



A DESIGN AND CREATION OF AN OPTICAL TRANSMISSION DEVICE  
IN RING RESONATOR



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN APPLIED PHYSICS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
DEPARTMENT OF PHYSICS

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่เอกสารนี้ไปโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2014

หัวข้อโครงการพิเศษ การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ส่งสัญญาณแสงในวงแหวนสั่นพ้อง  
 A DESIGN AND CREATION OF AN OPTICAL TRANSMISSION  
 DEVICE IN RING RESONATOR

ชื่อนักศึกษา นางสาวธนภัทร หอมระรื่น รหัสนักศึกษา 54050533

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2557

อาจารย์ที่ปรึกษา อ. กिरยูทธ์ ศรีนวลจันทร์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์  
 ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร. ประธาน บุรณศิริ	
อ. ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง	
อ. สุรชาติ กมลติลก	
อ. กिरยูทธ์ ศรีนวลจันทร์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ส่งสัญญาณแสงในวงแหวนสั่นพ้อง
ชื่อนักศึกษา	นางสาวธนภัทร หอมระรื่น รหัสนักศึกษา 54050533
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ. กिरยูทธ์ ศรีนวลจันทร์

### บทคัดย่อ

ในโครงงานพิเศษนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีการส่งสัญญาณแสงในวงแหวนสั่นพ้อง โดยการหาค่ารัศมีในการสั่นพ้องจากการจำลองแบบวงแหวนสั่นพ้องโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Optiwave โดยหลักการ Finite Difference Time Domain Method หรือ FDTD จากนั้นนำแบบไปที่ได้ขยายขนาดขึ้นและทำการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลองและผลจากโปรแกรม ซึ่งจากผลที่ได้มาในตอนที่ 1 ที่ความยาวคลื่น 650 nm ได้รัศมี 7.40  $\mu\text{m}$  ที่ความยาวคลื่น 532 nm ได้รัศมี 6.60  $\mu\text{m}$  ที่ความยาวคลื่น 445 nm ได้รัศมี 2.15  $\mu\text{m}$  ส่วนในตอนที่ 2 นี้ได้ทำการวัดค่าเช่นเดียวกับตอนที่ 1 ซึ่งผลที่ได้ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลจากโปรแกรมในตอนที่ 3 โดยสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนั้นเป็นไปในแนวทางเดียวกับทฤษฎี หรือตรงกับที่โปรแกรมที่คำนวณไว้ ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นเหตุอันเนื่องมาจากขั้นตอนการนำแสงเข้าระบบจะมีการสูญเสียหรือที่เรียกว่า Coupler Loss นั้นเอง

คำสำคัญ : พีเอ็มเอ็มเอ, วงแหวนสั่นพ้อง, เอฟดีทีดี, อุปกรณ์ออปติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	A DESIGN AND CREATION OF AN OPTICAL TRANSMISSION DEVICE IN RING RESONATOR
Students	MissTanapat Homrarueng Student ID 54050533
Degree	Bachelor of Science Applied Physics
Department	Physics
Academic Year	2014
Advisor	Mr.Keerayoot Srinuanjan

### ABSTRACT

In this special project, we have studied the theory of optical signals in the ring resonator to finding the radius of the resonance of a replication ring resonator. By using a mathematical model base on Finite Difference Time Domain Method or FDTD method from Optiwave Programming. Then bring to the enlarged and compared the results. The trials and results of the program the results came in part 1 at wavelength range 650 nm was 7.40  $\mu\text{m}$  wavelength range 532 nm which has a radius of 6.60  $\mu\text{m}$  and wavelength range 445 nm is 2.15  $\mu\text{m}$ . In the two, measurements are the same part 1. The results were compared with results from the program, it can be concluded that the models built equipment that is in line with the theory. Or to match the program calculated. The discrepancies occurred due to the introduction of light into the system is lost also known as the Coupler Loss.

Keyword : FDTD, Optical device, PMMA, Ring Resonator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาจาก อ.กฤษฎ์ ศรี  
นวลจันทร์ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษซึ่งได้ชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาตลอด  
การทำโครงการ

ขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำชี้แนะในการดำเนินงาน

ขอบพระคุณห้องปฏิบัติการฟิสิกส์เบื้องต้น สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์เครื่องมือในการปฏิบัติงาน

ขอขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ที่ได้ให้เงินทุนสำหรับสนับสนุนบางส่วนในการทำโครงการนี้

ขอบคุณรุ่นพี่ และเพื่อนๆ ที่ได้ช่วยเหลือทั้งการให้คำปรึกษาและกำลังใจในการทำโครงการ  
ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ ครอบครัวผู้เป็นที่รัก ผู้ให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือและให้  
โอกาสการศึกษาอันมีค่ายิ่งนี้

นางสาวธนภัทร หอมระรื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	4
2.2 สมการคลื่น	5
2.2.1 คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ	5
2.2.2 คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลาง	6
2.3 การสะท้อนกลับหมดของคลื่นแสง (Total Internal Reflection)	8
2.4 ท่อนำคลื่น (Waveguide)	9
2.5 เส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Optic)	9
2.6 การแทรกสอด (Interference)	10
2.7 ทฤษฎีวงแหวนสั่นพ้อง (Optical ring resonator)	11
2.8 การสูญเสียสัญญาณภายในเส้นใยแก้วนำแสง	12
2.9 อุปกรณ์ในการสร้างเครื่องมือ	14
2.9.1 PMMA	14
2.9.2 เลเซอร์ไดโอด (Laser Diode)	16
2.9.3 โฟโตทรานซิสเตอร์	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	18
3.1 พื้นฐานของวิธีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชนิดเวลาไม่ต่อเนื่อง หรือ Finite Difference Time Domain (FDTD)	18
3.2 สมการของการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ชนิดเวลาไม่ต่อเนื่อง (FDTD) ในสองมิติ	19
3.3 ขั้นตอนการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ด้วย OptiFDTD	20
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	21
3.4.1 PMMA ใส	21
3.4.2 เลเซอร์ไดโอด	22
3.4.3 โวลต์มิเตอร์	23
3.4.4 โฟโตทรานซิสเตอร์	23
3.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	24
3.5.1 การออกแบบวงแหวนสั่นพ้องในโปรแกรม OptiFDTD	25
3.5.2 ทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์	29
3.5.3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองในโปรแกรม และแบบจำลองอุปกรณ์	33
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	34
4.1 การออกแบบวงแหวนสั่นพ้องใน OptiFDTD	34
4.2 ทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์	43
4.3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองในโปรแกรมและแบบจำลองอุปกรณ์	49
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุปผลการวิจัย	58
5.2 ข้อเสนอแนะ	58
บรรณานุกรม	59
ภาคผนวก	60
ภาคผนวก ก	61
ภาคผนวก ข	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
4.3.1 ตารางแสดงค่า Loss จากการ Simulation ของโปรแกรม, การทดลองกับแบบจำลอง เสมือน และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ความยาวคลื่น 650 nm รัศมี 2.15 cm	49
4.3.2 ตารางแสดงค่า Loss จากการ Simulation ของโปรแกรม, การทดลองกับแบบจำลอง เสมือน และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ที่ความยาวคลื่น 650 nm รัศมี 6.60 cm	50
4.3.3 ตารางแสดงค่า Loss จากการ Simulation ของโปรแกรม, การทดลองกับแบบจำลอง เสมือน และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ที่ความยาวคลื่น 650 nm รัศมี 7.40 cm	51
4.3.4 ตารางแสดงค่า Loss จากการ Simulation ของโปรแกรม, การทดลองกับแบบจำลอง เสมือน และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ที่ความยาวคลื่น 532 nm รัศมี 2.15 cm	52
4.3.5 ตารางแสดงค่า Loss จากการ Simulation ของโปรแกรม, การทดลองกับแบบจำลอง เสมือน และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ที่ความยาวคลื่น 532 nm รัศมี 6.60 cm	53
4.3.6 ตารางแสดงค่า Loss จากการ Simulation ของโปรแกรม, การทดลองกับแบบจำลอง เสมือน และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ที่ความยาวคลื่น 532 nm รัศมี 7.40 cm	54
4.3.7 ตารางแสดงค่า Loss จากการ Simulation ของโปรแกรม, การทดลองกับแบบจำลอง เสมือน และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ที่ความยาวคลื่น 445 nm รัศมี 2.15 cm	55
4.3.8 ตารางแสดงค่า Loss จากการ Simulation ของโปรแกรม, การทดลองกับแบบจำลอง เสมือน และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ที่ความยาวคลื่น 445 nm รัศมี 6.60 cm	56
4.3.9 ตารางแสดงค่า Loss จากการ Simulation ของโปรแกรม, การทดลองกับแบบจำลอง เสมือน และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ที่ความยาวคลื่น 445 nm รัศมี 7.40 cm	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 มุมที่เล็กกว่าคือมุมปกติ (สีแดง) มุมที่ใหญ่กว่าคือ มุมที่สะท้อนกลับทั้งหมด (สีน้ำเงิน) (สีนั้นแยกเพื่อช่วยเกิดความเข้าใจ ไม่เกี่ยวข้องกับสีของแสง)	8
2.2 การสะท้อนกลับทั้งหมดในบล็อกกรวยยาว ที่ทำจากวัสดุ PMMA	8
2.3 ท่อนำคลื่นแบบกลาง (ไม่มีตัวนำตรงกลาง) และท่อนำคลื่นแบบเส้นใยแก้วนำแสง	9
2.4 เส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (Single mode Optic Fiber, SM) และชนิดหลายโหมด (Multimode Optic Fiber, MM)	9
2.5 การรวมกันแบบเสริมกัน (Constructive Interference) และการรวมกันแบบหักล้างกัน (Destructive Interference)	10
2.6 วงแหวนสั่นพ้อง (Optical ring resonator)	11
2.7 Throughput Loss ( $L_{TTP}$ )	12
2.8 TAP Loss ( $L_{TAP}$ )	13
2.9 Directionality Loss ( $L_D$ )	13
2.10 PMMA	14
2.11 แผ่น PMMA สีต่างๆ	15
2.12 เลเซอร์ไดโอด	16
2.13 โฟโตทรานซิสเตอร์ (a) ชนิดไม่มีขาเบส (2 ขา), (b) ชนิดมีขาเบส (3 ขา), (c) ชนิดโพโตดาร์ลิงตัน และ (d) ชนิดต่อทรานซิสเตอร์ภายนอกแบบดาร์ลิงตัน	17
3.1 แสดงการคำนวณเชิงตัวเลขของขอบเขตในสองมิติ	19
3.2 Flow Chart ของการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี FDTD ใน OptiFDTD	20
3.3 PMMA ไสขนาดกว้าง x ยาว x สูง : 0.5 cm x 16 cm x 0.5 cm	21
3.4 Ring Resonator ที่มีขนาดรัศมี (a) 2.15 cm, (b) 6.60 cm และ (c) 7.40 cm	21
3.5 เลเซอร์ไดโอด (a) ความยาวคลื่น 650 nm (สีแดง), (b) ความยาวคลื่น 532 nm (สีเขียว) และ (c) ความยาวคลื่น 445 nm (สีน้ำเงิน)	22
3.6 โวลต์มิเตอร์ รุ่น UT30B	23
3.7 โฟโตทรานซิสเตอร์รุ่น SFH 3710	23
3.8 Flow Chart ของขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	24
3.9 เลือกว่าวัสดุที่จะใช้ในการออกแบบ	25
3.10 ทำการกำหนดขนาดของฐาน	26
3.11 แสดงรูปที่ได้ทำการออกแบบในโปรแกรม OptiFDTD Designer	27
3.12 ระหว่างการแสดงผล Simulation	28
3.13 โฟโตทรานซิสเตอร์ที่บัดกรีเสร็จเรียบร้อยแล้ว	29
3.14 วงจรของโฟโตทรานซิสเตอร์โดยมีโวลต์มิเตอร์วัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม $R_{load}$	29
3.15 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม $R_{load}$ (a) 650 nm, (b) 532 nm และ (c) 445 nm	30
3.16 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม $R_{load}$ ความยาวคลื่น 650 nm (a) ขนาดรัศมี 2.15 cm, (b) ขนาดรัศมี 6.60 cm และ (c) ขนาดรัศมี 7.40 cm	31

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม $R_{load}$ ความยาวคลื่น 532 nm (a) ขนาดรัศมี 2.15 cm, (b) ขนาดรัศมี 6.60 cm และ (c) ขนาดรัศมี 7.40 cm	32
3.18 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม $R_{load}$ ความยาวคลื่น 445 nm (a) ขนาดรัศมี 2.15 cm, (b) ขนาดรัศมี 6.60 cm และ (c) ขนาดรัศมี 7.40 cm	33
4.1 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 650 nm ที่รัศมี 6.10 $\mu\text{m}$ (a) 2-Dimention (b) 3-Dimention	34
4.2 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 650 nm ที่รัศมี 6.75 $\mu\text{m}$ (a) 2-Dimention (b) 3-Dimention	35
4.3 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 650 nm ที่รัศมี 7.05 $\mu\text{m}$ (a) 2-Dimention (b) 3-Dimention	35
4.4 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 650 nm ที่รัศมี 7.10 $\mu\text{m}$ (a) 2-Dimention (b) 3-Dimention	36
4.5 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 650 nm ที่รัศมี 7.40 $\mu\text{m}$ (a) 2-Dimention (b) 3-Dimention	36
4.6 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 532 nm ที่รัศมี 5.60 $\mu\text{m}$ (a) 2-Dimention (b) 3-Dimention	37
4.7 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 532 nm ที่รัศมี 5.95 $\mu\text{m}$ (a) 2-Dimention (b) 3-Dimention	37
4.8 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 532 nm ที่รัศมี 6.60 $\mu\text{m}$ (a) 2-Dimention (b) 3-Dimention	38
4.9 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 532 nm ที่รัศมี 6.65 $\mu\text{m}$ (a) 2-Dimention (b) 3-Dimention	38
4.10 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 532 nm ที่รัศมี 6.95 $\mu\text{m}$ (a) 2-Dimention (b) 3-Dimention	39
4.11 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 445 nm ที่รัศมี 2.00 $\mu\text{m}$ (a) 2-Dimention (b) 3-Dimention	40
4.12 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 445 nm ที่รัศมี 2.10 $\mu\text{m}$ (a) 2-Dimention (b) 3-Dimention	40
4.13 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 445 nm ที่รัศมี 2.15 $\mu\text{m}$ (a) 2-Dimention (b) 3-Dimention	41
4.14 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 445 nm ที่รัศมี 2.25 $\mu\text{m}$ (a) 2-Dimention (b) 3-Dimention	41
4.15 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 445 nm ที่รัศมี 2.30 $\mu\text{m}$ (a) 2-Dimention (b) 3-Dimention	42
4.16 ผลการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ waveguide ยาว 16 cm ความยาวคลื่น 650 nm	43

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ผลจากการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ ความยาวคลื่น 650 nm ที่รัศมี 2.15 cm	43
4.18 ผลจากการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ ความยาวคลื่น 650 nm ที่รัศมี 6.60 cm	44
4.19 ผลจากการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ ความยาวคลื่น 650 nm ที่รัศมี 7.40 cm	44
4.20 ผลการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ waveguide ยาว 16 cm ความยาวคลื่น 532 nm	45
4.21 ผลจากการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ ความยาวคลื่น 532 nm ที่รัศมี 2.15 cm	45
4.22 ผลจากการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ ความยาวคลื่น 532 nm ที่รัศมี 6.60 cm	46
4.23 ผลจากการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ ความยาวคลื่น 532 nm ที่รัศมี 7.40 cm	46
4.24 ผลการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ waveguide ยาว 16 cm ความยาวคลื่น 445 nm	47
4.25 ผลจากการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ ความยาวคลื่น 445 nm ที่รัศมี 2.15 cm	47
4.26 ผลจากการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ ความยาวคลื่น 445 nm ที่รัศมี 6.60 cm	48
4.27 ผลจากการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ ความยาวคลื่น 445 nm ที่รัศมี 7.40 cm	48
4.28 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจากโปรแกรมกับค่าที่ทดลองกับแบบจำลองเสมือน ที่ความยาวคลื่น 650 nm รัศมี 2.15 cm	49
4.29 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจากโปรแกรมกับค่าที่ทดลองกับแบบจำลองเสมือน ที่ความยาวคลื่น 650 nm รัศมี 6.60 cm	50
4.30 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจากโปรแกรมกับค่าที่ทดลองกับแบบจำลองเสมือน ที่ความยาวคลื่น 650 nm รัศมี 7.40 cm	51
4.31 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจากโปรแกรมกับค่าที่ทดลองกับแบบจำลองเสมือน ที่ความยาวคลื่น 532 nm รัศมี 2.15 cm	52
4.32 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจากโปรแกรมกับค่าที่ทดลองกับแบบจำลองเสมือน ที่ความยาวคลื่น 532 nm รัศมี 6.60 cm	53
4.33 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจากโปรแกรมกับค่าที่ทดลองกับแบบจำลองเสมือน ที่ความยาวคลื่น 532 nm รัศมี 7.40 cm	54
4.34 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจากโปรแกรมกับค่าที่ทดลองกับแบบจำลองเสมือน ที่ความยาวคลื่น 445 nm รัศมี 2.15 cm	55
4.35 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจากโปรแกรมกับค่าที่ทดลองกับแบบจำลองเสมือน ที่ความยาวคลื่น 445 nm รัศมี 6.60 cm	56
4.36 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจากโปรแกรมกับค่าที่ทดลองกับแบบจำลองเสมือน ที่ความยาวคลื่น 445 nm รัศมี 7.40 cm	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น 'ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น' อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการสื่อสารนั้นเป็นการสื่อสารแบบไร้ขอบเขต ซึ่งตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมนุษย์เรา ได้มีการพัฒนาด้านการสื่อสารในรูปแบบต่างๆ มากมาย เช่น การใช้การส่งจดหมายแทนการใช้ นกพิราบในการสื่อสาร การใช้โทรศัพท์มือถือแทนการใช้เพจเจอร์ในการส่งข้อความ เป็นต้น ความหมายของการสื่อสารนั้นก็คือ “การส่งข้อมูลจากที่หนึ่งไปยังที่อื่นๆ ที่อยู่ห่างไกลออกไป” ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้นิยมใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequencies) และไมโครเวฟ (Microwave) มาใช้ในการติดต่อสื่อสารอย่างแพร่หลาย โดยอาศัยหลักการในการใช้คลื่นความถี่ในช่วงที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพของการสื่อสารในรูปแบบที่เหมาะสมอื่น ๆ

จากเศรษฐกิจและสังคมมีการพัฒนาให้มีความเจริญก้าวหน้ามากยิ่งขึ้น จึงทำให้มีความ ต้องการในการแลกเปลี่ยนข่าวสารและข้อมูลเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเพื่อเป็นการตอบสนองต่อความ ต้องการได้ทั้งในปัจจุบันและในอนาคต ระบบสื่อสารเชิงแสง (Optical Communication System) จึงเป็นระบบการสื่อสารที่สามารถส่งข่าวสารและข้อมูลต่างๆ ได้เป็นจำนวนมากและรวดเร็วในเวลา เดียวกันฉะนั้นระบบนี้จึงได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย

ระบบการสื่อสารเชิงแสง (Optical Communication System) เป็นการสื่อสารในอีกช่วง ความถี่หนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยในระบบนี้จะใช้คลื่นพาห้ที่เป็นแสงมาผสมกับสัญญาณข้อมูล ข่าวสาร (Optical Modulation) เนื่องจากแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของช่องสัญญาณนั้นจะสามารถ กำหนดได้ด้วยความถี่คลื่นพาห้ที่นำมาผสมกับสัญญาณข้อมูล ดังนั้น เมื่อทำการเพิ่มความถี่ของ คลื่นพาห้ให้เพิ่มขึ้น ก็จะเป็นการเพิ่มแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณข้อมูลให้มากขึ้นด้วยเช่นกัน และ เนื่องจากคลื่นแสงที่ใช้นั้นอยู่ในย่านความถี่ที่สูงกว่า (หรือความยาวคลื่นน้อยกว่า) คลื่นวิทยุและ ไมโครเวฟ จึงทำให้ช่องสัญญาณข้อมูลสามารถส่งข้อมูลได้ในปริมาณที่มากกว่าในช่วงเวลา เปรียบเทียบที่เท่ากัน ดังนั้นการสื่อสารเชิงแสงจึงได้ถูกนำมาใช้ในด้าน การสื่อสารและประยุกต์ใช้งาน ในหลายด้านโดยเฉพาะสำหรับการเชื่อมโยงข้อมูลปริมาณสูงแกนหลัก (Backbone) ระหว่างชุมสาย หรือการขนถ่ายข้อมูลความเร็วสูงอื่นๆ หรือกับการสื่อสารเฉพาะกิจอื่นๆ

ระบบการสื่อสารเชิงแสงและการสื่อสารผ่านดาวเทียมเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาขึ้น ในช่วงระยะเวลาใกล้เคียงกันประมาณช่วงคริสต์ทศวรรษที่ 60 (ประมาณช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2508-2512) ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนประวัติศาสตร์การสื่อสารโลก โดยการเปลี่ยนจากการใช้สื่อนำสัญญาณแบบเดิมที่เป็นสายทองแดง มาเป็นสื่อนำสัญญาณผ่านดาวเทียมและผ่านใยแก้วนำแสง ซึ่งในการเปลี่ยนแปลง ครั้งนี้จะเริ่มต้นจากการสื่อสารผ่านดาวเทียมเป็นอันดับแรก ในช่วงปี ค.ศ. 1966 (พ.ศ. 2509) เส้นใยนำแสงได้มีการพัฒนาขึ้น และได้มีนำเสนอคุณสมบัติของเส้นใยนำแสงที่ทำมาจากแก้วเพื่อเป็น ช่องทางสำหรับการนำพาสัญญาณแสง โดย เค ซี เกา และ จี เอ ฮอกแฮม ต่อมาในปี ค.ศ. 1978 (พ.ศ. 2521) ได้มีการทดสอบภาคสนามการให้บริการความถี่แถบกว้างหรือบรอดแบนด์สู่บ้านเรือนที่ พักอาศัย จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1988 (พ.ศ. 2531) ได้มีการทดสอบระบบการสื่อสารด้วยแสงแบบได้ นำ และนำผลการวิจัยไปพัฒนาใช้งานกับโครงการเชื่อมโยง ข้ามมหาสมุทรแอตแลนติก โดยใช้ เส้นใยนำแสง ซึ่งศักยภาพของเทคโนโลยีทั้งสองนั้น ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างพื้นฐานการ

สื่อสารเป็นอย่างมาก จึงนำไปสู่การให้บริการทั้งทางด้านเสียง และข้อมูลผ่านเครือข่ายความเร็วสูง เพื่อเพิ่มความสะดวกและรวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถขยายระยะทางการสื่อสารให้สามารถเชื่อมต่อถึงกันได้อย่างทั่วถึงในทุกภาคพื้นทวีป

ในโครงการพิเศษนี้ ได้สนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีการส่งสัญญาณแสงในวงแหวนสั่นพ้อง และคุณสมบัติของ PMMA รวมไปถึงการจำลองแบบวงแหวนสั่นพ้องขึ้นภายในโปรแกรม Optiwave และทำการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลองและผลจากทฤษฎีเพื่อสามารถนำไปพัฒนาการสื่อสารให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น และสามารถสร้างอุปกรณ์จากแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้และสามารถนำไปใช้ได้จริงเพื่อพัฒนาในด้านระบบการสื่อสารในปัจจุบันให้มีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น และสามารถนำงานไปต่อยอดได้อีก

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ทางแสงในวงแหวนสั่นพ้อง โดยการใช้โปรแกรมจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Optiwave
- 2) เพื่อศึกษาการส่งผ่านสัญญาณแสงในวงแหวนสั่นพ้อง โดยการออกแบบแบบจำลองและนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์จริง
- 3) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลของการทดลองจากทฤษฎีและอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

สำหรับขอบเขตงานวิจัยของโครงการนี้ เราสามารถแบ่งออกเป็นส่วนๆ ได้ดังนี้

- 1) ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับวงแหวนสั่นพ้อง และคุณสมบัติของ PMMA
- 2) ทำการออกแบบแบบจำลองด้วยโปรแกรม Optiwave
- 3) สร้างอุปกรณ์จากแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ในโปรแกรม Optiwave
- 4) เปรียบเทียบผลจากการทดลองทั้งจากโปรแกรมและจากอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ช่วงเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
สิงหาคม พ.ศ.2557	<ul style="list-style-type: none"> <li>กำหนดหัวข้อโครงการพิเศษ และวางแผนการทำงาน</li> </ul>
กันยายน – ธันวาคม พ.ศ.2557	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลเอกสารที่เกี่ยวข้อง</li> </ul>
มกราคม พ.ศ.2557	<ul style="list-style-type: none"> <li>ทำการออกแบบแบบจำลองด้วยโปรแกรม Optiwave</li> </ul>
กุมภาพันธ์ พ.ศ.2558	<ul style="list-style-type: none"> <li>ทำการขึ้นแบบแล้วทำการตัดตามแบบ</li> <li>นำแบบจำลอง PMMA มาจัดตามรูปแบบที่คำนวณไว้</li> </ul>
มีนาคม พ.ศ.2558	<ul style="list-style-type: none"> <li>ทำการทดลองและเก็บค่าของผลการทดลอง</li> <li>วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง</li> </ul>

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้เรียนรู้เกี่ยวกับทฤษฎีของวงแหวนเส้นพ้อง
- 2) ได้เรียนรู้จากกาออกแบบแบบจำลองด้วยโปรแกรม Optiwave
- 3) สามารถสร้างแบบจำลองเสมือนจากแบบที่ได้ออกแบบไว้ในโปรแกรม Optiwave ได้
- 4) ผลจากการเปรียบเทียบของผลจากการทดลองทั้งจากค่าจากโปรแกรมและจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Radiation (EM radiation หรือ EMR)) เป็นคลื่นชนิดหนึ่งที่ไม่ต้องใช้ตัวกลางในการเคลื่อนที่ ด้วยเหตุนี้คลื่นชนิดนี้จึงสามารถเคลื่อนที่ในสุญญากาศได้ เช่นคลื่นวิทยุ (Radio waves) คลื่นไมโครเวฟ (Microwaves) ปัจจุบันมีการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหลาย ๆ ด้าน เช่น การติดต่อสื่อสารทางการแพทย์ การทำอาหาร การควบคุมรีโมท คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือเป็นคลื่นที่เกิดจากคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กตั้งฉากกันและเคลื่อนที่ไปยังทิศทางเดียวกัน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเดินทางได้ด้วยความเร็ว 299,792,458 เมตร/วินาที หรือเทียบเท่ากับความเร็วแสง

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic disturbance) โดยการทำให้สนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก หรือถ้าสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีการสั่นในแนวตั้งฉากกัน และอยู่บนระนาบตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น

สเปกตรัม (Spectrum) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่และความยาวคลื่นแตกต่างกัน ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ คลื่นแสงที่ตามองเห็น, อัลตราไวโอเล็ต, อินฟราเรด, คลื่นวิทยุโทรทัศน์, ไมโครเวฟ, รังสีเอ็กซ์, รังสีแกมมา เป็นต้น

ประเภทของโหมดในท่อนำคลื่นสามารถจำแนกข้อมูลเพิ่มเติมดังนี้

Transverse electromagnetic (TEM) mode เป็นโหมดที่ไม่มีสนามไฟฟ้าหรือแม่เหล็กในทิศทางการเคลื่อนที่

Transverse electric (TE) mode : เป็นโหมดที่ไม่มีสนามไฟฟ้าในทิศทางการเคลื่อนที่ บางครั้งเรียกว่าโหมด H เพราะมีเพียงสนามแม่เหล็กตามทิศทางการเคลื่อนที่ (H คือสัญลักษณ์สำหรับสนามแม่เหล็ก)

Transverse magnetic (TM) mode : เป็นโหมดที่ไม่มีสนามแม่เหล็กในทิศทางการเคลื่อนที่ บางครั้งเรียกว่าโหมด E เพราะมีเพียงสนามไฟฟ้าตามทิศทางการเคลื่อนที่

Hybrid modes : ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะไม่มีค่าเป็นศูนย์ในทิศทางการเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 สมการคลื่น

### 2.2.1 คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ

ในบริเวณที่ไม่มีประจุหรือกระแส สมการแมกซ์เวลล์เป็นไปตามสมการ (2.1) ดังนี้

$$1) \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.1 a)$$

$$2) \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.1 b)$$

$$3) \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1 c)$$

$$4) \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.1 d)$$

ถ้าเราประยุกต์เคิร์ลเข้ากับข้อ 3) และ ข้อ 4)

