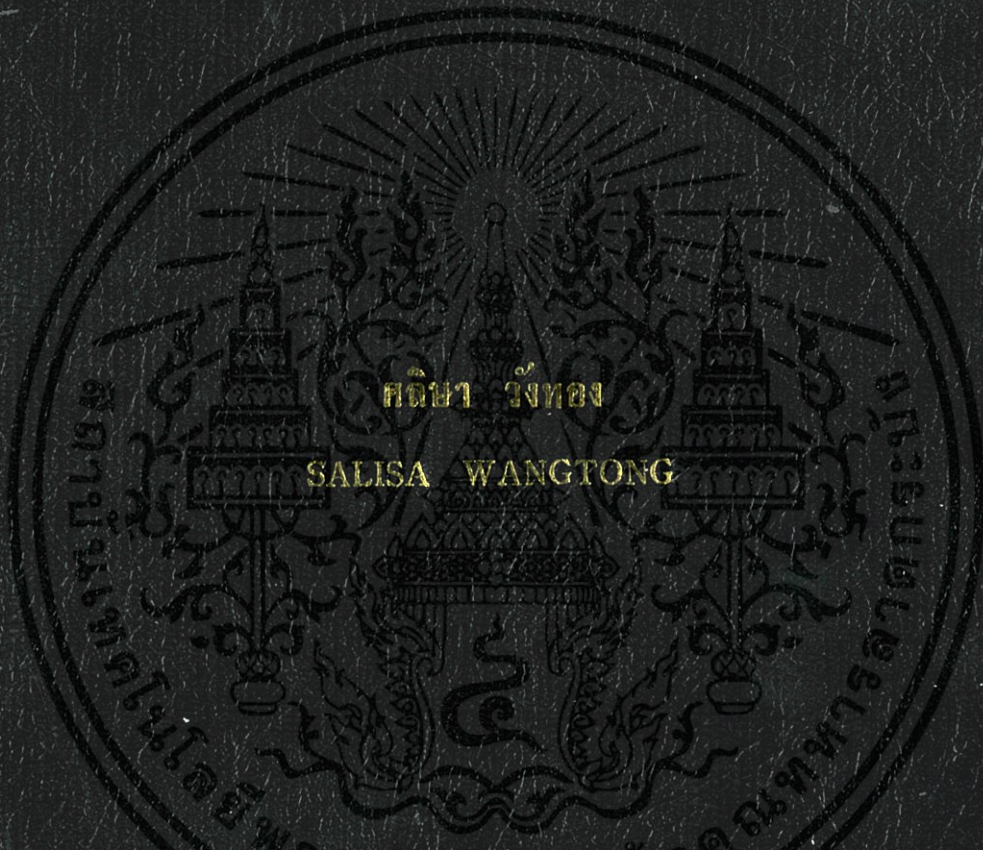


การพัฒนาจุดจู่ตรวจระยะสนามไมโครเวฟระยะใกล้  
ระบบเลื่อนหัวนำคลื่นปลายเปิด

DEVELOPMENT OF A SCANNING OPEN WAVEGUIDE PROBE  
MICROWAVE NEAR FIELD MICROSCOPE



ศศิษา วังทอง

SALISA WANGTONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-SC-M-030-041

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนากล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้  
ระบบเลื่อนท่อนำคลื่นปลายเปิด

DEVELOPMENT OF A SCANNING OPEN WAVEGUIDE PROBE  
MICROWAVE NEAR FIELD MICROSCOPE



T105135



ศลิษา วังทอง  
SALISA WANGTONG

อ.พ.  
ศ 2841  
2552

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 105135  
วันเดือนปี 16 พ.ย. 2552

b. 121bb091  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2552

KMITL-2009-SC-M-030-041

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DEVELOPMENT OF A SCANNING OPEN WAVEGUIDE PROBE  
MICROWAVE NEAR FIELD MICROSCOPE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2009**

**KMITL-2009-SC-M-030-041**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2009**

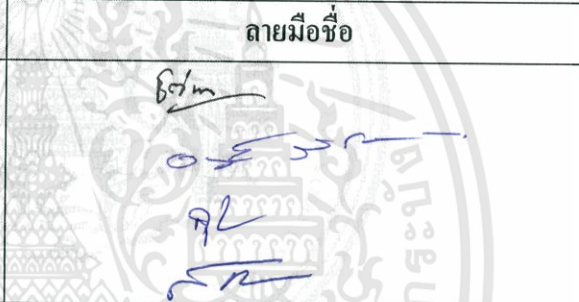
**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การพัฒนากล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ระบบเลื่อนท่อนำคลื่นปลายเปิด  
Development of a Scanning Open Waveguide Probe Microwave Near Field Microscope  
นักศึกษา                      นางสาวศลิษา วังทอง  
รหัสประจำตัว                47064109  
ปริญญา                        วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา                    ฟิสิกส์ประยุกต์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์    รศ.อนุพงษ์ สรงประภา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จิตินัย              แก้วแดง	
รศ.อนุพงษ์                สรงประภา	
รศ.สุวรรณ                กุลสำราญ	
รศ.สมศักดิ์              เชียร์ศิริกุล	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน / เดือน / ปี    ที่สอบ 20 พฤษภาคม 2552 เวลา 13.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ    ณ อาคารจุฬารณวลัยลักษณ์ 1 ห้อง 307

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่...22...เดือน...พฤษภาคม...พ.ศ. 2552....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ระบบเลื่อน ท่อนำคลื่นปลายเปิด
นักศึกษา	นางสาว ศลิษา วังทอง
รหัสนักศึกษา	47064109
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. อนุพงศ์ สรงประภา

### บทคัดย่อ

ได้ทำการออกแบบสร้างระบบต้นแบบของกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ทำงานที่ความถี่ 9.3 กิกะเฮิรตซ์ กำลังส่ง 10 มิลลิวัตต์ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาข้อจำกัดในทางฟิสิกส์ด้านความสามารถในการจำแนกแยกแยะรายละเอียดของวัตถุ ได้ดีกว่าขีดจำกัดของเรเลย์ (Rayleigh resolution) โดยพิจารณาอันตรกิริยาของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณทางออกของหัวส่งและรับสัญญาณซึ่งเป็นช่องสี่เหลี่ยมแคบ ๆ ตรงปลายปิดรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากของท่อนำคลื่นที่อยู่เกือบประชิดกับพื้นผิววัตถุแบน ใช้การเลื่อนตำแหน่งใน 2 มิติ พร้อมสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของปริมาณคลื่นที่สะท้อนกลับ เพื่อประมวลผลสร้างภาพในเบื้องต้นจากข้อมูลสัญญาณคล้องจองกับแต่ละตำแหน่งของหัวส่งและรับสัญญาณ

<b>Thesis Title</b>	Development of a Scanning Open Waveguide Probe Microwave Near Field Microscope
<b>Student</b>	Miss Salisa Wangtong
<b>Student ID.</b>	47064109
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	2009
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof. Anupong Songphapar

### ABSTRACT

A microwave near field microscope, operating at 9.3 GHz and 10 mW, has been designed and constructed to overcome the Rayleigh resolution limit. The plane object to be inspected is placed at a fixed short separation distance from the wedge – shape tip probe that is slot – opening waveguide microwave output port. The reflected wave signals represented the electromagnetic coupling strength are measured and collected as the probe is scanned in 2 dimensions across the object. The preliminary image of the object is obtained by plotting the collected data correspond to each position of the probe.

# กิตติกรรมประกาศ

สำหรับความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์อนุพงษ์ สรงประภา ที่ท่านได้ให้แนวทางการวิจัย ความช่วยเหลือแก้ไขในส่วนที่ไม่เข้าใจและคอยผลักดันให้งานได้ดำเนินต่อไป

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ให้ความรู้ คำปรึกษาและข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่อการทำงาน

ขอขอบคุณผลงานวิจัยและเอกสารอ้างอิงต่าง ๆ ที่ข้าพเจ้าได้หยิบยกมา ที่ทำให้เกิดความสนใจในการทำงานวิจัยนี้ ซึ่งข้าพเจ้าคาดหวังงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจในทางด้านไมโครเวฟกำลังงานต่ำ เพื่อนำไปพัฒนาต่อไปในวันข้างหน้า

ขอขอบคุณทางห้องปฏิบัติการไมโครเวฟประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ข้าพเจ้าได้หยิบยืมอุปกรณ์ เครื่องมือและสถานที่ เพื่อใช้ในการดำเนินการวิจัยนี้

ขอบคุณ คุณพ่อศักดิ์ชัย และคุณแม่จุไร ว่างทอง และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจ ให้การสนับสนุน ตลอดจนให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ เสมอมา

และขอขอบคุณ คุณอดิเรก คุณสุขุม คุณวีระชัย คุณสมพบ คุณประจักษ์ และน้อง ๆ จากห้องปฏิบัติการ ไมโครเวฟประยุกต์และห้องปฏิบัติการเครื่องมือทางการแพทย์และสิ่งแวดล้อม ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ ซึ่งเป็นบุคคลใกล้ชิดที่ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจตลอดมา ทำให้งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุก ๆ ท่านที่ได้กล่าวนามและที่มีได้กล่าวนามด้วยความจริงใจ

ศลิษา ว่างทอง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎีและแนวคิดในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการที่ใช้ในการวิจัย.....	4
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้.....	4
2.1.1 หัวส่งและรับสัญญาณ.....	10
2.1.1.1 ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	10
2.1.1.2 ช่องเปิดของหัวส่งและรับสัญญาณ.....	13
2.1.1.3 การจำลองการทำงานหัวส่งและรับสัญญาณแบบช่องเปิด.....	15
2.2 หลักการพัฒนากล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้.....	18
2.2.1 ส่วนระบบไมโครเวฟ.....	18
2.2.1.1 แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอด.....	19
2.2.1.2 เซอร์คิวเลเตอร์.....	20
2.2.2 ส่วนตรวจวัด เพื่อขยายและแปลงสัญญาณ.....	21
2.2.2.1 ตัวตรวจวัดสัญญาณ.....	21
2.2.2.3 ตัวปรับอิมพีแดนซ์แบบสลับจูนเนอร์.....	22
2.2.2.2 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน.....	23

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.3 ส่วนกลไกเลื่อนตำแหน่ง.....	24
2.2.3.1 สเตปมอเตอร์แบบ 5 เฟส.....	24
โครงสร้างและหลักการทำงานของสเตปมอเตอร์แบบ 5 เฟส.....	24
2.2.4 ส่วนควบคุมและประมวลผล.....	27
<b>บทที่ 3 การพัฒนาล็อกลูกทรรคน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ระบบเลื่อนท่อนำคลื่นปลายเปิด...</b>	<b>28</b>
3.1 การออกแบบระบบเบื้องต้น .....	28
3.1.1 หัวส่งและรับสัญญาณ .....	29
3.1.2 วงจรกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน.....	30
3.1.3 ระบบเชิงกลในการเลื่อนตำแหน่งในระนาบ 2 มิติ.....	31
3.1.3.1 การออกแบบโครงสร้างหลัก.....	31
3.1.3.2 การออกแบบกลไกการเลื่อนตำแหน่ง.....	31
3.1.4 ระบบควบคุมและเก็บข้อมูลเพื่อประมวลผล.....	32
3.2 การสร้างระบบ.....	33
3.2.1 แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์โคโฮด .....	34
3.2.2 เซอร์คิวเลเตอร์ .....	34
3.2.3 ตัวตรวจวัดสัญญาณ .....	35
3.2.4 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน.....	32
3.2.5 ตัวปรับอิมพีแดนซ์แบบสลับจูนเนอร์ .....	35
3.2.6 หัวส่งและรับสัญญาณ .....	36
3.2.7 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า .....	38
3.2.8 เครื่องกำเนิดความถี่ .....	38
3.2.9 เครื่องขยายสัญญาณแบบลือคอิน .....	39
3.2.10 เครื่องออสซิลโลสโคป .....	39
3.2.11 ระบบสแกนตำแหน่ง .....	40
3.2.12 การทำงานของระบบ .....	40

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การทดลอง.....	41
3.3.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจาก หัวส่งและรับสัญญาณกับพิวระนาบวัตถุ .....	41
3.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพของหัวส่งและรับสัญญาณ.....	42
3.3.2.1 การทดสอบความละเอียดในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต.....	42
3.3.2.2 การทดสอบความละเอียดในแนวนอนกับแนวยาวของสลิต.....	42
3.3.2.3 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม SEMCAD.....	43
3.3.3 การทดลองเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพวัตถุด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น.....	44
3.3.3.1 วัตถุตัวอย่างที่เป็นแถบทองแดง.....	44
1. วัตถุตัวอย่างที่เป็นแถบทองแดง 1 เส้น.....	45
2. วัตถุตัวอย่างที่เป็นแถบทองแดง 2 เส้น.....	46
3.3.3.2 วัตถุตัวอย่างที่เป็นเหรียญโลหะรูปวงกลม.....	47
3.4 วิธีการสร้างภาพกลับ.....	48
บทที่ 4 ผลการทดลอง .....	49
4.1 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนและระยะห่าง จากหัวส่งและรับสัญญาณกับพิวระนาบวัตถุ.....	49
4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของหัวส่งและรับสัญญาณ.....	50
4.2.1 ผลการทดสอบความละเอียดในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต.....	51
4.2.2 ผลการทดสอบความละเอียดในแนวนอนกับแนวยาวของสลิต.....	54
4.2.3 ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม SEMCAD.....	57
4.3 การทดลองเก็บข้อมูลและสร้างภาพวัตถุด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น.....	58
4.3.1 วัตถุตัวอย่างที่เป็นแถบทองแดง.....	58
4.3.1.1 วัตถุตัวอย่างที่เป็นแถบทองแดง 1 เส้น.....	58
4.3.1.2 วัตถุตัวอย่างที่เป็นแถบทองแดง 2 เส้น.....	66
4.3.2 วัตถุตัวอย่างที่เป็นเหรียญโลหะรูปวงกลม.....	74

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	78
5.1 สรุปการทดลอง.....	78
5.3 ปัญหาที่พบ.....	79
5.2 แนวทางการพัฒนา.....	79
5.3.1 พัฒนาหัวส่งและรับสัญญาณ .....	79
5.3.2 พัฒนาด้านการเก็บข้อมูล.....	79
5.3.2 พัฒนาด้านขีดความสามารถในการคำนวณและประมวลผล.....	79
5.3.4 พัฒนาด้านทฤษฎีในการประมวลผลสร้างภาพ .....	79
เอกสารอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก. แสดงแผนภาพขั้นตอนการทำงาน.....	84
ภาคผนวก ข. แสดงโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการทำงานของระบบ.....	85
ประวัติผู้เขียน.....	88

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงค่าที่ใช้ในการออกแบบหัวส่งและรับสัญญาณ.....	30
3.2 แสดงค่าเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองการทำงานหัวส่งและรับสัญญาณ ด้วยโปรแกรม SEMCAD.....	44
4.1 แสดงผลการคำนวณค่า Full Width at Half Maximum.....	56



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 (ก) แสดงการเลี้ยวเบนของคลื่นจากวัตถุเล็ก ๆ 2 อันผ่านเลนส์นูน.....	4
(ข) ภาพของวัตถุทั้งสองที่สามารถแยกได้	
(ค) ภาพของวัตถุทั้งสองที่ยากต่อการแยก	
2.2 เงื่อนไขของเกณฑ์เรย์ลี ณ ตำแหน่งที่สามารถแยกความแตกต่างของภาพได้พอดี.....	5
2.3 ความสามารถในการแยกภาพวัตถุที่อยู่ใกล้กันของกล้องจุลทรรศน์.....	5
2.4 สนามบริเวณ โดยรอบสายอากาศ.....	7
2.5 ระบบกล้องจุลทรรศน์สนาม ไมโครเวฟระยะใกล้ของแอสและนิโคล.....	8
2.6 ผลการทดลองของระบบกล้องจุลทรรศน์สนาม ไมโครเวฟระยะใกล้ของแอสและนิโคล ที่วัตถุมีความกว้างช่องเป็น (ก) 1.0 มิลลิเมตร (ข) 0.7 มิลลิเมตร และ (ค) 0.5 มิลลิเมตร.....	8
2.7 หัวส่งและรับสัญญาณรูปแบบต่าง ๆ (ก) แบบช่องเปิด (ข) แบบเอสทีเอ็ม (ค) แบบหัวเข็มโคแอกเซียล (ง) แบบโคแอกเซียลปลายเปิด (จ) แบบสตรีปไลน์ขนาน (ฉ) แบบแมกเนติกไดโพล.....	9
2.8 ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	10
2.9 การเคลื่อนที่ของคลื่นท่อนำคลื่น.....	11
2.10 การกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นในโหมด $TE_{10}$ .....	13
2.11 ช่องสล็อตบนแผ่นโลหะบางที่ปิดท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม.....	14
2.12 สนามไฟฟ้าและแม่เหล็กในระนาบใด ๆ.....	16
2.13 โครงสร้างหลักของกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้.....	18
2.14 ระบบการวัดสัญญาณ ไมโครเวฟสนามระยะใกล้โดยทั่วไป.....	18
2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับกระแสในปรากฏการณ์ของกันนี้.....	19
2.16 กันนี้ไดโอดในโพรง.....	20
2.17 วงจรสมนัยของกันนี้ไดโอดออสซิลเลเตอร์.....	20
2.18 สัญลักษณ์เซอร์คิวเลเตอร์แบบ 3 พอร์ต.....	21
2.19 โครงสร้างของตัวตรวจวัด.....	21
2.20 สดับจูนเนอร์ของท่อนำคลื่น (a) $E$ -stub (b) $H$ -stub (c) $E-H$ tuner.....	22
2.21 สมบัติวงจรการองสัญญาณความถี่สูงผ่าน.....	23
2.22 วงจรอาร์ชีกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน.....	23

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 โครงสร้างของสเตปมอเตอร์.....	25
2.24 การกระตุ้นของเฟส A.....	26
2.25 การกระตุ้นของเฟส A.....	26
2.26 แผนภาพระบบควบคุมและเก็บข้อมูล.....	27
3.1 แบบโครงสร้างกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้.....	28
3.2 โครงสร้างหัวส่งและรับสัญญาณ.....	29
3.3 วงจรอาร์ซีกรอสสัญญาณความถี่สูงผ่านที่ออกแบบ.....	30
3.4 โครงสร้างหลักที่ติดตั้งอุปกรณ์.....	31
3.5 กลไกการเลื่อนตำแหน่ง.....	31
3.6 แผนภาพการทำงานของระบบเก็บข้อมูล.....	32
3.7 กล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้.....	33
3.8 แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกันน้ำไดโอด (Toshiba : model S – GX12A ).....	34
3.9 เซอร์คิวเลเตอร์ (Lectronic Research Lab : 0994104901).....	34
3.10 ตัวตรวจวัดสัญญาณแบบคริสตัลเมท (SPC Electronics corp : 14T006).....	35
3.11 วงจรกรองความถี่สูงผ่านที่สร้างขึ้น.....	35
3.12 ตัวรับอิมพีแดนซ์แบบสตัปจูนเนอร์ (SPC Electronics corp : 14T011).....	36
3.13 เทฟลอนที่ใช้ในการทำหัวส่งและรับสัญญาณแบบ (ก) มุม 90 องศา (ข) มุม 60 องศา.....	36
3.14 หัวส่งและรับสัญญาณ (ก) แบบที่ 2 (มุม 90 องศา) (ข) แบบที่ 3 (มุม 60 องศา).....	37
3.15 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (SPC Electronics corp : 14T002).....	38
3.16 เครื่องกำเนิดความถี่ (GW : GFG – 8017G).....	38
3.17 เครื่องขยายสัญญาณแบบสี่ออคติน (EG&G Princeton applied research :5210).....	39
3.18 เครื่องออสซิลโลสโคป (Agilent : 54621A).....	39
3.19 แท่นวางวัตถุ (X – Y stage) และสเตปมอเตอร์ (Vexta : PH544 – NB – C34).....	40
3.20 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของความเข้มสัญญาณการสะท้อนกับระยะห่าง $z$ .....	41
3.21 การทดลองเพื่อหาความละเอียดในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต.....	42
3.22 การทดลองเพื่อหาความละเอียดในแนวนอนกับแนวยาวของสลิต.....	42
3.23 แบบจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม SEMCAD.....	43

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.24 ขอบเขตปริมาตรที่ทำการคำนวณพฤติกรรมทางแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบ.....	43
3.25 แถบทองแดงขนาด 8 มิลลิเมตร วางขนานกับแนวยาวของสลิต.....	45
3.26 แถบทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตร วางขนานกับแนวยาวของสลิต.....	45
3.27 แถบทองแดงขนาด 8 มิลลิเมตร วางตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต.....	45
3.28 แถบทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตร วางตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต.....	46
3.29 แถบทองแดงขนาด 8 มิลลิเมตร วางห่าง $d = 5$ มิลลิเมตร วางขนานกับแนวยาวของสลิต.....	46
3.30 แถบทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตร วางห่าง $d = 5$ มิลลิเมตร วางขนานกับแนวยาวของสลิต.....	46
3.31 แถบทองแดงขนาด 8 มิลลิเมตร วางห่าง $d = 5$ มิลลิเมตร วางตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต.....	47
3.32 แถบทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตร วางห่าง $d = 5$ มิลลิเมตร วางตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต.....	47
3.33 เหยี่ยูลอหะรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร.....	47
3.34 เหยี่ยูลอหะรูปวงกลมวางขอบห่าง 5 มิลลิเมตร ในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต.....	47
4.1 ความสัมพันธ์ของความเข้มของสัญญาณการสะท้อนกับระยะห่าง $z$ ของหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา.....	49
4.2 ความสัมพันธ์ของความเข้มของสัญญาณการสะท้อนกับระยะห่าง $z$ ของหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา.....	50
4.3 ความสัมพันธ์ของความเข้มของสัญญาณการสะท้อนกับตำแหน่งตามแนวตั้งฉาก กับแนวยาวของสลิต เมื่อวางแถบทองแดงขนาด 8 มิลลิเมตรของหัวส่งและรับสัญญาณ (ก) แบบมุม 90 องศา    (ข) แบบมุม 60 องศา .....	51
4.4 ความสัมพันธ์ของความเข้มของสัญญาณการสะท้อนกับตำแหน่งตามแนวตั้งฉาก กับแนวยาวของสลิต เมื่อวางแถบทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตรของหัวส่งและรับสัญญาณ (ก) แบบมุม 90 องศา    (ข) แบบมุม 60 องศา .....	52

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ความสัมพันธ์ของความเข้มของสัญญาณการสะท้อนกับตำแหน่งตามแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต เมื่อวางแถบทองแดงขนาด 2 มิลลิเมตรของหัวส่งและรับสัญญาณ (ก) แบบมุม 90 องศา (ข) แบบมุม 60 องศา .....53	
4.6 ความสัมพันธ์ของความเข้มของสัญญาณการสะท้อนกับตำแหน่งตามแนวขนานกับแนวยาวของสลิต เมื่อวางแถบทองแดงขนาด 8 มิลลิเมตรของหัวส่งและรับสัญญาณ (ก) แบบมุม 90 องศา (ข) แบบมุม 60 องศา .....54	
4.7 ความสัมพันธ์ของความเข้มของสัญญาณการสะท้อนกับตำแหน่งตามแนวขนานกับแนวยาวของสลิต เมื่อวางแถบทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตรของหัวส่งและรับสัญญาณ (ก) แบบมุม 90 องศา (ข) แบบมุม 60 องศา .....55	
4.8 ความสัมพันธ์ของค่าSWRกับการเลื่อนตำแหน่งตามแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต เมื่อวางแถบทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตร ของหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา..... 57	
4.9 ความสัมพันธ์ของค่าSWRกับการเลื่อนตำแหน่งตามแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต เมื่อวางแถบทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตร ของหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา..... 57	
4.10 ภาพวัดรูปที่ 3.25 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ..... 58	
4.11 ภาพวัดรูปที่ 3.25 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ..... 59	
4.12 ภาพวัดรูปที่ 3.26 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ..... 60	
4.13 ภาพวัดรูปที่ 3.26 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ..... 61	
4.14 ภาพวัดรูปที่ 3.27 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ..... 62	
4.15 ภาพวัดรูปที่ 3.27 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ..... 63	
4.16 ภาพวัดรูปที่ 3.28 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ..... 64	
4.17 ภาพวัดรูปที่ 3.28 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ..... 65	
4.18 ภาพวัดรูปที่ 3.29 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ..... 66	
4.19 ภาพวัดรูปที่ 3.29 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ..... 67	
4.20 ภาพวัดรูปที่ 3.30 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ..... 68	
4.21 ภาพวัดรูปที่ 3.30 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ..... 69	
4.22 ภาพวัดรูปที่ 3.31 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ..... 70	
4.23 ภาพวัดรูปที่ 3.31 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ..... 71	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 ภาพวัตถุรูปที่ 3.32 จากหัวสังและรับสัญญาณแบบมม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ.....	72
4.25 ภาพวัตถุรูปที่ 3.32 จากหัวสังและรับสัญญาณแบบมม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ.....	73
4.26 ภาพวัตถุรูปที่ 3.33 จากหัวสังและรับสัญญาณแบบมม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ.....	74
4.27 ภาพวัตถุรูปที่ 3.33 จากหัวสังและรับสัญญาณแบบมม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ.....	75
4.28 ภาพวัตถุรูปที่ 3.34 จากหัวสังและรับสัญญาณแบบมม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ.....	76
4.29 ภาพวัตถุรูปที่ 3.34 จากหัวสังและรับสัญญาณแบบมม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ.....	77



### 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

จากผลของการศึกษาและรวบรวมข้อมูลของหลักการทำงาน การออกแบบระบบและอุปกรณ์ทางไมโครเวฟ ตลอดจนความสำเร็จที่ผ่านมาของการประยุกต์ทฤษฎีคลื่นในการสร้างภาพไมโครเวฟ จึงคาดว่า การพัฒนาสร้างหัวส่งและรับคลื่น ที่เน้นการปรับเปลี่ยนตัวแปรของลักษณะช่องตรงปลายเปิดของท่อนำคลื่น จะทำให้ได้ภาพไมโครเวฟของวัตถุ 2 มิติที่มีความชัดเจนขึ้น ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาเครื่องต้นแบบ

### 1.4 ทฤษฎีและแนวคิดในการวิจัย

กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการมองวัตถุ ช่วยในการศึกษาลักษณะโครงสร้างและสมบัติของวัตถุ โดยพิจารณาความสามารถของกล้องจุลทรรศน์จากความละเอียด (Resolution) หรือความสามารถในการแจกแจงรายละเอียด ที่สามารถแยกจุดสองจุด ซึ่งอยู่ใกล้กันที่สุดให้มองเห็นเป็นสองจุดได้ (Two points of discrimination) ทั้งนี้ในการสร้างกล้องจุลทรรศน์นั้นมิได้อาศัยแต่คลื่นแสงในย่านที่มองเห็น (Visible light) เท่านั้น แต่ยังใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความยาวคลื่นอื่นได้ ไม่ว่าจะเป็น ไมโครเวฟ หรืออินฟราเรด เป็นต้น การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟกำลังต่ำในกล้องจุลทรรศน์จึงเป็นวิธีหนึ่งในการพัฒนากล้องจุลทรรศน์ เนื่องจากคลื่น ไมโครเวฟกำลังต่ำมีสมบัติในการส่องผ่านทะลุวัสดุหลายประเภท เช่น ปูนซีเมนต์ ไม้ พลาสติก ผ้าหนา ๆ เช่นเดียวกับรังสีเอ็กซ์ (ในขณะที่อินฟราเรดไม่มีสมบัติดังกล่าว) แต่แตกต่างตรงที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในรูปของการทำให้อะตอมของเนื้อเยื่อมีการแตกตัวใด ๆ ทั้งนี้ก็เพราะความยาวคลื่นที่มีค่ามาก พลังงานต่อหนึ่งหน่วยอนุภาคของคลื่นที่เรียกกันว่า โฟตอน (Photon) นั้นมีค่าน้อย อีกทั้งข้อจำกัดในการแจกแจงรายละเอียดที่ขึ้นกับความยาวคลื่นที่ใช้ ดังนั้นการพิจารณาในระดับสนามระยะใกล้ (Near field) ก็ทำให้เพิ่มขีดความสามารถของกล้องจุลทรรศน์ได้

### 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นศึกษาและพัฒนาาระบบกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ ให้มีประสิทธิภาพ รวมถึงการประมวลสร้างภาพ โดยแบ่งการทำงานออกเป็น

1.5.1 ศึกษาส่วนที่เกี่ยวข้องกับระบบไมโครเวฟ พร้อมออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไมโครเวฟในการวิจัย ที่แหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ 9.3 กิกะเฮิรตซ์ มีกำลังคลื่น 10 มิลลิวัตต์

1.5.1.1 การออกแบบระบบไมโครเวฟที่ใช้ในการพัฒนาระบบ

1.5.1.2 การสร้างระบบไมโครเวฟ

1.5.1.3 การออกแบบหัวรับส่งคลื่นและใช้โปรแกรมทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.2 พัฒนาระบบควบคุมการทำงานของระบบเก็บข้อมูลโดยการเลื่อนตำแหน่งวัตถุบนระนาบ 2 มิติ ด้วยสเตปมอเตอร์ที่ควบคุมด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น เพื่อควบคุมการทำงานในแบบกึ่งอัตโนมัติ ผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์

1.5.3 พัฒนาระบบการประมวลผลสร้างภาพ จากข้อมูลที่ได้จากระบบ

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

1.6.1 ศึกษาทฤษฎีทางไมโครเวฟและหลักการที่จำเป็นกับงานวิจัย รวมถึงหลักการการทำงานของอุปกรณ์ไมโครเวฟต่าง ๆ

1.6.2 ศึกษาทฤษฎีและสมการทางคณิตศาสตร์ในการสร้างภาพวัตถุในกรณีทั่วไป

1.6.3 ศึกษาและสร้างระบบสแกนพื้นผิววัตถุบนระนาบ  $xy$  ที่มีพื้นที่เสกน  $50 \times 50$  ตารางมิลลิเมตร

1.6.4 ศึกษาการพัฒนาและเลือกใช้งานลักษณะเฉพาะของหัวส่งและรับคลื่น

1.6.5 ศึกษาการเขียนโปรแกรมใช้ควบคุมการทำงาน โปรแกรมจำลองการส่งและรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และโปรแกรมประมวลผลสร้างภาพ

1.6.7 การสร้างและการทดสอบระบบย่อย

1.6.8 วิเคราะห์และแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น

1.6.9 ทำการทดสอบระบบโดยรวม ทำการทดลองเก็บข้อมูล ประมวลผลสร้างภาพพื้นผิววัตถุตัวอย่าง

1.6.10 สรุปผลการวิจัย และแนวทางในการดำเนินงานพัฒนาต่อไปในอนาคต

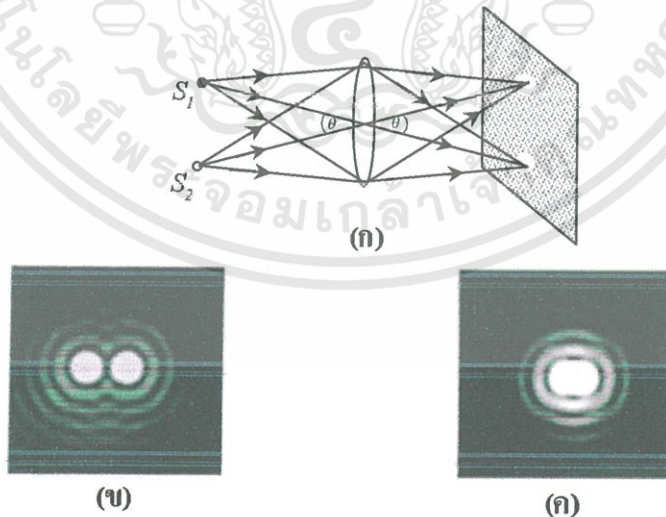
## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการที่ใช้ในการวิจัย

ในการวิจัยจะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานทางฟิสิกส์ที่จำเป็นในการกำหนดรายละเอียดของภาพวัตถุ 2 มิติ รวมถึงหลักการทางานในส่วนขอระบบไมโครเวฟและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการพัฒนา ระบบ

### 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟ ระยะใกล้

ในการระบุนความต่างของภาพวัตถุขนาดเล็กที่อยู่ใกล้ ๆ กัน หรือแยกกันอยู่โดยมุมเล็ก ๆ นั้นสิ่งที่กำหนดขีดจำกัดของการแยกรายละเอียดของภาพ ก็คือ ความไม่คมชัด (limit of resolution) รูปที่ 2.1(ก) แสดงให้เห็นถึงการเลี้ยวเบนของคลื่นจากวัตถุเล็ก ๆ 2 อัน คือ  $S_1$  และ  $S_2$  ที่เกิดจากเลนส์นูน โดยจุดศูนย์กลางของภาพการเลี้ยวเบนบนฉากของวัตถุทั้งสองถูกกำหนดด้วยมุม  $\theta$  ถ้า มุมนี้มีค่ามากพอ จะทำให้ภาพการแทรกสอดแยกจากกันชัดเจนดังในรูปที่ 2.1 (ข) แต่ถ้าวัตถุทั้งสองเข้ามาใกล้กันมากขึ้น ภาพก็จะเข้าใกล้กันด้วย จนถึงในระยະหนึ่งทีภาพจะซ้อนทับกันทำให้เกิดความยากลำบากในการแยกความต่างของภาพจากแต่ละวัตถุได้ ดังรูปที่ 2.1(ค) การระบุนขีดจำกัดของการแยกนี้ อาศัยเกณฑ์ของเรย์ลี (Rayleigh's criterion) ที่กล่าวว่า ภาพที่สามารถแยกได้พอดีนั้น จะต้องมีส่วนศูนย์กลางของ Airy disk อยู่ห่างกันไม่น้อยกว่ารัศมีของ Airy disk (Radius of Airy disk:  $\Delta\theta_{\min}$ ) [1]

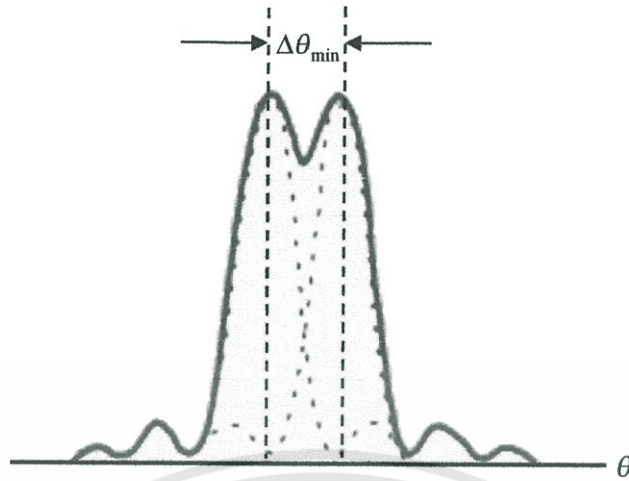


รูปที่ 2.1 (ก) แสดงการเลี้ยวเบนของคลื่นจากวัตถุเล็ก ๆ 2 อันผ่านเลนส์นูน

(ข) ภาพของวัตถุทั้งสองที่สามารถแยกได้

(ค) ภาพของวัตถุทั้งสองที่ยากต่อการแยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

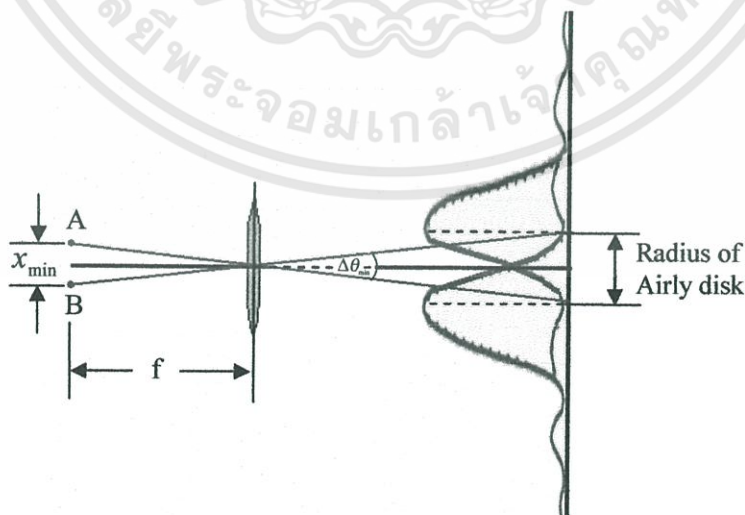


รูปที่ 2.2 เงื่อนไขของเกณฑ์เรย์ลี ณ ตำแหน่งที่สามารถแยกความแตกต่างของภาพได้พอดี

จากรูปที่ 2.2 พบว่าขีดจำกัดของการแยกมีค่าไม่น้อยกว่า  $(\Delta\theta)_{\min}$  หรือเมื่อจุดสูงสุดค่าความเข้มแสงของภาพหนึ่งตรงกับจุดต่ำสุดของอีกภาพพอดี จะทำให้สามารถแยกความต่างของภาพวัตถุทั้งสองได้ ดังนั้นจึงได้ความสัมพันธ์เป็น

$$(\Delta\theta)_{\min} = \frac{1.22\lambda}{D^*} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $D^*$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์นูน ถ้าจุดศูนย์กลางของ Airly disk มีจุดศูนย์กลางน้อยกว่ารัศมีของ Airly disk จะไม่สามารถบอกความต่างของภาพได้



