

รหัสโครงการ SUT7-709-59-12-14



รายงานการวิจัย

หน้าต่างประหยัดพลังงานโดยใช้พื้นผิวเลือกความถี่
(Energy saving window using frequency selective surface)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ข

รหัสโครงการ SUT7-709-59-12-14



รายงานการวิจัย

หน้าต่างประหยัดพลังงานโดยใช้พื้นผิวเลือกความถี่
(Energy saving window using frequency selective surface)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2564

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถดำเนินการได้ และได้รับผลสำเร็จบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ทุกประการ โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2559 สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบคุณบิดามารดาและครอบครัว ซึ่งให้การสนับสนุนและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา

ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์



Abstract

At present, global warming is a widespread problem around the world. Most of the effects that are affected are from the heat that causes buildings such as tall buildings, houses, etc., and cars to have a higher internal temperature. When considering the heat source, it was found that approximately 60% is the result of the heat that is transferred from the outside through the solid wall and the translucent wall into the interior of the building. The remaining 40% is the heat load generated from the interior of the building itself, such as the heat from electric lamps, office equipment, and heat from those in the building. Building by the proportion of the glass area to the total area of the building wall is quite high. And the heat that is transferred through glass can be up to 3-5 times as compared to the heat that is transferred through a solid wall. To reduce the load of air conditioning of the building reflective glass is gaining popularity in building frames. For the reason that this type of glass can reflect the sun's rays as well. However, the disadvantage of this type of glass is looks opaque. Therefore, if we want to use natural light from outside the building which has a high volume and potential. To illuminate the interior of the building and reduce the consumption of electricity in the lighting system, reflectors are not helpful. In addition, the glass has a relatively high solar radiation absorption. Causing the glass surface temperature to be high as well affects the comfort level of the people living inside the building. Also, reflectors often reflect the frequency used for communication, such as wireless network frequency (2.4 GHz), mobile phone frequency (800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, and 2100 MHz), etc. Therefore, this research designed energy-saving glass using frequency-selective substrates which can prevent heat and can also bring natural light from outside the building to make use of. Also, the power of the waves in the communication system will be slightly reduced compared with the reflector by the mechanism of heat transfer and light transmission of the glass.

บทคัดย่อ

ปัจจุบันภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาแพร่หลายทั่วโลก โดยผลกระทบที่ได้รับส่วนใหญ่นั้นจะเป็นเรื่องของความร้อนที่ทำให้สิ่งก่อสร้างต่างๆ เช่น อาคารสูง บ้านเรือน ฯลฯ และรถยนต์ มีอุณหภูมิภายในที่สูงขึ้น เมื่อพิจารณาถึงแหล่งที่มาของความร้อนพบว่าประมาณร้อยละ 60 เป็นผลจากความร้อนที่ถ่ายเทจากภายนอกอาคารผ่านผนังทึบและผนังโปร่งแสงเข้าสู่ภายในตัวอาคาร ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 40 เป็นภาวะความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายในตัวอาคารเอง เช่น ความร้อนจากหลอดไฟฟ้า อุปกรณ์สำนักงาน และความร้อนจากผู้อยู่ในอาคาร โดยสัดส่วนของพื้นที่กระจกต่อพื้นที่รวมของผนังอาคารมีค่อนข้างสูง และความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกระจกอาจสูงถึง 3-5 เท่า เมื่อเทียบกับความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังทึบ เพื่อลดภาระการปรับอากาศของอาคาร กระจกสะท้อนแสงจึงได้รับความนิยมในการใช้ประกอบเป็นกรอบอาคาร ด้วยเหตุผลที่ว่า กระจกประเภทนี้สามารถสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้ดี อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยของกระจกประเภทนี้ก็คือ มีลักษณะที่ทึบแสง ดังนั้นหากเราต้องการนำแสงธรรมชาติจากภายนอกอาคารซึ่งมีปริมาณและศักยภาพสูงมาใช้ เพื่อส่องสว่างภายในอาคาร และลดการใช้ไฟฟ้าในระบบแสงสว่าง กระจกสะท้อนแสงจะไม่เอื้อประโยชน์ นอกจากนี้ กระจกดังกล่าวจะมีการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ค่อนข้างสูง ทำให้อุณหภูมิผิวกระจกสูงตามไปด้วย ส่งผลต่อระดับความสบายของผู้ที่อาศัยภายในอาคาร อีกทั้งกระจกสะท้อนแสงมักสะท้อนคลื่นความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารด้วย เช่น ความถี่เครือข่ายไร้สาย (2.4 GHz) ความถี่สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ (800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz และ 2100 MHz) เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงออกแบบกระจกประหยัดพลังงานโดยใช้พื้นผิวเลือกความถี่ ซึ่งสามารถป้องกันความร้อนและยังสามารถนำแสงธรรมชาติจากภายนอกอาคารเข้ามาใช้ประโยชน์อีกด้วย อีกทั้งกำลังของคลื่นในระบบสื่อสารจะถูกลดทอนเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับกระจกสะท้อนแสง โดยกลไกการถ่ายเทความร้อนและส่งผ่านแสงของกระจก

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง	5
2.3 กระจกอนุรักษพลังงาน	6
2.4 คลื่นความร้อนจากแสงอาทิตย์	7
2.5 การแบ่งประเภทของกระจก	9
2.6 เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย	11
2.7 โทรศัพท์เคลื่อนที่	11
2.8 คลื่นระนาบ (plane wave)	13
2.9 บริเวณการแผ่พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	23
2.10 พื้นผิวเลือกความถี่ผ่าน (Frequency Selective Surfaces: FSS)	24
บทที่ 3 การออกแบบกระจกประหยัดพลังงาน	28
3.1 บทนำ	28
3.2 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบกระจกประหยัดพลังงาน	28
3.3 วิธีการคำนวณค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ	28
3.4 การจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 ผลการจำลองแบบ	32
3.6 การออกแบบชิ้นงานเพื่อสร้างจริง	36
3.7 สรุป	38
บทที่ 4 ผลการวัดทดสอบ	39
4.1 กล่าวนำ	39
4.2 กระจกประหยัดพลังงานต้นแบบและอุปกรณ์ในการทดสอบ	39
4.3 การวัดทดสอบชิ้นงาน	44
4.4 สรุปผลทดสอบ	50
บทที่ 5 บทสรุป	66
5.1 สรุปผลการวิจัย	66
5.2 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไข	66
5.3 ข้อเสนอแนะ	68
5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป	68
บรรณานุกรม	69
ประวัติผู้เขียน	72

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 กลไกการถ่ายเทความร้อนและส่งผ่านแสงของกระจกเลือกความถี่ผ่าน	2
รูปที่ 2.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านกระจก	7
รูปที่ 2.2 คลื่นความร้อนจากแสงอาทิตย์แสงอาทิตย์ที่ตกกระทบมายังพื้นโลก	8
รูปที่ 2.3 แสดงการแบ่งประเภทของกระจกที่ใช้ในปัจจุบันโดยจำแนกตามกระบวนการผลิต และคุณสมบัติ	9
รูปที่ 2.4 ภาพขยายทิศทางการถ่ายเทรังสีความร้อน	11
รูปที่ 2.5 คลื่นที่เดินทางในทิศทาง +z ตามสมการ (2.6)	14
รูปที่ 2.6 คลื่นระนาบตกกระทบตัวนำสมบูรณแบบตั้งฉาก	19
รูปที่ 2.7 คลื่นนิ่ง $\bar{E}_1 = \bar{a}_x E_1$ และ $\bar{H}_1 = \bar{a}_y H_1$	20
รูปที่ 2.8 คลื่นระนาบตกกระทบไดอิเล็กตริกแบบตั้งฉาก	21
รูปที่ 2.9 ชนิดของการตอบสนองความถี่แบบต่างๆและผลของการตอบสนอง แต่ละชนิดโดยพื้นสีเทาหมายถึงพื้นผิวของโลหะ	24
รูปที่ 2.10 ลักษณะและรูปร่างของ elements	25
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการใช้งานโดยใช้หลักการของ FSS	26
รูปที่ 2.12 ประเภทของ FSS	27
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการวิเคราะห์และออกแบบ FSS	27
รูปที่ 3.1 แสดงการตั้งค่า Boundary Condition	30
รูปที่ 3.2 การตั้งค่า port 1	31
รูปที่ 3.3 การตั้งค่า port 2	31
รูปที่ 3.4 วิธีการจำลองผลแบบ T-Solver	32
รูปที่ 3.5 พารามิเตอร์ของชิ้นงานต้นแบบ	32
รูปที่ 3.6 ชิ้นงานที่ออกแบบโดยค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ	33
รูปที่ 3.7 ค่า จากการวัดจำลองผลชิ้นงาน	33
รูปที่ 3.8 ผลการจำลองแบบโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ช่วงแรก	34
รูปที่ 3.9 ผลการจำลองแบบโดยมีการปรับค่าพารามิเตอร์ช่วงที่สอง	34
รูปที่ 3.10 ผลการจำลองแบบโดยปรับค่าพารามิเตอร์ช่วงสุดท้าย	35
รูปที่ 3.11 ผลการจำลองแบบปรับค่าพารามิเตอร์ช่วงสุดท้าย	35
รูปที่ 3.12 การจำลองชิ้นงานแบบ 3×3 อิลิเมนต์	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.13 การจำลองผลของชิ้นงานแบบ 3 × 3 อิลิเมนต์	36
รูปที่ 3.14 การจำลองชิ้นงานแบบ 5 × 5 อิลิเมนต์	37
รูปที่ 3.15 การจำลองผลของชิ้นงานแบบ 5 × 5 อิลิเมนต์	37
รูปที่ 3.16 การจำลองผลของชิ้นงานแบบ 1 3 × 3 และ 5 × 5 อิลิเมนต์	38
รูปที่ 4.1 การจำลองชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงาน	39
รูปที่ 4.2 กระจกประหยัดพลังงานต้นแบบโดยใช้กระจกใส	40
รูปที่ 4.3 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	42
รูปที่ 4.4 การติดตั้งการวัดอุณหภูมิแสงโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ รุ่น FT 90	44
รูปที่ 4.5 การจัดเตรียมอุปกรณ์และทำการวัดอากาศว่าง	44
รูปที่ 4.6 การวัดอุณหภูมิผ่านกระจกใส กระจกติดฟิล์ม และชิ้นงาน	45
รูปที่ 4.7 การจัดวางอุปกรณ์ในการวัดผลย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz	46
รูปที่ 4.8 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านอากาศว่างย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz	47
รูปที่ 4.9 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านอากาศว่างย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz	47
รูปที่ 4.10 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกใยย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz	48
รูปที่ 4.11 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกใยย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz	48
รูปที่ 4.12 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกประหยัดพลังงานย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz	49
รูปที่ 4.13 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกประหยัดพลังงานย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz	49
รูปที่ 4.14 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกติดฟิล์มย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz	50
รูปที่ 4.15 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกติดฟิล์มย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz	50
รูปที่ 4.16 การจัดวางอุปกรณ์ในการวัดผลความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz	51
รูปที่ 4.17 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านอากาศว่างย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz	51
รูปที่ 4.18 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านอากาศว่างย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz	52
รูปที่ 4.19 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกใยย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz	52
รูปที่ 4.20 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกใยย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz	53
รูปที่ 4.21 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกประหยัดพลังงานย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz	53

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.22 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกประหัยด์พลังงานย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz	54
รูปที่ 4.23 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกติดฟิล์มย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz	54
รูปที่ 4.24 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกติดฟิล์มย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz	55
รูปที่ 4.25 การจัดวางอุปกรณ์ในการวัดผลย่านความถี่ 2.4 GHz	55
รูปที่ 4.26 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านอากาศว่างย่านความถี่ 2.4 GHz	56
รูปที่ 4.27 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านอากาศว่างย่านความถี่ 2.4 GHz	56
รูปที่ 4.28 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกใสย่านความถี่ 2.4 GHz	57
รูปที่ 4.29 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกใสย่านความถี่ 2.4 GHz	57
รูปที่ 4.30 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกประหัยด์พลังงานย่านความถี่ 2.4 GHz	58
รูปที่ 4.31 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกประหัยด์พลังงานย่านความถี่ 2.4 GHz	58
รูปที่ 4.32 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกติดฟิล์มย่านความถี่ 2.4 GHz	59
รูปที่ 4.33 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกติดฟิล์มย่านความถี่ 2.4 GHz	59
รูปที่ 4.34 การจัดวางอุปกรณ์ในการวัดผล ย่านความถี่ 10 GHz	60
รูปที่ 4.35 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านอากาศว่างย่านความถี่ 10 GHz	60
รูปที่ 4.36 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านอากาศว่างย่านความถี่ 10 GHz	61
รูปที่ 4.37 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านอากาศว่างย่านความถี่ 10 GHz	61
รูปที่ 4.38 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกใสย่านความถี่ 10 GHz	62
รูปที่ 4.39 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกประหัยด์พลังงานย่านความถี่ 10 GHz	62
รูปที่ 4.40 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกประหัยด์พลังงานย่านความถี่ 10 GHz	63
รูปที่ 4.41 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกติดฟิล์มย่านความถี่ 10 GHz	63
รูปที่ 4.42 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกติดฟิล์มย่านความถี่ 10 GHz	64

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของแสงอาทิตย์กับแสงสปอร์ตไลท์	8
ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของกระจกชนิดต่างๆ	10
ตารางที่ 2.3 ความถี่ของค่ายโทรศัพท์มือถือในประเทศไทย	12
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของกระเบื้องความถี่ผ่านต้นแบบ	39
ตารางที่ 4.2 สายอากาศที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงาน	40
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบวัดอุณหภูมิจากรังสีอินฟราเรด	45
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวัดทดสอบการส่งผ่านคลื่นในย่านต่างๆ	64
ตารางที่ 5.1 ปัญหาและสาเหตุที่พบในขณะดำเนินงานและวิธีการแก้ไข	67

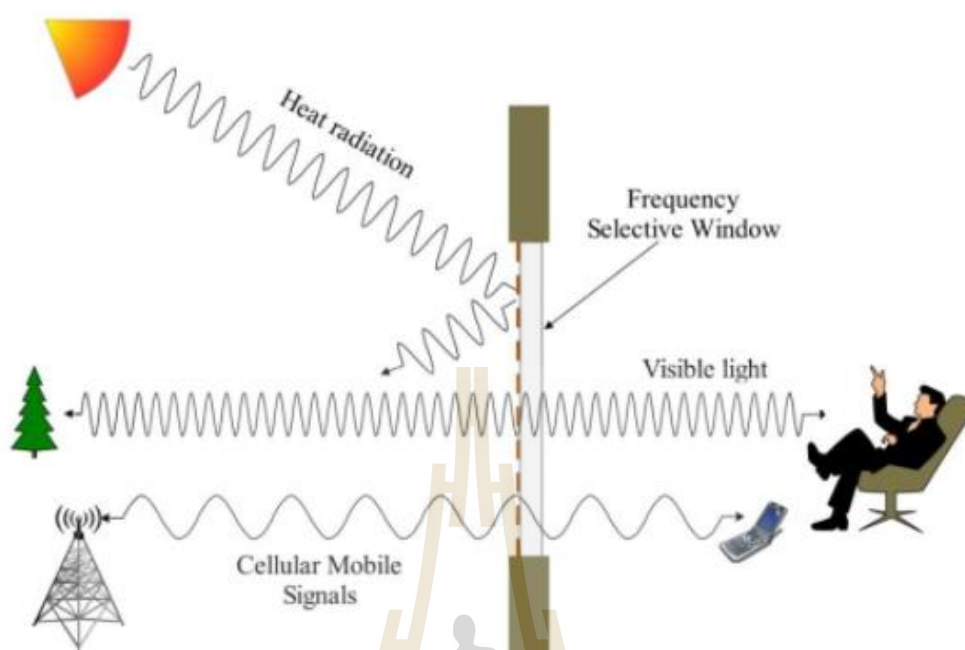
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ปัจจุบันภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาแพร่หลายทั่วโลก โดยผลกระทบที่ได้รับส่วนใหญ่นั้นจะเป็นเรื่องของความร้อนที่ทำให้สิ่งก่อสร้างต่างๆ เช่น อาคารสูง บ้านเรือน ฯลฯ และรถยนต์ มีอุณหภูมิภายในที่สูงขึ้นปกติแล้ว อาคารไม่ว่าจะขนาดใหญ่หรือเล็กก็มักต้องมีการปรับอากาศ อากาศที่มีระดับอุณหภูมิและความชื้นเหมาะสมย่อมส่งผลให้ผู้ใช้อาคารหรือพนักงานเกิดความรู้สึกสบาย และสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การปรับอากาศโดยระบบปรับอากาศจำเป็นต้องใช้พลังงานสูง ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว คิดเป็นร้อยละ 60 ของการใช้พลังงานรวมของทั้งอาคาร ดังนั้น หากต้องการที่จะลดการใช้ไฟฟ้าของระบบปรับอากาศลงแล้ว สิ่งที่เราต้องดำเนินการก็คือ การลดภาระการปรับอากาศให้ต่ำลงนั่นเอง เมื่อพิจารณาถึงแหล่งที่มาของความร้อนของระบบปรับอากาศ จะพบว่าประมาณร้อยละ 60 เป็นผลจากความร้อนที่ถ่ายเทจากภายนอกอาคารผ่านผนังทึบและผนังโปร่งแสงเข้าสู่ภายในตัวอาคาร ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 40 เป็นภาระความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายในตัวอาคารเอง เช่น ความร้อนจากหลอดไฟฟ้า อุปกรณ์สำนักงาน และความร้อนจากผู้อยู่ในอาคาร

ในสถานการณ์ปัจจุบัน อาจกล่าวได้ว่ากระจกได้กลายเป็นองค์ประกอบสำคัญหลักของกรอบอาคารไปแล้ว สัดส่วนของพื้นที่กระจกต่อพื้นที่รวมของผนังอาคารมีค่อนข้างสูง และความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกระจกอาจสูงถึง 3-5 เท่า เมื่อเทียบกับความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังทึบ เพื่อลดภาระการปรับอากาศของอาคาร กระจกสะท้อนแสงจึงได้รับความนิยมในการใช้ประกอบเป็นกรอบอาคาร ด้วยเหตุผลที่ว่า กระจกประเภทนี้สามารถสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้ดี อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยของกระจกประเภทนี้ก็คือ มีลักษณะที่ทึบแสง ดังนั้นหากเราต้องการนำแสงธรรมชาติจากภายนอกอาคารซึ่งมีปริมาณและศักยภาพสูงมาใช้ เพื่อส่องสว่างภายในอาคาร และลดการใช้ไฟฟ้าในระบบแสงสว่าง กระจกสะท้อนแสงจะไม่เอื้อประโยชน์ นอกจากนี้ กระจกดังกล่าวจะมีการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ค่อนข้างสูง ทำให้อุณหภูมิผิวกระจกสูงตามไปด้วย ส่งผลต่อระดับความสบายของผู้ที่อาศัยภายในอาคาร อีกทั้งกระจกสะท้อนแสงมักสะท้อนคลื่นความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารด้วย เช่น ความถี่เครือข่ายไร้สาย (2.4 GHz) ความถี่สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ (800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz และ 2100 MHz) เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงออกแบบกระจกประหยัดพลังงานโดยใช้พื้นผิวเลือกความถี่ ซึ่งสามารถป้องกันความร้อนและยังสามารถนำแสงธรรมชาติจากภายนอกอาคารเข้ามาใช้ประโยชน์อีกด้วย อีกทั้งกำลังของคลื่นในระบบสื่อสารจะถูกลดทอนเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับกระจกสะท้อนแสง โดยกลไกการถ่ายเทความร้อนและส่งผ่านแสงของกระจก แสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 กลไกการถ่ายเทความร้อนและส่งผ่านแสงของกระจกเลือกความถี่ผ่าน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของวัสดุต่างๆ เช่น กระจก แผ่นโลหะ เป็นต้น
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาหน้าต่างประหยัดพลังงาน ซึ่งสามารถลดทอนคลื่นความร้อนจากแสงอาทิตย์ ยอมให้แสงสว่างผ่านได้ และไม่ปิดกั้นความถี่ในระบบสื่อสาร เช่น ความถี่เครือข่ายไร้สาย (2.4 GHz) ความถี่สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ (800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz และ 2100 MHz) เป็นต้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษา พัฒนา และออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่สำหรับกระจกประหยัดพลังงาน
- 1.3.2 จำลองแบบโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio
- 1.3.3 สร้างอุปกรณ์ต้นแบบ และวัดทดสอบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

1.4.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

1. สำรวจบริษัทผู้ร่วมทุน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. วิเคราะห์ และออกแบบกระจกประหยัดพลังงาน
3. จำลองกระจกประหยัดพลังงาน ด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2009
4. สร้างชิ้นงานต้นแบบ

5. วัดและทดสอบชิ้นงาน เช่น วัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น การแผ่ความร้อนผ่านชิ้นงาน

1.4.2 สถานที่ทำการวิจัย ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สายอาคารเครื่องมือ 11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

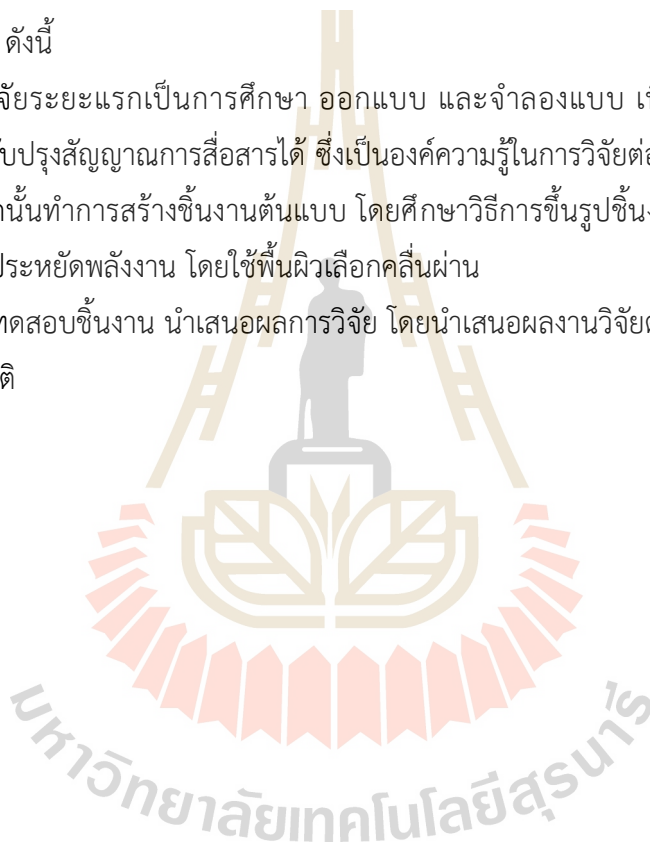
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้ออกแบบกระจกประหยัดพลังงานโดยใช้พื้นผิวเลือกความถี่ โดยอาจจำแนกผลของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ ดังนี้

1.5.1 การวิจัยระยะแรกเป็นการศึกษา ออกแบบ และจำลองแบบ เพื่อให้ได้กระจกประหยัดพลังงานที่สามารถปรับปรุงสัญญาณการสื่อสารได้ ซึ่งเป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

1.5.2 จากนั้นทำการสร้างชิ้นงานต้นแบบ โดยศึกษาวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานตามการออกแบบ ทำให้ได้ต้นแบบกระจกประหยัดพลังงาน โดยใช้พื้นผิวเลือกคลื่นผ่าน

1.5.3 วัดทดสอบชิ้นงาน นำเสนอผลการวิจัย โดยนำเสนอผลงานวิจัยต่อที่ประชุมระดับประเทศ และในระดับนานาชาติ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบบนผิวด้านนอกของกระจก รังสีอาทิตย์ส่วนหนึ่ง (รวมถึงช่วงรังสีที่เป็นแสงซึ่งตาคนเรามองเห็นได้) จะผ่านเข้าไปในอาคารได้โดยตรง บางส่วนถูกสะท้อนกลับ ขณะที่ส่วนที่เหลือจะถูกดูดกลืนไว้ในตัวกระจกเองซึ่งทำให้กระจกมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความร้อนที่สะสมนี้ส่วนหนึ่งจะถ่ายเทกลับสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก โดยส่วนที่เหลือจะถูกถ่ายเทเข้าสู่ภายในตัวอาคาร และกลายเป็นภาวะความร้อนของระบบปรับอากาศ ผลของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกและภายในอาคารก็เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ความร้อนถ่ายเทผ่านกระจกเข้าสู่อาคาร ดังนั้นความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกระจกจึงมีทั้งส่วนที่เกิดจากการนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสี (Radiation) ทั้งนี้รูปแบบของการถ่ายเทความร้อนจะแตกต่างกันไปตามคุณสมบัติเฉพาะของกระจกแต่ละประเภท จาก [1] จะเห็นได้ว่า กระจกใสยอมให้แสงผ่านเข้ามาได้มาก เมื่อเทียบกับกระจกอื่นๆ อย่างไรก็ตาม ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกระจกใสก็มีค่าสูงด้วย สำหรับกระจกเขียวเป็นกระจกที่มีคุณลักษณะที่ดีเมื่อเทียบกับกระจกใสคือยอมให้ความร้อนผ่านเข้ามาได้น้อยกว่ากระจกใส นอกจากนั้นกระจกเขียวและกระจกใสเป็นกระจกที่เอื้อต่อการใช้แสงธรรมชาติ อย่างไรก็ตามการนำไปประยุกต์ใช้กับอาคารอาจจำเป็นต้องใช้กระจกทั้งสองชนิดนี้ร่วมกับอุปกรณ์บังแดด เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนผ่านชั้นกระจกเข้ามามากเกินไป สำหรับกระจกสะท้อนแสงซึ่งนิยมใช้ในอาคารสูงส่วนใหญ่ ความร้อนที่ผ่านเข้ามาในอาคารของกระจกประเภทนี้จะต่ำ แต่จะสังเกตได้ว่า กระจกมีลักษณะของความทึบแสง และโอกาสในการนำแสงธรรมชาติมาใช้ เพื่อการส่องสว่างในอาคารเป็นไปได้น้อยหรือแทบเป็นไปไม่ได้ ส่วนกระจก Low-e (ย่อมาจากคำว่า Low emissivity) เป็นกระจกที่มีมีการเคลือบสารบนผิวกระจกซึ่งจะยอมให้เฉพาะรังสีอาทิตย์ ในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นหรือแสงสามารถผ่านเข้ามาได้มาก ขณะที่รังสีอาทิตย์ ในช่วงที่เป็นความร้อนเข้ามาได้น้อย ด้วยคุณลักษณะดังกล่าวจึงทำให้กระจก Low-e เริ่มได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในการใช้ประกอบเป็นกรอบอาคาร อย่างไรก็ตาม กระจก Low-e ยังมีราคาค่อนข้างแพง แม้ว่าด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่จะทำให้กระจกมีราคาที่ถูกลงแล้วก็ตาม

งานวิจัยนี้จึงเสนอการออกแบบหน้าต่างประหยัดพลังงาน เพื่อกรองความถี่ เช่น ความถี่เครือข่ายไร้สาย (2.4 GHz) ความถี่สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ (800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz และ 2100 MHz) เป็นต้น และลดความร้อนจากแสงอาทิตย์ ซึ่งงานวิจัยนี้จะได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคลื่นระนาบ หลักการเบื้องต้นของคลื่นผ่านตัวกลาง และการออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่ หรือ FSS (Frequency selective surface)

กระจกประหยัดพลังงานถูกออกแบบเพื่อกรองความถี่ เช่น เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ความถี่โทรศัพท์มือถือ และลดความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่เข้ามาภายในอาคาร ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา

เกี่ยวกับระนาบคลื่น (plane wave) หลักการเบื้องต้นของการเคลื่อนที่ของคลื่นผ่านตัวกลาง และการออกแบบพื้นผิวเลือกความถี่ หรือ FSS (Frequency Selective Structure) โดยในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในแต่ละส่วนได้แก่ กระจกอนุรักษพลังงาน คลื่นความร้อนจาก แสงอาทิตย์ การแบ่งประเภทของกระจก เครื่องช่วยท้องถิ่นไร้สาย โทรศัพท์เคลื่อนที่ คลื่นระนาบ การตกกระทบตัวกลางคลื่นแบบตั้งฉาก บริเวณการแผ่พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และพื้นผิวเลือกความถี่ผ่าน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องดำเนินการสำรวจและศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่เคยถูกนำมาใช้ ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อที่จะนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ โดยฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนั้นเป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียงและได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่น ฐานข้อมูล IEEE นอกจากนี้ยังได้ทำการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่าง ๆ ทั้งใน และต่างประเทศ ผลการสืบค้นที่ได้จะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป