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) &= \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = \vec{\nabla} \times \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ &= -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{B}) = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) &= \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) - \nabla^2 \vec{B} = \vec{\nabla} \times \left( \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \\ &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \end{aligned}$$

เนื่องจาก  $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$  และ  $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$  ดังนั้น

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}; \quad \nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

ในสุญญากาศ ส่วนประกอบของ  $\vec{E}$  และ  $\vec{B}$  สอดคล้องกับสมการ

$$\nabla^2 f = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

เราเรียกสมการ (2.3) นี้ว่า สมการคลื่น (Wave equation) แบบแผนเดิม ซึ่งหมายถึงฟังก์ชันคลื่น  $f$  เอกสารนี้เคลื่อนที่ด้วยอัตราความเร็ว  $v$  ดังนั้นตามสมการของแมกซ์เวลล์นั้นจะอธิบายได้ว่าในบริเวณว่างเปล่าการก้ำก๋วย่อมสนับสนุนการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยอัตราเร็ว

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2.4)$$

ซึ่งก็คืออัตราเร็วแสง หรือ  $c$  นั่นเอง

ค่า  $\epsilon_0$  และ  $\mu_0$  เป็นค่าคงที่ในกฎของคูลอมบ์และกฎของบิโอต์-ซาวาร์ต ตามลำดับ ซึ่งเราวัดค่าเหล่านี้ได้จากการทดลองที่เกี่ยวข้องกับประจุในลูกพิธ แบตเตอรี่ และเส้นลวด เป็นต้น แต่การทดลองดังกล่าวนี้ไม่เกี่ยวข้องกับเรื่องของแสง โดยที่ตามทฤษฎีของแมกซ์เวลล์ซึ่งประกอบไปด้วยค่าคงที่ทั้งสองนี้ให้ความสัมพันธ์แก่อัตราเร็วของแสง และหากสังเกตเทอมของแมกซ์เวลล์ในกฎของแอมแปร์ ( $\mu_0 \epsilon_0 \partial \vec{E} / \partial t$ ) นั้นมีบทบาทสำคัญมากในเรื่องนี้ เพราะถ้าปราศจากเทอมนี้ สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่อมไม่เกิดขึ้นอย่างแน่นอน

### 2.2.2 คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลาง

หากอยู่ภายในตัวกลางแต่ไม่มีประจุหรือกระแส สมการแมกซ์เวลล์ จะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$1) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (2.5 \text{ a})$$

$$2) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.5 \text{ b})$$

$$3) \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.5 \text{ c})$$

$$4) \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.5 \text{ d})$$

ถ้าเป็นตัวกลางเชิงเส้น

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} ; \quad \vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B} \quad (2.6)$$

และเป็นเอกพันธ์ (homogeneous) ดังนั้น  $\epsilon$  และ  $\mu$  ไม่แปรจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่ง สมการ (2.5) ก็ จะกลายเป็น

$$1) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.7 \text{ a})$$

$$2) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.7 \text{ b})$$

$$3) \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.7 \text{ c})$$

$$4) \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.7 \text{ d})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีสืบหาข้อมูลเพื่อการศึกษานั่นเอง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งแตกต่างจากสมการ (2.1) เพียงแทนที่  $\mu_0 \epsilon_0$  ด้วย  $\mu \epsilon$  ดังนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแพร่กระจายผ่านตัวกลางเอกพันธ์เชิงเส้นด้วยอัตราเร็ว

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (2.8)$$

สำหรับตัวกลางโปร่งใส  $\mu$  มีค่าใกล้เคียงกับ  $\mu_0$  มาก และ  $\epsilon$  มีค่ามากกว่า  $\epsilon_0$  ดังนั้นแสงจึงเดินทางผ่านตัวกลางได้ช้ากว่า ซึ่งจะได้ว่า

$$v = \frac{c}{n} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $n$  คือค่าดัชนีหักเห นั้นแสดงว่า  $n$  มีความสัมพันธ์กับสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุโดยสมการ

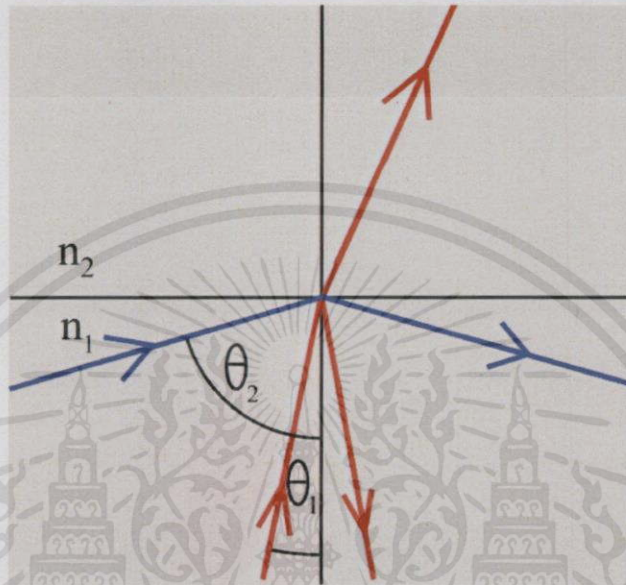
$$n \equiv \sqrt{\frac{\epsilon \mu}{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (2.10)$$

อย่างไรก็ตามค่าดัชนีหักเหยังขึ้นกับความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การสะท้อนกลับหมดของคลื่นแสง (Total Internal Reflection)

การสะท้อนกลับหมดเป็นปรากฏการณ์ทางแสงลักษณะหนึ่ง ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อรังสีของแสง ตกกระทบลงกับพื้นผิวของตัวกลางในมุมที่กว้างกว่ามุมวิกฤต ทั้งนี้เกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ แสงเดินทางมาจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหมากกว่า [ $n_1$ =higher refractive index] ไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหน้อยกว่า [ $n_2$ =lower refractive index] ยกตัวอย่างเช่น เมื่อแสงเดินทางจากแก้วไปยังอากาศ



รูปที่ 2.1 มุมที่เล็กกว่าคือมุมปกติ (สีแดง) มุมที่ใหญ่กว่าคือ มุมที่สะท้อนกลับทั้งหมด (สีน้ำเงิน) (สีนั้นแยกเพื่อช่วยเกิดความเข้าใจ ไม่เกี่ยวข้องกับสีของแสง)



รูปที่ 2.2 การสะท้อนกลับทั้งหมดในบล็อกรูปยาว ที่ทำจากวัสดุ PMMA

การนำไปใช้งาน

- เส้นใยแก้วแสง ที่ใช้งานในหลากหลายด้าน เช่น กล้องเอ็นโดสโคป สำหรับงานด้านการแพทย์ และ ในงานด้านโทรคมนาคม

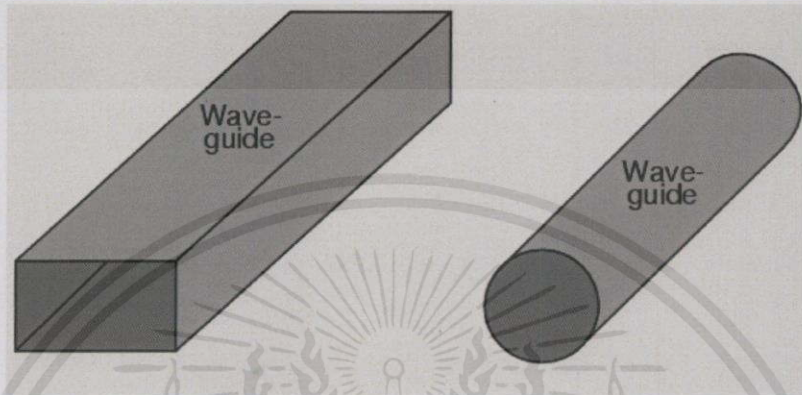
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การคุ้มครองของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การคัดลอกหรือการนำออกโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่าการตีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลบางประการที่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฯลฯ

## 2.4 ท่อนำคลื่น (Waveguide)

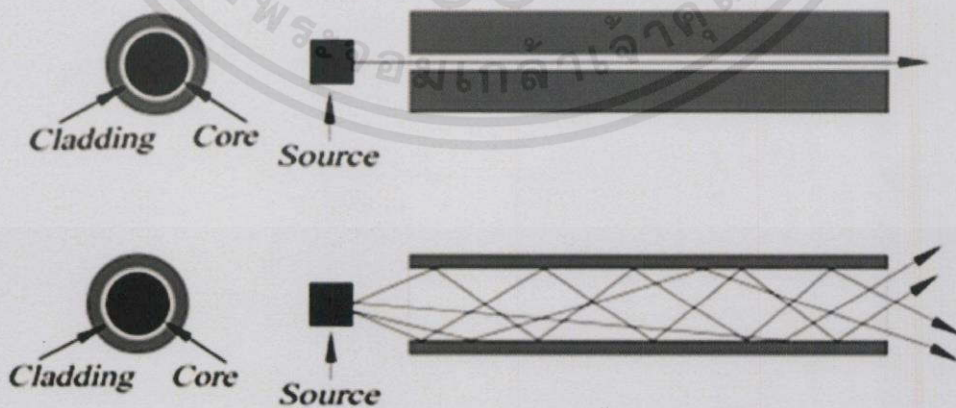
ท่อนำคลื่น (Waveguide) เป็นลักษณะโครงสร้างทางกายภาพที่ใช้ในการนำคลื่นไฟฟ้า โดยที่ท่อนำคลื่นแสง ได้แก่ เส้นใยแก้วนำแสงและท่อนำคลื่นแบบกลวง (ไม่มีตัวนำตรงกลาง) ท่อนำคลื่นนั้นใช้เป็นส่วนประกอบในวงจรออปติคัลหรือเป็นสื่อในการส่งข้อมูลข่าวสารในระยะทางไกล ระบบของท่อนำคลื่นสามารถแบ่งได้ตามรูปทรงเรขาคณิต, โครงสร้างโหมด, ดัชนีหักเห และวัสดุ



รูปที่ 2.3 ท่อนำคลื่นแบบกลวง (ไม่มีตัวนำตรงกลาง) และท่อนำคลื่นแบบเส้นใยแก้วนำแสง

## 2.5 เส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Optic)

เส้นใยแก้วนำแสงหรือไฟเบอร์ออปติก เป็นตัวกลางของสัญญาณแสงชนิดหนึ่ง ที่ทำมาจากแก้วซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงมาก เส้นใยแก้วนำแสงมีลักษณะเป็นเส้นยาวขนาดเล็ก มีขนาดประมาณเส้นผมของมนุษย์เรา เส้นใยแก้วนำแสงที่ดีต้องสามารถนำสัญญาณแสงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ โดยมีการสูญเสียของสัญญาณน้อยมาก ซึ่งสามารถแบ่งตามความสามารถในการนำแสงออกเป็น 2 ชนิด คือเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว (Single mode Optic Fiber, SM) และชนิดหลายโหมด (Multimode Optic Fiber, MM)



รูปที่ 2.4 เส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว (Single mode Optic Fiber, SM) และชนิดหลายโหมด (Multimode Optic Fiber, MM)

## 2.6 การแทรกสอด (Interference)

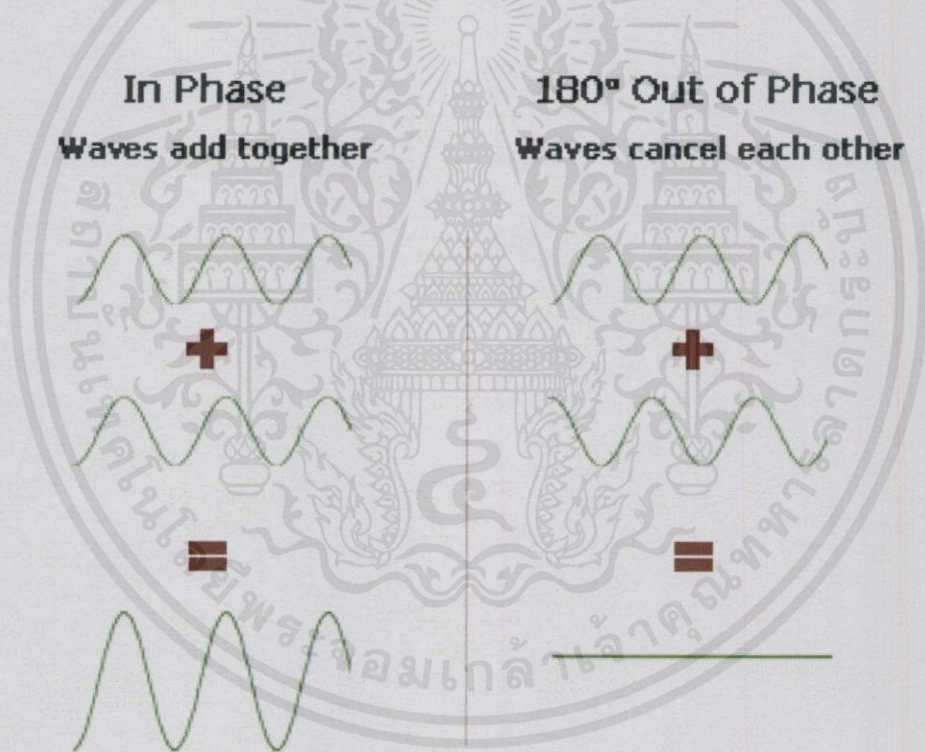
การแทรกสอดเป็นคุณสมบัติความเป็นคลื่นของแสงอย่างหนึ่งเกิดจากการที่คลื่นสองขบวนหรือมากกว่าเดินทางมาซ้อนทับกัน โดยที่ในปี พ.ศ.2344 โทมัส ยัง (Thomas Young) ได้พิสูจน์โดยการทดลองพบว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่น เพราะแสงมีสมบัติการแทรกสอด เช่นเดียวกับคลื่นน้ำ คลื่นเสียง และคลื่นชนิดอื่นๆ การแทรกสอด แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะดังนี้

- การรวมกันแบบเสริมกัน (Constructive Interference)

คือ การที่คลื่น 2 ขบวน ที่มีเฟสตรงกัน มาพบกัน จะทำให้เกิดการเสริมกันของคลื่น โดยที่ความสูงของคลื่นหรือแอมพลิจูด (Amplitude) เพิ่มขึ้นเรียกลักษณะการแทรกสอดนี้ว่า in phase

- การรวมกันแบบหักล้างกัน (Destructive Interference)

คือ การที่คลื่น 2 ขบวน ที่มีเฟสไม่ตรงกัน หรือ เฟสตรงข้ามกัน เช่น  $180^\circ$  กับ  $0^\circ$  มารวมกัน คลื่นจะเกิดการหักล้าง ซึ่งจะทำให้ความสูงของคลื่นหรือแอมพลิจูด (Amplitude) นั้นลดลงหรือหายไปเรียกลักษณะนี้ว่า out of phase

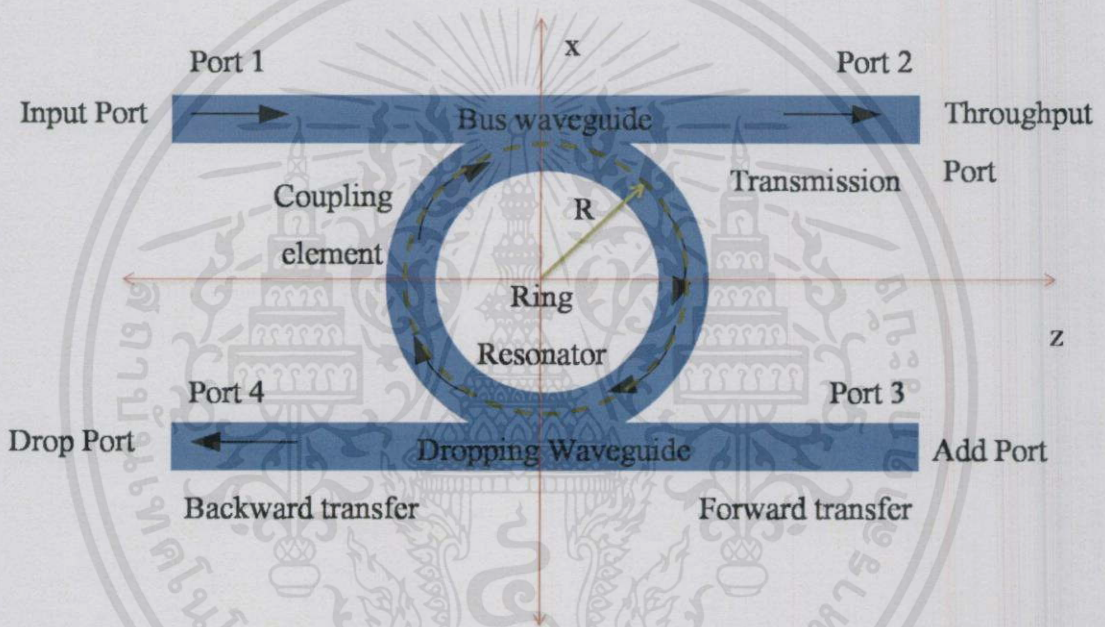


รูปที่ 2.5 การรวมกันแบบเสริมกัน (Constructive Interference)  
และการรวมกันแบบหักล้างกัน (Destructive Interference)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 ทฤษฎีวงแหวนสั่นพ้อง (Optical ring resonator)

ในการทำงานของวงแหวนสั่นพ้องแบบ Add-Drop Filter นั้น ตำแหน่งของวงแหวนสั่นพ้อง จะถูกวางไว้ตรงกลางระหว่างท่อนำคลื่น 2 อัน ในขณะที่มีการสั่นพ้องนั้น สัญญาณแสงจากท่อนำคลื่น ด้านบนจะลดลงและจะถูกส่งผ่านไปยังท่อนำคลื่นด้านล่างโดยผ่านทางวงแหวนที่อยู่ตรงกลาง โครงสร้างของวงแหวนสั่นพ้องแบบ Add-Drop Filter จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งจะประกอบไปด้วย Bus Waveguide, Dropping Waveguide และ วงแหวนสั่นพ้อง วงแหวนสั่นพ้องนั้นจะทำหน้าที่ เป็น coupling element ระหว่างท่อนำคลื่นทั้ง 2 อัน ซึ่งจะมีช่องสัญญาณทั้งหมด 4 ช่องสัญญาณ โดยที่ช่องสัญญาณที่ 1 เรียกว่า Input Port และช่องสัญญาณที่ 2 เรียกว่า Throughput Port ซึ่งคือ ช่องสัญญาณขาเข้าและช่องสัญญาณขาออกของการส่งผ่านสัญญาณ ในขณะที่ช่องสัญญาณที่ 3 และ 4 จะเป็นช่องสัญญาณ forward และ backward dropping ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 วงแหวนสั่นพ้อง (Optical Ring Resonator)

โดยที่การเกิดการสั่นพ้องต้องอาศัยทฤษฎีเกี่ยวกับการแทรกสอดของคลื่น ซึ่งสามารถอธิบาย ได้ดังนี้ ตามอุดมคติเมื่อคลื่นแสงเดินทางเข้าใน Bus waveguide จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ขบวน บริเวณวงแหวนสั่นพ้องกับ Bus waveguide โดยคลื่นแสงขบวนที่ 1 จะถูกส่งผ่านไปยัง Throughput Port ขบวนที่ 2 จะเดินทางภายในวงแหวนสั่นพ้องที่มีรัศมีที่เหมาะสมและวนกลับมาที่ จุดเดิมก่อนจะรวมกับคลื่นแสงขบวนที่ 1 ในลักษณะของการแทรกสอดแบบ In phase ทำให้ค่า สัญญาณที่ Throughput Port มีค่ามากกว่า Input Port

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 การสูญเสียสัญญาณภายในเส้นใยแก้วนำแสง

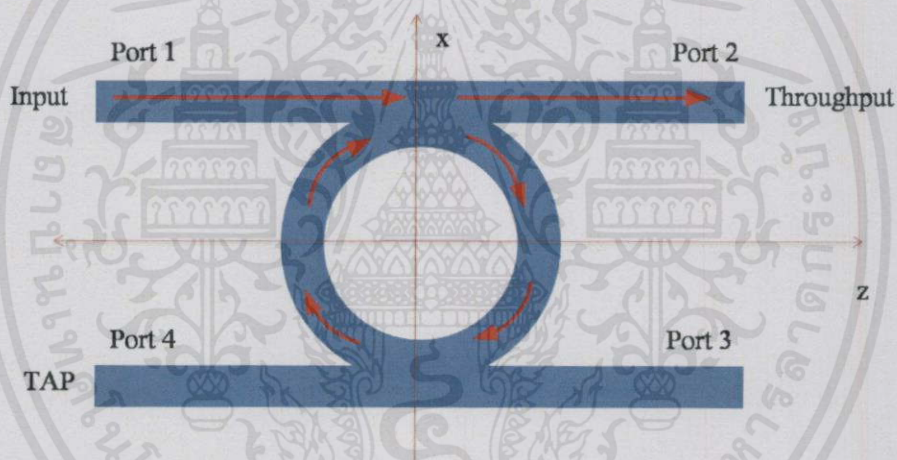
การสูญเสียสัญญาณเกิดจากการดูดกลืน หรือการกระเจิงของแสง กำลังของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง ( $P_i$ ) ถูกส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงยาว  $L$  กิโลเมตร แล้วกำลังที่ถูกส่งออกมาจากเส้นใยแก้วนำแสง ( $P_o$ ) ซึ่งโดยทั่วไปการสูญเสียกำลังของแสงนั้นจะถูกกำหนดเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอน (Attenuation Coefficient,  $\alpha$ ) ซึ่งมีหน่วยเป็นเดซิเบลต่อกิโลเมตร (dB/km) สามารถแทนด้วยความสัมพันธ์ คือ

$$\text{Loss}_{\text{dB}} = \alpha L = -10 \log \frac{P_o}{P_i} \quad (2.11)$$

### การสูญเสียสัญญาณในวงแหวนสั่นพ้อง

การสูญเสียสัญญาณภายในวงแหวนสั่นพ้อง แบ่งได้ตามช่องสัญญาณที่ออกดังนี้

Throughput Loss ( $L_{\text{THP}}$ )



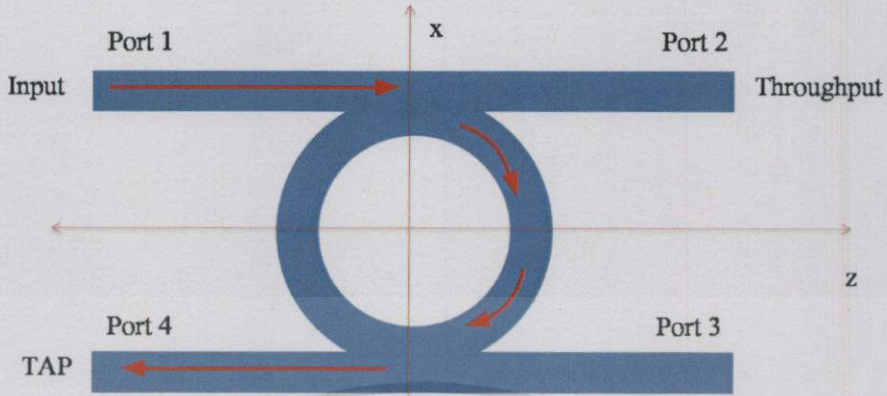
รูปที่ 2.7 Throughput Loss ( $L_{\text{THP}}$ )

$$L_{\text{THP}} = -10 \log \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad (2.12)$$

เป็นค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่เป็นอัตราส่วนของกำลังใน Throughput Port กับกำลังที่ Input Port ซึ่งการสูญเสียสัญญาณในช่องสัญญาณตามอุดมคติควรมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่า 0 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TAP LOSS ( $L_{TAP}$ )

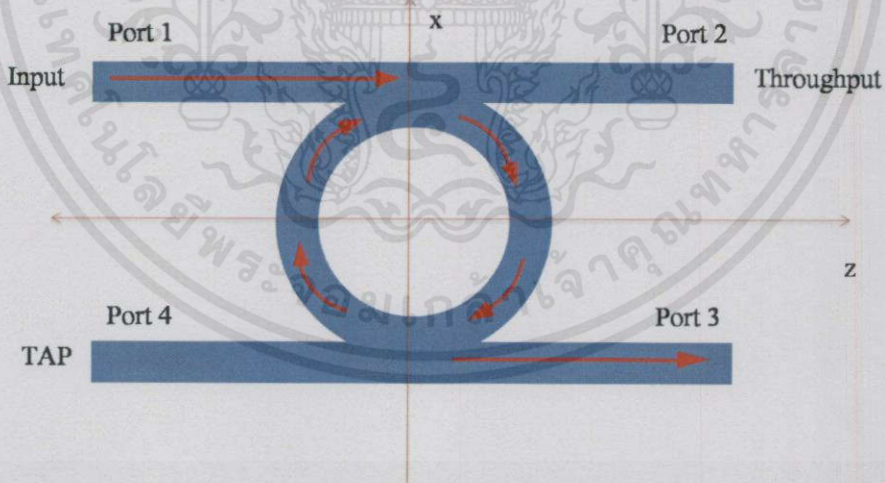


รูปที่ 2.8 TAP LOSS ( $L_{TAP}$ )

$$L_{TAP} = -10\log\left(\frac{P_4}{P_1}\right) \quad (2.13)$$

เป็นค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่เป็นอัตราส่วนของกำลังใน TAP Port กับกำลังที่ Input Port ตามอุดมคติกำลังที่ออกมาในช่องสัญญาณนี้ต้องมีค่าเท่ากับ 0

Directionality Loss ( $L_D$ )



รูปที่ 2.9 Directionality Loss ( $L_D$ )

$$L_D = -10\log\left(\frac{P_3}{P_1}\right) \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังสงวนลิขสิทธิ์ในเอกสารฉบับนี้ด้วย  
เป็นค่าการสูญเสียการส่งผ่านที่เป็นอัตราส่วนของกำลังในพอร์ต 4 กับกำลังที่ Input Port ซึ่งเป็นการสูญเสียที่ไม่ควรเกิดขึ้นในอุดมคติ นั่นคือไม่ควรจะมีสัญญาณออกมาจากช่องสัญญาณนี้

## 2.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเครื่องมือ

### 2.9.1 PMMA

Poly methyl Methacrylate (PMMA) เป็นวัสดุโปร่งใส ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ของ methyl Methacrylate มีการขายภายใต้ชื่อทางการค้าหลายชนิดโดยปกติแล้วนั้นเรียกว่า แก้วคริลิก , perspex, อะคริลิก หรือ plexiglas เป็นวัสดุที่ได้รับการพัฒนาในปี ค.ศ. 1928 ในห้องปฏิบัติการต่างๆ และถูกนำออกสู่ตลาดในปี 1933 โดย บริษัท โรทมแอนด์ และ Haas

PMMA ถือเป็นผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม สำหรับเป็นสารตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ส่งจำหน่ายแก่ภาคครัวเรือน หรือ ภาคอุตสาหกรรม ที่เกี่ยวข้อง ทั้งในรูป PMMA เหลวสำหรับภาคอุตสาหกรรม และแผ่น PMMA สำหรับงานในด้านต่าง

PMMA มักถูกใช้เป็นทางเลือกแทนกระจก มักจะเป็นที่ต้องการเนื่องจากมีคุณสมบัติในระดับปานกลาง การขนย้ายง่าย กรรมวิธีการผลิตและต้นทุนต่ำ แต่ก็มีความเปราะบางโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีแรงกระแทก



รูปที่ 2.10 PMMA

ผลิตภัณฑ์ PMMA

แบ่งได้เป็นประเภทต่างๆ คือ

1. ของแข็ง เป็นเทอร์โมพลาสติกเรซินที่อยู่ในรูปของแข็ง อาจจะมีลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้นรูปเป็นแผ่น
2. ของเหลว จะอยู่ในรูปของสารละลายที่ผลิตได้จากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสารละลาย
3. PMMA อิมัลชัน ใช้เป็นส่วนผสมของสีทาบ้าน มักผลิตในลักษณะของลาเท็กซ์



รูปที่ 2.11 แผ่นPMMAสีต่างๆ

คุณสมบัติโดยทั่วไปของ PMMA

โครงสร้างโดยทั่วไปนั้นมีความหนาแน่นประมาณ 1,150-1,190 kg/m<sup>3</sup> มีความโปร่งใสคล้ายกระจก ค่าดัชนีหักเหประมาณ 1.492 ทนทานต่อแรงกระแทก แรงกด และสภาพแวดล้อมดินฟ้าอากาศ ทนทานต่อสารเคมีหลายชนิด ยกเว้นสารตัวทำละลาย และกรดที่ส่วนมากมีผลต่อ PMMA รวมถึงต่างแก่ทุกชนิด สามารถเติมแต่งด้วยสี ให้มีสีสันทัดตามความต้องการ มีจุดอ่อนตัวต่ำ ทนต่อความร้อน และมีความเหนียว มีสภาพคงรูปที่ดี และทนต่อการขีดข่วน เป็นฉนวนไฟฟ้า และฉนวนป้องกันความร้อนที่ดี ไม่ดูดความชื้น