รูปที่ 2.3 ความสามารถในการแยกภาพวัตถุที่อยู่ใกล้กันของกล้องจุลทรรศน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าพิจารณาเลนส์วัตถุในกล้องจุลทรรศน์ดังรูปที่ 2.3 โดยการประมาณค่าโดยไม่คำนึงว่า คลื่นที่สะท้อนวัตถุไปที่เลนส์จะเป็นระนาบหรือไม่ ระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างวัตถุทั้งสอง ที่ทำให้ สามารถแยกความแตกต่างของภาพได้ หรือ  $x_{\min}$  เป็น

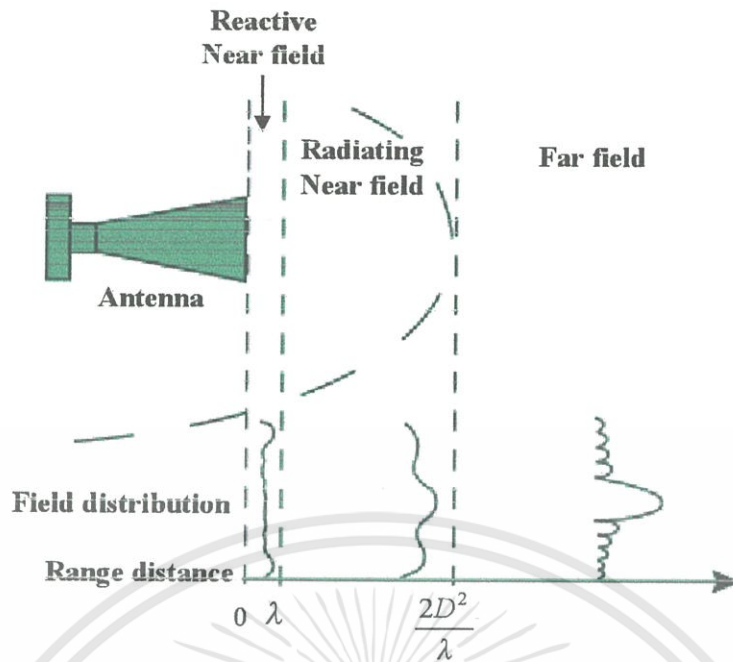
$$x_{\min} = f \Delta\theta_{\min} = f \frac{1.22\lambda}{D^*} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $f$  คือความยาว โฟกัสของเลนส์นูน และอัตราส่วน  $D^*/f$  เรียกว่า Numerical aperture ของเลนส์ ซึ่งมีค่าประมาณ 1.22 จะได้

$$x_{\min} \cong \lambda \quad (2.3)$$

จากสมการ (2.3) จะเห็นได้ว่าความสามารถในการจำแนกแยกวัตถุจากกัน ได้ของกล้องจุลทรรศน์มีค่าประมาณความยาวคลื่นที่ใช้ ด้วยเหตุนี้เองเพื่อให้ได้ค่าขีดจำกัดการแยกที่ดีขึ้น ทำให้มีการสร้างกล้องจุลทรรศน์ที่อาศัยลำอิเล็กตรอน รังสีเอ็กซ์ รังสีอัลตราไวโอเลต หรือคลื่นไมโครเวฟแทนแสง แต่อย่างไรก็ดีหากต้องการค่าขีดจำกัดที่น้อยกว่าความยาวคลื่น การพิจารณาในสนามระยะใกล้ (Near field) จึงเป็นวิธีที่นำมาใช้ในการเพิ่มขีดความสามารถของการแยกได้

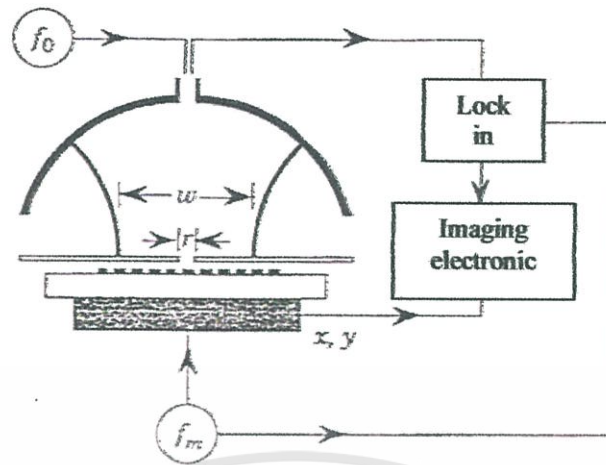
เมื่อพิจารณาแผ่ของคลื่นไมโครเวฟจากสายอากาศในระยะต่าง ๆ พบว่ามีด้วยกัน 3 บริเวณ [2], [3] คือ สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive near field) สนามแผ่กระจายระยะใกล้ (Radiating Near field) และสนามระยะไกล (Far field) ดังรูปที่ 2.4 สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณที่อยู่ใกล้สายอากาศที่สุดในระยะไม่เกินความยาวคลื่น พบว่า พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในส่วนนี้จะลดลงอย่างมากเมื่อระยะทาง (distance) เพิ่มขึ้น ส่วนสนามแผ่กระจายระยะใกล้อยู่ในช่วงระยะมากกว่าความยาวคลื่นแต่ไม่เกินระยะ  $2D^2/\lambda$  ( $D$  คือ ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ) และในระยะที่มากกว่า  $2D^2/\lambda$  ก็เป็นในส่วนสนามระยะไกลซึ่งจะพิจารณาหน้าคลื่นเป็นคลื่นระนาบ ต่างจากสนามแผ่กระจายระยะใกล้ที่มีลักษณะในแบบเป็นคลื่นทรงกลม



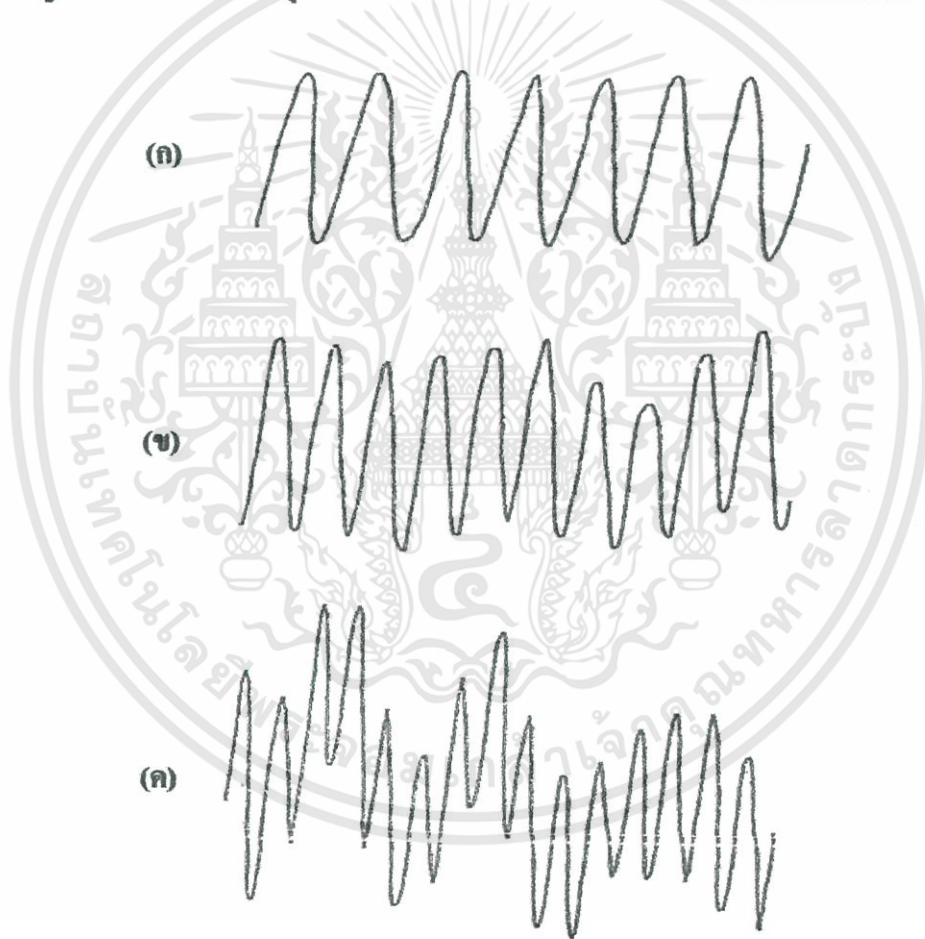
รูปที่ 2.4 สนามบริเวณโดยรอบสายอากาศ

กล้องจุลทรรศน์สนามระยะใกล้ (Near field microscope) เป็นการวัดการตอบสนองของวัตถุที่มีต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่นที่ใช้ในการสังเกตในระยะใกล้ที่สั้นกว่าความยาวคลื่นนั้นในอากาศ โดยกล้องจุลทรรศน์สนามระยะใกล้มีการพัฒนาขึ้น โดยใช้คลื่นต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นแสง ไมโครเวฟ อินฟราเรด หรือแม้แต่อัลตราไวโอเลต ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้งานคลื่นไมโครเวฟกำลังต่ำ จึงต้องทำความเข้าใจกับระบบกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ (Microwave near field microscope)

กล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ได้เริ่มมีการพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1972 โดย แอชและนิโคล [4] ได้สร้างระบบดังรูปที่ 2.5 ที่ทำงานด้วยคลื่นไมโครเวฟความยาวคลื่น 3 เซนติเมตร โดยปล่อยคลื่นไมโครเวฟความถี่  $f_0$  เข้าสู่ตัวเรโซเนเตอร์แบบเปิด (open resonator) เกิดเป็นคลื่น  $w$  ส่งไปยังช่องเปิดครีสมิ  $r$  ที่อยู่บนแผ่นไดอะแฟรม (diaphragm) บางซึ่งวางอยู่ในระยะใกล้กับเกรตติง (grating) ที่วางอยู่บนแท่นวางวัตถุ ทั้งนี้มีการมอดูเลต (modulate) สัญญาณด้วยสัญญาณความถี่  $f_m$  ทำการเก็บค่าความเข้มของสัญญาณที่ตำแหน่ง  $xy$  ใด ๆ ผลการทดลองโดยใช้วัตถุตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นเกรตติงที่ทำจากอะลูมิเนียมเคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ โดยมีความกว้างของช่องเกรตติงเป็น 1.0, 0.75 และ 0.5 มิลลิเมตร เป็นดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ระบบกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ของแอทและนิโคล

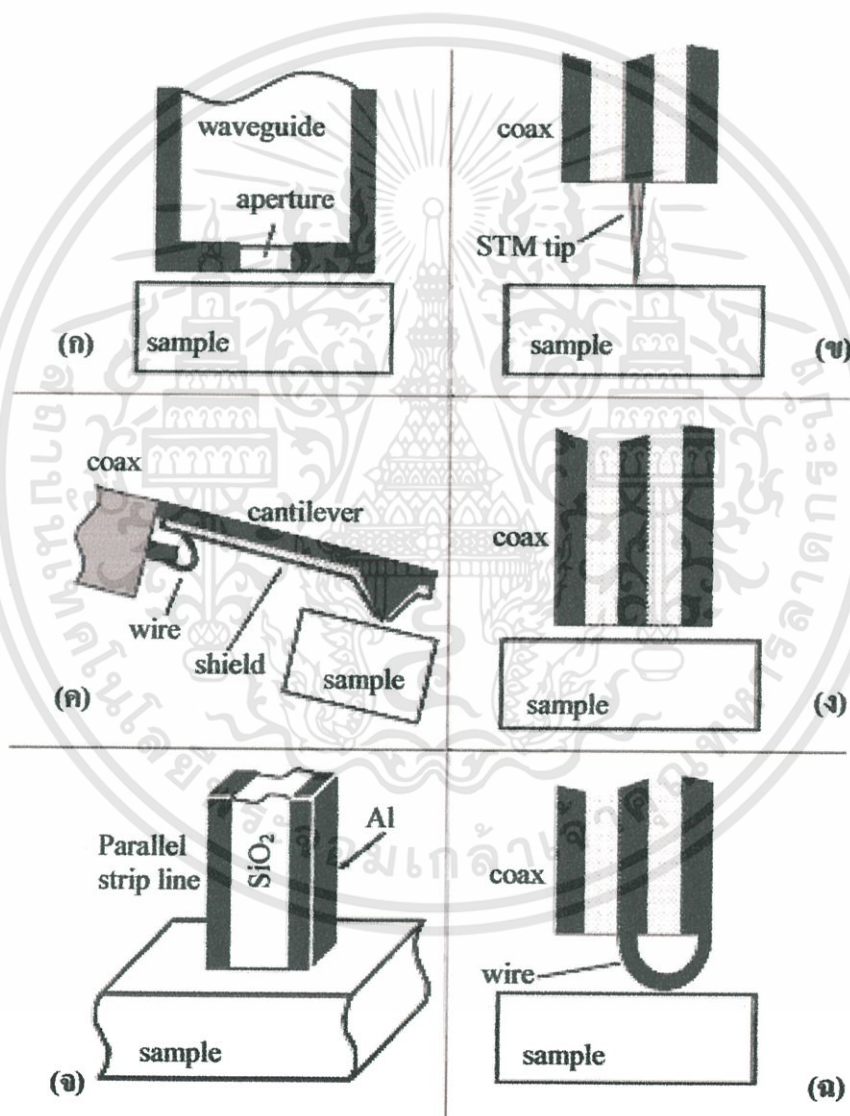


รูปที่ 2.6 ผลการทดลองของระบบกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ของแอทและนิโคล ที่วัตถุมีความกว้างช่องเป็น (ก) 1.0 มิลลิเมตร (ข) 0.7 มิลลิเมตร และ (ค) 0.5 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 2.6 พบว่าผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นถึงการแยกแยะในระดับที่ต่ำกว่าความยาวคลื่น (sub wavelength resolution)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้มีการพัฒนาขึ้นด้วยเทคนิคต่าง ๆ บนพื้นฐานองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ หัวส่งและรับสัญญาณ การวัดสัญญาณไมโครเวฟ และการสร้างภาพ [5] โดยระบบไมโครเวฟที่มีการพัฒนาขึ้นนั้นมีทั้งในรูปแบบของระบบสายส่งสัญญาณ (transmission line) ท่อนำคลื่น (waveguide) โดยจะมีการออกแบบหัวส่งและรับสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.7 ไม่ว่าจะเป็นหัวส่งและรับสัญญาณแบบท่อนำคลื่นที่มีช่องเปิดหรือสลิต (aperture/slit) [6] – [10] แบบหัวเข็มโคแอกเซียลเรโซเนเตอร์ (tip-coaxial resonator) [11] – [16] แบบโคแอกเซียลปลายเปิด (open – end coaxial) [17] – [24] และไมโครสตริป (microstrip probe) [25] – [27]



รูปที่ 2.7 หัวส่งและรับสัญญาณรูปแบบต่าง ๆ [29] (ก) แบบช่องเปิด (ข) แบบเอสทีเอ็ม (scanning tunneling microscope) (ค) แบบหัวเข็มโคแอกเซียล (ง) แบบโคแอกเซียลปลายเปิด (จ) แบบสตริปไลน์ขนาน (ฉ) แบบแมกเนติกไดโพล (magnetic dipole)

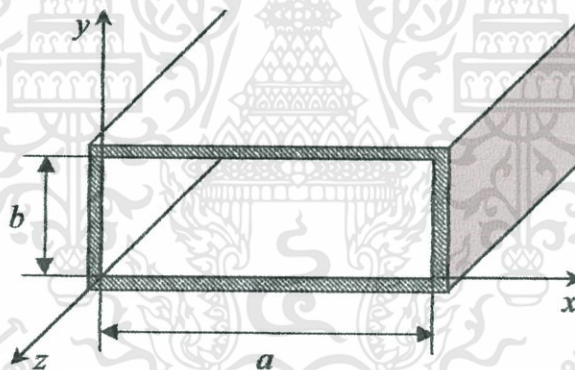
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 หัวส่งและรับสัญญาณ (Sensing probe)

หัวส่งและรับสัญญาณที่ใช้กับระบบกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้แบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบไม่เรโซแนนซ์ (non resonant type) และแบบเรโซแนนซ์ (resonant type) โดยทั่วไปนั้นหัวส่งและรับสัญญาณมีการพัฒนาใช้งานทั้งในรูปแบบของสายนำสัญญาณ (transmission lines) และท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular waveguide) [5] – [9] ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้งานท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า และส่วนที่สำคัญของหัวส่งและรับสัญญาณที่พัฒนาขึ้น ก็คือ ช่องเปิด (aperture) หรือสลิต (slit) หรือสลิต (slot) และเพื่อเป็นการสร้างความเข้าใจในหลักการทำงานของหัวส่งและรับสัญญาณจะต้องศึกษาลักษณะ โครงสร้างของท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และช่องเปิดที่ทำหน้าที่เป็นหัวส่งและรับสัญญาณ

#### 2.1.1.1 ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular waveguide)

ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นระบบนำสัญญาณที่ใช้ในย่านความถี่สูงรูปแบบหนึ่งที่มีคุณสมบัติในด้านที่มีการสูญเสียต่ำและทนกำลังคลื่นสูง ลักษณะของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นดังรูปที่ 2.8 [29]



รูปที่ 2.8 ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ในการพิจารณาการส่งผ่านคลื่นไปตามท่อนำคลื่นนั้นจะมีเงื่อนไขขอบเขตที่เกิดจากโครงสร้างของท่อนำคลื่น ซึ่งผนังเป็นตัวนำไฟฟ้าทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีรูปแบบเฉพาะที่เรียกว่าโหมด (mode) ดังนั้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปในทิศทางแกน  $z$  ที่มีจุด  $xy$  ใด ๆ ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ พบว่าความถี่คutoff (cutoff frequency,  $f_c$ ) ที่ โหมด  $TE_{m,n}$  ใด ๆ จะมีค่าเป็น

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่  $m, n$  เป็นเลขแสดคงโหมค  
 $a, b$  เป็นขนาดของท่อนำคลื่นที่  $a > b$

จากสมการ (2.4) เมื่อพิจารณาในกรณีทีคลื่นเคลื่อนที่ในอากาศ ซึ่ง  $\mu = \mu_0, \epsilon = \epsilon_0$  และ  $1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0} = c$  จะได้

$$f_c = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (2.5)$$

และความยาวคลื่นจะมีค่าเป็น

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (2.6)$$

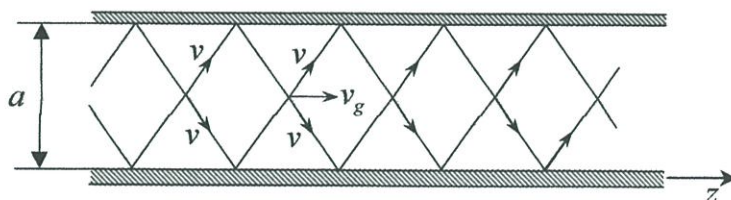
พิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นในท่อนำคลื่นในรูปแบบคลื่นระนาบที่มีการสะท้อนกับผนังท่อนำคลื่นดังรูปที่ 2.9 พบว่าองค์ประกอบคลื่นในแนวแกน  $z$  จะต่างไปจากคลื่นระนาบ ซึ่งความยาวคลื่นในแนวแกน  $z$  ซึ่งเรียกว่า guide wavelength คือ

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นใน free space

$f_c$  คือ ความถี่คัทออฟ

และ  $f$  คือ ความถี่ใช้งาน



รูปที่ 2.9 การเคลื่อนที่ของคลื่นท่อนำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วเฟส (phase velocity) ของคลื่นที่เคลื่อนที่ในแนวแกน  $z$  สามารถหาได้จาก

$$v_g = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (2.8)$$

ที่  $\mu$ ,  $\varepsilon$  คือ สภาพยอม (permittivity) และความซึมซาบได้ (permeability) ของสารไดอิเล็กตริกในท่อนำคลื่น พบว่า ความเร็วเฟสจะมีค่ามากกว่าความเร็วของแสงในอากาศ และความเร็วกลุ่ม (group velocity) มีค่าเป็น

$$v_{group} = \frac{c^2}{v_g} \quad (2.9)$$

ค่าความเร็วกลุ่มที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่า  $c$  โดยค่าคงที่ในการเคลื่อนที่ (propagation constant,  $\beta_g$ ) สามารถหาได้จาก

$$\beta_g = \omega \sqrt{\mu\varepsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} \quad (2.10)$$

ค่าตาแรกเตอร์สตติกอิมพีแดนซ์ของคลื่น (Characteristic wave impedance,  $Z$ ) ที่เคลื่อนไปในแนวแกน  $z$  คือ

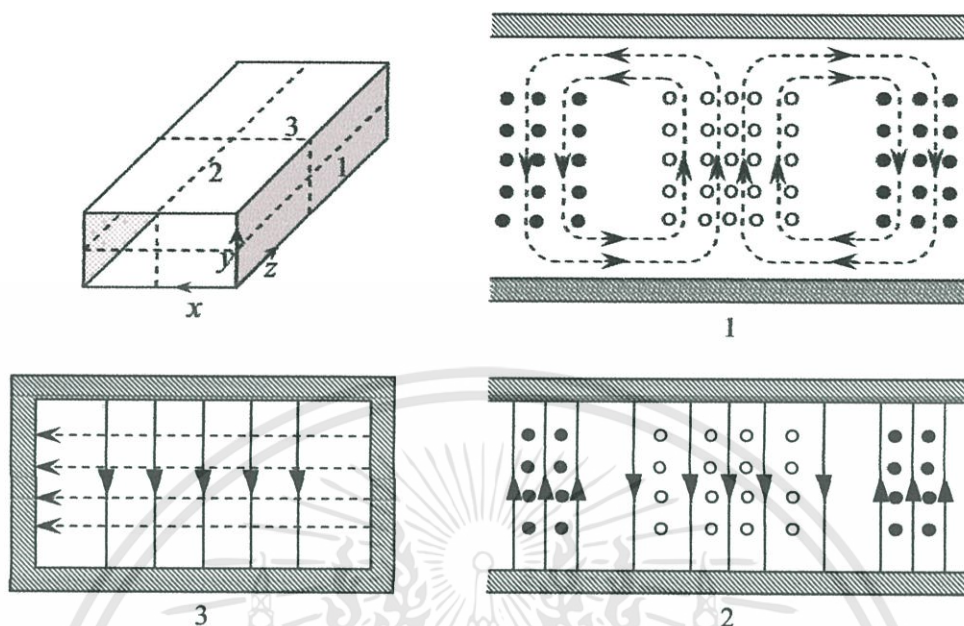
$$Z_{TE} = \frac{\sqrt{\mu/\varepsilon}}{\sqrt{1 - (f_c/f)^2}} \quad (2.11)$$

ในกรณีที่ตัวกลางในท่อนำคลื่นเป็นอากาศ พบว่า  $\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} \cong 377 \Omega$

การกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นเมื่อพิจารณาใน  $TE_{10}$  เป็นดังรูปที่ 2.10 ซึ่งพบว่า องค์ประกอบเวกเตอร์สนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  ในทิศ  $y$  จะมีค่าสูงสุด ณ ระนาบตรงกลาง ( $x = a/2$ ) ที่

$$E_y = |E_y| \sin \frac{\pi x}{a} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นในโหมด  $TE_{10}$

สนามแม่เหล็กมีองค์ประกอบทั้งในทิศ  $x$  และ  $z$  โดยที่สนามแม่เหล็กในทิศ  $x$  เป็น

$$H_x = \frac{E_y}{Z_g} = \frac{|E_y|}{Z_{TE}} \sin \frac{\pi x}{a} \quad (2.13)$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาในโหมด  $TE_{10}$  สามารถเขียนสมการ (2.5) และ (2.6) ได้เป็น

$$f_c = \frac{c}{2a} \quad (2.14)$$

และ

$$\lambda_c = 2a \quad (2.15)$$

### 2.1.1.2 ช่องเปิดของหัวส่งและรับสัญญาณ

ช่องเปิด หรือสล็อตเกิดจากการนำแผ่นโลหะบางที่มีช่องเปิดมาปิดที่ส่วนปลายของท่อนำคลื่น โดยให้ด้านยาวของสล็อตขนานกับด้านกว้าง (wide) ของท่อนำคลื่นดังรูปที่ 2.11 เมื่อพิจารณาในโหมด TE ที่ช่องสล็อตโปร่ง ทำให้เกิดความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นเป็น [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{a}{b} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} = \frac{a'}{b'} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a'}\right)^2} \quad (2.16)$$

ที่  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่นในอากาศ (Free space wavelength)

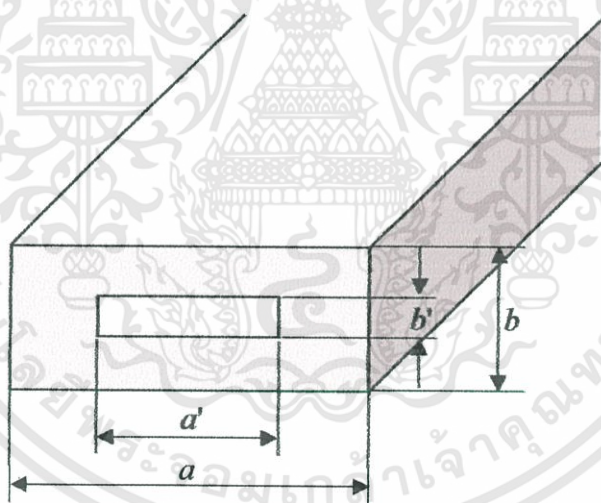
$a, b$  เป็นขนาดของท่อนำคลื่น

และ  $a', b'$  เป็นขนาดของช่องเปิด

ถ้าค่า  $b'$  เข้าใกล้ ศูนย์ แล้ว  $\lambda$  จะเข้าใกล้  $2a'$  โดยการสะท้อนที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายสมบัติอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่น (Waveguide impedance) เป็นดังนี้

$$Z = \frac{Z_0 \pi b'}{2a' \sqrt{1 - [\lambda/(2a')]^2}} \quad (2.17)$$

ที่  $Z_0$  เป็นค่าอิมพีแดนซ์ในอากาศ (Free space impedance:  $Z_0 = 377\Omega$ )



รูปที่ 2.11 ช่องสล็อตบนแผ่นโลหะบางที่ปิดท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

เมื่อนำเอาผิวแผ่นตัวนำมาวางบริเวณด้านหน้าใกล้ ๆ ช่องเปิด การสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟจะเกิดขึ้นบริเวณใต้ช่องเปิดนั้น การสะท้อนของผิวตัวนำนี้สัมพันธ์กับค่าความต้านทานของตัวนำ สามารถสร้างภาพไมโครเวฟของสภาพความต้านทานของวัสดุได้จากการวัดขนาด (amplitude) และเฟส (phase) ของสัญญาณสะท้อนนั้น โดยภาพไมโครเวฟที่ได้ก็ขึ้นกับความหนาของแผ่นวัสดุ ถ้าแผ่นตัวนำหนากว่าสกินเดปท์ (skin depth) จะถูกกำหนดด้วยสภาพความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของผิว (surface impedance) และแผ่นตัวนำบางมากจะถูกกำหนดด้วยสภาพความต้านทานแผ่น (sheet resistivity)

ในการวัดถึาระยะห่างระหว่างหัวส่งและรับสัญญาณกับผิววัสดุน้อยกว่าความกว้างสลิต ( $b'$ ) โดยที่ความละเอียด (resolution) ในแนวตั้งฉากกับสลิตจะขึ้นกับความกว้างสลิตนั้น ซึ่งอาจทำให้มีค่าน้อยกว่า  $\lambda/100$  ส่วนความละเอียดในแนวขนานกับสลิตนั้นก็ขึ้นกับความยาวของสลิต ( $a'$ ) ซึ่งในกรณีที่สลิตอยู่บนระนาบที่แบนจะมีค่าประมาณ  $\lambda/2$  อย่างไรก็ตามได้มีการพัฒนา รูปแบบของสลิตในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ให้สลิตอยู่บนผิวโค้ง [10] ทำให้ได้ความละเอียดอยู่ที่  $\lambda/60$  เทคนิคนี้เหล่านี้พัฒนาโดยอาศัยพื้นฐานว่า เมื่อระยะทางจากสลิตถึงผิววัตถุเพิ่มขึ้น สนามจะลดลง

ในการคำนวณออกแบบหัวส่งและรับสัญญาณ เพื่อเป็นการช่วยวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ถึงปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ของการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีลักษณะที่ซับซ้อน จึงใช้ โปรแกรม SEMCAD ในการคำนวณและเขียนแบบ 3 มิติ ซึ่ง โปรแกรมนี้ใช้เทคนิค FDTD (Finite – Difference Time - Domain) เทคนิคนี้อ้างอิงสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation) ในการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

### 2.1.1.3 การจำลองการทำงานหัวส่งและรับสัญญาณแบบช่องเปิด

การจำลองการทำงานจะเป็นการทำความเข้าใจในสมการแมกซ์เวลล์ที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Maxwell's Equation) ที่ใช้คณิตศาสตร์ในการคำนวณสมการแม่เหล็กไฟฟ้าของโปรแกรม SEMCAD และข้อจำกัดความแตกต่างโดยการประมาณตำแหน่งและเวลา โดยเริ่มจากส่วนที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งและเวลาดังนั้น ในการจำลองแบบต้องอาศัยทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า ภายใต้แบบจำลองที่มีความโค้งมีมุมและความหนาของไดอิเล็กทริก ในการคำนวณยังต้องมีการกำหนดค่าต่าง ๆ ที่จำเป็น ซึ่งฟังก์ชันเหล่านี้จะมีอยู่ใน โปรแกรม SEMCAD [30] และผลการจำลองจะแสดงค่าออกมาให้ตรวจสอบ

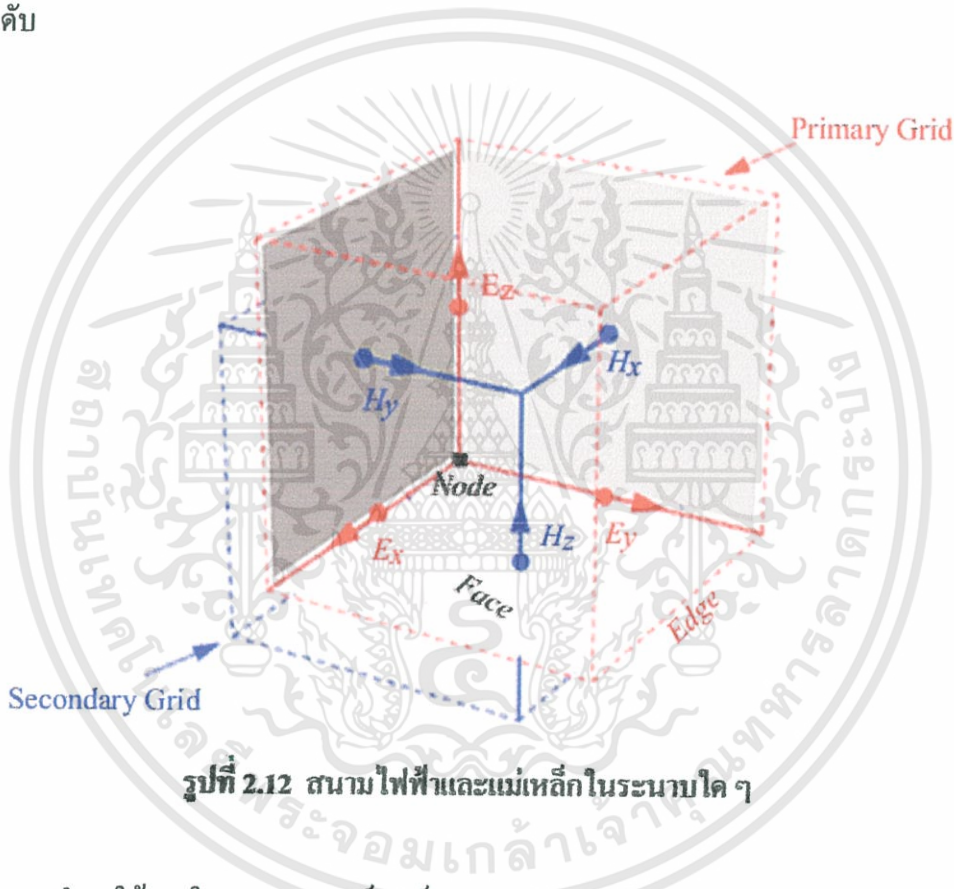
การใช้งานโปรแกรม SEMCAD จะอาศัยทฤษฎี FDTD (Finite-Difference Time-Domain Method) ซึ่งหลักการจะใช้สมการแมกซ์เวลล์แบบไม่ต่อเนื่อง โดยจำลองสมการแมกซ์เวลล์รูปเคิร์ท ของสนามที่เปลี่ยนกับเวลาแบบเป็นช่วงระยะทางและเวลาเป็นห้วงสั้น ๆ ซึ่งองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กจะอยู่ในบริเวณจุดโหนด(mode) ที่สร้างเมช (mesh) ในระบบคาร์ทีเซียนดังรูปที่ 2.12 องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กจะถูกปรับปรุงโดยจำกัดค่าแตกต่างของเคิร์ท รอบ ๆ สามารถคำนวณหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละตำแหน่งในแต่ละค่าเวลาได้หากรู้สนามเริ่มต้น (initial field) ขอบเขตปิด (boundary) และเงื่อนไขของแหล่งกำเนิด พิจารณาการแทนเทอมอนุพันธ์ (derivative) ด้วยค่าผลต่างจำกัดช่วงของการเปลี่ยนตัวแปร  $x$  และ  $t$  [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial F(i, j, k, n)}{\partial x} = \frac{F^n(i+1/2, j, k) - F^n(i-1/2, j, k)}{\Delta x} + O[(\Delta x)^2] \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial F(i, j, k, n)}{\partial t} = \frac{F^{n+1/2}(i, j, k) - F^{n-1/2}(i, j, k)}{\Delta t} + O[(\Delta t)^2] \quad (2.19)$$

โดยในที่นี้  $F^n$  อาจเป็นค่าสนามไฟฟ้า ( $E$ ) หรือสนามแม่เหล็ก ( $H$ ) ที่เวลา  $n \cdot \Delta t$ . และตำแหน่ง  $i$ ,  $j$  และ  $k$  และ  $O[(\Delta x)^2]$  และ  $O[(\Delta t)^2]$  เป็นส่วนคลาดเคลื่อนในออคเตอร์ของผลต่างยกกำลังสองตามลำดับ



การนำมาใช้งานในสมการแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial}{\partial t} \epsilon \vec{E} + \sigma_E \vec{E} \quad (2.20)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mu \vec{H} - \sigma_H \vec{H} \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.21) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{E_x|_{i,j,k}^{n+1} - E_x|_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{1}{\varepsilon_{i,j,k}} \left( \frac{H_z|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z|_{i,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} - \frac{H_y|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} - \sigma_{i,j,k} E_x|_{i,j,k}^{n+1/2} \right) \quad (2.22)$$

โดยที่

$$E_x|_{i,j,k}^{n+1/2} = \frac{E_x|_{i,j,k}^{n+1} - E_x|_{i,j,k}^n}{2} \quad (2.23)$$

จากสมการ (2.23) สามารถลดตัวแปรที่ไม่ทราบค่า  $E_x^{n+1}$  ทำให้ได้

$$E_x|_{i,j,k}^{n+1} = \left( \frac{1 - \frac{\Delta t \sigma_{i,j,k}}{2\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\Delta t \sigma_{i,j,k}}{2\varepsilon_{i,j,k}}} \right) E_x|_{i,j,k}^n + \left( \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j,k}}}{1 + \frac{\Delta t \sigma_{i,j,k}}{\varepsilon_{i,j,k}}} \right) \left( \frac{H_z|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z|_{i,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} - \frac{H_y|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \right) \quad (2.24)$$

ต่อมาสมการแมกซ์เวลล์อื่น ๆ ก็ทำได้แบบเดียวกันทั้งหมด หากอธิบายความแตกต่างการจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไปตามเมชอื่น ๆ และถ้าเมชมีช่วงไม่แน่นอนซึ่งมีใช้ในโปรแกรม SEMCAD ความผิดพลาดจากกรณีนี้จะเกิดขึ้นในอันดับที่หนึ่ง เพราะว่สมการที่ (2.20) และ (2.21) นั้นไม่ได้ถูกกำหนดเป็นค่าสมการความแตกต่าง อย่างไรก็ตาม SEMCAD มีส่วนที่แก้ไขค่าการผิดพลาดของ FDTD ในการที่โหนดไม่ต่อเนื่อง