2.2 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

การเปลี่ยนแปลงของอากาศอันเนื่องมาจากภาวะโลกร้อนก่อให้เกิดเป็นปัญหาแพร่หลายทั่วโลก โดยผลกระทบที่ได้รับส่วนใหญ่นั้นจะเป็นเรื่องของความร้อนที่ทำให้สิ่งก่อสร้างต่างๆ เช่น อาคารสูง บ้านเรือน ฯลฯ และรถยนต์ มีอุณหภูมิภายในที่สูงขึ้น ปกติแล้ว อาคารไม่ว่าจะขนาดใหญ่หรือเล็กก็มักต้องมีการปรับอากาศ อากาศที่มีระดับอุณหภูมิและความชื้นเหมาะสมย่อมส่งผลให้ผู้ใช้อาคารหรือพนักงานเกิดความรู้สึกสบาย และสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การปรับอากาศโดยระบบปรับอากาศจำเป็นต้องใช้พลังงานสูง ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว คิดเป็นร้อยละ 60 ของการใช้พลังงานรวมของทั้งอาคาร [1] ดังนั้น หากต้องการที่จะลดการใช้ไฟฟ้าของระบบปรับอากาศลงแล้ว สิ่งที่เราต้องดำเนินการก็คือ การลดภาระการปรับอากาศให้ต่ำลงนั่นเอง เมื่อพิจารณาถึงแหล่งที่มาของความร้อนของระบบปรับอากาศ จะพบว่าประมาณร้อยละ 60 เป็นผลจากความร้อนที่ถ่ายเทจากภายนอกอาคารผ่านผนังทึบและผนังโปร่งแสง เข้าสู่ภายในตัวอาคาร ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 40 เป็นภาระความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายในตัวอาคารเอง เช่น ความร้อนจากหลอดไฟฟ้า อุปกรณ์สำนักงาน และความร้อนจากผู้อยู่ในอาคาร [2] ดังนั้น เพื่อลดการใช้พลังงาน จึงมีการออกแบบให้อาคารใช้พลังงานต่ำ (Nearly Zero-Energy Level : NZEL) [3] สำหรับงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบกระจกประหยัดพลังงานสำหรับอาคารสมัยใหม่ ถึงแม้ว่าโลหะจะมีคุณสมบัติที่ดีในการสะท้อนคลื่น แต่การนำโลหะมาใช้ออกแบบอาคารสมัยใหม่ควรคำนึงถึงการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพด้วย ดังนั้นการออกแบบอาคารจึงนิยมใช้โลหะที่มีแผ่นฉนวนและใช้หน้าต่างประหยัดพลังงาน (energy saving windows) โดยหน้าต่างประหยัดพลังงานจะมีชั้นบางๆ ของโลหะเคลือบด้านบน เพื่อลดการแผ่ความร้อน และในขณะเดียวกันโลหะมีคุณสมบัติกีดขวางสัญญาณความถี่วิทยุ (Radio Frequency :RF) ในระบบสื่อสาร ทำให้คลื่นไม่สามารถแพร่ผ่านโลหะได้ เมื่อพิจารณาวัสดุสำหรับก่อสร้างอาคาร ผนัง หน้าต่าง เช่น ไม้ หิน และคอนกรีต วัสดุเหล่านี้ยอมให้สัญญาณวิทยุ และคลื่นความร้อนผ่านได้ โดยคลื่นถูกลดทอนเพียงเล็กน้อย ทำให้อุณหภูมิภายในอาคารสูงขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม ถ้าหน้าต่างถูก

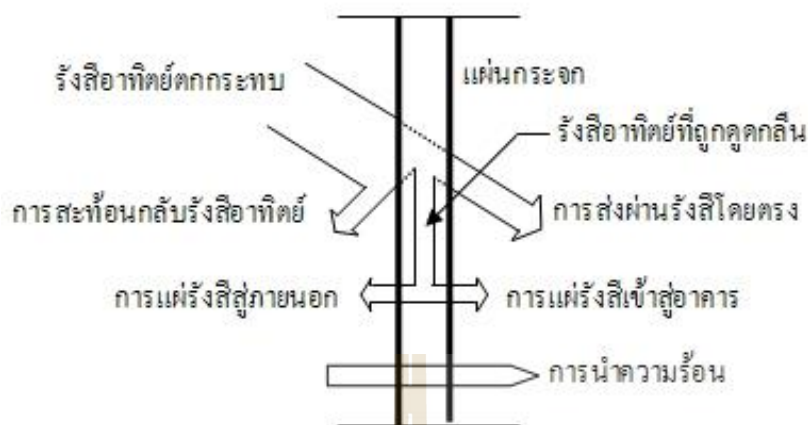
แทนที่ด้วยกระจกสะท้อนแสง (หน้าต่างประหยัดพลังงาน) สัญญาณวิทยุจะถูกลดทอนสูงขึ้น [4-5] สำหรับอีกวิธีการหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพสัญญาณสื่อสารคือ การใช้พื้นผิวเลือกความถี่ (Frequency Selective Surface หรือ FSS) ในหน้าต่างประหยัดพลังงาน [6-10] โดย FSS เป็นการเรียงแถวลำดับของอิเลเมนต์แพทช์ตัวนำหรือช่องเปิดที่มีพฤติกรรมเลือกความถี่ได้ [11-15] ซึ่งคล้ายกับการกรองความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โครงสร้างของอิเลเมนต์อาจถูกออกแบบให้กรองความถี่สูงหรือต่ำก็ได้ หรือ FSS อาจถูกออกแบบให้ส่งผ่านหรือสะท้อนคลื่นที่ความถี่เรโซแนนซ์ได้ โดย FSS สามารถนำมาออกแบบเป็นตัวครอบสายอากาศ (radomes) เพื่อลด RCS (radar cross section) ของความถี่ที่ไม่ต้องการได้ [16]

2.3 กระจกอนุรักษ์พลังงาน

เนื่องจากอาคารในปัจจุบันนี้ไม่ว่าจะมีขนาดใหญ่หรือขนาดเล็กจำเป็นต้องมีเครื่องปรับอากาศ โดยเครื่องปรับอากาศจะต้องใช้พลังงานสูง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วคิดเป็น 60% ของการใช้พลังงานรวมของทั้งอาคาร ดังนั้นหากต้องการที่จะลดการใช้ไฟฟ้าของระบบปรับอากาศ สิ่งที่ต้องดำเนินการคือ การลดภาระการปรับอากาศให้ต่ำลง เมื่อพิจารณาถึงแหล่งที่มาของความร้อนของระบบปรับอากาศจะพบว่า 60% เป็นผลจากความร้อนที่ถ่ายเทจากภายนอกอาคารผ่านผนังที่บดและผนังโปร่งแสงเข้าสู่ภายในตัวอาคาร ส่วนอีก 40% เป็นความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายในอาคารเอง เช่น ความร้อนจากหลอดไฟฟ้า อุปกรณ์สำนักงาน และความร้อนจากผู้อยู่ในอาคาร

ในปัจจุบันกระจกได้กลายเป็นองค์ประกอบสำคัญของอาคาร เพื่อลดภาระเครื่องปรับอากาศในอาคาร กระจกที่ออกแบบมาเพื่อสะท้อนแสงหรือกรองแสงจึงได้รับความนิยมในการใช้ประกอบภายในอาคาร ด้วยเหตุที่ว่า กระจกประเภทนี้สามารถสะท้อนรังสีจากดวงอาทิตย์ได้ อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยของกระจกประเภทนี้ก็คือ อาจมีลักษณะที่ทึบแสงซึ่งไม่เอื้อประโยชน์ หากเราต้องการนำแสงธรรมชาติจากภายนอกอาคารซึ่งมีปริมาณและศักยภาพสูงมาใช้เพื่อส่องสว่างในอาคาร และลดการใช้ไฟฟ้าในระบบแสงสว่างและระบบปรับอากาศ นอกจากนี้กระจกดังกล่าวโดยทั่วไปจะมีการดูดกลืนรังสีจากดวงอาทิตย์ค่อนข้างสูง ทำให้อุณหภูมิผิวกระจกสูงตามไปด้วย ส่งผลต่ออุณหภูมิภายในอาคารลดลง

กลไกการถ่ายเทความร้อนและส่งผ่านแสงของกระจก รังสีจากดวงอาทิตย์ส่วนหนึ่งจะผ่านเข้ามาภายในอาคารโดยตรง บางส่วนถูกสะท้อนกลับ ขณะที่ส่วนที่เหลือจะดูดกลืนไว้ในตัวกระจกนั่นเอง ซึ่งทำให้กระจกมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความร้อนที่สะสมในส่วนหนึ่งจะถ่ายเทกลับสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก โดยส่วนที่เหลือจะถ่ายเทเข้าสู่ตัวอาคาร และกลายเป็นภาระความร้อนของระบบปรับอากาศ ผลของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายนอกและภายในอาคารก็เป็นส่วนหนึ่งทำให้ความร้อนถ่ายเทผ่านกระจกเข้าสู่ตัวอาคาร ดังนั้นความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกระจกจึงมีทั้งส่วนที่เกิดจากการนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสี (Radiation) ทั้งนี้รูปแบบของการถ่ายเทความร้อนจะแตกต่างกันไปตามคุณสมบัติเฉพาะของกระจกแต่ละประเภท ลักษณะการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นกระจกแสดงดังรูปที่ 2.1



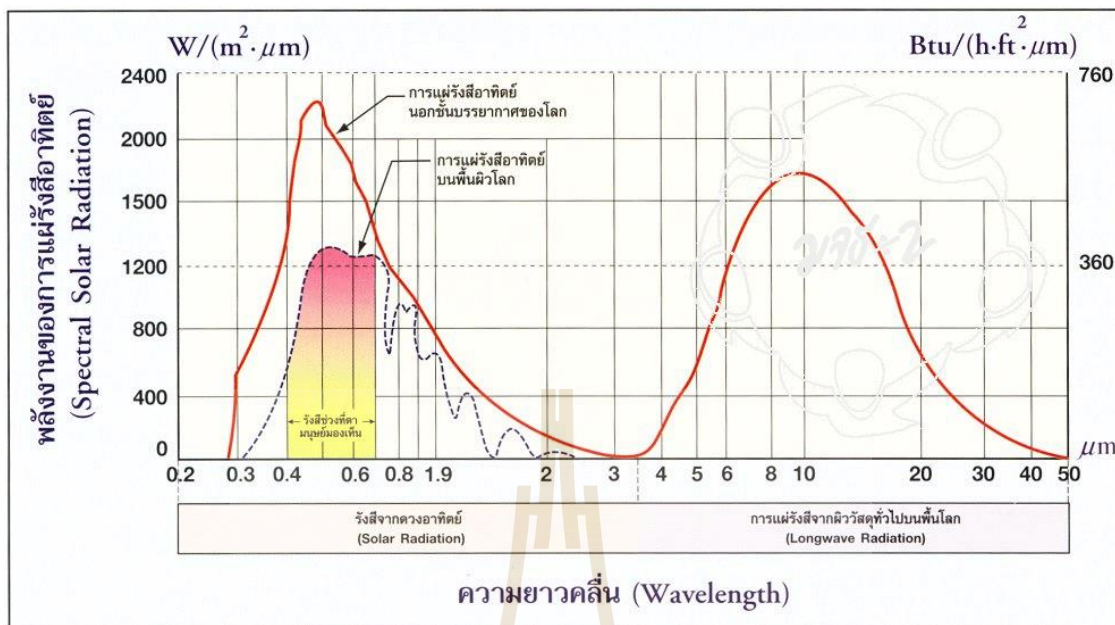
รูปที่ 2.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านกระจก

การประหยัดพลังงานของกระจกยกตัวอย่าง เช่น เมื่อเครื่องปรับอากาศตั้งอุณหภูมิที่ระดับร่างกายที่รู้สึกสบาย ที่ 26 องศาเซลเซียส และทุกอุณหภูมิที่ลดลง 1 องศาเซลเซียส จาก 26 องศาเซลเซียส เป็น 25 องศาเซลเซียส จะทำให้เสียค่าไฟเพิ่มเป็น 10% ดังนั้นเมื่อได้ศึกษากลไกและออกแบบกระจกเพื่อกรองแสงและประหยัดพลังงานแล้ว สามารถนำกระจกมาลดอุณหภูมิที่เข้ามาภายในตัวอาคารได้ ก็คือทำให้กระจกมีการสะท้อนคลื่นความร้อนจากดวงอาทิตย์ ส่งผลให้เครื่องปรับอากาศไม่ต้องปรับอุณหภูมิต่ำลงก่อนให้เกิดประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้

2.4 คลื่นความร้อนจากแสงอาทิตย์

คลื่นความร้อนจากแสงอาทิตย์แสงอาทิตย์ที่ตกกระทบมายังพื้นโลกนั้น ประกอบด้วยรังสีต่างๆ 3 ช่วงด้วยกันคือ

1. อุลตราไวโอเลต (UV) : ทำให้สีซีดจาง และทำให้เกิดมะเร็งผิวหนังได้
2. แสงสว่าง (Visible Light) : ช่วยให้เกิดการมองเห็นวัตถุ
3. อินฟราเรด (Infrared) : ทำให้เกิดความร้อน



รูปที่ 2.2 คลื่นความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบมายังพื้นโลก

ในวันที่ท้องฟ้าโปร่ง แสงอาทิตย์มีความเข้มของกำลังงานมากถึง 800-1000 วัตต์ต่อตารางเมตร ดังนั้นหากป้องกันความร้อนจากแสงแดดได้ จะช่วยให้ผู้อยู่ในอาคารได้รับความร้อนน้อยลง มีความสบายในการทำงานมากขึ้น และหากสถานที่ทำงานเป็นสถานที่ปรับอากาศแล้ว การป้องกันความร้อนจากแสงแดดจะช่วยลดการใช้ไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศได้

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของแสงอาทิตย์กับแสงสปอร์ตไลท์

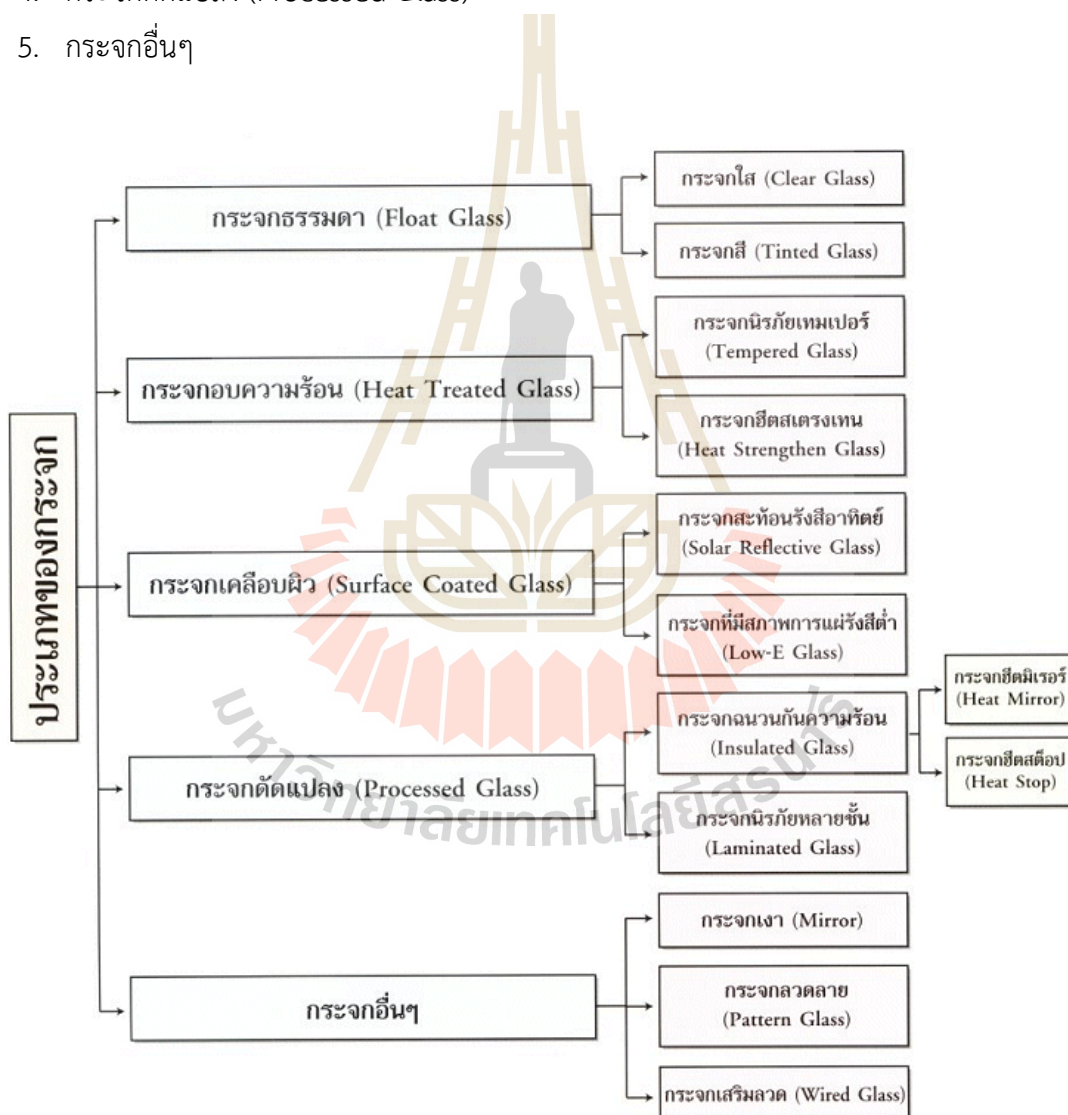
ชนิดของรังสี	แสงแดด	แสงสปอร์ตไลท์
รังสีอัลตราไวโอเล็ต (100 – 400 nm.)	3%	น้อยมาก
รังสีอินฟราเรด (700 – 2,400 nm.)	53%	80 – 90%
แสงสว่าง (380 – 780 nm.)	47%	10 – 20%

ดังนั้นในอาคารที่มีช่องเปิดรับแสงหรือกระจก จะต้องพิจารณาเรื่องการบังแดดให้ดี มิฉะนั้นจะต้องสิ้นเปลืองค่าไฟฟ้าในการปรับอากาศอย่างมากมาย สำหรับอาคารที่ไม่มีการบังแดดโดยชายคาหรือกันสาด จะต้องพิจารณาคูณสมบัติของกระจกด้วยว่า สามารถกันรังสีอาทิตย์ได้มากน้อยเพียงใด

2.5 การแบ่งประเภทของกระจก

เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการทำความเข้าใจ ในที่นี้จึงมีการจำแนกประเภทของกระจกตามกระบวนการผลิตด้วยกรรมวิธีต่างๆ เพื่อตอบสนองการใช้งานแตกต่างกันได้ ดังนี้

1. กระจกธรรมดา (Float Glass)
2. กระจกอบความร้อน (Heat Treated Glass)
3. กระจกเคลือบผิว หรือกระจกสะท้อนแสง (Surface Coated Glass)
4. กระจกดัดแปลง (Processed Glass)
5. กระจกอื่นๆ



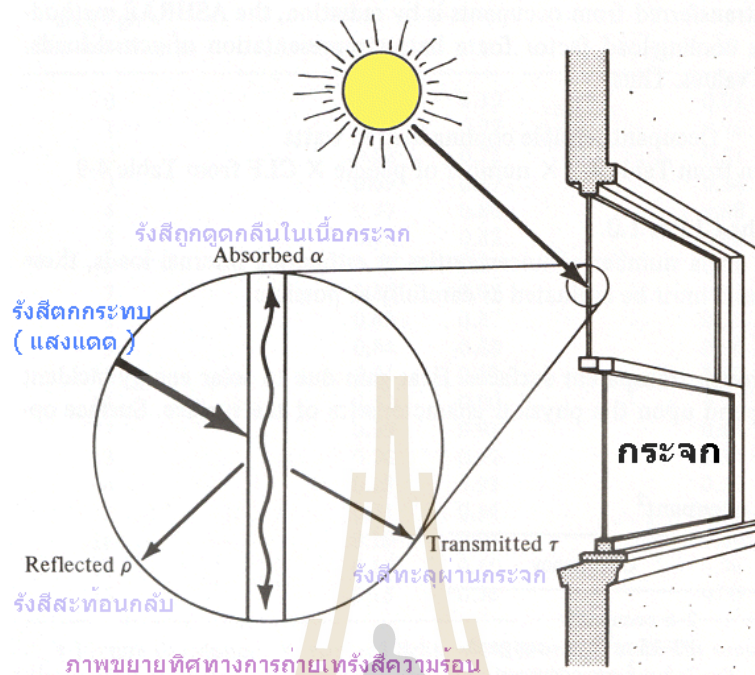
รูปที่ 2.3 แสดงการแบ่งประเภทของกระจกที่ใช้ในปัจจุบันโดยจำแนกตามกระบวนการผลิต และคุณสมบัติ

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของกระจกชนิดต่างๆ

	กระจกธรรมดา		กระจกอบความร้อน		กระจกเคลือบผิว		กระจกตัดแปลง		กระจกอื่นๆ		
	กระจกใส	กระจกสี	กระจกนิรภัยเทมเปอร์	กระจกฮีตสเตรงเทน	กระจกสะท้อนรังสีอาทิตย์	กระจกที่มีสภาพการแผ่รังสีต่ำ	กระจกฉนวนกันความร้อน	กระจกนิรภัยหลายชั้น	กระจกเงา	กระจกลดลาย	กระจกเสริมลวด
การมองเห็น	1 มองผ่านได้อย่างชัดเจน	✓									
	2 ลดความจ้าของแสงที่ผ่านกระจก		✓		✓	✓				✓	
	3 ให้ภาพสะท้อนที่ชัดเจนไม่บิดเบี้ยว	✓	✓						✓		
	4 มองผ่านเข้ามาจากด้านนอกได้ง่าย	✓									
ความแข็งแรง	1 มีความแข็งแรงมากเป็นพิเศษ			✓	✓			✓			✓
	2 ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ			✓	✓						
	3 ทนภาวะที่มีความร้อนสูงกว่าปกติ				✓						
	4 ทนต่อแรงอัดสูง			✓	✓			✓			
การประหยัดพลังงาน	1 ลดความร้อนที่เข้าสู่อาคาร		✓		✓	✓	✓	✓			
	2 ค่าการสะท้อนแสงสูง					✓	✓	✓			
	3 ค่าการคายรังสีความร้อนต่ำ						✓				
	4 ดูดกลืนพลังงานความร้อน		✓		✓						
	5 ผนวกระจกไม่ร้อน	✓									
อื่นๆ	1 แดกเป็นเม็ดเล็กๆ ไม่มีคม			✓							
	2 สีสีนสวยงาม		✓		✓						
	3 แสงสว่างผ่านกระจกได้มาก	✓				✓	✓			✓	
	4 ป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดี						✓	✓			
	5 ใช้สำหรับการตกแต่ง	✓	✓			✓			✓	✓	

* กระจกฮีตมิเรอร์ ป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดีกว่า กระจกฮีตสตีป

โดยปกติรังสีความร้อนที่ตกกระทบกระจก รังสีความร้อนบางส่วนจะสะท้อนออก บางส่วนจะดูดกลืนโดยกระจก และส่วนที่เหลือ (เป็นส่วนใหญ่) จะทะลุผ่านเนื้อกระจกเข้าไปพื้นที่ชั้นใน ทำให้ในห้องปรับอากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงเป็นสาเหตุให้เครื่องปรับอากาศต้องทำงานหนักมากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 2.4 ภาพขยายทิศทางการถ่ายเทรังสีความร้อน

2.6 เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN, WLAN) คือระบบที่เชื่อมโยงคอมพิวเตอร์เข้าเข้าด้วยกัน เป็นเครือข่ายภายในพื้นที่แบบไร้สาย โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุในการเชื่อมต่อหรือสื่อสารกัน การเชื่อมต่อแบบไร้สายมีทั้งแบบเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยกัน และเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านอุปกรณ์กระจายสัญญาณ (Access Point) มาตรฐานความเร็วของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายมีมาตรฐานรองรับ เช่น IEEE 802.11a, IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ซึ่งแต่ละมาตรฐานจะบอกถึงความเร็วและคลื่นความถี่ที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารกัน เช่น สำหรับมาตรฐาน IEEE 802.11a มีความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps ที่ความถี่ย่าน 5 GHz สำหรับมาตรฐาน IEEE 802.11b มีความเร็วสูงสุดที่ 11 Mbps ที่ความถี่ย่าน 2.4 GHz สำหรับมาตรฐาน IEEE 802.11g มีความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps ที่ความถี่ย่าน 2.4 GHz ในประเทศไทยอนุญาตให้ใช้ช่องคลื่นความถี่ที่ 2.4 GHz เป็นคลื่นความถี่เสรี ที่ทุกคนสามารถติดตั้งและใช้งานได้ จึงทำให้ในประเทศไทยจะมีอุปกรณ์กระจายสัญญาณ (Access Point) ที่จำหน่ายเพียงสองมาตรฐานคือ IEEE 802.11b และ g เท่านั้น ดังนั้นความถี่ที่ 2.4 GHz จึงเป็นความถี่ที่เราต้องให้สามารถผ่านกระจกได้เมื่อใช้งานเครือข่ายไร้สายภายในอาคาร

2.7 โทรศัพท์เคลื่อนที่

โทรศัพท์เคลื่อนที่ (mobile phone) เป็นอุปกรณ์สื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ลักษณะเดียวกับโทรศัพท์บ้านแต่ไม่ต้องการสายโทรศัพท์ จึงทำให้สามารถพกพาไปในที่ต่างๆได้ โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้คลื่นวิทยุในการติดต่อกับเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยผ่านสถานีฐานโดยเครือข่ายของโทรศัพท์เคลื่อนที่

แต่ละผู้ให้บริการจะเชื่อมต่อกับเครือข่ายของโทรศัพท์บ้านและเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ของผู้ให้บริการอื่นๆ โทรศัพท์เคลื่อนที่ในปัจจุบันนอกจากจะมีคุณสมบัติในการสื่อสารทางเสียงแล้ว ยังมีความสามารถอื่นอีก เช่น สนับสนุนการสื่อสารด้วยข้อความ เช่น SMS การเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต การสื่อสารแบบมัลติมีเดีย เช่น MMS นาฬิกา นาฬิกาปลุก นาฬิกาจับเวลา ปฏิทิน ตารางนัดหมาย สเปรดชีต โปรแกรมประมวลผล รวมไปถึงความสามารถในการรองรับแอปพลิเคชันของจาวาได้ ความถี่ของข่ายโทรศัพท์มือถือในประเทศไทยแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงความถี่ ของข่ายโทรศัพท์มือถือในประเทศไทย

เครือข่าย	2 G	2.5G - 2.75G	ความถี่เดิม (MHz)
	มาตรฐานเทคโนโลยี	มาตรฐานเทคโนโลยี	
AIS	GSM	GPRS/EDGE	900/1800 MHz
DTAC	GSM	GPRS/EDGE	850/1800 MHz
True	GSM	GPRS/EDGE	1800 MHz
Hutch	CDMA	CDMA2000 1xRTT	800 MHz
CAT	CDMA/GSM	CDMA2000 1xRTT	800/850/1800 MHz
TOT	GSM	GPRS/EDGE	900/1900 MHz

เครือข่าย	3 G	3.5G - 3.75G	ความถี่ก่อนประมูล 3G : ความถี่ 3 G ที่ใช้ใน ปัจจุบัน
	มาตรฐานเทคโนโลยี	มาตรฐานเทคโนโลยี	
AIS	UMTS/ WCDMA	HSPA(hsdpa)/ HSPA+	900 MHz : 2100 MHz
DTAC	UMTS/ WCDMA	HSPA(hsdpa) / HSPA+	850 MHz : 2100 MHz
True	UMTS/ WCDMA	HSPA(hsdpa) / HSPA+	<u>850 MHz</u> : 2100 MHz
	CDMA2000 1xEV-DO		800 MHz : 2100 MHz
CAT	CDMA2000 1xEV-DO		800/850 MHz
TOT	UMTS/ WCDMA	HSPA(hsdpa) / HSPA+	1900/2100 MHz

