



## การตรวจสอบความผิดปกติในวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ

โดย

นายชรินทร์	เล่าเจริญ	รหัสนักศึกษา B5530410
นางสาวพรอูมา	พิมพ์ศรี	รหัสนักศึกษา B5511327
นางสาวสุพิชชา	เลื่อนไสลสุข	รหัสนักศึกษา B5530502

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 527499 โครงการนิสิตกรรมโทคมมนาคม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทคมมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2554

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประจำภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2558

# การตรวจสอบความผิดปกติในวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ

คณะกรรมการสอบโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์  
ที่ปรึกษาโครงการ)



(รองศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุซหารสกุล  
กรรมการ



(รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุซหารสกุล)  
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำรายงานโครงการฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
รายวิชา 527499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2558

โครงการ	การตรวจสอบความผิดปกติในวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ		
โดย	1.นายชรินทร์	เล่าเจริญ	รหัสนักศึกษา B5530410
	2.นางสาวพรอมา	พิมพ์ศรี	รหัสนักศึกษา B5511327
	3.นางสาวสุพิชชา	เลื่อมใสสุข	รหัสนักศึกษา B5530502
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม		
ภาคการศึกษาที่	1/2558		

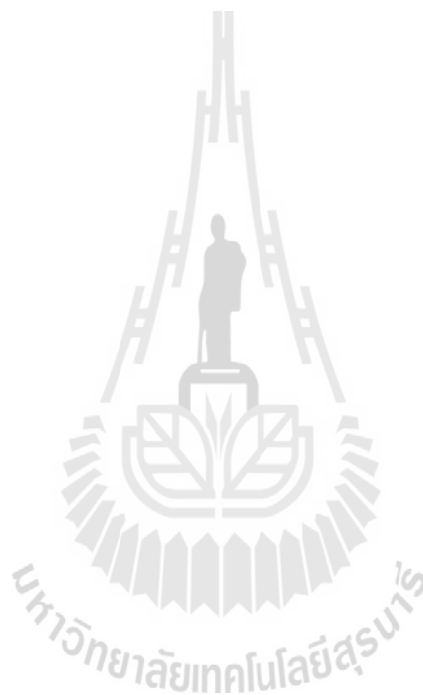
### บทคัดย่อ

ปัจจุบันการค้นหาลักษณะแปลกปลอมหรือความผิดปกติของวัสดุต่างๆที่เราไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่านั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการนำข้อมูลเพื่อไปซ่อมแซมแก้ไข ดังนั้น โครงการนี้จึงได้นำเสนอการตรวจสอบความผิดปกติในวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้หลักการทำงานของสายอากาศแบบสล็อต(Slot Antenna) เมื่อกคลื่นแผ่ออกจากสายอากาศภาดส่ง คลื่นจะเดินทางไปตามกระทบกับวัตถุและสะท้อนไปยังสายอากาศภาดรับ ในการออกแบบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบสายอากาศสล็อต (Slot Antenna) ขนาด 4x4 และระบบป้อนที่ความถี่ 5 GHz โดยจะศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจากวัตถุชิ้นนั้น แล้วนำมาคำนวณหาวัตถุสิ่งแปลกปลอมหรือความผิดปกติของวัสดุ

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำโครงการใคร่ขอแสดงความขอบพระคุณท่านอาจารย์ผศ.ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์  
ที่เป็นผู้ให้คำปรึกษาโครงการ พร้อมทั้งแนวทางแก้ไขปัญหา และข้อเสนอแนะต่างๆ ทำให้โครงการลุล่วง  
ไปด้วยดี พร้อมกันนี้ใคร่ขอขอบพระคุณต่อเจ้าหน้าที่ของภาคสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่เอื้ออำนวย  
ความสะดวกในการติดต่อโครงการ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณรุ่นพี่ และเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้  
คำแนะนำในการจัดทำโครงการ

นายชรินทร์      เต้าเจริญ  
นางสาวพรอุมา      พิมพ์ศรี  
นางสาวสุพิชชา      เลื่อมใสสุข



## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญรูปภาพ	ง
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตการทำงาน	2
1.4 ขั้นตอนการทำงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	4
2.1 สายอากาศ	4
2.1.1 ประเภทของสายอากาศ	5
2.1.1.1 สายอากาศแบบสาย (Wire Antenna)	5
2.1.1.2 สายอากาศแบบช่อง (Aperture Antenna)	5
2.1.1.3 สายอากาศแบบไมโครสตริป (Microstrip Antenna)	5
2.1.1.4 สายอากาศแบบอะเรย์ (Array Antenna)	6
2.1.1.5 สายอากาศแบบจานสะท้อน (Dish Antenna)	6
2.1.2 ประเภทของสายอากาศแบ่งตามลักษณะการรับ - ส่ง คลื่น	7
2.1.2.1 สายอากาศแบบเจาะจงทิศทาง (Directional Antenna)	7
2.1.2.2 สายอากาศแบบรอบตัว (OmniDirectional Antenna)	7
2.1.2.3 สายอากาศไอโซทรอปิก (Isotropic Antenna)	7
2.2 สายอากาศไมโครสตริป	8
2.2.1 แผ่นไมโครสตริป (Microstrip Pattern)	9
2.2.2 ระนาบกราวด์ (Ground Plane)	9

## สารบัญ (ต่อ)

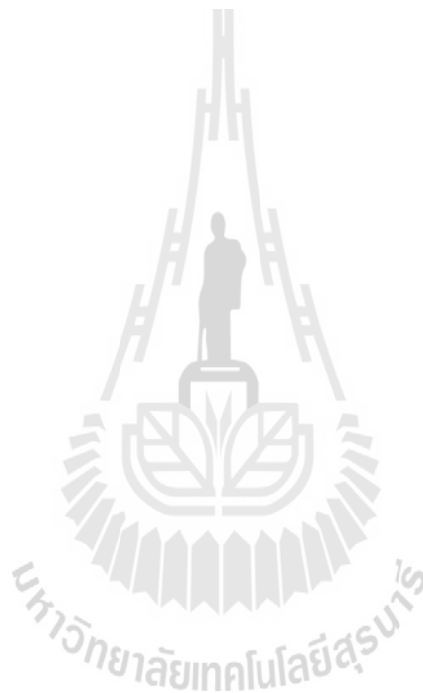
2.2.3 ไดอิเล็กตริก (Dielectric)	9
2.2.3.1 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Dielectric Constants : $\epsilon_r$ )	10
2.2.3.2 ค่ามุมสัมพัทธ์การสูญเสีย (Loss tangent : $\tan\delta$ )	10
2.2.3.3 ค่าคงตัวของการนำความร้อน (Thermal conductivity)	10
2.2.4 สายนำสัญญาณและหัวต่อ	10
2.2.5 หลักการทำงานของสายอากาศไมโครสตริป	12
2.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด (Slot Antenna)	13
2.3.1 การแพร่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศช่องเปิด	13
2.4 สายอากาศช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยไมโครสตริปไลน์	14
2.4.1 วิธีพื้นฐานที่สำคัญในการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	15
2.4.2 การส่งผ่านคลื่นไมโครสตริปไลน์	17
2.5 ลักษณะคลื่นบนสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป	17
2.5.1 คลื่นจร (Traveling wave)	17
2.5.2 การสะท้อนคลื่น	19
2.6 การออกแบบไมโครสตริปไลน์	21
2.7 ความกว้างแถบ (Bandwidth)	22
2.8 S-parameter	22
2.9 จุดตกกระทบและการสะท้อนของคลื่น	23
2.10 Absorber	24
2.11 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)	24
<b>บทที่ 3 การออกแบบและศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna) ขนาด 4×4 และไมโครสตริปไลน์ (Microstrip Line) ที่ความถี่ 5 GHz</b>	25
3.1 บทนำ	25
3.2 การออกแบบสายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna)	25
3.2.1 การคำนวณหาค่าความกว้างไมโครสตริปไลน์	26
3.2.2 การคำนวณหาค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ ( $\lambda_g$ )	27

## สารบัญ (ต่อ)

3.3 การจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio	29
3.3.1 การศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความยาว $L$	31
3.3.2 การศึกษาผลกระทบจากการปรับความกว้างของ $w_1$	32
3.3.3 การศึกษาผลกระทบจากการปรับความกว้างของ $w_2$	33
3.3.4 การศึกษาผลกระทบจากการปรับความยาวของ $L_1$	34
3.4 การออกแบบระบบป้อนไมโครสตริปไลน์ที่ความถี่ 5 GHz	39
3.4.1 การศึกษาผลกระทบจากการปรับระยะ $D$	42
3.4.2 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว $L_2$	45
3.4.3 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว $L_3$	48
3.4.4 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว $L_4$	51
3.4.5 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว $L_5$	54
3.5 การออกแบบสายอากาศแบบสลิต (Slot Antenna) ขนาด $4 \times 4$ และไมโครสตริปไลน์ที่ความถี่ 5 GHz	59
3.5.1 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว $L_6$ เมื่อมีสายอากาศ (Slot Antenna) ขนาด $4 \times 4$	60
3.5.2 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว $L_s$ เมื่อมีสายอากาศ (Slot Antenna) ขนาด $4 \times 4$	61
3.6 การจำลองการรับส่งคลื่นของสายอากาศสลิต (Slot Antenna) กรณีไม่มีวัสดุเปลือกปลอม	66
3.7 การจำลองการรับส่งคลื่นของสายอากาศสลิต (Slot Antenna) กรณีมีวัสดุเปลือกปลอม	69
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	72
4.1 บทนำ	72
4.2 ผลการวัดสายอากาศแบบสลิต (Slot Antenna) 1 อิมิตเมนต์	72
4.3 ผลการวัดสายอากาศแบบสลิต (Slot Antenna) ขนาด $4 \times 4$	74
4.4 ผลการวัดสายอากาศแบบสลิต (Slot Antenna) ภาคส่งและภาครับขนาด $4 \times 4$	75

## สารบัญ (ต่อ)

4.5 ผลการเปรียบเทียบรูป 2 มิติ ระหว่างผลที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio กับผลการวัดจริงจากสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ขนาด 4x4	80
<b>บทที่ 5</b> ข้อสรุปของโครงการ	92
5.1 บทสรุป	92
5.2 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไขปัญหา	95
5.3 ข้อเสนอแนะ	96
5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป	96
เอกสารอ้างอิง	97
ประวัติผู้เขียน	98
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	





## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1	แสดงการตรวจสอบสิ่งผิดปกติในวัสดุด้วยคลื่น ไมโครเวฟ	1
รูปที่ 2.1	ส่วนประกอบของการสื่อสาร	5
รูปที่ 2.2	ประเภทของสายอากาศต่างๆ	6
รูปที่ 2.3	แสดงลักษณะการแพร่กระจายคลื่นต่างๆ	8
รูปที่ 2.4	สายอากาศไมโครสตริป	8
รูปที่ 2.5	หัวเชื่อมสาย BNC	12
รูปที่ 2.6	การแพร่กระจายคลื่นจากไมโครสตริปแบบช่องเปิด	13
รูปที่ 2.7	สายอากาศช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยสายไมโครสตริป	15
รูปที่ 2.8	วิธีการเลื่อนจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณ	15
รูปที่ 2.9	วิธีการปรับความยาวท่อนสั้น	16
รูปที่ 2.10	วิธีการหมุนช่องเปิด	16
รูปที่ 2.11	เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบตามขวางของไมโครสตริปไลน์	17
รูปที่ 2.12	วงจรสมมูล	18
รูปที่ 2.13	สายส่งที่ต่อโหลดไว้ที่ปลายสาย	18
รูปที่ 2.14	กฎการสะท้อนของคลื่น	23
รูปที่ 2.15	Microwave Absorber	24
รูปที่ 2.16	เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)	24
รูปที่ 3.1	สายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) 1 อีลีเมนต์	29
รูปที่ 3.2	กราฟแสดงค่า $S_{11}$ และค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการคำนวณเบื้องต้น	30
รูปที่ 3.3	ศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความยาว $L$	31
รูปที่ 3.4	การเปรียบเทียบ $S_{11}$ เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า $L$	31
รูปที่ 3.5	แสดงการปรับความกว้างของ $w_1$	32
รูปที่ 3.6	การเปรียบเทียบค่า $S_{11}$ เมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของ $w_1$	33
รูปที่ 3.7	แสดงการปรับความกว้างของ $w_2$	33
รูปที่ 3.8	การเปรียบเทียบค่า $S_{11}$ เมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของ $w_2$	34
รูปที่ 3.9	แสดงการปรับความยาวของ $L_1$	34

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 3.10 ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการปรับความยาวของ $L_1$ ที่ได้จากการคำนวณ $\frac{\lambda_g}{2}$	35
รูปที่ 3.11 การเปรียบเทียบค่า $S_{11}$ เมื่อปรับความยาวของ $L_1$	35
รูปที่ 3.12 กราฟแสดงค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการปรับค่าทั้งหมด	36
รูปที่ 3.13 รูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสล롯 (Slot Antenna) ขนาด 1 อิลีเมนต์	37
รูปที่ 3.14 ระบบป้อนไมโครสตริปไลน์ที่ความถี่ 5 GHz	39
รูปที่ 3.15 ค่าที่ได้จากการออกแบบระบบป้อนที่ได้ค่าจากการคำนวณ	40
รูปที่ 3.16 แสดงรูปการแผ่คลื่นของสนามไฟฟ้า	41
รูปที่ 3.17 ศึกษาผลกระทบจากการปรับระยะ $D$	42
รูปที่ 3.18 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่า $S_{11}$ , $S_{12}$ , $S_{21}$ และ $S_{22}$ เมื่อทำการปรับระยะ $D$	43
รูปที่ 3.19 แสดงค่าอิมพีแดนซ์เมื่อทำการปรับระยะ $D$	43
รูปที่ 3.20 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว $L_2$	45
รูปที่ 3.21 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่า $S_{11}$ , $S_{12}$ , $S_{21}$ และ $S_{22}$ เมื่อทำการปรับค่าความยาว $L_2$	45
รูปที่ 3.22 แสดงค่าอิมพีแดนซ์เมื่อปรับค่าความยาว $L_2$	46
รูปที่ 3.23 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว $L_3$	48
รูปที่ 3.24 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่า $S_{11}$ , $S_{12}$ , $S_{21}$ และ $S_{22}$ เมื่อทำการปรับค่าความยาว $L_3$	48
รูปที่ 3.25 แสดงค่าอิมพีแดนซ์เมื่อปรับค่าความยาว $L_3$	49
รูปที่ 3.26 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว $L_4$	51
รูปที่ 3.27 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่า $S_{11}$ , $S_{12}$ , $S_{21}$ และ $S_{22}$ เมื่อทำการปรับค่าความยาว $L_4$	51
รูปที่ 3.28 แสดงค่าอิมพีแดนซ์เมื่อปรับค่าความยาว $L_4$	52
รูปที่ 3.29 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว $L_5$	54
รูปที่ 3.30 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่า $S_{11}$ , $S_{12}$ , $S_{21}$ และ $S_{22}$ เมื่อทำการปรับค่าความยาว $L_5$	54

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 3.31 แสดงค่าอิมพีแดนซ์เมื่อปรับค่าความยาว $L_5$	55
รูปที่ 3.32 การออกแบบระบบป้อนที่ความถี่ 5 GHz	57
รูปที่ 3.33 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่า $S_{11}$ , $S_{12}$ , $S_{21}$ และ $S_{22}$	58
รูปที่ 3.34 แสดงรูปการแผ่คลื่นของสนามไฟฟ้า	58
รูปที่ 3.35 สายอากาศแบบสลิต (Slot Antenna) ขนาด 4×4 และระบบป้อนไมโครสตริปไลน์ที่ความถี่ 5 GHz	59
รูปที่ 3.36 กราฟแสดงค่า $S_{11}$ ของสายอากาศแบบสลิต (Slot Antenna)	60
รูปที่ 3.37 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว $L_6$	60
รูปที่ 3.38 การเปรียบเทียบค่า $S_{11}$ เมื่อทำการปรับค่าความยาว $L_6$	60
รูปที่ 3.39 ค่าอิมพีแดนซ์เมื่อทำการปรับค่าความยาว $L_6$	61
รูปที่ 3.40 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว $L_S$	61
รูปที่ 3.41 การเปรียบเทียบค่า $S_{11}$ เมื่อทำการปรับค่าความยาว $L_S$	62
รูปที่ 3.42 ค่าอิมพีแดนซ์เมื่อทำการปรับค่าความยาว $L_S$	62
รูปที่ 3.43 กราฟแสดงค่า $S_{11}$ ของระบบสายอากาศ	63
รูปที่ 3.44 ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสายอากาศ	63
รูปที่ 3.45 รูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสลิต (Slot Antenna) ขนาด 4×4	64
รูปที่ 3.46 สายอากาศภาครับและภาคส่งอยู่ห่างกัน 97.68, 130.24, 162.80 และ 195.36 มิลลิเมตร (กรณีไม่มีวัสดุ)	66
รูปที่ 3.47 ค่า $S - parameter$ สายอากาศภาครับและภาคส่งอยู่ห่างกัน 97.68, 130.24, 162.80 และ 195.36 มิลลิเมตร (กรณีไม่มีวัสดุ)	67
รูปที่ 3.48 สายอากาศภาครับและภาคส่งอยู่ห่างกัน 97.68, 130.24, 162.80 และ 195.36 มิลลิเมตร (กรณีมีวัสดุ)	69
รูปที่ 3.49 ค่า $S - parameter$ สายอากาศภาครับและภาคส่งอยู่ห่างกัน 97.68, 130.24, 162.80 และ 195.36 มิลลิเมตร (กรณีมีวัสดุ)	70
รูปที่ 4.1 ภาพจริงของสายอากาศ (Slot Antenna) ขนาด 1 อีทีเมนต์	72