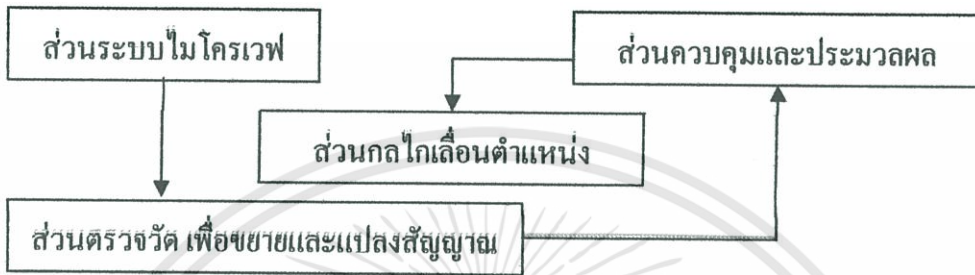
ค่าตัวเลขช่วงเวลาที่เหมาะสมกับการคำนวณจะกำหนดค่าความต่างที่เหมาะสมกับการจำลองแบบของช่วงเวลา ที่ใช้ในการปรับปรุงจะต้องถูกกำหนดให้ใช้กับสูตรของ FDTD ตามสมการแมกซ์เวลล์ในแต่ละจุดได้ว่า

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (2.25)$$

โดยที่  $\Delta x, \Delta y$  และ  $\Delta z$  จะเป็นช่วงระยะระหว่างโหนดตามพิกัดคาร์ทีเซียนและ  $c$  คือ ความเร็วของแสงในตัวกลาง ช่วงเหล่านี้รวมถึงช่วงเวลาที่ใช้คำนวณ ต้องให้ให้เล็กที่สุดก็จะมีคามแม่นยำสูง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 105135 อิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 หลักการพัฒนากล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้

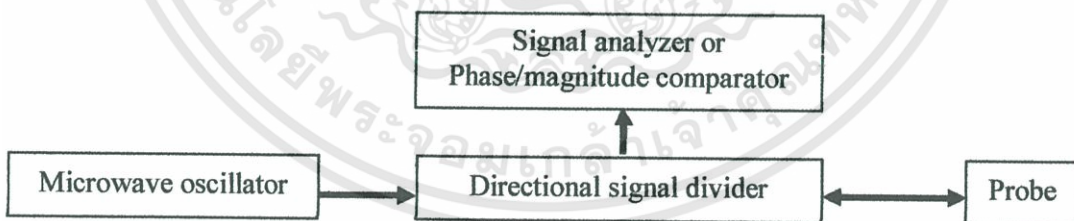
ในการพัฒนากล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนระบบไมโครเวฟ ส่วนตรวจวัด เพื่อขยายและแปลงสัญญาณ ส่วนกลไกเลื่อนตำแหน่ง และส่วนควบคุมและประมวลผล ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 โครงสร้างหลักของกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้

### 2.2.1 ส่วนระบบไมโครเวฟ

ระบบไมโครเวฟทั่วไปจะมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 2.14 โดยคลื่นไมโครเวฟจากแหล่งกำเนิดคลื่น จะถูกส่งไปส่วนที่ทำหน้าที่แบ่งสัญญาณ (directional signal divider) เพื่อส่งคลื่นไมโครเวฟไปยังตัวส่งและรับสัญญาณ (probe) และสัญญาณไมโครเวฟที่ส่งออกไปจะเกิดอันตรกิริยากับวัตถุ มีสัญญาณสะท้อนกลับไปที่ตัวส่งและรับสัญญาณแล้วส่งสัญญาณต่อไปยังส่วนที่ทำหน้าที่จัดการสัญญาณต่อไป [32]



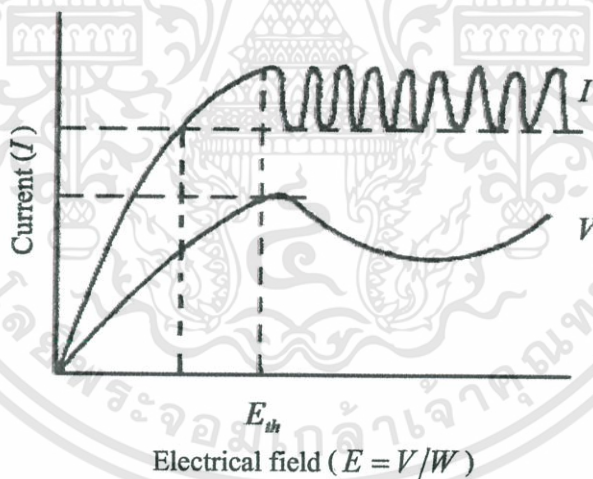
รูปที่ 2.14 ระบบการวัดสัญญาณไมโครเวฟสนามระยะใกล้โดยทั่วไป

เพื่อให้เข้าใจในระบบไมโครเวฟมากยิ่งขึ้นจะต้องทำความเข้าใจหลักการทำงานของอุปกรณ์ที่จำเป็นต่าง ๆ ที่จะทำให้สามารถปรับปรุงและแก้ไขปัญญาที่เกิดขึ้นได้

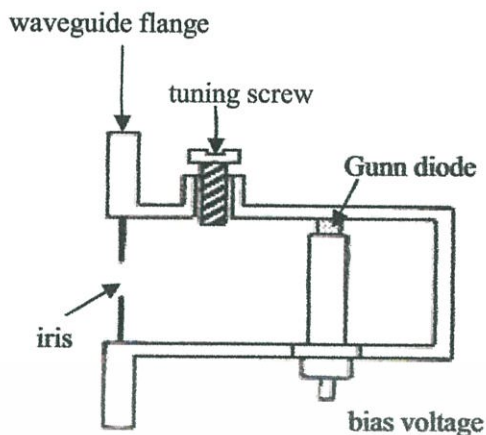
### 2.2.1.1 แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอด (Gunn diode Oscillator)

แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอด [33] เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ไมโครเวฟที่ใช้คุณสมบัติของปรากฏการณ์แบบกัมมันต์ (Gunn effect) ของผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium-Arsenide) ชนิด N โดยเมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมผลึกค่าน้อย ๆ ที่ถึงที่กระแจะไหลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับผลึก แต่เมื่อถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงในระดับหนึ่งเรียกว่า ค่าแรงดันขีดจำกัด  $V_{th}$  (threshold voltage) จะเกิดเสถียรภาพทางไฟฟ้าในผลึก กระแจะไหลเปลี่ยนค่าตลอดเวลาในลักษณะของพัลส์ (pulse) เป็นคาบด้วยค่าความถี่ผกผันกับระยะ  $W$  ระหว่างขั้วไฟฟ้า จะได้ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้ากับกระแจะดังรูปที่ 2.15

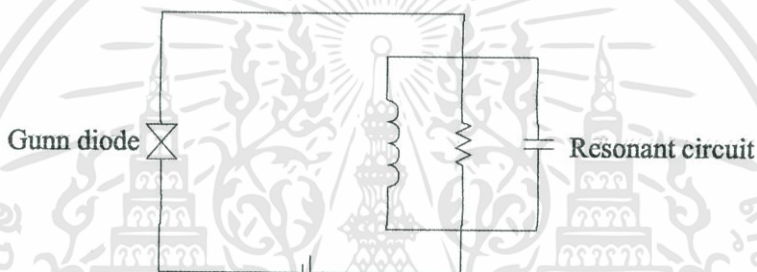
แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอดมีส่วนประกอบเป็นดังรูปที่ 2.16 โดยมีการติดตั้งกัมมันต์ไดโอดไว้ในโพรง (cavity) กล่องโลหะกึ่งปิด ที่เป็นส่วนหนึ่งของท่อนำคลื่นความถี่สูง โครงสร้างนี้จะกระทำตัวเสมือนวงจรกำทอนทางไฟฟ้า (resonance circuit) ตามวงจรสมนัยในรูปที่ 2.17 กำหนดเลือกให้กระแจะของกัมมันต์ไดโอดเป็นแบบฟังก์ชันไซน์ (sine) ความถี่เดียว ซึ่งความถี่นั้นกำหนดด้วยขนาดปริมาตรเมื่อปรับสกรู (tuning screw) ทำให้ได้คลื่นไมโครเวฟแผ่ออกมาจากช่องเปิด (iris) แบบคลื่นไซน์ที่ความถี่เดียวกันนี้ [29]



รูปที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับกระแจะในปรากฏการณ์ของกัมมันต์



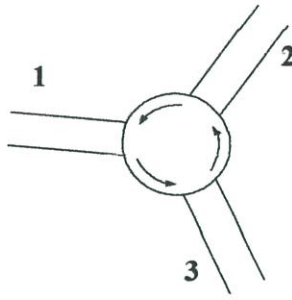
รูปที่ 2.16 กันนีไดโอดในโพรง



รูปที่ 2.17 วงจรสมนัยของกันนีไดโอดออสซิลเลเตอร์

### 2.2.1.2 เซอร์คิวเลเตอร์ (Circulator)

เซอร์คิวเลเตอร์ เป็นอุปกรณ์แบบ 3 พอร์ตหรือ 4 พอร์ต ที่ทำหน้าที่ส่งผ่านสัญญาณไปในทิศทางเดียว ดังรูปที่ 2.18 ซึ่งลักษณะการทำงานของเซอร์คิวเลเตอร์เป็นดังนี้ คือ คลื่นที่เข้ามาทางพอร์ตที่ 1 จะส่งผ่านออกไปทางพอร์ตที่ 2 โดยมีการสูญเสียน้อย และจะส่งออกไปทางพอร์ตที่ 3 โดยมีการสูญเสียมาก ซึ่งก็คือ คลื่นที่เข้ามาทางพอร์ตที่ 1 จะถูกส่งออกไปทางพอร์ตที่ 2 เกือบทั้งหมด ในขณะที่คลื่นที่เข้ามาทางพอร์ตที่ 2 จะถูกส่งออกไปทางพอร์ตที่ 3 และคลื่นที่เข้ามาทางพอร์ตที่ 3 ก็จะถูกส่งออกไปทางพอร์ตที่ 1 เกือบทั้งหมดเช่นเดียวกันในเชิงอุดมคติ นั้น เซอร์คิวเลเตอร์จะมีการเวียนสัญญาณในทิศทางเดียวอย่างสมบูรณ์แบบ คือ ค่าการลดทอนสัญญาณในทิศทางส่งผ่านจะเป็น 0 และค่าไอโซเลชันระหว่างพอร์ตที่อยู่ทิศตรงกันข้ามจะเป็น  $\infty$  [29], [34]



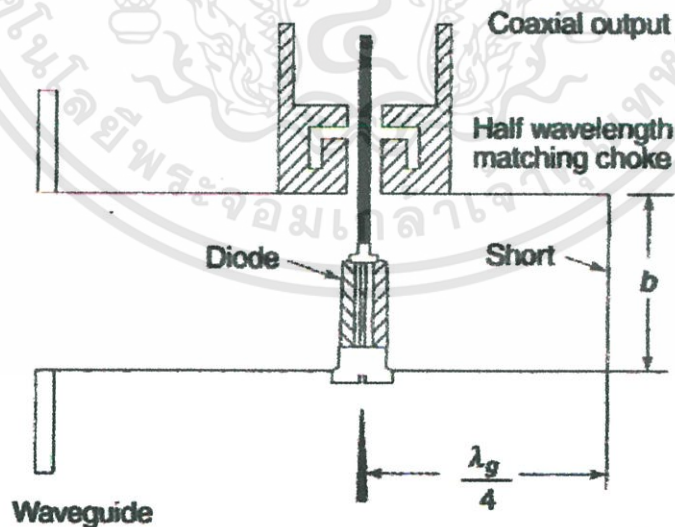
รูปที่ 2.18 สัญลักษณ์เซอร์คิวเลเตอร์แบบ 3 พอร์ต

## 2.2.2 ส่วนตรวจวัด เพื่อขยายและแปลงสัญญาณ

การจัดการสัญญาณ ไมโครเวฟนั้นจะทำการวัดสัญญาณ ขยายสัญญาณ และแปลงสัญญาณ เพื่อนำสัญญาณที่วัดจากระบบไปทำการประมวลผลต่อไป ทั้งนี้เพื่อความเข้าใจในส่วนจัดการสัญญาณจะต้องทำความเข้าใจกับอุปกรณ์ในส่วนนี้

### 2.2.2.1 ตัวตรวจวัดสัญญาณ (Detector)

การวัดขนาดสัญญาณในย่านความถี่ไมโครเวฟกำลังต่ำนั้น วิธีที่นิยมใช้ คือการแปลงสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นค่าแรงดันหรือกระแสตรง โดยใช้ตัวตรวจวัดสัญญาณ (detector) ซึ่งจะทำการแปลงสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นค่ากระแสตรง โครงสร้างของตัวตรวจวัดมีลักษณะดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของตัวตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตัวตรวจวัดสัญญาณนั้นจะมีช้อทกัไดโอดทำหน้าที่วัดสัญญาณ โดยถ้าสัญญาณมีกำลังต่ำ (น้อยกว่า 10 มิลลิวัตต์) เมื่อมีสัญญาณไมโครเวฟ ที่  $v = V \cos \omega t$  ตกคร่อมไดโอด กระแสของช้อทกัไดโอด จะเป็น

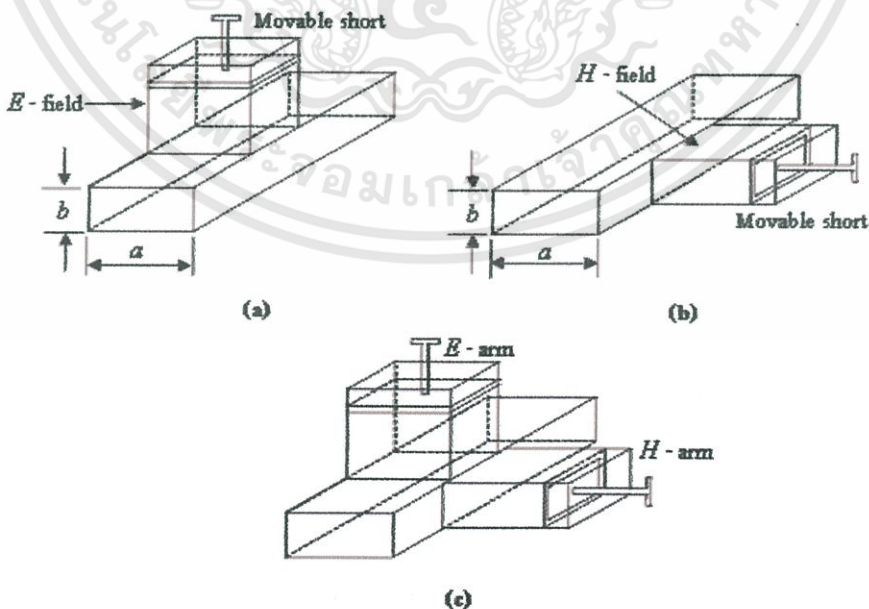
$$i = I_0 (e^{aV} - 1) \quad (2.26)$$

ที่  $I_0$  คือ กระแสอิ่มตัว และ  $a = 1/nV_T$  เมื่อ  $n$  เป็นค่าคงที่ ซึ่งในกรณีช้อทกัไดโอดมีค่าเท่ากับ 1.1 และ  $V_T$  คือเทอร์มอลโวลต์เตจ (thermal voltage) ที่เท่ากับ 26 มิลลิโวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง

จากสมบัติของช้อทกัไดโอดตามสมการ(2.26) ซึ่งมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ช้อทกัไดโอดมีสมบัติเป็นวาริสเตอร์ (varistor) และสามารถนำไปใช้เป็นตัวตรวจวัดได้

### 2.2.2.2 ตัวปรับอิมพีแดนซ์แบบสตับจูนเนอร์ (Variable stub tuner)

การปรับอิมพีแดนซ์ (Impedance matching) มีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้มีการส่งกำลังสูงสุดจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลด โดยไม่ต้องทำให้เสียกำลังจึงใช้ชิ้นส่วนรีแอกแตนซ์ (Reactance) เป็นหลัก ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ชิ้นส่วนรีแอกแตนซ์แบบวงจรกระจายที่เรียกว่า สตับ (stub) เราสามารถปรับค่ารีแอกแตนซ์เป็นค่าต่าง ๆ ได้โดยการปรับความยาวของสตับ ซึ่งท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมจะมีการต่อสตับได้ทั้งในระนาบ  $E$  และ  $H$  หรือทั้งสองระนาบ ด้วยการต่อช้อทเซอร์กิตพลันเจอร์ (short circuit plunger) ในแนวด้านกว้างหรือด้านแคบของท่อนำคลื่น [36] ดังรูปที่ 2.20

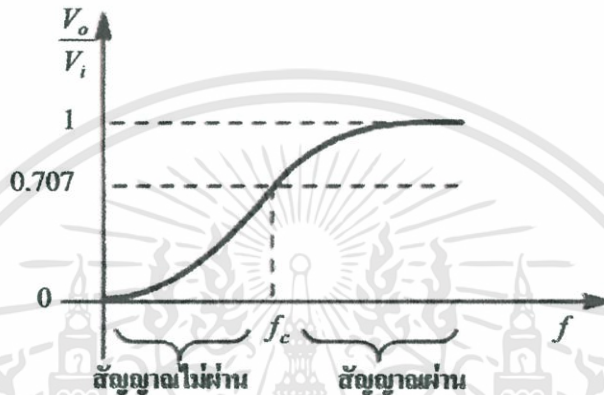


รูปที่ 2.20 สตับจูนเนอร์ของท่อนำคลื่น (a) E-stub (b) H-stub (c) E-H tuner

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2.3 วงจรกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน

ระบบไมโครเวฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สัญญาณที่วัดได้จะมีขนาดเล็ก มีสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการลดทอนสัญญาณรบกวนนี้ ดังนั้นวงจรกรองสัญญาณความถี่สูงผ่านจึงเป็นส่วนหนึ่งที่น่ามาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยทั่วไปวงจรกรองความถี่สูงผ่านเป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณที่ความถี่สูงผ่าน แต่จะลดทอนสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่คัทออฟ (Cutoff frequency:  $f_c$ ) ดังรูปที่ 2.21

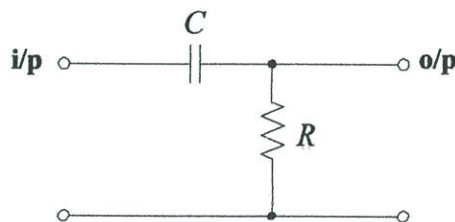


รูปที่ 2.21 สมบัติวงจรกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน

ทั้งนี้วงจรกรองสัญญาณความถี่สูงผ่านแบบง่าย สามารถออกแบบโดยใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ที่เรียกว่า วงจรอาร์ซี (RC circuit) ที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.22 ซึ่งมีความสัมพันธ์ของความถี่คัทออฟเป็น

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $f_c$  คือ ค่าความถี่คัทออฟในหน่วยเฮิรตซ์  $R$  คือ ค่าความต้านทานในหน่วยโอห์ม (ohm) และ  $C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในหน่วยฟารัด (farad)



รูปที่ 2.22 วงจรอาร์ซีกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 ส่วนกลไกเลื่อนตำแหน่ง

ส่วนของกลไกที่ใช้ในการเคลื่อนที่มีด้วยกัน 2 ส่วน คือ การเคลื่อนตามแนวแกน  $x$  และ แกน  $y$  ส่วนหลักของกลไกการเคลื่อนที่ก็คือ แท่นเลื่อนในแนวแกน  $xy$  และสเตปมอเตอร์ (step motor) ที่ควบคุมการทำงานด้วยชุดขับเคลื่อน (motor driver) ที่เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยแท่นเลื่อนนี้จะเป็นส่วนที่ใช้วางวัตถุที่ทำการเสกนในลักษณะการเลื่อนระบุตำแหน่ง

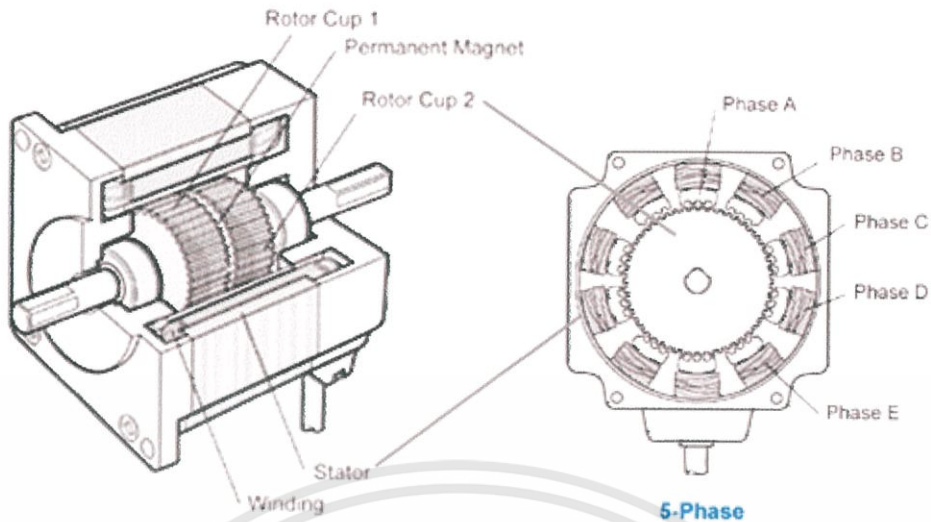
ดังนั้นเพื่อความเข้าใจในการทำงานในส่วนนี้ จึงต้องทำความเข้าใจกับสเตปมอเตอร์ซึ่งเป็นของส่วนสำคัญของกลไกเลื่อนตำแหน่งนี้

#### 2.2.3.1 สเตปมอเตอร์แบบ 5 เฟส

สเตปมอเตอร์เป็นมอเตอร์ที่มีลักษณะการทำงาน คือ เกิดการหมุนเพียงเล็กน้อยตามเส้นรอบวงและหยุดเมื่อจ่ายแรงดัน ไฟฟ้า ซึ่งต่างจากมอเตอร์ทั่วไปที่จะหมุนทันทีและตลอดเวลาเมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า ข้อดีของสเตปมอเตอร์ คือ สามารถกำหนดตำแหน่งการหมุน หรือองศาได้อย่างละเอียด โดยใช้คอมพิวเตอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวกำหนด

##### โครงสร้างและหลักการทำงานของสเตปมอเตอร์แบบ 5 เฟส

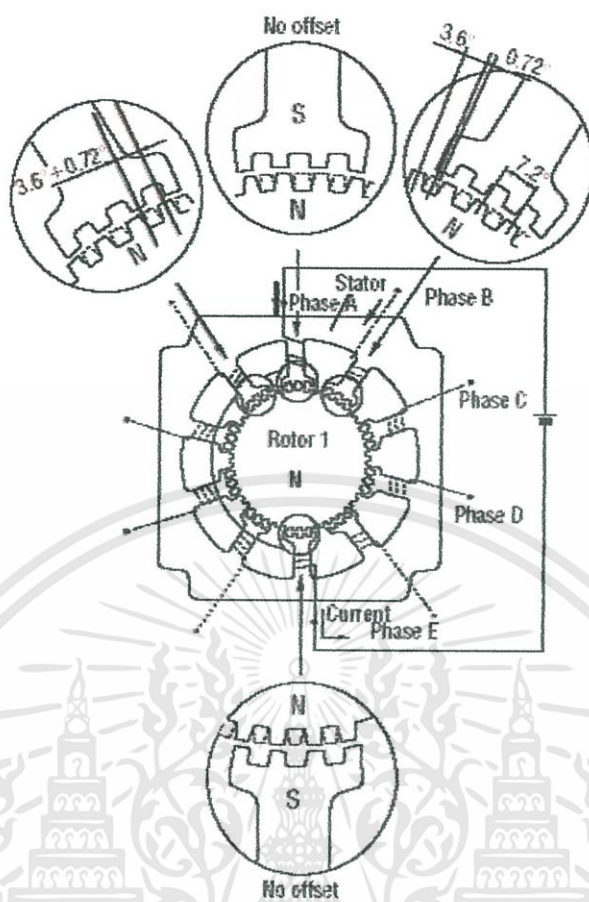
สเตปมอเตอร์มีโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.23 ประกอบด้วย คือ โรเตอร์ (rotor) เป็นส่วนแกนที่หมุนที่เคลื่อนที่ได้ ทำจากแม่เหล็กถาวรที่มีลักษณะวงกลมที่ผิวด้านข้างเป็นแฉกหรือซี่มี 2 ตัว โดยมีฟันสับหว่างกัน ทั้งนี้โรเตอร์ถูกล้อมรอบด้วยสเตเตอร์ (stator) ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ และมีขดลวดพันล้อมอยู่บนแกน เมื่อจ่ายไฟเข้าที่ขดลวดที่พันอยู่บนสเตเตอร์ เฟส A ก็จะทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กขึ้นที่ตำแหน่งเฟส A ผลักให้ โรเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่นี้เรียกว่า สเตป ค่าความละเอียดของมุมในแต่ละสเตป ขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะตัวของสเตปมอเตอร์นั้น ต่อมาหยุดจ่ายไฟเข้าที่เฟส A แล้วจ่ายไฟเข้าที่เฟส B แทนก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่บริเวณเฟส B เป็นผลให้ให้สนามแม่เหล็กนี้ผลักโรเตอร์ให้เคลื่อนที่ต่อไปได้ ต่อมาหยุดจ่ายกระแสเข้าเฟส B แล้วจ่ายเข้าที่เฟส C แทนก็จะทำให้สนามแม่เหล็กมาเกิดที่เฟส C ซึ่งผลักให้โรเตอร์เคลื่อนที่ต่อไปได้อีกจะเห็นว่า สเตปมอเตอร์นั้นสามารถที่จะเคลื่อนที่ได้จากหลักการของการจ่ายไฟเข้าที่ขดลวดบนสเตเตอร์ โดยที่จ่ายไฟให้เกิดแบบลำดับเฟสกันไป



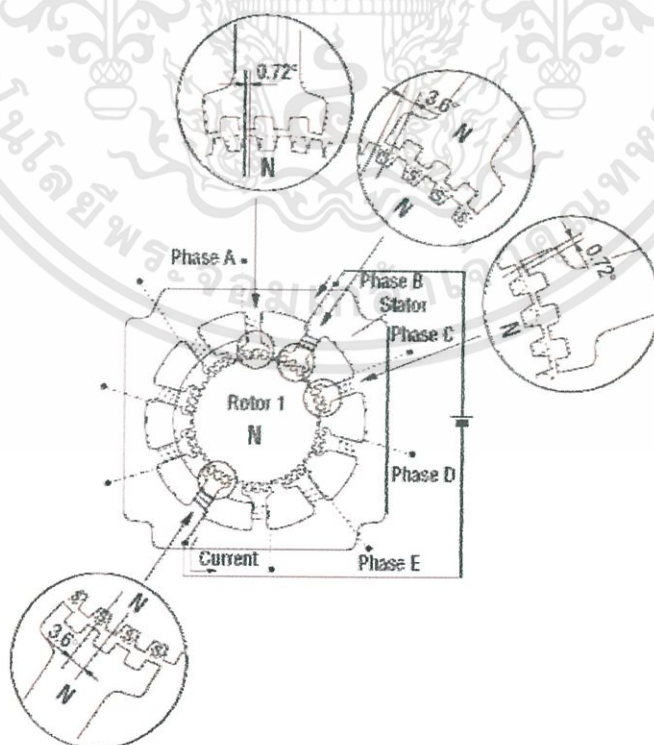
รูปที่ 2.23 โครงสร้างของสเตปมอเตอร์

พิจารณาการทำงานของสเตปมอเตอร์แบบ 5 เฟส ดังรูปที่ 2.24 เมื่อจ่ายกระแสไหลผ่านตั้งแต่ A ถึง E คือ มี 5 เฟส มอเตอร์แบบนี้จะเรียกว่า “สเตปมอเตอร์แบบ 5 เฟส” มีฟัน 50 ซี่ บนเส้นรอบรูปด้านนอกของแต่ละโรเตอร์ เฟืองของโรเตอร์ 1 และ โรเตอร์ 2 จะเป็นการชดเชยทางกลจากแต่ละอัน โดยครึ่งหนึ่งของระดับเฟือง เมื่อเฟส A ถูกกระตุ้น ขั้วจะถูกโพลาริซ์เป็นขั้วได้ดึงดูดเฟืองของ โรเตอร์ 1 ซึ่งถูกทำให้เป็นขั้วเหนือ ทำให้เกิดการผลักกับเฟือง โรเตอร์ 2 ซึ่งถูกทำให้เป็นขั้วได้ เนื่องจากแรงบนหน่วยที่สมดุลทั้งหมดทำให้โรเตอร์คงที่ ในเวลานี้เฟืองของขั้วเฟส B ที่ยังไม่ถูกกระตุ้นแต่จะวางตัวผิดเนื่องมาจากการเป็นขั้วได้ของเฟือง โรเตอร์ 2 ดังนั้นจึงมีค่าออฟเซต  $0.72^\circ$

เมื่อมีการกระตุ้นจากเฟส A ไป B ขั้วของเฟส B จะถูกโพลาริซ์เป็นขั้วเหนือ (พันขดลวดกลับด้านกับเฟส A) ดึงดูดกับขั้วแม่เหล็กใต้กับโรเตอร์ 2 และเกิดการผลักกันกับขั้วเหนือของ โรเตอร์ 1 เมื่อกระตุ้นเปลี่ยนเฟสจาก A ไป B โรเตอร์จะหมุนไป  $0.72^\circ$  เหมือนการเลื่อนจากเฟส A ไปเฟส B, C, D และ E ดังนั้นการหมุนกับเฟส A ไปเฟส E, D, C, B และกลับมาเฟส A จะหมุนไปด้วยความละเอียด  $0.72^\circ$  ใน 1 สเตป การได้ค่าออฟเซตระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ ที่มีความละเอียดและแม่นยำสูงนี้ทำให้ไม่ต้องมีการเข้ารหัสหรือใช้เซนเซอร์อื่น ๆ เลย เพื่อการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งทำให้ส่วนกลไกของการเดินตำแหน่งทำงานได้แม่นยำและง่ายต่อการควบคุม



รูปที่ 2.24 การกระตุ้นของเฟส A

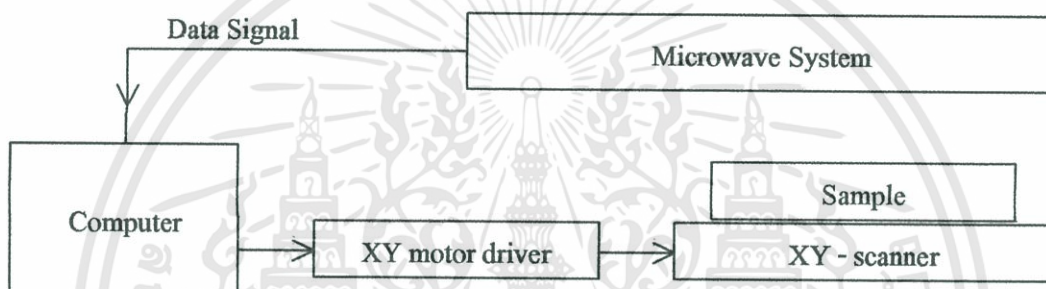


รูปที่ 2.25 การกระตุ้นของเฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.4 ส่วนควบคุมและประมวลผล

ส่วนควบคุมและประมวลผลเป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้ได้มาซึ่งข้อมูลในการสร้างภาพ ดังนั้นเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง และมีความรวดเร็วในการเก็บข้อมูลจึงมีความจำเป็นยิ่งที่จะต้องมีการออกแบบระบบในการเก็บข้อมูลให้ดี โดยระบบเก็บข้อมูลที่ทำกรออกแบบขึ้นมีลักษณะแผนภูมิการทำงานเป็นดังรูปที่ 2.26 ซึ่งมีคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมและประมวลผล โดยทำการควบคุมส่วนกลไกเลื่อนตำแหน่งผ่านทางซีเรียลพอร์ท 1 (serial port: com1) เชื่อมต่อกับ RS232 เข้ากับตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ (motor driver) เพื่อควบคุมการหมุนของมอเตอร์ และทำการเก็บข้อมูลด้วยการเชื่อมด้วย RS232 จากเครื่องออสซิลโลสโคป เข้าสู่ซีเรียลพอร์ท 2 (serial port: com2) ของเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการเก็บข้อมูล และประมวลผลต่อไป



รูปที่ 2.26 แผนภาพระบบควบคุมและเก็บข้อมูล

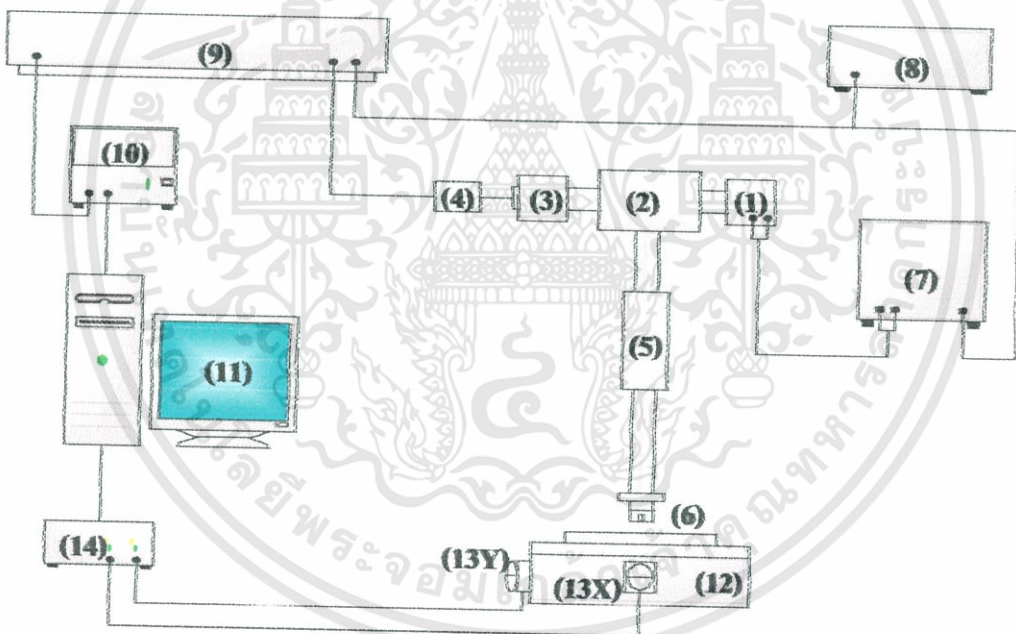
### บทที่ 3

## การพัฒนากล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ ระบบเลื่อนท่อนำคลื่นปลายเปิด

ในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบ สร้าง และพัฒนาระบบกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ระบบเลื่อนท่อนำคลื่นปลายเปิด ที่ได้ดำเนินการมา

### 3.1 การออกแบบระบบเบื้องต้น

ระบบกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ในเบื้องต้นที่ทำการออกแบบ มีลักษณะดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบโครงสร้างกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้

ประกอบด้วย (1) แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัณน์ไดโอด (Gunn diode oscillator) (2) เซอร์คิวเลเตอร์ (Circulator) (3) ตัวตรวจวัดสัญญาณ (Crystal mount detector) (4) วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High-pass filter) (5) ตัวปรับอิมพีแดนซ์แบบสตับจูนเนอร์ (Variable stub tuner) (6) หัวส่งและรับสัญญาณ (Sensing probe) (7) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Power supply) (8) เครื่องกำเนิดความถี่ (Frequency generator) (9) เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (Lock-in amplifier)

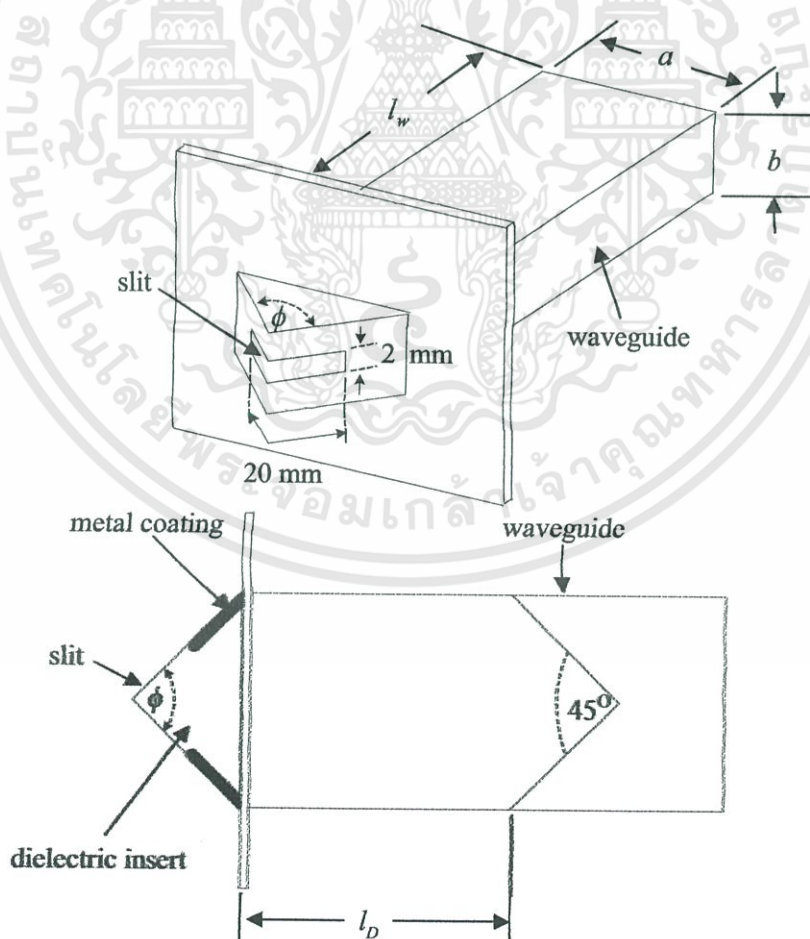
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (10) เครื่องออสซิลโลสโคป (11) เครื่องคอมพิวเตอร์ (12) แทนวางวัตถุแบบปรับเปลี่ยนได้ 2 แกน  
(13) สเตปมอเตอร์ (14) ตัวขับมอเตอร์