เครือข่าย	3.9 G	4 G	ความถี่ (MHz)
	มาตรฐานเทคโนโลยี	มาตรฐานเทคโนโลยี	
1	LTE (E-UTRA)	LTE Advanced	2100 MHz
2	LTE (E-UTRA)	LTE Advanced	2100 MHz
3	LTE (E-UTRA)	LTE Advanced	2100 MHz
4	LTE (E-UTRA)	LTE Advanced	2100 MHz
5	LTE (E-UTRA)	LTE Advanced	2100 MHz

ดังนั้นความถี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ คือ 800 MHz 900 MHz 1800 MHz และ 2100 MHz จึงเป็นความถี่ที่กระทรวงต้องกรองให้ผ่านเมื่อการใช้งานสื่อสารภายในอาคาร

2.8 คลื่นระนาบ (plane wave)

2.8.1 คลื่นระนาบในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย

จากสมการของเฮล์มโฮลทซ์ในตัวกลางเอกพันธ์ดังนี้

$$\nabla^2 E + k_0^2 E = 0 \quad (2.1)$$

เมื่อ k_0 คือ เลขคลื่นในอากาศว่าง (free-space wavenumber) ที่มีค่าเท่ากับ

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = \frac{\omega}{c} \quad (2.2)$$

ในระบบพิกัดฉากสมการ (2.1) คือสมการของเฮล์มโฮลทซ์ที่มีองค์ประกอบของ E_x , E_y และ E_z เพื่อความง่ายในการพิจารณาในข้างต้น สมมติให้เหลือเพียงองค์ประกอบในแนวแกน x เท่านั้น ดังนั้นสมการ (2.1) เขียนได้ว่า

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_0^2 \right) E_x = 0 \quad (2.3)$$

ถ้าพิจารณา E_x ที่มีการเดินทางไปในแนวแกน z แล้ว

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} = 0 \quad \text{และ} \quad \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} = 0$$

ดังนั้นสมการ (2.3) จะลดรูปเหลือแค่เพียง

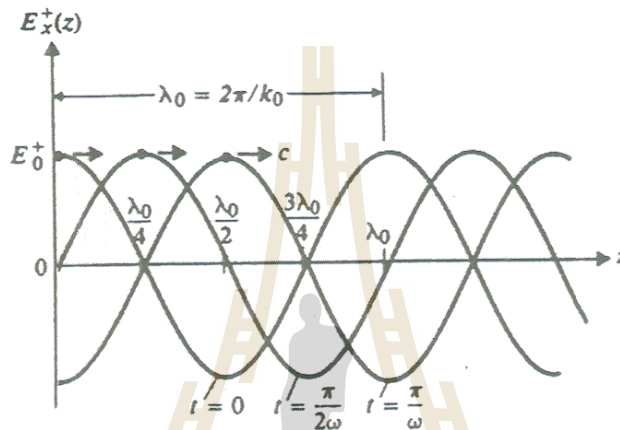
$$\frac{d^2 E_x}{dz^2} + k_0^2 E_x = 0 \quad (2.4)$$

ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์สามัญ (ordinary differential equation) เนื่องจาก E_x ขึ้นเป็นตัวแปร z เพียงอย่างเดียว และทำให้คำตอบของสมการคลื่นใน (2.4) มีค่าดังนี้

$$E_x(z) = E_x^+(z) + E_x^-(z) = E_0^+ e^{-jk_0 z} + E_0^- e^{jk_0 z} \quad (2.5)$$

เมื่อ E_0^+ และ E_0^- คือค่าคงที่ที่สามารถหาได้จากเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งจะอธิบายละเอียดในภายหลัง ในขั้นแรกเราจะพิจารณาเฉพาะเฟสเซอร์เทอมแรกของคำตอบในสมการ (2.5) ในรูปแบบของเวลาจริง (real time) โดยใช้ $\cos \omega t$ เป็นตัวอ้างอิง เมื่อกำหนดให้ E_0^+ เป็นค่าคงที่ที่มีค่าเป็นค่าจริง ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$E_x^+(z, t) = \text{Re}[E_x^+(z) e^{j\omega t}] = \text{Re}[E_0^+ e^{j(\omega t - k_0 z)}] = E_0^+ \cos(\omega t + k_0 z) \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.5 คลื่นที่เดินทางในทิศทาง $+z$ ตามสมการ (2.6)

สมการ (2.6) สามารถพล็อตได้ดังรูปที่ 2.5 เทียบกับเวลา t จากรูปจะเห็นว่าที่เวลา $t = 0$, $E_x^+(z, 0) = E_0^+ \cos k_0 z$ คือ โค้งของโคไซน์ที่มีขนาดเท่ากับ E_0^+ และเมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆ คลื่นก็เดินทางไปในทิศทาง $+z$ ซึ่งเราเรียกคลื่นในลักษณะนี้ว่า คลื่นจร (traveling wave) ถ้าเรากำหนดจุดสนใจไว้ที่ใดที่หนึ่งบนคลื่นลูกนี้และเคลื่อนที่ไปพร้อมๆ กับคลื่นเราจะสามารถหาความเร็วของคลื่นนี้ ดังนี้

$$\omega t - k_0 z = \text{constant phase}$$

$$\text{ดังนั้น } u_p = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k_0} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = c \quad (2.7)$$

สมการ (2.7) แสดงให้เห็นว่าความเร็วในการเดินทางของคลื่นที่ตำแหน่งเฟสใดๆ (phase velocity) ในอวกาศว่างมีค่าเท่ากับความเร็วแสงที่มีค่าประมาณ 3×10^8 (m/s)

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c} = \frac{\pi}{\lambda_0} \quad (\text{rad/m}) \quad (2.8)$$

$$\text{หรือ } \lambda_0 = \frac{2\pi}{k_0} \quad (\text{m}) \quad (2.9)$$

เมื่อกลับไปพิจารณาสมการ (2.5) ในเฟสเซอร์เทอมที่สองที่ว่า $E_0^- e^{jk_0 z}$ โดยไม่ต้องพล็อตกราฟก็พอจะทราบได้ว่าเทอมดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงคลื่นที่เดินทางไปในทิศทาง $-z$ ด้วยความเร็ว c ซึ่งถ้าสนใจแต่คลื่นที่เดินทาง

ไปในทิศทาง $+z$ เท่านั้น $E_0^- = 0$ อย่างไรก็ตามถ้าเกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นในตัวกลาง (หรือเกิดการสะดุด)

คลื่นจะเกิดการสะท้อนกลับ เมื่อนั้นคลื่นที่เดินทางสวนทาง (ในทิศทาง $-z$) จะต้องถูกพิจารณา ซึ่งจะอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

การหา \bar{H} ทำได้ ดังนี้

$$\nabla \times \bar{E} = \begin{vmatrix} \bar{a}_x & \bar{a}_y & \bar{a}_z \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x^+(z) & 0 & 0 \end{vmatrix} = -j\omega\mu_0 (\bar{a}_x H_x^+ + \bar{a}_y H_y^+ + \bar{a}_z H_z^+)$$

ซึ่งทำให้

$$H_x^+ = 0 \quad (2.10ก)$$

$$H_y^+ = \frac{1}{-j\omega\mu_0} \frac{\partial E_x^+(z)}{\partial z} \quad (2.10ข)$$

$$H_z^+ = 0 \quad (2.10ค)$$

ดังนั้น H_y^+ เป็นองค์ประกอบเดียวที่เหลืออยู่และเนื่องจาก

$$\frac{\partial E_x^+(z)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (E_0^+ e^{-jk_0 z}) = -jk_0 E_x^+(z)$$

และจาก (2.10) จะได้

$$H_x^+(z) = \frac{k_0}{\omega\mu_0} E_x^+(z) = \frac{1}{\eta_0} E_x^+(z) \text{ (A/m)} \quad (2.11)$$

$$\text{เมื่อ } \eta_0 \text{ นิยามจาก } \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cong 120\pi \cong 377 \text{ } (\Omega) \quad (2.12)$$

ซึ่งมีชื่อว่า อินทรินซิกอิมพีแดนซ์ (intrinsic impedance) ของอวกาศว่าง เนื่องจาก η_0 เป็นค่าจริง

ดังนั้น H_y^+ จะมีเฟสเท่ากับ (in phase) กับ E_x^+ ดังนั้นเราสามารถเขียน \bar{H} ในรูปแบบ ณ ขณะหนึ่ง

(instantaneous form) ได้ดังนี้

$$\bar{H}(z,t) = \bar{a}_y H_y^+(z,t) = \bar{a}_y \text{Re}[H_y^+(z)e^{j\omega t}] = \bar{a}_y \frac{E_0^+}{\eta_0} \cos(\omega t - k_0 z) \quad (2.13)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของ \bar{E} และ \bar{H} คือ อินทรินซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลาง และยังทราบอีกว่า \bar{H} ตั้งฉากกับ \bar{E} และทั้งคู่ก็ตั้งฉากกับทิศทางการเดินทางด้วยเช่นกัน

2.8.2 คลื่นระนาบในตัวกลางที่มีการสูญเสีย

ในตัวกลางที่มีการสูญเสีย เราสามารถเขียนสมการของเฮล์มโฮลตซ์ได้ดังนี้

$$\nabla^2 E = k_c^2 E = 0 \quad (2.14)$$

เมื่อ $k_c = \omega\sqrt{\mu\epsilon_c}$ เป็นค่าเชิงซ้อน (complex number) จะนิยามค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น (propagation constant, γ) ดังนี้

$$\gamma = jk_c = j\omega\sqrt{\mu\epsilon_c} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (2.15)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า γ เป็นค่าเชิงซ้อน จาก $\epsilon_c = \epsilon - j\frac{\sigma}{\omega}$ เมื่อแทนลงไปนสมการ (2.15) จะได้

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\epsilon}\left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon}\right)^{1/2} \quad (2.16)$$

หรือเขียนอีกอย่างหนึ่งได้ดังนี้

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\epsilon'}\left(1 - j\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^{1/2} \quad (2.17)$$

เมื่อ α และ β เป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพของ γ ถ้าในกรณีของตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย $\sigma = 0$ ($\epsilon'' = 0, \epsilon = \epsilon'$) ซึ่งทำให้ $\alpha = 0$ และ $\beta = k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$ ดังนั้นสมการของเฮล์มโฮลทซ์สมการ (2.14) จะเปลี่ยนเป็น

$$\nabla^2 E - \gamma^2 E = 0 \quad (2.18)$$

คำตอบของ (2.18) ก็คือ คลื่นระนาบที่เดินทางไปในทิศทาง $+z$ ซึ่งได้แก่

$$\bar{E} = \bar{a}_x E_x = \bar{a}_x E_0 e^{-\gamma z} \quad (2.19)$$

เมื่อสมมติให้คลื่นระนาบนี้มีขั้วเป็นแบบเชิงเส้นในทิศทาง x ซึ่งพารามิเตอร์ของการแพร่กระจายคลื่น (propagation factor $e^{-\gamma z}$) ประกอบด้วยสองพารามิเตอร์ดังนี้

$$\bar{E}_x = E_0 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \quad (2.20)$$

จะเห็นได้ว่าทั้งค่า α และ β เป็นค่าจริงที่มีค่าบวก ซึ่งพารามิเตอร์แรก ($e^{-\alpha z}$) จะมีค่าลดลงเมื่อ z เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเรียกชื่อว่า ค่าคงที่การลดทอน (attenuation constant : α) มีหน่วยเป็น (Np/m) ส่วนพารามิเตอร์ที่สองในสมการ (2.20) คือพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับเฟสของคลื่นที่เรียกว่า ค่าคงที่เฟส (phase constant) มีหน่วยเป็น (rad/m) ซึ่งแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของเฟสของคลื่นเมื่อเดินทางในระยะทาง 1 เมตร ต่อไปคือคุณสมบัติของตัวกลางชนิดต่างๆ มีดังนี้

1) ไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียต่ำ

ตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กตริกที่มีค่าการสูญเสียต่ำ (low-loss dielectric) มีคุณสมบัติเป็นฉนวน (insulator) ที่ดีแต่ไม่สมบูรณ์ 100% เนื่องจากค่าความนำไฟฟ้า (conductivity) ไม่ได้มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นในตัวกลางชนิดนี้จะมีค่า $\epsilon'' \ll \epsilon'$ หรือ $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \ll 1$ ในสภาวะดังกล่าวค่า γ จะถูกประมาณได้ด้วยการกระจายไบนอมิเยล (binomial expansion) ดังนี้

$$\gamma = \alpha + j\beta \cong j\omega\sqrt{\mu\epsilon'}\left[1 - j\frac{\epsilon''}{\epsilon'} + \frac{1}{8}\left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2\right] \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.21) ค่าคงที่การลดทอนมีค่าเท่ากับ

$$\alpha \cong \frac{\omega \varepsilon''}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'}} \quad (\text{Np/m}) \quad (2.22)$$

และมีค่าคงที่เฟสมีค่าเท่ากับ

$$\beta \cong \omega \sqrt{\mu \varepsilon'} \left[1 + \frac{1}{8} \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2 \right] \quad (\text{rad/m}) \quad (2.23)$$

จากสมการ (2.22) จะเห็นได้ว่าค่าคงที่การลดทอนของตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียต่ำมีค่าเป็นบวกและแปรผันตรงกับความถี่ ส่วนค่าคงที่เฟสในสมการ (2.23) มีค่าที่ต่างออกไปจาก $\omega \sqrt{\mu \varepsilon}$ เพียงเล็กน้อย ซึ่งค่า $\omega \sqrt{\mu \varepsilon}$ เป็นค่าในกรณีของตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กตริกสมบูรณ์ หรือที่เรียกว่า perfect (lossless) dielectric ค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียต่ำเป็นค่าเชิงซ้อนดังนี้

$$\eta_c \cong \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'}} \left(1 + j \frac{\varepsilon''}{2\varepsilon'} \right)^{-1/2} \quad (\Omega) \quad (2.24)$$

เนื่องจากอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์คืออัตราส่วนของ \bar{E}_x และ \bar{E}_y สำหรับคลื่นระนาบ ดังนั้นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในตัวกลางที่เกิดการสูญเสียนี้จึงไม่มีเฟสที่เหมือนกันดังเช่นในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย (lossless medium) ความเร็วเฟส (phase velocity : u_p) ได้จาก $\frac{\omega}{\beta}$ ดังนั้น

$$u_p = \frac{\omega}{\beta} \cong \frac{1}{\sqrt{\mu \varepsilon'} \left[1 - \frac{1}{8} \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2 \right]} \quad (2.25)$$

2) ตัวนำที่ดี

ตัวกลางที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำที่ดี (good conductor) คือตัวกลางที่มีค่า $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \gg 1$ ในสถานะเช่นนี้เราสามารถใส่สมการ (2.16) และสามารถตัด 1 ทิ้งไปเนื่องจากมีค่าน้อยมากเทียบกับ $\sigma / j\omega \varepsilon$ ดังนั้น

$$\gamma \cong j\omega \sqrt{\mu \varepsilon} \sqrt{\frac{\sigma}{j\omega \varepsilon}} = \sqrt{j} \sqrt{\omega \mu \sigma} = \frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega \mu \sigma}$$

หรือ

$$\gamma = \alpha + j\beta \cong (1+j) \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (2.26)$$

เมื่อใช้ความสัมพันธ์ที่ว่า

$$\sqrt{j} = (e^{j\pi/2})^{1/2} = e^{j\pi/4} = (1+j)/\sqrt{2}$$

และ $\omega = 2\pi f$ ดังนั้นสมการ (26) แสดงให้เห็นว่า α และ β สำหรับตัวกลางที่เป็นตัวนำที่ดีจะประมาณได้เท่ากัน และค่าทั้งสองก็ขึ้นกับ \sqrt{f} และ $\sqrt{\sigma}$ ดังนี้

$$\alpha = \beta = \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (2.27)$$

ส่วนค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางชนิดนี้มีค่าเท่ากับ

$$\eta_c = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_c}} \cong \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = (1+j)\sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}} = (1+j)\frac{\alpha}{\sigma} \quad (\Omega) \quad (2.28)$$

ซึ่งมีเฟสเท่ากับ 45° ดังนั้นความเข้มสนามแม่เหล็กจะตามหลังความเข้มสนามไฟฟ้าอยู่ 45° และค่าความเร็วเฟสในตัวกลางที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำที่ดีมีค่าเท่ากับ

$$u_p = \frac{\omega}{\beta} \cong \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}} \quad (\text{m/s}) \quad (2.29)$$

ซึ่งมีค่าแปรผันตรงกับ \sqrt{f} และ $\frac{1}{\sqrt{\sigma}}$ และความเร็วดังกล่าวมีค่าประมาณสองเท่าของความเร็วเสียงที่วิ่งในอากาศแต่มีค่าน้อยกว่าความเร็วแสงมากๆ ค่าความยาวคลื่นในตัวกลางที่เป็นตัวนำที่ดีมีค่าเท่ากับ

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{u_p}{f} = 2\sqrt{\frac{\pi}{f\mu\sigma}} \quad (\text{m}) \quad (2.30)$$

2.8.3 การตกกระทบตัวกลางคลื่นแบบตั้งฉาก

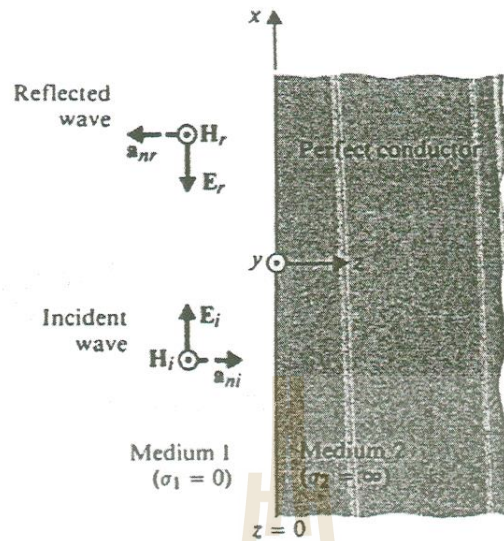
การตกกระทบตัวนำสมบูรณ์แบบตั้งฉาก

จากรูปที่ 2.6 คลื่นที่กำลังจะเดินทางไปตกกระทบรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง ในที่นี้จะเรียกว่า คลื่นตกกระทบ (incident wave, E_i และ H_i) เดินทางในทิศทาง $+z$ และรอยต่อของสองตัวกลางดังกล่าวอยู่ที่ตำแหน่ง $z = 0$ ดังนั้นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตกกระทบในรูปของเฟสเซอร์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_i(z) = a_x E_{i0} e^{-j\beta_1 z} \quad (2.31)$$

$$H_i(z) = a_x \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1 z} \quad (2.32)$$

เมื่อ E_{i0} คือขนาดของ E_i ที่ตำแหน่ง $z = 0$ แต่ β_1 และ η_1 คือค่าคงที่เฟสและอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่หนึ่งตามลำดับ ค่าเวกเตอร์ของพอยน์ติงของคลื่นตกกระทบดังกล่าวมีค่าเท่ากับ $P_i(z) = E_i(z) \times H_i(z)$ และมีทิศทางไปทาง \bar{a}_z ซึ่งเป็นทิศทางของการไหลของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีนี้



รูปที่ 2.6 คลื่นระนาบตกกระทบตัวนำสมบรูณ์แบบตั้งฉาก

ในตัวกลางที่สอง (ตัวนำสมบรูณ์) ทั้งความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะไม่มีค่า หรือกล่าวคือ $\bar{E}_2 = 0$, $\bar{H}_2 = 0$ จึงทำให้ไม่มีคลื่นถูกส่งผ่านข้ามรอยต่อไปยังตัวกลางที่สอง เพราะฉะนั้นคลื่นจะสะท้อนกลับหมดในตัวกลางที่หนึ่ง ทำให้ได้คลื่นสะท้อน (reflected wave) ซึ่งใช้สัญลักษณ์แทนด้วย \bar{E}_r , \bar{H}_r และค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสะท้อนในตัวกลางที่หนึ่งมีค่าดังนี้

$$\bar{E}_r(z) = \bar{a}_x E_{r0} e^{+j\beta_1 z} \quad (2.33)$$

เมื่อเครื่องหมายบวกที่ปรากฏอยู่บนฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลนั้นเกิดเนื่องจากคลื่นสะท้อนเดินทางในทิศทาง $-z$ ดังนั้นความเข้มสนามไฟฟ้ารวมในตัวกลางที่หนึ่งได้จากการรวมกันของ E_i และ E_r ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\bar{E}_1(z) = \bar{E}_i(z) + \bar{E}_r(z) = \bar{a}_x (E_{i0} e^{-j\beta_1 z} + E_{i0} e^{+j\beta_1 z}) \quad (2.34)$$

จากความต่อเนื่องที่ได้จากเงื่อนไขขอบเขตในองค์ประกอบสัมผัส (tangential component) ของความเข้มสนามไฟฟ้าที่รอยต่อ $z = 0$ ทำให้ได้ว่า

$$\bar{E}_1(0) = \bar{a}_x (E_{i0} + E_{r0}) = E_2(0) = 0$$

ดังนั้น $E_{r0} = -E_{i0}$ ซึ่งทำให้สมการ (2.34) กลายเป็น

$$\bar{E}_1(z) = \bar{a}_x E_{i0} (e^{-j\beta_1 z} + e^{+j\beta_1 z}) = -\bar{a}_x j 2 E_{i0} \sin \beta_1 z \quad (2.35)$$

ซึ่งสามารถหาความเข้มสนามแม่เหล็กสะท้อนได้จาก E_r ดังนี้

$$\bar{H}_r(z) = \frac{1}{\eta_1} \bar{a}_{nr} \times E_r(z) = \frac{1}{\eta_1} (-\bar{a}_z) \times E_r(z) = -\bar{a}_y \frac{1}{\eta_1} E_{r0} e^{+j\beta_1 z} = \bar{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{+j\beta_1 z}$$

เมื่อรวม $\bar{H}_r(z)$ เข้ากับ $\bar{H}_i(z)$ จะได้ความเข้มสนามแม่เหล็กรวมในตัวกลางที่หนึ่งดังนี้

$$\bar{H}_1(z) = \bar{H}_i(z) + \bar{H}_r(z) = \bar{a}_y 2 \frac{E_{i0}}{\eta_1} \cos \beta_1 z \quad (2.36)$$

จากสูตรหาค่ากำลังเฉลี่ยที่ว่า $P_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}(\bar{E} \times \bar{H}^*)$ เมื่อพิจารณาความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ได้จากสมการ (2.35) และ (2.36) จะเห็นได้ว่ากำลังเฉลี่ยในตัวกลางที่หนึ่งมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากไม่สามารถหาค่าส่วนจริงตามสมการได้ เพื่อดูพฤติกรรมของคลื่นรวมในตัวกลางที่หนึ่งเทียบกับตำแหน่งและเวลา เราจำเป็นต้องเปลี่ยนความเข้มของสนามทั้งสองให้อยู่ในรูป ณ ขณะหนึ่ง ดังนี้

$$\bar{E}_1(z) = \text{Re}[E_1(z)e^{j\omega t}] = \bar{a}_x 2E_{i0} \sin \beta_1 z \sin \omega t \tag{2.37}$$

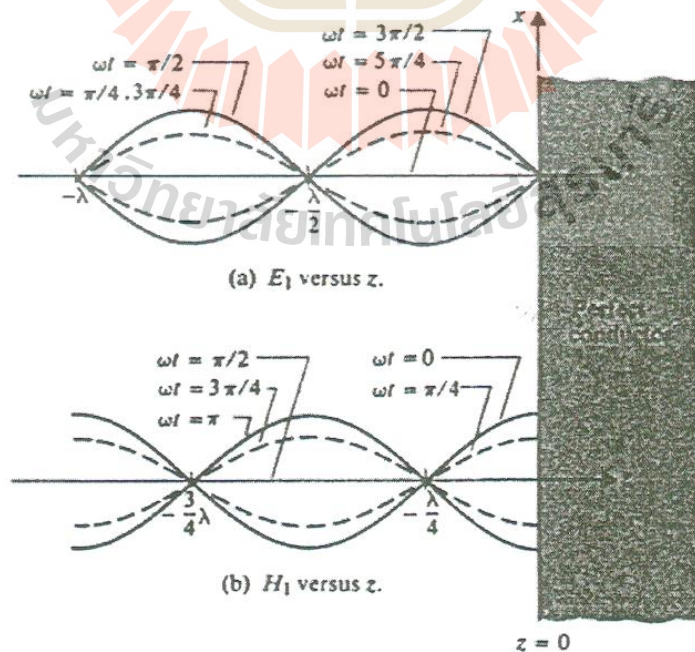
$$\bar{H}_1(z) = \text{Re}[H_1(z)e^{j\omega t}] = \bar{a}_y 2 \frac{E_{i0}}{\eta_1} \cos \beta_1 z \cos \omega t \tag{2.38}$$

ทั้ง $\bar{E}_1(z, t)$ และ $\bar{H}_1(z, t)$ มีค่าเป็นศูนย์และสูงสุดที่ตำแหน่งคงที่นับจากรอยต่อไม่ว่าเวลาจะเปลี่ยนไปเท่าใดตาม ซึ่งสามารถหาดำแหน่งได้ดังนี้

$$\left. \begin{array}{l} \text{Zeros of } \bar{E}_1(z, t) \\ \text{Maxima of } \bar{H}_1(z, t) \end{array} \right\} \text{ Occur at } \beta_1 z = -n\pi, z = -n \frac{\lambda}{2}, n = 0, 1, 2, \dots$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Maxima of } \bar{E}_1(z, t) \\ \text{Zeros of } \bar{H}_1(z, t) \end{array} \right\} \text{ Occur at } \beta_1 z = -(2n+1) \frac{\pi}{2}, z = -(2n+1) \frac{\lambda}{4}, n = 0, 1, 2, \dots$$

คลื่นรวมในตัวกลางที่หนึ่งจะไม่ใช่คลื่นจร (traveling wave) อีกต่อไป แต่มันคือคลื่นนิ่ง (หรือ คลื่นยืน) ที่มักจะเรียกกันว่า standing wave เป็นผลลัพธ์ของการรวมกันของคลื่นสองคลื่นที่เดินทางสวนทางกัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.7 คลื่นนิ่งของ $\bar{E}_1 = \bar{a}_x E_1$ และ $\bar{H}_1 = \bar{a}_y H_1$

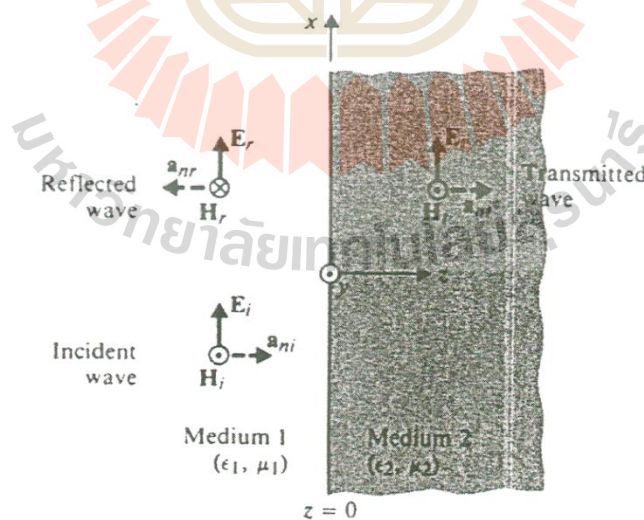
จากรูปที่ 2.7 แบ่งข้อสังเกตออกเป็น 3 ข้อดังนี้

1. \bar{E}_1 มีค่าเป็นศูนย์ที่รอยต่อที่เป็นตัวกลาง ($E_{i0} = -E_{r0}$) และจะมีค่าเป็นศูนย์เช่นนี้ที่ตำแหน่งเป็นจำนวนเท่าของ $\frac{\lambda}{2}$ นับจากรอยต่อของตัวกลาง
2. \bar{H}_1 จะมีค่าสูงสุดที่รอยต่อตัวกลาง ($H_{r0} = H_{i0} = E_{i0}/\eta_1$)
3. คลื่นนิ่งของ \bar{E}_1 และ \bar{H}_1 มีเฟสต่างกันอยู่ 90° และตำแหน่งต่างกันอยู่ $\frac{\lambda}{4}$