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.2 ผลการวัดค่า $S_{11}$ และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Slot Antenna) ขนาด 1 อิลีเมนต์	73
รูปที่ 4.3 ภาพจริงของสายอากาศ (Slot Antenna) ขนาด 4×4	74
รูปที่ 4.4 ผลการวัดค่า $S_{11}$ และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Slot Antenna) ขนาด 4×4	75
รูปที่ 4.5 รูปการจำลองการตรวจสอบวัสดุเปลือกปลอม	77
รูปที่ 4.6 ภาพผลการวัดค่า $S_{21}$ แบบมีวัสดุและไม่มีวัสดุ	78
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบรูปที่วัดจากโปรแกรม CST Microwave Studio กับการวัดจริง	81
รูปที่ 5.1 สายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna) และระบบป้อน ไมโครสตริปไลน์ (Microstrip line) ขนาด 4×4	93
รูปที่ 5.2 การจำลองการตรวจสอบความผิดปกติในวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ	94
รูปที่ 6.1 เลือกรูปแบบชิ้นงานที่จะสร้าง	99
รูปที่ 6.2 เลือกชนิดของสายอากาศ	100
รูปที่ 6.3 ตั้งค่าหน่วยต่างๆ	100
รูปที่ 6.4 การเลือก Frequency Range	101
รูปที่ 6.5 กำหนดชนิดของวัสดุที่ใช้ในการสร้างชิ้นงาน	101
รูปที่ 6.6 การกำหนดค่าตัวแปรของแผ่นซับสเตรต	102
รูปที่ 6.7 สร้าง Waveguide Port	102
รูปที่ 6.8 การทดสอบ Simplify	103
รูปที่ 6.9 ค่า S-parameter Magnitude in dB ( $S_{11}$ )	103

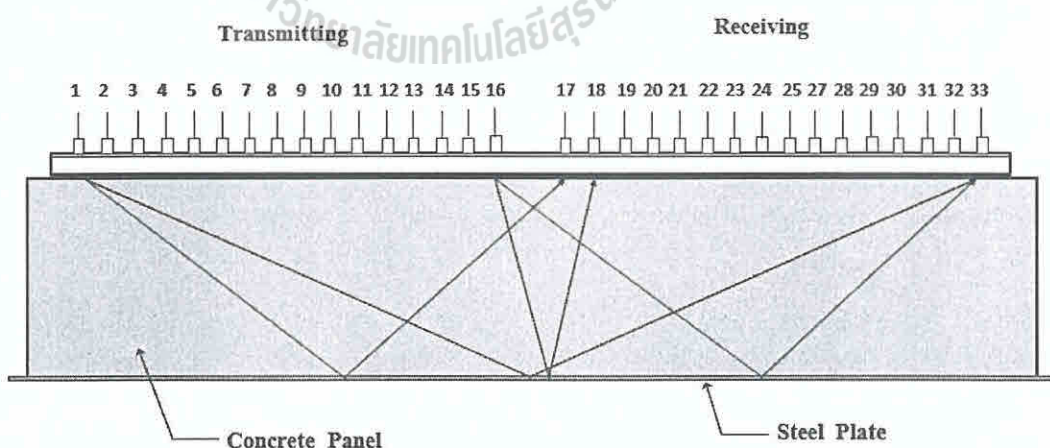
## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ปัจจุบันการค้นหาลักษณะแปลกปลอมหรือความผิดปกติของวัสดุต่างๆที่เราไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการนำข้อมูลเพื่อไปซ่อมแซมแก้ไข เช่น รอยร้าวของฝ้าผนังที่เกิดจากภัยธรรมชาติ การโค้งงอที่ผิดปกติของเหล็กเส้นในคอนกรีต เป็นต้น โดยทั่วไปหากเราต้องการทราบข้อมูลเหล่านั้น เราจำเป็นต้องทำการ ขุด เจาะ ฯลฯ ซึ่งทั้งหมดนี้จะสร้างความเสียหายให้กับวัสดุบริเวณนั้นเป็นอย่างมาก

โครงการนี้จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการค้นหาวัตถุสิ่งแปลกปลอมที่เราไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อที่จะไม่ทำให้วัสดุบริเวณนั้นเกิดความเสียหายโดยใช้หลักการการทำงานของสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) เมื่อคลื่นแผ่ออกจากสายอากาศภาคส่ง คลื่นจะเดินทางไปตามท่อดำและสะท้อนไปยังสายอากาศภาครับ ในโครงการนี้เราทำการออกแบบสายอากาศสล็อต (Slot Antenna) ขนาด 4x4 และระบบป้อนที่ความถี่ 5 GHz โดยใช้โปรแกรม CST ดังแสดงในรูปที่ 1 ในการวัดจะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyser) เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแล้วนำค่าเหล่านั้นมาคำนวณและพล็อตค่าลงในโปรแกรม Matlap เพื่อประมวลผลให้ได้เป็นภาพกราฟฟิคที่สามารถบอกลักษณะของวัตถุที่เราต้องการค้นหาได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 1 แสดงการตรวจสอบสิ่งผิดปกติในวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาและออกแบบสายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna) ขนาด 4x4 ทั้งภาครับและภาคส่ง และระบบป้อนที่ความถี่ 5 GHz
2. เพื่อศึกษาการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัตถุ
3. เพื่อตรวจสอบสิ่งผิดปกติในวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ

## 1.3 ขอบเขตการทำงาน

1. ศึกษาลักษณะการแผ่กระจายสนามไฟฟ้าในสายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna)
2. ศึกษาและออกแบบสายอากาศและระบบป้อนไมโครตรีป โดยการ ใช้โปรแกรม CST เพื่อใช้ในการจำลองผลการทดลอง
3. ศึกษาการใช้โปรแกรม Matlab เพื่อประมวลผลให้ได้เป็นภาพกราฟฟิก
4. สร้างอุปกรณ์และทดสอบชิ้นงานวัสดุต้นแบบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์

## 1.4 ขั้นตอนการทำงาน

- 1.4.1 ศึกษา ค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรม CST
- 1.4.3 ออกแบบสายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna) 1ตัว ที่ความถี่ 5 GHz
- 1.4.4 สร้างสายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna) 1ตัว และทำการทดสอบชิ้นงานเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์
- 1.4.5 ออกแบบระบบตัวป้อนที่ความถี่ 5 GHz
- 1.4.6 ออกแบบสายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna) ขนาด 4x4 ทั้งภาครับและภาคส่ง
- 1.4.7 สร้างสายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna) ขนาด 4x4 ทั้งภาครับและภาคส่ง และระบบป้อนที่ความถี่ 5 GHz
- 1.4.8 ทำการวัดค่าสายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna) ขนาด 4x4 ทั้งภาครับและภาคส่ง ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyser) เพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์
- 1.4.9 นำค่า  $S_{11}$  มาพล็อตในโปรแกรม Matlab เพื่อคุณลักษณะวัตถุสิ่งแปลกปลอม

1.4.10 สรุปผลการทดลองและเขียนรายงาน

1.4.11 นำเสนอโครงงาน

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้สายอากาศแบบสล롯 (Slot Antenna) ต้นแบบ ขนาด 4x4 ทั้งภาครับและ  
ภาคส่ง และระบบป้อนที่ความถี่ 5 GHz

1.5.2 เข้าใจการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัตถุ

1.5.3 สามารถตรวจสอบสิ่งผิดปกติในวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟได้



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

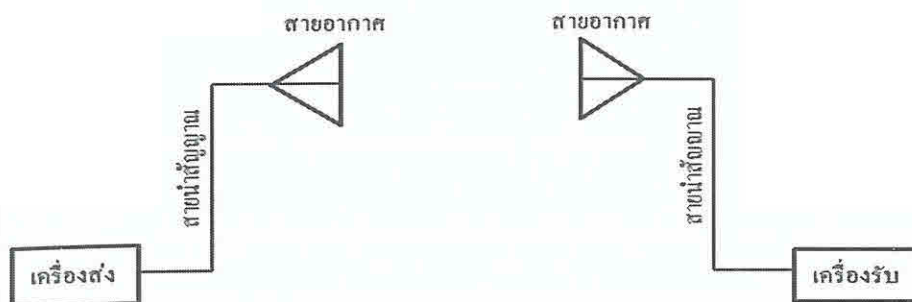
ในโครงการนี้ศึกษาและวิเคราะห์สายอากาศแบบสล็อต(Slot Antenna)สำหรับการใช้งานในการตรวจสอบความผิดปกติของวัสดุที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยทำการออกแบบสายอากาศสล็อต (Slot Antenna) ขนาด4x4และระบบป้อนให้สามารถรองรับคลื่นในย่านความถี่ไมโครเวฟนั้น ซึ่งความถี่ที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ คือ 5 GHzซึ่งลักษณะโดยทั่วไปของคลื่นไมโครเวฟนั้นจะเดินทางเป็นเส้นตรงสามารถหักเห(Refract) สะท้อน (Reflect) แดกกระจาย(Diffract) และถูกลดทอน (Attenuate) ได้ ดังนั้นในการศึกษาโครงการนี้จึงนำสมบัติการสะท้อนมาเพื่อใช้ในการออกแบบชิ้นงานในการหาวัสดุที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าโดยใช้คลื่นไมโครเวฟสำหรับใช้งานให้ได้ตามวัตถุประสงค์ของโครงการ โดยเมื่อคลื่นแผ่ออกจากสายอากาศภาคส่งคลื่นจะเดินทางไปตกกระทบและสะท้อนกับวัตถุไปยังสายอากาศภาครับ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในการศึกษา ผู้วิจัยได้เสนอรายละเอียดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

#### 2.1สายอากาศ

สายอากาศของเครื่องส่งจะทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นจากเครื่องส่งวิทยุผ่านอากาศหรือชั้นบรรยากาศไปยังเครื่องรับสายอากาศของเครื่องรับวิทยุ ซึ่งเครื่องรับวิทยุจะทำหน้าที่รับคลื่นจากอากาศเข้าสู่เครื่องรับเพื่อทำการตีความสัญญาณต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.1

คำว่าสายอากาศเป็นศัพท์เฉพาะด้านวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสารและอิเล็กทรอนิกส์บัญญัติขึ้นจากคำศัพท์ในภาษาอังกฤษ "antenna" หรือ "aerial" ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์อาจเขียนอักษรย่อ Ant. อย่างไรก็ตามบุคคลทั่วไปนิยมเรียกว่า เสาอากาศอาจจะเป็นเพราะเดิมใช้เสาสูงๆสำหรับติดตั้งสายอากาศนั่นเอง





รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของการสื่อสาร

## 2.1.1 ประเภทของสายอากาศ

### 2.1.1.1 สายอากาศแบบสาย(Wire Antenna )

สายอากาศชนิดนี้เป็นสายอากาศที่พบมากที่สุดเนื่องจากมีให้เห็นอยู่ทั่วไป และมีการใช้งานในหลายรูปแบบ เช่น ดึก อาคาร รถยนต์ เครื่องบิน ยานอวกาศ เป็นต้น รูปร่างของสายอากาศนั้นไม่จำเป็นต้องเป็นวงกลม อาจจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือรูปร่างลักษณะอื่นๆ ส่วนรูปทรงวงกลมนั้นมักนิยมใช้งานกันมากที่สุดเพราะง่ายต่อการออกแบบ

### 2.1.1.2 สายอากาศแบบช่อง (Aperture Antenna)

สายอากาศชนิดนี้โดยส่วนมากจะใช้ในย่านความถี่สูงซึ่งสายอากาศชนิดนี้มีประโยชน์มากในด้านเครื่องบินหรือยานอวกาศเนื่องจากสะดวกต่อการติดตั้งและยังสามารถหุ้มด้วยฉนวนหรือวัสดุที่ไม่เป็นสื่อไฟฟ้าได้อีกด้วยเพื่อจะได้ป้องกันการเกิดอันตรายต่อการระบบสื่อไฟฟ้า

### 2.1.1.3 สายอากาศแบบไมโครสตริป(Microstrip Antenna)

- สายอากาศชนิดนี้ถูกพัฒนาออกมาเพื่อใช้งานกับอุปกรณ์ขนาดเล็กเช่น โทรศัพท์มือถือลักษณะของอุปกรณ์จะมีลักษณะคล้ายกับแผ่นทองแดงและเนื่องจากถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานในย่านความถี่ใดความถี่หนึ่ง โดยเฉพาะรูปร่างของสายอากาศจึงอิงตามความเหมาะสมของความถี่ที่ใช้งานเป็นหลัก

#### 2.1.1.4 สายอากาศแบบอะเรย์(Array Antenna)

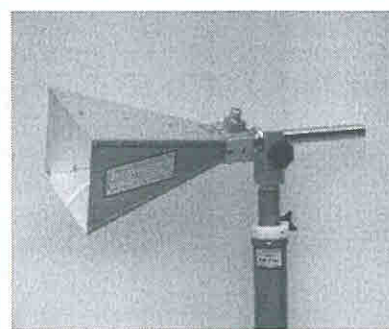
การประยุกต์ใช้งานสายอากาศนี้ โดยส่วนมากแล้วจะมีคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นไม่เหมือนกันทำให้เกิดวิธีการนำเอาสายอากาศมาใช้งานร่วมกันหรือเรียงแถวลำดับ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการในการใช้งานด้านต่างๆ

#### 2.1.1.5 สายอากาศแบบจานสะท้อน(Dish Antenna)

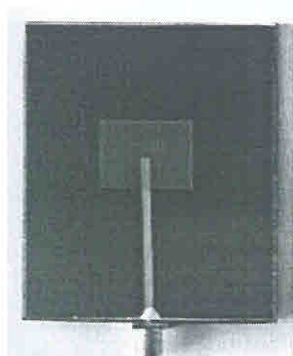
สายอากาศชนิดนี้เหมาะกับการใช้งานด้านดาวเทียมหรือการสื่อสารที่มีระยะทางไกลมากเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงสุด แต่มีข้อเสียคือ บีมวิดท์(Beamwidth)แคบ และมีขนาดใหญ่



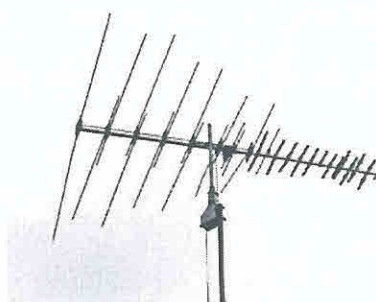
ก.สายอากาศแบบสาย  
(Wire Antenna)



ข. สายอากาศแบบช่อง  
(Aperture Antenna)



ค.สายอากาศแบบไมโครสตริป  
(Microstrip Antenna)



ง.สายอากาศแบบอะเรย์  
(Array Antenna)



จ.สายอากาศแบบจานสะท้อน  
(Dish Antenna)

รูปที่ 2.2 ประเภทของสายอากาศต่างๆ

## 2.1.2 ประเภทของสายอากาศแบ่งตามลักษณะการรับ-ส่งคลื่น

### 2.1.2.1 สายอากาศแบบเจาะจงทิศทาง (Directional Antenna)

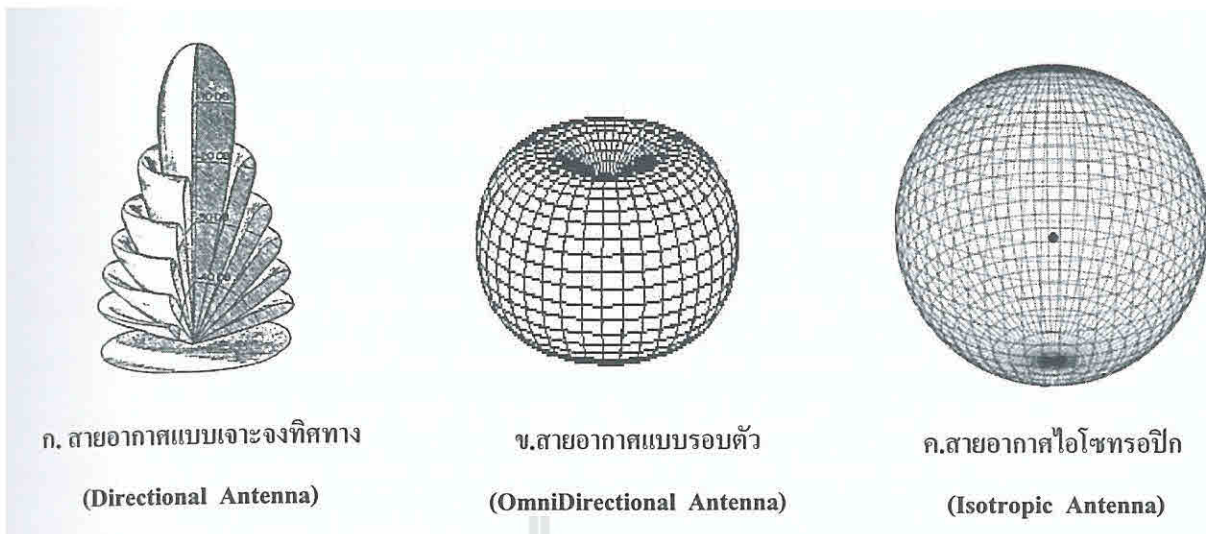
เป็นสายอากาศที่สามารถรับส่งคลื่นได้ดี และมีทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นที่มีทิศทางชัดเจนเหมาะสำหรับการติดต่อระหว่างจุด แต่มีข้อเสียคือ ถ้าไม่อยู่ในทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นจะไม่สามารถรับสัญญาณได้ซึ่งสายอากาศประเภทนี้มีอัตราขยาย (gain) สูงชนิดของสายอากาศที่นิยม ได้แก่ สายอากาศแบบยาจิก (Yagi Antenna) และสายอากาศแบบจานสะท้อน (Dish Antenna) เป็นต้น

### 2.1.2.2 สายอากาศแบบรอบตัว (OmniDirectional Antenna)

เป็นสายอากาศที่สามารถรับส่งคลื่นได้ดีในทุกทิศทาง ซึ่งมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทาง 360 องศาเหมาะสำหรับการใช้งานด้านการติดต่อกับลูกข่ายที่มีตำแหน่งและทิศทางที่ไม่แน่นอน โดยสายอากาศที่นิยมใช้คือ สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) ที่มีอีลีเมนต์ (Element) เพียงด้านเดียวการใช้งานจริงจะออกแบบด้วยโลหะหรือสายไฟรอบๆ ตัว สายอากาศชนิดนี้เป็นสายอากาศที่ใช้ในมาตรฐานในการเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบอื่นๆ

### 2.1.2.3 สายอากาศไอโซทรอปิก (Isotropic Antenna)

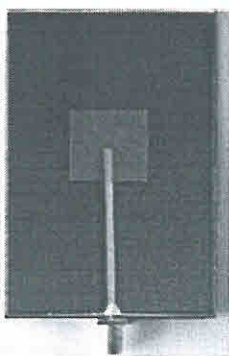
เป็นสายอากาศที่ใช้ในทางทฤษฎีโดยมีการแพร่กระจายของคลื่นทุกทิศทาง และมีความเข้มสนามที่เท่ากัน เป็นสายอากาศที่ไม่สามารถสร้างขึ้นได้จริง แต่จะใช้ในการเปรียบเทียบหรือกำหนดเป็นมาตรฐานนำไปเทียบกับสายอากาศแบบอื่น เพื่อดูลักษณะ คุณสมบัติ แสดงทิศทางของสายอากาศ