การใช้ประโยชน์

PMMA แบบของแข็งที่ถูกขึ้นรูปให้มีลักษณะเป็นแผ่น อาจเป็นแผ่นใสหรือแผ่นมีสีต่างๆ นิยมใช้งานมากในภาคครัวเรือน เช่น ทำป้าย ทำเครื่องตกแต่งบ้าน วัสดุตกแต่งบ้าน ชั้นโชว์ ตู้เลี้ยงปลา ถึงขยะ ของเด็กเล่น กรอบรูป กล้อง เป็นต้น

สำหรับภาคอุตสาหกรรมมีการใช้ประโยชน์จาก PMMA เช่น อุตสาหกรรมประกอบรถยนต์ อุตสาหกรรมขึ้นรูป และผลิตชิ้นส่วนพลาสติก เป็นต้น

การทำซื้อสามารถซื้อได้ตามร้านเครื่องเขียน ร้านพลาสติก ทั่วไป หรือสั่งซื้อจากร้านค้าที่ประกาศตามอินเทอร์เน็ต มีราคาตั้งแต่หลักสิบบาทถึงหลักพันบาท ขึ้นอยู่กับขนาด สี ลักษณะเฉพาะของแต่ละผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.2 เลเซอร์ไดโอด (Laser Diode)

เลเซอร์ไดโอด (Laser Diode) หรือ เลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Laser) มีโครงสร้างรอยต่อแบบ p-n ของสารกึ่งตัวนำทำจากสารประกอบกึ่งตัวนำ เช่น GaAs, InP มีขนาดเล็ก คุณสมบัติเด่นของเลเซอร์ไดโอด

มีขนาดเล็กและเบามาก มีประสิทธิภาพในการเปล่งลำแสงสูง สามารถดูเลดความเข้มของการเปล่งแสงด้วยกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน สามารถผลิตได้จำนวนมากและมีราคาที่ถูก

ปัจจุบันเลเซอร์ไดโอดถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น การสื่อสารด้วยแสง การวัดสารสนเทศ คอมแพคต์ดิสก์ เลเซอร์ดิสก์ ซีดีรอม การแพทย์ การบันเทิง ฯลฯ



รูปที่ 2.12 เลเซอร์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

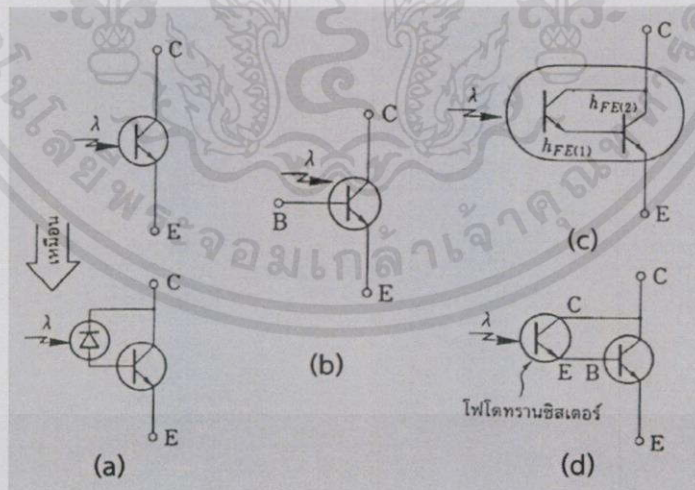
### 2.9.3 โฟโตทรานซิสเตอร์

โฟโตทรานซิสเตอร์ (phototransistor) คือสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงที่มีโครงสร้างเป็นทั้งโฟโตไดโอดและทรานซิสเตอร์ในตัวเดียวกัน โดยทั่วไปมีโครงสร้างคล้ายทรานซิสเตอร์ นั่นคือมีรอยต่อของสารกึ่งตัวนำแบบรอยต่อ pnp หรือ npn หรืออาจออกแบบให้มีโครงสร้างแบบทรานซิสเตอร์ดาร์ลิ่งตันก็ได้ การใช้งานโฟโตทรานซิสเตอร์นั้นมีมานานกว่า 20 ปีแล้ว ซึ่งมักใช้สำหรับการตรวจวัดการมีอยู่ของแสง เนื่องจากขนาดสัญญาณเอาต์พุตของโฟโตทรานซิสเตอร์แปรเปลี่ยนไปตามความเข้มของแสงในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น จึงไม่นิยมใช้เป็นตัววัดความเข้มแสงแบบต่อเนื่อง แต่นิยมใช้วัดว่ามีแสงอินฟราเรดเข้ามาหรือไม่เท่านั้น เช่น ใช้เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณแสงจาก LED ใช้เป็นอุปกรณ์รับแสงในโฟโตคัปเปอร์ ใช้ตรวจเช็คการวิ่งตัดแสงของวัตถุ เป็นต้น

ชนิดของโฟโตทรานซิสเตอร์

โฟโตทรานซิสเตอร์ชนิดธรรมดามีขาต่อเอาต์พุต 2 ขา แต่บางชนิดก็มี 3 ขา

- 1) โฟโตทรานซิสเตอร์ชนิด 2 ขา เป็นโฟโตทรานซิสเตอร์ชนิดที่ใช้งานกันทั่วไป วงจรสมมูลแสดงในรูปที่ 2.13(a) แต่คุณสมบัติเชิงเส้นไม่ดี
- 2) โฟโตทรานซิสเตอร์ชนิด 3 ขา เรียกว่าโฟโตทรานซิสเตอร์ชนิดมีขาเบส ดังแสดงในรูปที่ 2.13(b) มีข้อเด่นที่กระแสไฟฟ้ามืดมีค่าน้อยกว่าชนิด 2 ขา และการใช้งานก็สามารถกำหนดจุดการทำงานได้
- 3) โฟโตทรานซิสเตอร์ชนิดดาร์ลิ่งตันโฟโตทรานซิสเตอร์ มีลักษณะโครงสร้างที่มีทรานซิสเตอร์ต่อพ่วงเพิ่มอีก 1 ตัวภายในชิปเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.13(c) เนื่องจากวงจรรขยายเป็นแบบดาร์ลิ่งตันทรานซิสเตอร์ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจึงมีการขยายที่สูงมากอาจสามารถใช้ป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบรีเลย์ที่กินกระแสไฟฟ้ามกๆ ได้ ซึ่งการต่อแบบดาร์ลิ่งตันนี้อาจใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดธรรมดามาเชื่อมต่อภายนอกกับโฟโตทรานซิสเตอร์ที่หลังก็ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.13(d)



รูปที่ 2.13 โฟโตทรานซิสเตอร์ (a) ชนิดไม่มีขาเบส (2 ขา), (b) ชนิดมีขาเบส (3 ขา),

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน (c) ชนิดโฟโตดาร์ลิ่งตัน และ (d) ชนิดต่อทรานซิสเตอร์ภายนอกแบบดาร์ลิ่งตันในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาปรากฏการณ์ทางแสงในวงแหวนสั่นพ้อง ด้วยวิธีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชนิดเวลาไม่ต่อเนื่อง หรือ FDTD โดยการใช้โปรแกรมจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Optiwave ในการสร้างแบบ ซึ่งจะนำแบบจำลองที่สร้างขึ้นไปทำเป็นอุปกรณ์จริง และนำผลมาเปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลองกับค่าที่บันทึกได้จากโปรแกรม

### 3.1 พื้นฐานของวิธีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชนิดเวลาไม่ต่อเนื่อง หรือ Finite Difference Time Domain (FDTD)

โปรแกรม OptiFDTD เป็นโปรแกรมที่มีประสิทธิภาพสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ด้าน เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้งานง่าย อีกทั้งยังช่วยให้สามารถออกแบบและจำลององค์ประกอบเชิงแสงขั้นสูงได้อีกด้วย

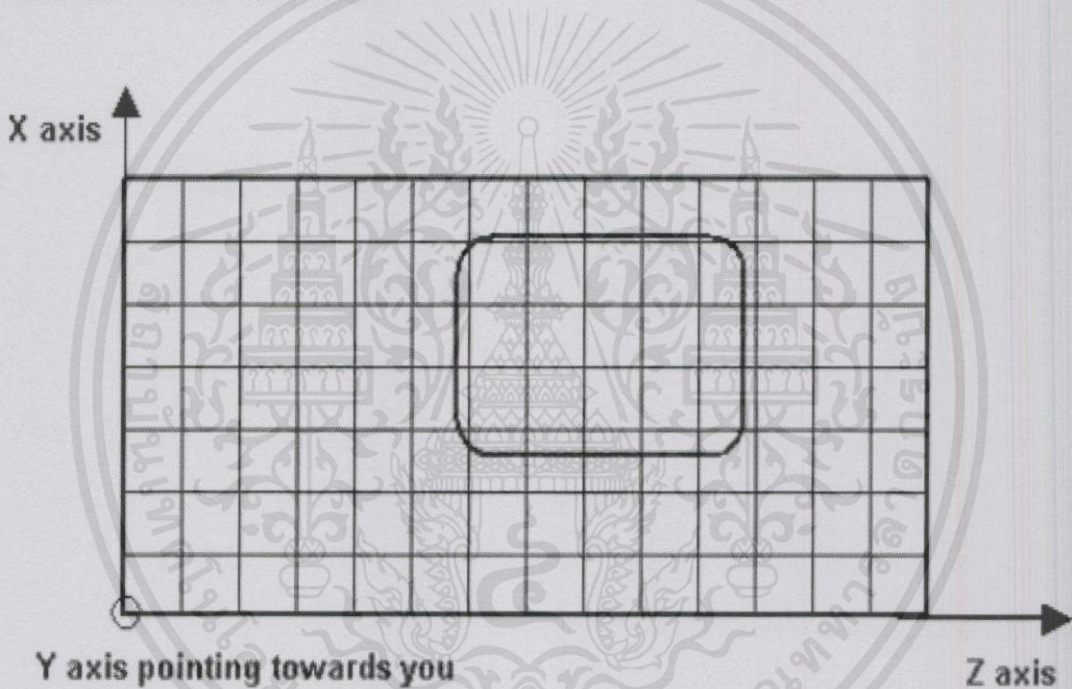
ชุดโปรแกรม OptiFDTD เป็นชุดโปรแกรมที่ทำงานโดยมีพื้นฐานมาจากวิธีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชนิดเวลาไม่ต่อเนื่องหรือที่เรียกย่อๆ ว่า FDTD ซึ่งการใช้ FDTD นั้นเป็นที่ยอมรับในเรื่องประสิทธิภาพในการใช้งานทางวิศวกรรมศาสตร์สำหรับการประยุกต์และการจำลองแบบการเลี้ยวเบนในทัศนศาสตร์อุปกรณ์ คุณสมบัติโดยรวมของ FDTD สามารถยกตัวอย่างได้เช่นความสามารถในการสร้างแบบจำลองของการเคลื่อนที่ของแสง การกระเจิงของแสง การเลี้ยวเบนของแสง และการสะท้อนของแสง รวมไปถึงปรากฏการณ์โพลาไรซ์ของแสงด้วย นอกจากนี้ FDTD ยังสามารถสร้างแบบจำลองของวัสดุที่มีสมบัติที่แตกต่างกันในแต่ละทิศทาง ซึ่งเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบของโมเลกุล และสร้างแบบจำลองการกระเจิงแสงโดยไม่จำเป็นต้องมีการกำหนดลักษณะของสนามไฟฟ้าก่อน ตัวอย่างเช่น การกำหนดค่าแอมพลิจูดให้เปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ วิธีการนี้ช่วยให้การจำลองแบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทั้งยังทำให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างของอุปกรณ์ที่อยู่ในระดับไมครอนและโครงสร้างที่ต้องการรายละเอียดมากๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 สมการของการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ชนิดเวลาไม่ต่อเนื่อง (FDTD) ในสองมิติ

วิธี FDTD นั้นมีหลักการพื้นฐานโดยตรงมาจากการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์เชิงตัวเลขของเคอร์เนลของสมการแมกซ์เวลล์ที่ขึ้นกับเวลา อุปกรณ์เชิงแสงจะวางอยู่ในระนาบของแกน X และแกน Z การเคลื่อนที่ของแสงจะเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน Z ส่วนในทิศของแกน Y ถูกกำหนดให้มีค่าเป็นอนันต์ ทำให้สามารถตัดเทอมอนุพันธ์ของ  $\partial/\partial y$  จากสมการแมกซ์เวลล์ออกได้ทั้งหมด และยังสามารถแยกสมการนี้ออกเป็นสองส่วน (TE และ TM) ซึ่งเป็นชุดสมการที่เป็นอิสระต่อกัน

การคำนวณขอบเขตในสองมิติแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.1 แสดงระยะที่เปลี่ยนไปในแกน X และ Z คือ  $\Delta x$  และ  $\Delta z$  ตามลำดับ โดยที่ในแต่ละเมช (mesh) มีความเกี่ยวข้องกันกับชนิดของวัสดุที่มีลักษณะเฉพาะตัว และมีการบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด เช่น ค่าดัชนีหักเห ลักษณะของการกระเจิงแสง เป็นต้น

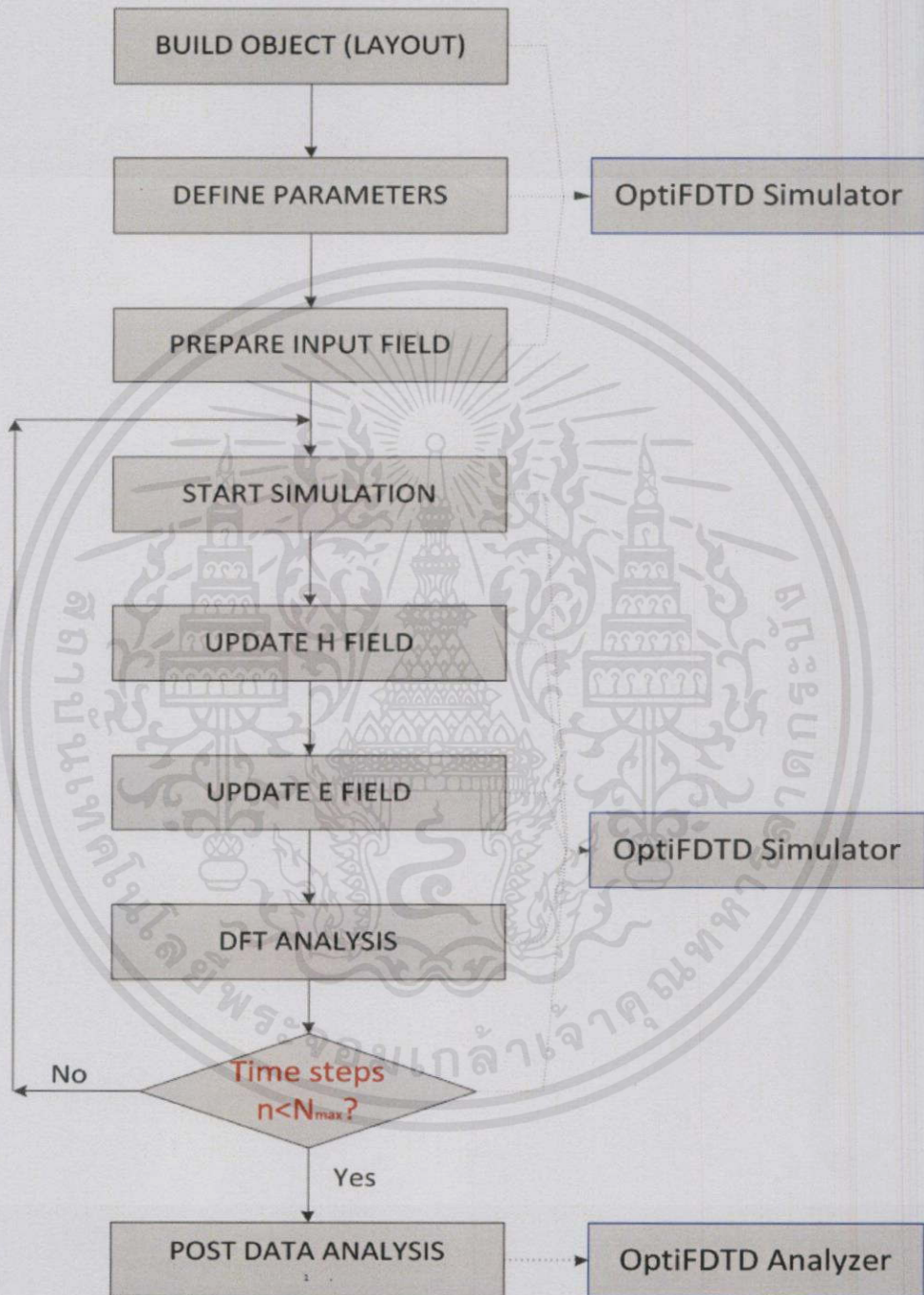


รูปที่ 3.1 แสดงการคำนวณเชิงตัวเลขของขอบเขตในสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ขั้นตอนการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ด้วย OptiFDTD

สำหรับรูปที่ 3.2 นี้เป็น Flow Chart สำหรับการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี FDTD ในโปรแกรม OptiFDTD ซึ่งจะบรรยายละเอียดขั้นตอนต่างๆ ของการทำงานใน OptiFDTD ดังนี้

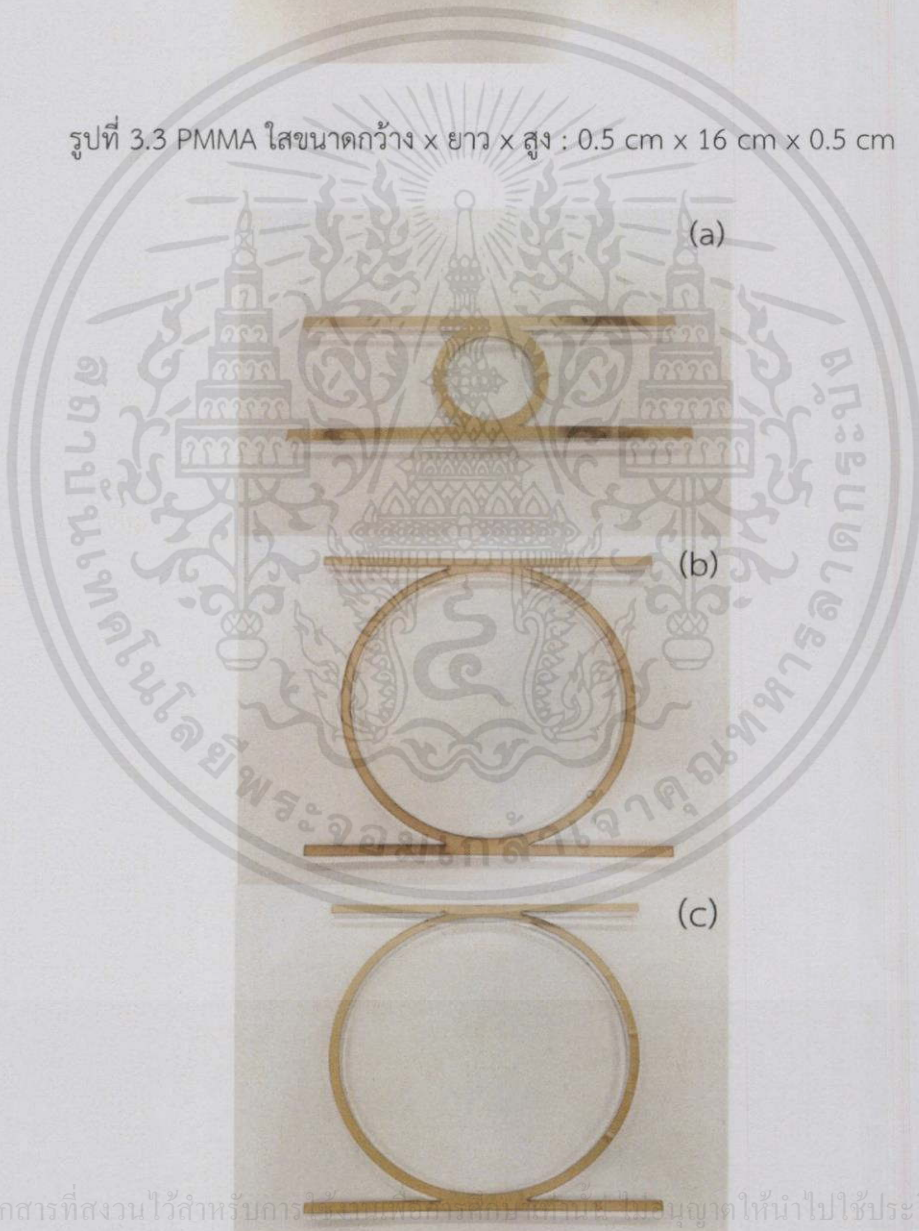


รูปที่ 3.2 Flow Chart ของการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี FDTD ใน OptiFDTD เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.4.1 PMMA ไส

รูปที่ 3.3 PMMA ไสขนาดกว้าง x ยาว x สูง : 0.5 cm x 16 cm x 0.5 cm

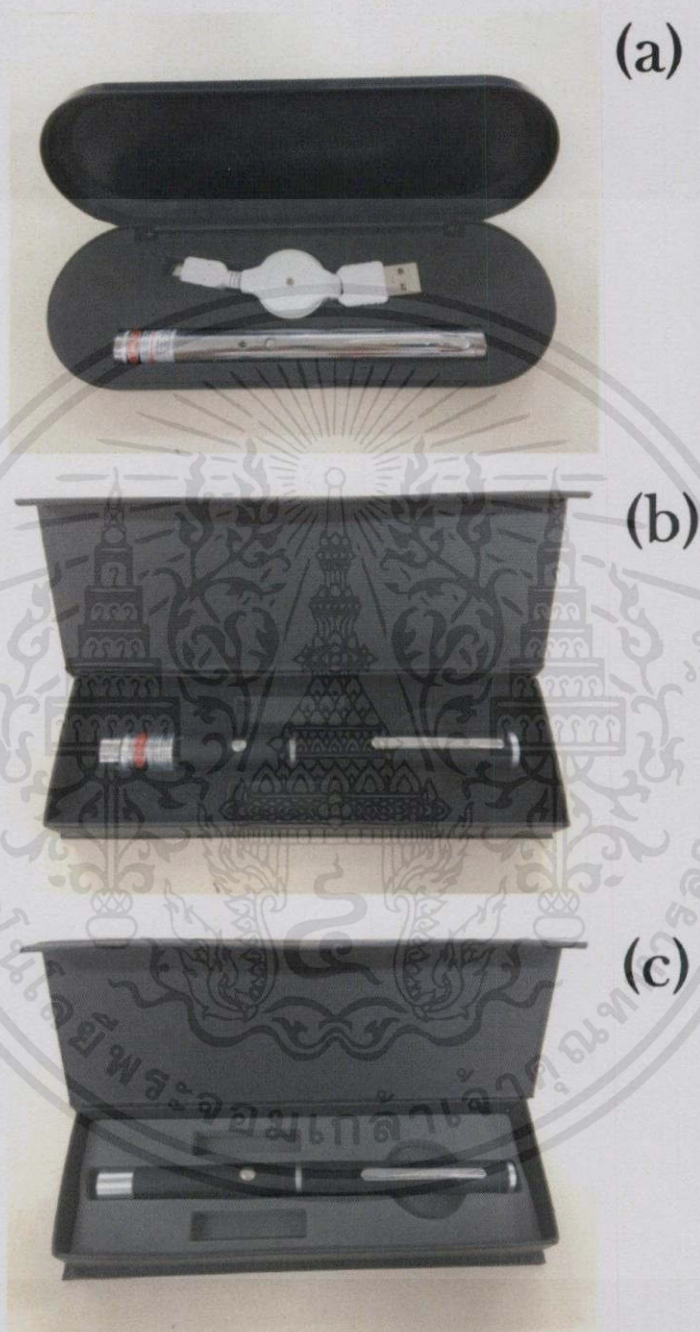


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเอกสารลับเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 Ring Resonator ที่มีขนาดรัศมี (a) 2.15 cm, (b) 6.60 cm และ (c) 7.40 cm

### 3.4.2 เลเซอร์ไดโอด

เลเซอร์ไดโอดที่ใช้ในการทดลองนี้นั้นใช้ทั้งหมด 3 ความยาวคลื่น คือ ความยาวคลื่น 650 nm (สีแดง), 532 nm (สีเขียว) และ 445 nm (สีน้ำเงิน)



รูปที่ 3.5 เลเซอร์ไดโอด (a) ความยาวคลื่น 650 nm (สีแดง), (b) ความยาวคลื่น 532 nm (สีเขียว) และ (c) ความยาวคลื่น 445 nm (สีน้ำเงิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีก้ารนำไปใช้

### 3.4.3 โวลต์มิเตอร์

ในการทดลองนี้ใช้โวลต์มิเตอร์แบบดิจิตอล รุ่น UT30B



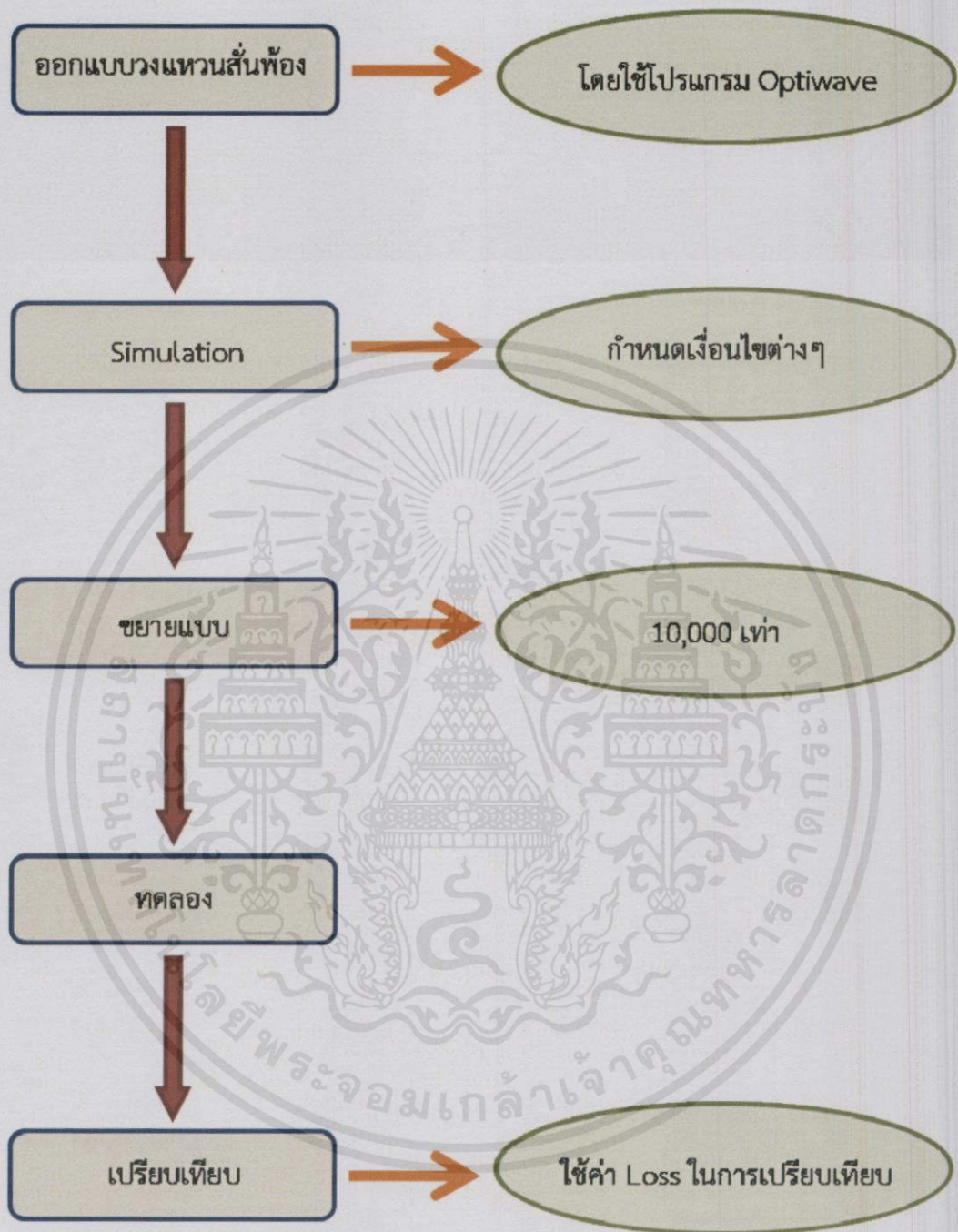
รูปที่ 3.6 โวลต์มิเตอร์ รุ่น UT30B

### 3.4.4 โฟโตทรานซิสเตอร์

โฟโตทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ Silicon NPN Phototransistor รุ่น SFH 3710 ซึ่งมี Spectral range of sensitivity อยู่ที่ 350 – 950 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.7 โฟโตทรานซิสเตอร์รุ่น SFH 3710  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย



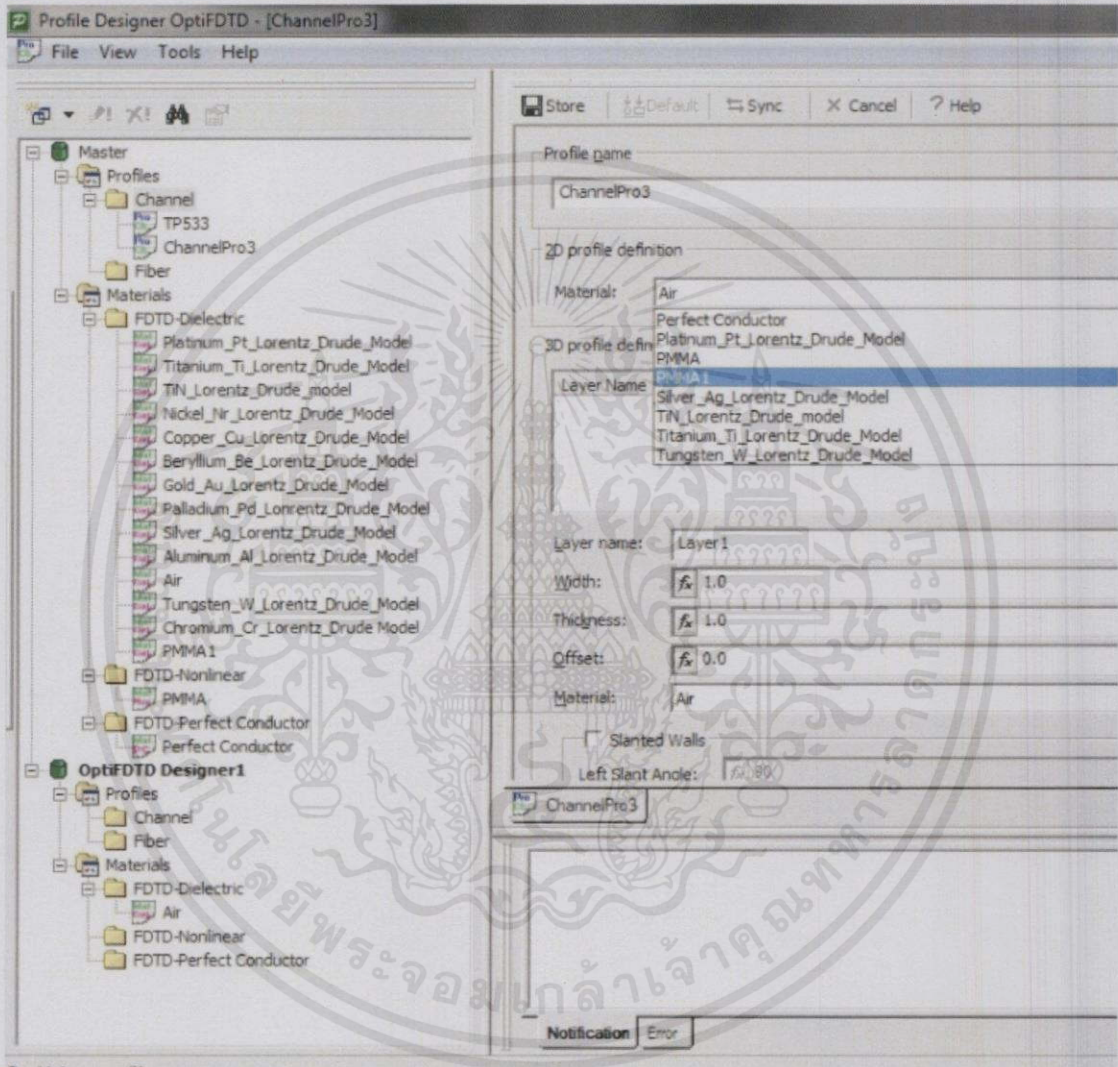
รูปที่ 3.8 Flow Chart ของขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.1 การออกแบบวงแหวนสั่นพ้องในโปรแกรม OptiFDTD

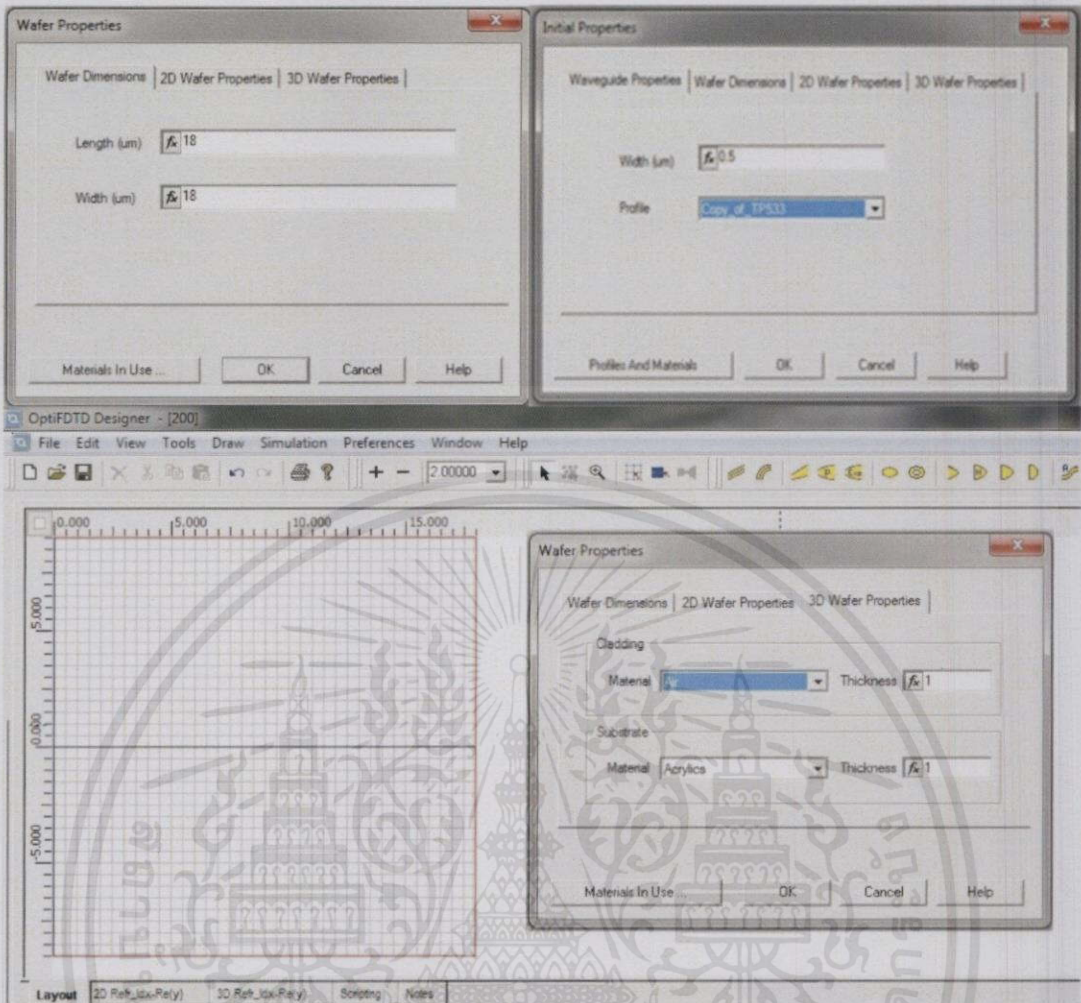
3.5.1.1 โปรแกรมที่ใช้นั้นมีชื่อว่า OptiFDTD Designer ทำการเลือกวัสดุที่จะใช้ในการออกแบบ โดยที่เราเลือกใช้วัสดุเป็น PMMA ที่มีค่าดัชนีหักเห = 1.492

3.5.1.2 ระบุความกว้างความยาวและความหนาของฐาน รวมถึงวัสดุภายนอกด้วย นั่นคืออากาศค่าดัชนีหักเห = 1



รูปที่ 3.9 เลือกวัสดุที่จะใช้ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

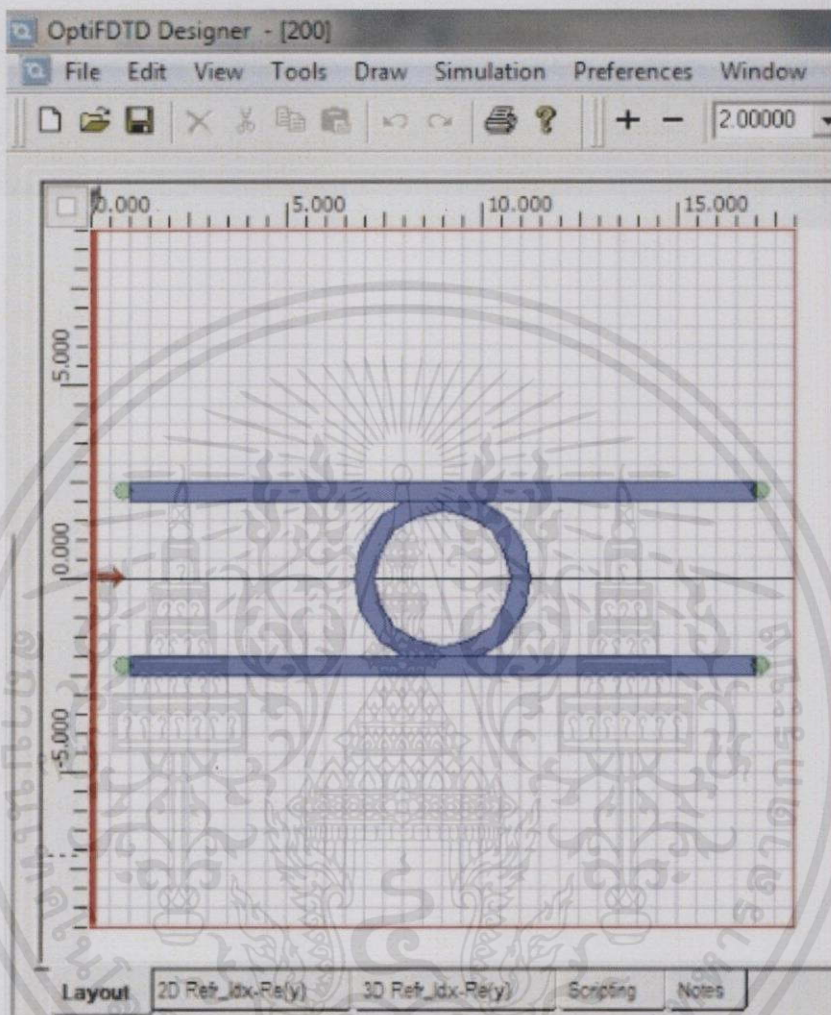


รูปที่ 3.10 ทำการกำหนดขนาดของฐาน

3.5.1.3 ออกแบบวงแหวนสั่นพ้องด้วยอุปกรณ์การวาดภายในโปรแกรม โดยกำหนด ความกว้าง×ความยาว×ความหนา ของ waveguide ทั้งบนและล่างมีขนาด  $0.5 \times 16 \times 0.5 \mu\text{m}$  รัศมีวงแหวนมีค่า  $2 \mu\text{m}$  ขนาดของ ความกว้าง×ความหนา ของวงแหวนเท่ากับ  $0.5 \times 0.5 \mu\text{m}$  ให้วงแหวนและ waveguide ซ้อนทับกัน 50% หรือ  $0.25 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

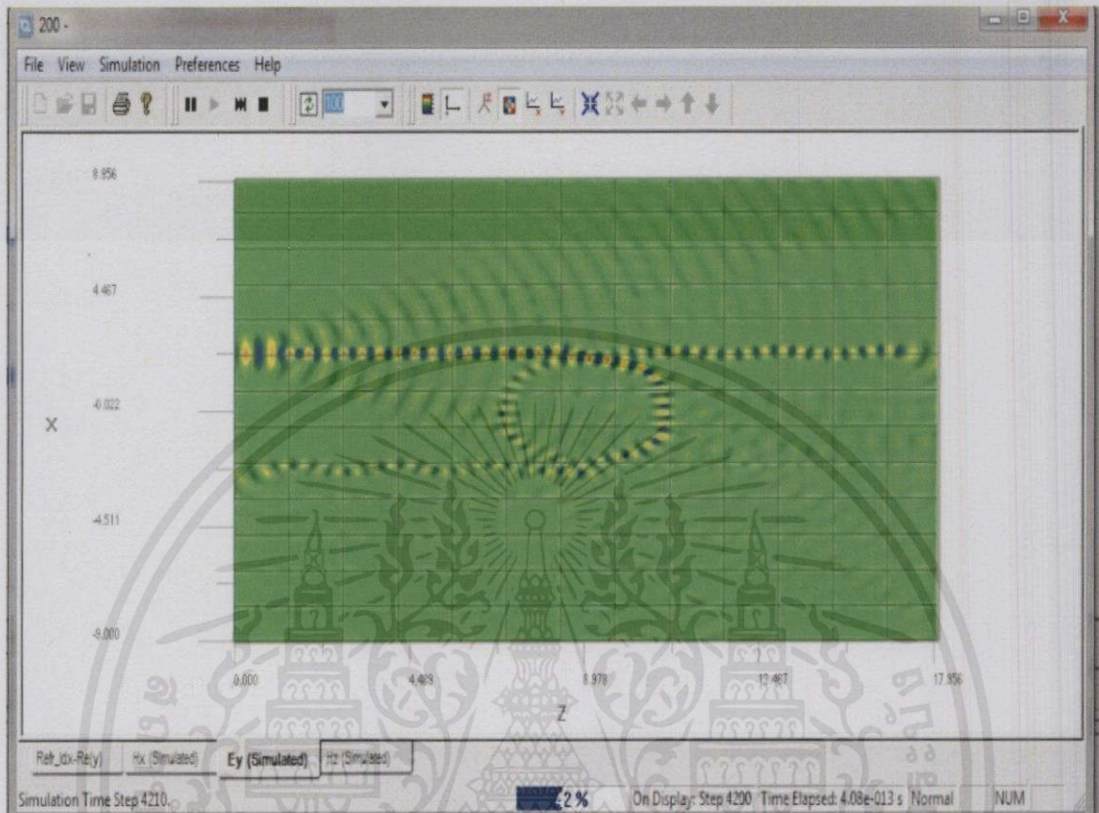
3.5.1.4 วางแหล่งกำเนิดแสงไว้ในจุดที่เราต้องการ โดยแหล่งกำเนิดแสงนั้นมีค่าความยาวคลื่นที่ 650 nm และวาง observation properties แบบจุดลงไปทั้ง 4 ด้านของปลายวงแหวนสี่นพ้อง



รูปที่ 3.11 แสดงรูปที่ได้ทำการออกแบบในโปรแกรม OptiFDTD Designer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1.5 ทำการ Simulation แบบ 2D 32Bit simulation Parameters ตั้งค่า step การ runs อยู่ที่ 10,000 time steps และบันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 3.12 ระหว่างการรอดผล Simulation

3.5.1.6 ทำข้อ 3.5.1.5 ซ้ำ โดยเปลี่ยนรัศมีของวงแหวนเป็น 2.05-7.50  $\mu\text{m}$  โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05  $\mu\text{m}$

3.5.1.7 คัดเลือกรัศมีที่ให้ค่า  $L_{\text{THP}}$ ,  $L_{\text{TAP}}$  และ  $L_{\text{D}}$  น้อยที่สุด

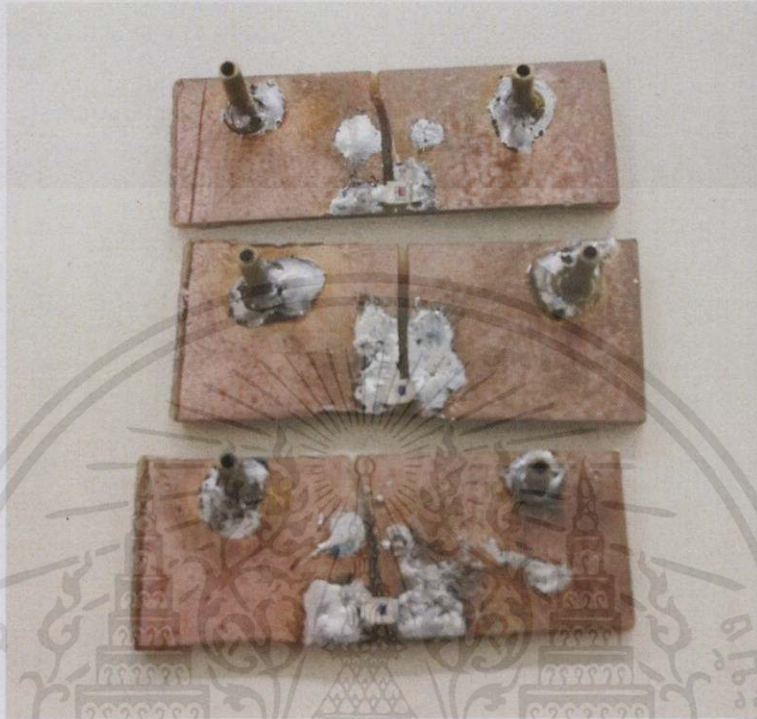
3.5.1.8 ทำซ้ำตั้งแต่ ข้อ 3.5.1.3 – 3.5.1.7 โดยเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงให้มีค่าความยาวคลื่นอยู่ที่ 532 nm และ 445 nm ตามลำดับ

3.5.1.9 นำแบบทั้ง 3 ที่ได้มาขยายขนาด 10,000 เท่า ตามแบบในโปรแกรม Optiwave เพื่อทำการตัดแบบ PMMA ตามที่ได้ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

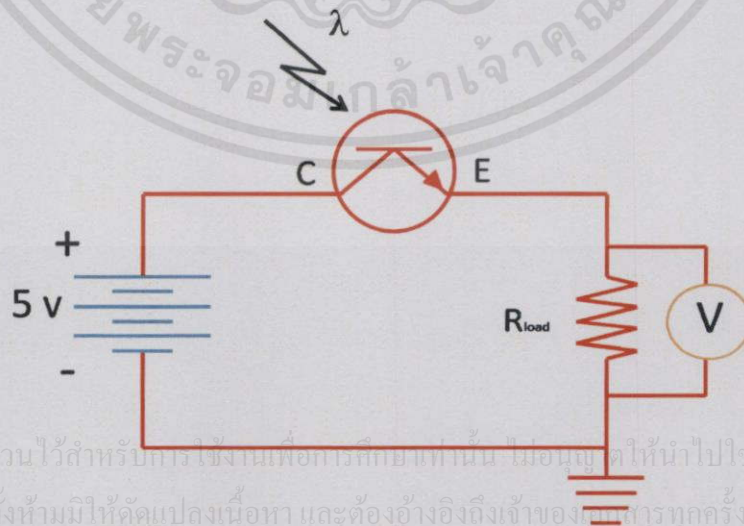
### 3.5.2 ทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์

3.5.2.1 เตรียมอุปกรณ์ก่อนทำการทดลองโดยการบัดกรีโฟโตทรานซิสเตอร์กับบอร์ดแผ่นทองแดง และเพิ่มตาไก่เพื่อเพิ่มความเสถียรในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 โฟโตทรานซิสเตอร์ที่บัดกรีเสร็จเรียบร้อยแล้ว

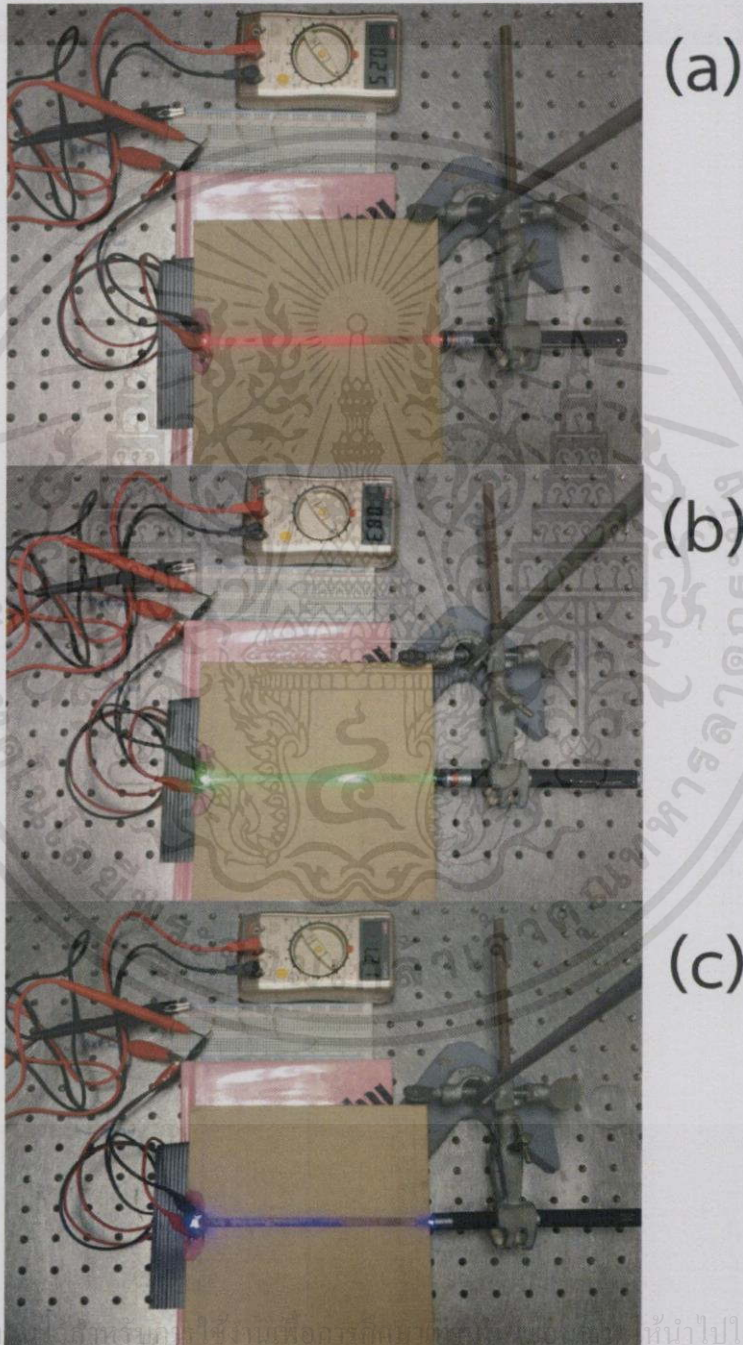
3.5.2.2 ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม  $R_{load}$  ของ Input Port โดยต่อวงจรดังรูปที่ 3.14 บันทึกผล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

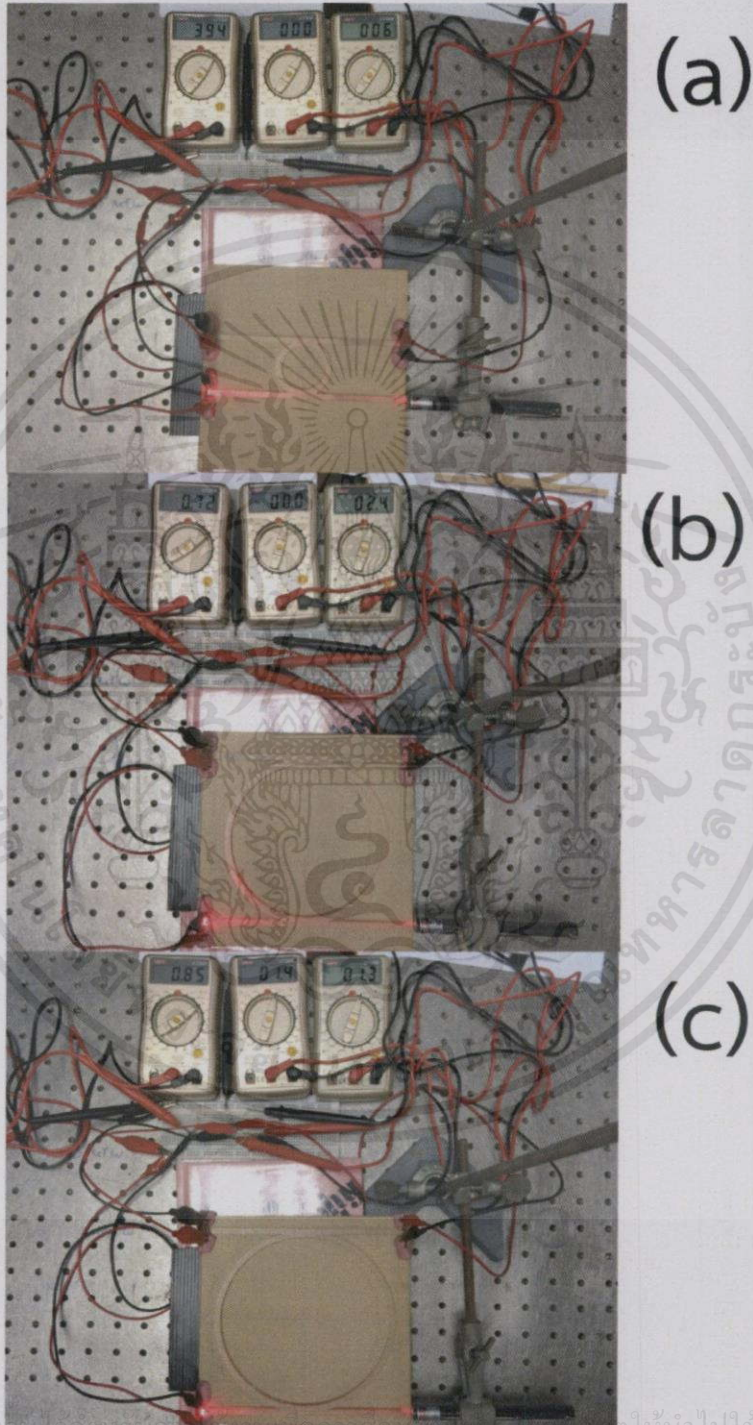
รูปที่ 3.14 วงจรของโฟโตทรานซิสเตอร์โดยมีโวลต์มิเตอร์วัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม  $R_{load}$

ต่อไปวัดค่าการลดทอนของสัญญาณแสงภายใน PMMA โดยที่ไม่มีวงแหวนสั่นพ้องใส่ แหล่งกำเนิดแสงค่าความยาวคลื่น 650 nm (สีแดง) อีกด้านของท่อนำคลื่นโดยมี โฟโตทรานซิสเตอร์รับแสงอยู่อีกด้านหนึ่ง ซึ่งโฟโตทรานซิสเตอร์นี้จะต่อเข้ากับโวลต์มิเตอร์ บันที่ผลการทดลอง โดยที่การจัดระบบของอุปกรณ์จะเป็นไปดังรูปที่ 3.15(a) ทำซ้ำโดย เปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงให้มีค่าความยาวคลื่นอยู่ที่ 532 nm (สีเขียว) และ 445 nm (สีน้ำเงิน) ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.15(b) และ 3.15(c) ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น หากนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
รูปที่ 3.15 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม  $R_{load}$  (a) 650 nm, (b) 532 nm และ (c) 445 nm

3.5.2.3 นำแบบจำลองอุปกรณ์ขนาดรัศมี 2.15 cm, 6.60 cm และ 7.40 cm มาทำการวัดค่า โดยทำการใส่อินพุตที่ปลายด้านหนึ่ง และใช้โฟโตทรานซิสเตอร์รับแสงที่ปลายอีก 3 ด้าน ของวงแหวนเส้นพ้อง ดังรูปที่ 3.16(a), (b) และ (c) ตามลำดับ บันทึกผลการทดลอง