การตกกระทบไดอิเล็กทริกแบบตั้งฉาก

ในหัวข้อนี้จะเปลี่ยนตัวกลางที่สองจากที่เคยเป็นตัวนำสมบูรณ์มาเป็นไดอิเล็กทริก เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบเข้ากับตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กทริก ที่มีค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ที่ไม่เท่ากับค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่คลื่นกำเนิดขึ้นมา ส่วนหนึ่งของคลื่นตกกระทบจะสะท้อนกลับในขณะที่ส่วนที่เหลือจะส่งผ่านไปยังตัวกลางไดอิเล็กทริกที่สอง จะมองเหตุการณ์นี้ได้ว่าเป็นการไม่สมดุลของอิมพีแดนซ์ของตัวกลาง

การวิเคราะห์ในหัวข้อนี้จะมีลักษณะเหมือนกับหัวข้อที่ผ่านมาคือ สมมติให้คลื่นตกกระทบแบบตั้งฉากจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง และเพื่อความง่ายในการวิเคราะห์ สมมติให้ตัวกลางทั้งสองเป็นตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย ($\sigma = 0$)



รูปที่ 2.8 คลื่นระนาบตกกระทบไดอิเล็กทริกแบบตั้งฉาก

จะเริ่มการวิเคราะห์จากรูปที่ 2.8 ที่มีคลื่นตกกระทบเดินทางไปในทิศทาง $+z$ และรอยต่อของตัวกลางอยู่ที่ตำแหน่ง $z = 0$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนในรูปของเฟสเซอร์ได้ ดังนี้

$$E_i(z) = \bar{a}_x E_{i0} e^{-j\beta_1 z} \quad (2.39)$$

$$H_i(z) = \bar{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1 z} \quad (2.40)$$

เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของตัวกลางเกิดที่ตำแหน่ง $z = 0$ ดังนั้นส่วนหนึ่งของคลื่นตกกระทบจะสะท้อนกลับไปยังตัวกลางที่ 1 และส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังตัวกลางที่ 2 ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

ก) คลื่นสะท้อน

$$E_r(z) = a_x E_{r0} e^{j\beta_1 z} \quad (2.41)$$

$$H_r(z) = (-a_y) \times \frac{1}{\eta_1} E_r(z) = -a_y \frac{E_{r0}}{\eta_1} e^{j\beta_1 z} \quad (2.42)$$

ข) คลื่นส่งผ่าน (ไปยังตัวกลางที่ 2)

$$E_t(z) = a_x E_{t0} e^{-j\beta_2 z} \quad (2.43)$$

$$H_t(z) = a_z \times \frac{1}{\eta_2} E_r(z) = a_y \frac{E_{t0}}{\eta_2} e^{-j\beta_2 z} \quad (2.44)$$

เมื่อ E_{t0} คือขนาดของ \bar{E}_t ที่ตำแหน่ง $z = 0$ ส่วน β และ η คือ ค่าคงที่เฟสและอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่ 2 ตามลำดับ จากสมการข้างต้นค่าที่ยังไม่รู้และต้องหาต่อไปก็คือ E_{t0} และ E_{r0} ซึ่งสามารถหาได้จากเงื่อนไขขอบเขตของทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ซึ่งที่รอยต่อ $z = 0$ องค์ประกอบในแนวสัมผัส (องค์ประกอบในแกน x) ของความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีความต่อเนื่อง ดังนั้น

$$\bar{E}_i(0) + \bar{E}_r(0) = \bar{E}_t(0) \quad \text{หรือ} \quad E_{i0} + E_{r0} + E_{t0} \quad (2.45)$$

$$\text{และ} \quad \bar{H}_i(0) + \bar{H}_r(0) = \bar{H}_t(0) \quad \text{หรือ} \quad \frac{1}{\eta_2} (E_{i0} - E_{r0}) = \frac{E_{t0}}{\eta_2} \quad (2.46)$$

แก้สมการ (2.45) และ (2.46) จะได้

$$\bar{E}_{r0} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} E_{i0} \quad (2.47)$$

$$\bar{E}_{t0} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} E_{i0} \quad (2.48)$$

อัตราส่วนของ E_{r0}/E_{i0} และ E_{t0}/E_{i0} ถูกเรียกว่า สัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficient)

และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmission coefficient) ตามลำดับ ซึ่งใช้สัญลักษณ์ และมีความสัมพันธ์กับอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ดังนี้

$$\Gamma = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.49)$$

$$\text{และ} \quad \tau = \frac{E_{t0}}{E_{i0}} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.50)$$

จะสังเกตเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนในสมการ (2.49) มีค่าเป็นไปได้ทั้งค่าลบและค่าบวก ขึ้นอยู่กับค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในสมการ (2.50) นั้นมีค่าเป็นบวก เท่านั้น นิยามของ Γ และ τ ในสมการ (2.49) และ (2.50) เป็นจริงในทุกๆ ตัวกลาง ซึ่งในตัวกลางชนิด กระจายตามความถี่ค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์จะมีค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อน และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเป็นดังนี้

$$1 + \Gamma = \tau \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.51)$$

ถ้าตัวกลางที่ 2 เป็นตัวนำสมบูรณ์แล้ว $\eta_2 = 0$ และเมื่อแทนค่าลงในสมการ (2.49) และ (2.50) จะได้ว่า $\Gamma = -1$ และ $\tau = 0$ ซึ่งทำให้ $E_{r0} = E_{i0}$ และ $E_{t0} = 0$ ที่ตีความได้ว่าคลื่นตกกระทบจะสะท้อนกลับหมดและเกิดคลื่นนิ่งขึ้นที่ด้านตัวกลางที่ 1 ถ้าตัวกลางที่ 2 ไม่ใช่ตัวนำสมบูรณ์ คลื่นตกกระทบบางส่วนจะสะท้อนกลับไปยังตัวกลางที่ 1 ซึ่งทำให้ค่าสนามไฟฟ้ารวมในตัวกลางที่ 1 มีสมการ ดังนี้

$$\begin{aligned} E_1(z) &= E_i(z) + E_r(z) = a_x E_{i0} (e^{-j\beta_1 z} + \Gamma e^{j\beta_1 z}) \\ &= a_x E_{i0} [(1 + \Gamma)e^{-j\beta_1 z} + \Gamma(e^{j\beta_1 z} - e^{-j\beta_1 z})] \\ &= a_x E_{i0} [(1 + \Gamma)e^{-j\beta_1 z} + \Gamma(j2 \sin \beta_1 z)] \end{aligned}$$

หรือจากสมการ (2.51) จะได้ว่า

$$\bar{E}_1(z) = \bar{a}_x E_{i0} [\tau e^{-j\beta_1 z} + \Gamma(j2 \sin \beta_1 z)] \quad (2.52)$$

จากสมการ (2.54) $\bar{E}_1(z)$ ประกอบไปด้วย 2 ส่วน ได้แก่ คลื่นจร (traveling wave) ที่มีขนาดเท่ากับ τE_{i0} และคลื่นนิ่งที่มีขนาดเท่ากับ $2\Gamma E_{i0}$ เนื่องจากการมีอยู่ของคลื่นจร ค่าของ $\bar{E}_1(z)$ จึงไม่ได้มีค่าเท่ากับศูนย์ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งเหมือนกับพฤติกรรมของคลื่นนิ่งทั่วๆ ไปที่ได้ศึกษามา ตำแหน่งที่เกิดค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ $|\bar{E}_1(z)|$ หาได้ดังนี้

$$E_1(z) = a_x E_{i0} e^{-j\beta_1 z} (1 + \Gamma e^{j2\beta_1 z}) \quad (2.53)$$

อัตราส่วนของค่าสูงสุดต่อค่าต่ำสุดสำหรับความเข้มของสนามไฟฟ้าของคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing-wave ratio, SWR) ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย S

$$S = \frac{|E|_{\max}}{|E|_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.54)$$

หรือเขียนอีกรูปหนึ่งได้

$$|\Gamma| = \frac{S - 1}{S + 1} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.55)$$

ในขณะที่ค่า Γ มีค่าได้ตั้งแต่ -1 ไปถึง +1 ค่าของ S จะมีค่าได้ตั้งแต่ 1 ถึง ∞

2.9 บริเวณการแผ่พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

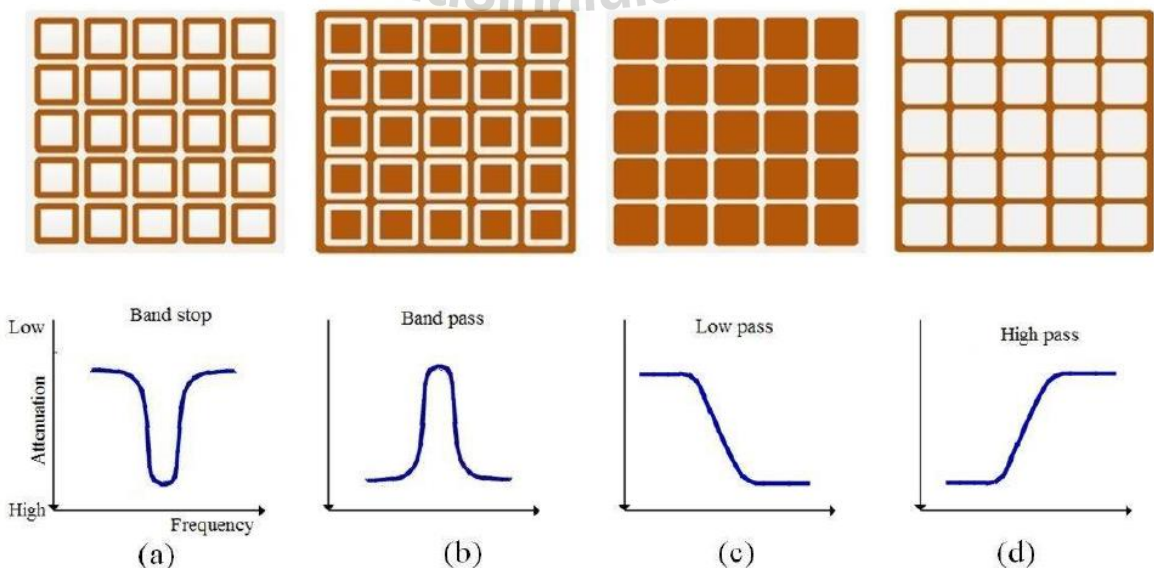
สำหรับบริเวณสนามไกล (Far-Field Region) นั้นจะเป็นบริเวณที่อยู่ในพื้นที่วงกลมวงนอกสุด (ถัดจากบริเวณเฟสเนล) ซึ่งบางครั้งเรียกว่า บริเวณเฟราน์โฮเฟอร์ (Fraunhofer Region) การพิจารณาสนาม

ที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะกำหนดให้เทอมของระยะทาง ($1/r$) มีค่ามากกว่าหนึ่งมากๆ ($\beta r \gg 1$) โดยผลเฉลยของสนามที่ได้จะไม่มียอดประกอบของสนามเชิงมุม เนื่องจากในเงื่อนไขของสนามไกลนี้ยอดประกอบของสนามเชิงมุมจะไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างสายอากาศไปยังจุดสังเกตใดๆ ทั้งสิ้นยอดประกอบของสนามที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electromagnetics Wave: TEM Wave) กับทิศทางการแผ่คลื่น สามารถนำมาพล็อตเพื่อหาแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ที่เกิดขึ้นจากสายอากาศที่ต้องการได้ โดยระยะของสนามไกลของสายอากาศทุกชนิดจะถูกกำหนดโดย

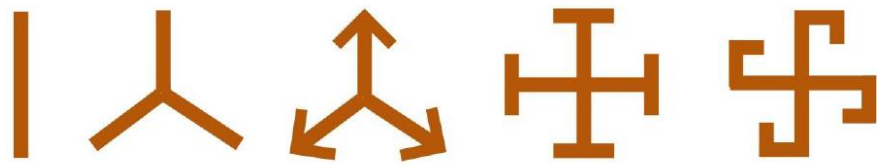
$$r \geq \frac{2D^2}{\lambda} \tag{2.56}$$

2.10 พื้นผิวเลือกความถี่ผ่าน (Frequency Selective Surfaces: FSS)

พื้นผิวเลือกความถี่ หรือ FSS เป็นการรวมตัวกันของโครงสร้างในระนาบที่มีรูปร่างพื้นผิวเหมือนกัน เพื่อทำหน้าที่กรองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในความถี่ต่างๆ โดย FSS ประกอบด้วยชั้นโลหะซึ่งถูกออกแบบให้สามารถเลือกความถี่ที่จะสะท้อนหรือส่งผ่านคลื่นได้ อิลิเมนต์เล็กๆที่เหมือนกันนี้อาจประกอบด้วย 1 อิลิเมนต์หรือหลายอิลิเมนต์ก็ได้ ซึ่งถูกเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) โดยหน่วยเซลล์นี้จะถูกจัดเรียงเป็นตาราง 1 มิติ หรือ 2 มิติ ปกติหน่วยเซลล์ประกอบด้วยแพทช์ตัวนำวางบนไดอิเล็กตริกหรือบางครั้งก็ออกแบบเป็นอิลิเมนต์แบบช่องเปิดที่มีรูปร่างแตกต่างกัน คลื่นที่ตกกระทบ FSS อาจถูกสะท้อนหรือส่งผ่าน ณ ความถี่เรโซแนนซ์ โดย FSS ที่ออกแบบด้วยแพทช์ตัวนำมักสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ ในขณะที่ FSS ที่ออกแบบด้วยช่องเปิดมักยอมให้คลื่นเดินทางผ่านที่ความถี่เรโซแนนซ์นั้นๆ ดังนั้น FSS จึงสามารถออกแบบเป็นตัวกรองความถี่สูงผ่าน (high pass) ความถี่ต่ำผ่าน (low pass) แถบความถี่หยุดผ่าน (band stop) และ แถบความถี่ผ่าน (band pass) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยคุณลักษณะในการกรองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นกับประเภท และรูปร่างของอิลิเมนต์ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 การออกแบบ FSS เพื่อกรองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



(ก) อิลิเมนต์ที่มีจุดเชื่อมต่อตรงกลาง (center connected element type)



(ข) ลูป (loop type)



(ค) มีวัสดุเคลือบผิวหรือโลหะด้านใน (plate type)

รูปที่ 2.10 รูปร่างอิลิเมนต์ของ FSS

รูปร่างอิลิเมนต์ของ FSS แบ่งได้ 4 ประเภทคือ

1. อิลิเมนต์ที่มีจุดเชื่อมต่อตรงกลาง (center connected element type)

รูปร่างของ FSS แบบอิลิเมนต์ที่มีจุดเชื่อมต่อตรงกลาง เช่น ไดโพล (Dipole) ไตรโพล (tri-pole) และการวางไดโพลแบบไขว้ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 10(ก) โดยแต่ละอิลิเมนต์ของจุดกึ่งกลางจะเรโซแนนซ์ เมื่อขนาดของอิลิเมนต์ยาว $\lambda/2$ ถ้าเป็นไดโพลจะมีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น แต่ถ้านำไดโพลมาไขว้กัน 90° จะมีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นทั้งสองด้าน

2. อิลิเมนต์แบบลูป

รูปร่างของ FSS แบบอิลิเมนต์แบบลูป เช่น ลูปสี่เหลี่ยมด้านเท่า ลูปวงกลม หรือลูปหกเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 10(ข) โดยปกติอิลิเมนต์จะเรโซแนนซ์เมื่อความยาวรวมของอิลิเมนต์เท่ากับ λ อิลิเมนต์แบบลูปเป็นที่นิยมเนื่องจากมีแบนด์วิดท์กว้าง

3. อิลิเมนต์แบบวัสดุเคลือบผิว (Plat type หรือ solid interior)

อิลิเมนต์แบบวัสดุเคลือบผิว หรือ แพทช์ จะมีรูปร่างหลากหลาย เช่น สี่เหลี่ยมด้านเท่า สี่เหลี่ยมผืนผ้า วงกลม และหกเหลี่ยม เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 10(ค) ซึ่งอิลิเมนต์ในกลุ่มนี้จะเป็น FSS แรกเริ่มที่ถูกออกแบบ โดยขนาดของอิลิเมนต์จะเท่ากับ $\lambda/2$

4. อิลิเมนต์รูปแบบผสม (Combination type)

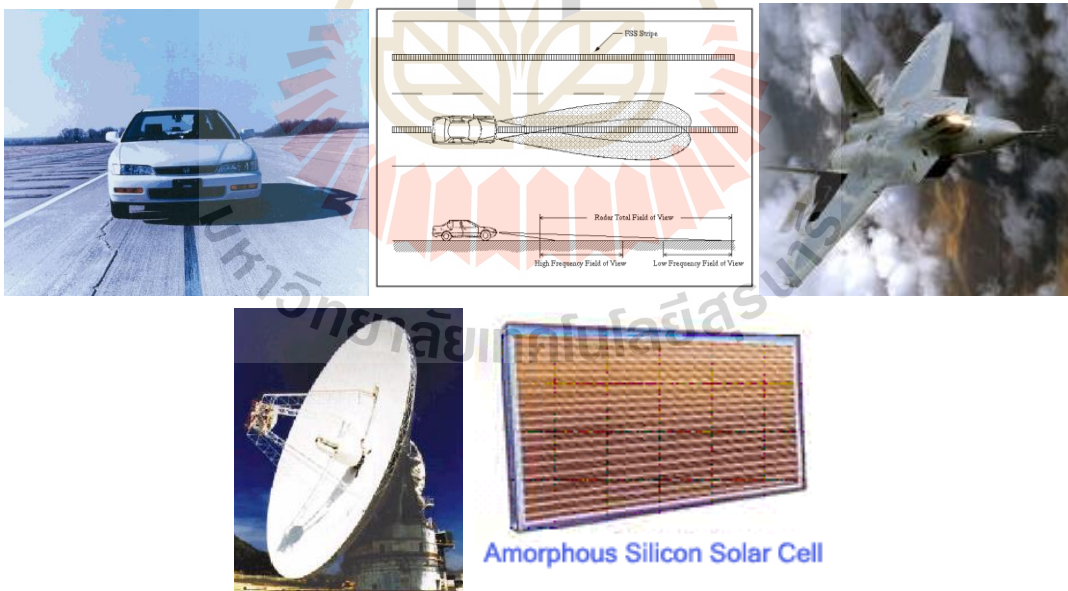
อิลิเมนต์รูปแบบผสม เป็นการนำอิลิเมนต์ทั้ง 3 แบบ ข้างต้นมาออกแบบผสมกัน ดังนั้นวิธีการออกแบบ FSS แบบนี้จะค่อนข้างซับซ้อน และหลากหลาย อย่างไรก็ตาม ความถี่เรโซแนนซ์เริ่มต้นของอิลิเมนต์แบบผสมที่มีโลหะภายในจะหาค่าได้ยาก

สำหรับการหาสมรรถนะของ FSS จะขึ้นกับรูปร่างและคุณลักษณะของอิลิเมนต์ ดังนี้

1. ความเสถียรของการส่งผ่านคลื่น ณ มุมตกกระทบใดๆ (Angular stability)
2. แแถบความถี่ (Bandwidth)
3. ช่องกั้นแถบ (Band separation) หรือช่องแถบที่แยกแหว่งระหว่างแถบความถี่ผ่านและแถบความถี่หยุดผ่าน
4. ระดับโพลาไรซ์ไขว้ (Cross polarization level)

ตัวอย่างการใช้งานโดยใช้หลักการของ FSS

- RFID tags
- ใช้บังคับการเดินทางของรถยนต์
- ใช้ในระบบป้องกันการลักลอบข้อมูล
- ใช้ในการออกแบบวัสดุเคลือบเพื่อลดการสะท้อนของแสงบนแผ่นแสงอาทิตย์

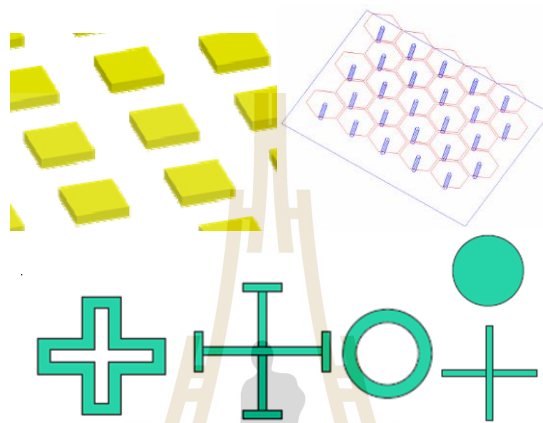


รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการใช้งานโดยใช้หลักการของ FSS

ประเภทของ FSS

1. แบบผิวเรียบ (Planar FSS)
 - สามารถทำวงจรถึงใน substrates ได้
 - สามารถทำเป็นแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้นได้
2. แบบผิวไม่เรียบ (Non-Planar FSS)

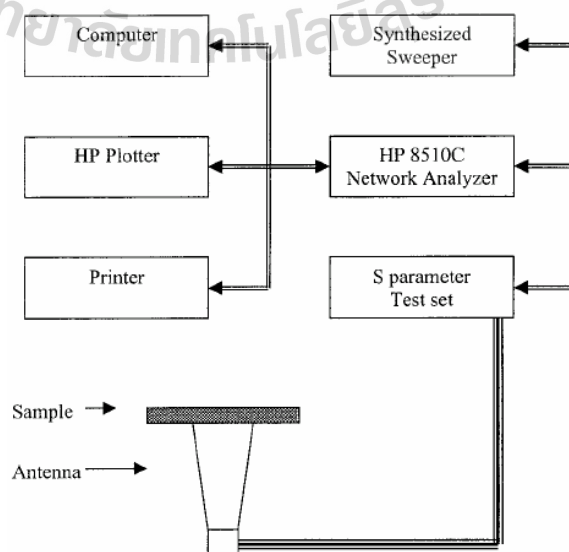
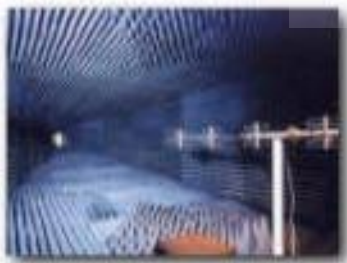
- ทำให้เป็นรูปทรงต่างๆ ได้
 - สามารถนำองค์ประกอบมารวมกันหลายๆ องค์ประกอบได้
3. แบบวงจร
- สามารถทำเป็นวงจรกรองความถี่ผ่านได้ (Band pass)
 - วงจรไม่ให้ความถี่ผ่าน (Band Stop)



รูปที่ 2.12 ประเภทของ FSS

หลักการการวิเคราะห์และออกแบบ FSS ทำได้หลายวิธี ดังนี้

- ออกแบบโดยใช้หลักการของ Periodic Moment Method (PMM)
- ออกแบบโดยใช้หลักการของ Method-of-Moments (MOM)
- ออกแบบโดยปรับรูปร่างและองค์ประกอบ
- ออกแบบโดยการสร้างชิ้นงานแล้ววัดผล



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการวิเคราะห์และออกแบบ FSS

บทที่ 3

การออกแบบกระจกประหยัดพลังงาน

3.1 บทนำ

ในบทนี้ จะกล่าวถึงการออกแบบชิ้นงานที่จะนำมาใช้เป็นกระจกประหยัดพลังงาน เพื่อลดคลื่นความร้อนที่มาจากดวงอาทิตย์ที่เข้ามาภายในอาคาร และปรับปรุงการสื่อสารระหว่างภายนอกและภายในอาคาร ในย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz (ใช้งานจริงในย่าน 790 MHz – 960 MHz) 1800 MHz และ 2100 MHz (ใช้งานจริงในย่าน 1710 MHz – 2170 MHz) และ 2.4 GHz (ใช้งานจริงในย่าน 2.3 GHz – 2.5 GHz) และออกแบบให้คลื่นความร้อนและความถี่ที่ไม่ได้กล่าวมาข้างต้นผ่านได้น้อยลงหรือไม่ให้ผ่านเลย โดยใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ซึ่งเริ่มต้นจากการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาจำลองผลในโปรแกรม CST ดูแนวโน้มของการจำลองผลและปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จนได้ผลการจำลองที่ต้องการ

3.2 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบกระจกประหยัดพลังงาน

ในการออกแบบชิ้นงานซึ่งทำบนแผ่นกระจก มีพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับใช้ในการออกแบบได้แก่

1. ความถี่ปฏิบัติงานของชิ้นงาน คือ ย่านความถี่ 800 MHz 900 MHz 1800 MHz 2100 MHz และ 2.4 GHz
2. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของซับสเตรท (Dielectric constant : ϵ_r) ซึ่งไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบเป็น Glass (Silica) มีค่าเท่ากับ 3.8
3. ความสูงของซับสเตรท (h) เท่ากับ 5 mm.
4. ขนาดของแผ่นกระจก กว้าง 60 cm ยาว 60 cm หนา 0.5 cm

3.3 วิธีการคำนวณค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ

1. ออกแบบที่ความถี่ 800 MHz

ในการออกแบบจะใช้ซับสเตรทเป็นกระจก (Glass silica) มีค่า $\epsilon_r = 3.8$ ออกแบบที่ความถี่ $f_r = 800 \times 10^6$ Hz นำค่า ϵ_r แทนลงในสมการที่ 3.1 เพื่อหาค่าความกว้าง W

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{(\epsilon_r + 1)}{2}}} \quad (3.1)$$