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการแพร่กระจายคลื่นต่างๆ

## 2.2สายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริป คือ สายอากาศที่ประกอบไปด้วยแผ่นโลหะวางติดอยู่บนสารแผ่นฐาน ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริกเหนือระนาบกราวด์ (Ground Plane) ในบางครั้งอาจมีวัสดุห่อหุ้ม (Radome) เพื่อใช้ป้องกันสายอากาศแผ่นโลหะอาจมีรูปร่างได้หลายรูปแบบ สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม วงกลม วงรี ฯลฯ แต่รูปร่างที่นิยมในการออกแบบวิเคราะห์นำไปประยุกต์ใช้งานมากที่สุดคือ สี่เหลี่ยมผืนผ้าและวงกลม เนื่องจากคุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของทั้งสองค่าโพลาไรเซชันแบบไขว้ค่า (Low-cross polarization) สายอากาศแบบนี้มีรูปร่างแบน สะดวกในการวางบนผิวแนวระนาบ ง่ายในการสร้างและราคาถูก เพราะใช้เทคโนโลยีเดียวกันกับการทำแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed circuit)



รูปที่ 2.4 สายอากาศไมโครสตริป

### 2.2.1 แผ่นไมโครสตริป(Microstrip Pattern)

แผ่นตัวนำสายอากาศเป็นแผ่นโลหะแบบบาง ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่พลังงานและมีค่าความต้านทานต่ำทนต่อสภาพแวดล้อมสามารถยึดติดกับผิวของชั้นวัสดุฐานรอง ได้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปทำจากทองแดงทองคำ หรืออลูมิเนียม แผ่นตัวนำอาจมีรูปร่างต่างๆ เช่น สี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลมวงรี เป็นต้น วัสดุที่นำมาใช้ทำแผ่นตัวนำสายอากาศนี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศ และความซับซ้อนในการผลิตนอกจากนี้แล้วขนาดและรูปร่างของแผ่นตัวนำสายอากาศ ยังเป็นปัจจัยต่อการกำหนดความถี่ใช้งานรูปแบบการแผ่พลังงานและอิมพีแดนซ์ขาเข้า ปัจจุบันแผ่นตัวนำสายอากาศที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นแผ่นตัวนำรูปสี่เหลี่ยมและวงกลม เนื่องจากการออกแบบและการผลิตสามารถทำได้ง่าย

### 2.2.2 ระนาบกราวด์ (Ground Plane)

เป็นแผ่นโลหะขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับแผ่นตัวนำสายอากาศ ซึ่งส่วนใหญ่ทำจากโลหะชนิดเดียวกันกับสายอากาศ โดยขนาดของระนาบกราวด์นี้จะส่งผลกระทบต่อรูปแบบการแผ่กระจายคลื่น เนื่องจากคลื่นเลี้ยวเบนที่บริเวณขอบของระนาบกราวด์นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศอีกด้วยเนื่องจากการวิเคราะห์สายอากาศส่วนใหญ่มีข้อสมมุติว่าแผ่นระนาบกราวด์มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นไมโครสตริปมากสามารถประมาณได้ว่าเป็นขนาดอนันต์ และเป็นขนาดที่จำกัดของระนาบกราวด์จะมีผลต่อลำคลื่นหลัก (MainLobe) น้อยมากแต่จะทำให้เกิดลำคลื่นด้านหลังของรูปแบบการแผ่กระจายคลื่น

### 2.2.3 ไดอิเล็กตริก(Dielectric)

ชนิดและขนาดของชั้นวัสดุฐานรองเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบสายอากาศ และเป็นองค์ประกอบสำคัญที่กำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริปการแผ่พลังงานของสายอากาศจะลดลงเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง ( $\epsilon_r$ ) เพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาของชั้นวัสดุฐานรองมีค่าคงที่การแผ่พลังงานของสายอากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้นวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้นและการแผ่พลังงานนี้จะมีปริมาณลดลงเมื่อความหนาต่อความยาวคลื่นมีค่าประมาณ 0.05

การเลือกวัสดุเพื่อใช้เป็นวัสดุฐานรองนอกจากต้องคำนึงถึงสมบัติทางกลสมบัติทางเคมีความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมเช่นความชื้นอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการยึดติดกับผิวโลหะได้ด้วยความเรียบของผิวซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดกับโลหะและสามารถผลิตเป็นชั้นวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศได้ นอกจากนี้สมบัติทางไฟฟ้ายังเป็นตัวแปรสำคัญในการเลือกวัสดุโดยมีค่าปัจจัยที่ต้องคำนึงดังต่อไปนี้

### 2.2.3.1. ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Dielectric Constants: $\epsilon_r$ )

วัสดุที่ใช้ควรเป็นวัสดุเนื้อเดียวเพื่อให้ค่าสภาพยอมของสารไดอิเล็กตริกมีค่าคงที่ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกบ่งบอกคุณสมบัติของการเป็นสารไดอิเล็กตริกโดยเทียบกับอากาศว่าง ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ควรมีค่าต่ำ เนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ต่ำทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพที่ดี และทำให้การผลิตมีความผิดพลาดน้อย

### 2.2.3.2. ค่ามุมสัมพัทธ์การสูญเสีย (Loss tangent : $\tan \delta$ )

ค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างกระแสการนำกับกระแสเสียดสเฟลซ-เมนต์โดยเมื่อนำสารไดอิเล็กตริกไปคั่นกลางระหว่างแผ่นโลหะคู่หนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ ซึ่งค่านี้แสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีการสูญเสีย เนื่องจากการนำกระแสเล็กน้อยเพียงใด โดยค่านี้ควรมีค่าที่ต่ำ เพื่อลดพลังงานการสูญเสียเนื่องจากการสูญเสียของไดอิเล็กตริกทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศสูงขึ้น

### 2.2.3.3. ค่าคงตัวของ การนำความร้อน (Thermal Conductivity)

แสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดีมากน้อยเพียงใด ซึ่งค่านี้ยิ่งสูงยิ่งดี

## 2.2.4 สายนำสัญญาณและหัวต่อ

สายนำสัญญาณ (Transmission Lines) คือวัสดุตัวกลาง หรือ โครงสร้างที่ถูกออกแบบเพื่อเป็นเส้นทางสำหรับนำพลังงานหรือสัญญาณจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง เช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นเสียงและสัญญาณทางไฟฟ้า เป็นต้น การเลือกใช้สายนำสัญญาณที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณได้มาก ตัวอย่าง การส่งสัญญาณจากเครื่องวิทยุ สายนำสัญญาณสามารถส่งผ่านกำลัง จากเครื่องส่งไปยังสายอากาศ และนำสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศ กลับมาที่เครื่องรับวิทยุ โดยแบ่งตาม โครงสร้างการใช้งาน ดังนี้

1. สายเส้นคู่เปิด (Two-wire Open Line)
2. โคแอกเซียล(Coaxial Cable)
3. เส้นใยแก้วนำแสงหรือไฟเบอร์ออฟติก(Optic Fiber)
4. สายส่งสัญญาณชนิดแผ่นเรียบ (Planar Transmission line)
5. ท่อนำคลื่น (Waveguide)

ข้อต่อและหัวแปลงในงานด้านRF และไมโครเวฟ (Connectors and Adapters)

เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการเชื่อมต่อวงจร ซึ่งข้อต่อและหัวแปลงมีด้วยกันหลายแบบขึ้นอยู่กับ

ลักษณะการใช้งาน ส่วนมากจะมีความแตกต่างทางด้าน โครงสร้าง ขนาด และวัสดุที่ใช้ ข้อต่อและหัวแปลงที่ดีต้องมีคุณสมบัติทนต่อกำลัง ได้สูงมีการสูญเสียกำลังต่ำ ค่า VSWR ต่ำ และมีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) กว้าง โดยทั่วไปข้อต่อที่ใช้กับสายโคแอกเซียล จะเป็นที่นิยมในการใช้งานมาก หัวเชื่อมต่อที่ใช้กับสายโคแอกเซียลและสายโคแอกเซียลแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. สายโคแอกเซียลแบบบาง (Thin Coaxial Cable)
2. สายโคแอกเซียลแบบหนา (Thick Coaxial Cable)

ทั้งสายแบบบาง (Thinnet) และแบบหนา (Thicknet) จะใช้หัวเชื่อมต่อชนิดเดียวกันที่เรียกว่า หัว BNC ซึ่งใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างสายสัญญาณและเน็ตเวิร์คการ์ด หัวเชื่อมต่อแบบ BNC นี้ มีหลายแบบดังต่อไปนี้

1. หัวเชื่อมสาย BNC (BNC Cable Connector) เป็นหัวที่เชื่อมเข้ากับปลายสาย
2. หัวเชื่อมสายรูปตัว T (BNC T-Connector) เป็นหัวที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างสายสัญญาณ

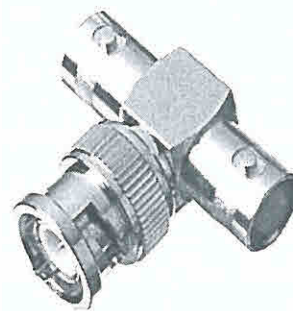
กับเน็ตเวิร์คการ์ด

3. หัวเชื่อมสายแบบบาร์เรล (BNC Barrel Connector) เป็น หัวที่ใช้ในการเชื่อมต่อสายสัญญาณเพื่อให้สายมีขนาดยาวขึ้น

4. ตัวสิ้นสุดสัญญาณ (BNC Terminator) เป็นหัวที่ใช้ในการสิ้นสุดสัญญาณที่ปลายสายเพื่อเป็นการสิ้นสุดสัญญาณไม่ให้สะท้อนกลับถ้าไม่อย่างนั้นสัญญาณจะสะท้อนกลับทำให้รบกวนสัญญาณที่นำข้อมูลจริงซึ่งจะทำให้เครือข่ายล้มเหลวในที่สุด



ก. หัวเชื่อมต่อสาย BNC  
(BNC Cable Connector)



ข. หัวเชื่อมต่อสายรูปตัว T  
(BNC T-Connector)



ค. หัวสิ้นสุดสัญญาณ  
(BNC Terminator)



ง. หัวเชื่อมต่อสายแบบบาร์เรล  
(BNC Barrel Connector)

### รูปที่ 2.5 หัวเชื่อมต่อสาย BNC

#### 2.2.5 หลักการทำงานของสายอากาศไมโครสตริป

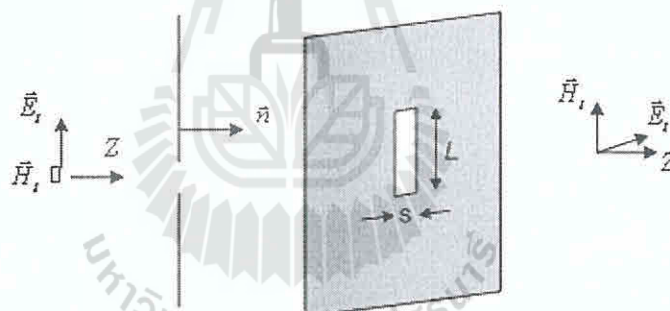
สายอากาศมีการทำงานเช่นเดียวกับสายอากาศทั่วไปคือนำเอาสายอากาศมาเชื่อมเข้ากับแหล่งจ่ายข้อมูลผ่านทางหัวเชื่อมต่อก็สามารถใช้งานได้โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะไม่มี การปรับแต่งใดๆอีก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสายอากาศที่มีทิศทางแถบมากจะไม่มี การขยับเขยื้อนใดๆ หลังจากติดตั้งแล้วสายอากาศไมโครสตริปมีทั้งข้อดีและข้อด้อยหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศที่ใช้ในย่านไมโครเวฟแบบอื่นๆซึ่งข้อด้อยของสายอากาศไมโครสตริปสามารถจะกำจัดให้ลดน้อยลงได้ถ้าออกแบบให้ถูกต้องและเลือกใช้วัสดุที่มีการสูญเสียต่ำซึ่งคาดว่าต่อไปในอนาคตจะมีการนำสายอากาศไมโครสตริปมาใช้กันอย่างกว้างขวางมากขึ้นเนื่องจากความหนาของไมโครสตริปบางมาก



## 2.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด(Slot Antenna)

### 2.3.1 การแพร่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศช่องเปิด

การแพร่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศช่องเปิดเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าปะทะแผ่นตัวนำสมบูรณ์แบบช่องเปิดแคบๆ โดยที่สนามไฟฟ้ามีทิศตั้งฉากกับแนวของช่องเปิดที่ตรงช่องเปิดจะมีสนามไฟฟ้าความเข้มสูงมากเกิดขึ้นทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นออกไปยังบริเวณที่อยู่อีกด้านหนึ่งในกรณีช่องเปิดแคบมากๆ กระแสไฟฟ้าสมมูลคือ  $\vec{J} = \vec{n} \times \vec{H}^i$  จะมีขนาดจำกัด และเมื่อคิดว่าความกว้างของช่องเปิดซึ่งอ้างอิงจากรูปคือ  $S$  เข้าหาศูนย์กระแสไฟฟ้าสมมูลส่วนนี้จะตัดทิ้งได้เพราะมีขนาดเล็กแค่ส่วนที่เป็นกระแสแม่เหล็กสมมูล คือ  $\vec{M} = \vec{E}^i \times \vec{n}$  นั้นไม่สามารถตัดทิ้งได้เพราะเมื่อ  $S$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์สนามแม่เหล็กที่ช่องเปิดจะเข้าหอนั้นตั้งจึงไม่สามารถตัดทิ้งได้ ถ้าให้  $E_s$  เป็นสนามไฟฟ้าที่ช่องเปิดและช่องเปิดยาว  $L$  เนื่องจากปลายทั้งสองของช่องเปิดสนามไฟฟ้าจะต้องเป็นศูนย์



รูปที่ 2.6 การแพร่กระจายคลื่นจากไมโครสตริปแบบช่องเปิด

การออกแบบสายอากาศแบบสล็อต มีพารามิเตอร์สำคัญที่เป็นตัวกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ คือ ความยาวรอบรูปของช่องเปิดที่อ้างอิงกับความยาวคลื่นสัมพัทธ์ ( $\lambda_g$ ) ซึ่งต้องหาผ่านความถี่ออกแบบที่ต้องการในโครงการนี้จะทำการศึกษาและออกแบบสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ที่ความถี่ 5 GHz ได้ดังนี้

การคำนวณหาความยาวคลื่นในอากาศ ( $\lambda_0$ ) ได้จาก

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

ค่าความยาวคลื่นสัมพัทธ์ ( $\lambda_g$ ) ในวัสดุฐานรอง

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.2ก)$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.2ข)$$

ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant :  $\epsilon_{eff}$ )

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_{r+1} + \epsilon_{r-1}}{2} \sqrt{1 + \frac{12d}{w}} \quad (2.3)$$

- เมื่อ  $C$  คือ ความเร็วแสง มีค่าประมาณ  $3 \times 10^8$   
 $f$  คือ ความถี่ที่ต้องการออกแบบ  
 $\epsilon_{eff}$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล  
 (Effective Dielectric Constant)  
 $\epsilon_r$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็ก (Dielectric Constant)

ความยาวของสล็อต

$$\frac{\lambda_g}{2} \quad (2.4)$$

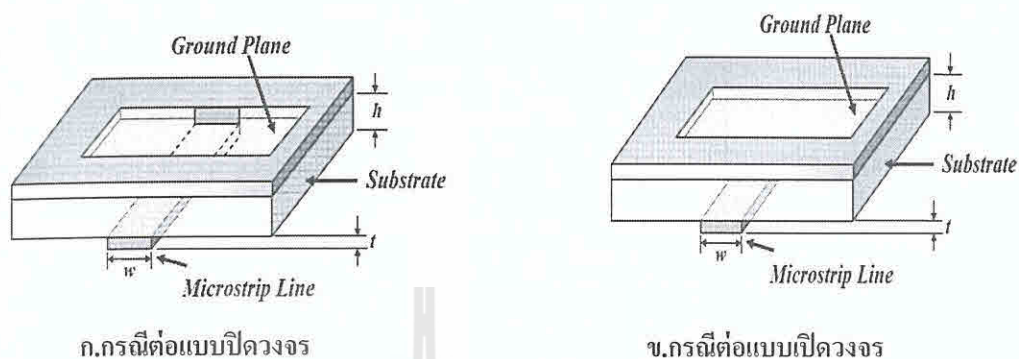
ระยะห่างของสายอากาศ

$$\frac{\lambda_g}{4} \quad (2.5)$$

## 2.4 สายอากาศช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยไมโครสตริปไลน์

โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยไมโครสตริปไลน์ ประกอบไปด้วยสายอากาศแบบช่องเปิดที่อยู่บนแผ่นตัวนำทำหน้าที่เป็นระนาบกราวด์และสายไมโครสตริปที่อยู่บนระนาบตรงกันข้ามสำหรับลักษณะการส่งผ่านคลื่นสัญญาณนี้มีหลักการรูปแบบพื้นฐานอยู่ 2 รูปแบบคือการต่อแบบปิดวงจร (Microstrip Terminated Short Circuit) ซึ่งการต่อแบบ

ปัดวงจรนี้ไม่นิยมนำมาออกแบบเนื่องจากมีรูปแบบที่ยากต่อการนำไปสร้างในเทคโนโลยีวงจรพิมพ์และการต่อแบบเปิดวงจร (Microstrip Terminated Open Circuit) ซึ่งความยาวที่เหมาะสมของสายไมโครสตริปในกรณีนี้มีความยาวประมาณเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น



ก.กรณีต่อแบบเปิดวงจร

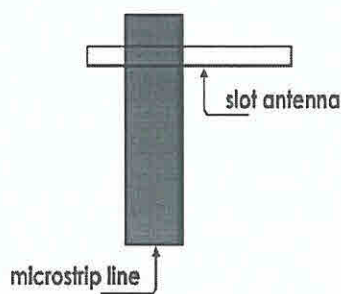
ข.กรณีต่อแบบเปิดวงจร

รูปที่ 2.7 สายอากาศช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยสายไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ป้อนสัญญาณด้วยไมโครสตริปไลน์นั้นมีการจัดวางสายอากาศช่องเปิดให้อยู่ตรงกลางระหว่างด้านซ้ายและขวาบนระนาบกราวด์และวางตำแหน่งของไมโครสตริปไลน์ไว้บนระนาบตรงข้ามบริเวณกึ่งกลางช่องเปิดโดยมีการป้อนสัญญาณเข้าที่ปลายของไมโครสตริปไลน์การจัดวางในลักษณะแบบนี้ทำให้เกิดความต้านทานในการแพร่กระจายสูง ดังนั้นจึงได้มีการทำวิจัยเพื่อให้มีการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดี

#### 2.4.1 วิธีพื้นฐานที่สำคัญในการทำแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีอยู่หลายวิธีดังนี้

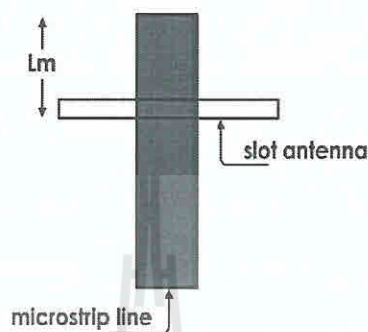
1. วิธีเลื่อนจุดกึ่งกลางของช่องเปิดบนระนาบกราวด์ออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณ (Offset Microstrip Feeding) เป็นวิธีการเลื่อนหรือเปลี่ยนตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์โดยเลื่อนไปทางซ้ายหรือทางขวาเท่านั้น แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วิธีการเลื่อนจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณ

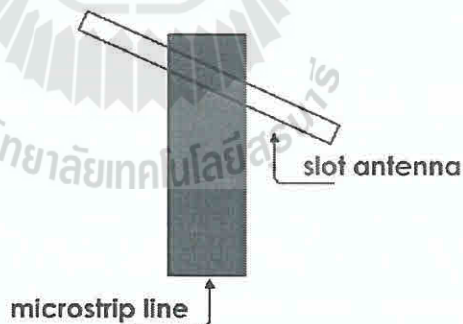
2. วิธีการปรับความยาวท่อนสั้น (Stub-Turning) วิธีนี้จะเป็นการเปลี่ยนขนาดความยาวของสายส่งสัญญาณ กำหนดให้  $L_m$  เป็นความยาวของท่อนสั้นที่วัดเทียบจากขอบของช่องเปิดจรจนถึงปลายสายส่งสัญญาณ การทำแมตซ์อิมพีแดนซ์วิธีนี้จะมีผลต่อความถี่ตอบสนองด้วย แสดงในรูปที่

2.9



รูปที่ 2.9 วิธีการปรับความยาวท่อนสั้น

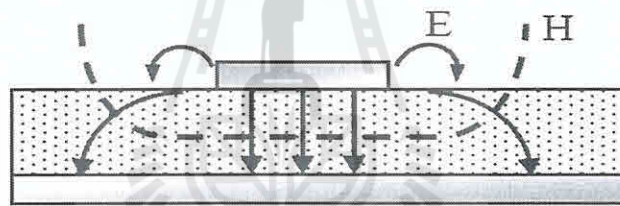
3. วิธีการหมุนช่องเปิด (Center-fed but Inclined Microstrip line Feed) วิธีการแบบนี้เป็นวิธีการทำให้ช่องเปิดไม่ตั้งฉากกับสายส่งสัญญาณ ซึ่งการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์วิธีนี้จะมีความยุ่งยากและไม่ค่อยได้รับความนิยม แสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วิธีการหมุนช่องเปิด

## 2.4.2 การส่งผ่านคลื่นในไมโครสตริปไลน์

การส่งผ่านคลื่นในไมโครสตริปไลน์นั้นใกล้เคียงกับโหมด TEM แต่ไม่ใช่โหมด TEM เพราะมีสนามในแนวแกนอยู่ด้วยจึงนิยมเรียกโหมดดังกล่าวว่าโหมดกึ่ง TEM (quasi-TEM mode) (แสดงในรูปที่ 2.11) แสดงเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในระนาบตามขวางของไมโครสตริปไลน์การที่มีสนามในแนวแกนอยู่นั้นเป็นเพราะ โครงสร้างที่มีสารไดอิเล็กตริกและอากาศอยู่ในระนาบเดียวกัน และในสภาพที่มีสนามในแนวแกนเกิดขึ้นนี้ โหมดที่ส่งผ่านอยู่นั้นจะเป็นไฮบริดโหมดกับการที่คลื่นส่งผ่านในโหมดกึ่ง TEM ซึ่งพออนุโลมให้เป็นโหมด TEM นี้ทำให้สามารถใช้หลักการวงจรกระจายในการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของไมโครสตริปได้โดยวิธีการหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริก-สัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant:  $\epsilon_{eff}$ ) ของระบบซึ่งจะรวมผลของสารไดอิเล็กตริกและสายอากาศเข้าด้วยกัน



รูปที่ 2.11 เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบตามขวางของไมโครสตริปไลน์

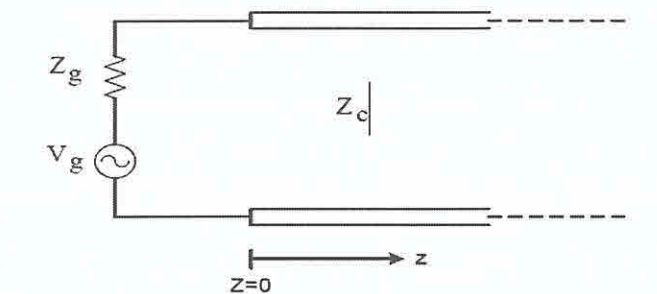
## 2.5 ลักษณะคลื่นบนสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป

เป็นการส่งผ่านของคลื่นจากแหล่งกำเนิดสัญญาณต้นทางไปตามสายส่งในกรณีสายยาวเป็นอนันต์กรณีที่สายมีความยาวจำกัดและมีโหลดต่ออยู่ซึ่งเป็นกรณีที่มีคลื่นสะท้อนเกิดขึ้นรวมทั้งการเกิดคลื่นนิ่งบนสายส่ง

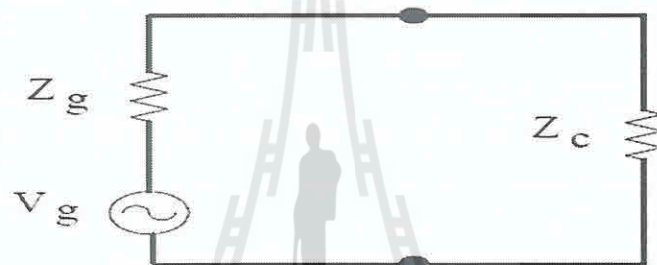
### 2.5.1 คลื่นจร (Traveling Wave)

กรณีที่สายส่งหรือสายนำสัญญาณมีความยาวเป็นอนันต์และถูกป้อนด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณ (V<sub>g</sub>) ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ภายในเป็น  $Z_g$  ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ก) การที่สายยาวอนันต์หมายถึง  $Z = \infty$  การส่งผ่านของคลื่นไปด้าน +Z ถือว่าเป็นทิศทางปกติหรือมีการส่งผ่านไปด้านหน้าคลื่นที่ส่งผ่านไปในทิศ -Z ถือว่าเป็นคลื่นสะท้อนในกรณีที่สายยาวอนันต์และคลื่นที่

ถูกป้อนจากต้นทางสามารถส่งผ่านไปในทิศทาง  $+z$  ตามโครงสร้างของสายนำสัญญาณ โดยไม่มีการสะท้อนหรือสะท้อนกลับคลื่นที่ส่งผ่านในสภาพที่กล่าวนี้เรียกว่าคลื่นจร



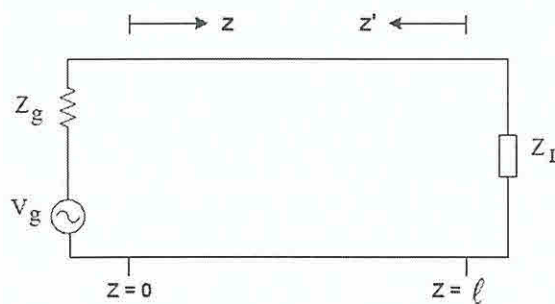
ก.สายส่งที่มีความยาวเป็นอนันต์



ข.วงจรสมมูล

รูปที่ 2.12 วงจรสมมูล

ลำดับต่อไปพิจารณาการหาค่าขนาดของคลื่นจรนี้โดยใช้วงจรสมมูลในรูปที่ 2.12 ประกอบและคิดในรูปของเฟสเซอร์ของสัญญาณตามรูป เนื่องจากที่ตำแหน่ง  $z=0$  อิมพีแดนซ์ที่มองเข้าไปทางสายนำสัญญาณเท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งคือ  $Z_c$  ดังนั้นจึงเปรียบเสมือนมีอิมพีแดนซ์  $Z_c$  มาต่ออยู่ดังวงจรสมมูลตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.1-



รูปที่ 2.13 สายส่งที่ต่อโหลดไว้ที่ปลายสาย

จากรูปที่ 2.13 วงจรสมมูลนี้สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม  $Z_c$  ได้ดังนี้

$$V_i = \frac{Z_c}{Z_g + Z_c} V_g \quad (2.6)$$

ผลที่ได้ตามสมการเป็นขนาดของคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $Z = 0$  ซึ่งส่งผ่านไปตามสายส่ง เนื่องจากตามหลักการของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่า  $Z_g$  และ  $Z_c$  ต้องมีความสัมพันธ์กันในรูป  $Z_g = Z_c$  แต่เนื่องจาก  $Z_c$  เป็นค่าจริงดังนั้น  $Z_g$  เป็นค่าจริงและมีค่าเท่ากับ  $Z_c$  ซึ่งในภาคปฏิบัติต้องสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณหรือเครื่องส่งให้มีอิมพีแดนซ์ภายในเท่ากับค่า  $Z_c$  เช่นถ้านำไปใช้กับสายโคแอกเชียลแบบ 50 โอห์ม อิมพีแดนซ์ภายในของเครื่องกำเนิดสัญญาณต้องเท่ากับ 50 โอห์มด้วยเป็นต้น ในกรณีเช่นนี้เรียกว่ามีการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่สมบูรณ์ที่คั่นทางและขนาดของแรงดันคั่นทางมีค่าเป็นดังนี้

$$V_i = \frac{V_g}{2} \quad (2.7)$$

### 2.5.2 การสะท้อนของคลื่น

กรณีที่สายส่งไม่ได้ยาวอนันต์หรือมีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะไม่สม่ำเสมอตามแกน  $Z$  คลื่นจรที่ส่งผ่านไปจะได้รับผลกระทบจากสภาพนั้นๆ เช่นถ้าสายมีความยาวจำกัดโดยที่ปลายสายต่อไว้ด้วยโหลดที่มีค่าเป็น  $Z_L$  (ดังแสดงในรูปที่ 2.13) ผลที่ได้คือกำลังงานถูกแบ่งเป็นสองส่วนส่วนที่หนึ่งสะท้อนกลับมาตามสาย ส่วนที่สองสูญเสียที่โหลดกลายเป็นความร้อนในส่วนกำลังงานมีปริมาณเล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับ (Voltage reflection coefficient)

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\Gamma$  คือ สัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับ

$V_r$  คือ แรงดันสะท้อนกลับ

$V_i$  คือ แรงดันตกกระทบ

จากสมการที่ (2.8) ถ้าสัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับมีค่าเป็นบวกแสดงว่าแรงดันสะท้อนกลับมีเฟสตรงกัน (in phase) แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบแสดงว่าแรงดันสะท้อนกลับมีเฟสตรงกันข้าม (out of phase) การหาค่าเปอร์เซ็นต์ของคลื่นแรงดันสะท้อนกลับหาได้ดังนี้

$$\% \text{ แรงดันสะท้อนกลับ} = \Gamma \times 100 \quad (2.9)$$

กำลังงานหาได้จากแรงดันยกกำลังสองหารด้วยอิมพีแดนซ์ลักษณะ  $Z_c$

$$P = \frac{V^2}{Z_c} \quad (2.10)$$

ฉะนั้นสัมประสิทธิ์กำลังงานสะท้อนกลับ (Power reflection coefficient) มีค่าเท่ากับกำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับ

$$\Gamma^2 = \frac{P_r}{P_i} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\Gamma$  คือสัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับ

$P_r$  คือกำลังงานสะท้อนกลับ

$P_i$  คือกำลังงานตกกระทบ

เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ได้โดย

$$\% \text{ แรงดันสะท้อนกลับ} = \Gamma^2 \times 100 \quad (2.12)$$

นอกจากนี้สัมประสิทธิ์แรงดันสะท้อนกลับยังสามารถหาได้จากอัตราส่วนของผลต่างและผลรวมระหว่างโหลดกับอิมพีแดนซ์ลักษณะของสายนำสัญญาณ

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c} \quad (2.13)$$



## 2.6 การออกแบบไมโครสตริปไลน์

ไมโครสตริปไลน์มีลักษณะเป็นแถบโลหะแคบ โดยความกว้างของแถบโลหะเป็นตัวกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของไมโครสตริปไลน์ที่ต้องการออกแบบเพื่อให้แมตช์กับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งที่นำมาต่อเข้าที่ปลายสายไมโครสตริป ส่วนความยาวเป็นตัวช่วยในการปรับแต่งให้มีค่าการสูญเสียกลับเกิดน้อยที่สุด

ถ้ากำหนดให้  $W$  เป็นความกว้างของสายไมโครสตริป  $d$  เป็นความสูงของวัสดุฐานรอง (Substrate) ที่มีความหนาของชั้นโลหะน้อยมากและ  $Z_c$  เป็นอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่ง สัญญาณแบบโคแอกเซียลสมการในการคำนวณหาความกว้าง  $W$  มีดังนี้

$$\text{กรณี } \frac{W}{d} \leq 1$$

$$Z_c = 60 \ln \left( \frac{8d}{W} + \frac{W}{4d} \right) / (\epsilon_{eff})^{1/2} \quad (2.21)$$

$$\text{กรณี } \frac{W}{d} \geq 1$$

$$Z_c = \frac{120\pi / (\epsilon_{eff})^{1/2}}{\frac{W}{d} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W}{d} + 1.44 \right)} \quad (2.22)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{W}{d} \leq 2$$

$$\frac{W}{d} = \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2} \quad (2.23)$$

$$\text{กรณี } \frac{W}{d} \geq 2$$

$$\frac{W}{d} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{Z_{\epsilon_r}} \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \quad (2.24)$$

เมื่อ

$$A = \frac{Z_c}{60} \left( \frac{\epsilon_r - 1}{2} \right)^{1/2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (2.25)$$

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.26)$$

โดยธรรมชาติไมโครสตริปไลน์มีคุณสมบัติในการทำให้คลื่นกระจัดกระจาย (Dispersive) นั่นคือการที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant :  $\epsilon_{eff}$ )แปรตามค่าความถี่และโครงสร้างของสายไมโครสตริปเป็นลักษณะกึ่ง TEM ดังนั้นสมการพื้นฐานเกี่ยวกับความยาวคลื่นในสายไมโครสตริปไลน์คือ

$$\lambda_g = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.27)$$

## 2.7 ความกว้างแถบ (Bandwidth)

ความกว้างแถบของสายอากาศถูกนิยามว่าย่านความถี่ที่ยังอยู่ภายในสภาวะที่สายอากาศยังสามารถทำงานได้สภาวะดังกล่าวพิจารณาจากคุณสมบัติบางตัวของสายอากาศและให้เป็นไปตามมาตรฐานกำหนดความกว้างแถบจะพิจารณาจากช่วงของความถี่ที่ต่ำกว่าและสูงกว่าความถี่กลาง (Center Frequency) ซึ่งสภาวะการทำงานของสายอากาศที่ยอมรับได้จะต้องสามารถทำงานได้ตลอดย่านความถี่นี้กรณีที่เป็นสายอากาศแถบกว้าง (Broadband Antennas) ความกว้างแถบมักจะแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างความถี่สูงสุดกับความถี่ต่ำสุดที่สายอากาศสามารถทำงานได้เช่นถ้าสายอากาศชนิดนี้มีความกว้างแถบเท่ากับ 10:1 แสดงว่าความถี่สูงสุดมีค่ามากกว่าความถี่ต่ำสุดอยู่ 10 เท่าและถ้าหากเป็นกรณีของสายอากาศแถบแคบ (Narrowband Antennas) ความกว้างแถบมักจะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ของผลต่างความถี่ (ความถี่สูงสุด-ลบความถี่ต่ำสุด) เมื่อเทียบกับความถี่กลางของความกว้างแถบเช่น ถ้าสายอากาศชนิดนี้มีความกว้างแถบเท่ากับ 5% แสดงว่าผลต่างของความถี่ที่สายอากาศสามารถทำงานได้มีค่าเป็น 5% ของความถี่กลางของความกว้างแถบ

## 2.8 S- Parameter

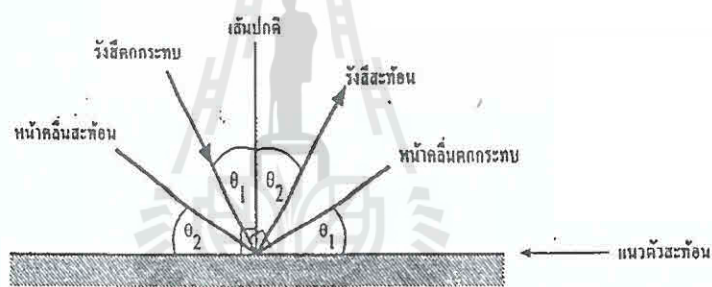
เนื่องจากการกำหนดแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นในสาย (Line) ในย่านความถี่ไมโครเวฟที่ไม่ใช่โหมด TEM เพื่อนำมาคำนวณหาคุณสมบัติต่างๆของอุปกรณ์ในทางปฏิบัตินั้นจะกระทำได้ไม่ง่ายนักจึงจำเป็นต้องทำการวัดขนาด (Magnitude) และเฟสของคลื่นที่เดินทางไปในทิศทางที่กำหนดให้โดยตรง (หรือขนาดและเฟสของคลื่นนิ่ง (Standing Wave) ก็ได้) ดังนั้นในย่านความถี่ไมโครเวฟจึงมีการกำหนดให้พิจารณาในรูปของคลื่นพุ่งกระทบ (Incident Wave) คลื่นสะท้อนกลับ (Reflected Wave) และคลื่นส่งผ่าน (Transmitted Wave) ที่เดินทางผ่านเข้าออกอุปกรณ์ หรือ

โครงข่ายที่มีจำนวน  $N$  พอร์ตในรูปแบบของเมตริกซ์การกระจาย (Scattering Matrix) จึงมีจำนวนของ S-parameter ตั้งแต่  $S_{11}$  จนถึง  $S_{NN}$  เช่น ถ้าเป็นอุปกรณ์ที่มี 2 พอร์ตก็จะมี S-parameter จำนวน 4 ตัว ได้แก่  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  และ  $S_{22}$