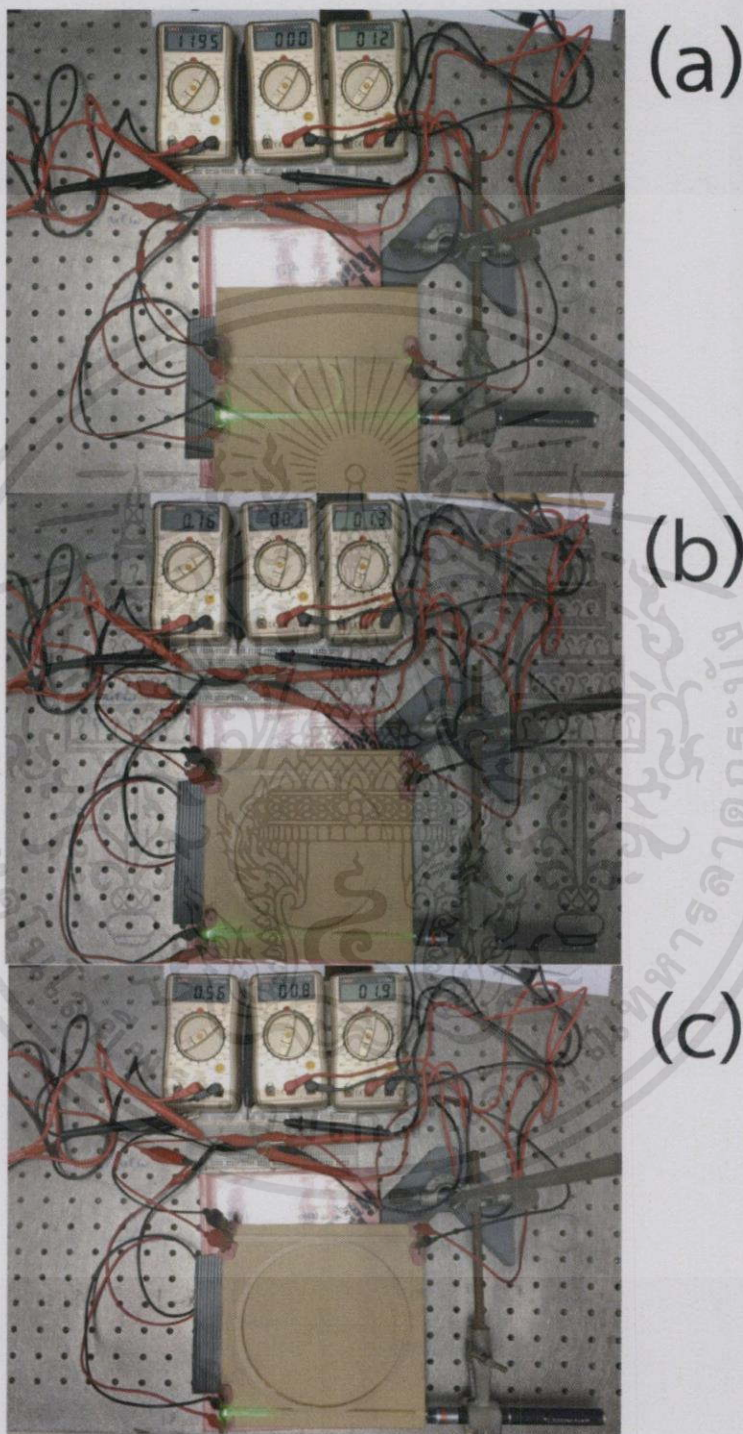
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับกรณีสอนเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและข้อมูลดังกล่าวไว้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้

รูปที่ 3.16 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม  $R_{load}$  ความยาวคลื่น 650 nm (สีแดง)

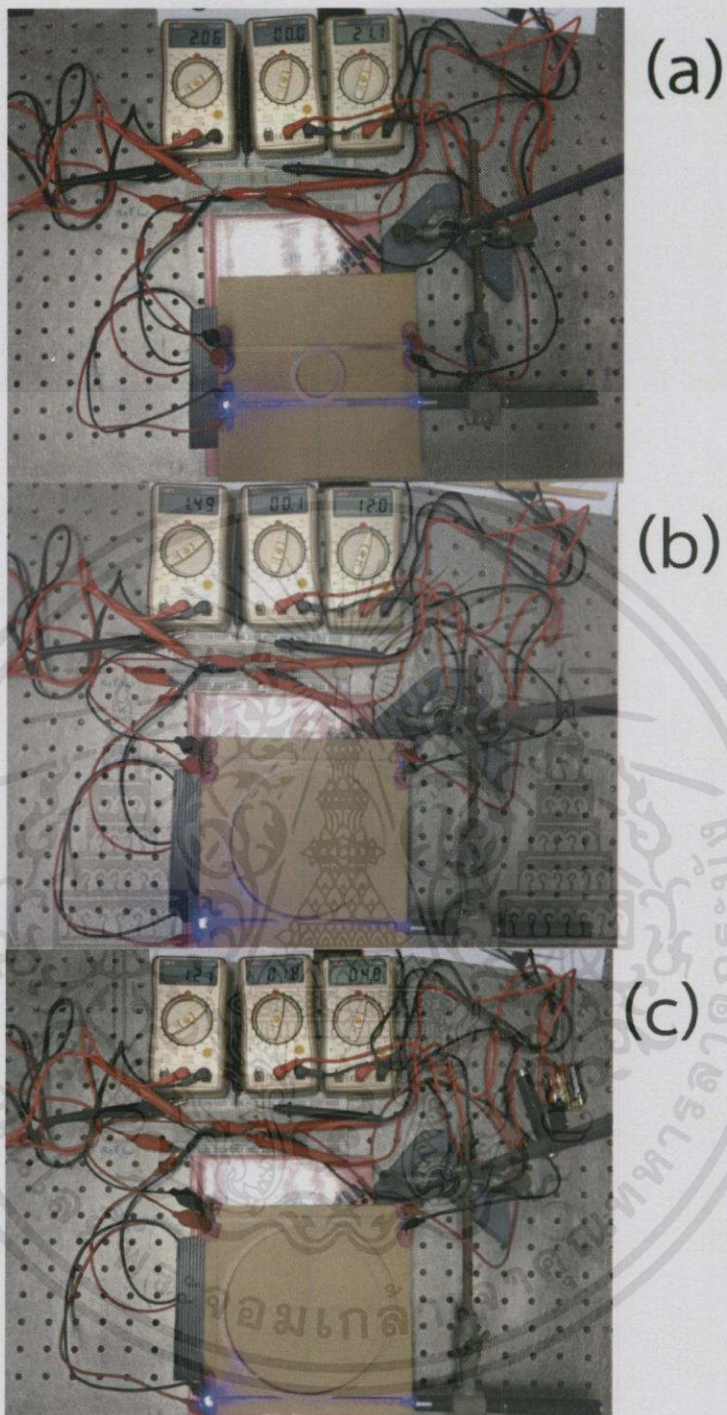
(a) ขนาดรัศมี 2.15 cm, (b) ขนาดรัศมี 6.60 cm และ (c) ขนาดรัศมี 7.40 cm

3.5.2.4 ทำซ้ำในข้อ 3.5.2.3 โดยเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงให้มีค่าความยาวคลื่นอยู่ที่ 532 nm และ 445 nm ตามลำดับ บันทึกผลการทดลอง แสดงได้ดังรูปที่ 3.17 และ 3.18 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.17 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม  $R_{load}$  ความยาวคลื่น 532 nm (สีเขียว)  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำข้อมูลของเอกสารหรือรูปไปใช้

(a) ขนาดรัศมี 2.15 cm, (b) ขนาดรัศมี 6.60 cm และ (c) ขนาดรัศมี 7.40 cm



รูปที่ 3.18 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม  $R_{load}$  ความยาวคลื่น 445 nm (สีน้ำเงิน)  
 (a) ขนาดรัศมี 2.15 cm, (b) ขนาดรัศมี 6.60 cm และ (c) ขนาดรัศมี 7.40 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 3.5.3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองในโปรแกรมและแบบจำลองอุปกรณ์ โยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง นำผลการทดลองในขั้นตอน 3.5.1 และ 3.5.2 มาทำการเปรียบเทียบค่าความ  
 แตกต่างในแต่ละค่าความยาวคลื่น

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

สำหรับบทนี้จะนำเสนอผลจากการดำเนินงานวิจัยโดยการใช้โปรแกรมจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ชนิดเวลาไม่ต่อเนื่องที่เรียกว่า OptiFDTD ในการสร้างแบบ ซึ่งจะนำแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นนำไปทำเป็นอุปกรณ์จริงโดยการขยายสเกลของแบบเพิ่มขึ้น 10,000 เท่า และนำผลมาเปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลองกับค่าที่บันทึกได้จากโปรแกรม และนำไปวิเคราะห์ผลในขั้นถัดไป

#### 4.1 การออกแบบวงแหวนสั่นพ้องในโปรแกรม OptiFDTD

ในขั้นตอนนี้จะเป็นผลจากการบันทึกค่าที่ได้จากการ Simulation ของโปรแกรม OptiFDTD โดยมีข้อกำหนดดังนี้

วัสดุของ Ring Resonator, Waveguide และฐาน คือ PMMA ซึ่งมีค่าดัชนีหักเห = 1.492

วัสดุภายนอก คือ อากาศ ค่าดัชนีหักเห = 1

ความยาว Waveguide = 16  $\mu\text{m}$

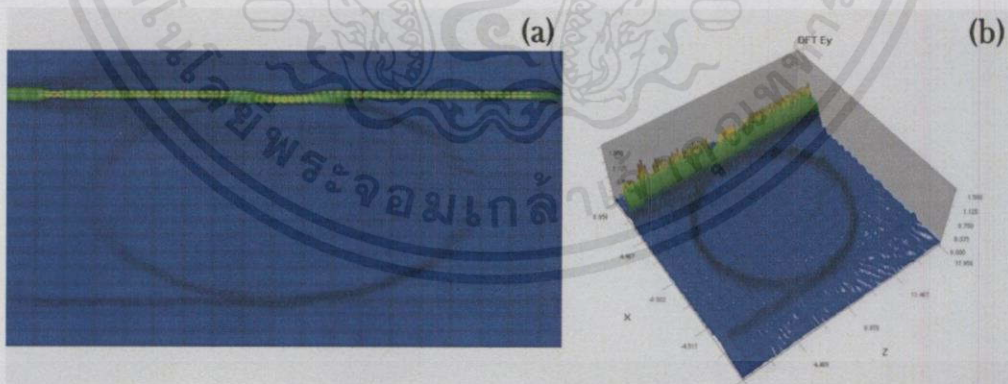
ขนาดของฐาน = 18x18  $\mu\text{m}$

ความกว้างของส่วน core 5  $\mu\text{m}$

โดยผลที่ได้จะนำเสนอเป็นรูปภาพ รวมถึงค่า Loss ต่างๆ ดังที่จะแสดงดังต่อไปนี้

ความยาวคลื่น 650 nm

ที่รัศมี 6.10  $\mu\text{m}$



รูปที่ 4.1 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 650 nm ที่รัศมี 6.10  $\mu\text{m}$  (a) 2-Dimension (b) 3-Dimension

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

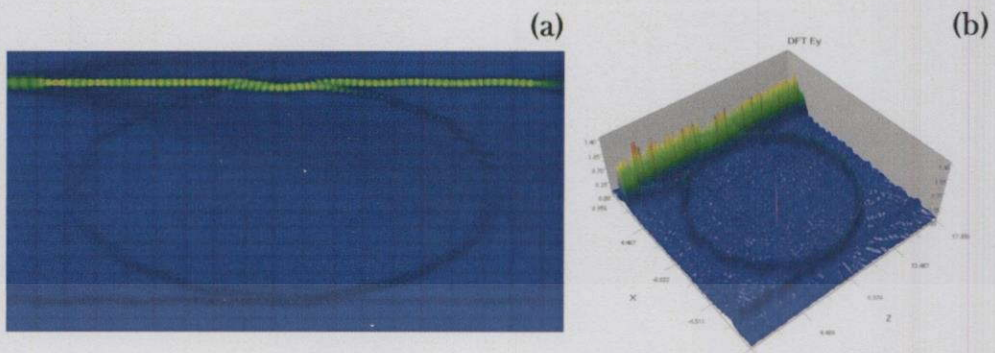
$L_{\text{THP}} = -0.5400 \text{ dB}$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทางศูนย์ฯ ขอสงวนสิทธิ์ให้คำปรึกษาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$L_{\text{TAP}} = 4.7513 \text{ dB}$

$L_{\text{D}} = 9.9288 \text{ dB}$

ที่รัศมี 6.75  $\mu\text{m}$



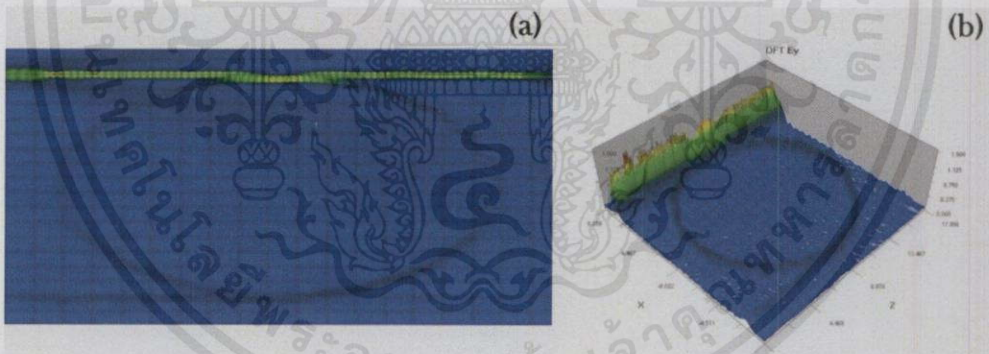
รูปที่ 4.2 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 650 nm ที่รัศมี 6.75  $\mu\text{m}$  (a) 2-Dimension (b) 3-Dimension

$$L_{\text{THP}} = -0.5730 \text{ dB}$$

$$L_{\text{TAP}} = 5.8053 \text{ dB}$$

$$L_{\text{D}} = 9.0016 \text{ dB}$$

ที่รัศมี 7.05  $\mu\text{m}$



รูปที่ 4.3 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 650 nm ที่รัศมี 7.05  $\mu\text{m}$  (a) 2-Dimension (b) 3-Dimension

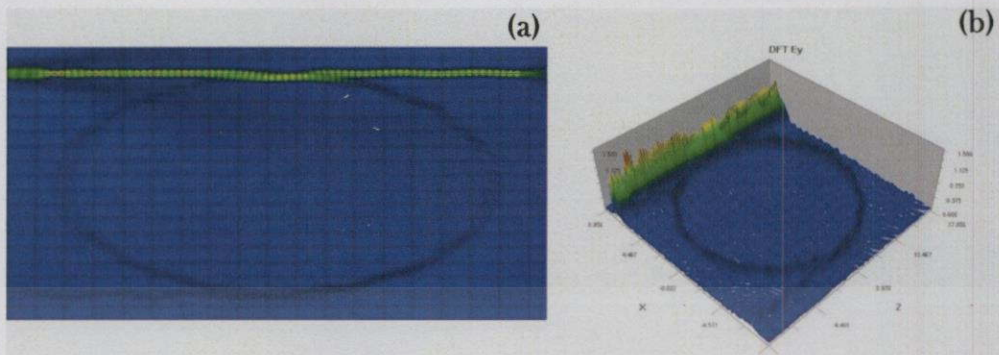
$$L_{\text{THP}} = -0.7189 \text{ dB}$$

$$L_{\text{TAP}} = 6.0875 \text{ dB}$$

$$L_{\text{D}} = 9.4741 \text{ dB}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่รัศมี 7.10  $\mu\text{m}$



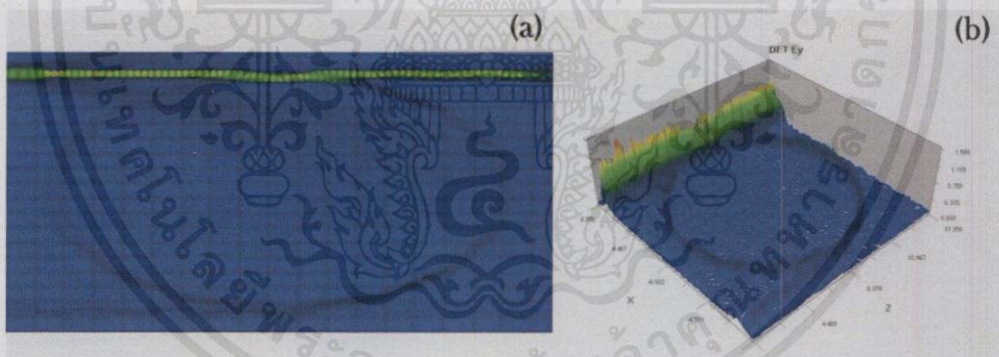
รูปที่ 4.4 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 650 nm ที่รัศมี 7.10  $\mu\text{m}$  (a) 2-Dimension (b) 3-Dimension

$$L_{\text{THP}} = -0.6889 \text{ dB}$$

$$L_{\text{TAP}} = 6.4812 \text{ dB}$$

$$L_{\text{D}} = 14.1465 \text{ dB}$$

ที่รัศมี 7.40  $\mu\text{m}$



รูปที่ 4.5 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 650 nm ที่รัศมี 7.40  $\mu\text{m}$  (a) 2-Dimension (b) 3-Dimension

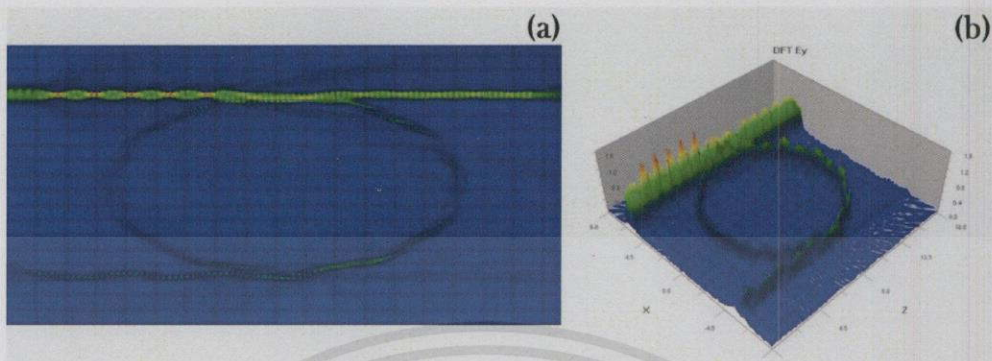
$$L_{\text{THP}} = -0.7601 \text{ dB}$$

$$L_{\text{TAP}} = 6.4696 \text{ dB}$$

$$L_{\text{D}} = 9.5872 \text{ dB}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จากผลทั้ง 5 ข้างต้นนั้นได้ทำการเลือกรัศมีที่มีขนาด 7.40  $\mu\text{m}$  เพื่อไปทำการขยายแบบใน ไม่ทำการขยายแบบอื่นอีกต่อไป เนื่องจากค่าของ  $L_{\text{THP}}$  นั้นมีติดลบที่มีค่ามากที่สุด และในขณะเดียวกัน  $L_{\text{TAP}}$  มีค่าน้อย รวมถึง  $L_{\text{D}}$  ด้วย เมื่อเทียบกับค่า  $L_{\text{THP}}$ ,  $L_{\text{TAP}}$  และ  $L_{\text{D}}$  ของรัศมีอื่นๆ

ความยาวคลื่น 532 nm  
ที่รัศมี 5.60 μm



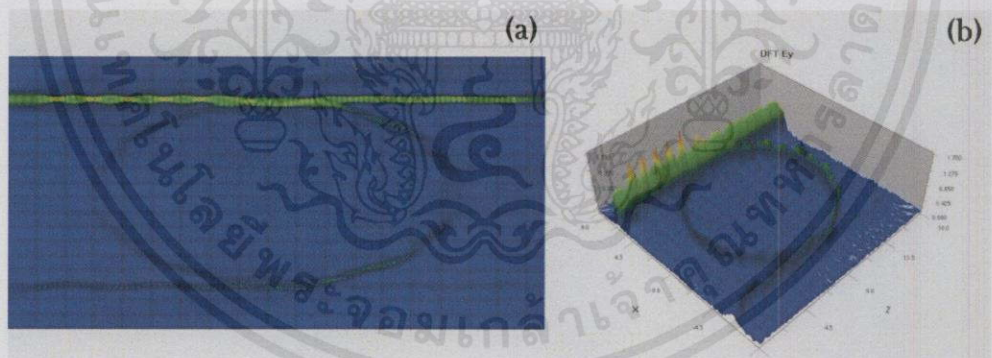
รูปที่ 4.6 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 532 nm ที่รัศมี 5.60 μm (a) 2-Dimension (b) 3-Dimension

$L_{THP} = 1.0140 \text{ dB}$

$L_{TAP} = 5.8817 \text{ dB}$

$L_D = 10.9417 \text{ dB}$

ที่รัศมี 5.95 μm



รูปที่ 4.7 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 532 nm ที่รัศมี 5.95 μm (a) 2-Dimension (b) 3-Dimension

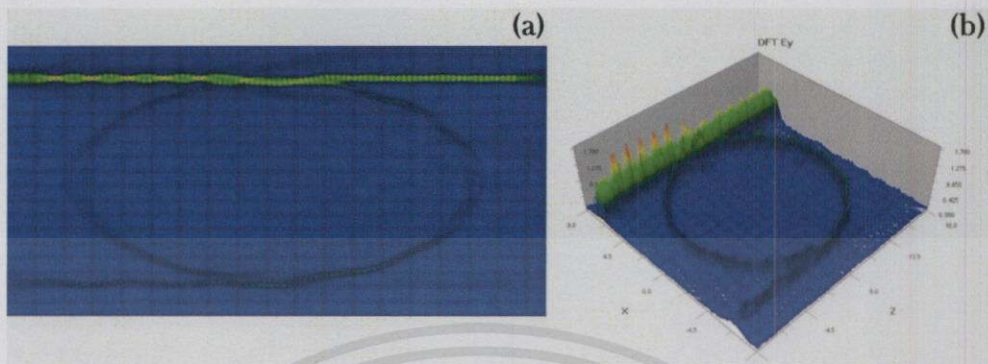
$L_{THP} = 0.9343 \text{ dB}$

$L_{TAP} = 4.5956 \text{ dB}$

$L_D = 10.6275 \text{ dB}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่รัศมี 6.60  $\mu\text{m}$



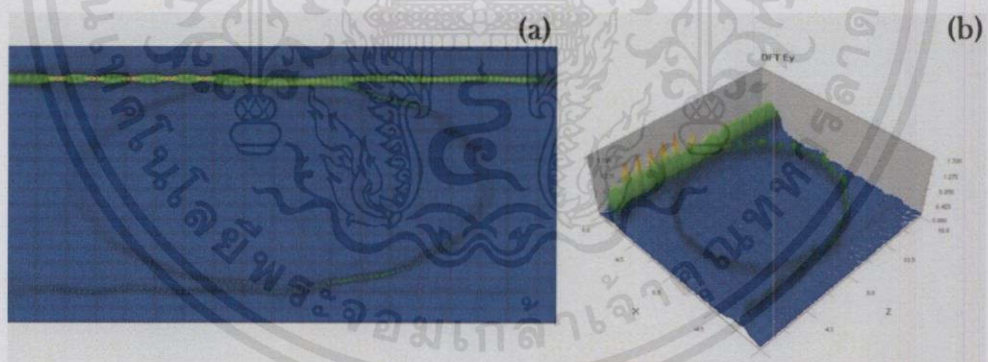
รูปที่ 4.8 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 532 nm ที่รัศมี 6.60  $\mu\text{m}$  (a) 2-Dimension (b) 3-Dimension

$$L_{\text{THP}} = 0.7802 \text{ dB}$$

$$L_{\text{TAP}} = 5.1614 \text{ dB}$$

$$L_{\text{D}} = 9.5946 \text{ dB}$$

ที่รัศมี 6.65  $\mu\text{m}$



รูปที่ 4.9 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 532 nm ที่รัศมี 6.65  $\mu\text{m}$  (a) 2-Dimension (b) 3-Dimension

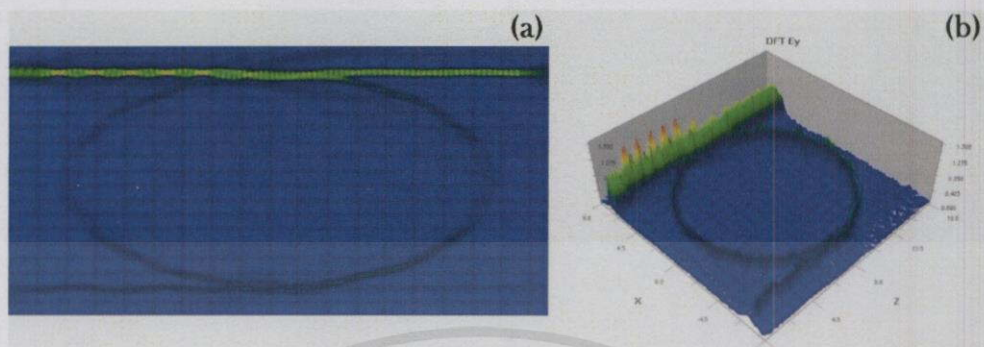
$$L_{\text{THP}} = 1.0266 \text{ dB}$$

$$L_{\text{TAP}} = 5.1582 \text{ dB}$$

$$L_{\text{D}} = 11.0584 \text{ dB}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่รัศมี 6.95  $\mu\text{m}$



รูปที่ 4.10 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 532 nm ที่รัศมี 6.95  $\mu\text{m}$  (a) 2-Dimension (b) 3-Dimension

$$L_{\text{THP}} = 1.0656 \text{ dB}$$

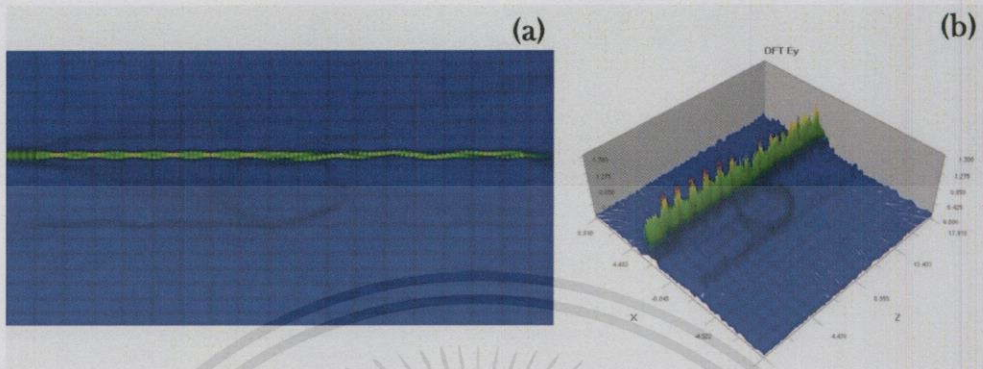
$$L_{\text{TAP}} = 5.2232 \text{ dB}$$

$$L_{\text{D}} = 10.4957 \text{ dB}$$

จากผลทั้ง 5 ข้างต้นนั้นได้ทำการเลือกรัศมีที่มีขนาด 6.60  $\mu\text{m}$  เพื่อไปทำการขยายแบบในขั้นตอนต่อไป เนื่องด้วยค่าของ  $L_{\text{THP}}$  นั้นมีค่าน้อยที่สุด และในขณะเดียวกัน  $L_{\text{TAP}}$  มีค่าน้อยรวมถึง  $L_{\text{D}}$  ด้วย เมื่อเทียบกับค่า  $L_{\text{THP}}$ ,  $L_{\text{TAP}}$  และ  $L_{\text{D}}$  ของรัศมีอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น 445 nm  
ที่รัศมี 2.00  $\mu\text{m}$



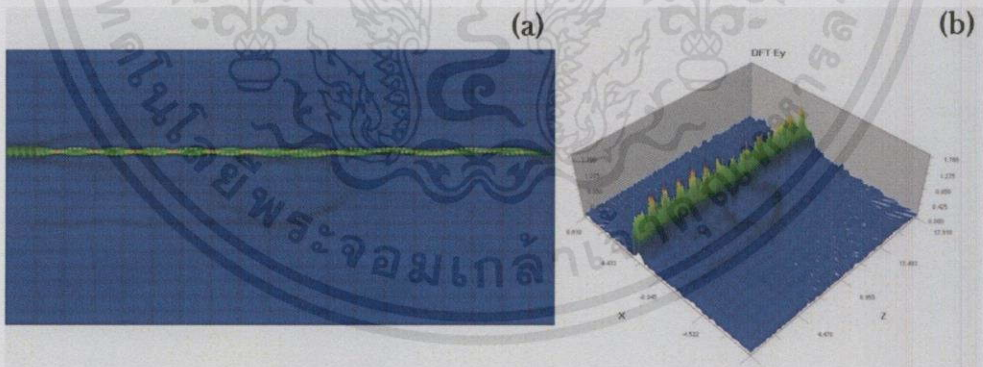
รูปที่ 4.11 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 445 nm ที่รัศมี 2.00  $\mu\text{m}$  (a) 2-Dimension (b) 3-Dimension

$$L_{\text{THP}} = -0.5940 \text{ dB}$$

$$L_{\text{TAP}} = 12.4677 \text{ dB}$$

$$L_{\text{D}} = 14.9657 \text{ dB}$$

ที่รัศมี 2.10  $\mu\text{m}$



รูปที่ 4.12 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 445 nm ที่รัศมี 2.10  $\mu\text{m}$  (a) 2-Dimension (b) 3-Dimension