จะได้ $W = 0.121$ m

และหาค่า h คือ ความสูงของซับสเตรท มีค่าเป็น $h = d = 5 \times 10^{-3}$ m

นำค่า W และ h ที่ได้แทนลงในสมการที่ (3.2) เพื่อหาค่า ϵ_{eff}

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

จะได้ $\epsilon_{eff} = 4.112$

จากนั้นนำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ (3.3) เพื่อหาค่า L

$$L = \frac{3 \times 10^8}{2f_r (\sqrt{\epsilon_{reff}})} \quad (3.3)$$

จะได้ $L = 0.0925 \text{ m}$

$$\frac{\lambda_0}{2} = \frac{3 \times 10^8}{2f_r} = 0.1875 \text{ m}$$

2. ออกแบบที่ความถี่ 900 MHz

คำนวณในลักษณะเดียวกันกับการออกแบบที่ความถี่ 800 MHz จะได้พารามิเตอร์สำหรับ
ออกแบบที่ความถี่ $f_r = 900 \times 10^6 \text{ Hz}$ คือ

$$W = 0.1076 \text{ m}$$

$$\epsilon_{eff} = 4.147$$

$$L = 0.0818 \text{ m}$$

$$\frac{\lambda_0}{2} = \frac{3 \times 10^8}{2f_r} = 0.1667 \text{ m}$$

3. ออกแบบที่ความถี่ 1800 MHz

$$W = 0.054 \text{ m}$$

$$\epsilon_{eff} = 4.434$$

$$L = 0.0643 \text{ m}$$

$$\frac{\lambda_0}{2} = \frac{3 \times 10^8}{2f_r} = 0.0833 \text{ m}$$

4. ออกแบบที่ความถี่ 2100 MHz

$$W = 0.0461 \text{ m}$$

$$\epsilon_{eff} = 4.524$$

$$L = 0.0336 \text{ m}$$

$$\frac{\lambda_0}{2} = \frac{3 \times 10^8}{2f_r} = 0.0714 \text{ m}$$

5. ออกแบบที่ความถี่ 2.4 GHz

$$W = 0.0403 \text{ m}$$

$$\epsilon_{eff} = 4.608$$

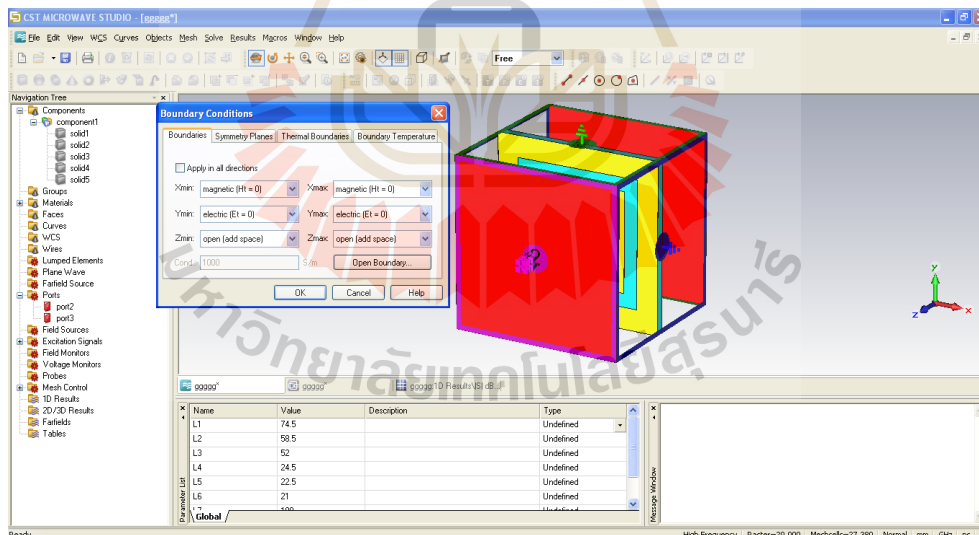
$$L = 0.0291 \text{ m}$$

$$\frac{\lambda_0}{2} = \frac{3 \times 10^8}{2f_r} = 0.0625 \text{ m}$$

3.4 การจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO

1. การตั้งค่า Boundary Condition

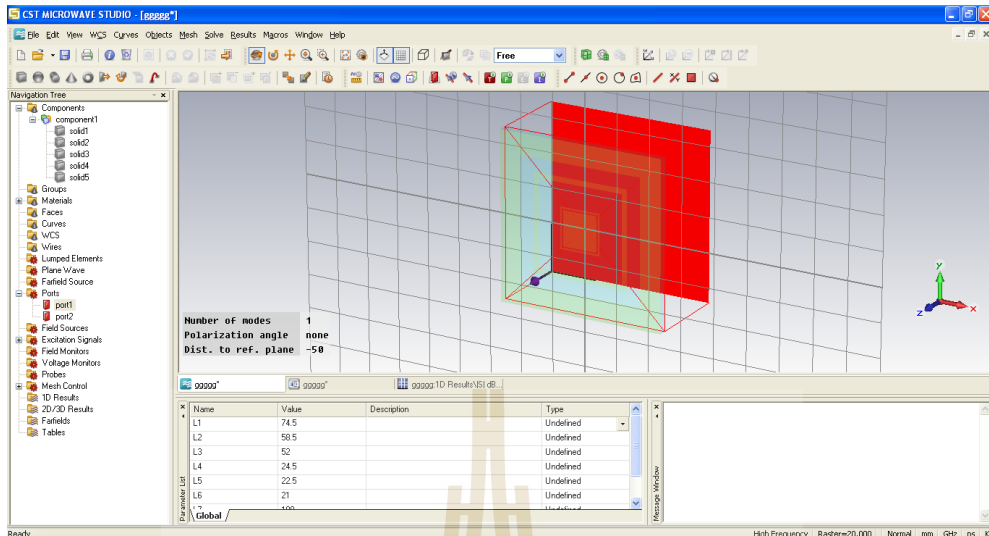
เริ่มจากการตั้งค่า X_{\min} และ X_{\max} ให้มีค่าเท่ากับ magnetic ($H_t = 0$) และ ค่า Y_{\min} และ Y_{\max} มีค่าเท่ากับ electric ($E_t = 0$) และ ค่า Z_{\min} และ Z_{\max} มีค่าเท่ากับ open (add space) แสดงดังรูป 3.1



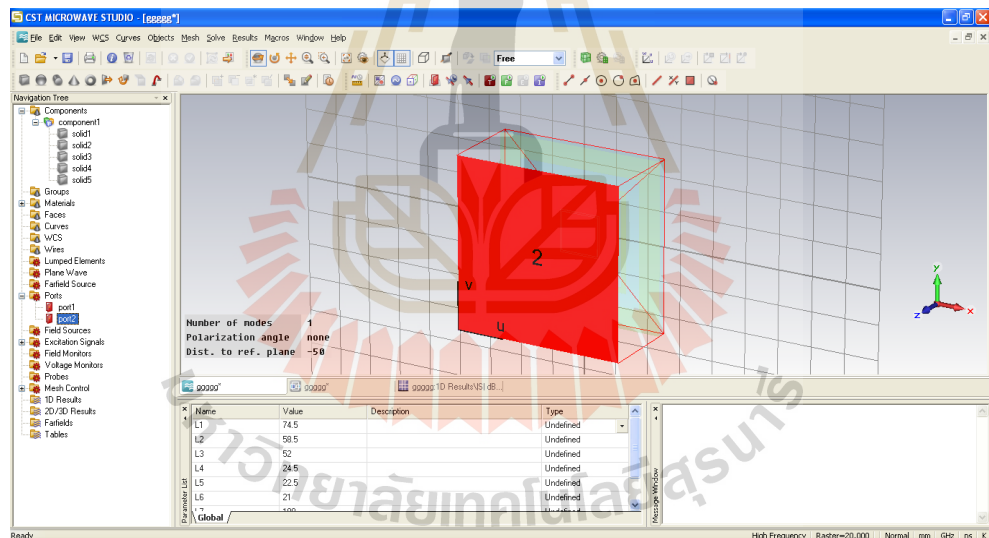
รูปที่ 3.1 แสดงการตั้งค่า Boundary Condition

2. การจำลองแบบ Unit Cell ใน waveguide ports

เริ่มจากการคำนวณหาระยะของ port1 และ port2 ก่อน โดยคำนวณหาจากสูตร $\lambda/2$ แล้วนำมาตั้งค่าในโปรแกรม CST โดยใส่ port ทั้งสองด้าน คือ ทั้งด้านหน้า และ ด้านหลัง หรือ port1 และ port2 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3



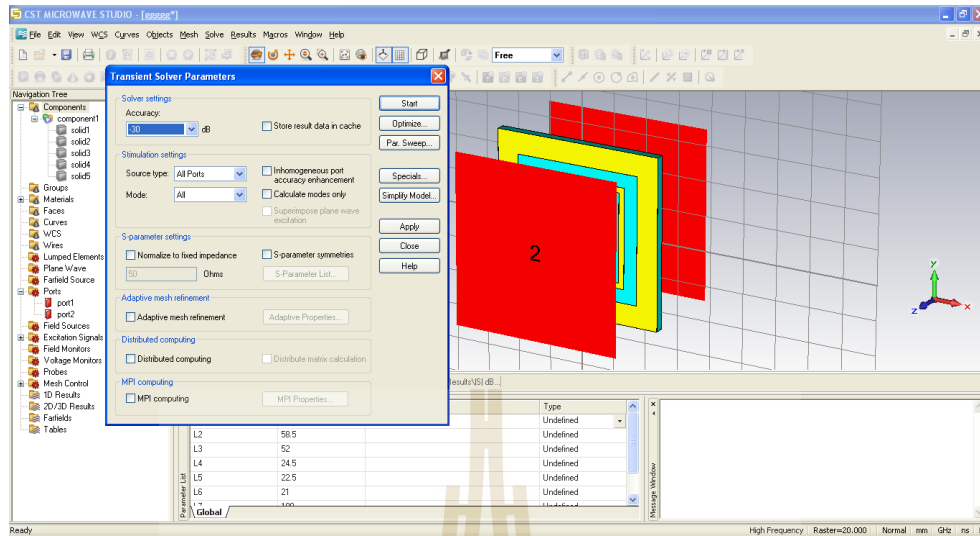
รูปที่ 3.2 การตั้งค่า port 1



รูปที่ 3.3 การตั้งค่า port 2

3. วิธีการ T Solver

การจำลองผลการส่งผ่านคลื่น โดยใช้คำสั่ง T-Solve บน Toolbar ทำการกำหนดค่าที่ต้องการจะทำการส่งผ่าน และเงื่อนไข จากนั้นเริ่มการจำลองผล (กด Start) ดังแสดงในรูปที่ 3.4

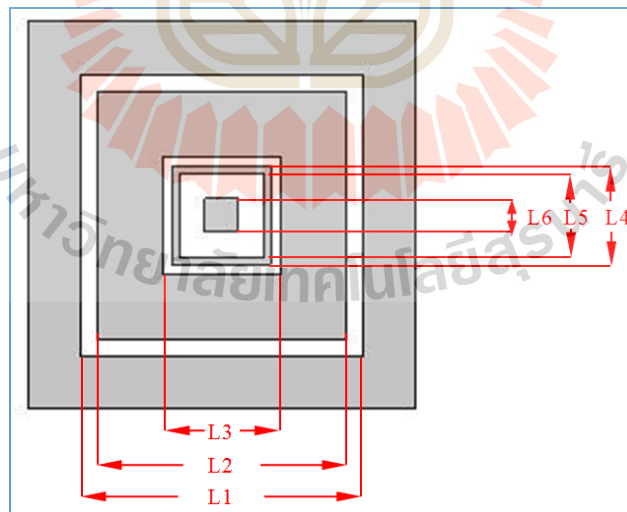


รูปที่ 3.4 วิธีการจำลองผลแบบ T Solver

3.5 ผลการจำลองแบบ

1. ผลการจำลองแบบขึ้นงานโดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณมาใช้ในการออกแบบ

ซึ่งจะได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 พารามิเตอร์ของขึ้นงานต้นแบบ

จากสมการที่ (3.3) ที่ความถี่ 800 MHz จะได้ค่า $L_1 = 92.5$ mm

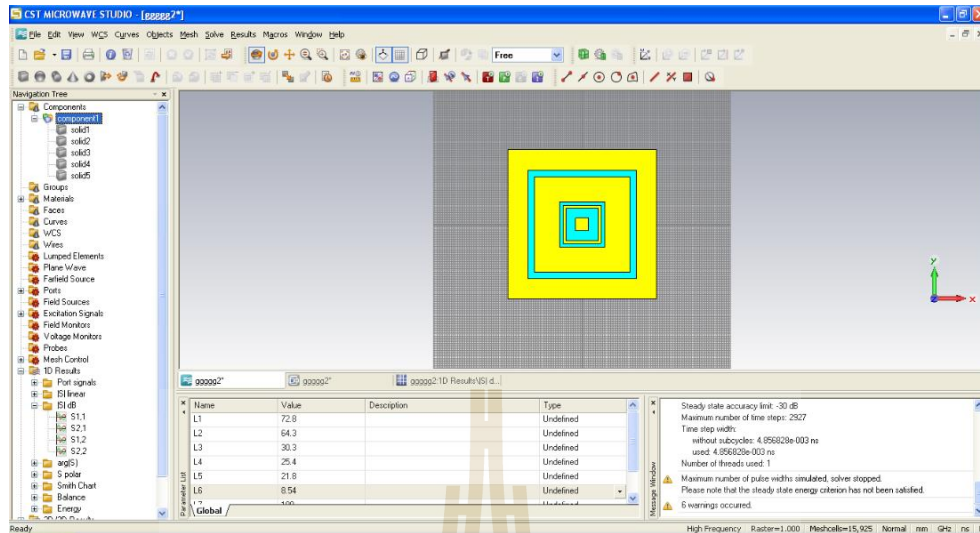
ความถี่ 900 MHz จะได้ค่า $L_2 = 81.8$ mm

ความถี่ 1800 MHz จะได้ค่า $L_3 = 39.6$ mm

ความถี่ 2100 MHz จะได้ค่า $L_4 = 33.6$ mm

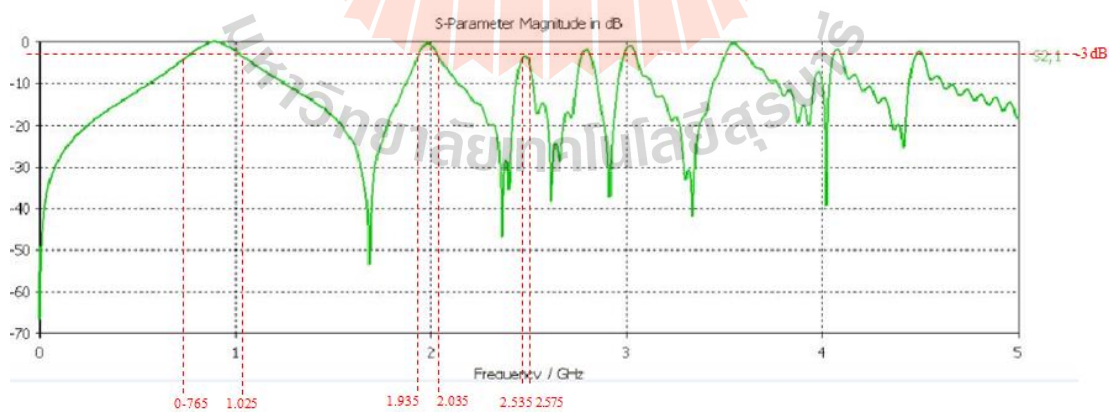
ความถี่ 2400 MHz จะได้ค่า $L_5 = 29.1$ mm

ความถี่สูงสุดที่ใช้ จะได้ค่า $L_6 = 26.7$ mm



รูปที่ 3.6 โครงสร้างชิ้นงานที่ออกแบบโดยมีค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้มาจำลองผลพบว่ากราฟของ S_{21} แสดงดังรูปที่ 3.7 ซึ่งจะพิจารณาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ -3 dB พบว่า คลื่นสามารถส่งผ่าน FSS ที่ออกแบบได้ดีที่ย่านความถี่ 790 MHz - 960 MHz เนื่องจากผลการจำลองที่ -3 dB มีค่าประมาณ 765 MHz - 1025 MHz ส่วนย่านความถี่ 1710 MHz - 2170 MHz ยังบางความถี่ที่ส่งผ่านไม่ได้ เนื่องจากผลการจำลองที่ -3 dB มีค่าประมาณ 1935 MHz - 2035 MHz และในย่านความถี่ 2.4 GHz ยังไม่สามารถทำงานได้ เนื่องจากผลการจำลองที่ -3 dB มีค่าประมาณ 2.535 GHz - 2.575 GHz

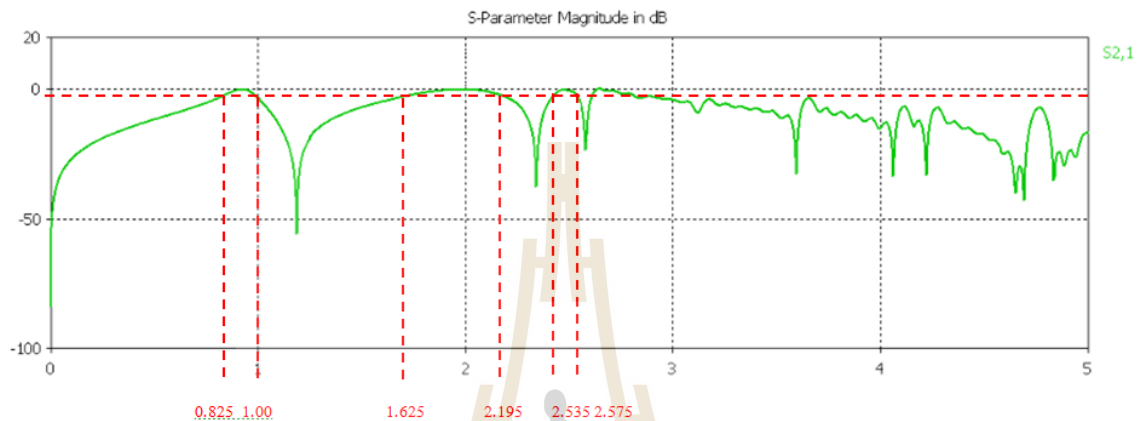


รูปที่ 3.7 ค่า S_{21} จากการวัดจำลองผลชิ้นงาน

เนื่องจากผลการจำลองแบบของชิ้นงานที่ได้จากการคำนวณมีช่วงความถี่ที่ 1710 MHz - 2170 MHz และ 2.4 GHz ยังไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากกระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะที่ใกล้กัน จะมียผลต่อการกรองคลื่นความถี่ จึงต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์บางค่าจนกระทั่งได้ผลการจำลองแบบตามที่ต้องการ ซึ่งมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

1) ผลการจำลองแบบโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ช่วงแรก

เนื่องจากช่วงความถี่ 1710 MHz 2170 MHz และ 2.4 GHz ยังไม่สามารถใช้งานได้ จึงได้มีการปรับค่า $L_1 = 73$ mm $L_2 = 58$ mm $L_3 = 50$ mm $L_4 = 23$ mm $L_5 = 22$ mm และ $L_6 = 20$ mm จะได้ผลการจำลองแบบดังรูปที่ 3.8

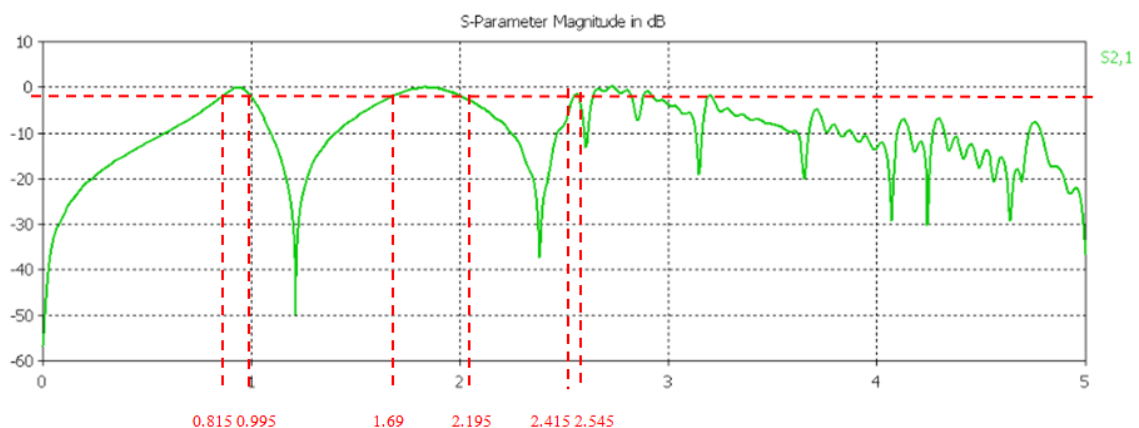


รูปที่ 3.8 ผลการจำลองแบบโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ช่วงแรก

จากรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าที่ช่วงความถี่ 1710 MHz – 2170 MHz สามารถส่งผ่านคลื่นได้ แต่ช่วงความถี่ 2.4 GHz ยังไม่สามารถส่งผ่านคลื่นได้ จึงต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์บางค่าจนกระทั่งได้ผลการจำลองแบบตามที่ต้องการ ซึ่งมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆอีกหลายครั้ง

2) ผลการจำลองแบบโดยมีการปรับค่าพารามิเตอร์ช่วงที่สอง

ช่วงความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz ยังไม่สามารถใช้งานได้แล้ว จึงต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่ ดังนี้ $L_1 = 72$ mm $L_2 = 58$ mm $L_3 = 48$ mm $L_4 = 28$ mm $L_5 = 22$ mm และ $L_6 = 18$ mm

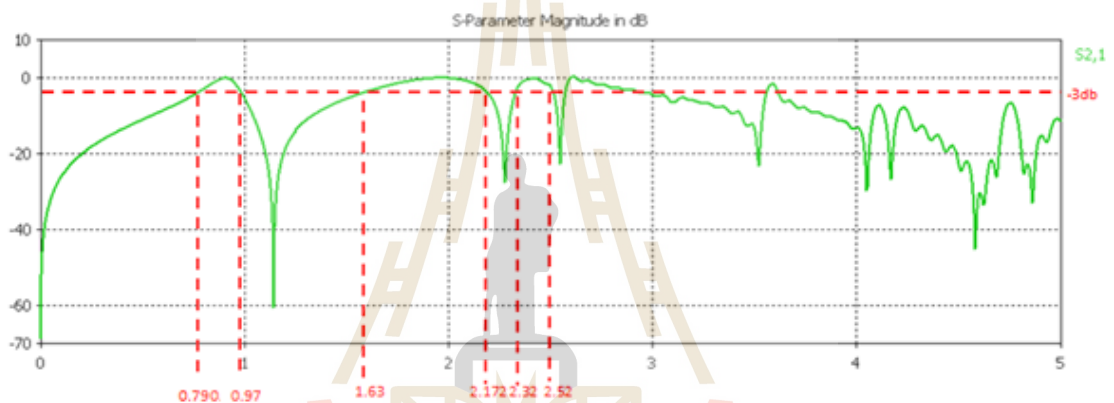


รูปที่ 3.9 ผลการจำลองแบบโดยมีการปรับค่าพารามิเตอร์ช่วงที่สอง

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าช่วงความถี่ 1710 MHz – 2170 MHz สามารถส่งผ่านคลื่นได้ และช่วงความถี่ 2.4 GHz สามารถส่งผ่านคลื่นได้ที่ช่วงความถี่ 2.415 GHz – 2.545 GHz แต่ช่วงความถี่ 790 MHz - 960 MHz มีช่วงความถี่ยังไม่กว้างพอ จึงต้องมีการปรับพารามิเตอร์อีกครั้ง

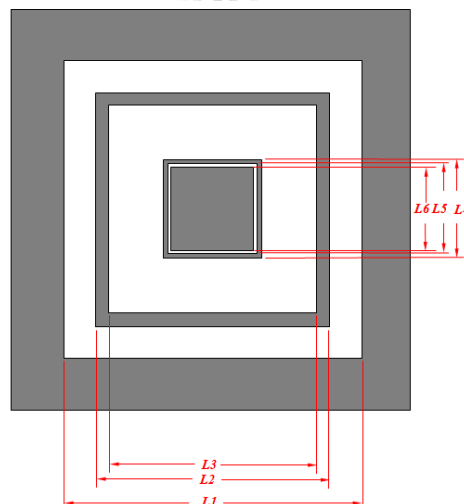
3) ผลการจำลองแบบโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ช่วงที่สามที่สมบูรณ์

ช่วงความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz ยังไม่สามารถส่งผ่านคลื่นได้แล้ว จึงต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่ดังนี้ $L_1 = 74.5$ mm $L_2 = 58.5$ mm $L_3 = 52$ mm $L_4 = 24.5$ mm $L_5 = 22.5$ mm และ $L_6 = 21$ mm



รูปที่ 3.10 ผลการจำลองแบบโดยปรับค่าพารามิเตอร์ช่วงสุดท้าย

จากรูปที่ 3.10 จะเห็นว่าช่วงความถี่ 790 MHz - 960 MHz ความถี่ 1710 MHz – 2170 MHz และช่วงความถี่ 2.4 GHz สามารถส่งผ่านคลื่นได้ดี จะเห็นว่าสามารถปรับพารามิเตอร์ตามที่ต้องการได้เรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.11 โครงสร้างของ FSS เมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ช่วงสุดท้าย

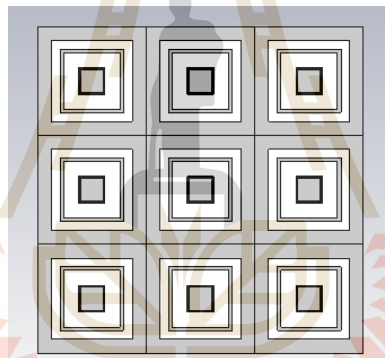
จากรูปที่ 3.11 แสดงโครงสร้างของ FSS เมื่อจำลองแบบปรับค่าพารามิเตอร์ช่วงสุดท้าย พบว่าขนาด L มีค่าเปลี่ยนไป โดยช่วงความถี่ที่ให้คลื่นผ่าน คือ ช่วงความถี่ 790 MHz - 960MHz 1710 MHz - 2170MHz และ 2.4GHz ความถี่ที่ไม่ได้กล่าวจากนี้จะเป็นช่วงความถี่ที่ไม่ให้ผ่าน

3.6 การออกแบบชิ้นงานเพื่อสร้างจริง

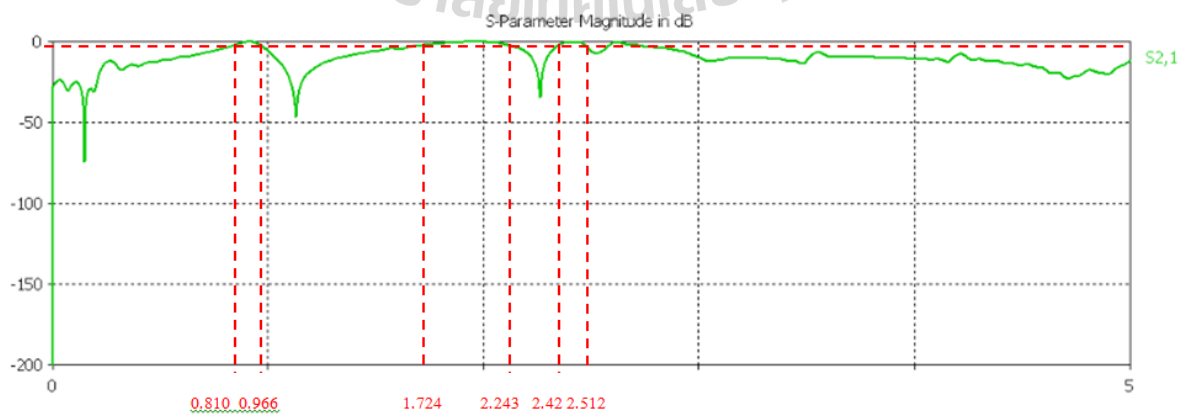
ในการสร้างแบบจำลองที่ได้ออกแบบมาข้างต้นนี้เป็นการออกแบบชิ้นงานแบบ unit cell ซึ่งในการออกแบบชิ้นงานจริงไม่สามารถทำได้ จึงได้มีเลือกการออกแบบชิ้นงานขนาดต่างๆ ดังนี้

1. การออกแบบชิ้นงานแบบ 3 × 3 อิลิเมนต์

การออกแบบชิ้นงานแบบ 3 × 3 อิลิเมนต์ซึ่งจะได้ผลการจำลองแบบมีค่าแสดงดังรูปที่ 3.12 และ 3.13



รูปที่ 3.12 การจำลองชิ้นงานแบบ 3 × 3 อิลิเมนต์



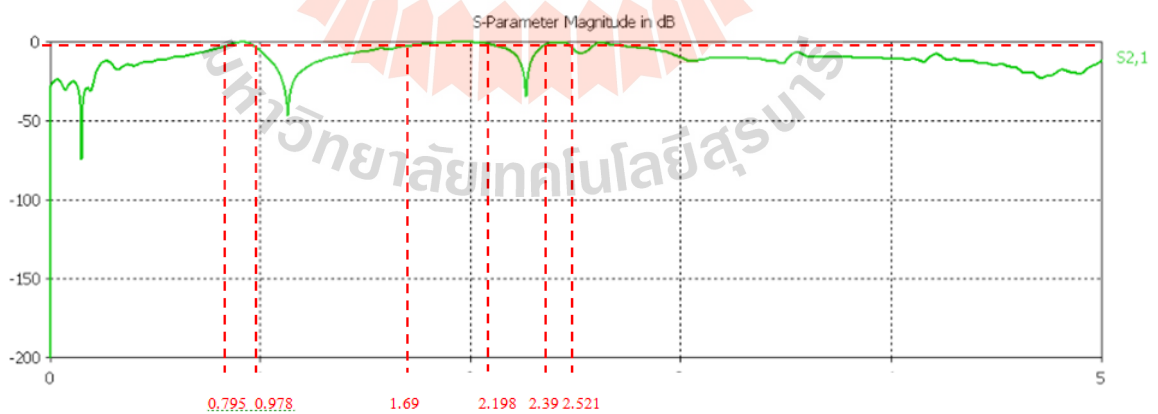
รูปที่ 3.13 การจำลองผลของชิ้นงานแบบ 3 × 3 อิลิเมนต์

2. การออกแบบชิ้นงานแบบ 5×5 อิลิเมนต์

ได้ทำการออกแบบชิ้นงานแบบ 5×5 อิลิเมนต์ ซึ่งจะได้ผลการจำลองแบบมีค่าแสดงดังรูปที่ 3.14 และ 3.15