$S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  และ  $S_{22}$  คือ S-parameter ของเครื่องมือวัดที่มีลักษณะช่องสัญญาณ 2 พอร์ต โดยปกติสามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์และการสะท้อนค่า S-parameter ได้จากเครื่อง Network Analyzer นอกจากนี้เครื่อง Network Analyzer ยังใช้วัดค่าคงที่อื่นๆ (constant value) ของคลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟได้ เช่น อิมพีแดนซ์สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmission coefficient), การลดทอนของสัญญาณที่ผ่านจุดต่อ (Insertion Loss), การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) และมุม (phase) เป็นต้น

## 2.9 จุดตกกระทบและการสะท้อนของคลื่น

กฎการสะท้อนของคลื่น



รูปที่ 2.14 กฎการสะท้อนของคลื่น

รังสีตกกระทบ คือ แนวที่คลื่นวิ่งเข้าชนตัวสะท้อนก่อนสะท้อน

รังสีสะท้อน คือ แนวที่คลื่นวิ่งออกจากตัวสะท้อนหลังสะท้อน

เส้นปกติ คือ เส้นที่ลากตั้งฉากกับตัวสะท้อน ณ ตำแหน่งที่คลื่นตกกระทบ

มุมตกกระทบ คือ มุม  $\theta_1$  จากวัดได้จากมุมที่หน้าคลื่นตกกระทบทำกับแนวตัวสะท้อน หรือ มุมที่รังสีตกกระทบทำกับเส้นปกติ

มุมสะท้อน คือ มุม  $\theta_2$  จากวัดได้จากมุมที่หน้าคลื่นสะท้อนทำกับแนวตัวสะท้อน หรือ มุมที่รังสีสะท้อนทำกับเส้นปกติ

กฎการสะท้อน

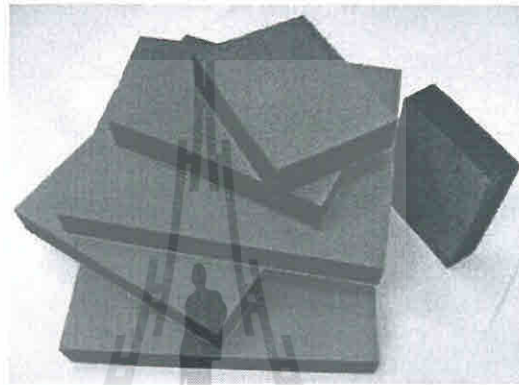
1. มุมตกกระทบ = มุมสะท้อน

2. รังสีตกกระทบ เส้นปกติ และรังสีสะท้อน ต้องอยู่บนระนาบเดียวกัน

### 2.10 Absorber

ตัวช่วยดูดซับคลื่นคลื่นหรือวัสดุใดๆ ที่สามารถดูดคลื่นหรือลดความเข้มของรังสีชนิดก่อกำเนิดไอออนตัวอย่างของสารดูดคลื่นนิวตรอน เช่น แสฟเนียม หรือ แคดเมียม ใช้เป็นแท่งควบคุมในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์สารดูดคลื่นรังสีแกมมา เช่น คอนกรีตและเหล็ก ใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แผ่นกระดาษหรือแผ่นโลหะบางสามารถดูดคลื่นหรือลดความเข้มของรังสีแอลฟาได้

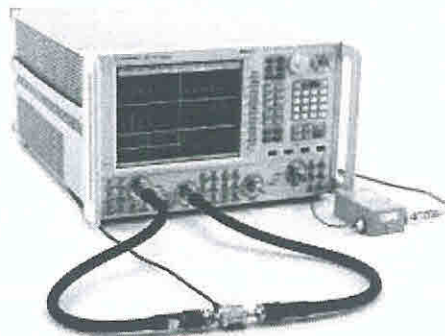
5



รูปที่ 2.15 Microwave Absorber

### 2.11 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาด้านคลื่นความถี่สูงมาก เช่น คลื่นเรดาร์, คลื่นมิลลิเมตรและสามารถวิเคราะห์ลักษณะของคลื่นได้ด้วยในย่านความถี่ต่างๆ



รูปที่ 2.16 เครื่อง Network Analyzer

### บทที่ 3

## การออกแบบและศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna) ขนาด 4x4 และไมโครสตริปไลน์ (Microstrip Line) ที่ความถี่ 5 GHz

### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna) ขนาด 4x4 ทั้งภาคส่งและภาครับ และไมโครสตริปไลน์ (Microstrip Line) ที่ความถี่ 5 GHz เพื่อใช้ในการตรวจสอบสิ่งผิดปกติในวัสดุที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยที่ไม่ทำลายวัสดุนั้น การออกแบบและการวิเคราะห์จะเริ่มจากออกแบบสายอากาศขนาด 1 อิลลิเมนต์ ให้สามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 5 GHz และทำการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ 50 โอห์ม จากนั้นทำการออกแบบระบบไมโครสตริปไลน์ให้ได้ความถี่ที่ 5 GHz และนำค่าที่ได้จากการออกแบบไปสร้างเป็นชิ้นงานจริงเพื่อนำผลที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

### 3.2 การออกแบบสายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna)

ในโครงการนี้เป็นารออกแบบสายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna) และระบบไมโครสตริปไลน์ ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ คือ วัสดุฐานรองแบบ FR4 ซึ่งมีราคาถูก สามารถหาซื้อได้ง่าย โดยวัสดุฐานรองแบบ FR4 มีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุฐานรองชนิด FR4

วัสดุฐานรอง	$\epsilon_r$	$h$ (mm)	$\sigma$ (s/m)	$t$ (mm)	$\tan\delta$
FR4	4.5	1.6	$5.8 \times 10^7$	0.035	0.02

โดยที่	$\epsilon_r$	คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)
	$h$	คือ ค่าความหนาของวัสดุ
	$\sigma$	คือ ค่าความนำของวัสดุตัวนำ (ทองแดง)
	$t$	คือ ค่าความหนาของวัสดุตัวนำ
	$\tan\delta$	คือ ค่ามุมสัมพัทธ์การสูญเสีย (Loss tangent)

### 3.2.1 การคำนวณหาค่าความกว้างไมโครสตริปไลน์ (Microstrip Line)

ในการออกแบบสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) เริ่มจากการคำนวณความกว้างของไมโครสตริปไลน์ ( $w$ ) ออกแบบเพื่อแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ 50 โอห์ม

สำหรับความกว้างของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป ( $w$ ) สามารถคำนวณหาได้จากสมการในบทที่ 2 ซึ่งได้นำแสดงอีกครั้ง คือ สมการ (3.1ก) และ (3.1ข) โดยขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) และค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant :  $\epsilon_{eff}$ )

$$\frac{w}{d} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B-1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[ \ln(B-1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (3.1 ก)$$

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.1 ข)$$

เมื่อ  $w$  คือ ความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

$d$  คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง

$\epsilon_r$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)

$Z_0$  คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ

แทนค่าการคำนวณในสมการที่ (3.1 ข) :

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$B = \frac{60\pi^2}{50\sqrt{4.5}}$$

$$B = 5.58$$

แทนค่าการคำนวณในสมการที่ (3.1 ก) :

$$\frac{w}{d} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B-1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[ \ln(B-1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\}$$

$$\frac{w}{d} = \frac{2}{\pi} \left\{ 5.58 - 1 - \ln(2(5.58) - 1) + \frac{4.5 - 1}{2(4.5)} \left[ \ln(5.58 - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{4.5} \right] \right\}$$

$$\frac{w}{d} = 1.88$$

$$w = 1.88 \times d$$

$$w = 1.88 \times 1.6$$

$$w = 3.008 \text{ มิลลิเมตร}$$

เมื่อนำค่าคุณสมบัติต่างๆของวัสดุฐานรองที่แสดงดังตารางที่ 3.1 แทนลงในสมการที่ (3.1 ก) และ สมการที่ (3.1ข) จะได้ความกว้างของไมโครสตริปไลน์ ซึ่งวัสดุฐานรองที่ใช้ คือ FR4 ดังนั้น ความกว้างของไมโครสตริปไลน์ ที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 3.2

### 3.2.2 การคำนวณหาค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ ( $\lambda_g$ )

การออกแบบสายอากาศแบบสล็อต มีพารามิเตอร์สำคัญที่เป็นตัวกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ คือ ความยาวรอบรูปของช่องเปิดที่อ้างอิงกับความยาวคลื่นสัมพันธ์ ( $\lambda_g$ ) ซึ่งต้องหาผ่านความถี่ที่ต้องการออกแบบ ในโครงการนี้จะทำการศึกษาและออกแบบสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ที่ความถี่ 5 GHz ดังนั้นเมื่อนำสมการที่ (3.1ก) และ (3.1ข) มาทำการคำนวณจะสามารถหาค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ ( $\lambda_g$ ) ได้

คำนวณหาความยาวคลื่นในอากาศ ( $\lambda_0$ ) ได้จาก

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (3.1 ค)$$

ค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ ( $\lambda_g$ ) ในวัสดุฐานรอง

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.1 ง)$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.1 จ)$$

ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant :  $\epsilon_{eff}$ )

สามารถคำนวณได้จาก

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \sqrt{1 + \frac{12d}{w}} \quad (3.1 ฉ)$$

โดยที่  $c$  คือ ความเร็วแสง (ประมาณ  $3 \times 10^8$ )

$f$  คือ ความถี่ที่ต้องการออกแบบ

$\epsilon_{eff}$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant)

$\epsilon_r$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)

แทนค่าการคำนวณในสมการที่ (3.1 ค)

$$\lambda_0 = \frac{c}{f}$$

$$\lambda_0 = \frac{3 \times 10^8}{5 \times 10^9}$$

$$\lambda_0 = 60 \text{ มิลลิเมตร}$$

แทนค่าการคำนวณในสมการที่ (3.1 ฉ)

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_{r+1} + \epsilon_{r-1}}{2} + \frac{\epsilon_{r+1} - \epsilon_{r-1}}{2} \sqrt{1 + \frac{12d}{w}}$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{4.5+1}{2} + \frac{4.5-1}{2} \sqrt{1 + \frac{12(1.6)}{3.008}}$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = 3.39$$

แทนค่าการคำนวณในสมการที่ (3.1 ง)

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}$$

$$\lambda_g = \frac{60 \text{ mm}}{\sqrt{3.39}}$$

$$\lambda_g = 32.59 \text{ มิลลิเมตร}$$

ความยาวของสล็อต

$$\frac{\lambda_g}{2} = \frac{32.59}{2} = 16.30 \text{ มิลลิเมตร}$$

ระยะห่างของสายอากาศ

$$\frac{\lambda_g}{4} = \frac{32.59}{4} = 8.14 \text{ มิลลิเมตร}$$

สำหรับขนาดสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ที่ออกแบบนั้นมักใช้เทียบกับความยาวคลื่นสัมพันธ์ ( $\lambda_g$ ) และโดยทั่วไปถ้าเป็นสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ความยาวของสล็อตจะประมาณเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวสัมพันธ์ ( $\lambda_g/2$ )

แต่ถ้าช่องเปิดนั้นมีความกว้างมากขึ้นเป็นรูปสี่เหลี่ยม ก็ต้องนำเอาความกว้างมาชดเชยกับความยาวของด้านที่แพร่กระจายคลื่น หรือถ้าคิดจากเส้นรอบรูปของช่องเปิดก็จะมากกว่าหนึ่งความ



ยาวคลื่นสัมพันธ์ ( $\lambda_g$ ) ไม่มากนัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความกว้างและความยาวของช่องเปิดที่สัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ แต่การกำหนดความยาวเส้นรอบรูปที่กล่าวมานี้ อาจไม่สามารถใช้กับรูปร่างช่องเปิดที่ซับซ้อนได้ สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากการใช้วัสดุฐานรองชนิด FR4 จะถูกนำไปใช้ในการจำลองสายอากาศจะใช้วิธีการคำนวณจากสมการข้างต้น โดยต้องกำหนดค่าความถี่และคุณสมบัติของวัสดุฐานรองที่ใช้ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

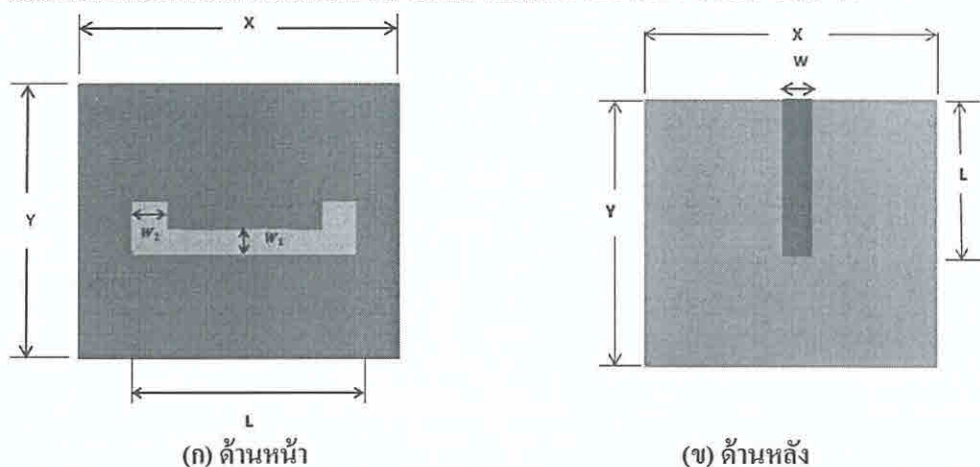
ตารางที่ 3.2 ค่าที่คำนวณได้จากวัสดุฐานรองชนิด FR4 เพื่อใช้ออกแบบ

วัสดุฐานรอง	$f$ (GHz)	$\epsilon_{eff}$	$\lambda_0$ (mm)	$\lambda_g$ (mm)	$\lambda_g/2$ (mm)	$\lambda_g/4$ (mm)	$w$ (mm)
FR4	5	3.39	60	32.59	16.30	8.14	3.008

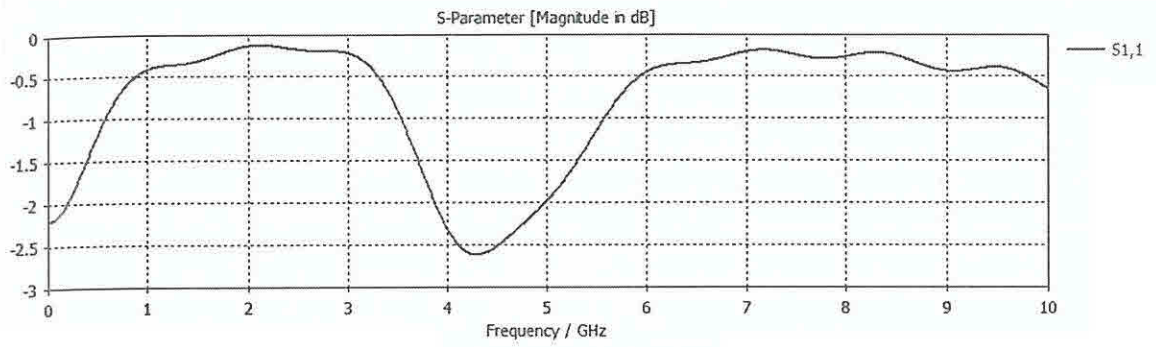
ซึ่งค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ ( $\lambda_g$ ) และความกว้างของไมโครสตริปไลน์ ( $w$ ) ของการใช้วัสดุฐานรองชนิด FR4 ที่จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบต่อไป

### 3.3 การจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

การจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อให้สายอากาศสามารถทำงานได้ที่ความถี่ 5 GHz โดยมีค่า  $S_{11}$  ต่ำกว่า -10dB เพราะจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน และทำให้การแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีมากยิ่งขึ้น โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการแมตซ์คือ 50 โอห์ม แต่เมื่อนำค่าที่คำนวณได้จากตารางที่ 3.2 มาใช้ในการจำลอง พบว่าสายอากาศยังไม่ได้สามารถทำงานได้ที่ความถี่ที่ต้องการ และค่าอิมพีแดนซ์ยังไม่แมตซ์ที่ 50 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ รูปที่ 3.2



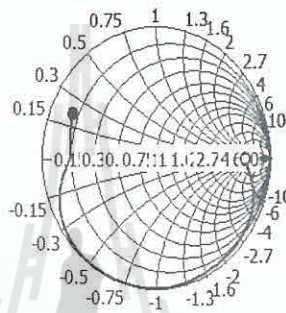
รูปที่ 3.1 สายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) 1 มิติเมตร



ค่า  $S_{11}$

- 0 (396, 0) Ohm
  - 5 (5.96, 11) Ohm
- Frequency / GHz

S-Parameter [Impedance View]



—  $S_{1,1}$  (50 Ohm)

ข ค่าอิมพีแดนซ์

รูปที่ 3.2 กราฟแสดงค่า  $S_{11}$  และค่าอิมพีแดนซ์ ที่ได้จากการคำนวณเบื้องต้น

จากรูปที่ 3.1ก พบว่าค่า  $S_{11}$  ที่ความถี่ 5 GHz มีค่าเท่ากับ -1.98 dB แต่ค่า  $S_{11}$  ต่ำสุดอยู่ที่ความถี่ 4.29 GHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -2.62 dB ซึ่งสายอากาศยังไม่สามารถทำงานได้ดีในความต้องการ และเมื่อพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์พบว่ายังไม่แมตซ์ที่ 50 โอห์ม ซึ่งค่า  $S_{11}$  และค่าอิมพีแดนซ์มีความสัมพันธ์กัน ดังแสดงในสมการที่ (3.1ข) และ (3.1ข)

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \tag{3.1ข}$$

$$|S_{11}| = 20 \log |\Gamma| \tag{3.1ข}$$

แทนค่าการคำนวณในสมการที่ (3.1 ข)