ในส่วนอุปกรณ์ที่ใช้งานและระบบเบื้องต้นที่ทำการออกแบบขึ้นในที่นี้ ได้แก่

### 3.1.1 หัวส่งและรับสัญญาณ

หัวส่งและรับสัญญาณที่ทำการออกแบบขึ้นในเบื้องต้นโดยอาศัยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีและหลักการตั้งที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2 ทำให้ได้หัวส่งและรับสัญญาณแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งบริเวณด้านปลายของท่อนำคลื่นจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม บริเวณผิวหน้าเคลือบด้วยโลหะ โดยเว้นช่องเปิดที่ทำหน้าที่เป็นสลิต ขนาดกว้าง 2 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร ที่มีสัมประสิทธิ์ในการส่งผ่านคลื่นออกจากช่องเปิดเท่ากัน เพื่อให้คลื่นที่รั่วออกไปทางด้านข้างเดินทางไกลกว่าคลื่นที่รั่วออกจากบริเวณตรงกลาง คลื่นเหล่านั้นจึงมีการลดทอนมากกว่า ก่อนที่จะไปสะท้อนยังระนาบวัตถุ มีผลให้พื้นที่ของบริเวณสะท้อนคลื่นบนระนาบวัตถุมีค่าน้อยกว่า  $2 \times 20$  ตารางมิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีช่องเปิดบนระนาบปลายท่อนำคลื่น



รูปที่ 3.2 โครงสร้างหัวส่งและรับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

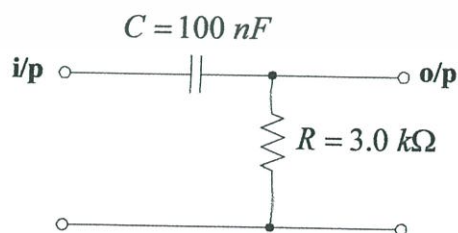
ในการออกแบบหัวส่งและรับสัญญาณ ใช้โปรแกรม SEMCAD เพื่อทำการจำลองการทำงานและปรับเปลี่ยนตัวแปร เพื่อให้ได้ผลที่ดีที่สุด เน้นการปรับมุมหัวส่งและรับสัญญาณ ( $\phi$ ) โดยในการออกแบบนี้ค่าตัวแปรที่เลือกใช้เป็นดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าที่ใช้ในการออกแบบหัวส่งและรับสัญญาณ

ตัวแปร	หัวส่งและรับสัญญาณ	
	แบบที่ 1	แบบที่ 2
ค่ามุมหัวส่งและรับสัญญาณ ( $\phi$ )	$90^\circ$	$60^\circ$
ความกว้างของแท่งไดอิเล็กตริก ( $w_D$ )	22.84 mm	22.84 mm
ความหนาของแท่งไดอิเล็กตริก ( $t_D$ )	10.14 mm	10.14 mm
ความยาวของแท่งไดอิเล็กตริก ( $l_D$ )	50 mm	50 mm
ชนิดของแท่งไดอิเล็กตริก	เทฟลอน	เทฟลอน
ค่าเพอร์มิตติวิตีของแท่งไดอิเล็กตริก	2.1	2.1
ความกว้างของท่อนำคลื่น ( $a$ )	25.40 mm	25.40 mm
ความสูงของท่อนำคลื่น ( $b$ )	12.70 mm	12.70 mm
ความยาวของท่อนำคลื่น ( $l_w$ )	100 mm	100 mm
ความหนาของผนังท่อนำคลื่น	1.25 mm	1.25 mm
ความหนาของผิวโลหะที่เคลือบ	0.03 mm	0.03 mm
ความถี่ที่ใช้งาน ( $f$ )	9.3 GHz	9.3 GHz

### 3.1.2 วงจรกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน

วงจรกรองสัญญาณความถี่สูงผ่านที่ออกแบบนั้น กำหนดให้มีความถี่คัทออฟที่ 500 เฮิรตซ์ ทำให้ได้วงจรที่มีลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรอาร์ซีกรองสัญญาณความถี่สูงผ่านที่ออกแบบ

### 3.1.3 ระบบเชิงกลในการเลื่อนตำแหน่งในระนาบ 2 มิติ

#### 3.1.3.1 การออกแบบโครงสร้างหลัก

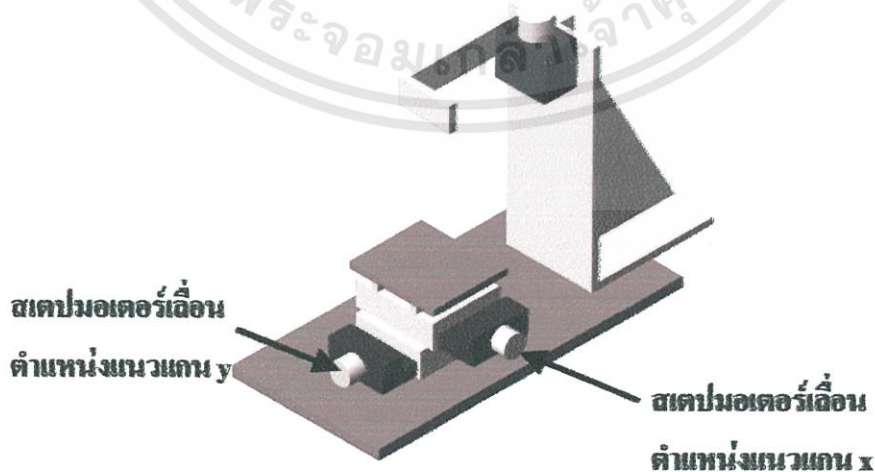
โครงสร้างหลักที่ใช้ติดตั้งอุปกรณ์ที่ออกแบบมีลักษณะดังรูปที่ 3.4 ประกอบด้วยแท่นวางวัตถุที่สามารถเลื่อนในแนว  $xy$  ในระยะ 5 เซนติเมตร และแท่นยึดอุปกรณ์ไมโครเวฟที่สามารถเลื่อนตำแหน่งเพื่อปรับระยะห่างระหว่างชุดอุปกรณ์กับแท่นวางวัตถุได้



รูปที่ 3.4 โครงสร้างหลักที่ใช้ติดตั้งอุปกรณ์

#### 3.1.3.2 การออกแบบกลไกการเลื่อนตำแหน่ง

ส่วนกลไกที่ใช้ในการเลื่อนตำแหน่ง มีลักษณะเป็นแท่นเลื่อนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 2 แนว มีกลไกการเคลื่อนที่ คือ สเตปมอเตอร์ ที่ควบคุมการทำงานด้วยชุดขับเคลื่อนที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ เป็นส่วนที่วางวัตถุและเลื่อนไปในระนาบ 2 มิติ ดังรูปที่ 3.5



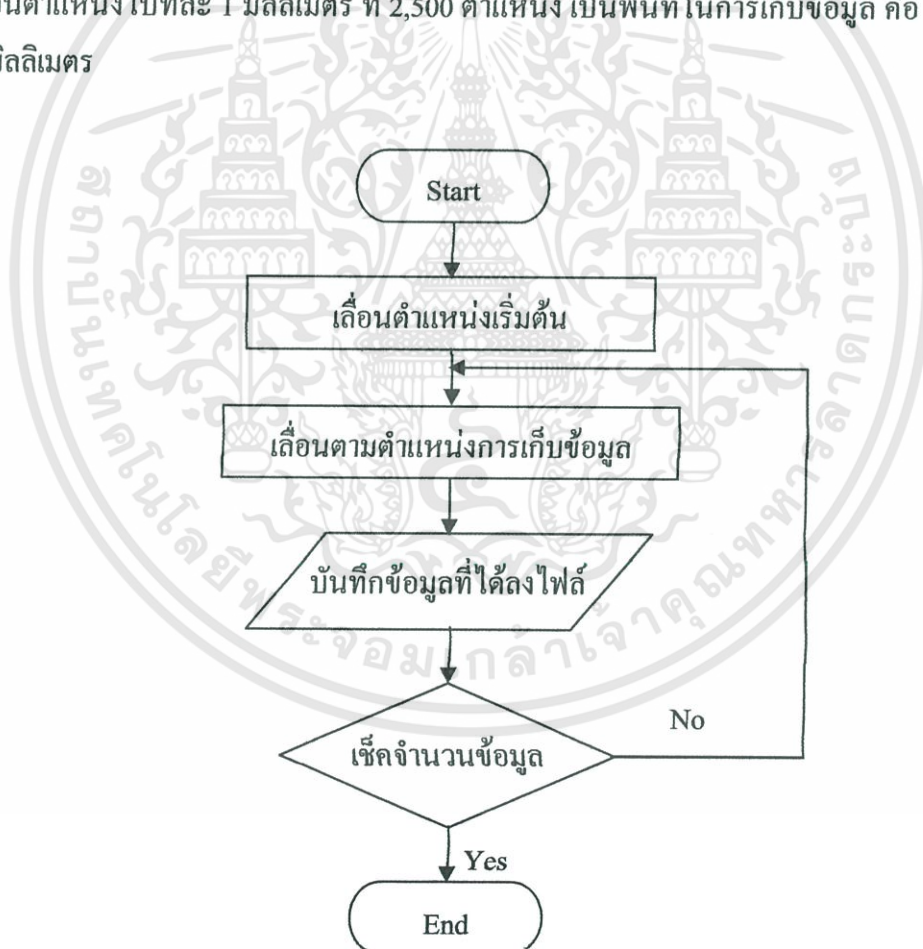
รูปที่ 3.5 กลไกการเลื่อนตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 ระบบควบคุมและเก็บข้อมูลเพื่อประมวลผล

ในการจัดเก็บข้อมูลของระบบเป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้ได้มาซึ่งข้อมูลในการสร้างภาพ ดังนั้นเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง และมีความรวดเร็วในการเก็บข้อมูลจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการออกแบบระบบในการเก็บข้อมูลให้ดี ในการควบคุมการทำงานของระบบเก็บข้อมูลนั้น จะใช้คอมพิวเตอร์ ออกแบบโปรแกรมควบคุมและเก็บข้อมูลที่พัฒนาโดยใช้โปรแกรม MATLAB มี

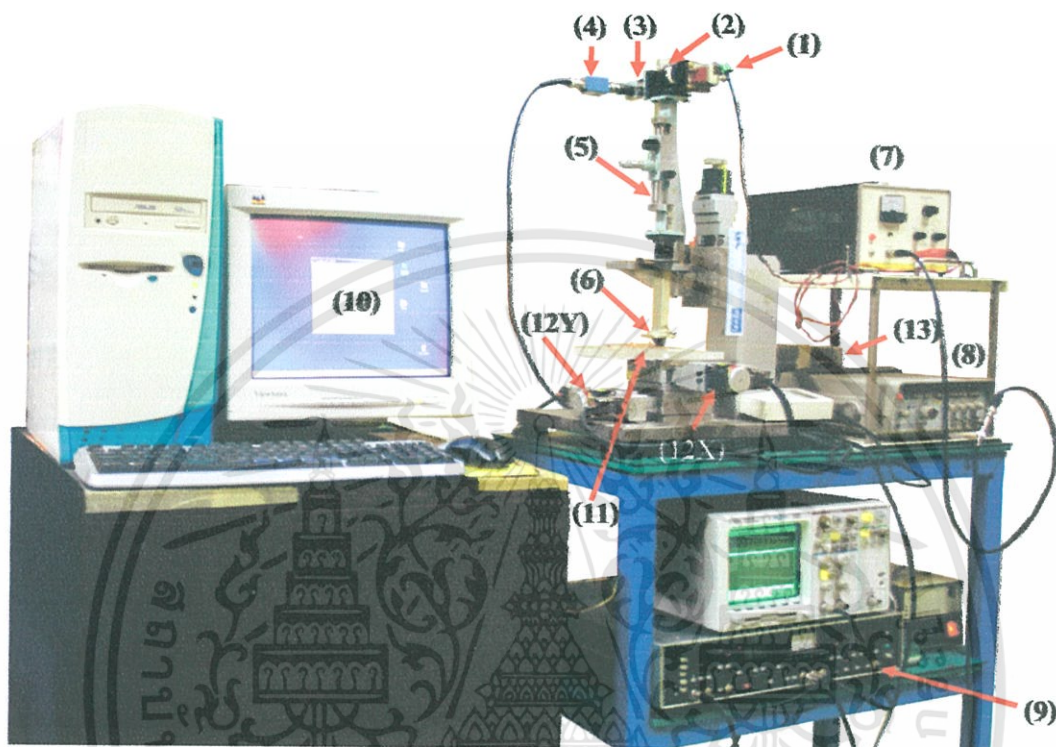
ลักษณะการทำงานของโปรแกรมที่ทำการพัฒนาขึ้นนั้น เมื่อเริ่มการทำงาน โปรแกรมจะออกคำสั่งให้มีการสร้างไฟล์ข้อมูล คำสั่งการอ่านค่าสัญญาณผ่านพอร์ท RS232 ที่เป็นพอร์ทอนุกรม (serial port) ของเครื่องคอมพิวเตอร์ คำสั่งควบคุมการทำงานของมอเตอร์เพื่อให้เคลื่อนที่และมีความถูกต้องของตำแหน่งในการเก็บข้อมูลผ่านทางพอร์ทอนุกรมอีกพอร์ท โดยการสั่งงานทั้งหมดจะแสดงผลออกมาทางจอคอมพิวเตอร์ และตรวจสอบการทำงานของระบบได้ขณะทำงาน ซึ่งสามารถสรุปลำดับการทำงานของระบบได้ดังรูปที่ 3.6 โดยระบบทำการเก็บข้อมูลด้วยการเลื่อนตำแหน่งไปทีละ 1 มิลลิเมตร ที่ 2,500 ตำแหน่ง เป็นพื้นที่ในการเก็บข้อมูล คือ 50×50 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 แผนภาพการทำงานของระบบเก็บข้อมูล

### 3.2 การสร้างระบบ

ระบบกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ในเบื้องต้นที่ทำการพัฒนาขึ้น มีลักษณะดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้

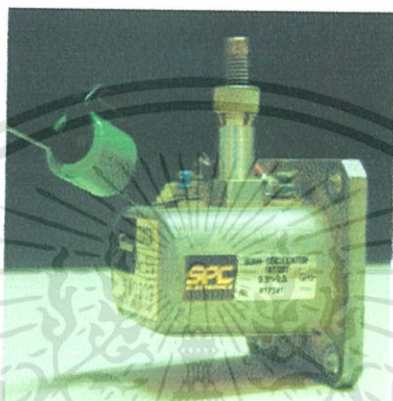
ประกอบด้วย (1) แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอด รุ่น S - GX12A ของโตชิบา (Toshiba) (2) เซอร์คิวเลเตอร์ รุ่น 0994104901 ของ Lectronic Research Lab (3) ตัวตรวจวัดสัญญาณ แบบ Crystal mount รุ่น 14T006 ของ SPC Electronics corp (4) วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High - pass filter) (5) ตัวปรับอิมพีแดนซ์แบบสตัปจูนเนอร์ รุ่น 14T001 ของ SPC Electronics corp (6) หัวส่งและรับสัญญาณ (Sensing probe) (7) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า รุ่น 14T002 ของ SPC Electronics corp (8) เครื่องกำเนิดความถี่ รุ่น GFG - 8017G GW (9) เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน รุ่น 5210 ของ EG&G Princeton applied research (10) เครื่องออสซิลโลสโคป (Agilent : 54621A) (11) เครื่องคอมพิวเตอร์ (12) แท่นวางวัตถุ (13) สเตปมอเตอร์ รุ่น PH544 - NB - C34 ของ Vexta (13) ตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ รุ่น MMC - 2 ของ ชูโอ เซกิ (Chuo Seiki)

เพื่อความเข้าใจในระบบที่ทำการพัฒนาขึ้น จึงต้องทราบรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนานี้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอด (Gunn diode oscillator)

แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอด (Gunn oscillator) ดังรูปที่ 3.8 เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ กัมมันต์ไดโอดออสซิลเลเตอร์ รุ่น S-GX12A ของโตชิบา ทำงานที่ความถี่ 9.3 กิกะเฮิร์ตซ์ กำลังส่ง 10 มิลลิวัตต์ โดยการไบอัสแรงดันไฟ 9 โวลต์ ซึ่งทำการมอดูเลตระดับไฟเลี้ยงด้วยสัญญาณความถี่ 1.0 กิโลเฮิร์ตซ์ จากเครื่องกำเนิดความถี่



รูปที่ 3.8 แหล่งกำเนิดคลื่นแบบกัมมันต์ไดโอด (Toshiba : model S – GX12A)

### 3.2.2 เซอร์คิวเลเตอร์ (Circulator)

เซอร์คิวเลเตอร์ ที่ทำหน้าที่ส่งผ่านสัญญาณในลักษณะวนไปในทิศทางเดียว โดยสัญญาณคลื่นไมโครเวฟจากกัมมันต์ไดโอดออสซิลเลเตอร์จะผ่านเข้าสู่ทางพอร์ต 1 และส่งออกไปทางพอร์ต 2 ของเซอร์คิวเลเตอร์ เพื่อเข้าสู่ตัวปรับอิมพีแดนซ์ต่อไป โดยเซอร์คิวเลเตอร์ที่ใช้ คือ รุ่น 0994104901 ของ Lectronic Research Lab ดังรูปที่ 3.9

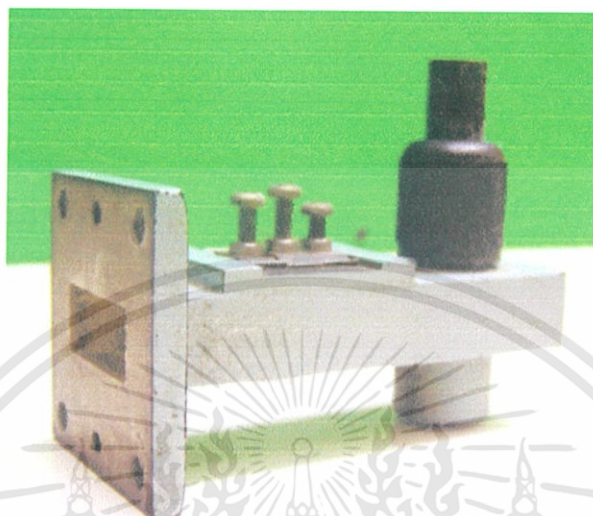


รูปที่ 3.9 เซอร์คิวเลเตอร์ (Lectronic Research Lab : 0994104901)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 ตัวตรวจวัดสัญญาณ (Detector)

ตัวตรวจวัดสัญญาณที่ใช้ คือ ตัวตรวจวัดสัญญาณแบบคริสตัลเมท (Crystal mount) รุ่น 14T006 ของ SPC Electronics corp ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งใช้งานในย่านความถี่ 9.1 – 9.6 กิกะเฮิรตซ์



รูปที่ 3.10 ตัวตรวจวัดสัญญาณแบบคริสตัลเมท (SPC Electronics corp : 14T006)

### 3.2.4 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High – pass filter)

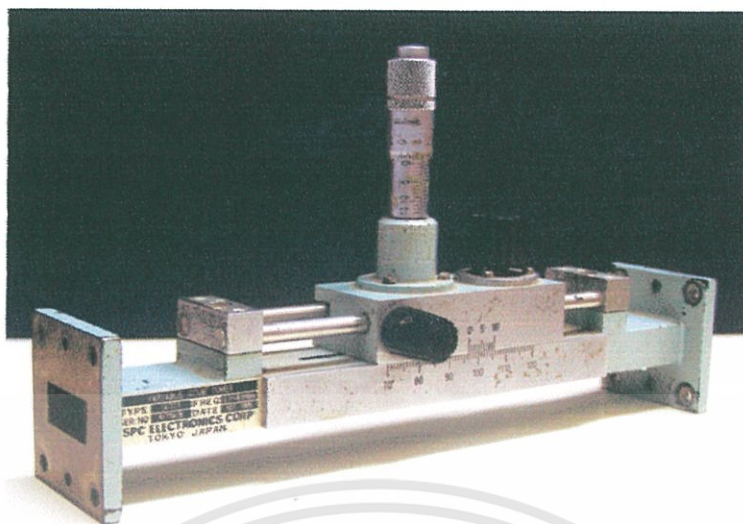
วงจรกรองความถี่สูงผ่านที่สร้างขึ้น มีลักษณะดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรกรองความถี่สูงผ่านที่สร้างขึ้น

### 3.2.5 ตัวปรับอิมพีแดนซ์แบบสตัปจูนเนอร์ (Variable stub tuner)

ตัวปรับอิมพีแดนซ์แบบสตัปจูนเนอร์ ที่ใช้ คือ รุ่น 14T011 ของ SPC Electronics corp ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งใช้งานในย่านความถี่ 9.1 – 9.6 กิกะเฮิรตซ์



รูปที่ 3.12 ตัวปรับอิมพีแดนซ์แบบสตั๊บบจูนเนอร์ (SPC Electronics corp : 14T011)

### 3.2.6 หัวส่งและรับสัญญาณ

ได้ทำการออกแบบและสร้างหัวส่งและรับสัญญาณ มุ่งเน้นการปรับมุมส่วนปลายของหัวส่งและรับสัญญาณ โดยใช้เทฟลอนที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.13 ซึ่งมีมุมส่วนปลายเท่ากับ 90 และ 60 องศา ตามลำดับ เพื่อใช้เป็นวัสดุไดอิเล็กทริกที่ใส่เข้าไปในท่อนำคลื่นปลายเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และใช้กาวเงินเคลือบผิวนอกพร้อมเว้นช่องว่างตรงกึ่งกลางกว้าง 2 มิลลิเมตร ยาวข้างละ 10 มิลลิเมตร และเมื่อนำไปประกอบเข้ากับท่อนำคลื่นปลายเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำให้ได้ หัวส่งและรับสัญญาณใน 2 แบบ ดังรูปที่ 3.14

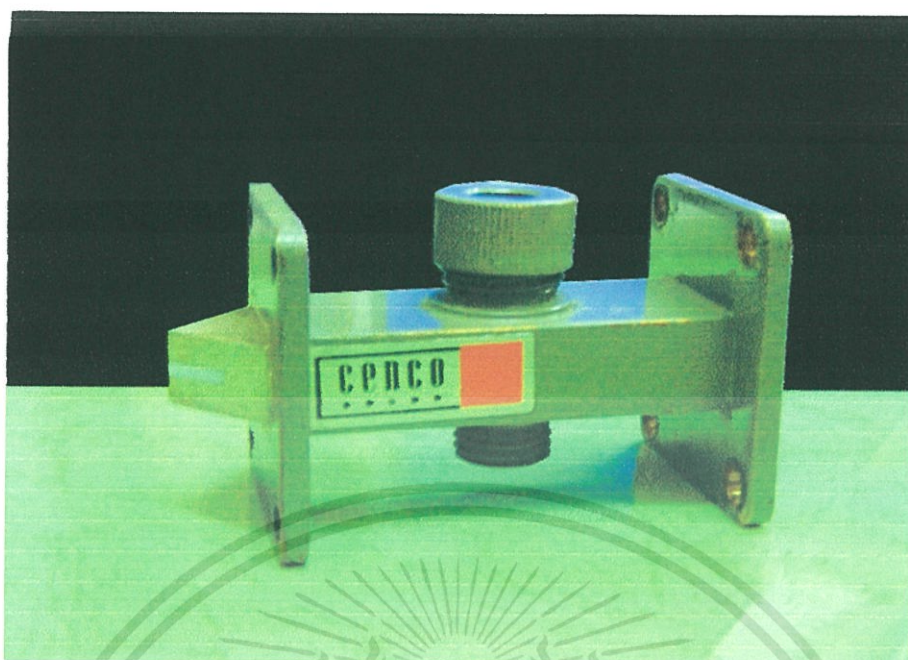


(ก)

(ข)

รูปที่ 3.13 เทฟลอนที่ใช้ในการทำหัวส่งและรับสัญญาณแบบ (ก) มุม 90 องศา (ข) มุม 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



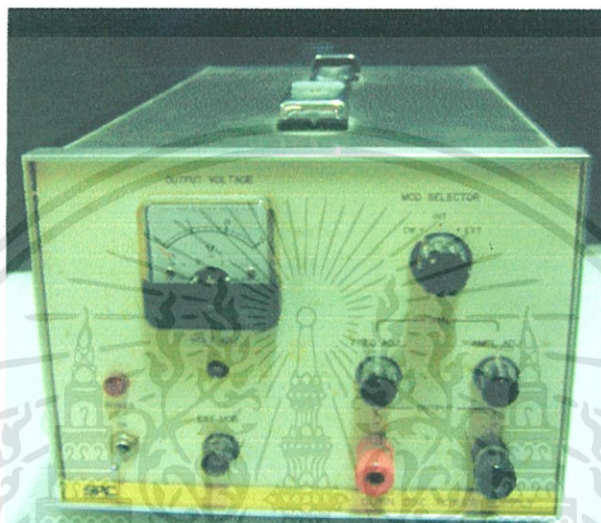
(ข)

รูปที่ 3.14 หัวส่งและรับสัญญาณ (ก) แบบมม 90 องศา (ข) แบบมม 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.7 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Microwave power supply)

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ คือ รุ่น 14T002 ของ SPC Electronics corp ดังรูปที่ 3.15 ซึ่งสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้ในช่วง 0 – 15 โวลต์ และทำการมอดูเลทแรงดันไฟฟ้าด้วยสัญญาณความถี่ตามต้องการได้ โดยในการใช้งานนี้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า จะจ่ายแรงดันไฟฟ้า 9 โวลต์ที่มอดูเลทสัญญาณความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ให้กับแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 3.15 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (SPC Electronics corp : 14T002)

### 3.2.8 เครื่องกำเนิดความถี่ (Function generator)

เครื่องกำเนิดความถี่ที่ใช้ คือ รุ่น GFG – 8017G ของ GW ซึ่งจะทำหน้าที่ให้สัญญาณความถี่ต่ำที่ 1.0 กิโลเฮิรตซ์ เพื่อใช้ในการมอดูเลทระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ไบอัสกันน์ไดโอดออสซิลเลเตอร์ และเป็นสัญญาณอ้างอิงในการขยายสัญญาณของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน



รูปที่ 3.16 เครื่องกำเนิดความถี่ (GW : GFG – 8017G)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.9 เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (Lock – in amplifier)

เนื่องจากสัญญาณที่วัดได้ในระบบที่พัฒนาขึ้นมีระดับต่ำรวมถึงมีสัญญาณรบกวนด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการทำการขยายสัญญาณและลดทอนสัญญาณรบกวน ในที่นี้ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณแบบเข้าจังหวะ (synchronous) เปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่มอดูเลท เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวน ทำให้สัญญาณที่ดีขึ้น และเก็บเป็นข้อมูลเพื่อนำไปประมวลผลต่อไป ทั้งนี้เครื่องขยายสัญญาณที่ใช้ คือ เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน รุ่น 5210 ของ EG&G Princeton applied research ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (EG&G Princeton applied research :5210)

### 3.2.10 เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

ในการเก็บข้อมูลจะต้องทำการอ่านค่าและแปลงสัญญาณจากเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน และนำข้อมูลที่ได้เก็บลงในคอมพิวเตอร์ ดังนั้นจึงใช้เครื่องออสซิลโลสโคป มาต่อเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินเพื่อแปลงสัญญาณขาออกจากรูปร่างเป็นดิจิทัล และส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อการจัดเก็บข้อมูลต่อไป โดยงานวิจัยนี้ใช้เครื่องออสซิลโลสโคป Agilent รุ่น 54621A

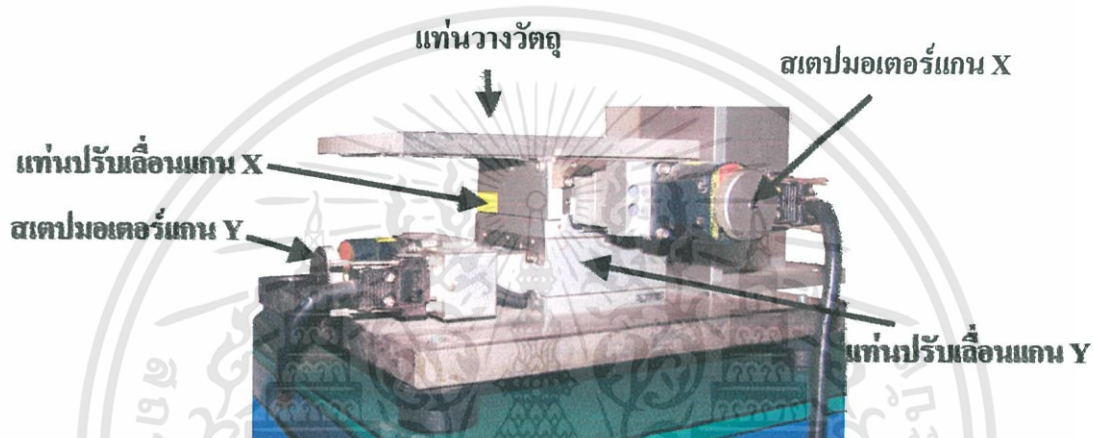


รูปที่ 3.18 เครื่องออสซิลโลสโคป (Agilent : 54621A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.11 ระบบสแกนตำแหน่ง

ในการเก็บข้อมูลจะต้องมีการเก็บข้อมูลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวระนาบ 2 มิติ จึงจำเป็นที่จะต้องมียูปรกรณ์ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ อันได้แก่ แท่นวางวัตถุ และสเตปมอเตอร์ 2 ตัว รุ่น PH544 – NB – C34 ของเวกตา (Vexta) โดยสเตปมอเตอร์จะเป็นกลไกที่ทำให้แท่นวัตถุเคลื่อนที่ไปในแนวแกน X และแกน Y ภายใต้หัวส่งและรับสัญญาณ และมีการควบคุมการทำงานผ่านชุดขับเคลื่อน รุ่น MMC – 2 ของชูโอ เซกิ (Chuo Seiki) ด้วยโปรแกรมที่ทำการพัฒนาขึ้นด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ในระบบกึ่งอัตโนมัติ ซึ่งจำทำการเลื่อนตำแหน่ง ไปครั้งละ 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.19 แท่นวางวัตถุและสเตปมอเตอร์ (Vexta : PH544 – NB – C34)

### 3.2.12 การทำงานของระบบ

การทำงานของระบบกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ที่สร้างขึ้นตามรูปที่ 3.7 เป็นดังนี้ คือ เมื่อแหล่งกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟกำลังต่ำ (10 มิลลิวัตต์) ความถี่ 9.3 กิกะเฮิรตซ์ ที่ถูกไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าที่มอดูเลทกับความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์จากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ส่งคลื่นผ่านท่อนำคลื่นที่มีภาคตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ไปยังพอร์ต 1 ของเซอร์คิวเลเตอร์ซึ่งทำหน้าที่ส่งผ่านสัญญาณออกไปยังพอร์ต 2 เข้าสู่ตัวปรับอิมพีแดนซ์แบบสเต็ปจูนเนอร์ ส่งผ่านไปยังหัวส่งและรับสัญญาณ เพื่อส่งสัญญาณสู่พื้นผิวของวัตถุที่วางอยู่ในระยะประชิด และรับสัญญาณสะท้อนจากวัตถุกลับส่งผ่านตัวปรับอิมพีแดนซ์แบบสเต็ปจูนเนอร์ เข้าสู่เซอร์คิวเลเตอร์ทางพอร์ต 2 ซึ่งจะส่งผ่านสัญญาณออกไปทางพอร์ต 3 เข้าสู่ตัวตรวจวัดสัญญาณ และทำการกรองสัญญาณด้วยวงจรกรองสัญญาณความถี่สูง เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำ แล้วทำการขยายสัญญาณ แต่เนื่องจากสัญญาณที่ได้มีระดับต่ำและยังมีสัญญาณรบกวนอยู่ จึงต้องทำการขยายสัญญาณด้วยเครื่องขยายสัญญาณแบบลือคอิน ที่ทำการขยายสัญญาณแบบเข้าจังหวะโดยรับสัญญาณอ้างอิงจากเครื่องกำเนิดความถี่ที่ 1 กิโลเฮิรตซ์เช่นเดียวกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า แล้วนำสัญญาณที่ผ่านการขยาย

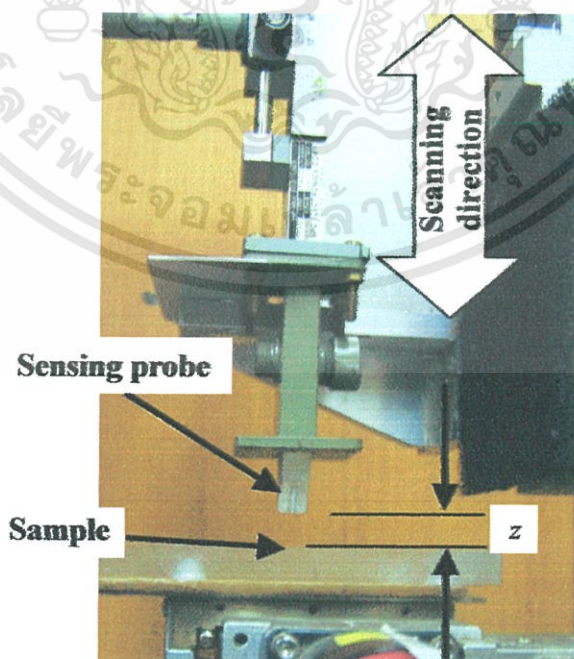
แล้วส่งไปยังเครื่องออสซิลโลสโคป เพื่ออ่านค่า แปลงสัญญาณและส่งเป็นข้อมูลไปเก็บที่คอมพิวเตอร์ ซึ่งเชื่อมต่อกับ RS232 เข้าสู่ซีเรียลพอร์ท 1 ทั้งนี้จะทำการเก็บข้อมูลไปตามระนาบ  $xy$  ในลักษณะการเลื่อนตำแหน่งเพื่อเก็บข้อมูลในทุก ๆ ระยะ 1 มิลลิเมตร โดยมีการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ด้วยตัวขับเคลื่อนผ่านทาง ซีเรียลพอร์ท 2 ด้วย RS232 เช่นกัน ทั้งนี้ระบบจะทำงานในแบบอัตโนมัติ

### 3.3 การทดลอง

ในส่วนของการทดลองที่เกี่ยวข้องกับระบบกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ที่พัฒนาขึ้น ได้แบ่งส่วนการทดลองออกเป็น การทดสอบวัดสมบัติของหัวส่งและรับคลื่น และการทดสอบการทำงานของระบบทั้งหมด

#### 3.3.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากหัวส่งและรับสัญญาณกับพิวระนาบวัตถุ

เพื่อกำหนดระยะห่างระหว่างหัวส่งและรับสัญญาณกับพิวระนาบวัตถุ (ระยะ  $z$ ) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดระยะห่างที่จะใช้ในการพัฒนาระบบ โดยใช้แผ่นโลหะเป็นวัตถุ และทำการปรับตัวสแต็บจูนเนอร์ให้สัญญาณที่วัดได้มีค่าต่ำสุด และบันทึกระดับสัญญาณที่อ่านได้จากเครื่องเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน ซึ่งรับสัญญาณจากตัวตรวจวัดสัญญาณในระบบไมโครเวฟ โดยทำการวัดสัญญาณทุก ๆ ระยะห่าง 0.5 มิลลิเมตร เป็นระยะ 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.20 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของความเข้มของสัญญาณการสะท้อนกับระยะห่าง  $z$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพของหัวส่งและรับสัญญาณ

เพื่อทดสอบหัวส่งและรับสัญญาณที่ทำการพัฒนาขึ้น โดยพิจารณาความสามารถในการแยกแยะวัตถุในแต่ละแนวของหัวส่งและรับสัญญาณทั้งแบบมุม 90 และ 60 องศา โดยการทดสอบ 2 แบบ คือ การทดสอบความละเอียดในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับแนวยาวของสลิต ด้วยการนำแถบทองแดงขนาด 8 และ 5 มิลลิเมตร วางในแต่ละแนว และทำการวัดสัญญาณ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองผลจาก โปรแกรม SEMCAD