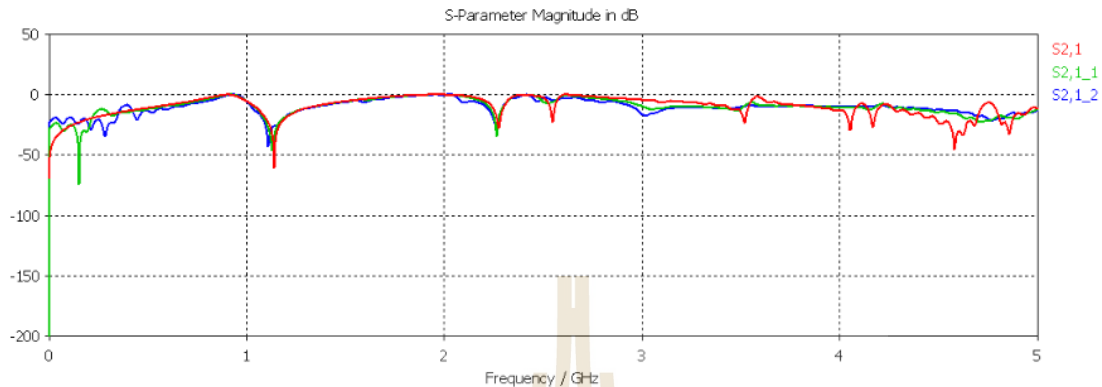


รูปที่ 3.14 การจำลองชิ้นงานแบบ 5×5 อิลิเมนต์



รูปที่ 3.15 การจำลองผลของชิ้นงานแบบ 5×5 อิลิเมนต์

3. เปรียบเทียบกราฟการจำลองผลของชิ้นงานแบบ 3×3 และ 5×5 อิลิเมนต์



-สีแดงแสดงการจำลองของชิ้นงานที่ 1 อิลิเมนต์

-สีน้ำเงินแสดงการจำลองของชิ้นงานที่ 3×3 อิลิเมนต์

-สีเขียวแสดงการจำลองของชิ้นงานที่ 5×5 อิลิเมนต์

รูปที่ 3.16 การการจำลองผลของชิ้นงานแบบ 1, 3×3 และ 5×5 อิลิเมนต์

จากการจำลองผลในรูปที่ 3.16 พบว่าการจำลองผลของชิ้นงานแบบ 5×5 อิลิเมนต์ มีผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับการออกแบบชิ้นงานแบบ 1 อิลิเมนต์มากกว่าการจำลองผลของชิ้นงานแบบ 3×3 อิลิเมนต์ จึงได้นำการจำลองแบบชิ้นงานแบบ 5×5 อิลิเมนต์ มาทำหน้าที่ต่างประหยัดพลังงานต่อไป

3.7 สรุป

ในบทนี้ ที่กล่าวมาเป็นการออกแบบกระจกประหยัดพลังงาน ซึ่งออกแบบให้ความถี่ย่าน 800 MHz 900 MHz 1800 MHz 2100 MHz และ 2.4 GHz ให้สามารถผ่านได้ และความถี่นอกเหนือจากนี้ ให้มีการใช้งานได้ลดลง โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ความกว้างและความยาวของแผ่นโลหะทั้งในย่านความถี่ดังกล่าว เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีค่าพารามิเตอร์ S_{21} ที่มีความเสถียรภาพมากที่สุด ซึ่งค่าได้ในการออกแบบชิ้นงานแบบ 5×5 อิลิเมนต์ คือ ค่าความกว้างของแผ่นโลหะที่ย่านความถี่ 800 MHz ด้านนอกเท่ากับ 58.5 mm ค่าความกว้างของแผ่นโลหะที่ย่านความถี่ 900 MHz ด้านในเท่ากับ 52 mm ค่าความกว้างของแผ่นโลหะที่ย่านความถี่ 1800 MHz ด้านนอกเท่ากับ 24.5 mm ค่าความกว้างของแผ่นโลหะที่ย่านความถี่ 2100 MHz ด้านในเท่ากับ 22.5 mm และค่าความกว้างของแผ่นโลหะที่ย่านความถี่ 2.4 GHz ด้านนอกเท่ากับ 21 mm เพื่อที่จะได้นำผลไปสร้างชิ้นงานจริงต่อไป

บทที่ 4

การทดสอบชิ้นงานและวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

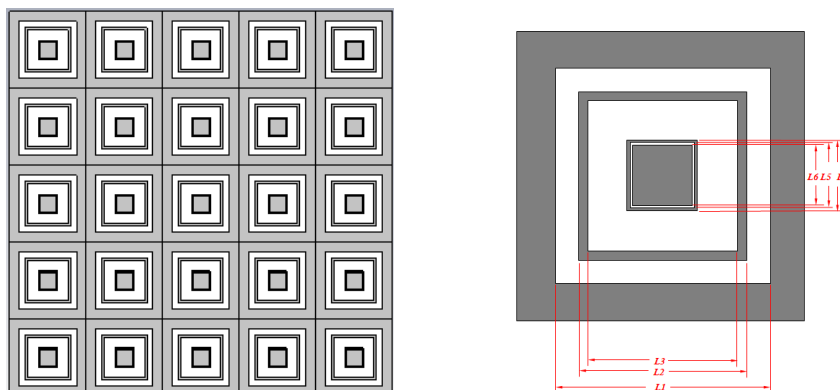
จากการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานในบทที่ 2 ในการสร้างกระจกประหยัดพลังงานนั้นจะเริ่มจากการออกแบบโดยใช้การหาขนาดและรูปแบบของพื้นผิวเลือกคลื่นผ่าน (Frequency Selective Surface) ที่เหมาะสมในบทที่ 3 โดยใช้โปรแกรม CST เพื่อการจำลองแบบ จากนั้นจึงสร้างชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงานต้นแบบ และทำการวัดทดสอบ ทำให้สามารถสร้างชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์ และพร้อมที่จะนำไปทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ แล้วนำมาวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกับทฤษฎี เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์

4.2 กระจกประหยัดพลังงานต้นแบบและอุปกรณ์ในการทดสอบ

ในการสร้างกระจกประหยัดพลังงานนั้นจะเริ่มจากการออกแบบโดยใช้โปรแกรม CST เพื่อจำลองผลการทดลอง ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 จากนั้นนำมาขึ้นงานต้นแบบกระจกประหยัดพลังงาน ซึ่งมีขนาดพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.1 และสายอากาศที่ใช้ทดสอบกระจกประหยัดพลังงานแสดงดังรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของกระเลือกความถี่ผ่านต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
L_1	74.5
L_2	58.5
L_3	52
L_4	24.5
L_5	22.5
L_6	21





รูปที่ 4.1 การจำลองชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงาน



รูปที่ 4.2 กระจกประหยัดพลังงานต้นแบบโดยใช้กระจกใส

ตารางที่ 4.2 สายอากาศที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงานมีดังนี้

รูปภาพอุปกรณ์	ข้อมูลอุปกรณ์
 <p>1.สายอากาศไดโพล</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> สาย RG174A/U ยาว 3 เมตร <input type="checkbox"/> Frequency range: 714 ~ 960 MHz <input type="checkbox"/> Impedance: 50 Ohm nominal <input type="checkbox"/> Gain: 3.5dBi <input type="checkbox"/> Radiation: Omni <input type="checkbox"/> Polarization: Vertical <input type="checkbox"/> Wave: Half Wave Dipole
 <p>2.สายอากาศยาคี-อูตะ</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> 3G UMTS/HSDPA Yagi antenna <input type="checkbox"/> Frequency range: 1800 to 2100MHz <input type="checkbox"/> Gain: 20 dBi <input type="checkbox"/> V.S.W.R: = 1.5 <input type="checkbox"/> Polarization: vertical or horizontal <input type="checkbox"/> Horizontal: -3dB beamwidth 36-degree <input type="checkbox"/> Vertical: -3dB Beamwidth 22-degree <input type="checkbox"/> Impedance: 50 Ohms <input type="checkbox"/> Front-to-back ratio: = 18dB <input type="checkbox"/>

รูปภาพอุปกรณ์	ข้อมูลอุปกรณ์
	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Maximum input power: 50W <input type="checkbox"/> Connector type: N-F <input type="checkbox"/> Lightning protection: direct ground <input type="checkbox"/> Dimension: 700 x 92 45mm <input type="checkbox"/> Weight: 1.4Kg <input type="checkbox"/> Radiating element material: brass <input type="checkbox"/> Operating temperature: -40 to +60 deg.C
 <p data-bbox="392 1137 587 1169">สายอากาศไดโพล</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Frequency range: 2300 ~ 2700 MHz <input type="checkbox"/> Impedance: 50 Ohm nominal <input type="checkbox"/> Gain: 4.5dBi <input type="checkbox"/> Radiation: Omni <input type="checkbox"/> Polarization: Vertical <input type="checkbox"/> Maximum VSWR: 2.0 Ratio <input type="checkbox"/> Length : 223 mm. <input type="checkbox"/> Connector Type : Swivel Style SMA <input type="checkbox"/> Wave: Half Wave Dipole4. สายอากาศปากแตร ย่านความถี่ 10 GHz
 <p data-bbox="379 1827 603 1859">สายอากาศปากแตร</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Frequency range: 8 ~ 12 GHz <input type="checkbox"/> Impedance: 50 Ohms <input type="checkbox"/> Gain: 17.67 dBi <input type="checkbox"/> Radiation: Durational <input type="checkbox"/> Polarization: Vertical <input type="checkbox"/> VSWR: 1.15 Ratio

เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)



รูปที่ 4.3 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

สำหรับการใช้งานในการวัดผลของเครื่องโครงข่าย ในตอนเริ่มต้นจะทำการ calibrate แบบ 2-port ก่อนซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ตั้งช่วงความถี่ที่ต้องการวัด (เช่น 2GHz – 6GHz) โดย
 - กดปุ่ม Start แล้วป้อนค่าความถี่เริ่มต้น
 - กดปุ่ม Stop แล้วป้อนค่าความถี่เริ่มต้น
- 2) กดปุ่ม Cal จากนั้น
 - เลือก “CALIBRATE MANU”
 - เลือก “FULL 2-PORT” จากนั้นจะปรากฏเมนูให้เลือก 3 ตัว ดังนี้
 - 1) REFLECTION 2) TRANSMISSION 3) ISOLATION
 - ให้เลือกทำทีละเมนู โดยเริ่มจาก

2.1 REFLECTION

- เลือก REFLECTION จากนั้นให้ต่ออุปกรณ์โหลดมาตรฐานทั้ง 3 ตัว โดยเริ่มจาก
 - ต่ออุปกรณ์โหลดมาตรฐาน OPEN (2.4 mm. Female) เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 1 (2.4 mm.) แล้วเลือก “OPEN” รอจนกว่าคำว่า OPEN ถูกขีดเส้นใต้ (OPEN)
 - ต่ออุปกรณ์โหลดมาตรฐาน OPEN (2.4 mm. Male) เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 2 (2.4 mm.) แล้วเลือก “OPEN” รอจนกว่าคำว่า OPEN ถูกขีดเส้นใต้ (OPEN)
 - ต่ออุปกรณ์โหลดมาตรฐาน SHORT (2.4 mm. Female) เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 1 (2.4 mm.) แล้วเลือก “SHORT” รอจนกว่าคำว่า SHORT ถูกขีดเส้นใต้ (SHORT)
 - ต่ออุปกรณ์โหลดมาตรฐาน SHORT (2.4 mm. Male) เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 2 (2.4 mm.) แล้วเลือก “SHORT” รอจนกว่าคำว่า SHORT ถูกขีดเส้นใต้ (SHORT)

- ต่ออุปกรณ์โหลตมาตรฐาน 50 โอห์ม (2.4 mm. Female) เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 1 (2.4 mm.) แล้วเลือก “LOAD” จากนั้นเลือก “BROADBAND” รองจนกว่าคำว่า BROADBAND ถูกขีดเส้นใต้ (BROADBAND) จากนั้นเลือก “DONE LOADS”

- ต่ออุปกรณ์โหลตมาตรฐาน 50 โอห์ม (2.4 mm. Male) เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 2 (2.4 mm.) แล้วเลือก “LOAD” จากนั้นเลือก “BROADBAND” รองจนกว่าคำว่า BROADBAND ถูกขีดเส้นใต้ (BROADBAND) จากนั้นเลือก “DONE LOADS”

- เลือก “STANDARDS DONE”

- ให้รองจนคำว่า “COMPUTING CAL COEFFICIENTS” ที่กระพริบอยู่หายไป

- จากนั้น ให้ข้ามทำเมนูที่สามก่อน คือ “ISOLATION” โดยที่ยังไม่ต้องถอดอุปกรณ์โหลตมาตรฐาน 50 โอห์ม ของทั้งสองพอร์ตออก

2.2 ISOLATION

- เลือก “ISOLATION”

- เลือก “OMIT ISOLATION” แล้วรองจนกว่าคำว่า ISOLATION ถูกขีดเส้นใต้ (ISOLATION)

- ถอดอุปกรณ์โหลตมาตรฐาน 50 โอห์ม ของทั้งสองพอร์ตออก

- ต่อสายนำสัญญาณพอร์ต 1 กับ พอร์ต 2 เข้าด้วยกัน

- จากนั้นให้ทำเมนูที่สอง คือ “TRANSMISSION”

2.3 TRANSMISSION

- เลือก “TRANSMISSION”

- เลือก “DO BOTH FWD+REV”

- รองจนคำว่า TRANSMISSION ถูกขีดเส้นใต้ (TRANSMISSION)

- ถอดสายนำสัญญาณทั้งสองแยกออกจากกัน

- ต่ออุปกรณ์โหลตมาตรฐาน 50 โอห์ม (2.4 mm. Female) เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 1 (2.4 mm.)

- ต่ออุปกรณ์โหลตมาตรฐาน 50 โอห์ม (2.4 mm. Male) เข้ากับสายนำสัญญาณ Port 2 (2.4 mm.)

- เลือก “DON'T 2-PORT CAL”

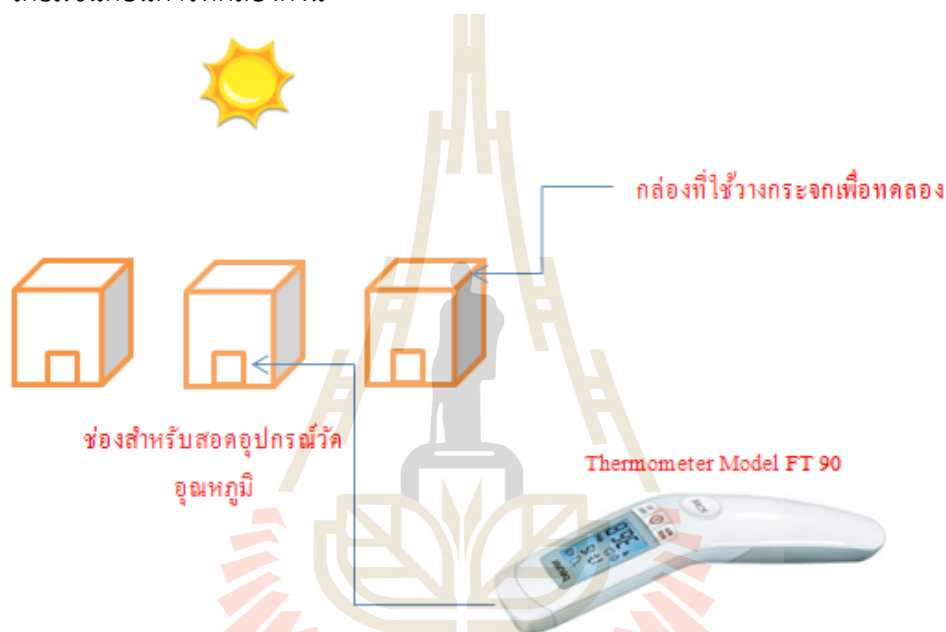
3) ให้รองจนคำว่า “COMPUTING CAL COEFFICIENTS” ที่กระพริบอยู่หายไป ถือเป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการ CALIBRATION สำหรับ 2-PORT

หลังจาก calibrate เสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้จัดตั้งอุปกรณ์ให้เรียบร้อย ซึ่งจะแสดงให้เห็นในหัวข้อถัดไป

4.3 การวัดทดสอบชิ้นงาน

4.3.1 วัดทดสอบอุณหภูมิแสงอาทิตย์หลังเดินทางผ่านกระจกต่างๆ

ในหัวข้อนี้จะเริ่มจากการจัดตั้งอุปกรณ์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.4 เพื่อทดสอบอุณหภูมิภายในกล่อง ซึ่งเป็นการจำลองการวัดแทนการทดสอบจากสถานที่จริง โดยกล่องทั้งหมดจะถูกตั้งไว้กลางที่โล่งแจ้ง และทุกกล่องจะมีวัสดุกันแสงก่อนส่องผ่านไปกล่องแตกต่างกัน วัสดุที่นำมาทำนั้นคือหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งตามบ้านหรืออาคารในปัจจุบัน เช่น ผ่านกระจกใส กระจกติดฟิล์ม เปรียบเทียบกับกระจกประหยัดพลังงานที่ออกแบบ โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.4 การติดตั้งการวัดอุณหภูมิแสงโดยใช้เทอร์มิโมเตอร์ รุ่น FT 90

1. วัดอุณหภูมิ ผ่านอากาศว่าง (ไม่มีกระจก) เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.5 การจัดเตรียมอุปกรณ์และทำการวัดอากาศว่าง

2. วัดอุณหภูมิรังสีอินฟราเรด ผ่านกระจกใส กระจกติดฟิล์ม และชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงาน เมื่อเวลาผ่านไปอีก 5 นาที โดยทำการวัดอุณหภูมิกำลัง 3 ครั้ง จากนั้นนำมาหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ย



รูปที่ 4.6 การวัดอุณหภูมิผ่านกระจกใส กระจกติดฟิล์ม และชิ้นงาน

3. วัดอุณหภูมิ ผ่านอากาศว่าง กระจกใส กระจกติดฟิล์ม และชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงาน ที่ 10 นาทีต่อมา ตามลำดับ โดยทำการวัดอุณหภูมิก่อนละ 3 ครั้ง จากนั้นนำมาหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ย

4. วัดอุณหภูมิ ผ่านอากาศว่าง กระจกใส กระจกติดฟิล์ม และชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงาน ที่ 20 นาทีต่อมา ตามลำดับ โดยทำการวัดอุณหภูมิก่อนละ 3 ครั้ง จากนั้นนำมาหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ย

ผลการวัดทดสอบอุณหภูมิ

สถานที่ทดสอบ ณ สนามหญ้าตรงข้ามศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีการศึกษา วันที่ 12 มีนาคม 2560 เวลา 11.10 น.

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบวัดอุณหภูมิจากรังสีอินฟราเรด

วัสดุ	ครั้งที่วัด	อุณหภูมิที่วัดได้ (องศาเซลเซียส) ที่เวลา		
		ที่ 5 นาที	ที่ 10 นาที	ที่ 20 นาที
อากาศว่าง	1	40.4	40.5	40.6
	2	40.5	40.5	40.5
	3	40.4	40.6	40.4
กระจกใส	1	46.6	47.1	45.5
	2	46.2	46.9	45.5
	3	46.2	47.2	45.5
ชิ้นงานกระจก ประหยัดพลังงาน	1	44.5	45.0	44.1
	2	44.5	45.0	44.0
	3	44.4	45.0	39.0
กระจกติดฟิล์ม	1	45.5	46.8	44.6
	2	45.5	46.9	45.3
	3	45.5	46.9	45.3

วิเคราะห์การวัดทดสอบอุณหภูมิ

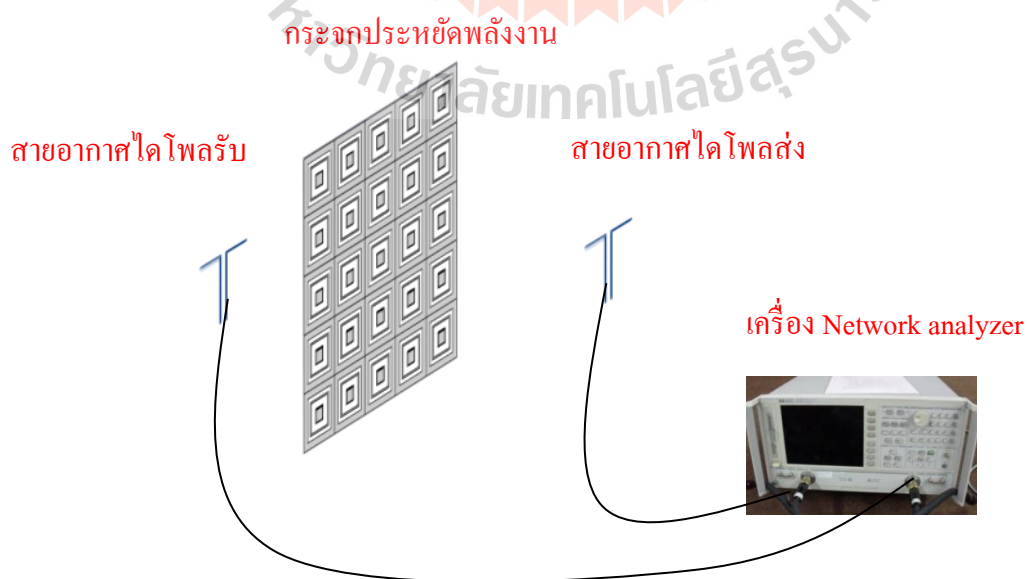
จากผลการทดสอบวัดอุณหภูมิ จะเห็นว่าที่เวลาเดียวกันอากาศว่างเหมือนกันเมื่อวัดอุณหภูมิที่เวลา 5 , 10 , 20 นาทีผ่านไป จะพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่า 40.47 องศาเซลเซียส , 40.53 องศาเซลเซียส และ 40.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันเพราะจำลองการทดสอบเป็นแบบระบบปิดเหมือนกัน โดยที่เวลา 5 นาที พบว่ากระจกใสมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่างจากชิ้นงาน 1.86 องศาเซลเซียส และกระจกติดฟิล์มมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่างจากชิ้นงาน 1.03 องศาเซลเซียส ที่เวลา 10 นาที พบว่ากระจกใสมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่างจากชิ้นงาน 2.02 องศาเซลเซียส และกระจกติดฟิล์มมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่างจากชิ้นงาน 1.87 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20 นาที พบว่ากระจกใสมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่างจากชิ้นงาน 3.14 องศาเซลเซียส และกระจกติดฟิล์มมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่างจากชิ้นงาน 2.71 องศาเซลเซียส

4.3.2 วัดทดสอบการส่งผ่านคลื่นในย่านความถี่ต่างๆ

ในการออกแบบหน้าต่างประหยัดพลังงานนั้นได้กำหนดวัตถุประสงค์ไว้คือ ให้คลื่นสำหรับความถี่เครือข่ายไร้สาย (2.4 GHz) ความถี่สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ (800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz และ 2100 MHz) ส่งผ่านได้ แต่ความถี่ที่สูงกว่านี้ไม่สามารถส่งผ่านได้ ซึ่งรวมถึงคลื่นอินฟราเรดที่มาจากแสงอาทิตย์ด้วย ดังนั้นจึงแบ่งการทดสอบตามย่านความถี่ และเปรียบเทียบผลกับการส่งคลื่นผ่านอากาศกระจกใส และกระจกกรองแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ถึง 4.42 โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) วัดทดสอบ และใช้สายอากาศไดโพล ยากิอูตะ และปากแตร เป็นตัวส่งและรับคลื่น

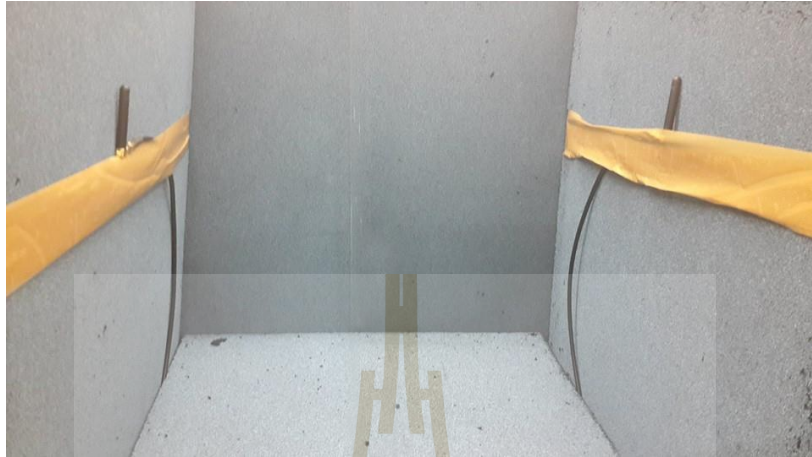
4.3.2.1. วัดทดสอบย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz ด้วยสายอากาศไดโพล

การวัดทดสอบย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz ด้วยสายอากาศไดโพล ในหัวข้อนี้จะเริ่มจากการจัดตั้งอุปกรณ์ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.7 ดังนี้

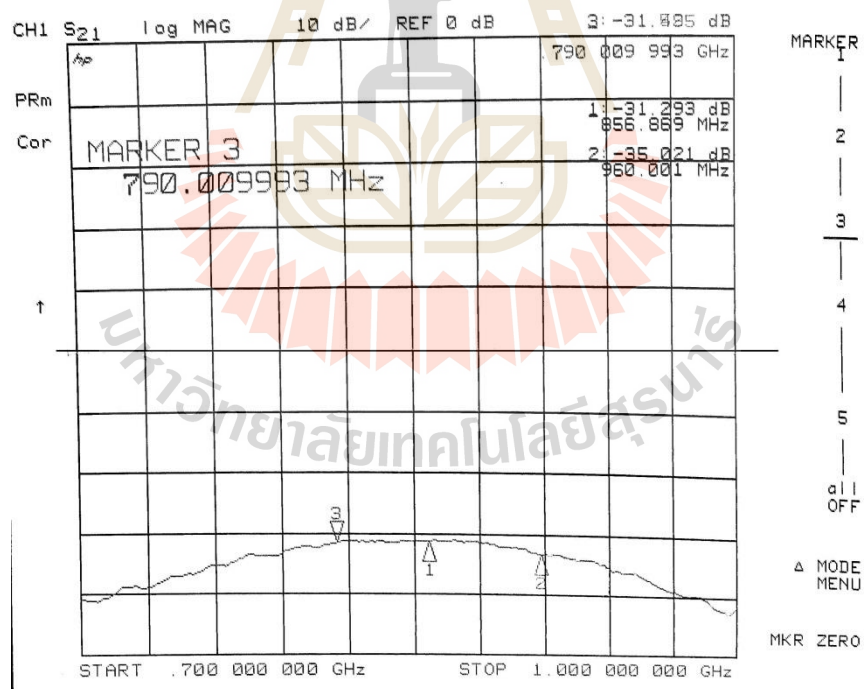


รูปที่ 4.7 การจัดวางอุปกรณ์ในการวัดผลย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz

1) วัดทดสอบวัดทดสอบค่า S_{21} โดยการส่งผ่านอากาศว่าง ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านอากาศว่างย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz

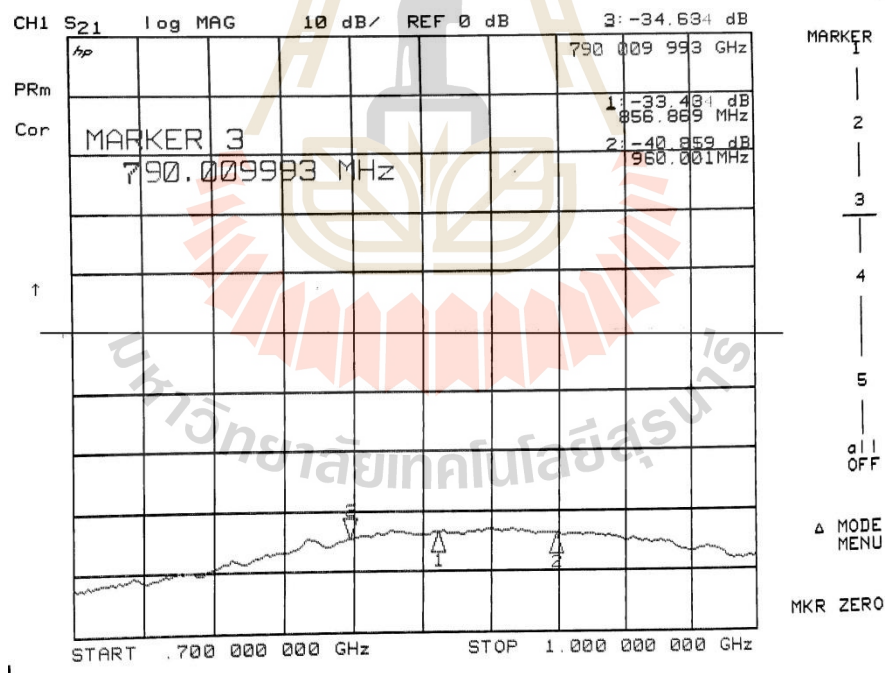


รูปที่ 4.9 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านอากาศว่างย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz

2) วัดทดสอบค่า S_{21} โดยการส่งผ่านกระจกใส ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.10 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกใส่ย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz

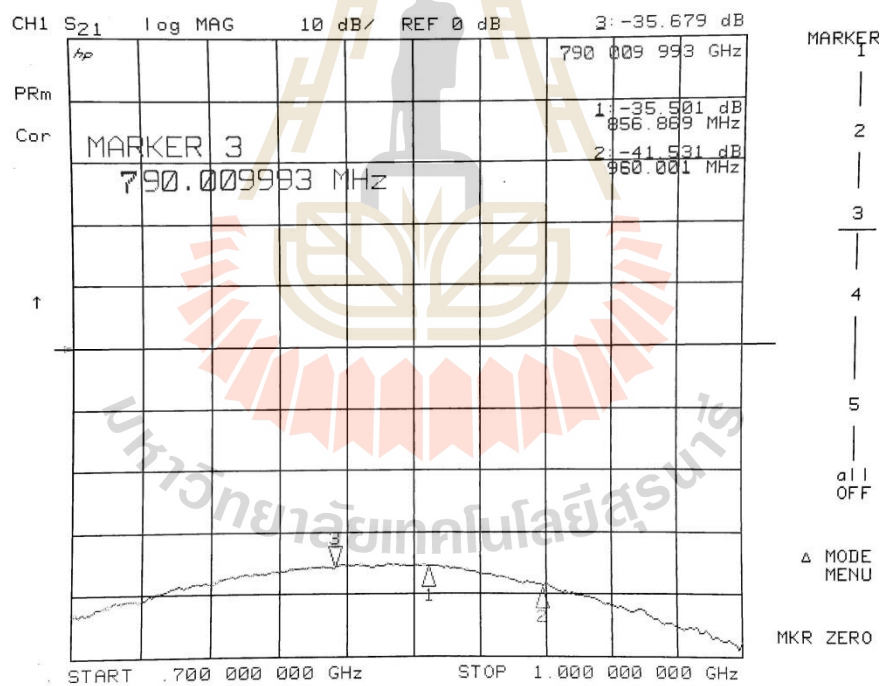


รูปที่ 4.11 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกใส่ย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz

3) วัดทดสอบค่า S_{21} โดยการส่งผ่านชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงาน ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.12 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกประหยัดพลังงานย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz

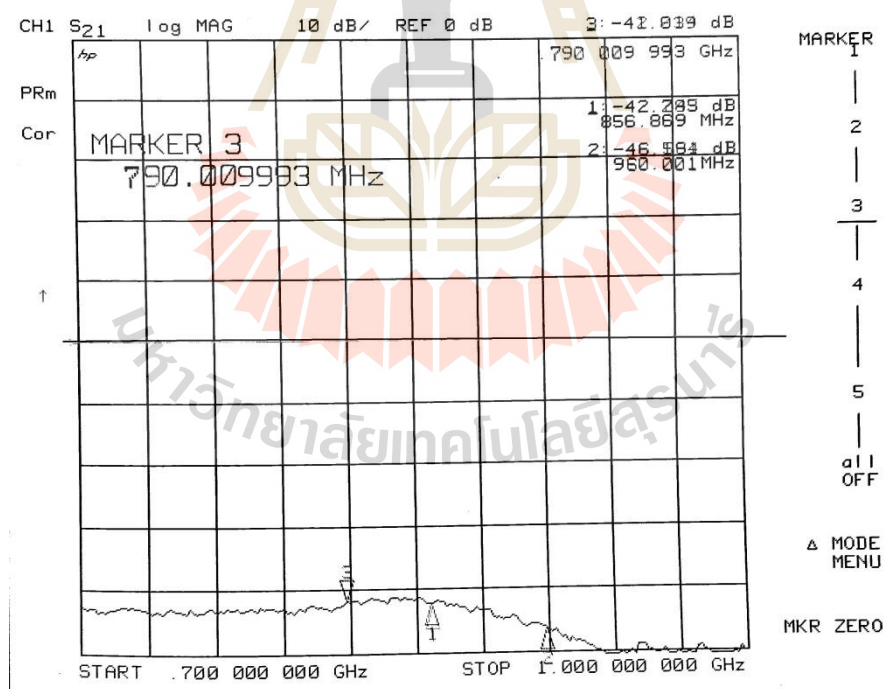


รูปที่ 4.13 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกประหยัดพลังงานย่านความถี่ 800MHz และ 900 MHz

4) วัดทดสอบค่า S_{21} ผ่านกระจกกรองฟิล์ม ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้

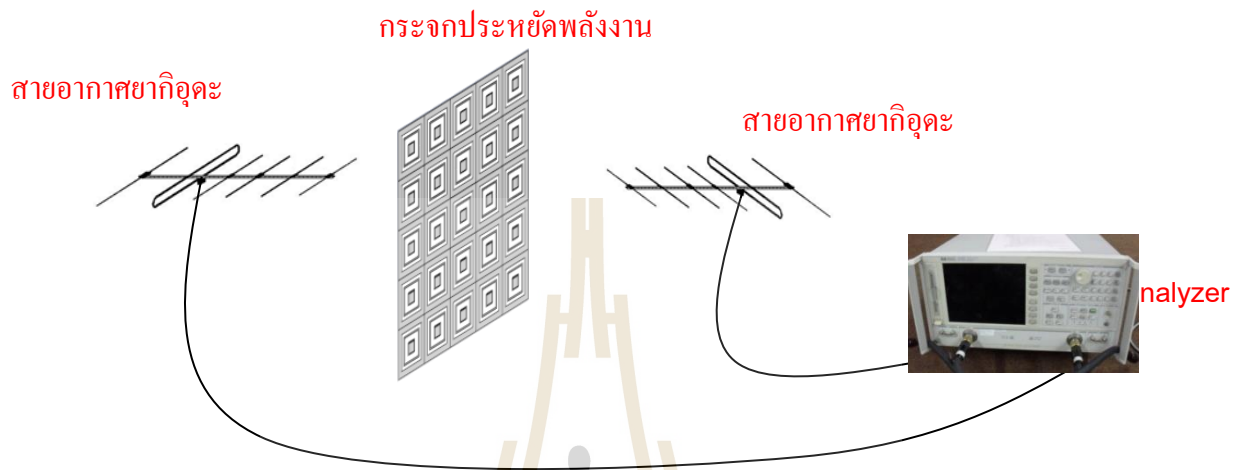


รูปที่ 4.14 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกติดฟิล์มย่านความถี่ 800 MHz และ 900 MHz



รูปที่ 4.15 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกติดฟิล์มย่านความถี่ 800MHz และ 900 MHz

4.3.2.2 วัดทดสอบย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz ด้วยสายอากาศยาคูตะ
การวัดทดสอบย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz ด้วยสายอากาศยาคูตะในหัวข้อนี้จะ
เริ่มจากการจัดตั้งอุปกรณ์ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.16 ดังนี้

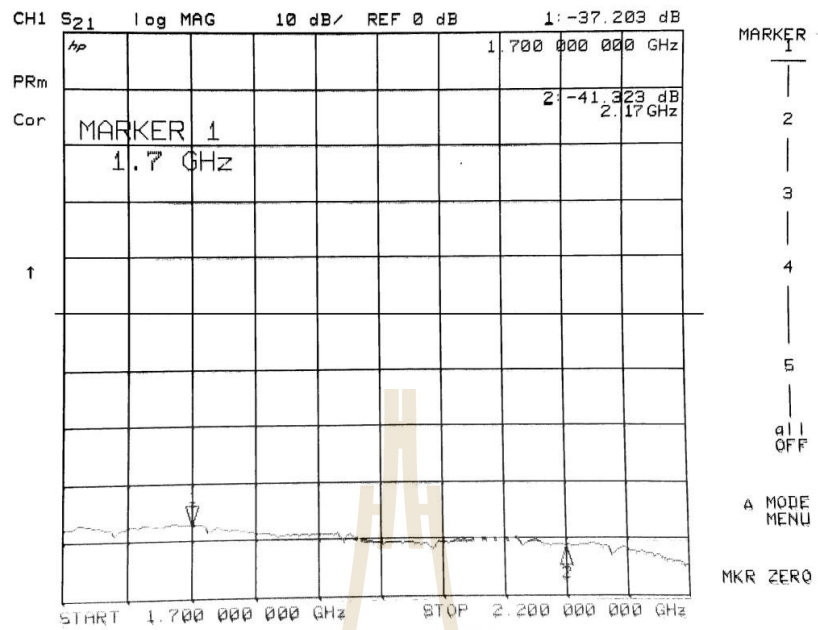


รูปที่ 4.16 การจัดวางอุปกรณ์ในการวัดผล ย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz

- 1) เริ่มจากรวัดทดสอบค่า S_{21} โดยการส่งผ่านอากาศว่าง ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.17 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านอากาศว่างย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz

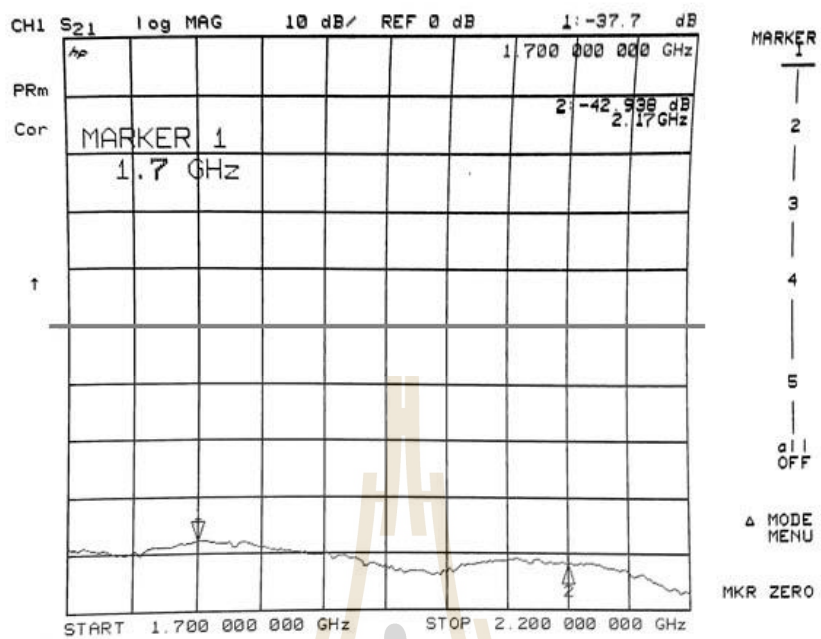


รูปที่ 4.18 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านอากาศว่างย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz

2) วัดทดสอบค่า S_{21} โดยการผ่านกระจกใส ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.19 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกใสาย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz

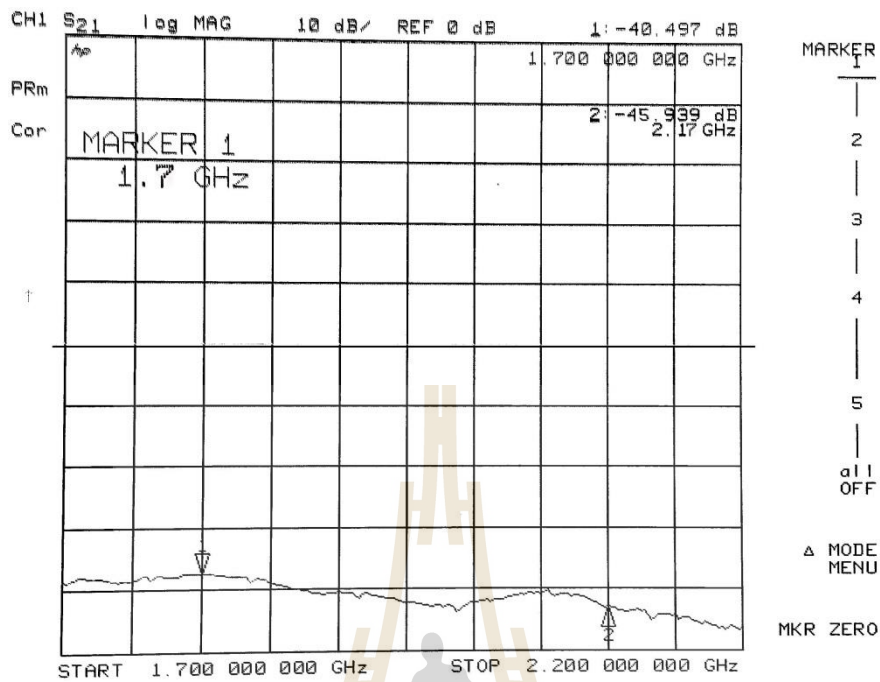


รูปที่ 4.20 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกใส่ย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz

- 3) วัดทดสอบค่า S_{21} ผ่านชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงาน ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.21 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกประหยัดพลังงานย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz

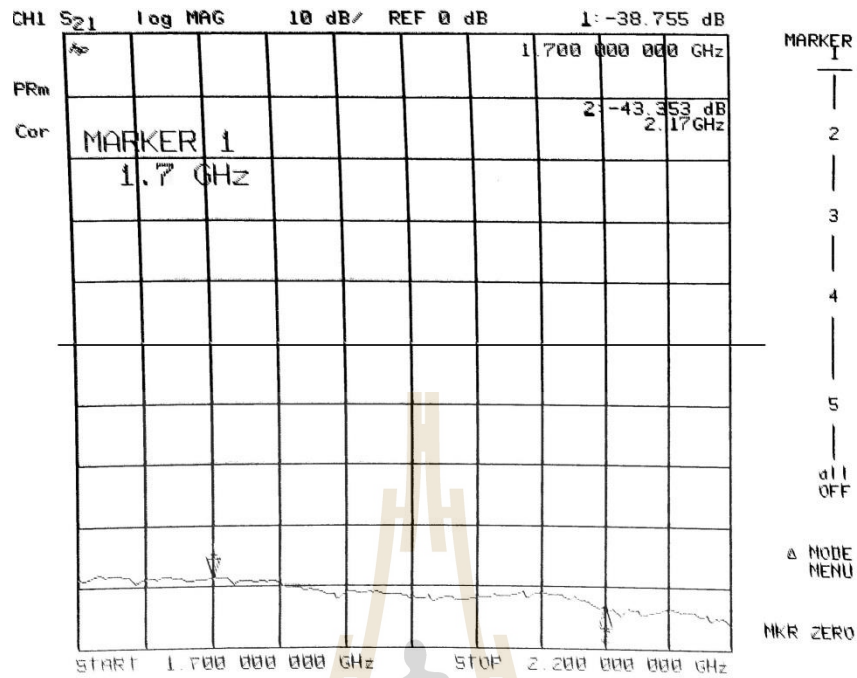


รูปที่ 4.22 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกประหยัดพลังงานย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz

4) วัดทดสอบค่า S_{21} ผ่านกระจกติดฟิล์ม ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



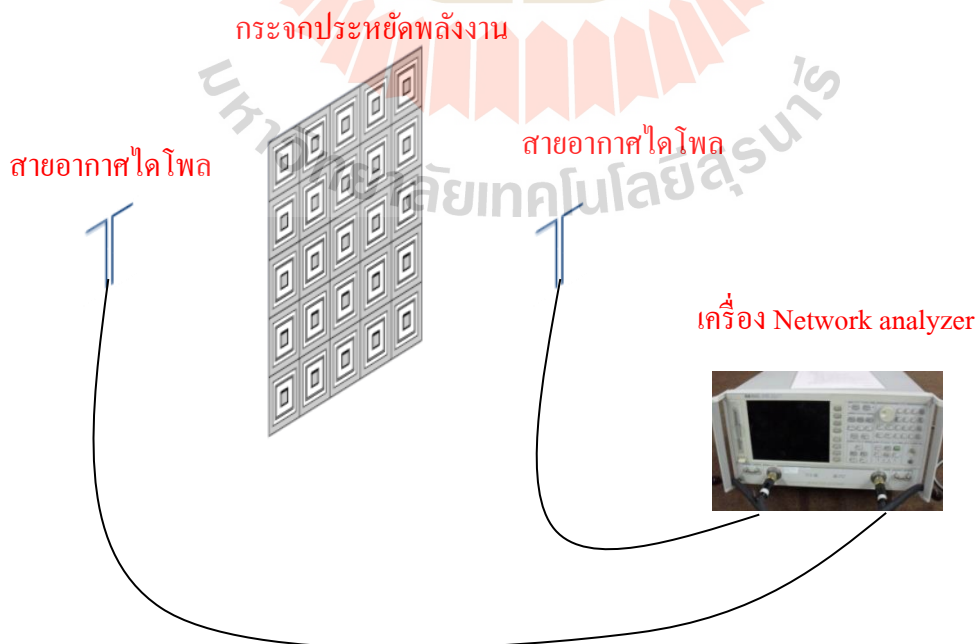
รูปที่ 4.23 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกติดฟิล์มย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz



รูปที่ 4.24 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกติดฟิล์มย่านความถี่ 1800 MHz และ 2100 MHz

4.3.2.3 วัดทดสอบย่านความถี่ 2.4 GHz ด้วยสายอากาศไดโพล

การวัดทดสอบย่านความถี่ 2.4 GHz ด้วยสายไดโพล ในหัวข้อนี้จะเริ่มจากการจัดตั้งอุปกรณ์ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.25 ดังนี้

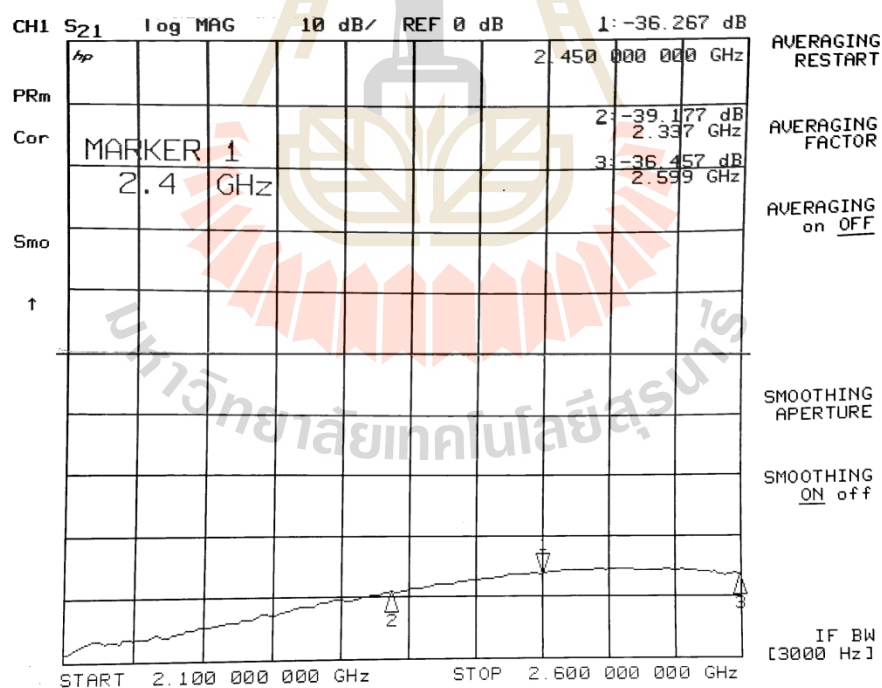


รูปที่ 4.25 การจัดวางอุปกรณ์ในการวัดผลย่านความถี่ 2.4 GHz

1) วัดทดสอบค่า S_{21} โดยการส่งผ่านอากาศว่าง ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.26 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านอากาศว่างย่านความถี่ 2.4 GHz

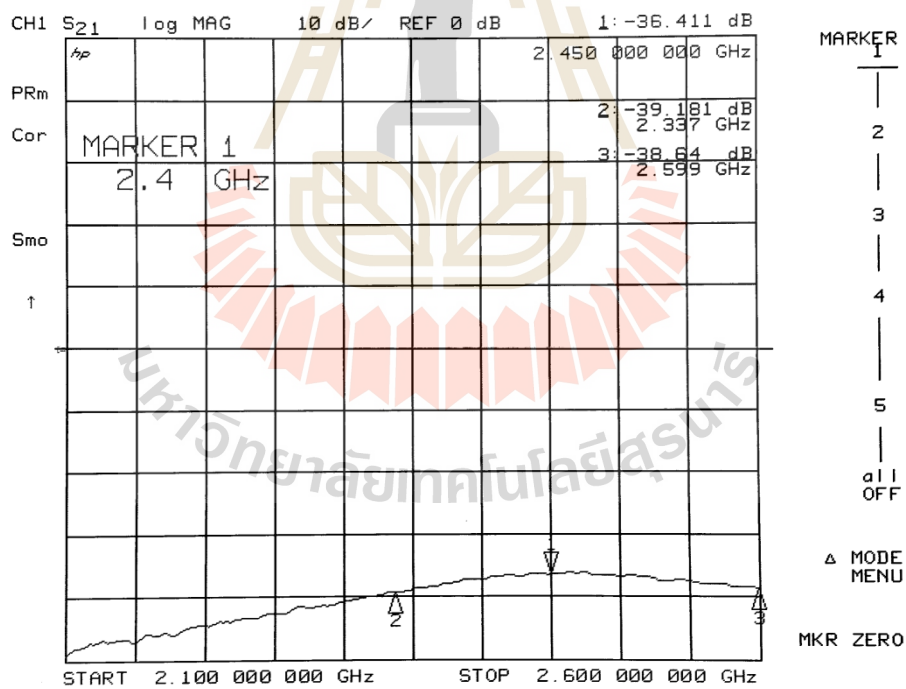


รูปที่ 4.27 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านอากาศว่างย่านความถี่ 2.4 GHz

2) วัดทดสอบค่า S_{21} ผ่านกระจกใส ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.28 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกใส่ง่ายนความถี่ 2.4 GHz

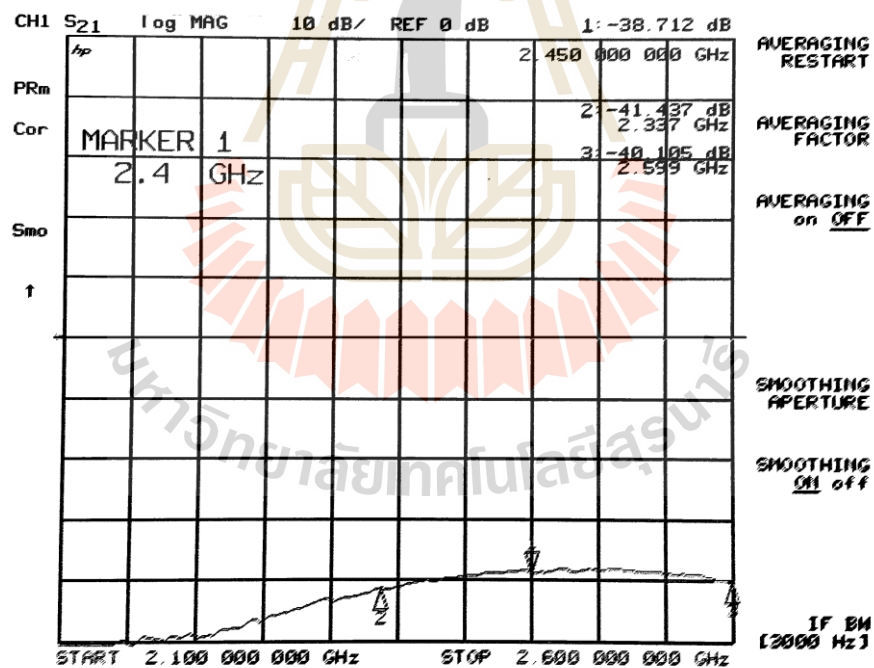


รูปที่ 4.29 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกใส่ง่ายนความถี่ 2.4 GHz

3) วัดทดสอบค่า S_{21} โดยการส่งกระแสจกประหยัดพลังงาน ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.30 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระแสจกประหยัดพลังงานย่านความถี่ 2.4 GHz

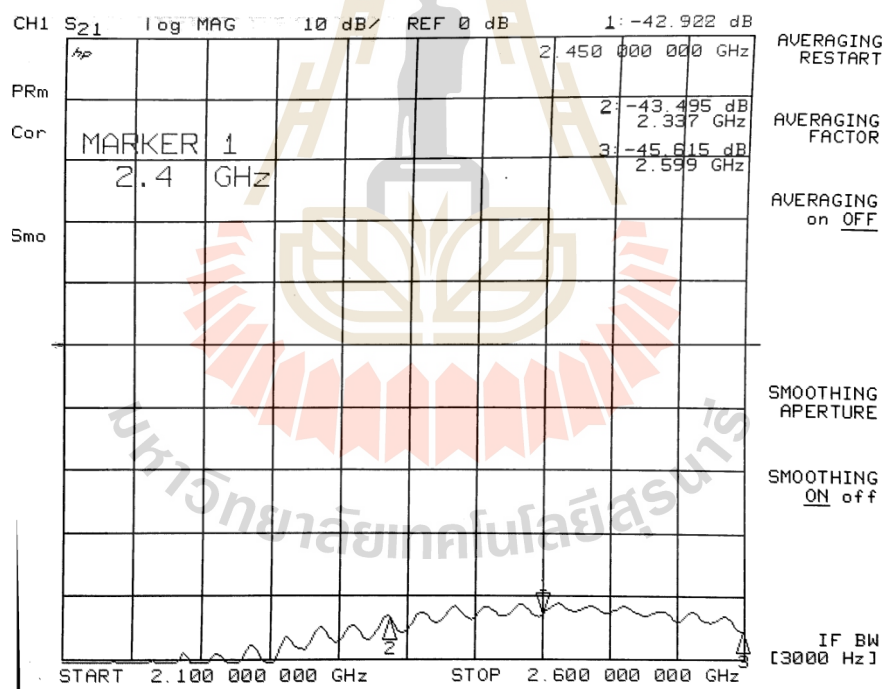


รูปที่ 4.31 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระแสจกประหยัดพลังงานย่านความถี่ 2.4 GHz

4) วัดทดสอบค่า S_{21} โดยการส่งผ่านกระจกติดฟิล์ม ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



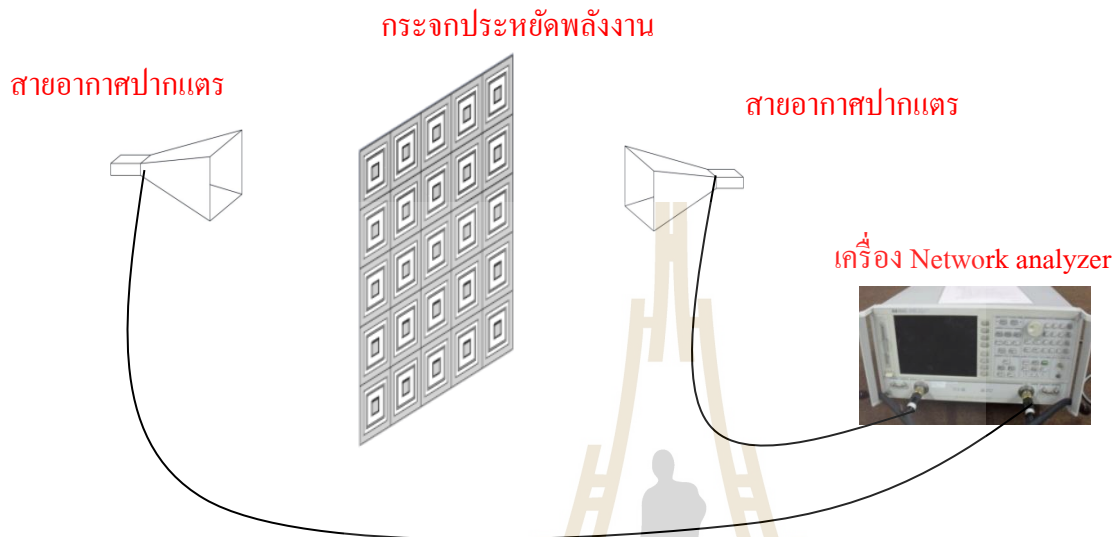
รูปที่ 4.32 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกติดฟิล์มย่านความถี่ 2.4 GHz