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

$$\Gamma = \frac{(5.96 + j11) - 50}{(5.96 + j11) + 50}$$

$$\Gamma = \frac{-44.04 + j11}{55.96 + j11}$$

$$\Gamma = \frac{45.39 \angle 165.98}{57.03 \angle 11.12}$$

$$\Gamma = 0.795 \angle 14.93$$

แทนค่าการคำนวณในสมการที่ (3.1 ซ)

$$|S_{11}| = 20 \log |\Gamma|$$

$$|S_{11}| = 20 \log 0.795$$

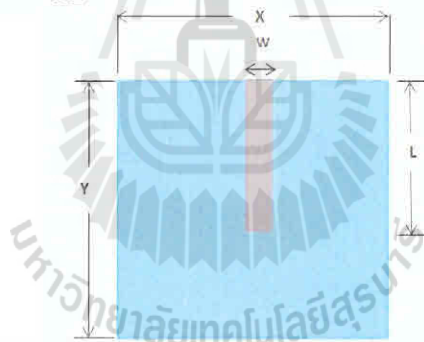
$$|S_{11}| = 20 \log 0.795$$

$$|S_{11}| = -1.99 \text{ dB}$$

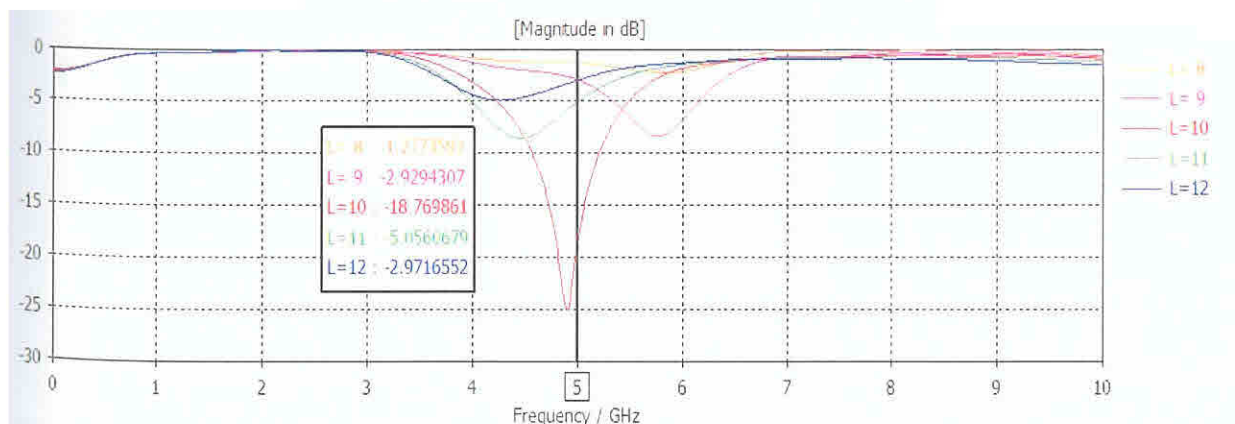
ดังนั้น ทางคณะผู้จัดทำจึงได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

### 3.3.1 การศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความยาว $L$

ในเบื้องต้นนี้ เป็นการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงระยะความยาว  $L$  ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยให้ค่าพารามิเตอร์ทุกตัวคงที่คือ  $w = 3.008$  มิลลิเมตร,  $x = 20$  มิลลิเมตร,  $y = 20$  มิลลิเมตร เพื่อเปรียบเทียบค่า  $S_{11}$  ในการปรับแต่ละค่า ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความยาว  $L$



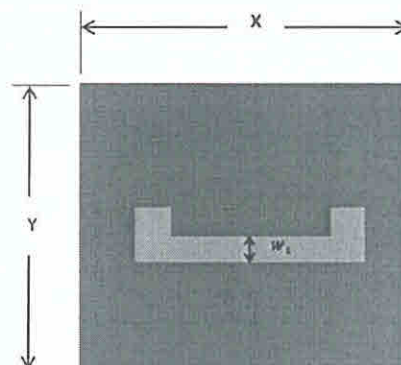
รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบ  $S_{11}$  เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า  $L$

ในขั้นตอนนี้ใช้ความกว้างของไมโครสตริปไลน์ ( $w$ ) ที่ได้จากการคำนวณดังที่แสดงอยู่ในตารางที่ 3.2 คือ 3.008 มิลลิเมตร ในการศึกษาผลกระทบของ  $L$  ที่เกิดขึ้นต้องกำหนดความกว้างของสล็อตให้คงที่ จากนั้นทำการปรับค่า  $L$  เพื่อศึกษาผลกระทบของ  $S_{11}$

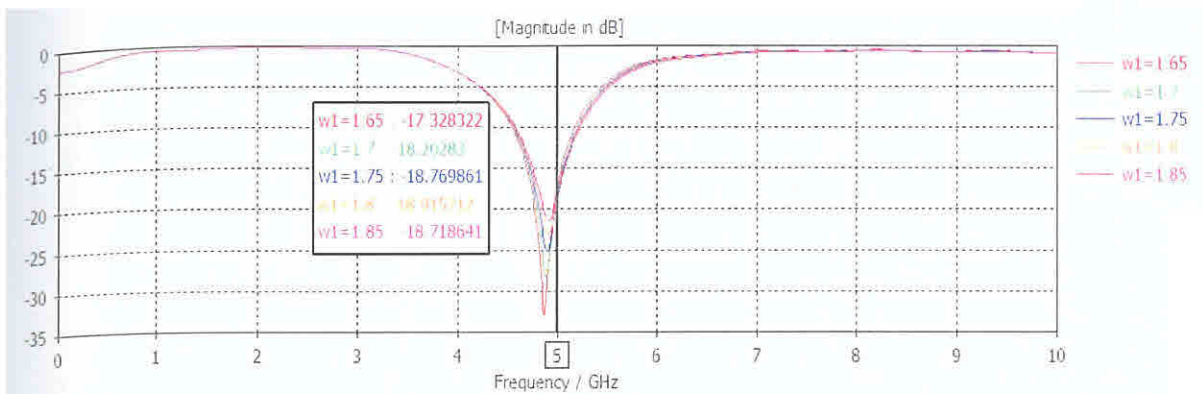
จากการจำลองการเปลี่ยนระยะ  $L$  จาก 8 - 12 มิลลิเมตร พบว่าความยาว  $L$  จะมีผลต่อการแมตซ์อิมพีแดนซ์มากที่สุด ถ้าความยาว  $L$  มากหรือน้อยเกินไปจะทำให้การแมตซ์อิมพีแดนซ์ลดน้อยลง ขณะเดียวกันจะมีผลตอบสนองต่อความถี่เรโซแนนซ์เล็กน้อย ผลจากการศึกษาการปรับความยาว  $L$  นี้พบว่าควรพิจารณาเลือกค่า  $L$  ที่ทำให้การแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุดเป็นอันดับแรกก่อน หลังจากนั้นให้ดูว่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้ตรงกับความถี่ที่เราออกแบบหรือไม่ ถ้าไม่ตรงต้องปรับขนาดของสายอากาศใหม่ และขณะเดียวกันต้องปรับค่า  $L$  ใหม่อีกครั้ง ทำสลับไปมาจนกว่าจะได้แมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดี และมีความถี่เรโซแนนซ์ตรงตามที่ต้องการ ผลการจำลองค่า  $S_{11}$  ที่แสดงในรูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่าความยาว  $L$  เท่ากับ 10 มิลลิเมตร จะให้การแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุด ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 4.9 GHz มีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ 25.11 dB และมีแถบช่วงความถี่ตั้งแต่ 4.58 - 5.21 GHz

### 3.3.2 การศึกษาผลกระทบจากการปรับความกว้างของ $w_1$

ในเบื้องต้นทำการจำลองผลการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของ  $w_1$  ดังแสดงในรูปที่ 3.5 จาก 1.65 - 1.85 มิลลิเมตร ซึ่งในการจำลองครั้งนี้ให้ค่า  $L=10$  เพื่อดูผลกระทบในการปรับความกว้างของ  $w_1$  เพื่อเปรียบเทียบค่า  $S_{11}$  ในการปรับค่าแต่ละค่า ซึ่งแสดงผลดังแสดงใน รูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 แสดงการปรับความกว้างของ  $w_1$



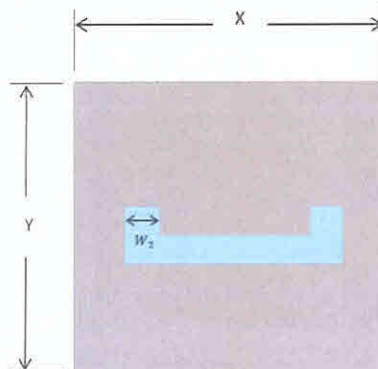
รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบค่า  $S_{11}$  เมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของ  $w_1$

จากผลการจำลองพบว่า เมื่อลดความกว้างของ  $w_1$  จะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ต่ำกว่าความถี่ที่เราต้องการ และเมื่อเพิ่มความกว้างของ  $w_1$  จะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์เข้าใกล้กับความถี่ที่เราต้องการ สรุปผลคือ เมื่อทำการเพิ่มความกว้างของ  $w_1$  จาก 1.65 - 1.85 มิลลิเมตร ความถี่จะมีค่าสูงขึ้นและมีค่า  $S_{11}$  มากขึ้น ซึ่งถ้าค่า  $S_{11}$  มีค่าต่ำมากๆจะส่งผลให้สายอากาศมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีมากยิ่งขึ้น

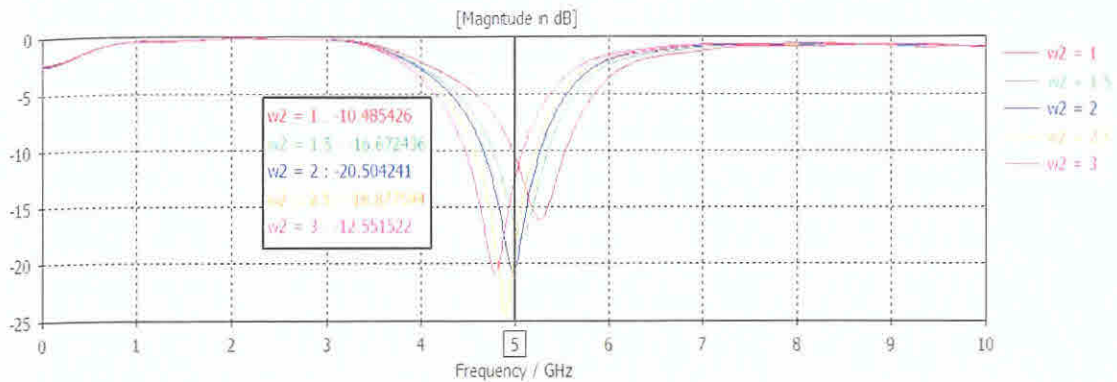
ดังนั้นในการจำลองนี้กลุ่มของคณะผู้จัดทำได้เลือกค่าความกว้างของ  $w_1$  มีค่าเป็น 1.75 มิลลิเมตร พบว่าค่า  $S_{11}$  ที่ความถี่ 5 GHz มีค่าเท่ากับ -18.77 dB แต่ค่า  $S_{11}$  ที่มีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ความถี่ 4.90 GHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -25.11 dB และมีแถบช่วงความถี่ตั้งแต่ 4.58 - 5.2 GHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการ

### 3.3.3 การศึกษาผลกระทบจากการปรับความกว้างของ $w_2$

ในเบื้องต้นทำการจำลองผลการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของ  $w_2$  ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จาก 1.5 - 3.5 มิลลิเมตร ซึ่งในการจำลองครั้งนี้ให้ค่า  $L = 10$  มิลลิเมตร,  $w_1 = 1.75$  มิลลิเมตร เพื่อดูผลกระทบในการปรับความกว้างของ  $w_2$  เพื่อเปรียบเทียบค่า  $S_{11}$  ในการปรับค่าแต่ละค่า ซึ่งแสดงผล ในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 แสดงการปรับความกว้างของ  $w_2$



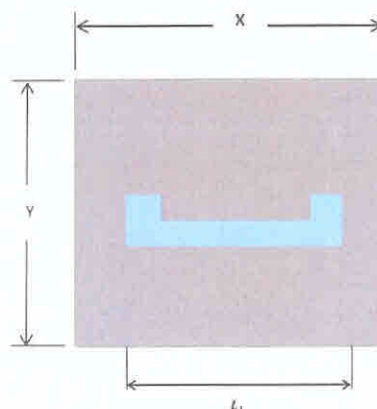
รูปที่ 3.8 การเปรียบเทียบค่า  $S_{11}$  เมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของ  $W_2$

จากผลการจำลองพบว่า เมื่อลดความกว้างของ  $W_2$  จะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์คือความถี่ที่ได้จะสูงกว่าความถี่ที่เราต้องการ และเมื่อเพิ่มความกว้างของ  $W_2$  จะทำให้ความถี่ที่ได้มีค่าต่ำกว่าความถี่ที่เราต้องการ สรุปผลคือ การเปลี่ยนแปลงความกว้างของ  $W_2$  มีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ ยิ่งทำการลดความกว้างของ  $W_2$  ยิ่งได้ค่าความถี่ที่สูงขึ้น และเมื่อทำการเพิ่มความกว้างของ  $W_2$  จะยิ่งทำให้ได้ความถี่ที่ต่ำลง

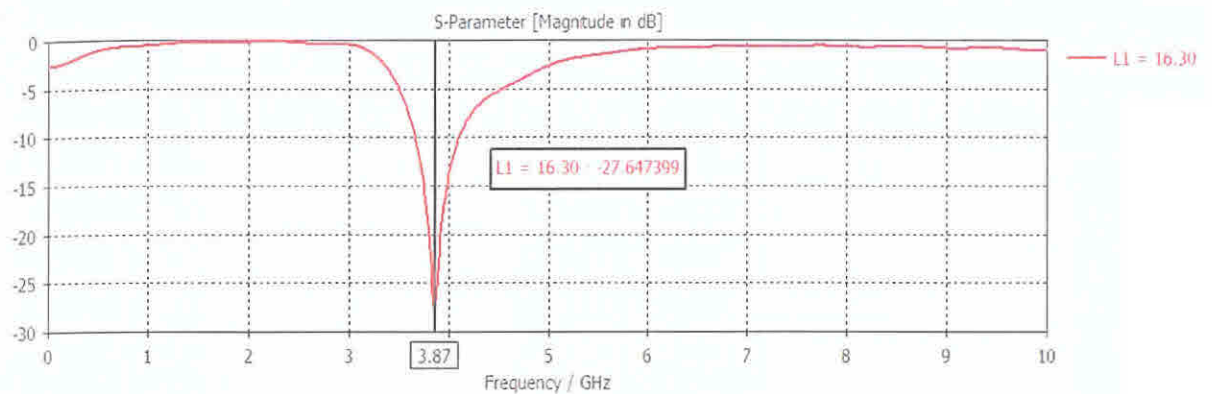
ในการจำลองนี้กลุ่มของคณะผู้จัดทำได้เลือกค่าความกว้างของ  $W_2$  มีค่าเป็น 2 มิลลิเมตร เนื่องจากได้ค่าตรงกับความถี่ที่ต้องการออกแบบ และมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -20.50 dB โดยมีแถบช่วงความถี่ตั้งแต่ 4.67 - 5.27 GHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการ

### 3.3.4 การศึกษาผลกระทบจากการปรับความยาวของ $L_1$

การจำลองเพื่อหาผลของการเปลี่ยนแปลงความยาวของ  $L_1$  ดังแสดงในรูปที่ 3.9 จะต้องกำหนดตามค่าพารามิเตอร์เบื้องต้น ให้คงที่ คือ  $L = 10$  มิลลิเมตร,  $w_1 = 1.75$  มิลลิเมตร และ  $w_2 = 2$  มิลลิเมตร จากนั้นทำการจำลองค่าความยาวของ  $L_1$  ตามที่คำนวณได้คือ  $\lambda_g/2 = 16.30$  มิลลิเมตร ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.10



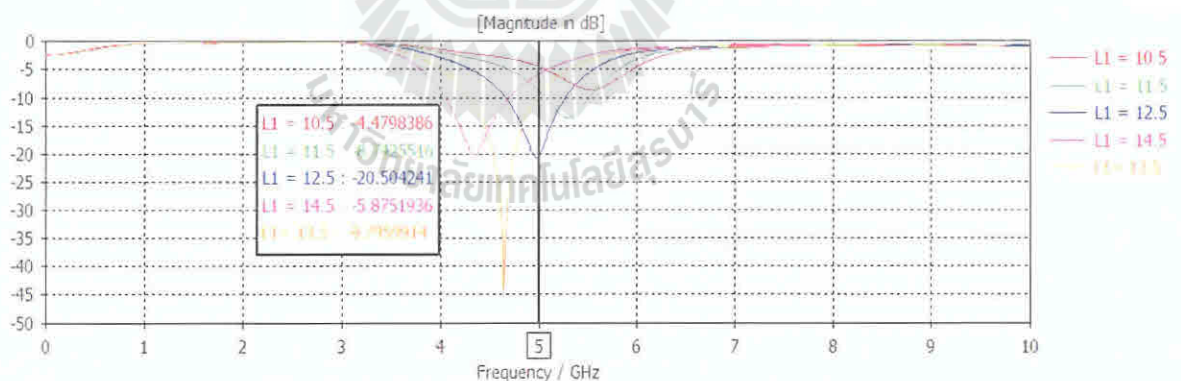
รูปที่ 3.9 แสดงการปรับความยาวของ  $L_1$



รูปที่ 3.10 ค่า  $S_{11}$  ที่ได้จากการปรับความยาวของ  $L_1$  ที่ได้จากการคำนวณ  $\lambda_g/2$

จากรูปที่ 3.10 พบว่า เมื่อความยาวของ  $L_1$  มีค่าตามที่คำนวณ  $\lambda_g/2 = 16.30$  มิลลิเมตร พบว่าค่า  $S_{11}$  ที่ความถี่ 5 GHz มีค่าเท่ากับ -2.35 dB แต่ค่า  $S_{11}$  ที่มีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ความถี่ 3.87 GHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -27.65 dB โดยมีแถบช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.68 - 4.1 GHz ซึ่งไม่ครอบคลุมความถี่ที่ต้องการ

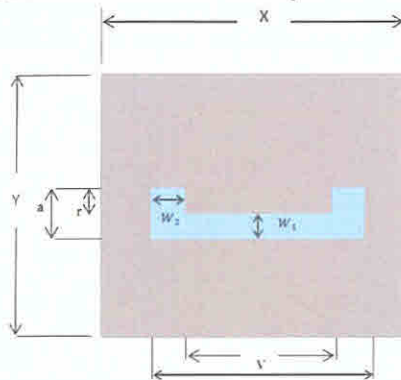
ดังนั้นจึงได้จำลองค่าความยาวของ  $L_1$  ใหม่ จาก 11.5 - 13.5 มิลลิเมตร พบว่าความยาวของ  $L_1$  มีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์และค่า  $S_{11}$  เป็นอย่างมาก โดยค่าที่ดีที่สุด คือ ความยาว 12.5 มิลลิเมตร พบว่าได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 4.93 GHz และค่า  $S_{11}$  มีค่า -23.73 dB แสดงดังรูปที่ 3.10