#### 3.3.2.1 การทดสอบความละเอียดในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต

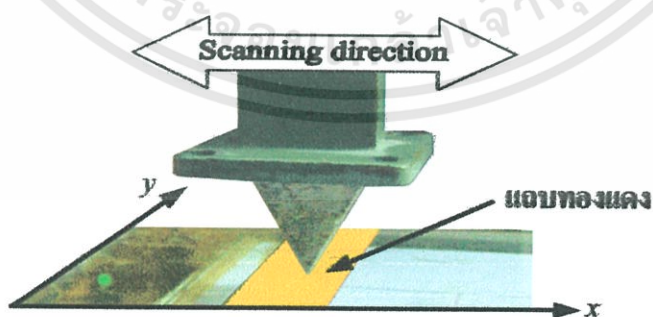
นำแถบทองแดงวางในแนวขนานกับแนวยาวของสลิตและทำการเก็บข้อมูลแบบเลื่อนตำแหน่งไปตามแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 การทดลองเพื่อหาความละเอียดในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต

#### 3.3.2.2 การทดสอบความละเอียดในแนวขนานกับแนวยาวของสลิต

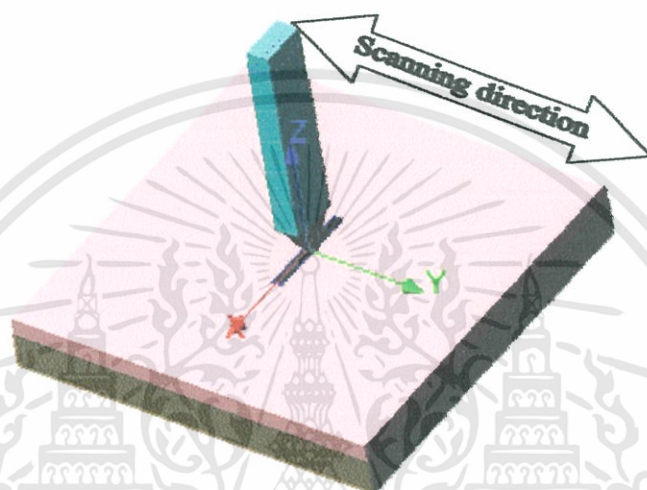
นำแถบทองแดงวางในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิตและทำการเก็บข้อมูลแบบเลื่อนตำแหน่งไปตามแนวขนานกับแนวยาวของสลิต ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 การทดลองเพื่อหาความละเอียดในแนวขนานกับแนวยาวของสลิต

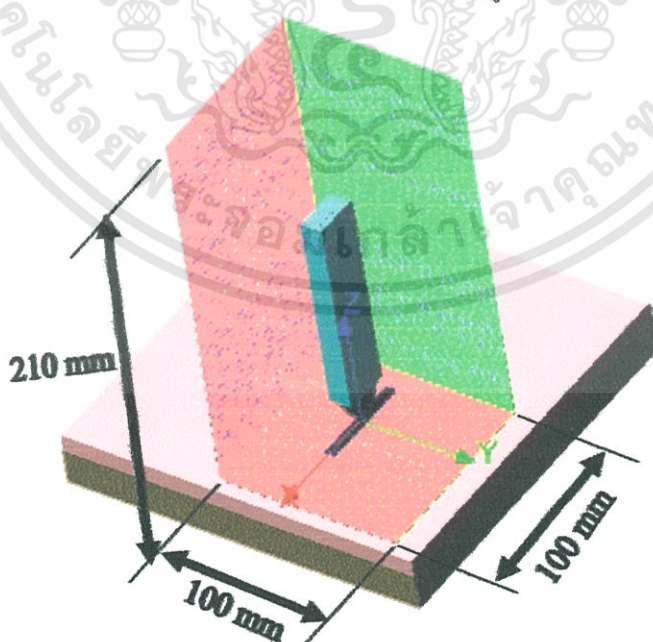
### 3.3.2.3 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม SEMCAD

เมื่อทำการออกแบบหัวส่งและรับสัญญาณซึ่งมีการวางตัวตั้งฉากกับแผ่นวางวัตถุด้วยโปรแกรม SEMCAD พร้อมทั้งทำการคำนวณเพื่อจำลองพฤติกรรมทางแม่เหล็กไฟฟ้า ในกรณีมีวัตถุเป็นแถบโลหะขนาด 5 มิลลิเมตร โดยมีค่าตัวแปรในการจำลองการทำงานเป็นดังตารางที่ 3.2 แล้วบันทึกค่าสแตนด์อิงเวฟเรโซ (Standing Wave Ratio: SWR) ที่ตำแหน่งของการเลื่อนสแกน ในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิท ของหัวส่งและรับสัญญาณทั้งสองแบบ คือ แบบมุม 90 และ 60 องศา



รูปที่ 3.23 แบบจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม SEMCAD

ทั้งนี้ขอบเขตของปริมาตรที่ทำการคำนวณเป็นไปดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ขอบเขตปริมาตรที่ทำการคำนวณพฤติกรรมทางแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองการทำงานหัวส่งและรับสัญญาณด้วยโปรแกรม SEMCAD

Parameter	Value
<b>Global setting</b>	
- Axis x	From -50 to 50; Stepping : min = 0.2, max = 0.4, ratio = 1.5
- Axis y	From -50 to 50; Stepping : min = 0.2, max = 0.4, ratio = 1.5
- Axis z	From -50 to 160; Stepping : min = 1, max = 5, ratio = 1.5
<b>Run setting</b>	
- Harmonic simulation	9.3 GHz
- Duration	11 Periods
- Absorbing	Mur ; Order = 2
Boundaries	Waveguide source; Add type; TE01 mode
- Source elements	Port sensor; Phasor mode
- Sensors	
<b>Part</b>	
- Background	Dielectric
- Teflon	Dielectric; Relative permittivity = 2.1   9.3 GHz
- Metal coat	PEC (Perfect electric conductors)
- Waveguide	PEC
- Sample	PEC
- Substrate	Dielectric
- Base	PEC

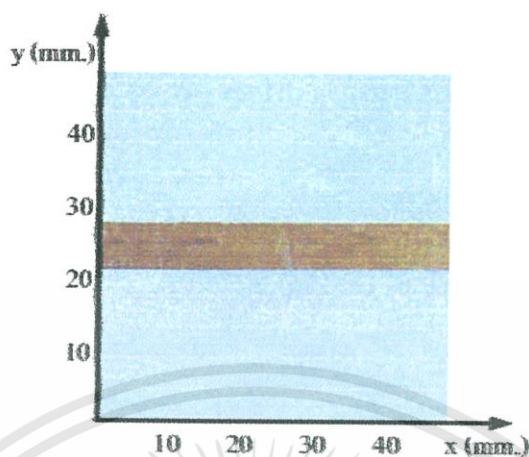
### 3.3.3 การทดลองเก็บข้อมูลเพื่อสร้างภาพวัตถุด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบและสร้างระบบกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ขึ้น และทดลองเก็บข้อมูลด้วยระบบที่สร้างขึ้น เพื่อเป็นการทดสอบระบบ และเปรียบเทียบลักษณะสัญญาณที่ได้จากวัตถุ การทดสอบในขั้นตอนนี้ใช้วัตถุตัวอย่างเป็นโลหะแบน 2 แบบ คือ แถบทองแดง และเหรียญโลหะวงกลม จัดวางวัตถุในแบบต่าง ๆ เพื่อทดสอบความสามารถของระบบ

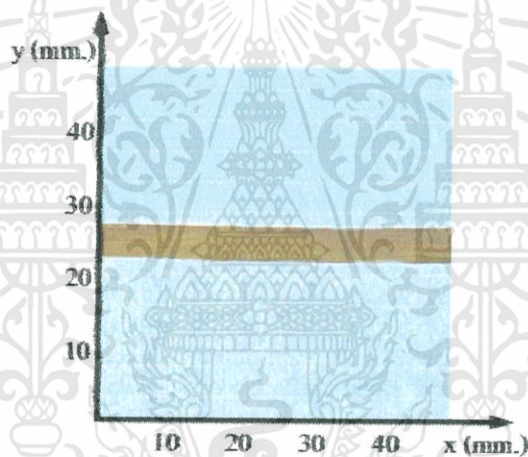
#### 3.3.3.1 วัตถุตัวอย่างที่เป็นแถบทองแดง

นำแถบทองแดงขนาด 8 และ 5 มิลลิเมตร มาเป็นวัตถุโดยใช้แถบทองแดง 1 และ 2 ชั้น โดยวางแถบทองแดงในแนวขนานและตั้งฉากกับความยาวของช่องเปิด

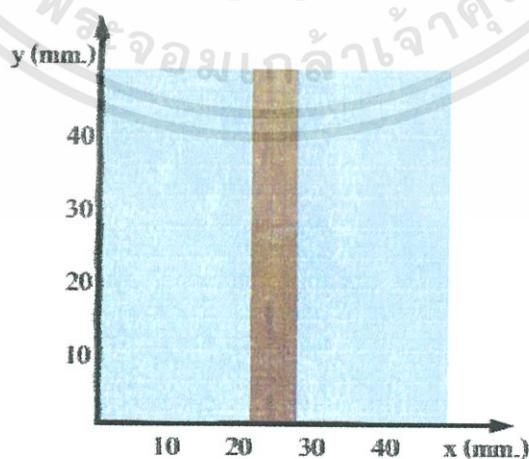
### 1. วัตถุประสงค์ตัวอย่างที่เป็นแถบทองแดง 1 เส้น



รูปที่ 3.25 แถบทองแดงขนาด 8 มิลลิเมตร วางขนานกับแนวฮาวของสลิต

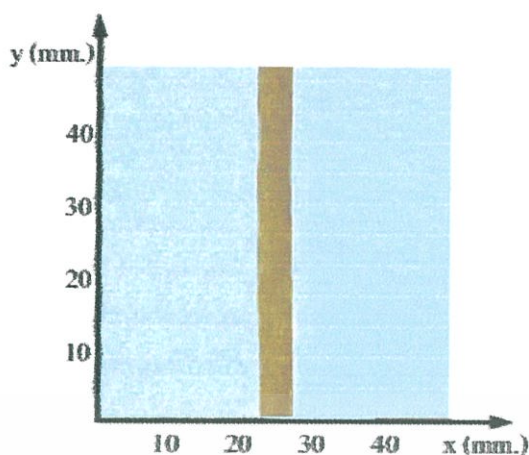


รูปที่ 3.26 แถบทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตร วางขนานกับแนวฮาวของสลิต



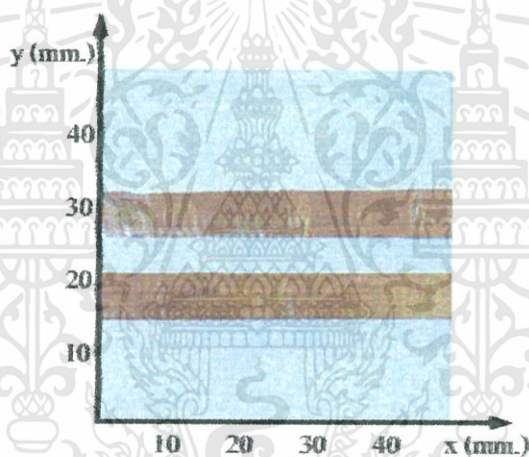
รูปที่ 3.27 แถบทองแดงขนาด 8 มิลลิเมตร วางตั้งฉากกับแนวฮาวของสลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

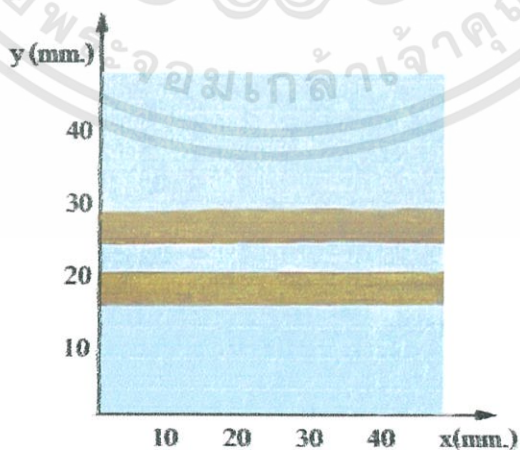


รูปที่ 3.28 แฉกทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตร วางตั้งฉากกับแนวฮาวของสลิต

2. วัดดูตัวอย่างที่เป็นแฉกทองแดง 2 เส้น

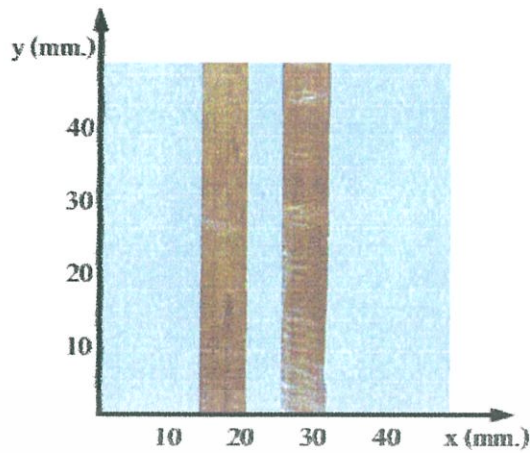


รูปที่ 3.29 แฉกทองแดงขนาด 8 มิลลิเมตร วางห่าง  $d=5$  มิลลิเมตร วางขนานกับแนวฮาวของสลิต

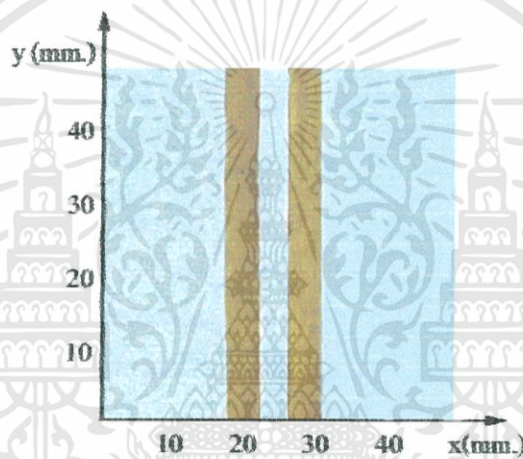


รูปที่ 3.30 แฉกทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตร วางห่าง  $d=5$  มิลลิเมตร วางขนานกับแนวฮาวของสลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

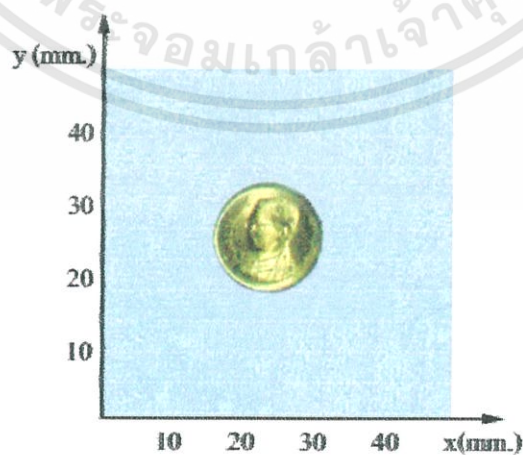


รูปที่ 3.31 แถบทองแดงขนาด 8 มิลลิเมตร วางห่าง  $d=5$  มิลลิเมตร วางตั้งฉากกับแนวหาของสลิต



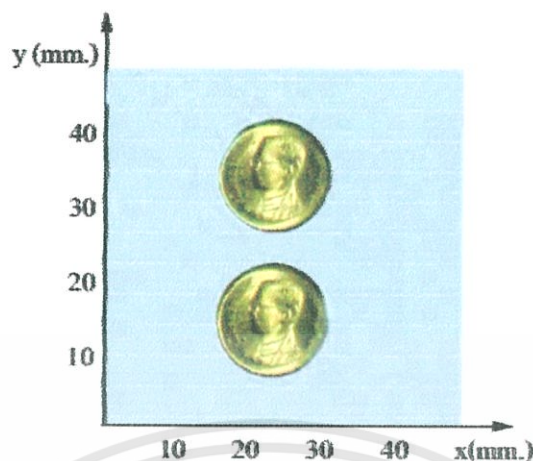
รูปที่ 3.32 แถบทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตร วางห่าง  $d=5$  มิลลิเมตร วางตั้งฉากกับแนวหาของสลิต

### 3.3.3.2 วัตถุตัวอย่างที่เป็นเหรียญโลหะรูปวงกลม



รูปที่ 3.33 เหรียญโลหะรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.34 เหรียญโลหะรูปวงกลมวางขอบห่าง 5 มิลลิเมตรในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสไลด์

### 3.4 วิธีการสร้างภาพกลับ

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการสร้างภาพกลับมาโดยทางดิจิทัล ซึ่งเป็นการนำข้อมูลที่เก็บบันทึกไว้ในรูปของเมตริกซ์ ที่เป็นตัวแทนการกระจายคลื่นในรูปสัญญาณที่ตรวจวัดได้ โดยในเบื้องต้นจะทำการสร้างภาพการกระจายความเข้มของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ในแต่ละตำแหน่งของพื้นที่ทำการเก็บข้อมูล ด้วยโปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB) โดยอ้างอิงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำการสร้างภาพของวัตถุตัวอย่างต่าง ๆ

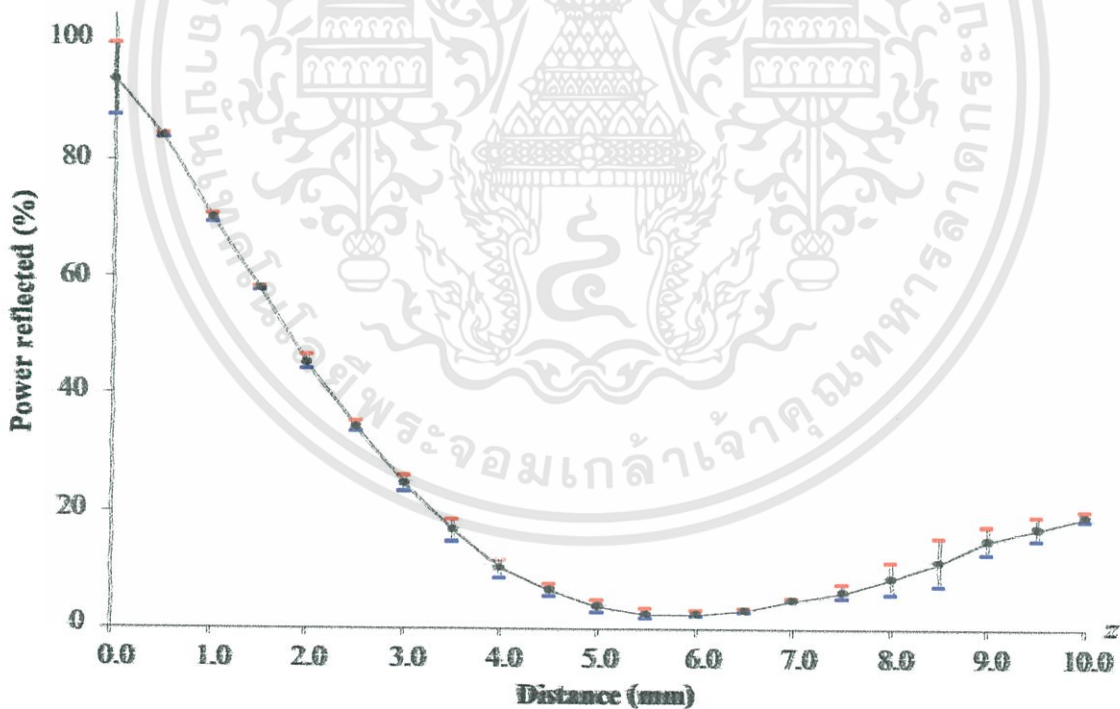
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

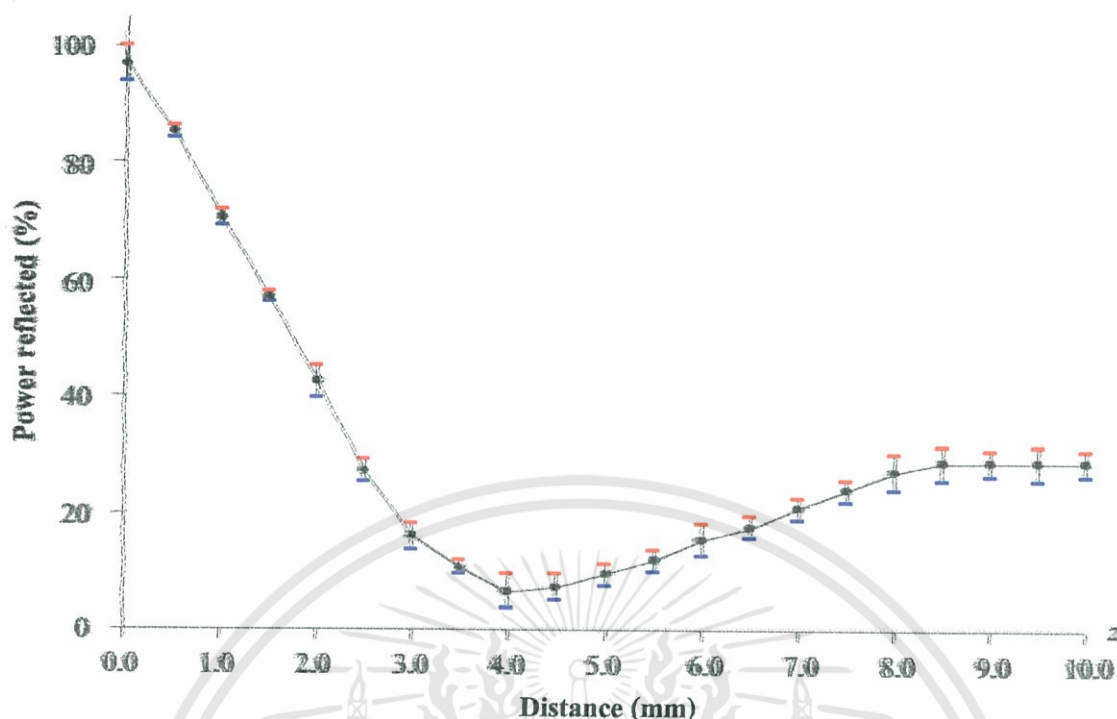
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองวัดสมบัติของหัวส่งและรับสัญญาณที่นำไปสู่การพัฒนา ระบบกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ และการทดสอบระบบที่สร้างขึ้น

#### 4.1 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนและระยะห่างจากหัวส่ง และรับสัญญาณกับพิวระนาบวัตถุ

จากการทดลองเพื่อกำหนดระยะห่างระหว่างหัวส่งและรับสัญญาณกับพิวระนาบวัตถุ ดังรูปที่ 3.20 เมื่อทำการวัดระดับสัญญาณสะท้อนกลับบริเวณหัวส่งและรับสัญญาณ พบว่า ความสัมพันธ์ของกำลังสัญญาณการสะท้อนกับระยะห่างของหัวส่งและรับสัญญาณทั้งแบบมุม 90 องศา และ 60 องศา เป็นดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของความเข้มของสัญญาณการสะท้อนกับระยะห่าง  $z$  ของหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของความเข้มของสัญญาณการสะท้อนกับระยะห่าง  $z$  ของหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา

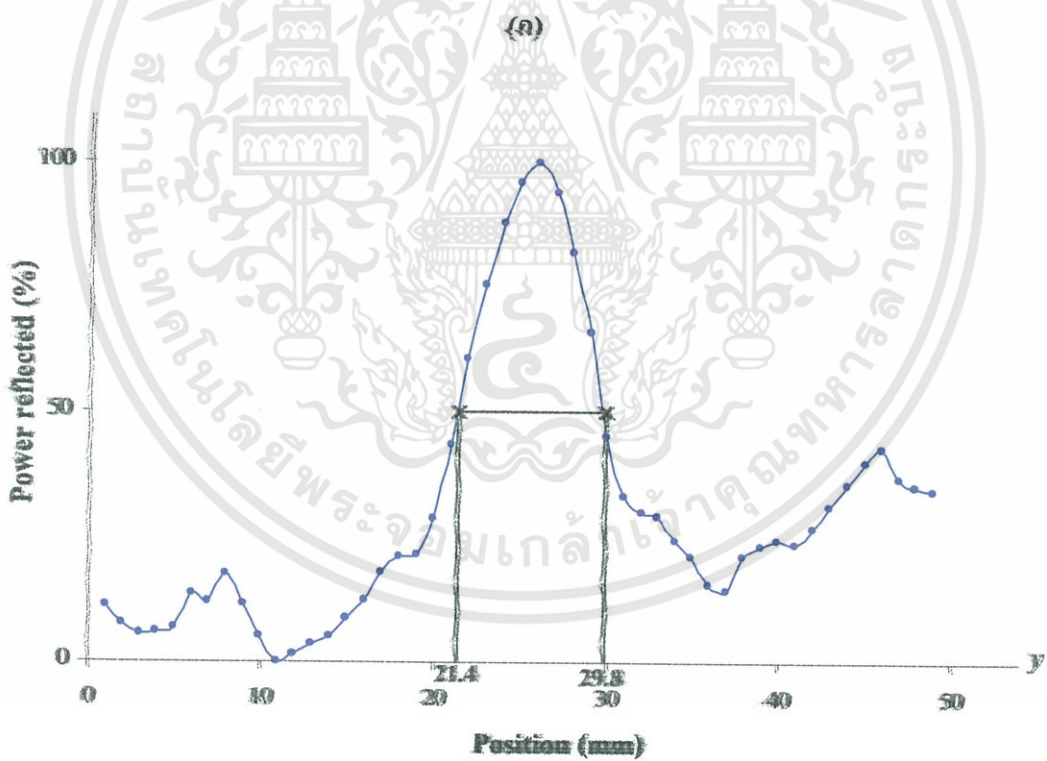
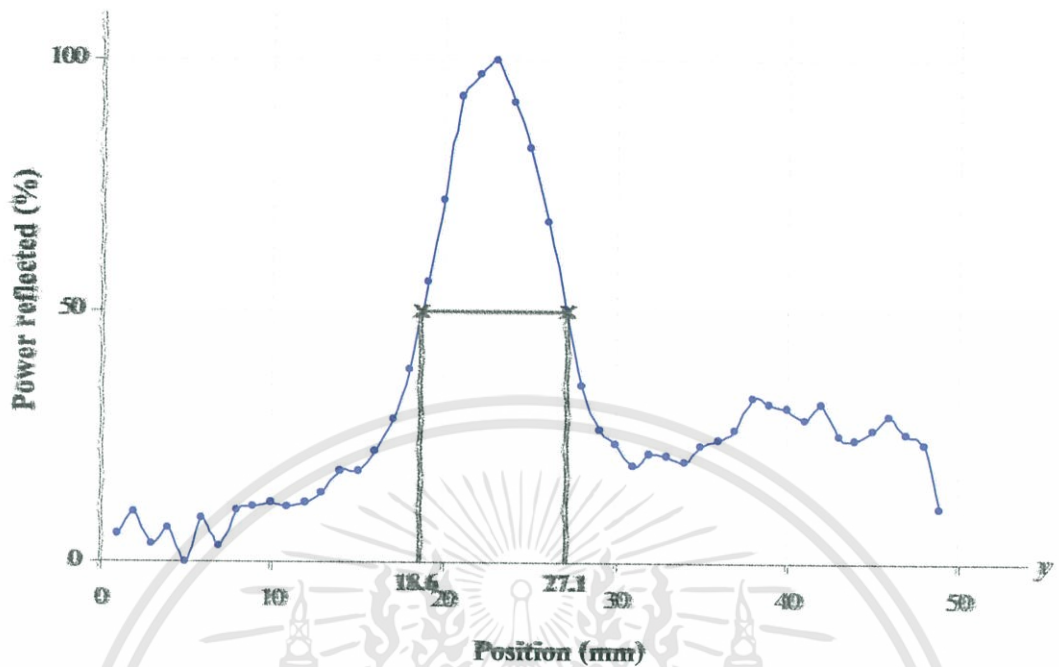
จากผลการทดลองพบว่า หัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา นั้นในช่วงระยะ 0 – 3 มิลลิเมตร สัญญาณมีการสะท้อนสูง ส่วนในระยะที่มากกว่า 3 มิลลิเมตร สัญญาณที่ได้จะมีค่าต่ำ ในทำนองเดียวกันหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา ในช่วงระยะ 0 – 2 มิลลิเมตร สัญญาณมีการสะท้อนสูง ส่วนในระยะที่มากกว่า 3 มิลลิเมตร สัญญาณที่ได้จะมีค่าต่ำ นำไปสู่การตั้งระยะห่างระหว่างหัวส่งและรับสัญญาณกับผิวระนาบวัตถุของระบบกล้องจุลทรรศน์ที่ทำการพัฒนา โดยใช้ที่ระยะห่าง 1 มิลลิเมตร เพราะมีการสะท้อนกลับของสัญญาณสูง

## 4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของหัวส่งและรับสัญญาณ

### 4.2.1 ผลการทดสอบความละเอียดในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต

จากการทดลองเพื่อหาความละเอียดการแยกแยะในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต ดังรูปที่ 3.21 โดยใช้แถบทองแดงขนาด 8, 5 และ 2 มิลลิเมตร เมื่อนำข้อมูลสัญญาณสะท้อนกลับที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับตำแหน่งการเลื่อนที่เก็บข้อมูลของหัวส่งและรับสัญญาณในแนวขนานกับแนวยาวของสลิต และพิจารณาค่าตัวแทนความกว้างของวัตถุโดยอ้างอิงกับค่าความกว้างพิคสัญญาณ ที่ตำแหน่งซึ่งค่าที่เป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดของสัญญาณ (Full width at half maximum: FWHM) ผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.3 , 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

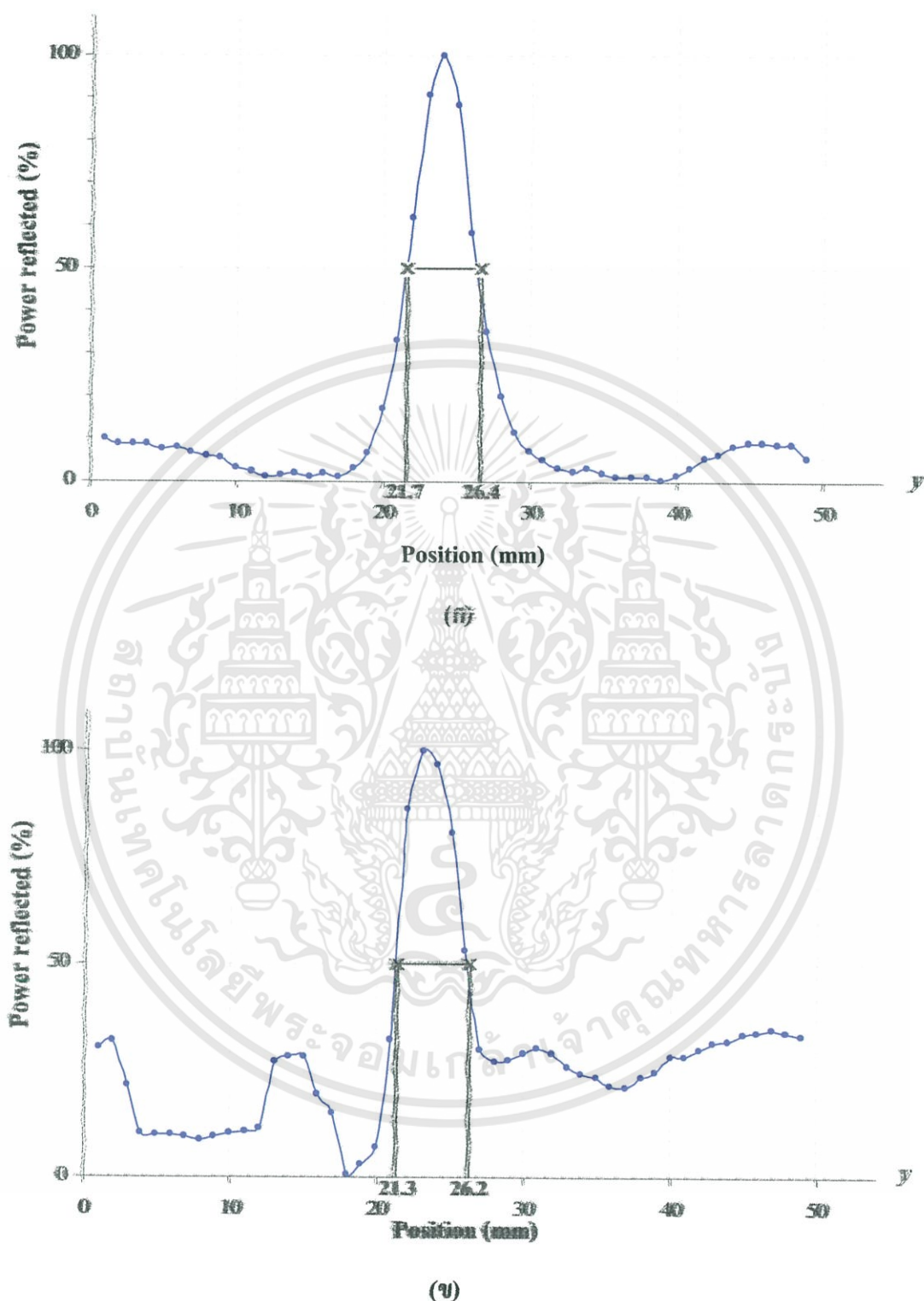
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

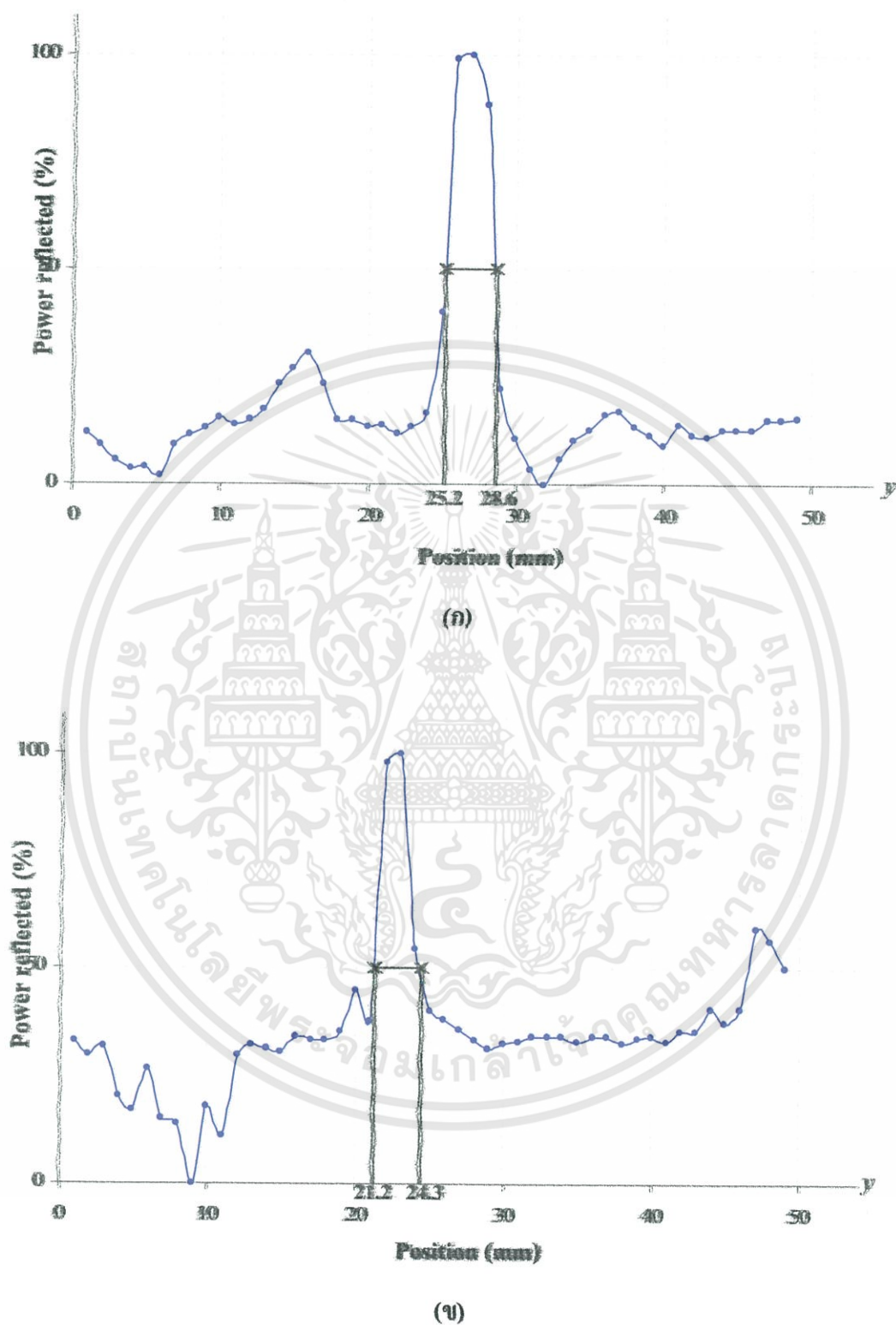
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของความเข้มของสัญญาณการสะท้อนกับตำแหน่งตามแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสติก เมื่อวางแถบทองแดงขนาด 8 มิลลิเมตรของหัวตั้งและรับสัญญาณ (ก) แบบมุม 90 องศา (ข) แบบมุม 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของความเข้มของสัญญาณการสะท้อนกับตำแหน่งตามแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสปีด เมื่อวางแถบทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตรของหัวส่งและรับสัญญาณ (ก) แบบมุม 90 องศา (ข) แบบมุม 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