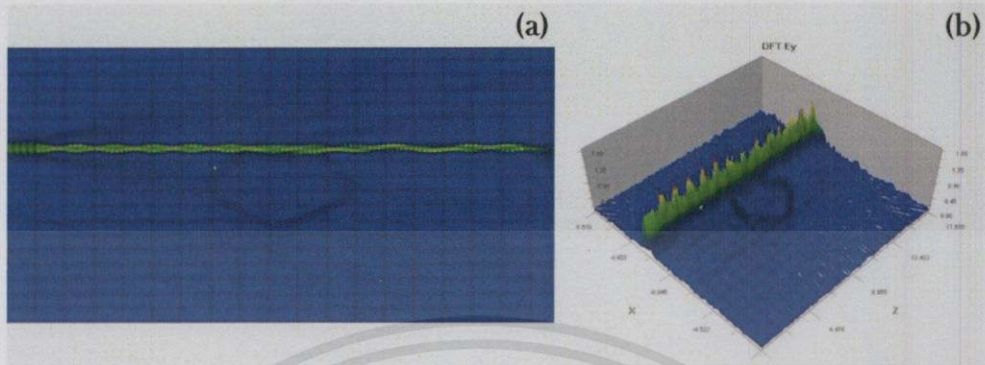
$$L_{\text{THP}} = -0.2710 \text{ dB}$$

$$L_{\text{TAP}} = 15.7628 \text{ dB}$$

$$L_{\text{D}} = 12.8172 \text{ dB}$$

เอกสารนี้เป็นของมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าการ L<sub>D</sub> = 12.8172 dB ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่รัศมี 2.15  $\mu\text{m}$



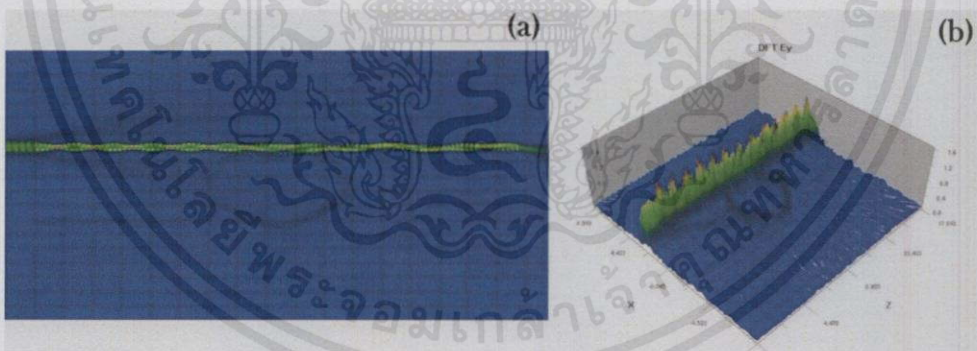
รูปที่ 4.13 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 445 nm ที่รัศมี 2.15  $\mu\text{m}$  (a) 2-Dimension (b) 3-Dimension

$$L_{\text{THP}} = -0.6279 \text{ dB}$$

$$L_{\text{TAP}} = 13.5975 \text{ dB}$$

$$L_{\text{D}} = 11.5726 \text{ dB}$$

ที่รัศมี 2.25  $\mu\text{m}$



รูปที่ 4.14 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 445 nm ที่รัศมี 2.25  $\mu\text{m}$  (a) 2-Dimension (b) 3-Dimension

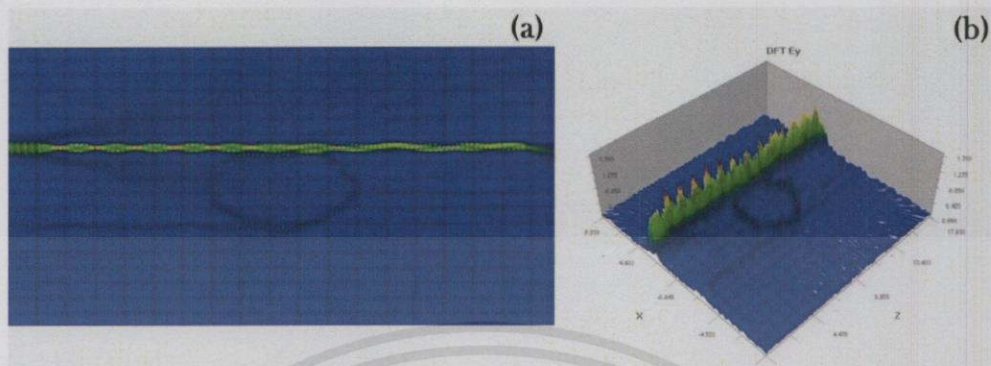
$$L_{\text{THP}} = -0.1180 \text{ dB}$$

$$L_{\text{TAP}} = 10.2030 \text{ dB}$$

$$L_{\text{D}} = 10.0890 \text{ dB}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่รัศมี 2.30  $\mu\text{m}$



รูปที่ 4.15 ผลจากการ Simulation จากโปรแกรม Optiwave ของความยาวคลื่น 445 nm ที่รัศมี 2.30  $\mu\text{m}$  (a) 2-Dimension (b) 3-Dimension

$$L_{\text{THP}} = -0.4594 \text{ dB}$$

$$L_{\text{TAP}} = 8.9699 \text{ dB}$$

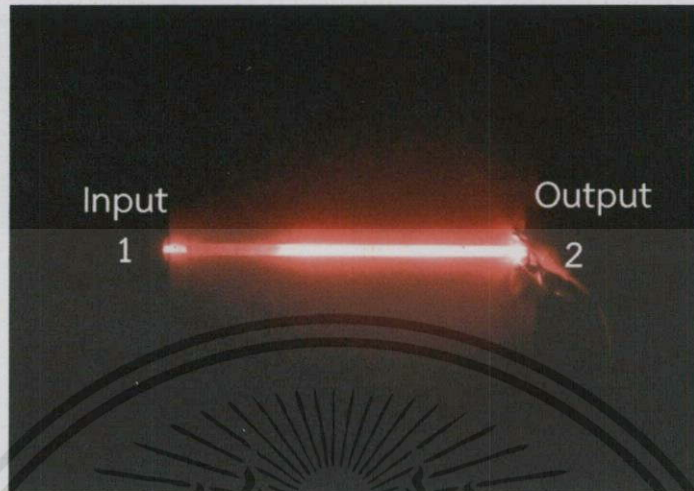
$$L_{\text{D}} = 13.0400 \text{ dB}$$

จากผลทั้ง 5 ข้างต้นนั้นได้ทำการเลือกรัศมีที่มีขนาด 2.15  $\mu\text{m}$  เพื่อไปทำการขยายแบบในขั้นตอนต่อไป เนื่องด้วยค่าของ  $L_{\text{THP}}$  นั้นมีติดลบที่มีค่ามากที่สุด และในขณะเดียวกัน  $L_{\text{TAP}}$  มีค่าน้อย รวมถึง  $L_{\text{D}}$  ด้วย เมื่อเทียบกับค่า  $L_{\text{THP}}$ ,  $L_{\text{TAP}}$  และ  $L_{\text{D}}$  ของรัศมีอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์

ความยาวคลื่น 650 nm



รูปที่ 4.16 ผลการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ waveguide ยาว 16 cm ความยาวคลื่น 650 nm

ค่า  $Loss_{dB}$  ในระบบของค่าความยาวคลื่น 650 nm 0.650728 dB

ที่รัศมี 2.15 cm



รูปที่ 4.17 ผลจากการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ ความยาวคลื่น 650 nm ที่รัศมี 2.15 cm

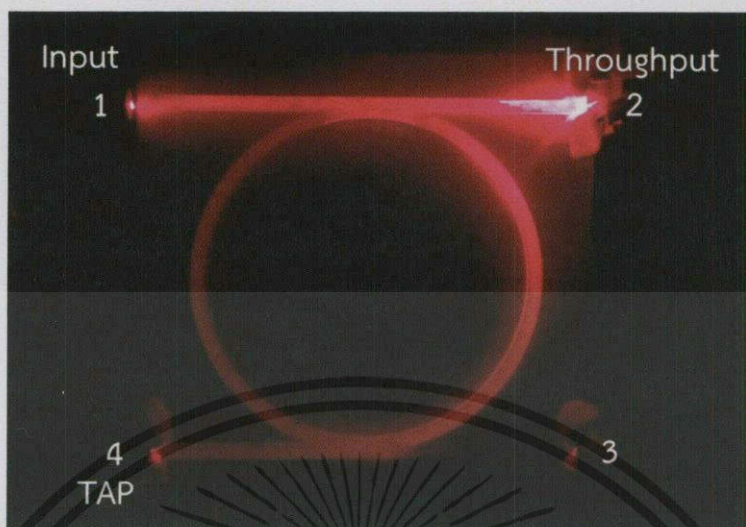
$$L_{THP} = 2.8400 \text{ dB}$$

$$L_{TAP} = 16.7877 \text{ dB}$$

$$L_D = 19.4201 \text{ dB}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

ที่รัศมี 6.60 cm



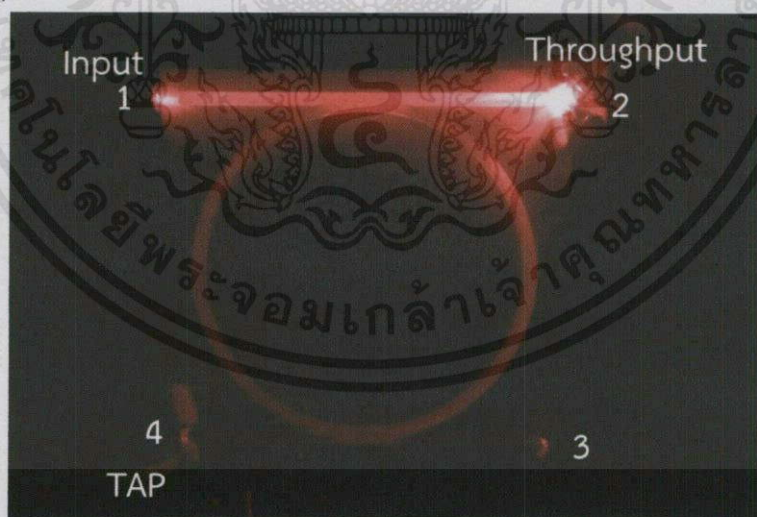
รูปที่ 4.18 ผลจากการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ ความยาวคลื่น 650 nm ที่รัศมี 6.60 cm

$$L_{\text{THP}} = 2.4494 \text{ dB}$$

$$L_{\text{TAP}} = 16.9062 \text{ dB}$$

$$L_{\text{D}} = 22.3469 \text{ dB}$$

ที่รัศมี 7.40 cm



รูปที่ 4.19 ผลจากการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ ความยาวคลื่น 650 nm ที่รัศมี 7.40 cm

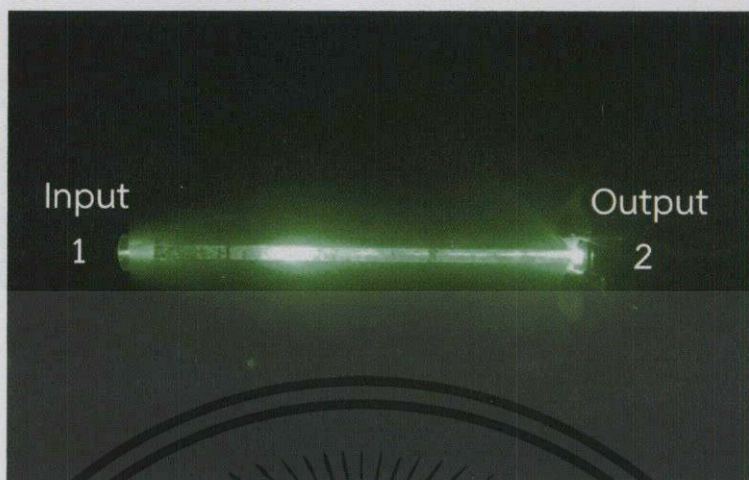
$$L_{\text{THP}} = 1.0933 \text{ dB}$$

$$L_{\text{TAP}} = 17.5333 \text{ dB}$$

$$L_{\text{D}} = 24.0654 \text{ dB}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น 532 nm



รูปที่ 4.20 ผลการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ waveguide ยาว 16 cm ความยาวคลื่น 532 nm

ค่า Loss<sub>dB</sub> ในระบบของค่าความยาวคลื่น 532 nm 0.386167 dB

ที่รัศมี 2.15 cm



รูปที่ 4.21 ผลจากการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ ความยาวคลื่น 532 nm ที่รัศมี 2.15 cm

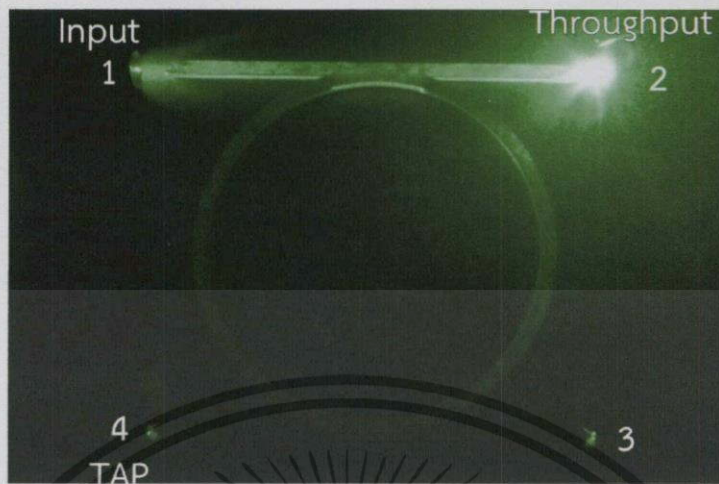
$$L_{\text{THP}} = 3.3189 \text{ dB}$$

$$L_{\text{TAP}} = 20.6160 \text{ dB}$$

$$L_{\text{D}} = 24.2957 \text{ dB}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่รัศมี 6.60 cm



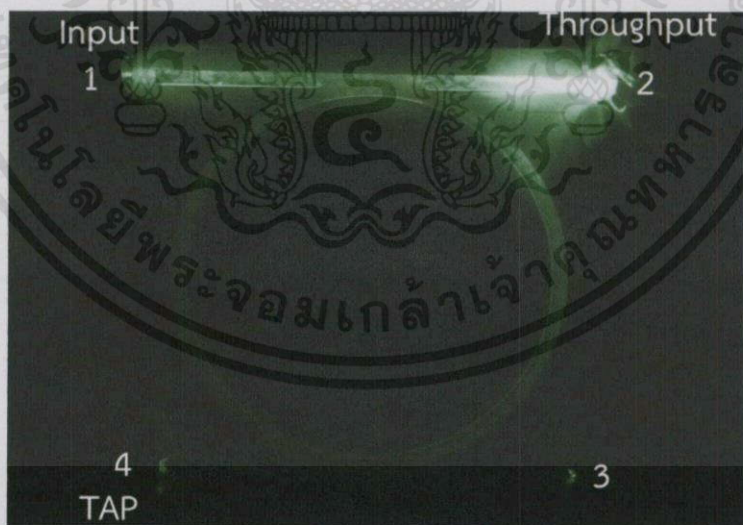
รูปที่ 4.22 ผลจากการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ ความยาวคลื่น 532 nm ที่รัศมี 6.60 cm

$$L_{\text{THP}} = 1.7238 \text{ dB}$$

$$L_{\text{TAP}} = 20.2119 \text{ dB}$$

$$L_{\text{D}} = 20.6695 \text{ dB}$$

ที่รัศมี 7.40 cm



รูปที่ 4.23 ผลจากการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ ความยาวคลื่น 532 nm ที่รัศมี 7.40 cm

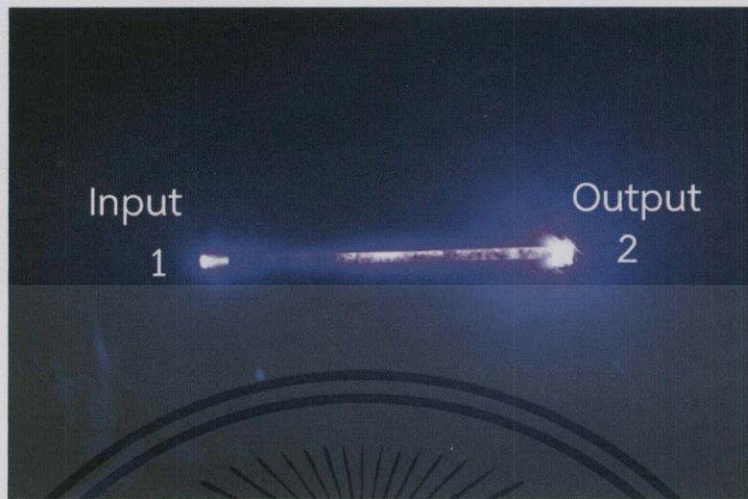
$$L_{\text{THP}} = 3.0645 \text{ dB}$$

$$L_{\text{TAP}} = 18.4403 \text{ dB}$$

$$L_{\text{D}} = 29.0849 \text{ dB}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ลงนามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

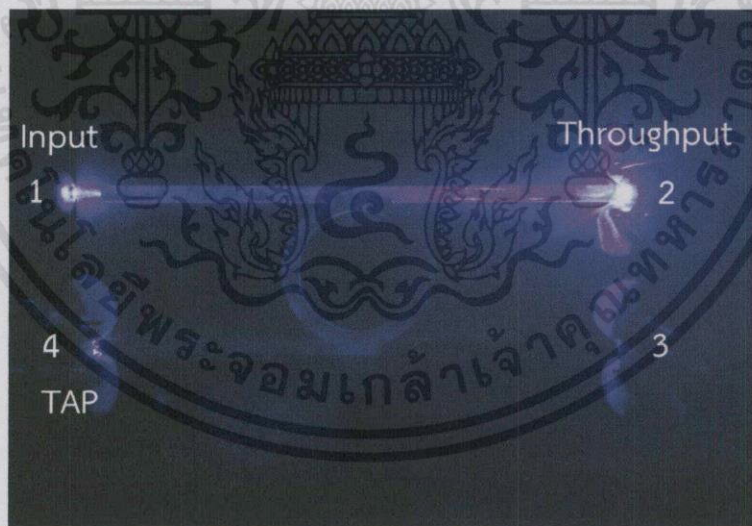
ความยาวคลื่น 445 nm



รูปที่ 4.24 ผลการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ waveguide ยาว 16 cm ความยาวคลื่น 445 nm

ค่า  $Loss_{dB}$  ในระบบของค่าความยาวคลื่น 445 nm 0.602718 dB

ที่รัศมี 2.15 cm



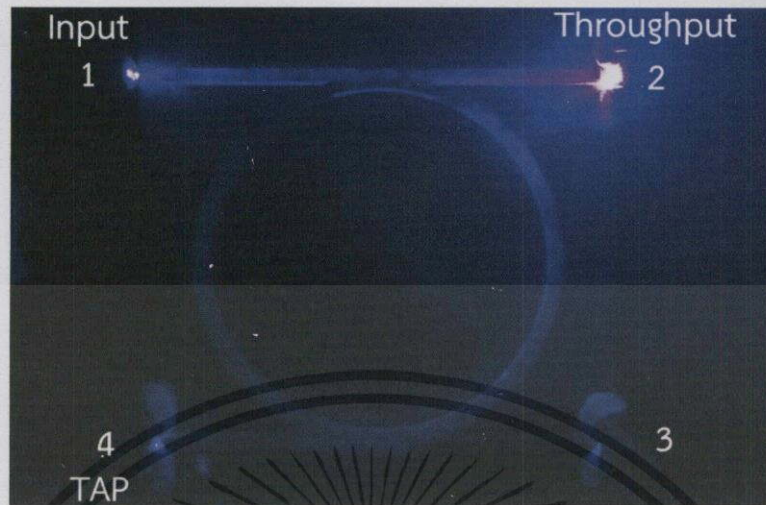
รูปที่ 4.25 ผลจากการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ ความยาวคลื่น 445 nm ที่รัศมี 2.15 cm

$$L_{THP} = 2.0695 \text{ dB}$$

เอกสารที่  $L_{TAP} = 22.1203 \text{ dB}$  ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งให้ข้าพเจ้าทราบทันทีหากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่รัศมี 6.60 cm



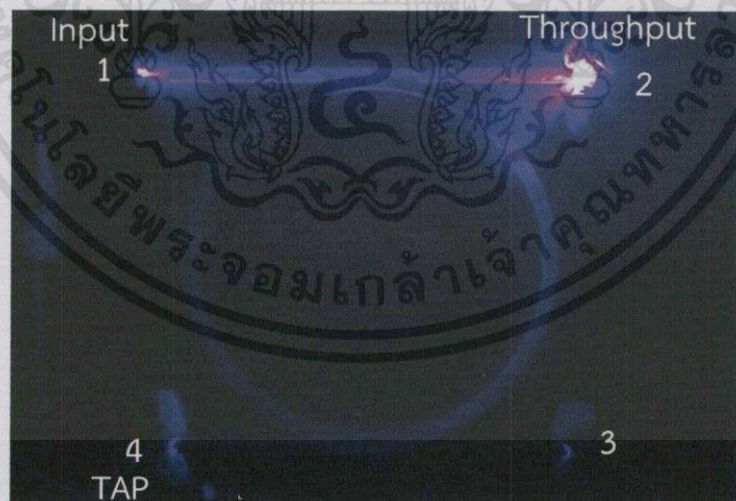
รูปที่ 4.26 ผลจากการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ ความยาวคลื่น 445 nm ที่รัศมี 6.60 cm

$$L_{\text{THP}} = 5.4660 \text{ dB}$$

$$L_{\text{TAP}} = 15.7223 \text{ dB}$$

$$L_{\text{D}} = 30.9836 \text{ dB}$$

ที่รัศมี 7.40 cm



รูปที่ 4.27 ผลจากการทดลองกับแบบจำลองอุปกรณ์ ความยาวคลื่น 445 nm ที่รัศมี 7.40 cm

$$L_{\text{THP}} = 3.7473 \text{ dB}$$

$$L_{\text{TAP}} = 27.4378 \text{ dB}$$

$$L_{\text{D}} = 29.9157 \text{ dB}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าการจะใดๆก็ตาม หากท่านมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองในโปรแกรมและแบบจำลองอุปกรณ์

ในตอนนี้จะแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากโปรแกรมกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยจะแสดงเป็นตารางเปรียบเทียบและกราฟได้ดังด้านล่างนี้

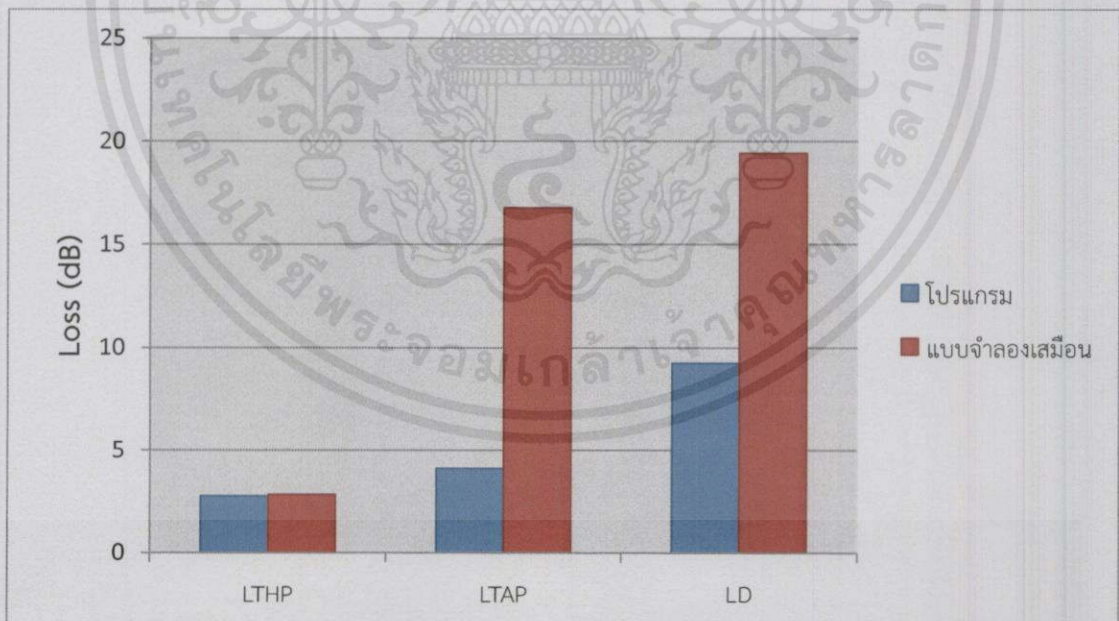
คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากสูตร

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง} = \frac{2|x_1 - x_2|}{x_1 + x_2} \times 100\% \quad (4.1)$$

ตารางที่ 4.3.1 ตารางแสดงค่า Loss จากการ Simulation ของโปรแกรม, การทดลองกับแบบจำลองเสมือน และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ความยาวคลื่น 650 nm รัศมี 2.15 cm

	โปรแกรม (dB)	แบบจำลองเสมือน (dB)	ความแตกต่าง (%)
$L_{THP}$	2.7546	2.8400	3.0529
$L_{TAP}$	4.0951	16.7877	121.5603
$L_D$	9.2378	19.4201	71.0610

จากในตารางที่ 4.3.1 ได้แสดงค่า  $L_{THP}$ ,  $L_{TAP}$  และ  $L_D$  จากค่าที่ Simulation จากโปรแกรม และค่าที่ได้จากแบบจำลองเสมือน ซึ่งทำให้ได้ค่าความแตกต่าง คือ 3.0529%, 121.5603% และ 71.0610% ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบได้ดังนี้



รูปที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจากโปรแกรมกับค่าที่ทดลองกับแบบจำลองเสมือน ที่ความยาวคลื่น 650 nm รัศมี 2.15 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยทางวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียสัญญาณของทั้งค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าจากแบบจำลองเสมือน มีค่าที่มีแนวโน้มเหมือนกัน

ตารางที่ 4.3.2 ตารางแสดงค่า Loss จากการ Simulation ของโปรแกรม, การทดลองกับแบบจำลองเสมือน และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ที่ความยาวคลื่น 650 nm รัศมี 6.60 cm

	โปรแกรม (dB)	แบบจำลองเสมือน (dB)	ความแตกต่าง (%)
$L_{THP}$	0.9587	2.4494	87.4798
$L_{TAP}$	7.8213	16.9062	73.4801
$L_D$	13.2717	22.3469	50.9576

จากในตารางที่ 4.3.2 ได้แสดงค่า  $L_{THP}$ ,  $L_{TAP}$  และ  $L_D$  จากค่าที่ Simulation จากโปรแกรม และค่าที่ได้จากแบบจำลองเสมือน ซึ่งทำให้ได้ค่าความแตกต่าง คือ 87.4798%, 73.4801% และ 50.9576% ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบได้ดังนี้



รูปที่ 4.29 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจากโปรแกรมกับค่าที่ทดลองกับแบบจำลองเสมือน ที่ความยาวคลื่น 650 nm รัศมี 6.60 cm

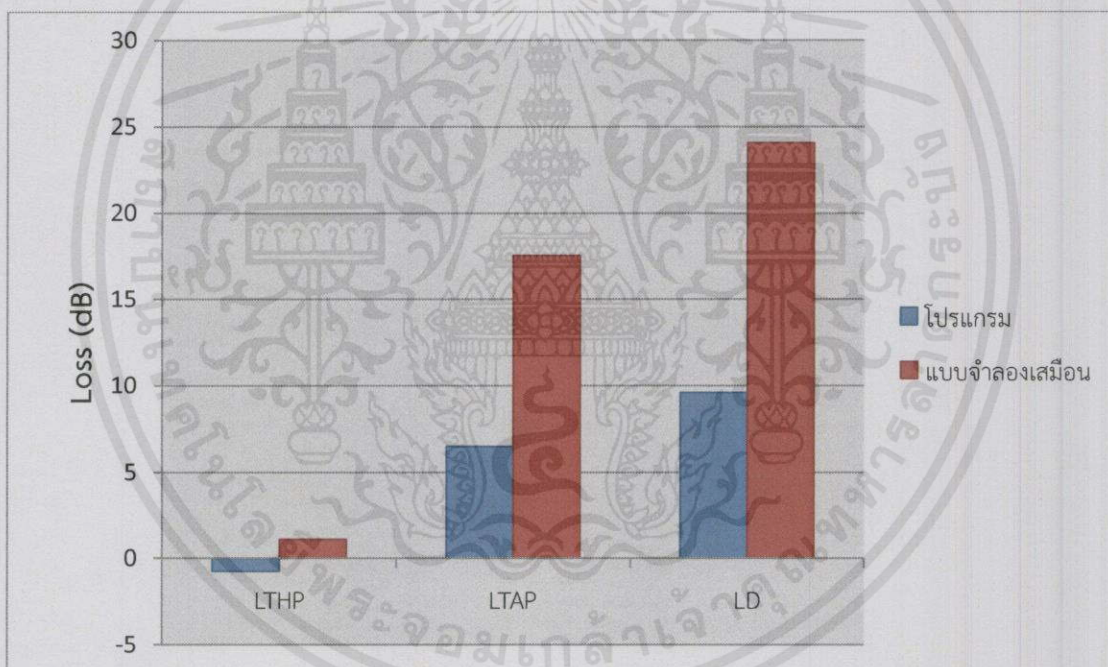
จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียสัญญาณของทั้งค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าจากแบบจำลองเสมือน มีค่าที่มีแนวโน้มเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3.3 ตารางแสดงค่า Loss จากการ Simulation ของโปรแกรม, การทดลองกับแบบจำลองเสมือน และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ที่ความยาวคลื่น 650 nm รัศมี 7.40 cm