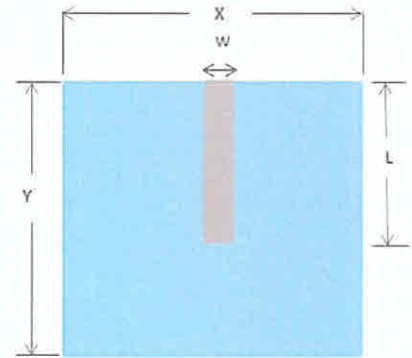
รูปที่ 3.11 การเปรียบเทียบค่า  $S_{11}$  เมื่อปรับความยาวของ  $L_1$

ในการจำลองนี้กลุ่มของคณะผู้จัดทำได้เลือกค่าความยาวของ  $L_1$  มีค่าเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร พบว่าค่า  $S_{11}$  ที่ความถี่ 5 GHz มีค่าเท่ากับ -20.50 dB แต่ค่า  $S_{11}$  ที่มีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ความถี่ 4.98 GHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -20.72 dB โดยมีแถบช่วงความถี่ตั้งแต่ 4.67 - 5.27 GHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการ

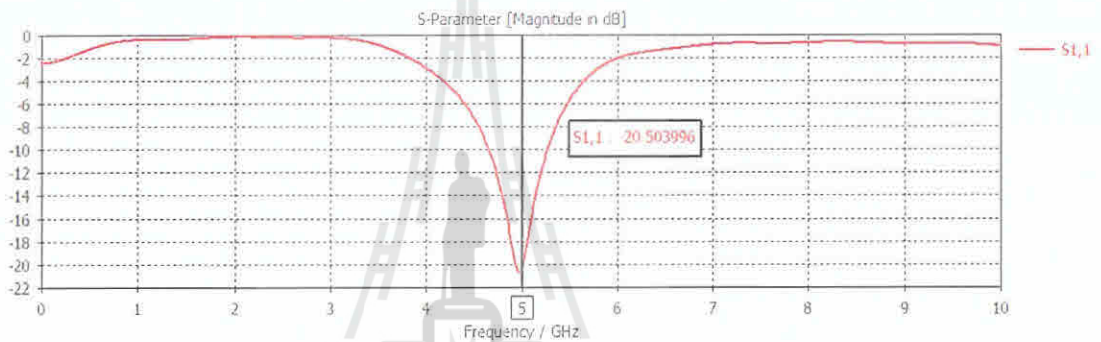
ทำการปรับพารามิเตอร์ต่างๆจะได้ผลดังต่อไปนี้



(ก) ด้านหน้า



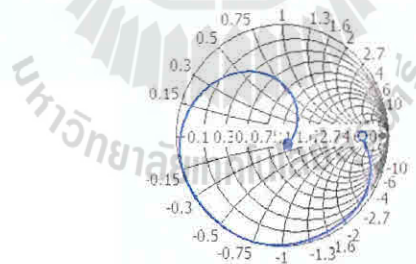
(ข) ด้านหลัง



ก แสดงค่า  $S_{11}$

[Impedance View]

- 0 (363, 0) Ohm
  - 5 (54.5, -8.35) Ohm
- Frequency / GHz:



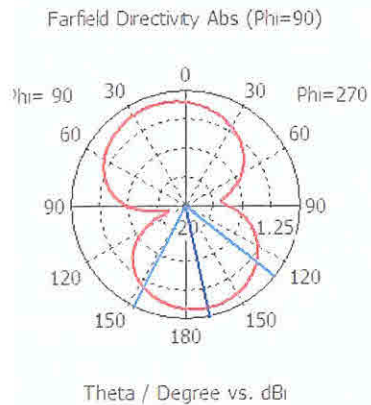
—  $L1 = 12.5$  (49.34 Ohm)

ข แสดงค่าอิมพีแดนซ์

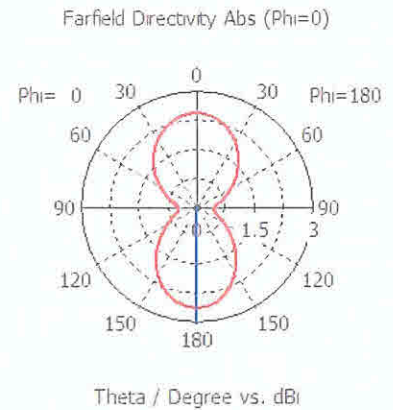
รูปที่ 3.12 กราฟแสดงค่า  $S_{11}$  ที่ได้จากการปรับค่าทั้งหมด

จากรูปที่ 3.12 พบว่าค่า  $S_{11}$  ที่ความถี่ 5 GHz มีค่าเท่ากับ -20.50 dB และมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 54.5-j8.35 โอห์ม ซึ่งค่า  $S_{11}$  เป็นไปตามที่คณะผู้จัดทำต้องการนั่นคือ สายอากาศสามารถทำงานที่ความถี่ 5 GHz ได้ และมีค่า  $S_{11}$  ต่ำกว่า -10 dB และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการแมตซ์ ซึ่งทั้งค่า  $S_{11}$  และค่าอิมพีแดนซ์มีความสัมพันธ์กันดังแสดงในสมการที่ (3.1ข) และ (3.1ซ)





ระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane)



ระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane)

### ก รูประนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก 2มิติ



รูปที่ 3.13 รูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสลิต (Slot Antenna) ขนาด 1 มิลลิเมตร (2มิติและ3มิติ)

จากรูปที่ 3.13 พบว่ารูปในการแผ่พลังงาน 3มิติ ของสายอากาศ 1 มิลลิเมตร จะมีการแผ่พลังงาน 2 ทิศทาง แสดงว่าสายอากาศสามารถทำงานได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง

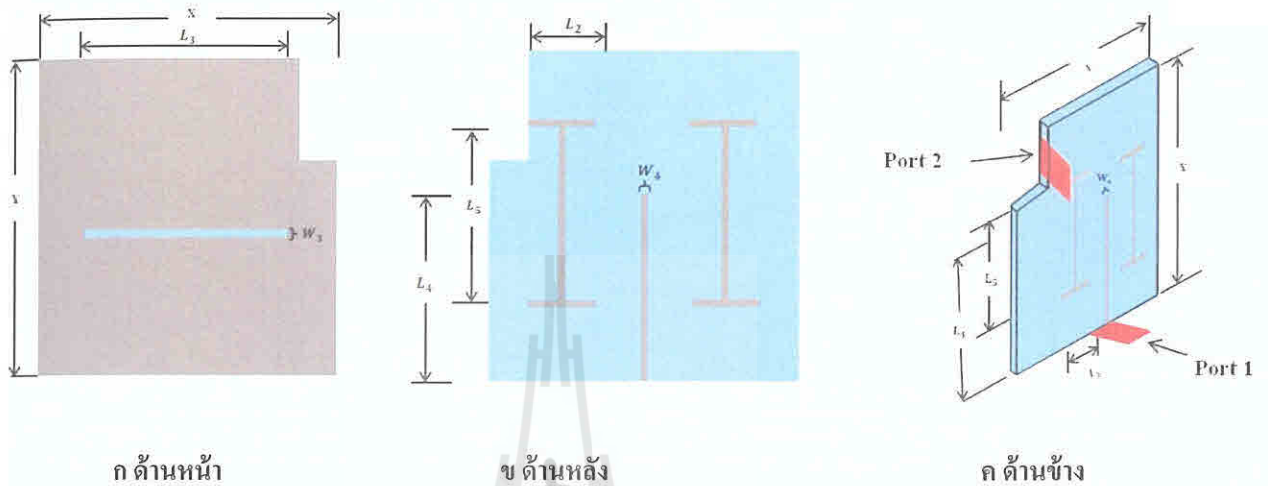
ตารางที่ 3.3 สรุปค่าที่ใช้ในการออกแบบ

ค่าพารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการออกแบบ / ขนาดทางกายภาพ (mm)
$X$	20
$Y$	20
$a$	3.5
$r$	1.75
$v$	7.5
$L$	10
$L_1$	12.5
$W$	3.008
$W_1$	1.75
$W_2$	2

จากการออกแบบ โดยแทนค่าที่ได้ทั้งหมดนี้ จะได้ความถี่ที่ 4.94 GHz ค่า  $S_{11}$  คือ -27.04 dB และแถบช่วงความถี่ตั้งแต่ 4.58 - 5.20 GHz ซึ่งครอบคลุมความถี่ที่เราต้องการ

### 3.4 การออกแบบระบบป้อนไมโครสตริปไลน์ ที่ความถี่ 5 GHz

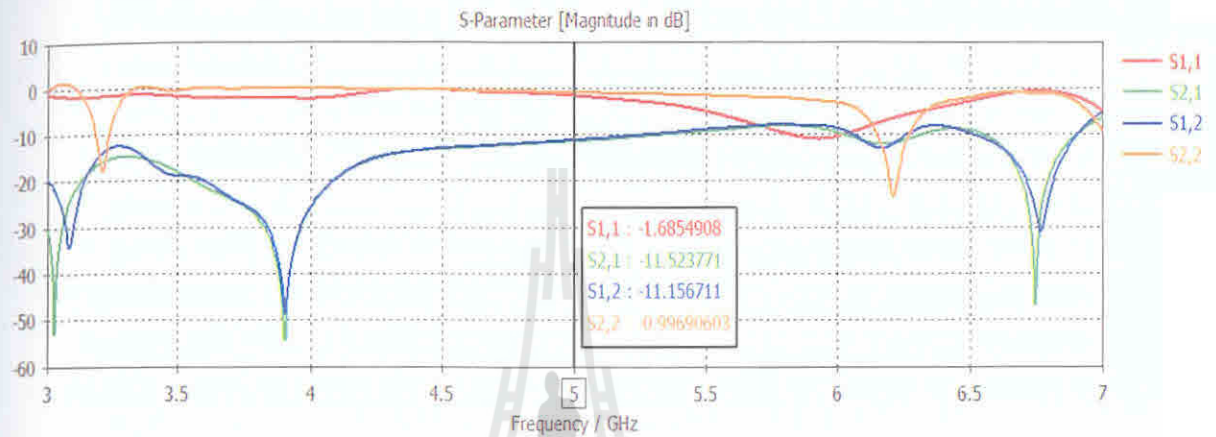
การจำลองเพื่อออกแบบระบบป้อนไมโครสตริปไลน์ที่ความถี่ 5 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.14 การออกแบบระบบป้อนไมโครสตริปไลน์ที่ความถี่ 5 GHz

ในการออกแบบข้างต้นนี้ เราได้ทำการทดสอบโดยการใช้พอร์ต 2 พอร์ต ในการรับส่งคลื่นหากันซึ่งถ้าพอร์ตที่ 1 สามารถส่งคลื่นไปหาพอร์ตที่ 2 ได้ แสดงว่า เมื่อพอร์ตที่ 1 รับสัญญาณไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายและส่งคลื่นไปยังพอร์ตที่ 2 โดยพอร์ตที่ 2 จะทำหน้าที่แผ่คลื่นไปยังสายอากาศแต่ละตัวเพื่อให้สายอากาศสามารถทำงานได้ เมื่อสายอากาศได้รับคลื่นก็จะแผ่คลื่นออกไปในอากาศ และการที่พอร์ตที่ 2 สามารถส่งคลื่นกลับมายังพอร์ตที่ 1 ได้ แสดงว่า เมื่อสายอากาศรับคลื่นจากภายนอก สายอากาศจะแปลงคลื่นนั้นเป็นสัญญาณไฟฟ้ามาเข้าที่พอร์ตที่ 2 และส่งกลับมายังพอร์ตที่ 1 ถ้าเป็นเช่นนี้แสดงว่าเมื่อนำสายอากาศสล็อต (Slot Antenna) มาต่อเข้ากับระบบไมโครสตริปไลน์ และต่อแหล่งจ่ายเข้ากับพอร์ตที่ 1 จะมีการแผ่คลื่นจากพอร์ตที่ 1 ไปยังสายอากาศทุกตัว ทำให้สายอากาศทุกตัวสามารถทำงานได้

ในขั้นตอนนี้ใช้ความกว้างของไมโครสตริปไลน์ ( $w$ ) ที่ได้จากการคำนวณ ดังที่แสดงอยู่ในตาราง-ที่ 3.2 คือ  $w = 3.008$  มิลลิเมตร และระยะห่างของสายอากาศที่ได้คำนวณไว้คือ  $\frac{\lambda_g}{4} = 8.14$  มิลลิเมตร ซึ่งถ้าเราเลือกใช้ค่า 8.14 มิลลิเมตร จะทำให้สายอากาศซ้อนทับกัน ทางคณะผู้จัดทำจึงได้เลือกใช้ระยะห่างของสายอากาศที่  $\frac{5\lambda_g}{4}$  ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ค่าที่ได้จากการออกแบบระบบป้อนที่ได้ค่าจากการคำนวณ

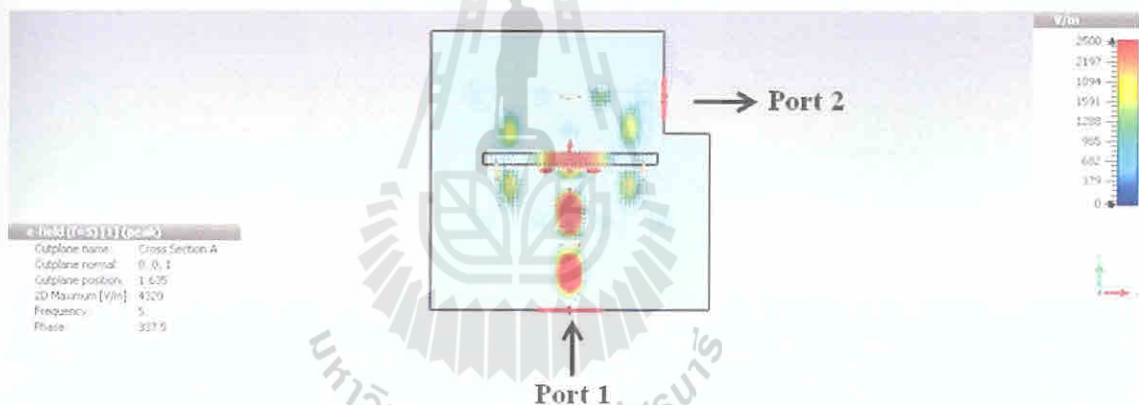
จากผลการทดลองพบว่าเมื่อออกแบบตามค่าที่คำนวณไว้ จะได้คุณลักษณะของระบบป้อนไมโครสตริปไลน์ ดังนี้

ตารางที่ 3.4 แสดงค่า  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  และ  $S_{22}$  ที่ได้ค่าจากโปรแกรม CST Microwave

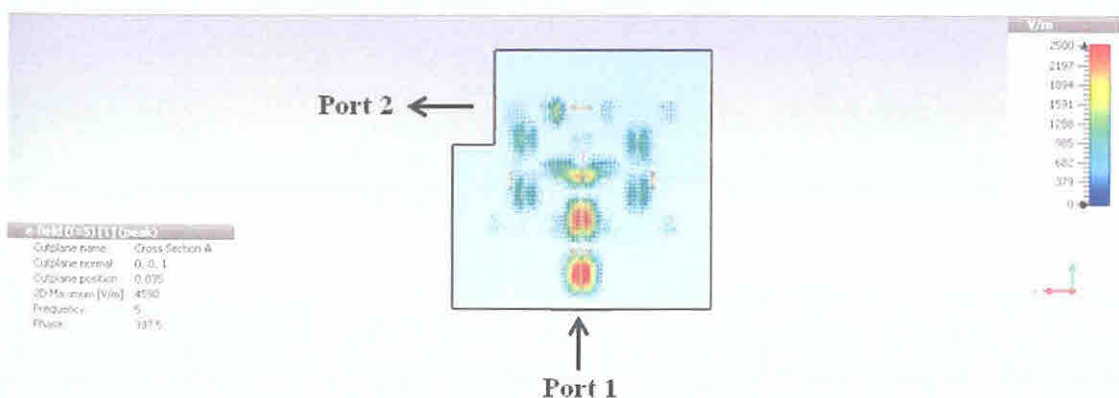
Studio

คุณสมบัติ	ความถี่ (GHz)	ค่า $S_{11}$ (dB)
$S_{11}$	5	-1.69
$S_{12}$	5	-11.16
$S_{21}$	5	-11.52
$S_{22}$	5	-0.99

จากการจำลองผลเพื่อศึกษาระบบไมโครสตริปไลน์ พบว่าค่า S-parameter ยังไม่เป็นไปตามที่ต้องการ กล่าวคือ ที่ความถี่ 5 GHz ค่า  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  ยังมีค่าสูง หมายความว่าค่าอิมพีแดนซ์ยังไม่แมตซ์ที่ 50 โอห์ม และค่า  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  มีค่าน้อย ทำให้สนามไฟฟ้าแผ่คลื่นออกจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 2 และแผ่คลื่นจากพอร์ตที่ 2 มายังพอร์ตที่ 1 ได้ไม่ดีเท่าที่ควร กล่าวคือ เมื่อส่งคลื่นออกไปแล้วคลื่นจะเกิดการจางหายระหว่างทางทำให้มีการรับส่งคลื่นหากันได้น้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.16ก และรูปที่ 3.16ข ซึ่งถ้าต้องการให้รับส่งคลื่นจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 2 และ พอร์ตที่ 2 ส่งคลื่นกลับมายังพอร์ตที่ 1 ได้ดี ค่า  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  ต้องมีค่าใกล้เคียง 0 dB กล่าวคือ เมื่อส่งคลื่นออกไปแล้วคลื่นจะสามารถรับส่งหากันได้เป็นอย่างดีไม่มีการจางหายระหว่างทาง ดังนั้น ทางคณะผู้จัดทำจึงได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้ค่า  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  มีค่าอิมพีแดนซ์แมตซ์ที่ 50 โอห์ม และให้ค่า  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  มีค่าใกล้เคียง 0 dB ดังนี้



ก รูปแบบการแผ่คลื่นของสนามไฟฟ้า กรณียังไม่ปรับค่าพารามิเตอร์ (ด้านหน้า)

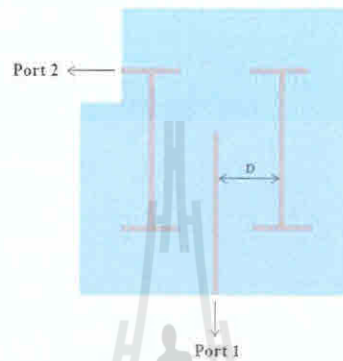


ข รูปแบบการแผ่คลื่นของสนามไฟฟ้า กรณียังไม่ปรับค่าพารามิเตอร์ (ด้านหลัง)