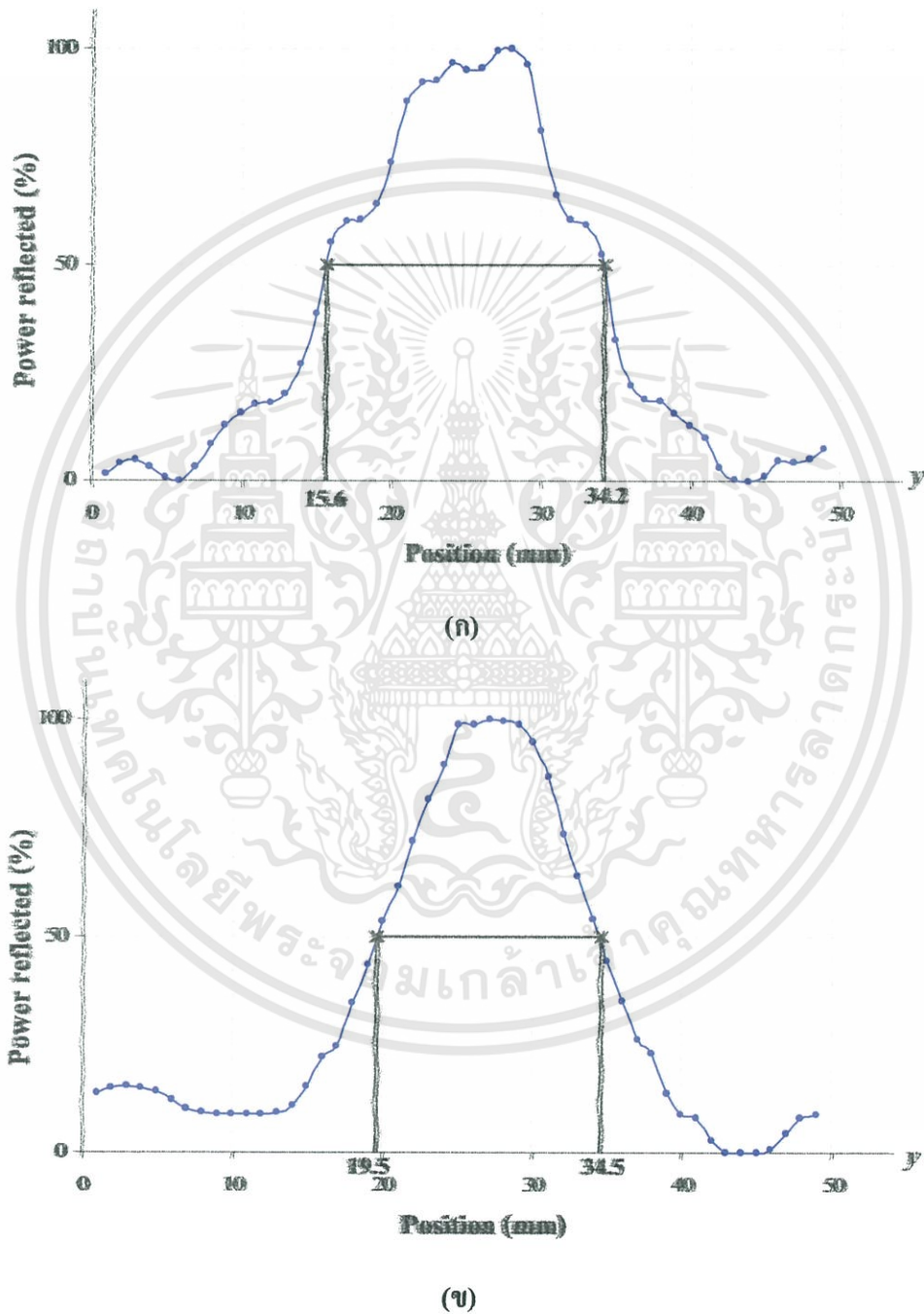


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของความเข้มของสัญญาณการสะท้อนกับตำแหน่งตามแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต เมื่อวางแถบทองแดงขนาด 2 มิลลิเมตรของหัวส่งและรับสัญญาณ  
(ก) แบบมุม 90 องศา (ข) แบบมุม 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

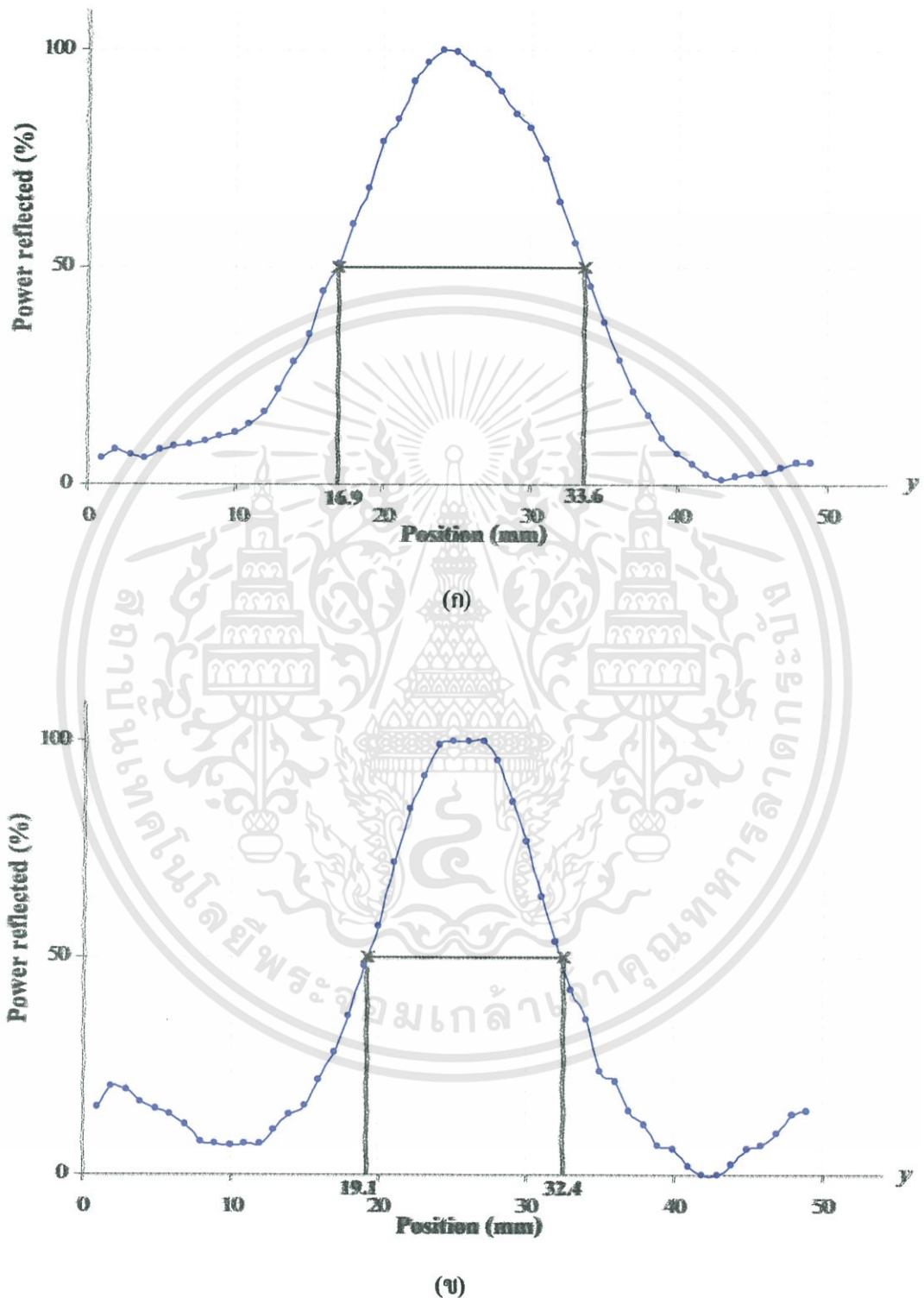
#### 4.2.2 ผลการทดสอบความละเอียดในแนวนานกับแนวยาวของสลิต

จากการทดลองเพื่อหาความละเอียดการแยกแยะในแนวนานกับแนวยาวของสลิต ดังรูปที่ 3.22 โดยใช้แถบทองแดงขนาด 8 และ 5 มิลลิเมตร เมื่อนำข้อมูลสัญญาณสะท้อนกลับที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับตำแหน่งการเลื่อนที่เก็บข้อมูลของหัวส่งและรับสัญญาณในแนวนานกับแนวยาวของสลิต และค่า FWHM ผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของความเข้มของสัญญาณการสะท้อนกับการเลื่อนตำแหน่งความ  
แนวนานกับแนวยาวของสลิต เมื่อวางแถบทองแดงขนาด 8 มิลลิเมตร ของหัวส่ง  
และรับสัญญาณ (ก) แบบมุม 90 องศา (ข) แบบมุม 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของความเข้มของสัญญาณการสะท้อนกับการเลื่อนตำแหน่งตาม  
แนวขนานกับแนวยาวของสลิค เมื่อวางแถบทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตร ของหัวส่ง  
และรับสัญญาณ (ก) แบบมุม 90 องศา (ข) แบบมุม 60 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์จากรูปที่ 4.3 - 4.7 พบว่าค่า FWHM ของแต่ละกราฟความสัมพันธ์ ที่คำนวณได้เป็นดังตารางที่ 4.1

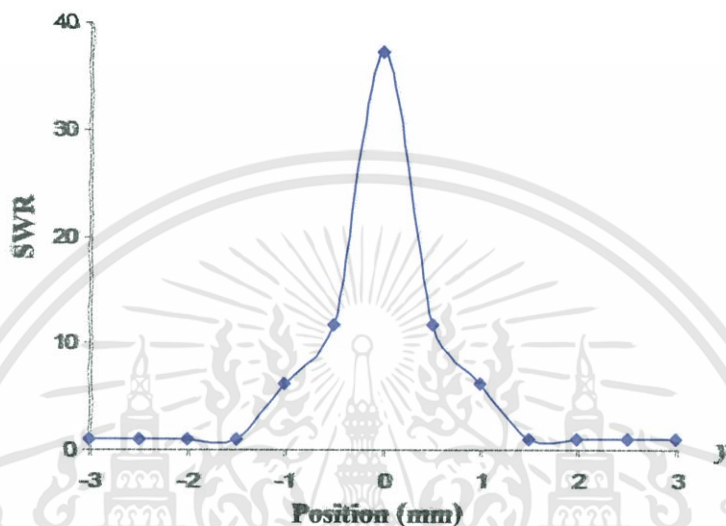
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการคำนวณค่า Full Width at Half Maximum

	ขนาดวัตถุ (มิลลิเมตร.)	ค่า FWHM (มิลลิเมตร)		ค่าความคลาดเคลื่อน (%)	
		ปลายหัวส่งรับ มุม 90°	ปลายหัวส่งรับ มุม 60°	ปลายหัวส่งรับ มุม 90°	ปลายหัวส่งรับ มุม 60°
แนวตั้งฉาก	8	8.5	8.4	6.25	5
	5	4.7	4.9	6	2
	2	3.4	3.1	70	55
แนวขนาน	8	18.6	15	132.5	87.5
	5	16.7	13.3	108.75	66.25

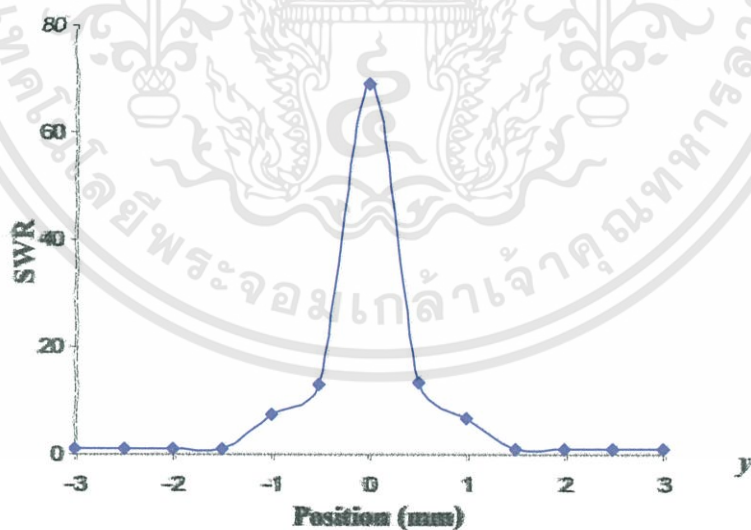
จากตารางที่ 4.1 การพิจารณาลึ่งชี้วัดถึงความละเอียดในการแยกแยะ โดยการเปรียบเทียบขนาดความกว้างของวัตถุกับค่า FWHM ของสัญญาณในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสถิติของหัวส่งและรับสัญญาณ โดยใช้แถบทองแดงขนาด 8, 5 และ 2 มิลลิเมตร หัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา มีค่า FWHM เป็น 8.5, 4.7 และ 3.4 และแบบมุม 60 องศา เป็น 8.4, 4.9 และ 3.1 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าในกรณีใช้แถบทองแดงขนาด 8 มิลลิเมตร หัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเป็น 6.25% และ 5% สำหรับหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา ในกรณีใช้แถบทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตร หัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่า แบบมุม 60 องศา มีค่าเท่ากับ 6% และ 2% ตามลำดับ รวมทั้งในกรณีใช้แถบทองแดงขนาด 3 มิลลิเมตร หัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่า แบบมุม 60 องศา มีค่าเท่ากับ 70% และ 55% ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน การพิจารณาความละเอียดในแนวขนานกับแนวยาวของสถิติของหัวส่งและรับสัญญาณ โดยใช้แถบทองแดงขนาด 8 และ 5 มิลลิเมตร หัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา มีค่า FWHM เป็น 18.6 และ 16.7 และแบบมุม 60 องศา เป็น 15 และ 13.3 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าในกรณีใช้แถบทองแดงขนาด 8 มิลลิเมตร หัวส่งและรับสัญญาณทั้งแบบมุม 90 และ 60 องศา มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเป็น 132.5% และ 87.5% และในกรณีใช้แถบทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตร มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเป็น 108.75% และ 66.25% ตามลำดับ

### 4.2.3 ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม SEMCAD

จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม SEMCAD พบว่า ค่าสแตนดิ้งเวฟเรโซ (SWR) ของหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 และ 60 องศา มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งการเลื่อนที่เก็บข้อมูลของหัวส่งและรับสัญญาณในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิตในกรณีใช้วัตถุเป็นแถบโลหะ กว้าง 5 มิลลิเมตร เป็นดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของค่า SWR กับการเลื่อนตำแหน่งตามแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต เมื่อวางแถบทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตร ของหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของค่า SWR กับการเลื่อนตำแหน่งตามแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิต เมื่อวางแถบทองแดงขนาด 5 มิลลิเมตร ของหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่า ณ บริเวณตำแหน่งที่มีแถบทองแดงวางอยู่จะมีค่า SWR สูงกว่าในบริเวณอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

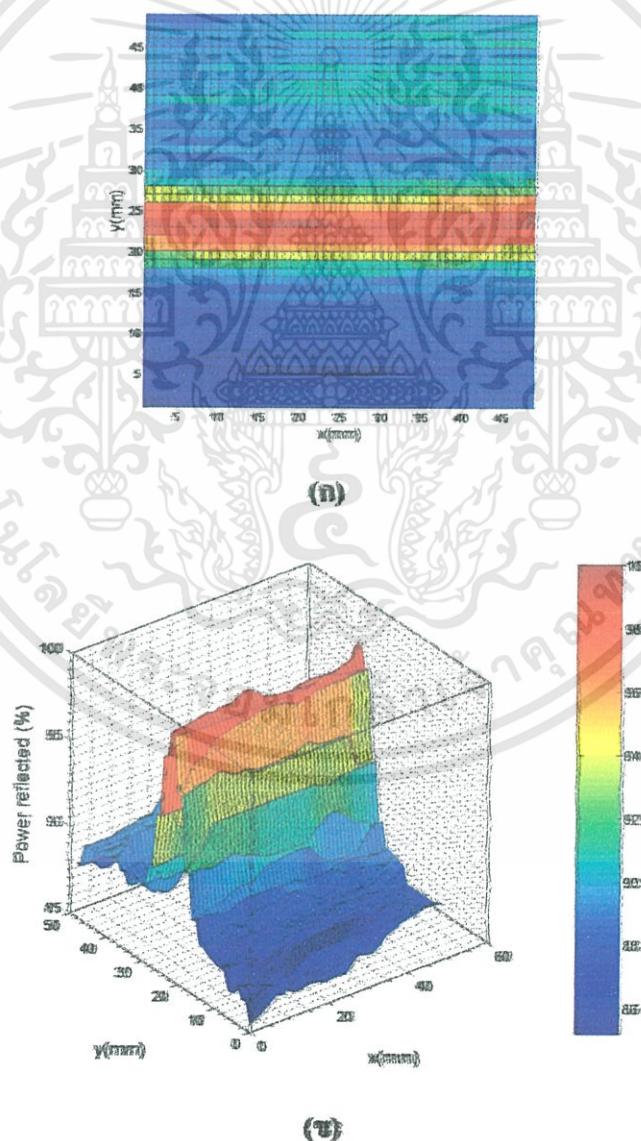
### 4.3 การทดลองเก็บข้อมูลและสร้างภาพวัตถุด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น

การทดสอบระบบกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ ระบบเลื่อนท่อนำคลื่นปลายเปิด ที่พัฒนาขึ้น โดยใช้วัตถุตัวอย่างต่าง ๆ มีผลเป็นดังนี้

#### 4.3.1 วัตถุตัวอย่างที่เป็นแถบทองแดง

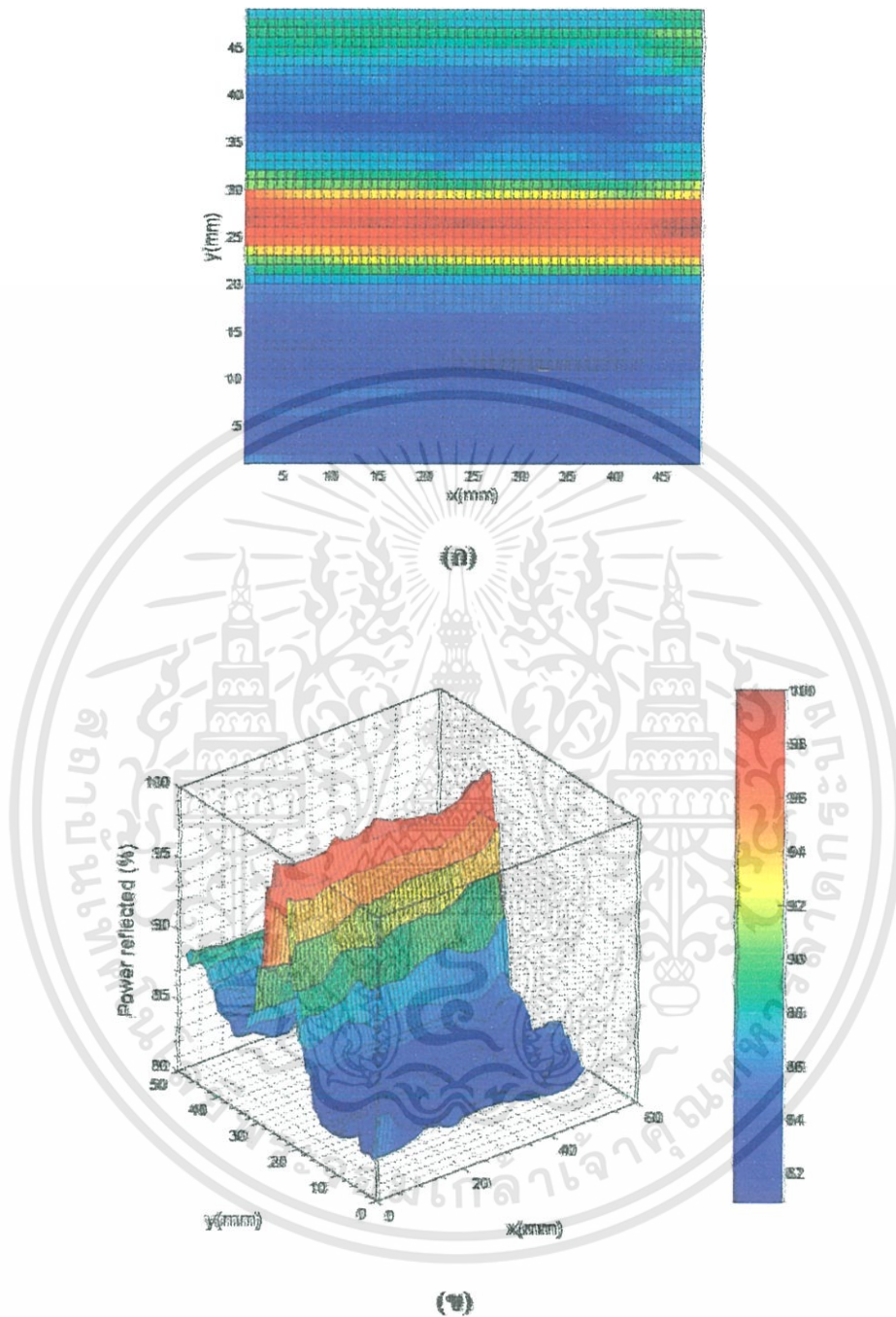
##### 4.3.1.1 วัตถุตัวอย่างที่เป็นแถบทองแดง 1 เส้น

ผลของการสร้างภาพในแนวราบและค่าการกระจายของขนาดสัญญาณบนระนาบ 2 มิติของวัตถุรูปที่ 3.25, 3.26, 3.27 และ 3.28 โดยใช้หัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา และ 60 องศา เป็นดังรูปที่ 4.10 - 4.17 ตามลำดับ



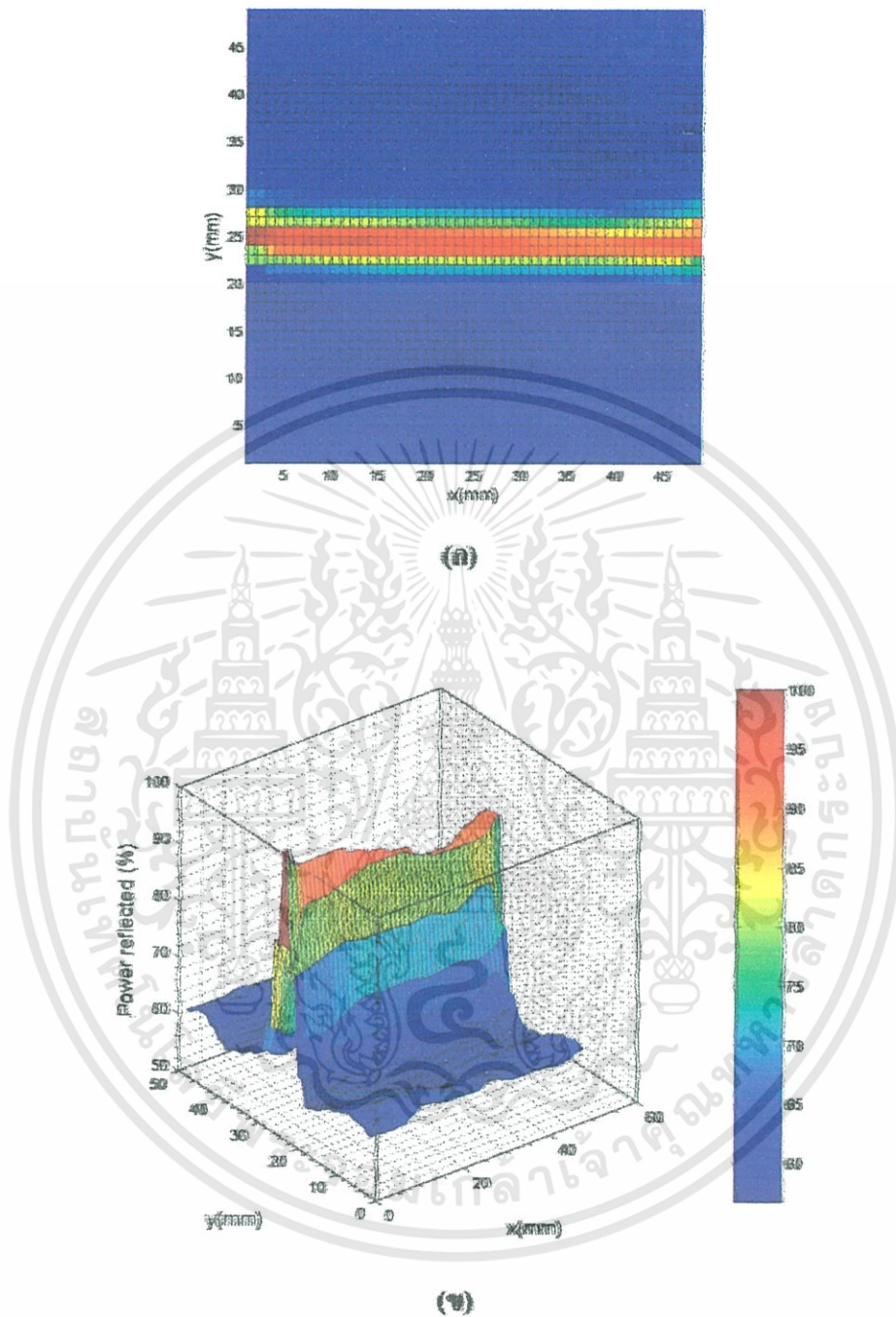
รูปที่ 4.10 ภาพวัตถุรูปที่ 3.25 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



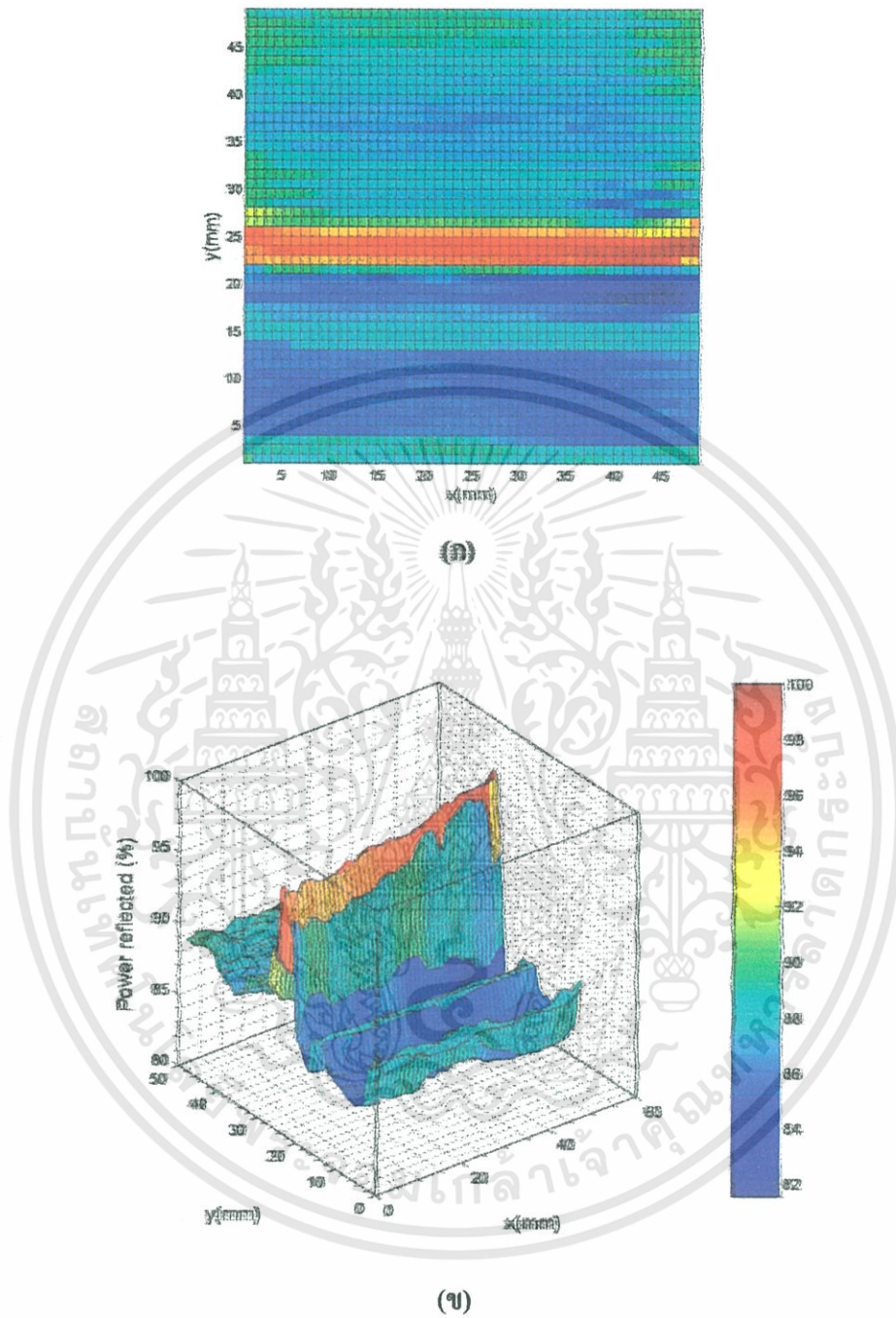
รูปที่ 4.11 ภาพวัตถุรูปที่ 3.25 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



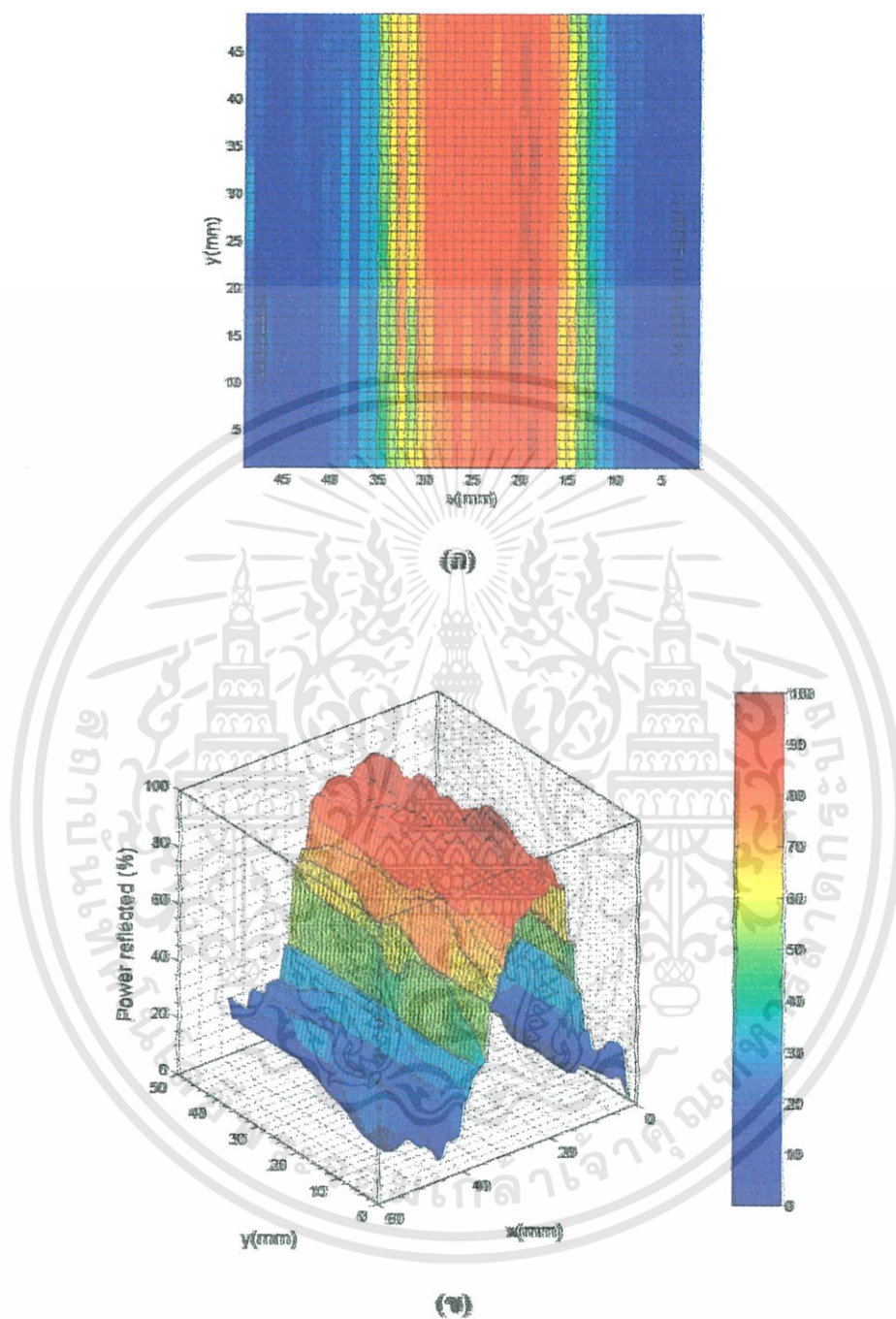
รูปที่ 4.12 ภาพวาดรูปที่ 3.26 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



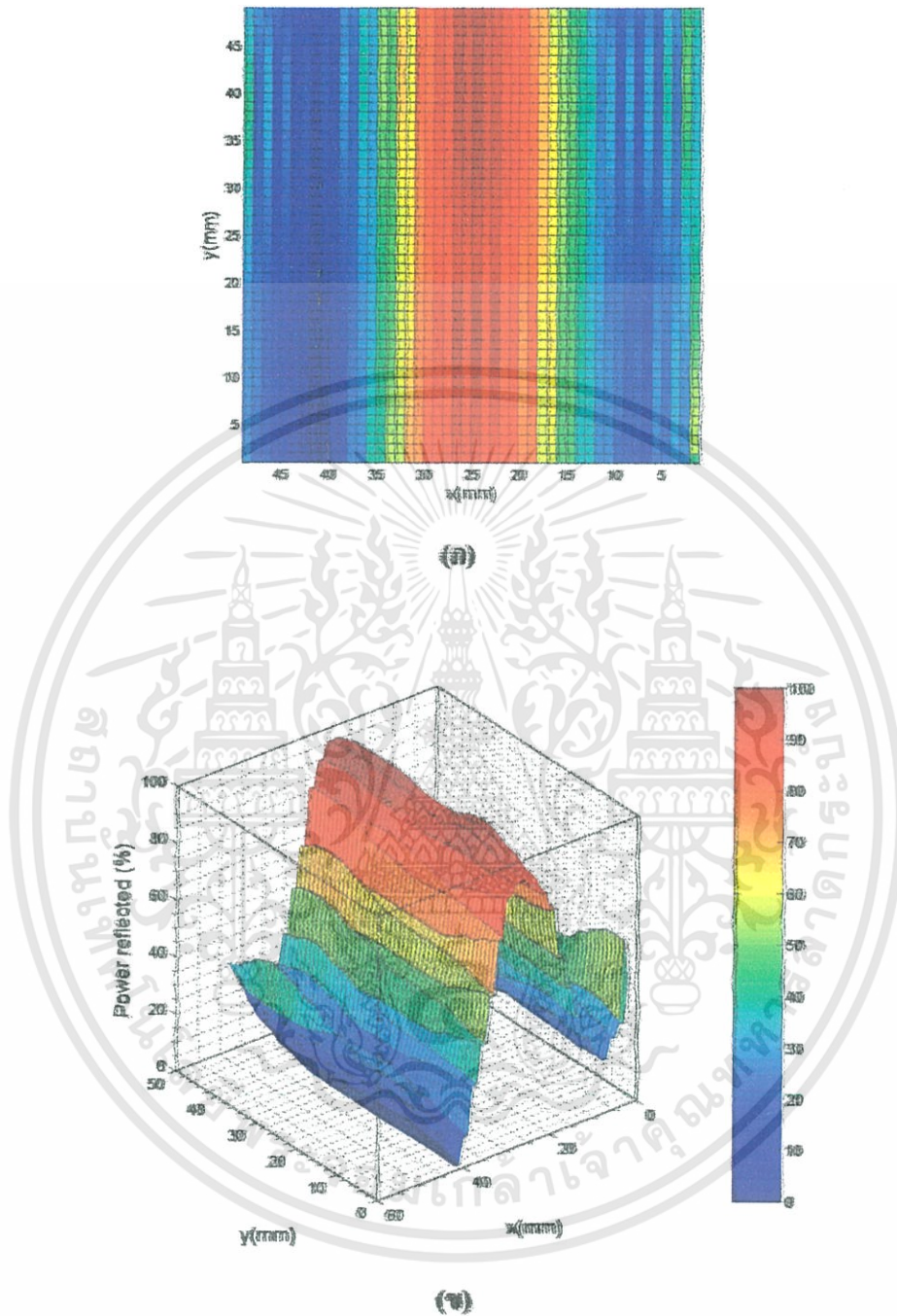
รูปที่ 4.13 ภาพวัตถุรูปที่ 3.26 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