	โปรแกรม (dB)	แบบจำลองเสมือน (dB)	ความแตกต่าง (%)
$L_{THP}$	-0.7601	1.0933	1112.4850
$L_{TAP}$	6.4696	17.5333	46.0932
$L_D$	9.5872	24.0654	43.0225

จากในตารางที่ 4.3.3 ได้แสดงค่า  $L_{THP}$ ,  $L_{TAP}$  และ  $L_D$  จากค่าที่ Simulation จากโปรแกรม และค่าที่ได้จากแบบจำลองเสมือน ซึ่งทำให้ได้ค่าความแตกต่าง คือ 1112.4850%, 46.0932% และ 43.0225% ตามลำดับ โดยที่  $L_{THP}$  ของโปรแกรมมีค่าเป็นลบ เนื่องจากเกิดการส่งผ่านสัญญาณแสงไปยัง Throughput Port มากกว่าค่าที่ Input Port จึงทำให้เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมีค่าสูงกว่าของตัวอื่นหลายเท่า ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบได้ดังนี้



รูปที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจากโปรแกรมกับค่าที่ทดลองกับแบบจำลองเสมือน ที่ความยาวคลื่น 650 nm รัศมี 7.40 cm

จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียสัญญาณของทั้งค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าจากแบบจำลองเสมือน มีค่าที่มีแนวโน้มคล้ายกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3.4 ตารางแสดงค่า Loss จากการ Simulation ของโปรแกรม, การทดลองกับแบบจำลองเสมือน และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ที่ความยาวคลื่น 532 nm รัศมี 2.15 cm

	โปรแกรม (dB)	แบบจำลองเสมือน (dB)	ความแตกต่าง (%)
$L_{THP}$	2.3714	3.3189	33.3023
$L_{TAP}$	6.1836	20.6160	107.7061
$L_D$	11.2413	24.2957	73.4693

จากในตารางที่ 4.3.4 ได้แสดงค่า  $L_{THP}$ ,  $L_{TAP}$  และ  $L_D$  จากค่าที่ Simulation จากโปรแกรม และค่าที่ได้จากแบบจำลองเสมือน ซึ่งทำให้ได้ค่าความแตกต่าง คือ 33.3023%, 107.7061% และ 73.4693% ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบได้ดังนี้



รูปที่ 4.31 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจากโปรแกรมกับค่าที่ทดลองกับแบบจำลองเสมือน ที่ความยาวคลื่น 532 nm รัศมี 2.15 cm

จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียสัญญาณของทั้งค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าจากแบบจำลองเสมือน มีค่าที่มีแนวโน้มเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3.5 ตารางแสดงค่า Loss จากการ Simulation ของโปรแกรม, การทดลองกับแบบจำลองเสมือน และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ที่ความยาวคลื่น 532 nm รัศมี 6.60 cm

	โปรแกรม (dB)	แบบจำลองเสมือน (dB)	ความแตกต่าง (%)
$L_{THP}$	0.7802	1.7238	75.3674
$L_{TAP}$	5.1614	20.2119	118.6326
$L_D$	9.5946	20.6695	73.1884

จากในตารางที่ 4.3.5 ได้แสดงค่า  $L_{THP}$ ,  $L_{TAP}$  และ  $L_D$  จากค่าที่ Simulation จากโปรแกรม และค่าที่ได้จากแบบจำลองเสมือน ซึ่งทำให้ได้ค่าความแตกต่าง คือ 75.3674%, 118.6326% และ 73.1884% ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบได้ดังนี้



รูปที่ 4.32 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจากโปรแกรมกับค่าที่ทดลองกับแบบจำลองเสมือน ที่ความยาวคลื่น 532 nm รัศมี 6.60 cm

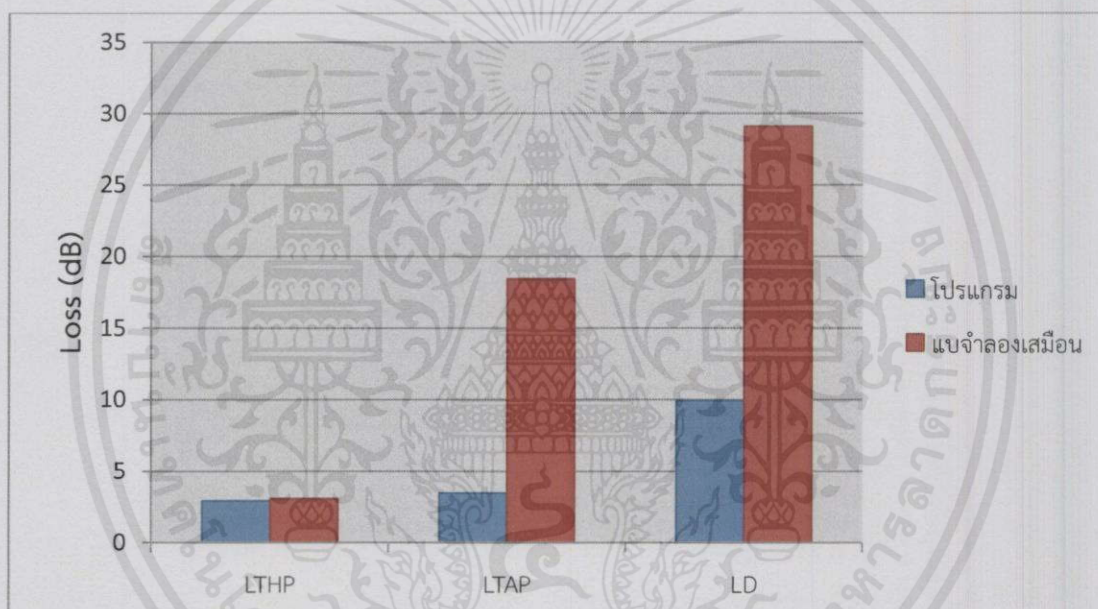
จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียสัญญาณของทั้งค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าจากแบบจำลองเสมือน มีค่าที่มีแนวโน้มเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3.6 ตารางแสดงค่า Loss จากการ Simulation ของโปรแกรม, การทดลองกับแบบจำลองเสมือน และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ที่ความยาวคลื่น 532 nm รัศมี 7.40 cm

	โปรแกรม (dB)	แบบจำลองเสมือน (dB)	ความแตกต่าง (%)
$L_{THP}$	2.9126	3.0645	5.0827
$L_{TAP}$	3.4629	18.4403	136.7599
$L_D$	9.9243	29.0849	98.2363

จากในตารางที่ 4.3.6 ได้แสดงค่า  $L_{THP}$ ,  $L_{TAP}$  และ  $L_D$  จากค่าที่ Simulation จากโปรแกรม และค่าที่ได้จากแบบจำลองเสมือน ซึ่งทำให้ได้ค่าความแตกต่าง คือ 5.0827%, 136.7599% และ 98.2363% ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบได้ดังนี้



รูปที่ 4.33 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจากโปรแกรมกับค่าที่ทดลองกับแบบจำลองเสมือน ที่ความยาวคลื่น 532 nm รัศมี 7.40 cm

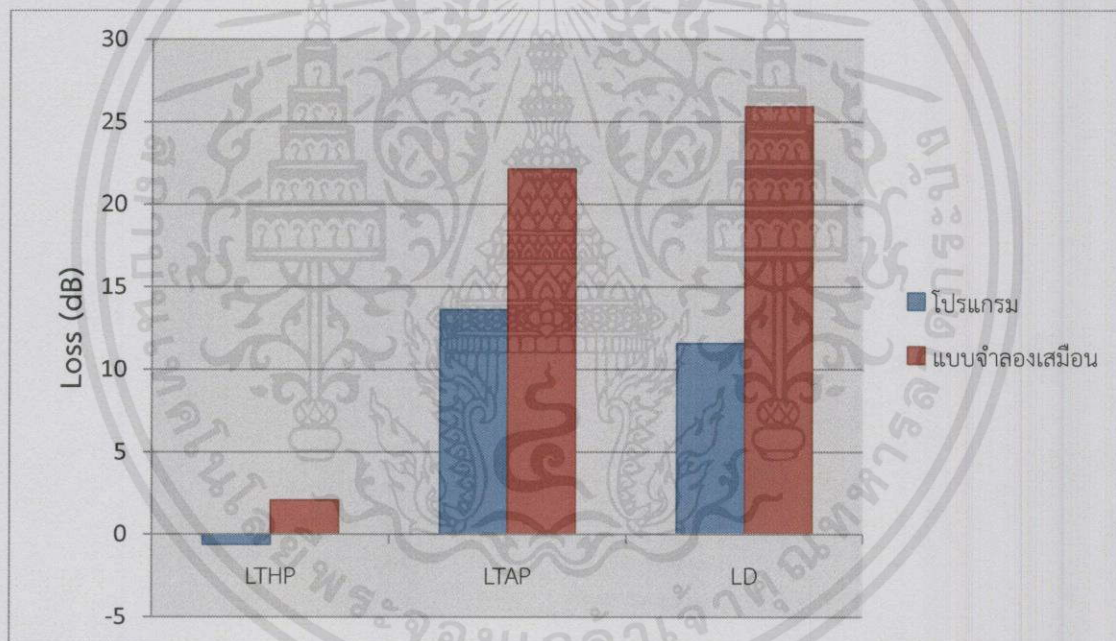
จากกราฟจะเห็นได้ว่าการสูญเสียสัญญาณของทั้งค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าจากแบบจำลองเสมือน มีค่าที่มีแนวโน้มเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3.7 ตารางแสดงค่า Loss จากการ Simulation ของโปรแกรม, การทดลองกับแบบจำลองเสมือน และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ที่ความยาวคลื่น 445 nm รัศมี 2.15 cm

	โปรแกรม (dB)	แบบจำลองเสมือน (dB)	ความแตกต่าง (%)
$L_{THP}$	-0.6279	2.0695	374.2231
$L_{TAP}$	13.5975	22.1203	47.7230
$L_D$	11.5726	25.9122	76.5089

จากในตารางที่ 4.3.7 ได้แสดงค่า  $L_{THP}$ ,  $L_{TAP}$  และ  $L_D$  จากค่าที่ Simulation จากโปรแกรม และค่าที่ได้จากแบบจำลองเสมือน ซึ่งทำให้ได้ค่าความแตกต่าง คือ 374.2231%, 47.7230% และ 76.5089% ตามลำดับ โดยที่  $L_{THP}$  ของโปรแกรมมีค่าเป็นลบ เนื่องจากเกิดค่าการส่งผ่านสัญญาณแสงไปยัง Throughput Port มากกว่าค่าที่ Input Port จึงทำให้เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมีค่าสูงกว่าของตัวอื่นหลายเท่า ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบได้ดังนี้



รูปที่ 4.34 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจากโปรแกรมกับค่าที่ทดลองกับแบบจำลองเสมือน ที่ความยาวคลื่น 445 nm รัศมี 2.15 cm

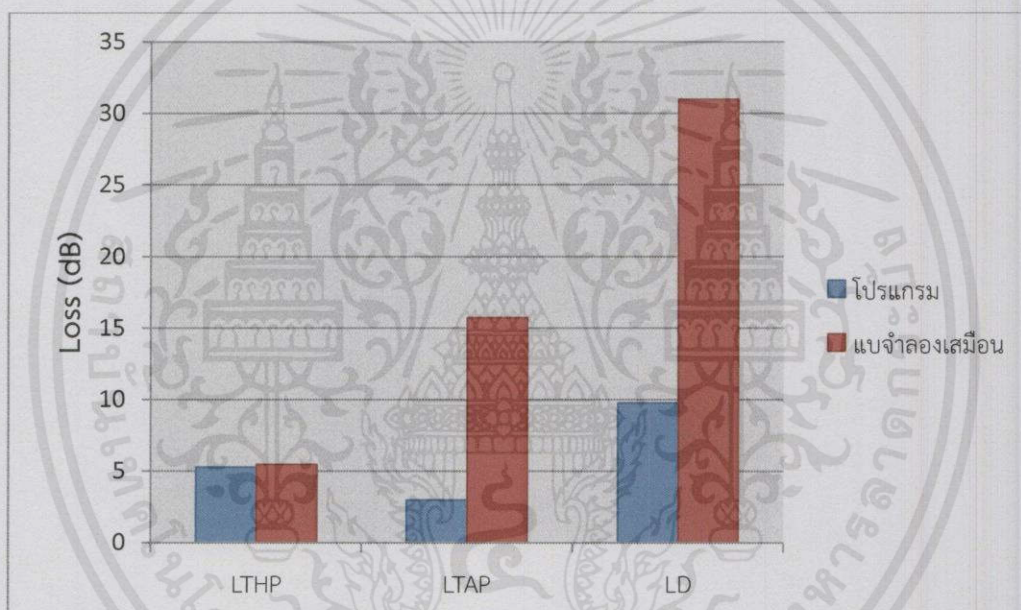
จากกราฟจะเห็นได้ว่าการสูญเสียสัญญาณของทั้งค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าจากแบบจำลองเสมือน มีค่าที่มีแนวโน้มคล้ายกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3.8 ตารางแสดงค่า Loss จากการ Simulation ของโปรแกรม, การทดลองกับแบบจำลองเสมือน และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ที่ความยาวคลื่น 445 nm รัศมี 6.60 cm

	โปรแกรม (dB)	แบบจำลองเสมือน (dB)	ความแตกต่าง (%)
$L_{THP}$	5.2561	5.4660	3.9153
$L_{TAP}$	2.9638	15.7223	136.5560
$L_D$	9.7577	30.9836	104.1984

จากในตารางที่ 4.3.8 ได้แสดงค่า  $L_{THP}$ ,  $L_{TAP}$  และ  $L_D$  จากค่าที่ Simulation จากโปรแกรม และค่าที่ได้จากแบบจำลองเสมือน ซึ่งทำให้ได้ค่าความแตกต่าง คือ 3.9153%, 136.5560% และ 104.1984% ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบได้ดังนี้



รูปที่ 4.35 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจากโปรแกรมกับค่าที่ทดลองกับแบบจำลองเสมือน ที่ความยาวคลื่น 445 nm รัศมี 6.60 cm

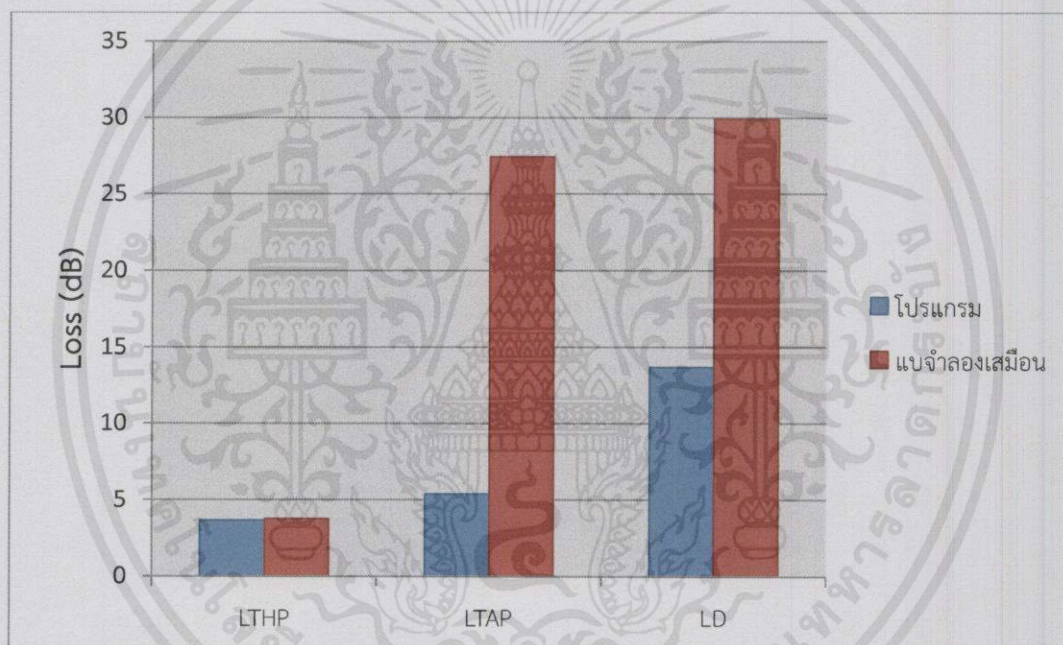
จากกราฟจะเห็นได้ว่าการสูญเสียสัญญาณของทั้งค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าจากแบบจำลองเสมือน มีค่าที่มีแนวโน้มเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3.9 ตารางแสดงค่า Loss จากการ Simulation ของโปรแกรม, การทดลองกับแบบจำลองเสมือน และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ที่ความยาวคลื่น 445 nm รัศมี 7.40 cm

	โปรแกรม (dB)	แบบจำลองเสมือน (dB)	ความแตกต่าง (%)
$L_{THP}$	3.6573	3.7473	2.4309
$L_{TAP}$	5.3752	27.4378	134.4748
$L_D$	13.6975	29.9157	74.3729

จากในตารางที่ 4.3.9 ได้แสดงค่า  $L_{THP}$ ,  $L_{TAP}$  และ  $L_D$  จากค่าที่ Simulation จากโปรแกรม และค่าที่ได้จากแบบจำลองเสมือน ซึ่งทำให้ได้ค่าความแตกต่าง คือ 2.4309%, 134.4748% และ 74.3729% ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบได้ดังนี้



รูปที่ 4.36 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าจากโปรแกรมกับค่าที่ทดลองกับแบบจำลองเสมือน ที่ความยาวคลื่น 445 nm รัศมี 7.40 cm

จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียสัญญาณของทั้งค่าที่ได้จากโปรแกรมและค่าจากแบบจำลองเสมือน มีค่าที่มีแนวโน้มเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ ได้สนใจศึกษาในทฤษฎีการส่งสัญญาณแสงในวงแหวนสั่นพ้อง และคุณสมบัติของ PMMA รวมไปถึงการจำลองแบบวงแหวนสั่นพ้องขึ้นภายในโปรแกรม Optiwave และทำการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลองและผลจากโปรแกรม ซึ่งจากผลที่ได้มาในบทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัยนั้นในตอนต้นที่ 1 ที่ความยาวคลื่น 650 nm ได้รัศมี 7.40  $\mu\text{m}$  ที่ความยาวคลื่น 532 nm ได้รัศมี 6.60  $\mu\text{m}$  ที่ความยาวคลื่น 445 nm ได้รัศมี 2.15  $\mu\text{m}$

หลังจากนำรัศมีทั้ง 3 ไปวาดแบบแล้วตัดออกมาเพื่อทำการทดลองในขั้นตอนต่อไปแล้วนั้น ในตอนที่ 2 นี้ได้ทำการวัดค่าเช่นเดียวกับตอนที่ 1 ซึ่งผลที่ได้ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลจากโปรแกรม ในตอนที่ 3 โดยสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนั้นตรงตามทฤษฎี หรือเป็นไปในแนวทางเดียวกับโปรแกรมที่คำนวณไว้ ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นเหตุอันเนื่องมาจากต่อนำแสงเข้าระบบจะมีการสูญเสีย หรือที่เรียกว่า Coupler Loss นั้นเอง

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองที่ผ่านมา นั้น ข้อควรระวังในส่วนของตอนที่ 2 คือ แสงรบกวนจากภายนอก และแสงรบกวนที่เกิดจากระบบเอง โดยที่การทดลองนี้ควรทดลองในห้องมืด การศึกษานี้สามารถนำไปพัฒนาปรับเปลี่ยนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้มีความเสถียร และสามารถสร้างอุปกรณ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง ซึ่งจะเป็นการพัฒนาด้านระบบการสื่อสารให้มีรวดเร็วและมีความเหมาะสมต่อการใช้งานในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- ดุสิต เครื่องาม. 2542. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน. เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ดุสิต เครื่องาม. 2542. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน. เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรีชา ยุพาพิน. 2543. เครือข่ายใยแก้วนำแสง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และสุภาณี ลิ้มสุวรรณ. 2543. ไฟฟ้าและแม่เหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์เสียงเชียง.
- Govind P. Agrawal. 2002. *Fiber Optic Communication Systems*. 3<sup>th</sup> ed. : John Wiley & Sons, Inc.
- Optiwave. 2009. *OptiFDTD Technical Background and Tutorials Finite Difference Time Domain Photonics Simulation Software*. Canada : 7 capella court, Ottawa, ON, K2E 8A7.
- พัชรินทร์ ดวงแก้ว, เครือวัลย์ วงศ์ปัญญา และกองบรรณาธิการ. 2537. พื้นฐานการสื่อสารเชิงแสง [Online]. Available : [http://thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach/Principle\\_of\\_Optical\\_Communications/index.php](http://thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach/Principle_of_Optical_Communications/index.php)
- Kirankumar H. 2005. *Ring Resonator Theory*. [Online]. Available : [http://home.iitj.ac.in/~k.r.hiremath/research/thesis\\_html/node8.html](http://home.iitj.ac.in/~k.r.hiremath/research/thesis_html/node8.html)
- อะคริลิก. [Online]. Available : <http://www.manufacturingterms.com/Thai/Acrylic.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Acrylic Sheet - Technical Data Sheet



GENERAL			
Property	Method	Units	Value
Density	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1.19
Water Absorption 24h/23 °C-50x50x4mm <sup>3</sup>	DIN EN ISO 62 Method 1	%	0.2
Ball indentation hardness	ISO 2039-1	MPa	235
Forming temperature air pressure		°C	140-160
Forming temperature vacuum		°C	160-190
Moulding shrinkage		%	0.5-0.8

MECHANICAL			
Property	Method	Units	Value
Tensile Strength	ISO 527-2	MPa	70
Elongation at break	ISO 527-2	%	4
Tensile Modulus	ISO 527-2	MPa	3200
Flexural Strength	ISO 178	MPa	115
Flexural Modulus	ISO 178	MPa	3300
Impact strength Charpy unnotched	ISO 179-1	KJ/m <sup>2</sup>	17
Impact strength Charpy notched	ISO 179-1	KJ/m <sup>2</sup>	2

THERMAL			
Property	Method	Units	Value
Vicat Temperature (B 50)*	ISO 306	°C	105
Specific heat capacity	ISO 11357-4	J/gK	1.47
Linear thermal expansion	DIN 53752	K <sup>-1</sup> ×10 <sup>-5</sup>	7
Thermal Conductivity	DIN 52612	W/mK	0.18
Service temperature continuous use		°C	70
Max. temperature short term use		°C	90
Degradation temperature		°C	>280

OPTICAL			
Property	Method	Units	Value
Light transmission (3mm)	DIN 5036-3/ EN ISO 13468-2	%	92
Refractive index	ISO 489	n <sup>D</sup> 20	1.492

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tel: 0116 232 1010

Web: [www.oadbyplastics.co.uk](http://www.oadbyplastics.co.uk)

Email: [sales@oadbyplastics.co.uk](mailto:sales@oadbyplastics.co.uk)

The data shown are typical values and are not intended to represent specifications. Their aim is to guide the user toward a material choice.

Not all material sizes shown within the availability programme of this data sheet are available as standard.

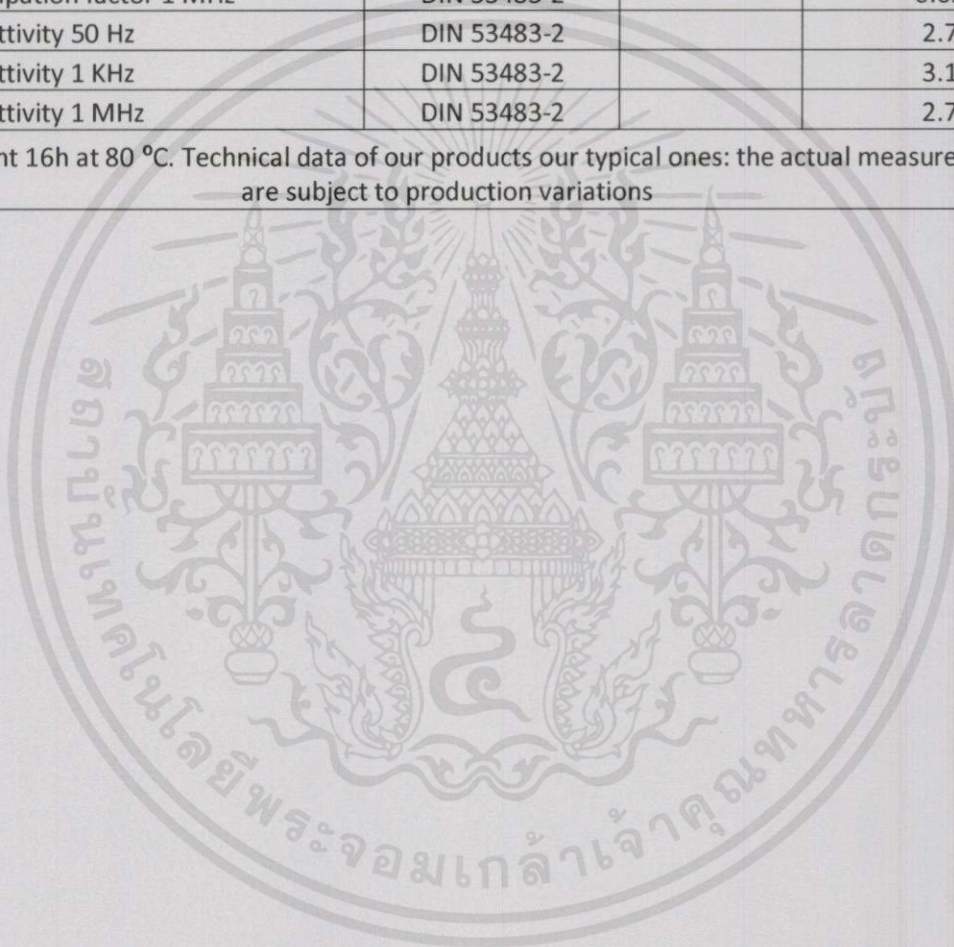
Please contact Oadby Plastics Ltd for further details.