รูปที่ 4.33 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกติดฟิล์มย่านความถี่ 2.4 GHz

4.3.2.4 วัดทดสอบย่านความถี่ 10 GHz ด้วยสายอากาศปากแตร

การวัดทดสอบย่านความถี่ 8 GHz – 12 GHz ด้วยสายปากแตรในหัวข้อนี้จะเริ่มจากการจัดตั้งอุปกรณ์ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.34 ดังนี้

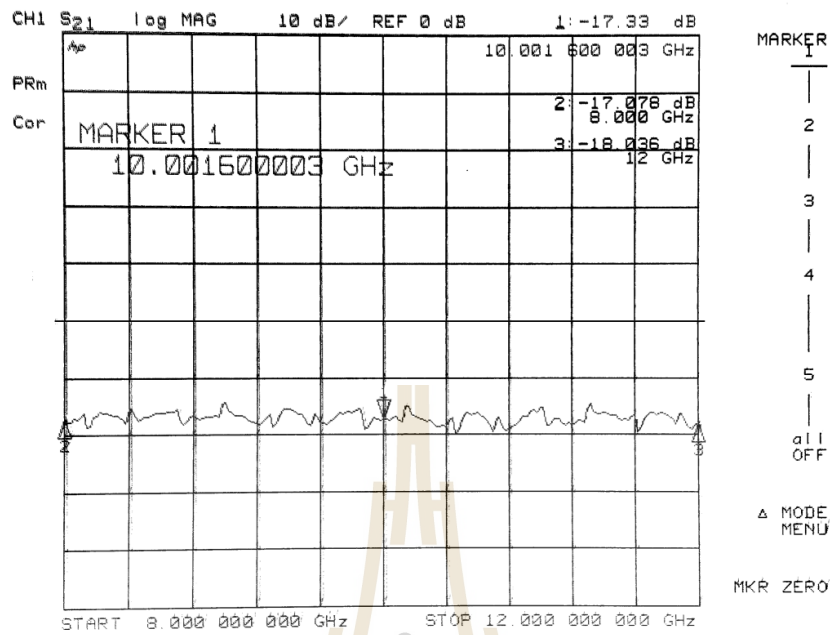


รูปที่ 4.34 การจัดวางอุปกรณ์ในการวัดผล ย่านความถี่ 10 GHz

- 1) วัดทดสอบค่า S_{21} โดยการส่งผ่านอากาศว่าง



รูปที่ 4.35 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านอากาศว่างย่านความถี่ 10 GHz

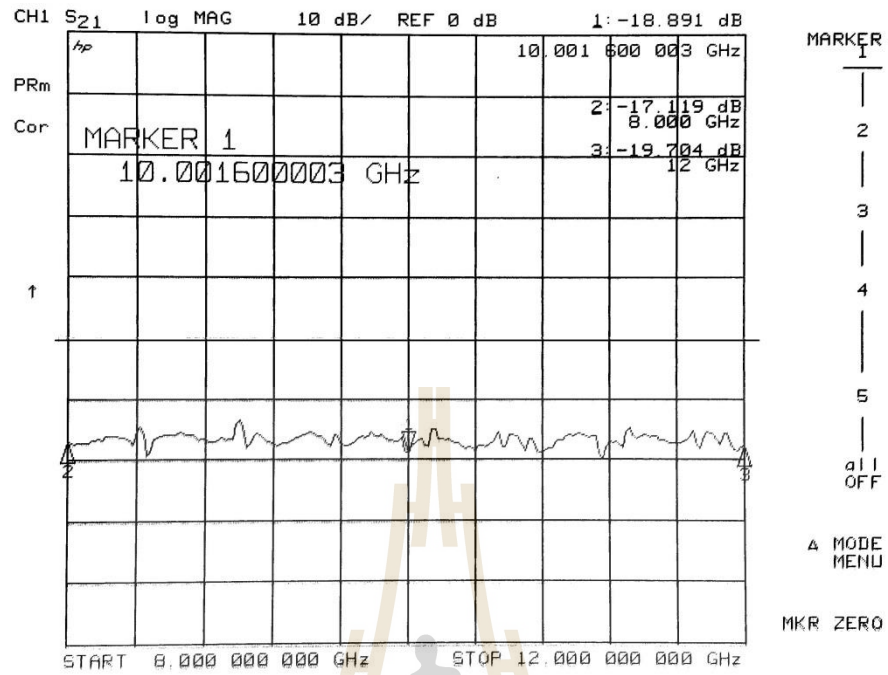


รูปที่ 4.36 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านอากาศว่างย่านความถี่ 10 GHz

2) วัดทดสอบค่า S_{21} ผ่านกระจกใส ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.37 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกใสายานความถี่ 10 GHz

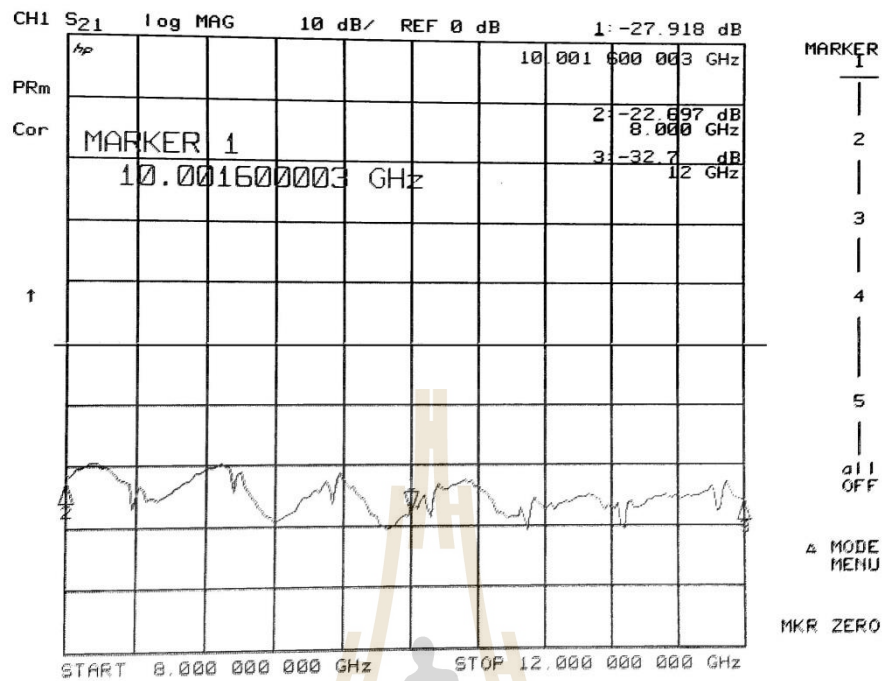


รูปที่ 4.38 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกใสย่านความถี่ 10 GHz

วัดทดสอบค่า S_{21} ผ่านชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงาน ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.39 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกประหยัดพลังงานย่านความถี่ 10 GHz

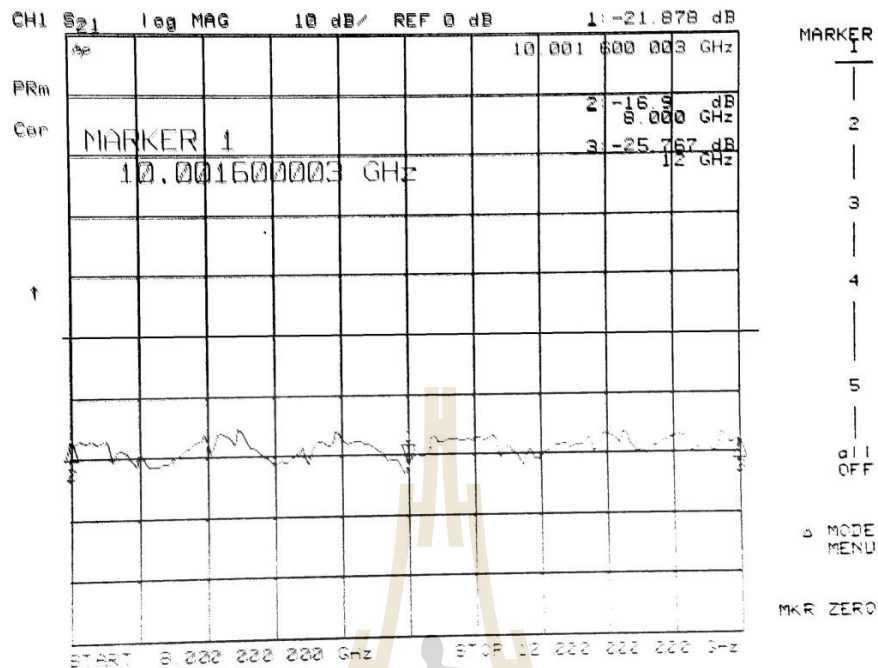


รูปที่ 4.40 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกประหยัดพลังงานย่านความถี่ 10 GHz

- 3) วัดทดสอบค่า S_{21} โดยการส่งผ่านกระจกติดฟิล์ม ซึ่งแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.41 การวัดผล S_{21} ส่งผ่านกระจกติดฟิล์มย่านความถี่ 10 GHz



รูปที่ 4.42 ผลการวัดทดสอบ S_{21} ส่งผ่านกระจกติดฟิล์มย่านความถี่ 10 GHz

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดทดสอบการส่งผ่านคลื่นในย่านต่างๆ

ชนิด สายอากาศ	อัตราขยาย (dBi)	ความถี่ (GHz)	ค่าพารามิเตอร์ S_{21} ที่ผ่านวัสดุต่างๆ (dB)			
			อากาศว่าง	กระจกใส	ชิ้นงานกระจก ประหยัดพลังงาน	กระจกติดฟิล์ม
ไดโพล	3.5	0.79	-31.495	-34.634	-35.679	-42.839
		0.96	-35.021	-40.859	-41.531	-46.584
ยาگی	20	1.71	-37.203	-37.7	-38.755	-40.497
		2.17	-41.323	-42.938	-43.353	-45.939
ไดโพล	4.5	2.4	-39.177	-36.411	-38.712	-42.922
ปากแตร	13	8	-17.078	-17.119	-22.697	-16.900
		10	-17.330	-18.891	-27.918	-21.878
		12	-19.704	-19.704	-32.700	-25.767

วิเคราะห์ผลวัดทดสอบการส่งผ่านคลื่นในย่านต่างๆ

จากผลการวัดการส่งผ่านคลื่นที่ผ่านตัวกลางชนิดต่างๆ นำมาเปรียบเทียบกับผลจากการส่งผ่านคลื่นผ่านชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงาน พบว่า สายอากาศไดโพล อัตราขยาย (Gain) เท่ากับ 3.5 dBi ความถี่ 790 MHz และ 960 MHz ชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงานส่งผ่านคลื่นค่า S_{21} ต่างจากการส่งผ่านคลื่นผ่านอากาศว่างอยู่ โดยมีการสูญเสียต่างจากอากาศว่างแค่ -1.045 dB และ -0.672 dB ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นค่าการสูญเสียที่น้อยมาก และยังพบว่าชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงานส่งผ่านคลื่นที่ความถี่ 790 MHz และ 960 MHz ได้ดีกว่ากระจกติดฟิล์ม

สายอากาศยาก็อูตะ อัตราขยาย (Gain) เท่ากับ 20 dB ความถี่ 1710 MHz และ 2170 MHz ชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงานส่งผ่านคลื่นค่า S_{21} ต่างจากการส่งผ่านคลื่นผ่านอากาศว่างอยู่ โดยมีการสูญเสียต่างจากอากาศว่างแค่ -1.055 dB และ -0.415 dB ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นค่าการสูญเสียที่น้อยมาก และยังพบว่าชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงานส่งผ่านคลื่นที่ความถี่ 1710 MHz และ 2170 MHz ได้ดีกว่ากระจกติดฟิล์ม

สายอากาศไดโพล อัตราขยาย (Gain) เท่ากับ 4.5 dB ความถี่ 2.4 GHz ชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงานส่งผ่านคลื่น S_{21} โดยมีส่งผ่านได้ดีกว่าอากาศว่าง 2.301 dB ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ดีมาก และยังพบว่าชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงานส่งผ่านคลื่นที่ความถี่ 2.4 GHz ได้ดีกว่ากระจกติดฟิล์ม

สายอากาศปากแตร อัตราขยาย (Gain) เท่ากับ 13 dB ความถี่ 8 GHz , 10 GHz และ 12 GHz ชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงานส่งผ่านคลื่นค่า S_{21} ต่างจากการส่งผ่านคลื่นผ่านอากาศว่างอยู่ โดยมีการสูญเสียต่างจากอากาศว่าง -5.578 dB -9.027 dB -12.996 dB ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นค่าการสูญเสียที่เยอะขึ้นเรื่อยๆตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น เพราะว่าเป็นช่วงความถี่ที่ไม่ได้ถูกออกแบบ และยังพบว่าชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงานส่งผ่านคลื่นที่ ได้ต่ำกว่ากระจกติดฟิล์มลงเรื่อยๆตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

4.4 สรุปผลทดสอบ

การเปรียบเทียบผลการวัดค่าพารามิเตอร์ S_{21} ของหน้าต่างประหยัดพลังงานที่ได้ออกแบบจากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO ซึ่งจะเห็นได้ว่า หน้าต่างประหยัดพลังงาน สามารถส่งผ่านคลื่นความถี่ในย่าน 800 MHz 900 MHz 1800 MHz 2100 MHz และ 2.4 GHz ได้จริง และพบว่าการลดทอนการส่งผ่านตามความถี่ที่สูงขึ้น

จากการวัดอุณหภูมิพบว่าหน้าต่างประหยัดพลังงานสามารถลดอุณหภูมิเมื่อเทียบกับกระจกใสได้ 1.86 องศาเซลเซียส และเมื่อเทียบกับกระจกติดฟิล์ม หน้าต่างประหยัดพลังงานสามารถลดอุณหภูมิได้ถึง 2.71 องศาเซลเซียส เพราะฉะนั้นชิ้นงานสามารถลดอุณหภูมิความร้อนจากแสงอาทิตย์ได้จริงตามจุดประสงค์

บทที่ 5

บทสรุป

บทนี้จะกล่าวถึงสรุปผลการออกแบบและผลการวัดทดสอบกระจกประหยัดพลังงาน และแสดงข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

5.1. สรุปผลการวิจัย

จากการจัดทำกระจกประหยัดพลังงาน จะเริ่มตั้งแต่การออกแบบจากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO โดยนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากสูตรการคำนวณมาใช้ในการออกแบบ ซึ่งในช่วงแรกของการออกแบบพบว่า ผลการจำลองแบบในครั้งแรกยังไม่ได้ผลตามที่ต้องการ จึงต้องทำการค่อยๆ ปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของชิ้นงาน จนได้ผลการจำลองแบบตามที่ต้องการ จากนั้นทำชิ้นงานต้นแบบจริงตามที่ออกแบบจากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO และนำชิ้นงานต้นแบบไปวัดทดสอบผล

จากผลการทดสอบชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงาน พบว่าสามารถส่งผ่านคลื่นความถี่ในย่าน 800 MHz 900 MHz 1800 MHz 2100 MHz และ 2.4 GHz ได้จริง และมีการลดทอนการส่งผ่านเมื่อความถี่สูงขึ้น

จากการวัดอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานกระจกประหยัดพลังงานเมื่อมาจำลองในระบบแบบปิดจะช่วยให้เครื่องปรับอากาศทำงานได้น้อยลงเมื่อเทียบกับกระจกใส ลดอุณหภูมิจากเดิมได้ 1.86 องศาเซลเซียส ถึง 3.14 องศาเซลเซียส คิดเป็นการประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ร้อยละ 18.6 และชิ้นงานประหยัดพลังงานช่วยให้เครื่องปรับอากาศทำงานได้น้อยลงเมื่อเทียบกับกระจกติดฟิล์ม ลดอุณหภูมิจากเดิมได้ 1.03 องศาเซลเซียส ถึง 2.71 องศาเซลเซียส ถือเป็นการประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ร้อยละ 10.3 นอกจากนี้แสงสว่างจากข้างนอกสามารถเข้ามาภายในอาคาร ซึ่งจะเป็นการลดการใช้ไฟฟ้าในระบบแสงสว่างได้ จึงสรุปได้ว่างานวิจัยกระจกประหยัดพลังงานที่ออกแบบและสร้างขึ้นมานั้นสามารถใช้งานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ และมีประสิทธิภาพตามที่ออกแบบมาเพื่อการใช้งานจริง

และในบทนี้ยังกล่าวถึงปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน วิธีการแก้ไข ข้อเสนอแนะ และวิธีการพัฒนางานวิจัยต่อไปของงานวิจัยหน้าต่างประหยัดพลังงาน

5.2 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไข

ในการทำวิจัยกระจกประหยัดพลังงาน ปัญหาที่พบได้บ่อยๆ แสดงดังตารางที่ 5.1 ซึ่งประกอบด้วยปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน สาเหตุของปัญหา และวิธีการแก้ไขปัญหา

ตารางที่ 5.1 ปัญหาและสาเหตุที่พบในขณะดำเนินงานและวิธีการแก้ไข

ปัญหาที่พบ ในขณะ ดำเนินงาน	สาเหตุและวิธีการแก้ไข
1.การออกแบบ ชิ้นงานโดยใช้ โปรแกรม CST	<p>สาเหตุ เนื่องจากมีหลายความถี่ เมื่อมีการเปลี่ยนความถี่ใดความถี่หนึ่งในโปรแกรม จะทำให้ความถี่ที่ถูกออกแบบไว้แล้วเปลี่ยนตามไปด้วย</p> <p>วิธีแก้ไขปัญหา หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และ S_{21} ให้ได้</p>
2. การสร้าง ชิ้นงานจริง	<p>สาเหตุ</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.เนื่องจากชิ้นงานต้องใช้สติกเกอร์ทองแดงมีราคาสูงมาก และหาซื้อตามร้านทั่วไปยาก 2.ต้องใช้สติกเกอร์แปะลงบนกระจกให้ตรงตามที่ออกแบบ ในขณะที่แปะสติกเกอร์มีการเบี้ยวไปมาจึงทำให้ผลการวัดมีความคลาดเคลื่อน <p>วิธีแก้ไขปัญหา</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.นำสติกเกอร์อลูมิเนียมมาที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน เพราะมีราคาถูก 2.ออกแบบชิ้นงานจากโปรแกรม Corel Draw เพื่อใช้ในการตัดสติกเกอร์ แล้วนำมาติดทับบนกระจก ลอกสติกเกอร์เฉพาะส่วนที่ถูกออกแบบไว้ออกจากนั้นพ่นสีสเปรย์โลหะอลูมิเนียมทับบริเวณที่ลอกออกแทนเพื่อความแม่นยำ
3. ในการวัดค่า S_{21} เมื่อมีชิ้นงาน กั้นระหว่าง สายอากาศ 2 ตัว เกิดความ คลาดเคลื่อนและ ผิดเพี้ยน	<p>สาเหตุ</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. อาจเกิดจากการความไม่ประณีตในการติดตั้งอุปกรณ์ 2. ความไม่แม่นยำในการอ่านค่า 3. เกิดจากการรบกวนของสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ในบริเวณที่ทำการทดสอบ <p>วิธีแก้ไขปัญหา</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. มีความประณีตบรรจงในการติดตั้งอุปกรณ์ 2. เพิ่มความแม่นยำในการอ่านค่ามากขึ้น 3. ในขณะที่วัด ควรหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนดังกล่าว เช่น การปิดโทรศัพท์เคลื่อนที่ในขณะที่ทำการทดสอบ

5.3. ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในการออกแบบ FSS ด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO มีการใช้งานทรัพยากรของเครื่องสูง สามารถสังเกตได้จากกราฟการทำงานของหน่วยประมวลผลกลางจาก task manager ของ windows ผู้ใช้งานควรใช้งานโปรแกรมนี้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูง

5.3.2 ในการวัดขนาด การตัดและพันสเปรย์โลหะนั้นควรทำด้วยความปราณีต ไม่เร่งรีบและพันให้สม่ำเสมอทั่วแผ่นกระจก เพื่อให้ลวดวงจรที่ได้ออกมานั้นมีความเหมือนจริงกับที่ออกแบบมากที่สุด

5.3.3 ในการจัดตั้งอุปกรณ์ในการวัดค่ารูปแบบการส่งผ่านคลื่นนั้น ควรตั้งให้ดีโดยเฉพาะสายอากาศที่ใช้งาน ควรวางให้ตรงกัน ผลการวัดจะได้ไม่มีความคลาดเคลื่อนมากนัก

5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

เนื่องจากกระจกที่นำมาออกแบบเป็นกระจกธรรมดา ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาเป็นหน้าต่างประหยัดพลังงานที่มีประสิทธิภาพกว่านี้ได้ เพื่อจะช่วยให้การประหยัดพลังงานไฟฟ้ามากขึ้นภายในสถานที่นั้นๆ ด้วย



บรรณานุกรม

- [1] Pipat Chaivivatvorakul et al., “Energy management system through the economic crisis (ระบบการจัดการพลังงานฝ่าวิกฤติเศรษฐกิจ),” <http://www.thaienergy.org/>.
- [2] European Commission’s Market Observatory for Energy, “2009 Annual Report of the Market Observatory for Energy”, Luxembourg, 2010, ISBN 978-92-79-14175-1.
- [3] Andreas H., Lorenzo P., Karsten V. et.all, “Towards nearly zero-energy build-ings: Definition of common principles under the EPBD”, Project no. BESDE10788, Ecofys Germany GmbH, 14.2.2013.
- [4] William C. Stone, “Electromagnetic Signal Attenuation in construction Materi-als”, NIST Construction Automation Program Report No. 31997, USA, 1997.
- [5] Ari Asp, Yaroslav Sydorov, Mikko Valkama, Jarno Niemelä, “Radio Signal Propagation and Attenuation measurements for Morden Residential Buildings”, In: GC 2012 workshop: The 4th IEEE International workshop on Heterogeneous and Small Cell Networks. IEEE (2012).
- [6] G.H.H. Sung, K.W. Sowerby, A.G. Williamson, “The impact of frequency se-lective surfaces applied to standard wall construction materials”, International Symposium on Antennas and Propagation, 2004.
- [7] M. Raptopoulos, S. Stavrou, “Frequency Selective Buildings through Fre-quency Selective Surfaces” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011.
- [8] G.I. Kiani, A. Karlsson, L. Olsson, K.P. Esselle, “Glass Characterization for Designing Frequency Selective Surfaces to Improve Transmission through Energy Saving Glass Windows”, APMC Microwave Conference, 2007.
- [9] B. Widenberg, S. Poulsen, and A. Karlsson, “The design of window panes with high transmission at 900 MHz and 1800 MHz,” in Antenna 00, Nordic Antenna Symposium, Lund, Sweden, pp. 185–190, 2000.
- [10] J.C. Batchelor, E.A. Parker, B. Sanz-Izquierdo, J.B. Robertson, I.T. Ekpo and A.G. Williamson, “Designing FSS for Wireless Propagation Control within Buildings,” Antennas & Propagation Conference, Loughborough, 2009.
- [11] T.K. Wu, “Frequency Selective Surface and Grid Array”, John Wiley and Sons, Inc., 1995, ISBN 0-471-31189-8.
- [12] Hui-Hsia Sung, “Frequency Selective Wallpaper for Mitigating Indoor Wireless Interference”, University of Auckland, 2006.
- [13] Salvatore Celozzi, Rodolfo Araneo and Giampiero Lovat, “Electromagnetic Shielding” John Wiley & Sons, Inc., 2008, ISBN: 978-0-470-05536-6.

- [14] C. Mias, C. Tsakonas and C. Oswald, "An Investigation into the Feasibility of designing Frequency Selective Windows employing periodic structures (Ref. AY3922)", Final Report for the Radio communications Agency, The Nottingham Trent University, U.K.
- [15] Ben A. Munk, "Frequency Selective Surfaces: Theory and Design", John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000, ISBN 0-471-37047-9 (alk. Paper).
- [16] Zhong Ming Tan and Kirk T. McDonald, "Babinet's Principle for Electromagnetic Fields" Joseph Henry Laboratories, Princeton University, January 19, 2012.
- [17] B.A. Munk, R. Kouyoumjian, and L. Peters Jr., "Reflection Properties of Periodic Surfaces of Loaded Dipoles," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-19, pp. 612-617, September 1971.
- [18] John David Shumpert, "Modelling of Periodic Dielectric Structures (Electromagnetic Crystals)", University of Michigan, 2001.
- [19] Marios Raptopoulos and Stavros Stavrou, "Frequency Selective Buildings Through Frequency Selective Surfaces", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 59, no. 8, August 2011.
- [20] U. Rafique, M. M. Ahmed, M. A. Haq and M. T. Rana, "Transmission of RF Signals through Energy Efficient Window Using FSS", Emerging Technologies (ICET), Seventh International Conference, 2011.
- [22] CST Microwave Studio 2012, [accessed on 5.2.2014]. Available at: <https://www.cst.com/Contents/Products/MWS/Overview.aspx>.
- [23] G.I. Kiani, A. Karlsson, L. Osslon, K.P. Esselle, and M. Nilson, "Transmission of infrared and visible wavelengths through energy-saving glass due to etching of frequency selective surfaces", IET Microwaves, Antennas, and Propagation, vol. 4, no. 7, July 2010.
- [24] Irfan Ullah, Xiaoli Zhao, Daryoush Habibi and Ghaffer Kiani, "Transmission Improvement of UMTS and Wi-Fi Signals Through Energy Saving Glass Using FSS", 2011.
- [25] Ghaffer I. Kiani, Lars G. Olsson, Anders Karlsson, Karu P. Esselle and Martin Nilsson, "Cross-Dipole Bandpass Frequency Selective Surface for Energy-Saving Glass Used in Buildings", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 59, no. 2, February 2011.
- [26] Irfan Ullah, Xiaoli Zhao, Daryoush Habibi and Ghaffer Kiani, "Transmission Improvement of UMTS and Wi-Fi Signals Through Energy Saving Glass Using FSS", Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), 2011.
- [27] Simon R. Saunders and Alejandro Aragon Zavala, 'Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems' Second edition, John Wiley & Sons, Ltd., 2007, ISBN: 978-0-470-84879-1.

- [28] J.D. Parsons, 'The Mobile Radio Propagation Channel', Second Edition, John Wiley & Sons Ltd., 2000, ISBN: 978-0-471-98857-1.
- [29] D. K. Cheng, "Field and Wave Electromagnetics," 2nd ed. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., United States of America, 1992, ISBN 0-201-01239-1.
- [30] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, "Antenna Theory and Design," Second edition, John Wiley & Sons Inc., United States of America, 1998, ISBN 0-471-04458-X.
- [31] David M. Pozar, "Microwave Engineering", Third edition, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-44878-8, 205.
- [32] Yi Huang and Kevin Boyle, "Antennas: From Theory to Practice", John Wiley & Sons, Inc., U.K., ISBN 978-0-470-51028-5, 2008.
- [33] C.A. Balanis, "Antenna theory, Analysis and Design", Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2005, ISBN 978-0-470-51028-5.
- [34] J.D. Kraus, "Antennas", Second edition, Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd., New Delhi, 1997, ISBN 0-07-035422-7.
- [35] Theodore S. Rappaport, "Wireless Communications-Principles and Practice", Second Edition, Prentice-Hall, Inc. 2002, ISBN 0-13-042232-0.
- [36] Simon R. Saunders and Alejandro Arajon Zavala, "Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems", Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd., 2007, ISBN 978-0-470-84879-1.
- [37] Peng Wu et al., "Use of Frequency-Selective Surface for Suppressing Radio-Frequency Interference from Wireless Charging", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 61, NO. 8, AUGUST 2014.

ประวัติผู้เขียน

รศ.ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ เกิดเมื่อ 9 กันยายน 2517 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี 2540 และต่อมาได้ศึกษาระดับปริญญาโทต่อด้วยทุนส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษเป็นอาจารย์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้าสื่อสาร) จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเมื่อปี 2550 ได้สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่สนใจได้แก่ เทคโนโลยีสายอากาศ