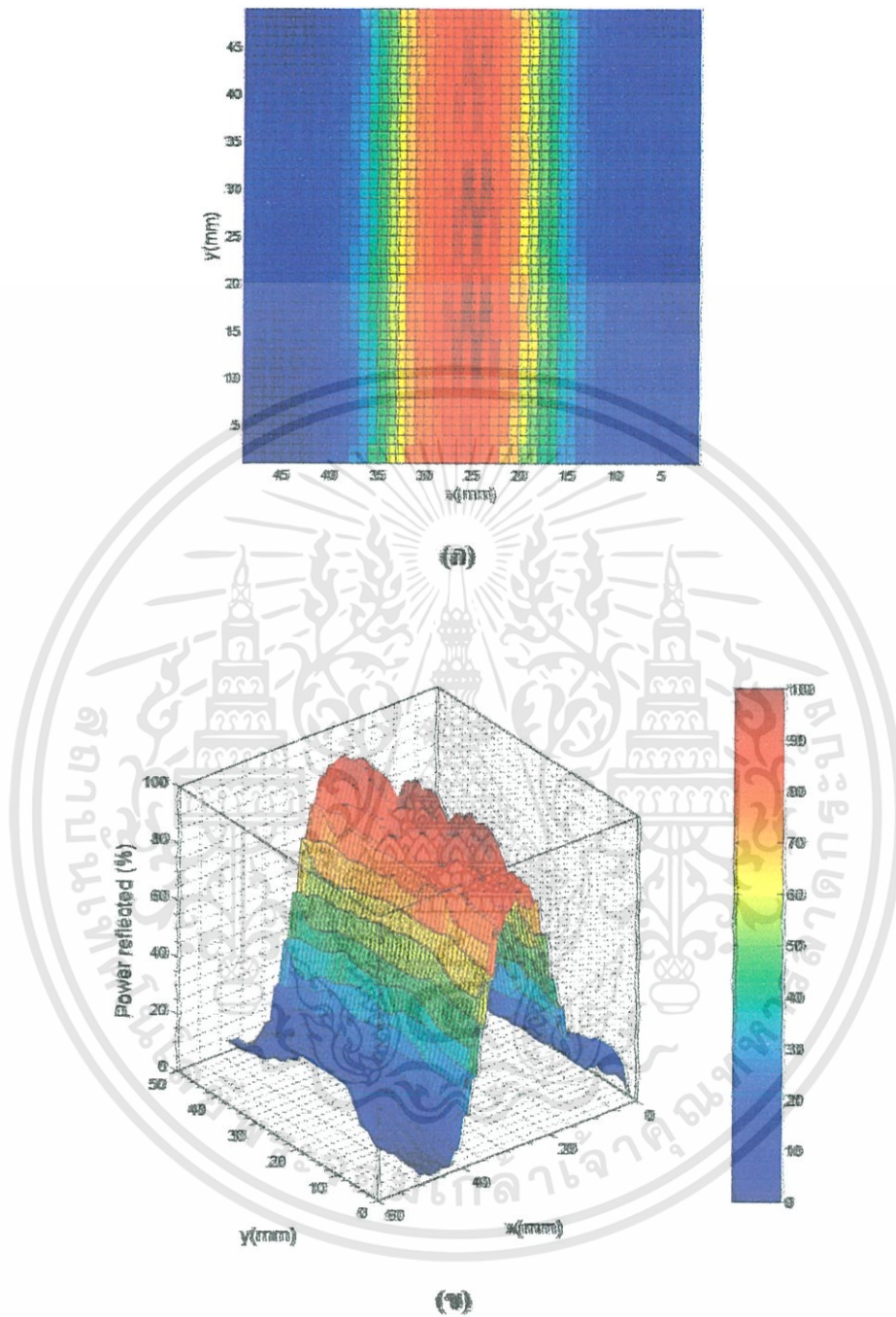
รูปที่ 4.14 ภาพวัตถุรูปที่ 3.27 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



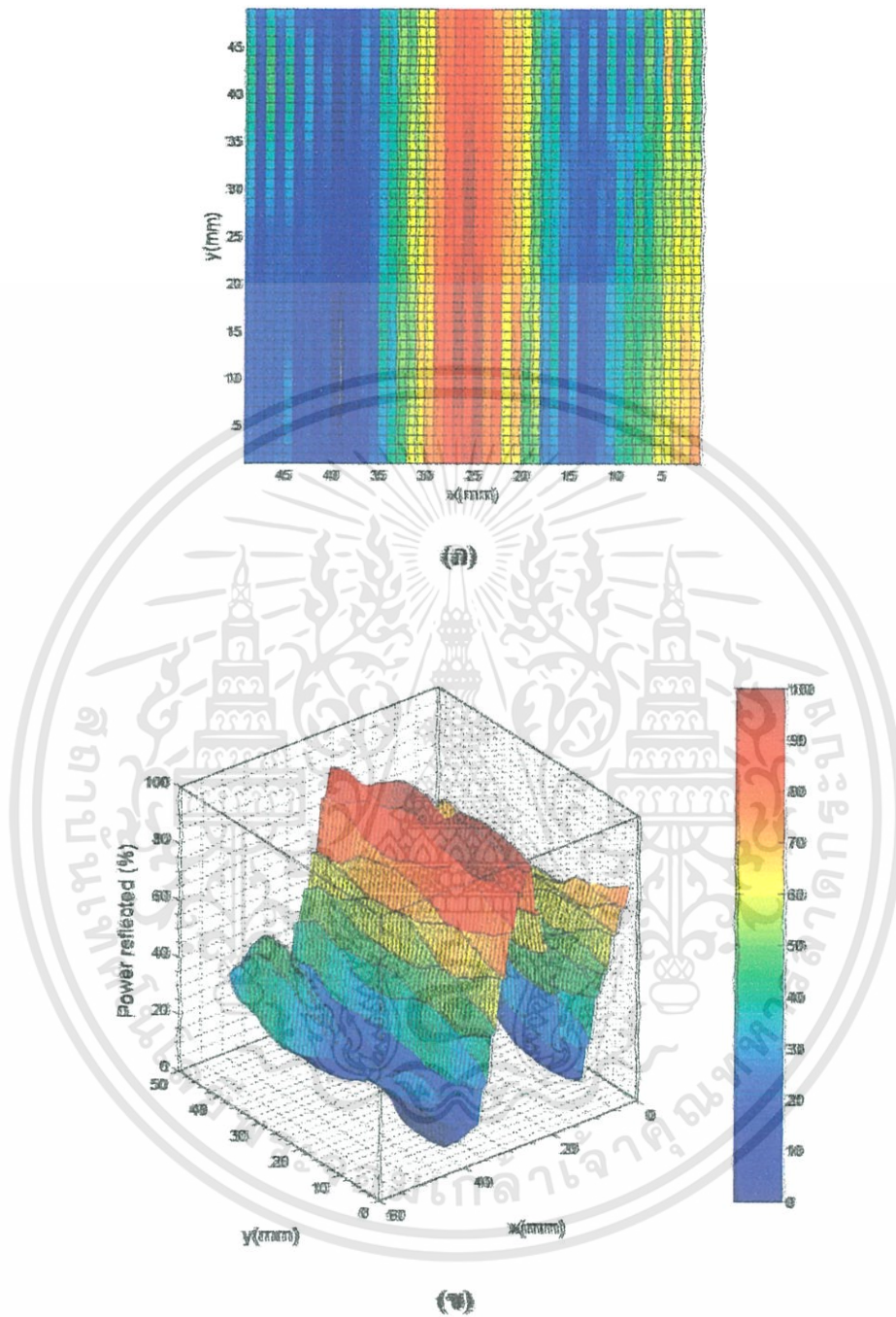
รูปที่ 4.15 ภาพวาดรูปที่ 3.27 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ภาพวัตถุรูปที่ 3.28 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

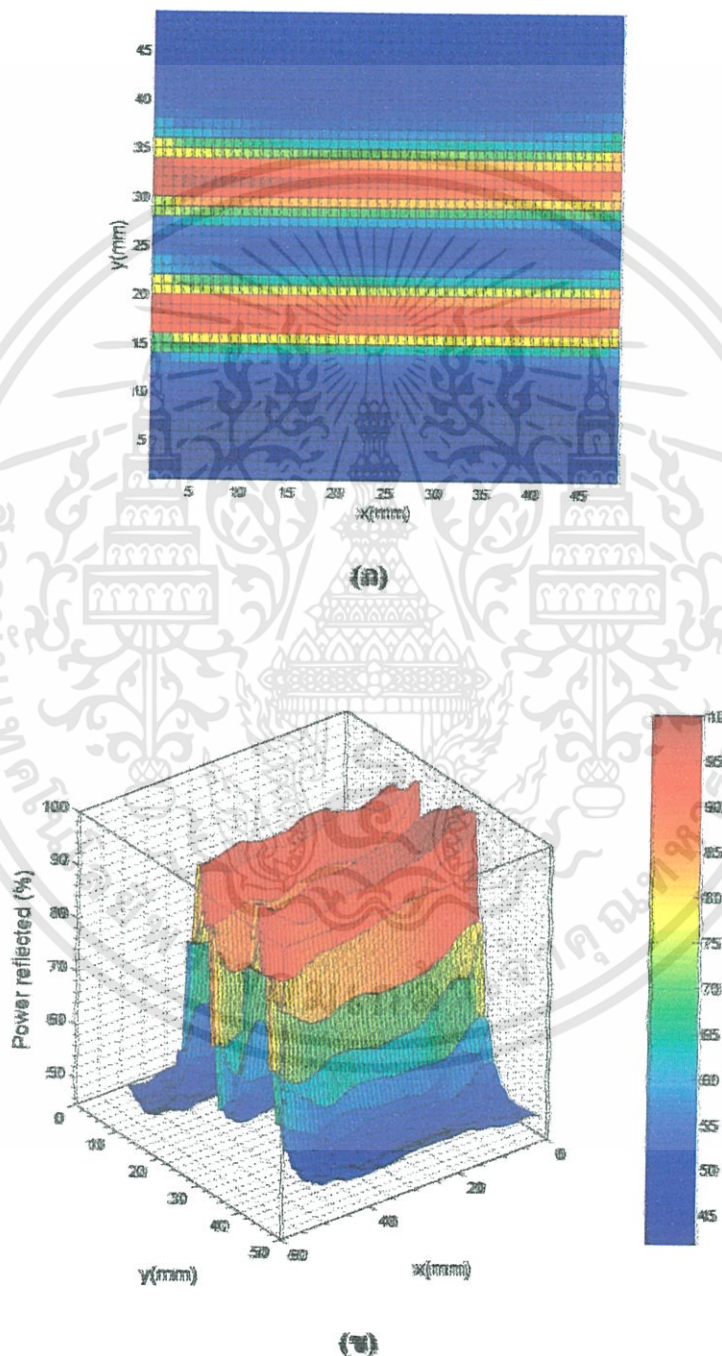


รูปที่ 4.17 ภาพวาดรูปที่ 4.28 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

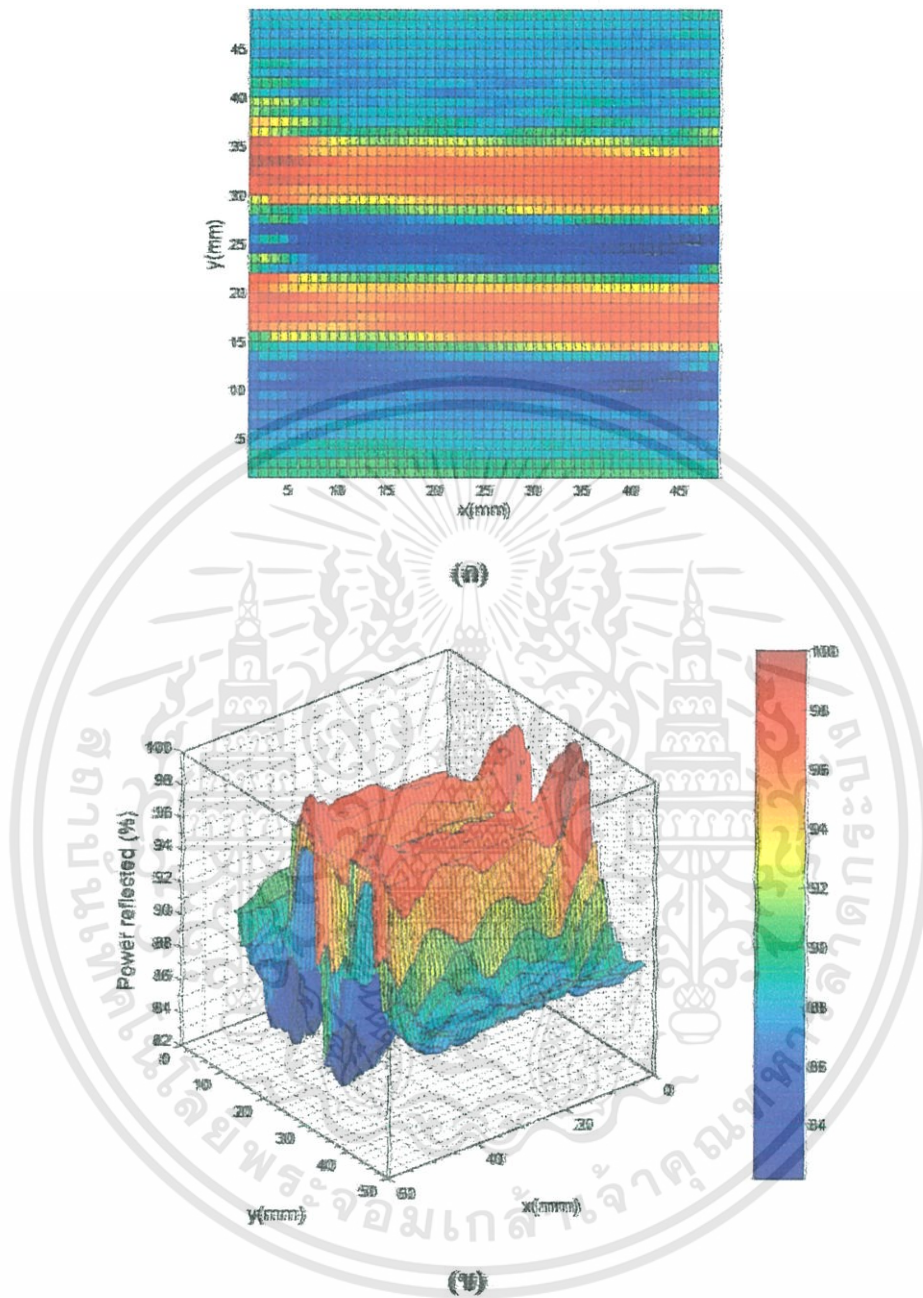
#### 4.3.1.2 วัตถุตัวอย่างที่เป็นแถบทองแดง 2 เส้น

ผลของการสร้างภาพในแนวราบและค่าการกระจายของขนาดสัญญาณบนระนาบ 2 มิติของวัตถุรูปที่ 3.29, 3.30, 3.31 และ 3.32 โดยใช้หัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา และ 60 องศา เป็นดังรูปที่ 4.18 - 4.25 ตามลำดับ



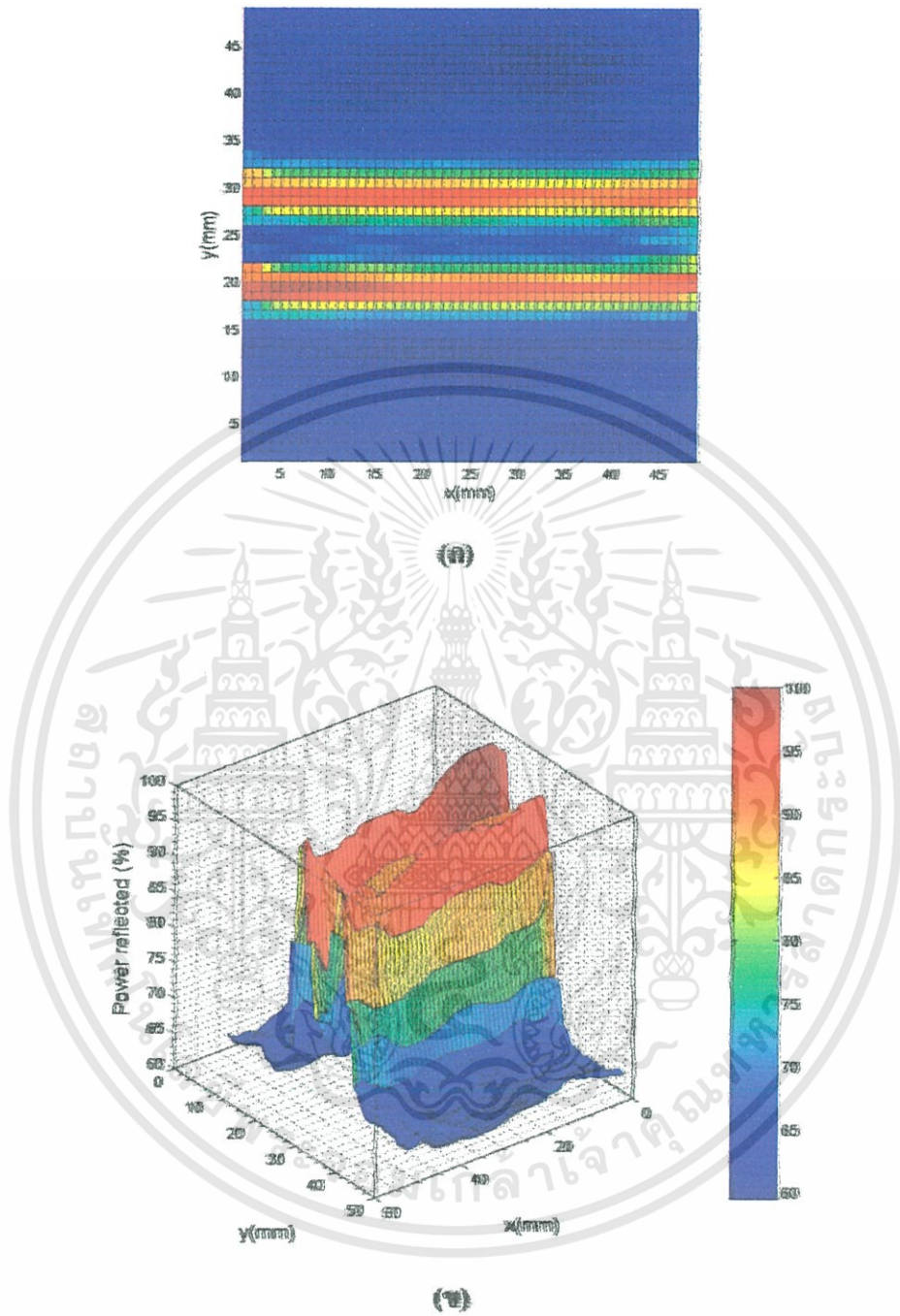
รูปที่ 4.18 ภาพวัตถุรูปที่ 3.29 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



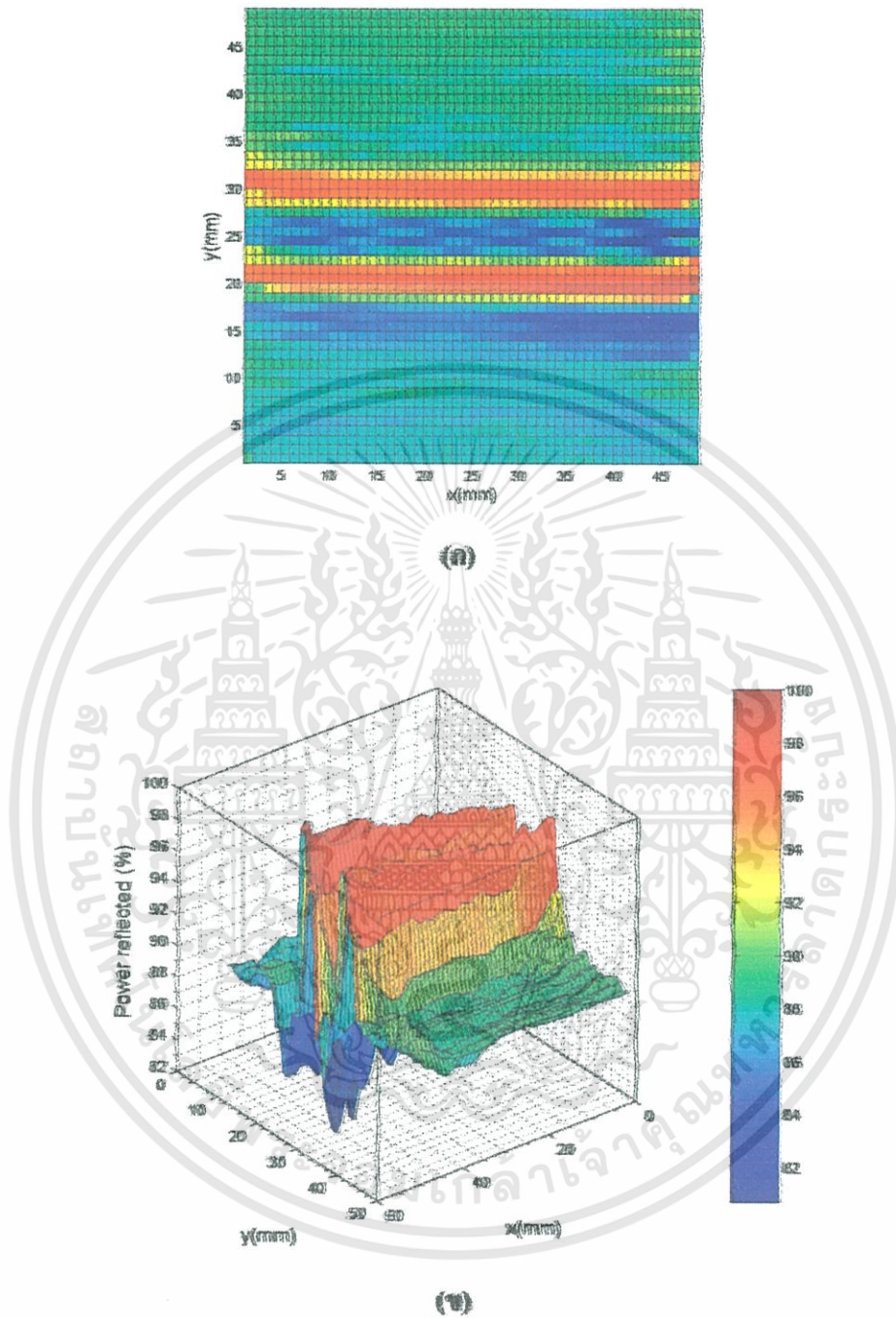
รูปที่ 4.19 ภาพวัตถุรูปที่ 3.29 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



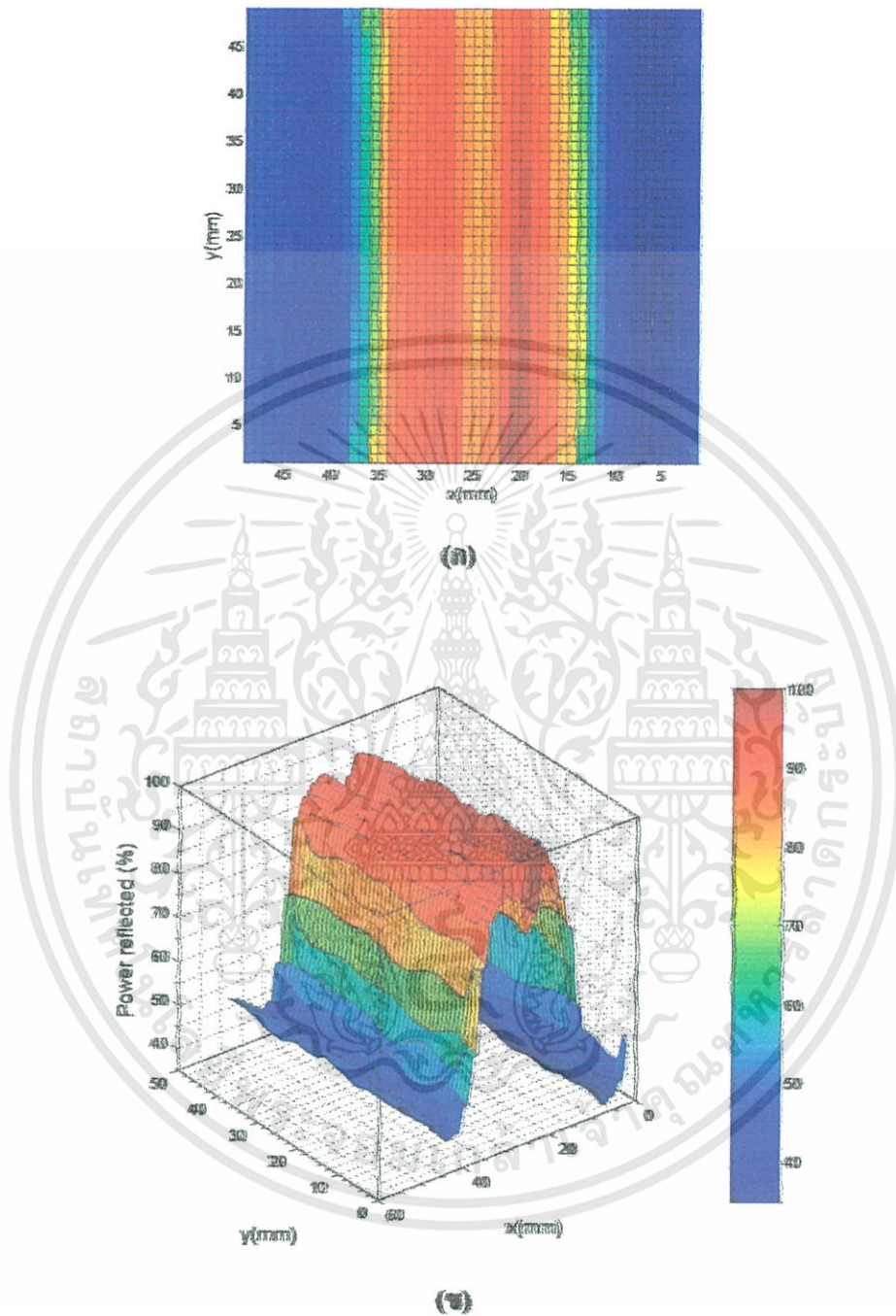
รูปที่ 4.20 ภาพวัตถุรูปที่ 3.30 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



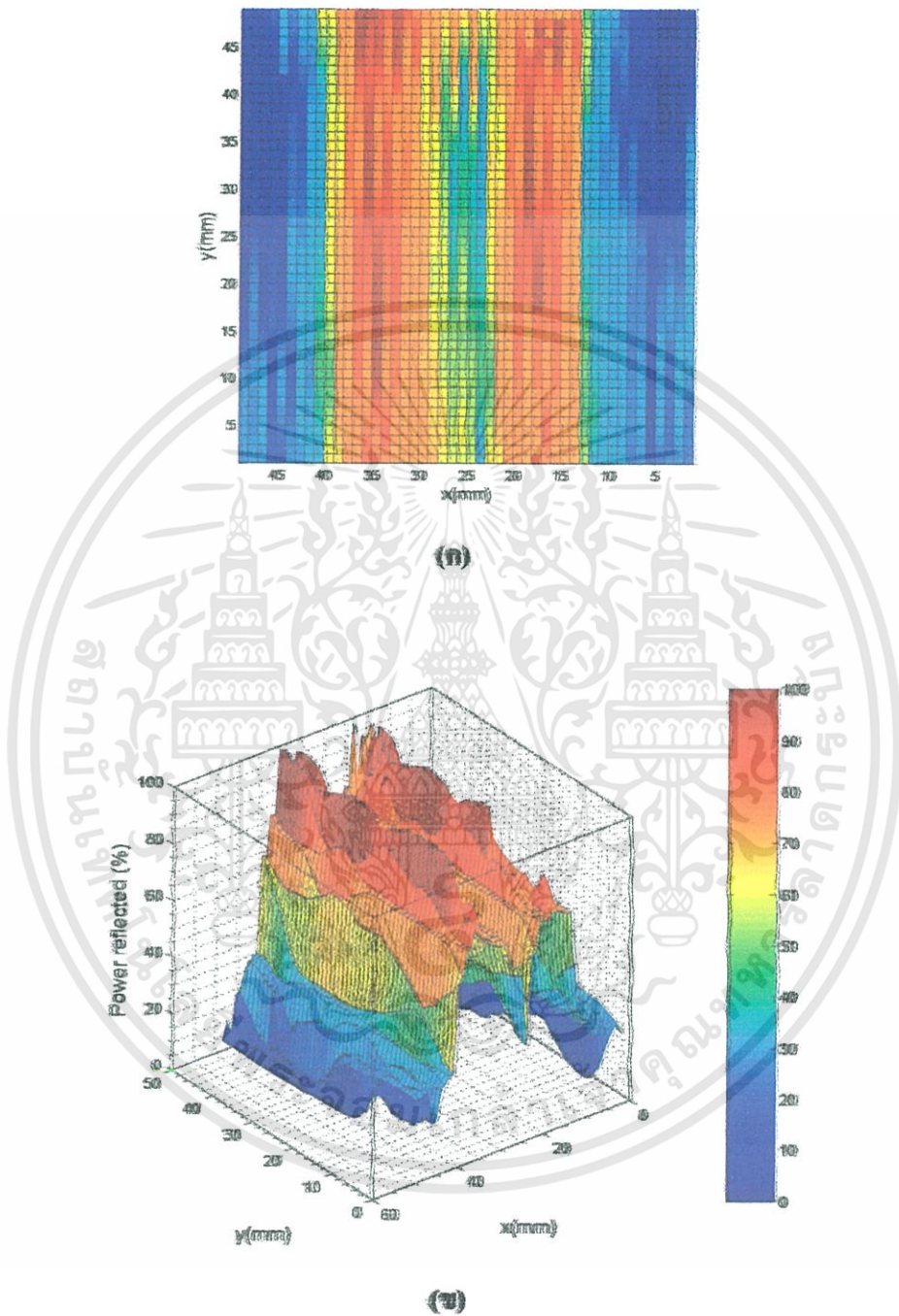
รูปที่ 4.21 ภาพวัตถุรูปที่ 3.30 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



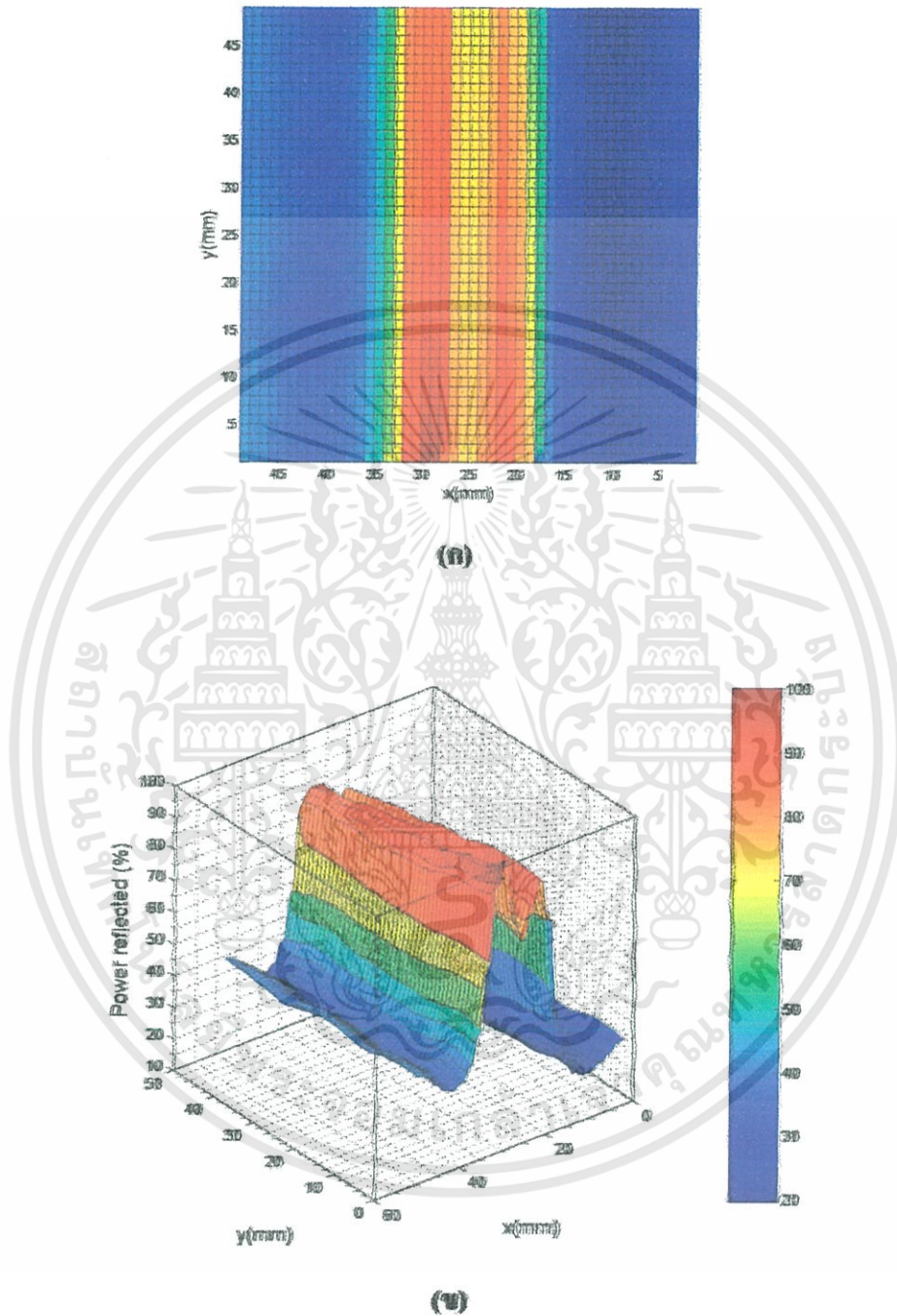
รูปที่ 4.22 ภาพวาดรูปที่ 3.31 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



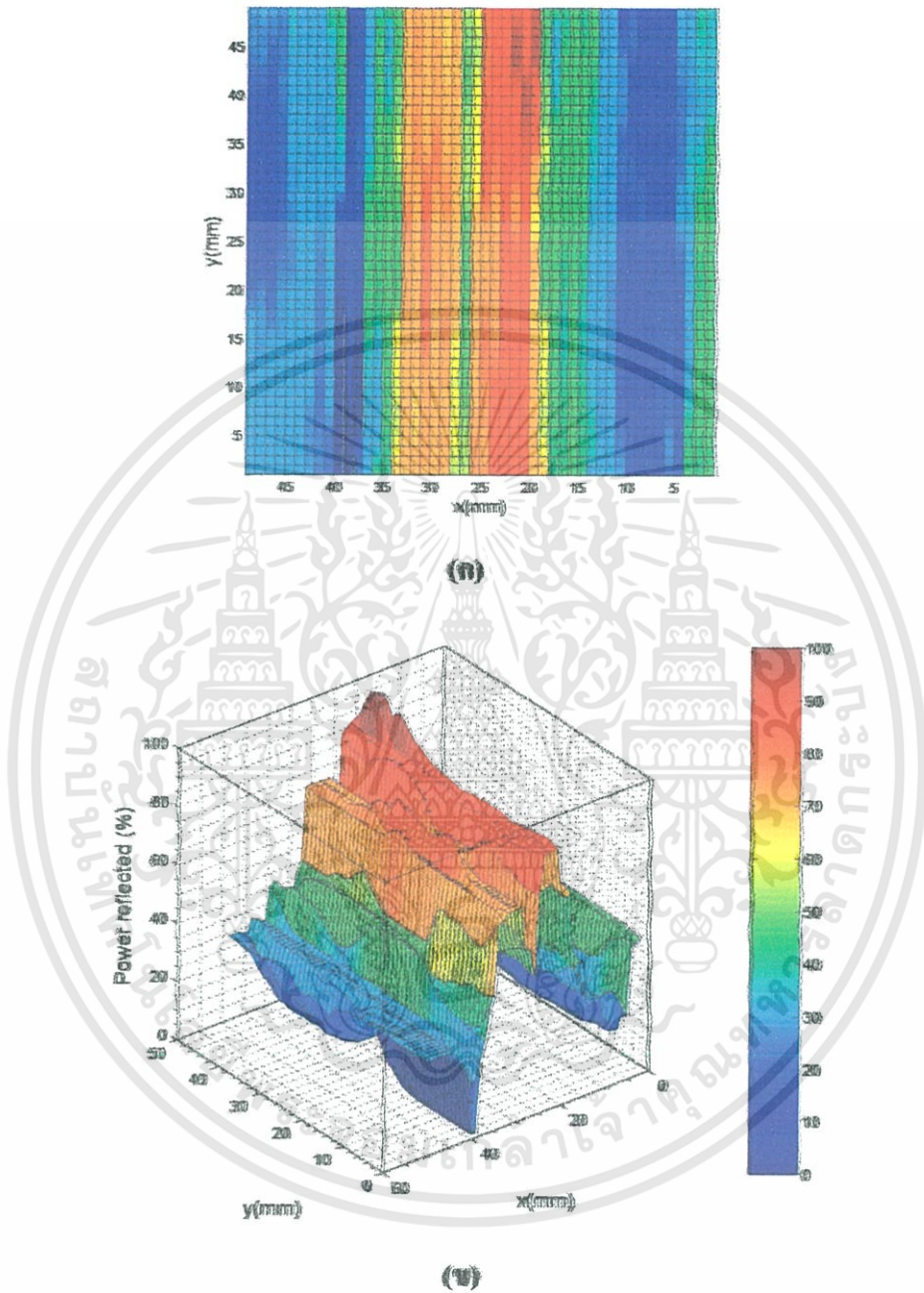
รูปที่ 4.23 ภาพวาดรูปที่ 3.31 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา (ก) 2 เมตร (ข) 3 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ภาพตัดดูรูปที่ 3.32 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