# Acrylic Sheet - Technical Data Sheet



ELECTRICAL			
Property	Method	Units	Value
Surface Resistivity	IEC 60093	$\Omega$	$3 \times 10^{15}$
Volume Resistivity	IEC 60093	$\Omega \times m$	$1 \times 10^{13} - 5 \times 10^{13}$
Electrical strength	IEC 60243-1	KV/mm	10
Dielectric strength	IEC 60243-1	KV/mm	30
Dialectical dissipation factor 50 Hz	DIN 53483-2		0.06
Dialectical dissipation factor 1 KHz	DIN 53483-2		0.04
Dialectical dissipation factor 1 MHz	DIN 53483-2		0.02
Relative permittivity 50 Hz	DIN 53483-2		2.7
Relative permittivity 1 KHz	DIN 53483-2		3.1
Relative permittivity 1 MHz	DIN 53483-2		2.7

\*Pre-treatment 16h at 80 °C. Technical data of our products our typical ones: the actual measured values are subject to production variations



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tel: 0116 232 1010

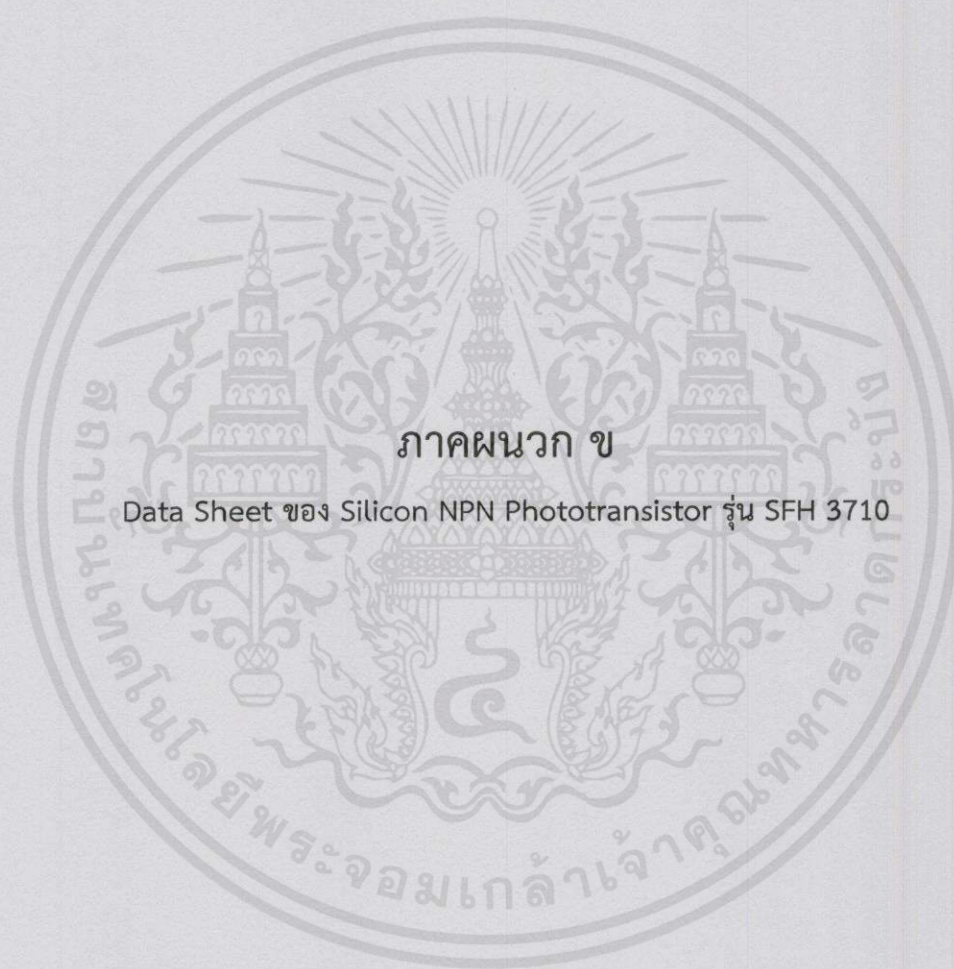
Web: [www.oadbyplastics.co.uk](http://www.oadbyplastics.co.uk)

Email: [sales@oadbyplastics.co.uk](mailto:sales@oadbyplastics.co.uk)

The data shown are typical values and are not intended to represent specifications. Their aim is to guide the user toward a material choice.

Not all material sizes shown within the availability programme of this data sheet are available as standard.

Please contact Oadby Plastics Ltd for further details.



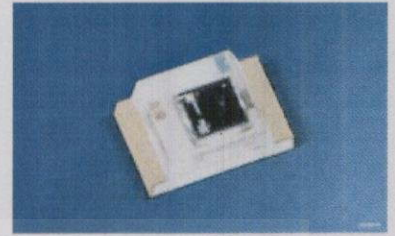
## ภาคผนวก ข

Data Sheet ของ Silicon NPN Phototransistor รุ่น SFH 3710

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Silicon NPN Phototransistor with  $V_{\lambda}$  Characteristics**  
**NPN-Silizium-Fototransistor mit  $V_{\lambda}$ -Charakteristik**  
**Version 1.0**

**SFH 3710**



**Features:**

- **Spectral range of sensitivity:** 350 ... 950 nm
- **Special:** Adapted to human eye sensitivity ( $V_{\lambda}$ )
- Very small SMT package

**Applications**

- For control and drive circuits
- Ambient light detector
- Exposure meter for daylight and artificial light
- Sensor for backlight-dimming

**Besondere Merkmale:**

- **Spektraler Bereich der Fotoempfindlichkeit:** 350 ... 950 nm
- **Besonderheit:** Angepasst an die Augenempfindlichkeit ( $V_{\lambda}$ )
- Sehr kleines SMT Gehäuse

**Anwendungen**

- Messen / Steuern / Regeln
- Umgebungslichtsensor
- Beleuchtungssensor
- Dimmungssensor für Hintergrundbeleuchtung

**Ordering Information**  
**Bestellinformation**

Type:	Photocurrent	Ordering Code
Typ:	Fotostrom	Bestellnummer
	$\lambda = 560 \text{ nm}, E_e = 10 \mu\text{W}/\text{cm}^2, V_{CE} = 5 \text{ V}$	
	$I_{PCE} [\mu\text{A}]$	
SFH 3710	2.5 ... 12.5	Q65110A3107
SFH 3710-2/3	2.5 ... 8	Q65110A3512
SFH 3710-3/4	4 ... 12.5	Q65110A3511

*Note: Single bins on request*

*Anm.: Einzelgruppen auf Anfrage*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Maximum Ratings** ( $T_A = 25\text{ °C}$ )**Grenzwerte**

Parameter Bezeichnung	Symbol Symbol	Values Werte	Unit Einheit
Operating and storage temperature range Betriebs- und Lagertemperatur	$T_{op}; T_{stg}$	-40 ... 85	°C
Collector-emitter voltage Kollektor-Emitter-Spannung	$V_{CE}$	5.5	V
Collector current Kollektorstrom	$I_C$	20	mA
Emitter-collector voltage Emitter-Kollektor-Spannung	$V_{EC}$	0.5	V

**Characteristics** ( $T_A = 25\text{ °C}$ )**Kennwerte**

Parameter Bezeichnung	Symbol Symbol	Values Werte	Unit Einheit
Wavelength of max. sensitivity Wellenlänge der max. Fotoempfindlichkeit	$\lambda_{S\ max}$	570	nm
Spectral range of sensitivity Spektraler Bereich der Fotoempfindlichkeit	$\lambda_{10\%}$	350 ... 950	nm
Radiant sensitive area Bestrahlungsempfindliche Fläche	A	0.29	mm <sup>2</sup>
Dimensions of chip area Abmessung der Chipfläche	L x W	0.75 x 0.75	mm x mm
Half angle Halbwinkel	$\phi$	± 60	°
Capacitance Kapazität ( $V_{CE} = 0\text{ V}$ , $f = 1\text{ MHz}$ , $E = 0$ )	$C_{CE}$	4	pF
Dark current Dunkelstrom ( $V_{CE} = 5\text{ V}$ , $E = 0$ )	$I_{CE0}$	3 ( $\leq 50$ )	nA
Temperature coefficient Temperaturkoeffizient (Std. Light A)	TC	0.9	% / K
Temperature coefficient Temperaturkoeffizient ( $\lambda = 550\text{ nm}$ )	TC	0.78	% / K

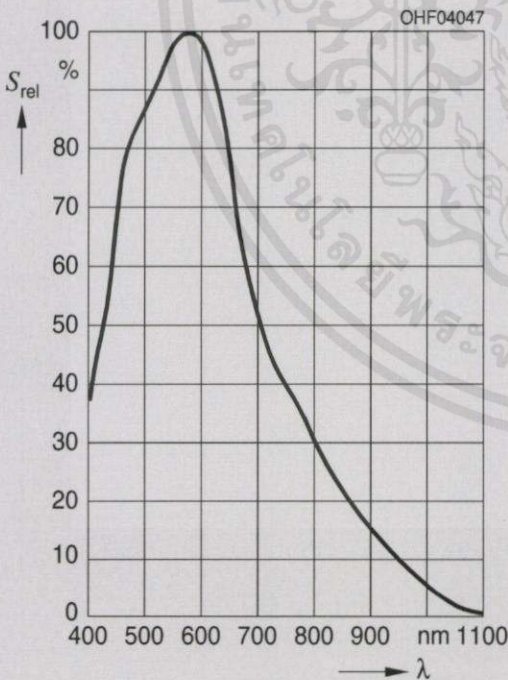
ไม่มีประกันใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Grouping ( $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\lambda = 560\text{ nm}$ )  
 Gruppierung

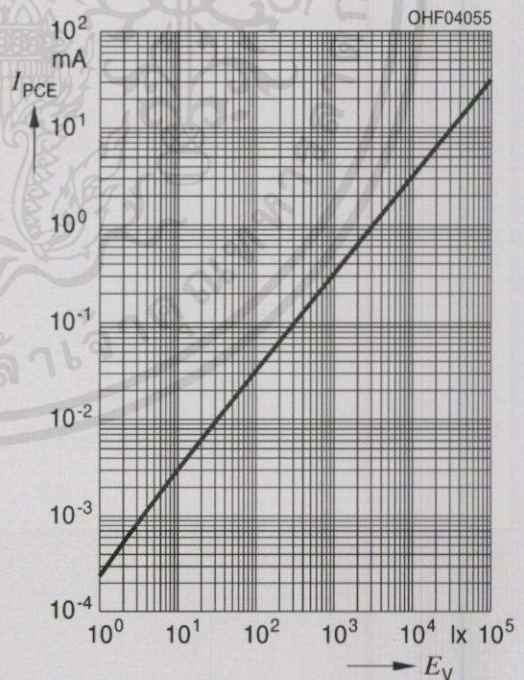
Group	Min Photocurrent	Max Photocurrent	Typ Photocurrent	Collector-emitter saturation voltage
Gruppe	Min Fotostrom	Max Fotostrom	Typ Fotostrom	Kollektor-Emitter Sättigungsspannung
	$E_e = 10\text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , $V_{CE} = 5\text{ V}$	$E_e = 10\text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , $V_{CE} = 5\text{ V}$	$E_V = 1000\text{ lx, Std. Light A, } V_{CE} = 5\text{ V}$	$I_C = I_{PCEmin} \times 0.3$ , $E_e = 10\text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^2$
	$I_{PCE, min}\text{ }[\mu\text{A}]$	$I_{PCE, max}\text{ }[\mu\text{A}]$	$I_{PCE}\text{ }[\mu\text{A}]$	$V_{CEsat}\text{ }[\text{mV}]$
SFH 3710-2	2.5	5	220	100
SFH 3710-3	4	8	350	100
SFH 3710-4	6.3	12.5	570	100

Note.:  $I_{PCEmin}$  is the min. photocurrent of the specified group  
 Anm.:  $I_{PCEmin}$  ist der minimale Fotostrom der jeweiligen Gruppe

Relative Spectral Sensitivity  
 Relative spektrale Empfindlichkeit  
 $S_{rel} = f(\lambda)$



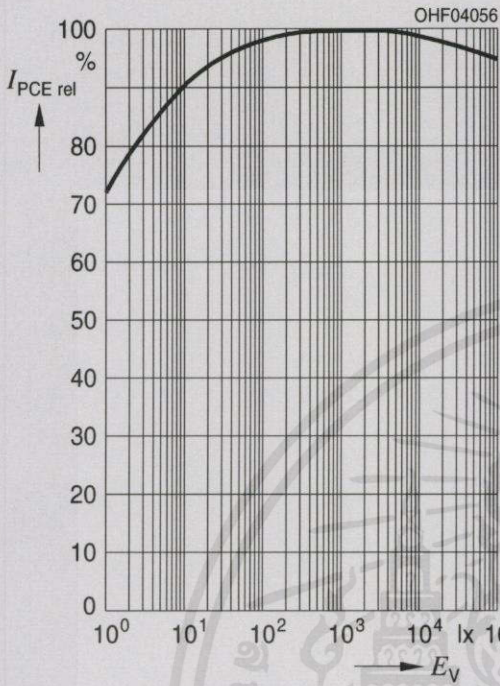
Photocurrent  
 Fotostrom  
 $I_{PCE} = f(E_V)$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

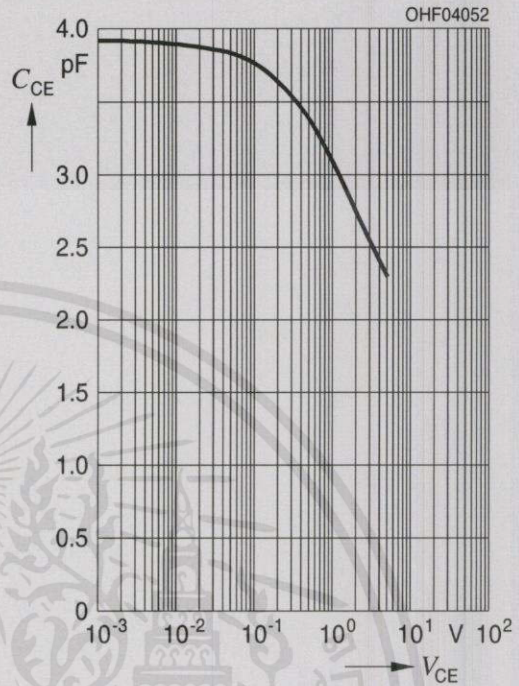
**Photocurrent  
Fotostrom**

$I_{PCE} = f(E_V)$



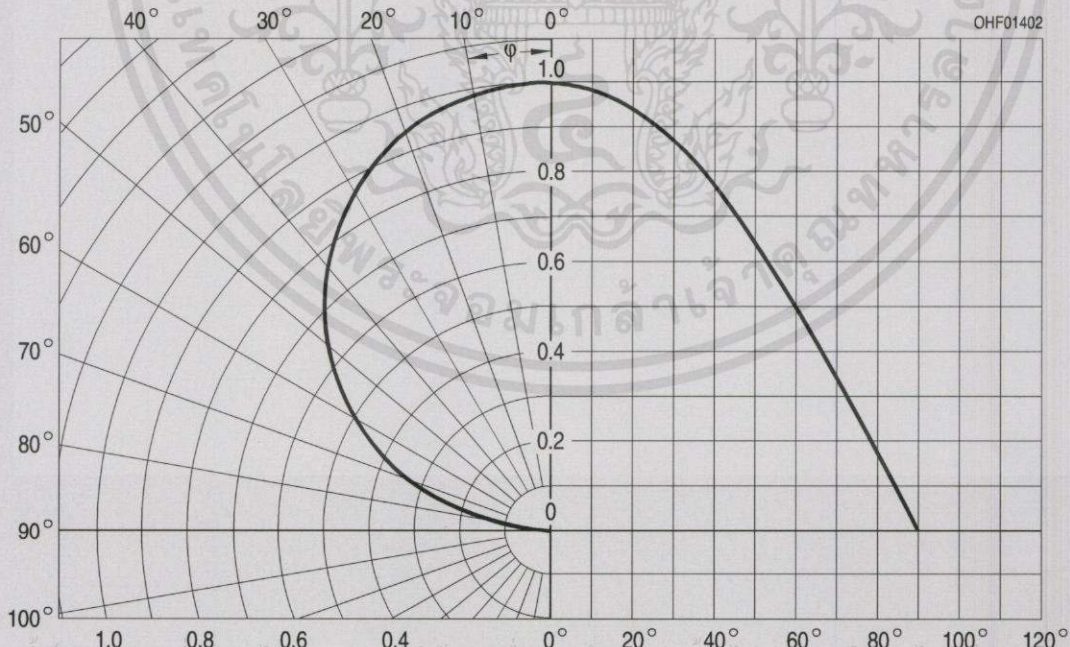
**Collector-Emitter Capacitance  
Kollektor-Emitter Kapazität**

$C_{CE} = f(V_{CE}), f = 1 \text{ MHz}, E = 0$



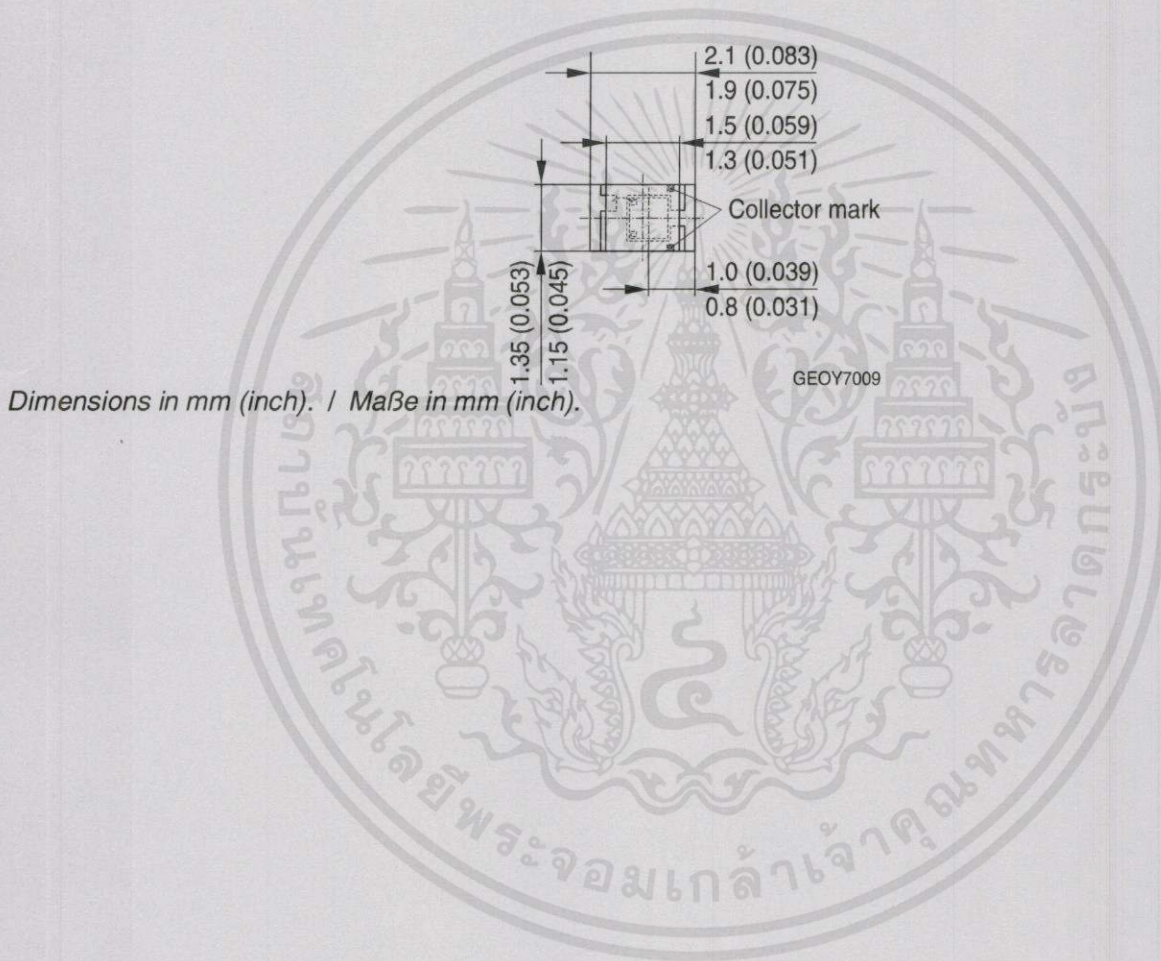
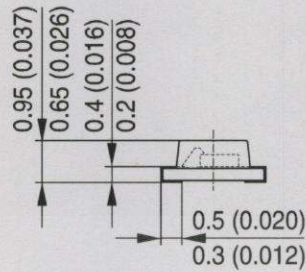
**Directional Characteristics  
Winkeldiagramm**

$S_{rel} = f(\varphi)$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ ใช้งานด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

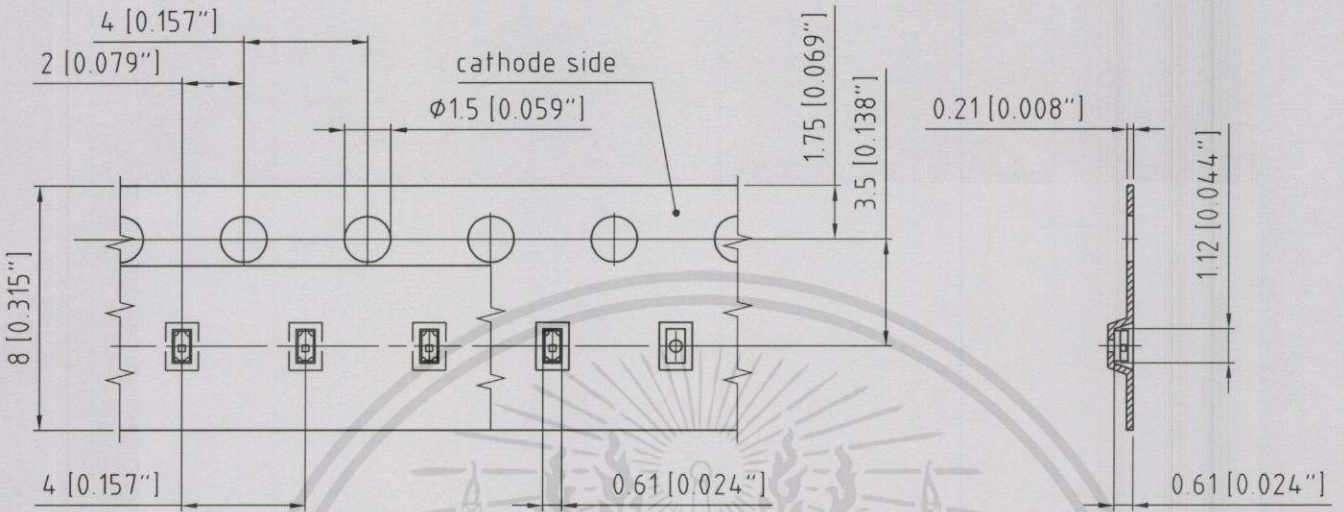
Package Outline  
Maßzeichnung



Dimensions in mm (inch). / Maße in mm (inch).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

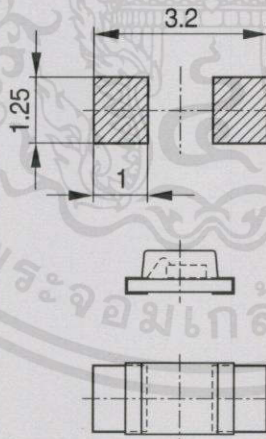
Method of Taping  
Gurtung



C63062-A4114-B1-02

Dimensions in mm (inch). / Maße in mm (inch).

Recommended Solder Pad  
Empfohlenes Lötpadding



Bauteil positioniert  
Component location on pad

OHFP2578

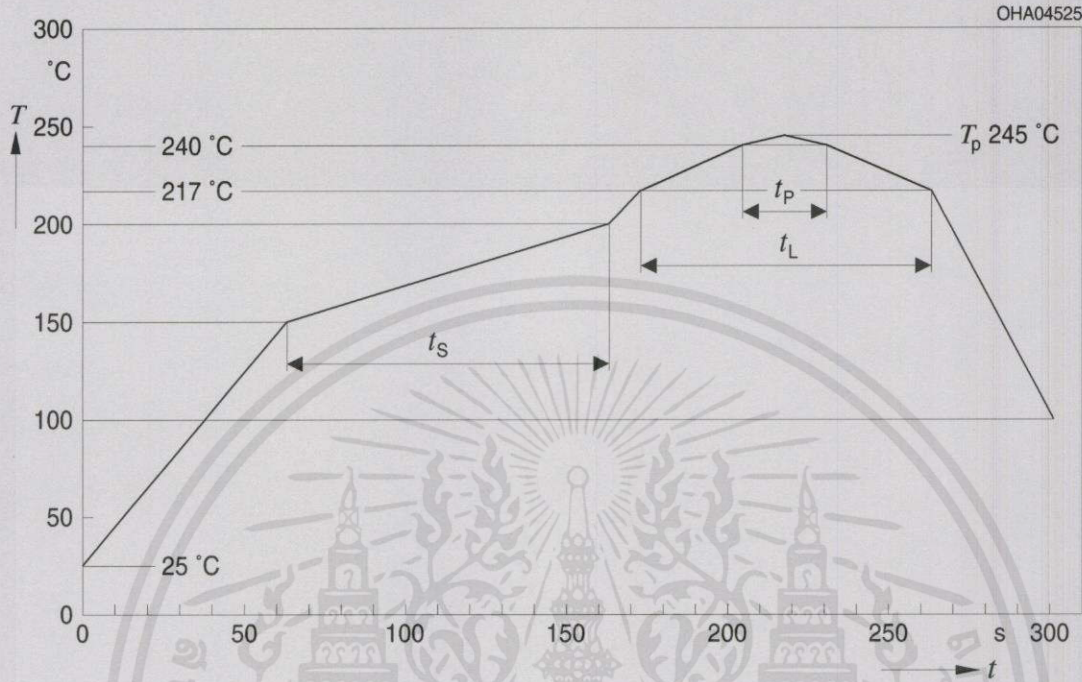
Dimensions in mm. / Maße in mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Reflow Soldering Profile**

**Reflow-Lötprofil**

Preconditioning: JEDEC Level 2 acc. to JEDEC J-STD-020D.01



OHA04612

Profile Feature Profil-Charakteristik	Symbol Symbol	Pb-Free (SnAgCu) Assembly			Unit Einheit
		Minimum	Recommendation	Maximum	
Ramp-up rate to preheat*) 25 °C to 150 °C			2	3	K/s
Time $t_s$ $T_{Smin}$ to $T_{Smax}$	$t_s$	60	100	120	s
Ramp-up rate to peak*) $T_{Smax}$ to $T_p$			2	3	K/s
Liquidus temperature	$T_L$		217		°C
Time above liquidus temperature	$t_L$		80	100	s
Peak temperature	$T_p$		245	260	°C
Time within 5 °C of the specified peak temperature $T_p - 5$ K	$t_p$	10	20	30	s
Ramp-down rate* $T_p$ to 100 °C			3	6	K/s
Time 25 °C to $T_p$				480	s

All temperatures refer to the center of the package, measured on the top of the component  
 \*) slope calculation  $DT/Dt$ :  $Dt$  max. 5 s; fulfillment for the whole T-range

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Disclaimer

### Attention please!

The information describes the type of component and shall not be considered as assured characteristics. Terms of delivery and rights to change design reserved. Due to technical requirements components may contain dangerous substances.

For information on the types in question please contact our Sales Organization.

If printed or downloaded, please find the latest version in the Internet.

### Packing

Please use the recycling operators known to you. We can also help you – get in touch with your nearest sales office.

By agreement we will take packing material back, if it is sorted. You must bear the costs of transport. For packing material that is returned to us unsorted or which we are not obliged to accept, we shall have to invoice you for any costs incurred.

### Components used in life-support devices or systems must be expressly authorized for such purpose!

Critical components\* may only be used in life-support devices\*\* or systems with the express written approval of OSRAM OS.

\*) A critical component is a component used in a life-support device or system whose failure can reasonably be expected to cause the failure of that life-support device or system, or to affect its safety or the effectiveness of that device or system.

\*\*) Life support devices or systems are intended (a) to be implanted in the human body, or (b) to support and/or maintain and sustain human life. If they fail, it is reasonable to assume that the health and the life of the user may be endangered.

## Disclaimer

### Bitte beachten!

Lieferbedingungen und Änderungen im Design vorbehalten. Aufgrund technischer Anforderungen können die Bauteile Gefahrstoffe enthalten. Für weitere Informationen zu gewünschten Bauteilen, wenden Sie sich bitte an unseren Vertrieb. Falls Sie dieses Datenblatt ausgedruckt oder heruntergeladen haben, finden Sie die aktuellste Version im Internet.

### Verpackung

Benutzen Sie bitte die Ihnen bekannten Recyclingwege. Wenn diese nicht bekannt sein sollten, wenden Sie sich bitte an das nächstgelegene Vertriebsbüro. Wir nehmen das Verpackungsmaterial zurück, falls dies vereinbart wurde und das Material sortiert ist. Sie tragen die Transportkosten. Für Verpackungsmaterial, das unsortiert an uns zurückgeschickt wird oder das wir nicht annehmen müssen, stellen wir Ihnen die anfallenden Kosten in Rechnung.

### Bauteile, die in lebenserhaltenden Apparaten und Systemen eingesetzt werden, müssen für diese Zwecke ausdrücklich zugelassen sein!

Kritische Bauteile\* dürfen in lebenserhaltenden Apparaten und Systemen\*\* nur dann eingesetzt werden, wenn ein schriftliches Einverständnis von OSRAM OS vorliegt.

\*) Ein kritisches Bauteil ist ein Bauteil, das in lebenserhaltenden Apparaten oder Systemen eingesetzt wird und dessen Defekt voraussichtlich zu einer Fehlfunktion dieses lebenserhaltenden Apparates oder Systems führen wird oder die Sicherheit oder Effektivität dieses Apparates oder Systems beeinträchtigt.

\*\*) Lebenserhaltende Apparate oder Systeme sind für (a) die Implantierung in den menschlichen Körper oder (b) für die Lebenserhaltung bestimmt. Falls Sie versagen, kann davon ausgegangen werden, dass die Gesundheit und das Leben des Patienten in Gefahr ist.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Published by OSRAM Opto Semiconductors GmbH  
 Leibnizstraße 4, D-93055 Regensburg  
 www.osram-os.com © All Rights Reserved.

HS and China RoHS compliant product



符合欧盟 RoHS 指令的要求；

符合中国 RoHS 指令的要求；

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