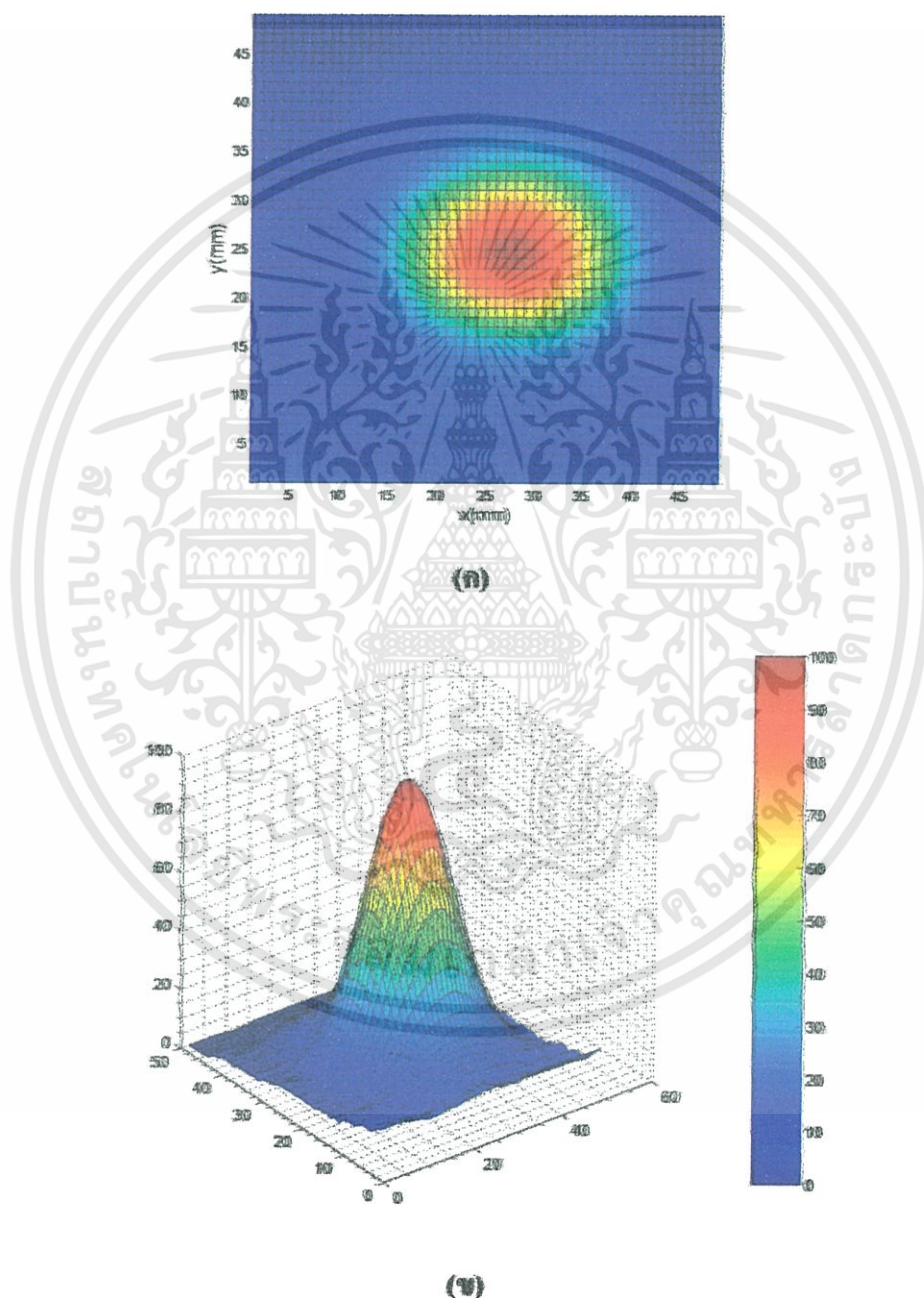


รูปที่ 4.25 ภาพวัตถุรูปที่ 3.32 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

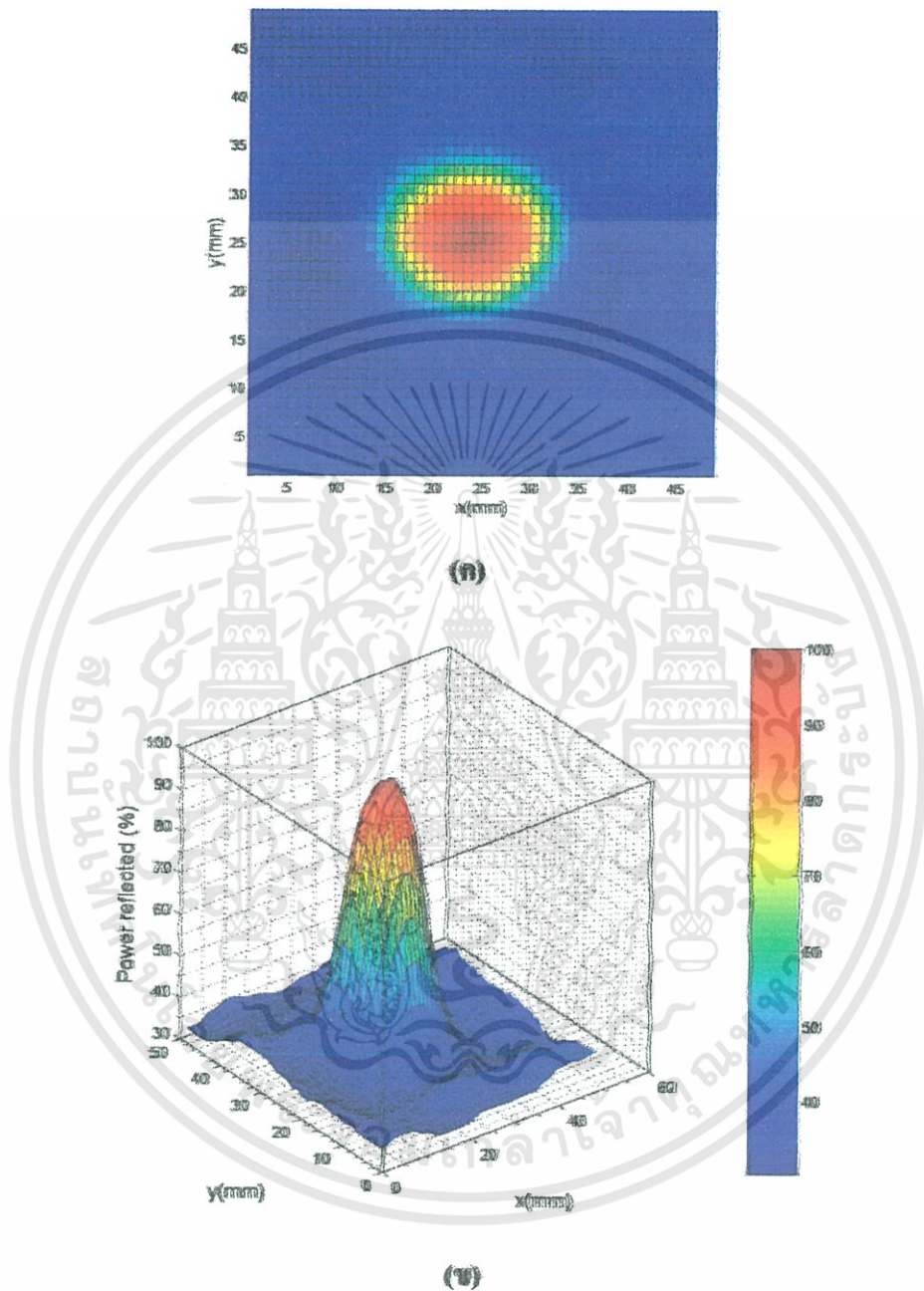
### 4.3.2 วัตถุตัวอย่างที่เป็นเหรียญโลหะรูปวงกลม

ผลของการสร้างภาพในแนวราบและค่าการกระจายของขนาดสัญญาณบนระนาบ 2 มิติ ของวัตถุรูปที่ 3.33 และ 3.34 โดยใช้หัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา และ 60 องศา เป็นดั่งรูปที่ 4.26 - 4.29 ตามลำดับ



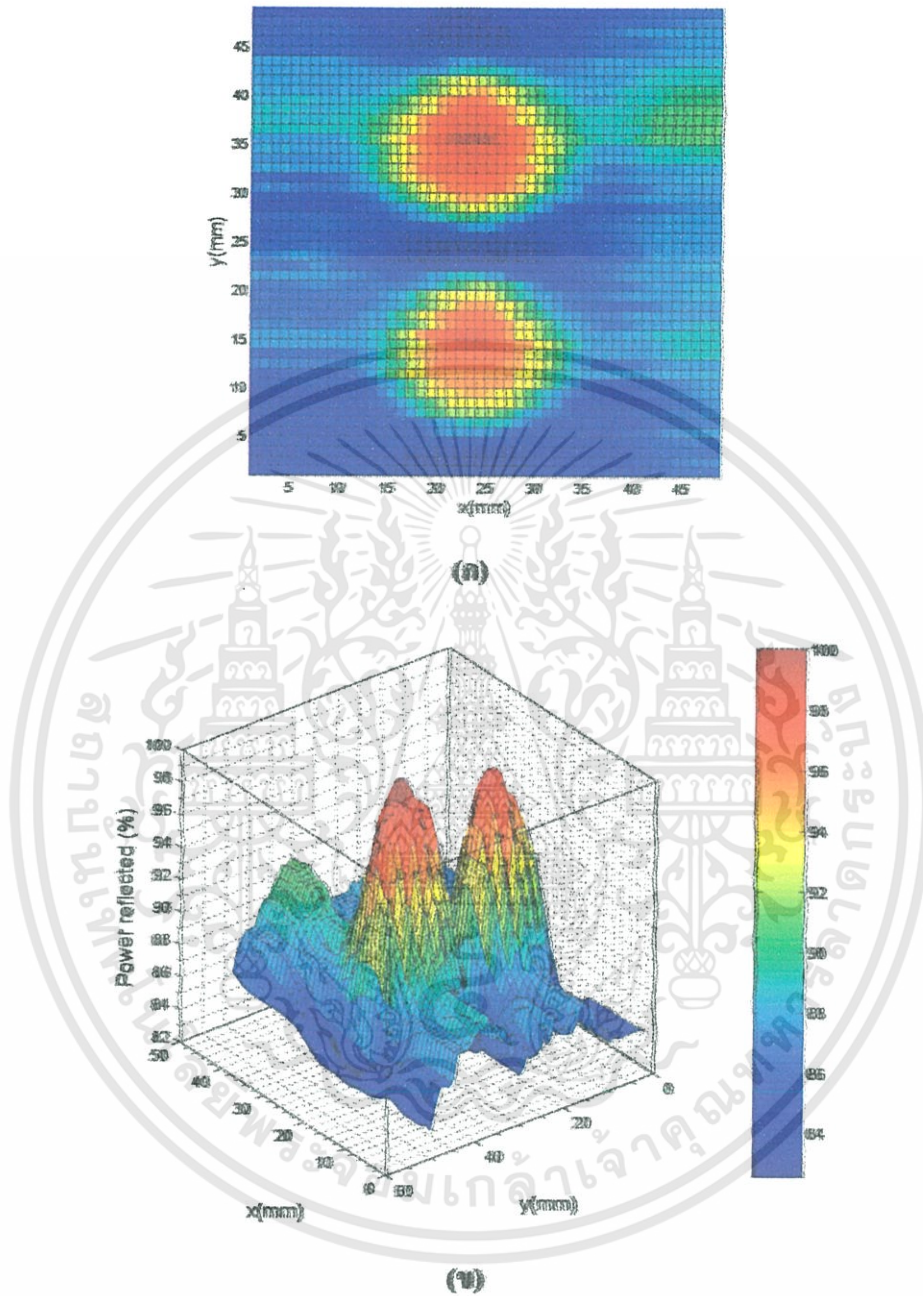
รูปที่ 4.26 ภาพวัตถุรูปที่ 3.33 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



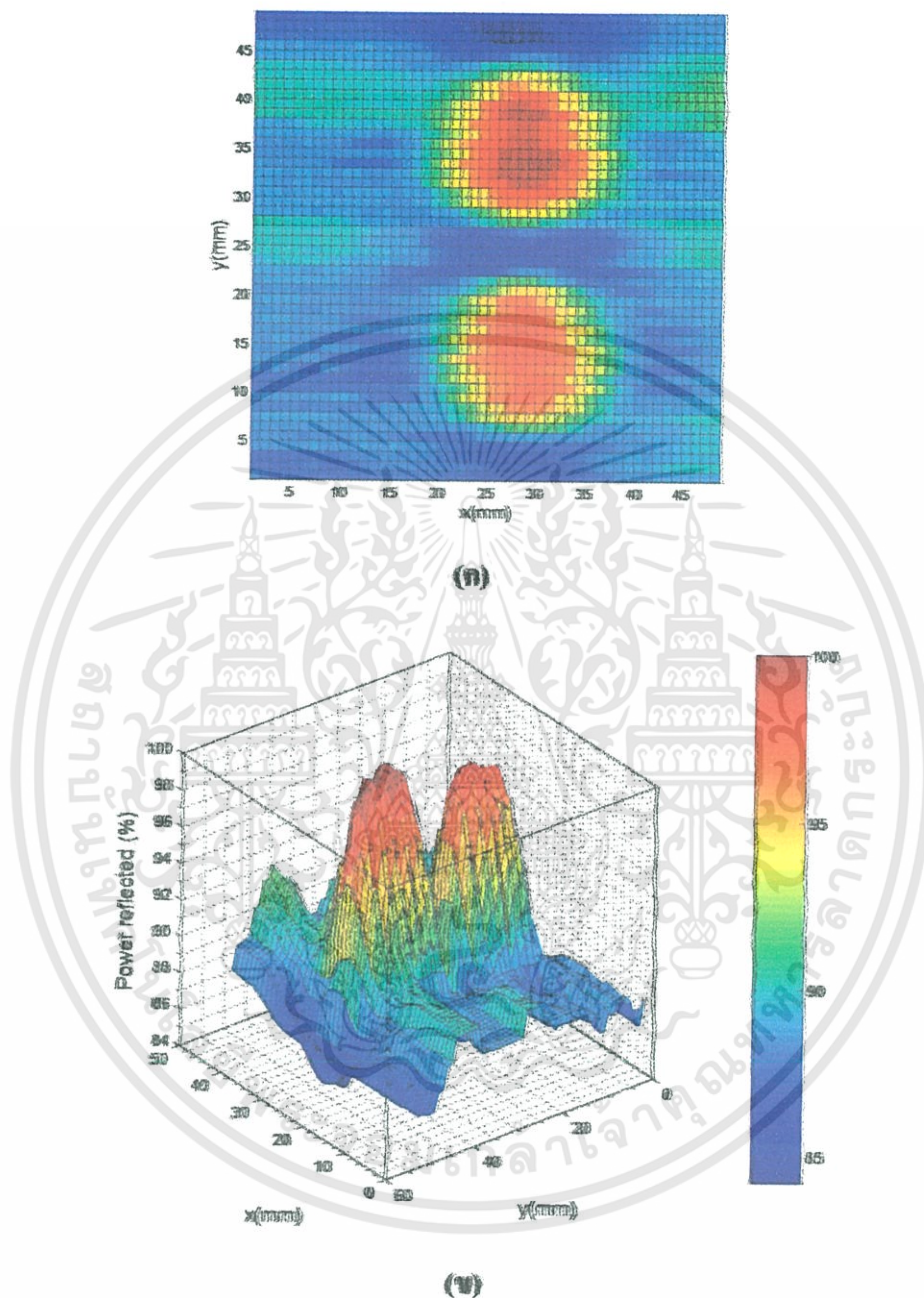
รูปที่ 4.27 ภาพวาดลวดรูปที่ 3.33 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 ภาพวัตถุรูปที่ 3.34 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 90 องศา (ก) 2 เมตร (ข) 3 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ภาพวัตถุรูปที่ 3.34 จากหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศา (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ

จากผลการเก็บข้อมูลเพื่อการสร้างภาพด้วยระบบกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระบบเลื่อนท่อนำคลื่นปลายเปิดที่ได้พัฒนาและสร้างขึ้น พบว่า ภาพที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลที่เก็บด้วยระบบนี้ มีความคมชัดและใกล้เคียงกับวัตถุต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ระบบกล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ระบบเลื่อนท่อนำคลื่นปลายเปิด ที่ทำการพัฒนาขึ้น ทำงานที่ความถี่ 9.3 กิกะเฮิร์ตซ์ กำลังส่ง 10 มิลลิวัตต์ มีขนาดพื้นที่เก็บข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ที่  $50 \times 50$  ตารางมิลลิเมตร ทำการเก็บข้อมูล  $49 \times 49 = 2401$  ข้อมูล ด้วยการเลื่อนตำแหน่งวัตถุเพื่อทำการเก็บข้อมูล โดยมีระยะในการเลื่อนครั้งละ 1 มิลลิเมตร ขับเคลื่อนแทนวางวัตถุด้วยสเตปมอเตอร์ โดยระบบที่สร้างขึ้นนี้ทำงานในแบบกึ่งอัตโนมัติ พร้อมกันนี้ได้ทำการสร้างหัวส่งและรับสัญญาณขึ้น 2 แบบ ได้แก่ แบบมุม 90 องศา และแบบมุม 60 องศา เพื่อเปรียบเทียบความสามารถของหัวส่งและรับสัญญาณ

จากผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างหัวส่งและรับสัญญาณกับพิวระนาบวัตถุที่นำไปสู่การตั้งระยะห่างระหว่างหัวส่งและรับสัญญาณกับพิวระนาบวัตถุของระบบซึ่งเท่ากับ 1 มิลลิเมตร และการทดสอบหัวส่งและรับสัญญาณที่สร้างขึ้นซึ่งพบว่า ความละเอียดของในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับแนวยาวของสลิตของหัวส่งและรับสัญญาณใน 2 แนวนั้นมีค่าต่างกัน โดยที่ความละเอียดในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของสลิตของหัวส่งและรับสัญญาณทั้งสองแบบมีค่าเท่ากัน คือ 5 มิลลิเมตร ส่วนความละเอียดในแนวขนานกับแนวยาวของสลิตนั้นเป็น 8 มิลลิเมตร โดยพบว่าหัวส่งและรับสัญญาณแบบมุม 60 องศาที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบมุม 90 องศา แสดงให้เห็นว่ามุมของหัวส่งและรับสัญญาณนั้นมีผลต่อความละเอียดในแนวขนานกับแนวยาวของสลิต

ปัญหาผลการจำลองการทำงานในทางทฤษฎียังมีความแตกต่างจากผลการทดลองเนื่องด้วยขอบเขตปริมาตรที่ใช้ในการคำนวณไม่ใหญ่มากนัก แต่ต้องใช้เวลาในการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์เป็นเวลานานมาก จึงเกิดความคลาดเคลื่อนได้

ทั้งนี้การทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นเน้นไปในการระบุลักษณะของวัตถุที่เป็นโลหะ และเนื่องจากพื้นที่ในการเก็บข้อมูลไม่ใหญ่มาก วัตถุตัวอย่างจึงต้องเป็นวัตถุขนาดเล็ก ผลจากการทดสอบระบบ พบว่า ภาพที่ได้มีความชัดเจนและลักษณะใกล้เคียงกับวัตถุต้นแบบ

## 5.2 ปัญหาที่พบ

ปัญหาที่พบหลังจากการพัฒนาระบบคลังจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ระบบเลื่อนท่อนำคลื่นปลายเปิด ได้แก่ ปัญหาจากเสถียรภาพของสัญญาณ เนื่องจากการเลื่อนตำแหน่งทำให้เกิดการสั่นสะเทือนส่งผลกระทบต่อสัญญาณที่วัดได้ เพราะสัญญาณที่วัดได้มีขนาดเล็ก

ปัญหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งในการเก็บข้อมูลและการจัดเรียงจะต้องทำให้สอดคล้องกัน เพราะจะส่งผลต่อการประมวลผล

## 5.3 แนวทางการพัฒนา

### 5.3.1 พัฒนาหัวส่งและรับสัญญาณ

เพื่อที่จะทำให้ได้ความละเอียดในการแยกแยะของระบบที่ดีขึ้น จำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาหัวส่งและรับสัญญาณขึ้นในรูปแบบปลายเข็ม ซึ่งจะต้องมีการปรับปรุงระบบเพิ่มขึ้น

### 5.3.2 พัฒนาด้านการเก็บข้อมูล

เพื่อให้ได้ระบบที่มีประสิทธิภาพ จะต้องมีการปรับระบบกลไกการเก็บข้อมูล ให้มีความละเอียดมากขึ้น และลดปัญหาอันเนื่องจากการสั่นของแท่นวางวัตถุขณะเลื่อนเก็บข้อมูล

### 5.3.3 พัฒนาด้านขีดความสามารถในการคำนวณและประมวลผล

ควรจะต้องให้รวดเร็วยิ่งขึ้น เพื่อจะได้ทำการขยายขอบเขตปริมาตรการพิจารณาให้ใหญ่มาก ๆ ได้

### 5.3.4 พัฒนาด้านทฤษฎีในการประมวลผลสร้างภาพ

เนื่องจากหัวส่งและรับสัญญาณมีขนาดใหญ่ซึ่งทำให้ได้ข้อมูลจากการสะท้อนสัญญาณมาจากในหลายตำแหน่ง ดังนั้นเมื่อคำนึงถึงเงื่อนไขนี้ จึงควรทำให้การประมวลผลมีความซับซ้อนมากขึ้น จึงต้องพัฒนาด้านทฤษฎีในการประมวล เพื่อช่วยให้ภาพที่ได้มีความสมบูรณ์และชัดเจนขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สุวรรณ กุศลาราม. 2537. **ทัศนศาสตร์กายภาพ**. กรุงเทพฯ: คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] Nearfield System Inc. “**Near – Field 101.**” [Online]. Available : <http://www.nearfield.com/theory.htm>. 2006.
- [3] Agilent Technologies. “**Near – Field vs Far – Field.**” [Online]. Available : [http://www.home.agilent.com/upload/cmc\\_upload/All/NSI-near-far.pdf](http://www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/NSI-near-far.pdf). 2004.
- [4] Paesler, M. A. and Moyer P. J. 1996. **Near-field optics theory, instrumentation, and application**. New York : John Wiley.
- [5] Chen, L. F. et. al. 2004. **Microwave electronics measurement and materials characterization**. Chichester : John Wiley.
- [6] Golosovsky, M. and Davidov, D. 1996. “ Novel millimeter-wave near-field resistivity microscope. ” **Applied Physics Letters**. vol. 68, no.11 : 1579 – 1581.
- [7] Golosovsky, M. et. al. 1996. “ High-spatial resolution resistivity mapping of large-area YBCO films by a near-field millimeter-wave microscope. ”. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**. vol. 44, no. 7 : 1390 – 1392.
- [8] Lann, A. et. al. 1998. “ Combine millimeter-wave near-field microscope and capacitance distance control for the quantitative mapping of sheet resistance of conducting layers. ” **Applied Physics Letters**. vol. 73, no.19 : 2832 – 2834.
- [9] Golosovsky, M., Lann, A. and Davidov, D. 1998. “ A millimeter-wave near-field scanning probe with an optical distance control. ” **Ultramicroscopy**. 71 : 133 – 141.
- [10] Davidov, D. and Golosovsky, M. **Near-field resistivity microscope**. U.S. patent no. 5781018, July 1998.
- [11] Wei, T. et. al. 1996. “ Scanning tip microwave near-field microscope. ” **Applied Physics Letters**. vol. 68, no.24 : 3506 – 3508.
- [12] Gao, C. et. al. 1997. “ High spatial resolution quantitative microwave impedance microscopy by scanning tip microwave near-field microscope. ” **Applied Physics Letters**. vol. 71, no.13 : 1872 – 1874.
- [13] Takeuchi, I. et. al. 1997. “ Low temperature scanning-tip microwave near-field microscopy of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  films. ” **Applied Physics Letters**. vol. 71, no.14 : 2026 – 2028.

- [14] Xiang, X. D. et. al. **Scanning tip microwave near field microscope**. U.S. patent no. 5821410, October 1998.
- [15] Gao, C. et. al. 1998. “Quantitative microwave near-field microscopy of dielectric properties.” **Review of Scientific Instruments**. vol. 69, no. 11 : 3864 – 3851.
- [16] Wang, Z. et. al. 2005. “Quantitative measurement of sheet resistance by evanescent microwave probe.” **Applied Physics Letters**. vol. 86 : 1531181 – 1531183.
- [17] Steinhauer, D. E. et. al. 1998. “Quantitative imaging of sheet resistance with a scanning near-field microwave microscope.” **Applied Physics Letters**. vol. 72, no.7 : 861 – 863.
- [18] Thanawalla, A. S. et. al. 1998. “Microwave near-field imaging of electric fields in a superconducting microstrip resonator.” **Applied Physics Letters**. vol. 73, no.17 : 2491 – 2493.
- [19] Dutta, S. K. et. al. 1999. “Imaging microwave electric fields using a near-field scanning microwave microscope.” **Applied Physics Letters**. vol. 74, no.1 : 156 – 158.
- [20] Anlage, S. M. et. al. **Near-field scanning microwave microscope having a transmission line with an open end**. U.S. patent no. 5900618, May 1999.
- [21] Thanawalla, A. S. et. al. 1999. “Frequency following imaging of electric field from resonant superconducting devices using a scanning near-field microwave microscope.” **IEEE Transaction on Applied Superconductivity**. vol. 9, no.2 : 3042 – 3045.
- [22] Tselev, A. et. al. 2003. “Near-field microwave microscope with improved sensitivity and spatial resolution.” **Review of Scientific Instruments**. vol. 74, no. 6 : 3167 – 3170.
- [23] Imtiaz, A. et. al. 2005. “Near-field microwave microscopy on nanometer length scales.” **Journal of Applied Physics**. vol. 97 : 0443020 – 0443026.
- [24] Tabib, M. et. al. 1999. “0.4  $\mu\text{m}$  spatial resolution with 1 GHz () evanescent microwave probe.” **Review of Scientific Instruments**. vol. 70, no. 3 : 1725 – 1729.
- [25] Tabib-Azar, M. et. al. 1999. “Nondestructive superresolution imaging of defects and nonuniformities in metals, semiconductor, dielectrics, composites, and plants using evanescent microwave.” **Review of Scientific Instruments**. vol. 70, no. 6 : 2783 – 2792.
- [26] Tabib-Azar, M. et. al. 1999. “Evanescent microwave probes on high-resistivity silicon and its application in characterization of semiconductor.” **Review of Scientific Instruments**. vol. 70, no. 7 : 3083 – 3086.

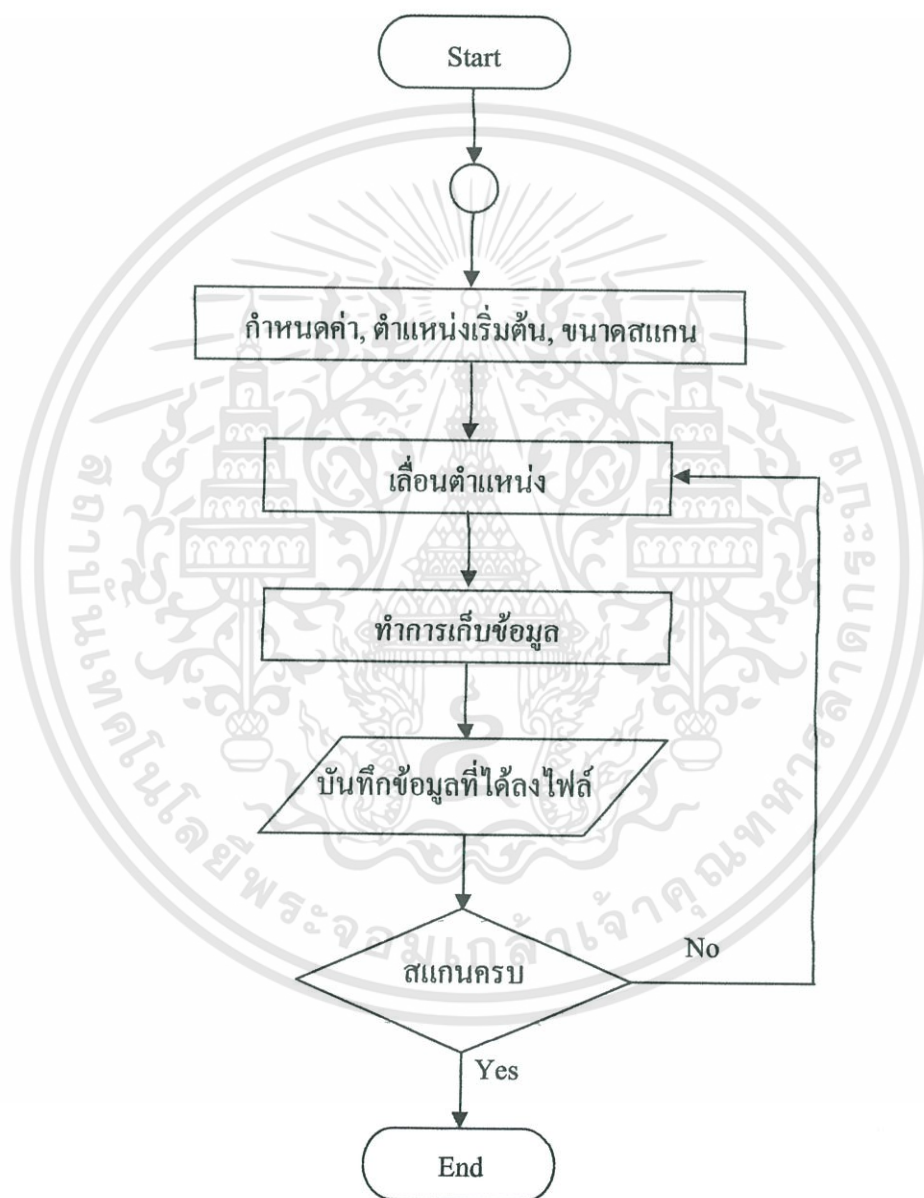
- [27] Tabib-Azar, M. and Akinwande, D. 2000. “Real-time imaging of semiconductor space-charge regions using high-spatial resolution evanescent microwave microscope.” **Review of Scientific Instruments**. vol. 71, no. 3 : 1460 – 1465.
- [28] Kalinin S. and Gruverman A., editor. 2007. **Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical phenomena at the nanoscale**. New York: Springer Science & Business Media.
- [29] Seeger, J. A. 1986. **Microwave theory, components, and devices**. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice-Hall.
- [30] SEMCAD Simulation Program, “FDTD Method”, chap.3, Reference Manual.
- [31] อติเรก แรงกสิกรณ. 2550. “การพัฒนาระบบส่งและรับคลื่นแบบอะเรย์แปดสมาชิกผลัดกันทำงานด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการสร้างภาพไมโครเวฟ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [32] Zoughi, R. 2000. **Microwave Non – Destructive Testing and Evaluation**. Dordrecht : Kluwer Academic.
- [33] ชรรณศักดิ์ วิมลเกียรติคุณ. 2545. “การศึกษาวิจัยและพัฒนาไมโครเวฟฮอโลกราฟี ในการมองภาพวัตถุโดยใช้เทคนิคการกระเจิงมอดูเลตคลื่นแสง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [34] บัณฑิต รจน์อารยานนท์. 2539. วิศวกรรมไมโครเวฟ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [35] Gandhi, O.P. 1989. **Microwave Engineering and Application**. Singapore : Pergamon Press.
- [36] Das, A. and Das, S.K. 2001. **Microwave Engineering**. Singapore : McGraw – Hill.
- [37] Oriental Motor. “2-Phase and 5-Phase Step Motor Comparison: Motor control.” [Online]. Available : <http://www.orientalmotor.com/MotionControl101/2phase-v-5phase.html>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.  
แสดงแผนภาพขั้นตอนการทำงาน

แผนภาพขั้นตอนการทำงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

### แสดงโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการทำงานของระบบ

```

clear
port1 = serial('COM1');
port2 = serial('COM2');
fopen(port1);
fopen(port2);
fprintf('Open successfully.\n');

nx = 49; %dimensionless
ny = 49; %dimensionless
dx = 1; %millimeter
dy = 1; %millimeter
xstep = dx*500; %step
ystep = dy*500; %step
dt = 1; %second

fprintf('number of points in x-axis is %d points\n',nx);
fprintf('number of points in y-axis is %d points\n',ny);
fprintf('delta x is %f millimeters or %d step\n',dx,xstep);
fprintf('delta y is %f millimeters or %d step\n',dy,ystep);
fprintf('Delay time is %f sec',dt);

% speed initialize
fprintf(port2,'P:17P5000');
fprintf(port2,'P:18P1000');
fprintf(port2,'P:19P100');
fprintf(port2,'P:33P5000');
fprintf(port2,'P:34P1000');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

fprintf(port2,'P:35P100');

plusxstep = ['M:XP' num2str(xstep)];
minusxstep = ['M:XP' num2str(-xstep)];
plusystep = ['M:YP' num2str(ystep)];

clear data;
i = 1;
j = 1;
fprintf(port1,':MEAS:VAV?')
data(j,i) = str2num(fscanf(port1));
pause(dt)
while j<=ny
    direction = (-1)^(j+1);
    if direction==1
        for i=2:1:nx
            fprintf(port2,plusxstep);
            fprintf(port2,'G:');
            pause(dt)
            fprintf(port1,':MEAS:VAV?')
            data(j,i) = str2num(fscanf(port1));
        end
    elseif direction==(-1)
        for i=nx-1:-1:1
            fprintf(port2,minusxstep);
            fprintf(port2,'G:');
            pause(dt)
            fprintf(port1,':MEAS:VAV?')
            data(j,i) = str2num(fscanf(port1));
        end
    end
end
j = j + 1;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if j>ny, break; end;
fprintf(port2,plusystep);
fprintf(port2,'G:');
pause(dt)
fprintf(port1,':MEAS:VAV?')
data(j,i) = str2num(fscanf(port1));
end

```

```

lowerlimit = -50000;
cmd = ['A:YP' num2str(lowerlimit)];
fprintf(port2,cmd);

surf(data)

pause (10)

lowerlimit = -55000;
cmd = ['A:XP' num2str(lowerlimit)];
fprintf(port2,cmd);

```



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวศลิษา วังทอง
วัน เดือน ปีเกิด	26 มกราคม 2523 ที่นครปฐม
ที่อยู่	64/23 หมู่ที่ 3 ต.บางกระเบา อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม 73120
E-mail	wt.salisa@gmail.com
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2541 – 2545	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ (โพลีเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ. 2545 – 2547	ตำแหน่ง วิศวกรประกันคุณภาพ บริษัทอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จำกัด (มหาชน)
พ.ศ. 2547 – ปัจจุบัน	ผู้ช่วยนักวิจัย ประจำห้องปฏิบัติการเครื่องมือทางการแพทย์และ สิ่งแวดล้อม ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548	ผลงานวิจัย “การสร้างภาพภาคตัดขวางของวัตถุด้วยวิธีไมโครเวฟโทโม กราฟี” ตีพิมพ์ใน วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม หน้า 49 – 63
พ.ศ. 2549	ผลงานวิจัย “การพัฒนากล้องจุลทรรศน์สนามไมโครเวฟระยะใกล้ระบบ ท่อนำคลื่น” เสนอใน “การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาฟิสิกส์แห่งชาติ ครั้งที่ 1” ณ เชื้อนจุฬากรณ์ จังหวัดชัยภูมิ (29 มิ.ย. – 1 ก.ค. 2549)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้