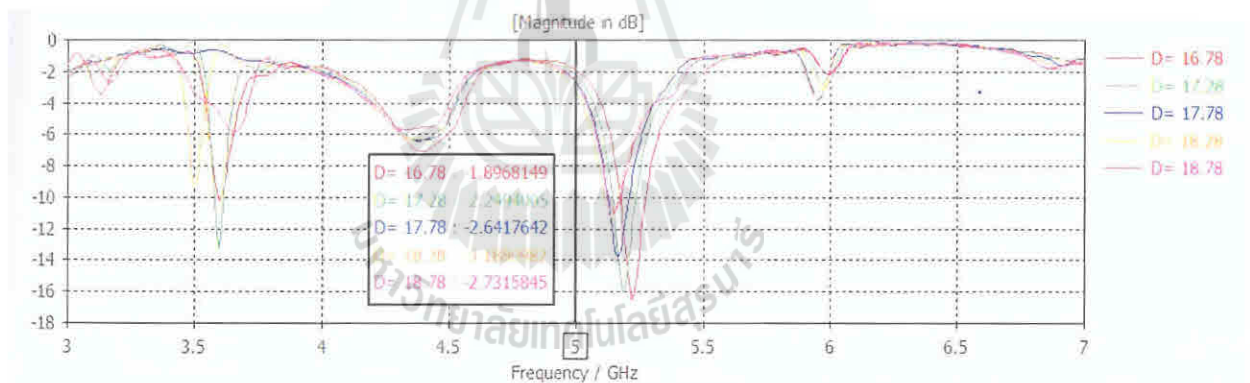
รูปที่ 3.16 แสดงรูปการแผ่คลื่นของสนามไฟฟ้า

### 3.4.1 การศึกษาผลกระทบจากการปรับระยะ $D$

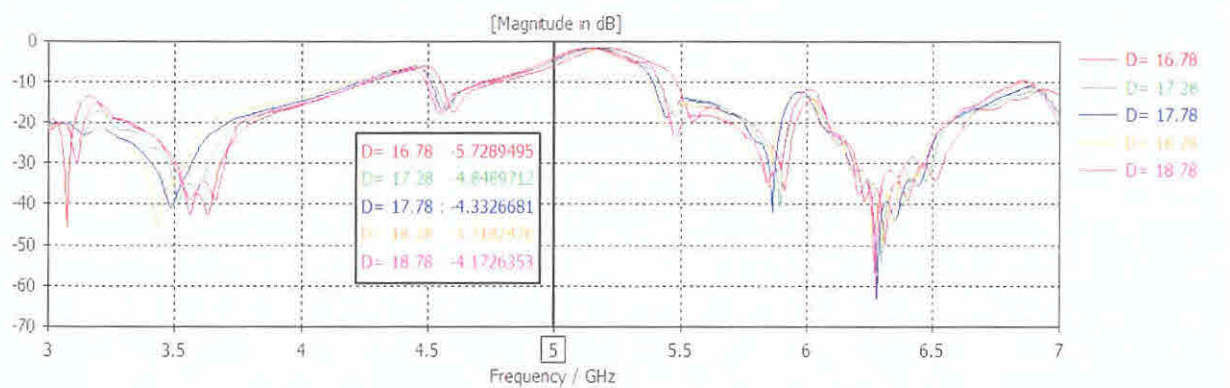
ในเบื้องต้นทำการจำลองผลกระทบจากระยะ  $D$  ดังแสดงในรูปที่ 3.17 โดยทำการปรับระยะ  $D$  จาก 16.78 - 18.78 มิลลิเมตร ซึ่งในการจำลองครั้งนี้จะทำให้ค่าทุกค่าคงที่ เพื่อดูผลกระทบจากการเลื่อนระยะ  $D$  เพื่อจะทำการเปรียบเทียบค่า  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  และ  $S_{22}$  ในการปรับค่าแต่ละค่า ซึ่งแสดงผล ดังรูปที่ 3.18 และแสดงค่าอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 3.19



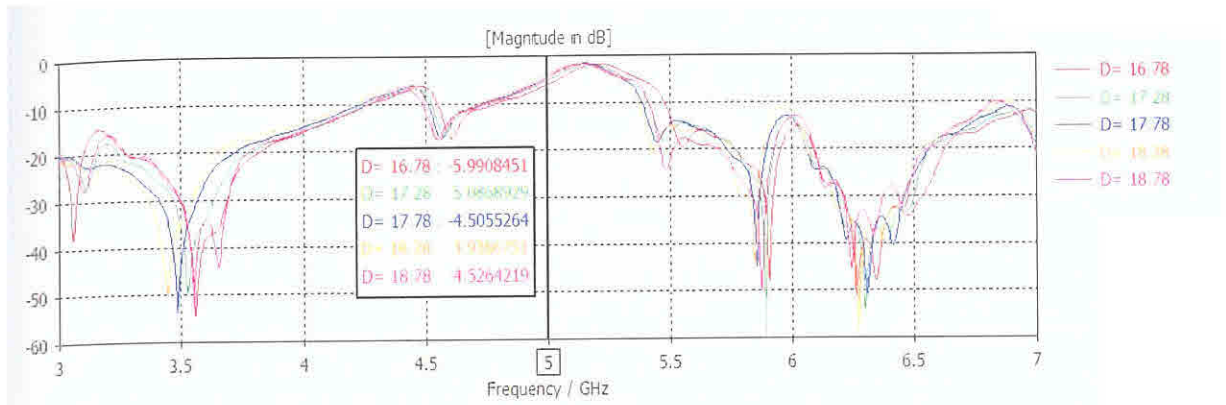
รูปที่ 3.17 ศึกษาผลกระทบจากการปรับระยะ  $D$



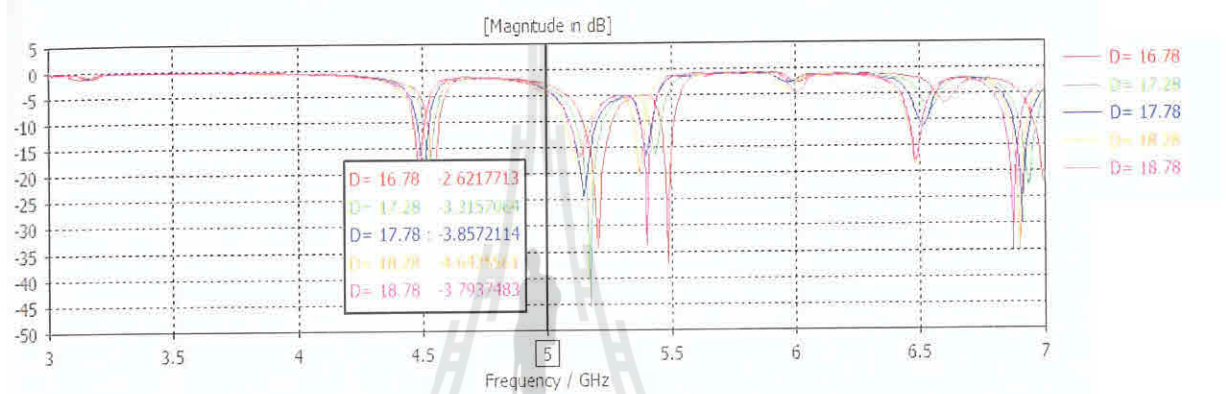
ค่า  $S_{11}$



ค่า  $S_{12}$



ค่า  $S_{21}$

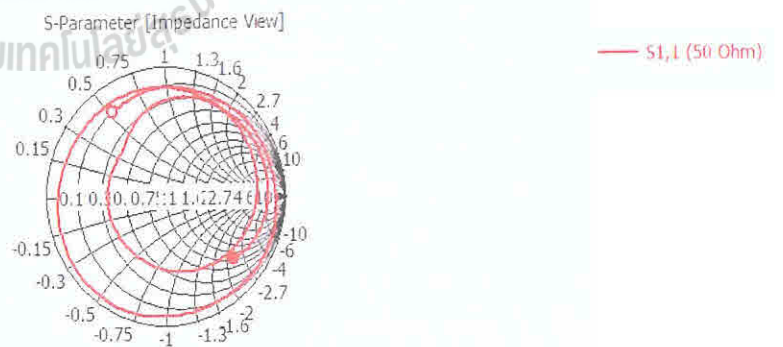


ค่า  $S_{22}$

รูปที่ 3.18 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่า  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  และ  $S_{22}$  เมื่อทำการปรับระยะ  $D$

- 3 (7.5, 26.2) Ohm
  - 5 (56, -115) Ohm
- Frequency / GHz

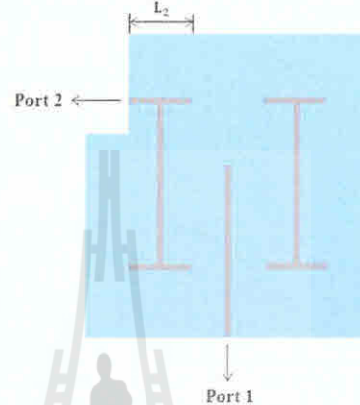
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล



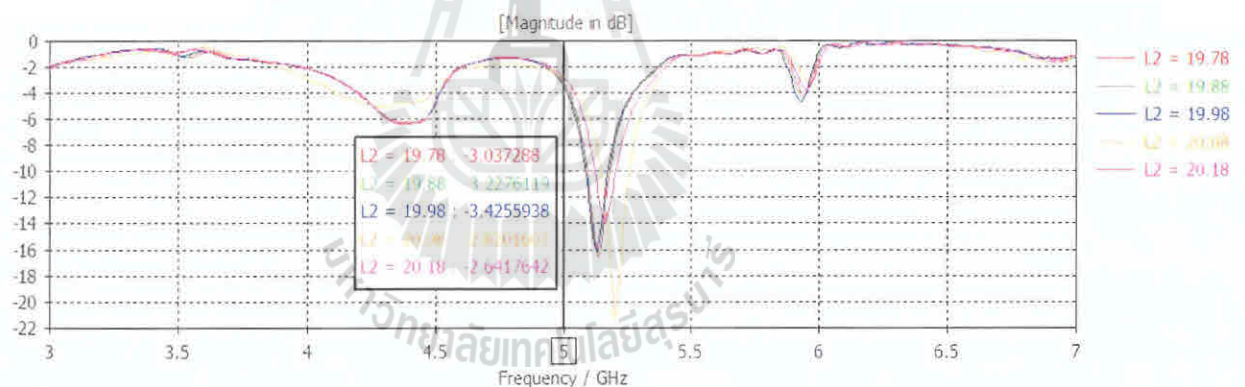
ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศภาคส่ง (พอร์ตที่ 1)

### 3.4.2 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว $L_2$

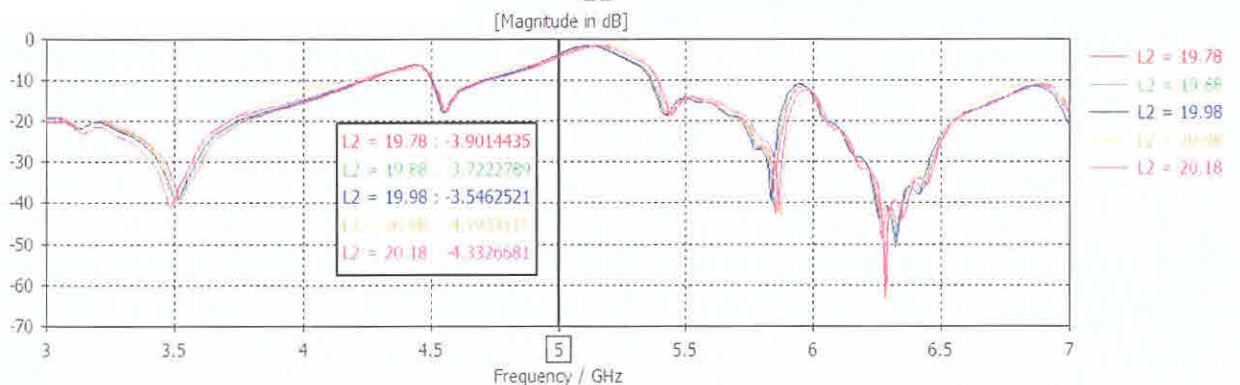
ในเบื้องต้นทำการจำลองผลกระทบจากการปรับค่าความยาว  $L_2$  ดังแสดงในรูปที่ 3.20 จาก 19.78 - 20.18 มิลลิเมตร ซึ่งในการจำลองครั้งนี้จะให้ค่า  $D = 17.78$  มิลลิเมตร เพื่อดูผลกระทบจากการเพิ่มค่า  $L_2$  และเปรียบเทียบค่า  $S_{11}, S_{12}, S_{21}$  และ  $S_{22}$  ในการปรับค่าแต่ละค่า ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 3.21 และแสดงค่าอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.20 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว  $L_2$

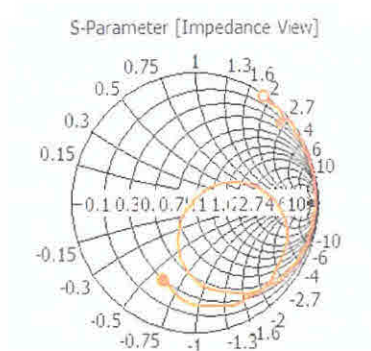
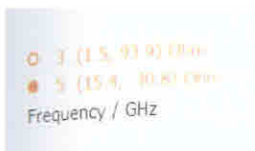


#### ก ค่า $S_{11}$



#### ข ค่า $S_{12}$



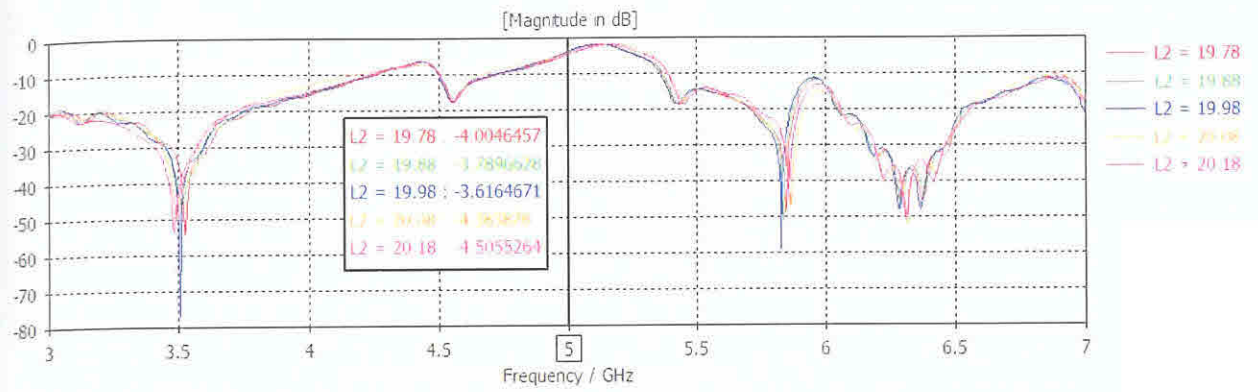


ข ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศครี (พอร์ตที่ 2)

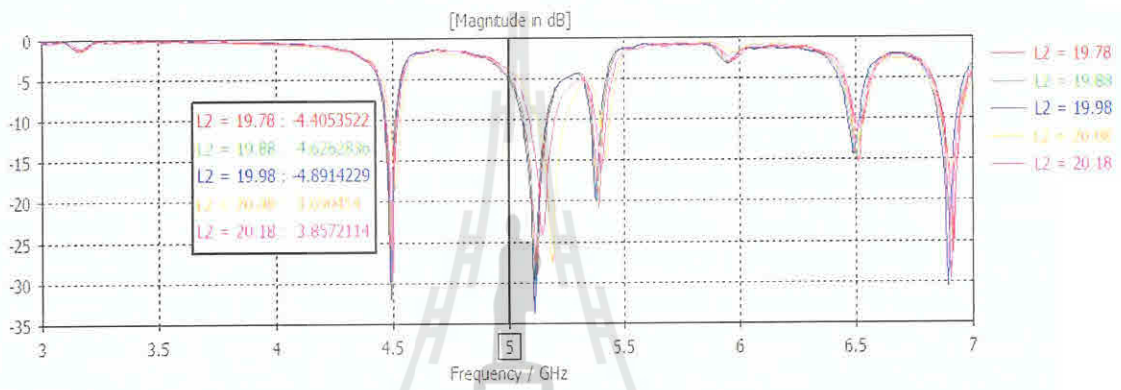
รูปที่ 3.19 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ เมื่อทำการปรับระยะ  $D$

จากผลการจำลองพบว่า เมื่อปรับค่าระยะ  $D$  จะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ กล่าวคือ ยิ่งปรับระยะ  $D$  ให้เพิ่มขึ้นค่าความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่าต่ำลงเข้าใกล้ความถี่ที่เราต้องการ และเมื่อดูที่ความถี่ 5 GHz จะพบว่า ค่า  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  มีค่าน้อยลง และค่า  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  มีค่าเข้าใกล้ 0 dB มากขึ้น และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศส่ง (พอร์ตที่ 1) และสายอากาศครี (พอร์ตที่ 2) เท่ากับ  $56 - j115$  โอห์ม และ  $15.4 - j30.8$  โอห์ม ตามลำดับ ซึ่งสายอากาศครี (พอร์ตที่ 2) ยังไม่มีค่าใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ที่ต้องการทำการแมตซ์

ในการจำลองนี้กลุ่มของคณะผู้จัดทำได้เลือกค่าระยะ  $D$  มีค่าเท่ากับ 17.78 มิลลิเมตร โดยค่าความถี่ที่ได้คือ 5.164 GHz ซึ่งใกล้เคียงกับวัตถุประสงค์ที่เราต้องการ โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -13.77 dB, ค่า  $S_{12}$  เท่ากับ -1.48 dB, ค่า  $S_{21}$  เท่ากับ -1.59 dB และค่า  $S_{22}$  เท่ากับ -18.78 dB



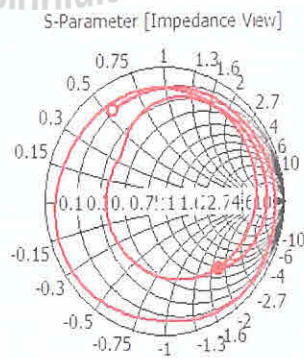
ค่า  $S_{21}$



ค่า  $S_{22}$

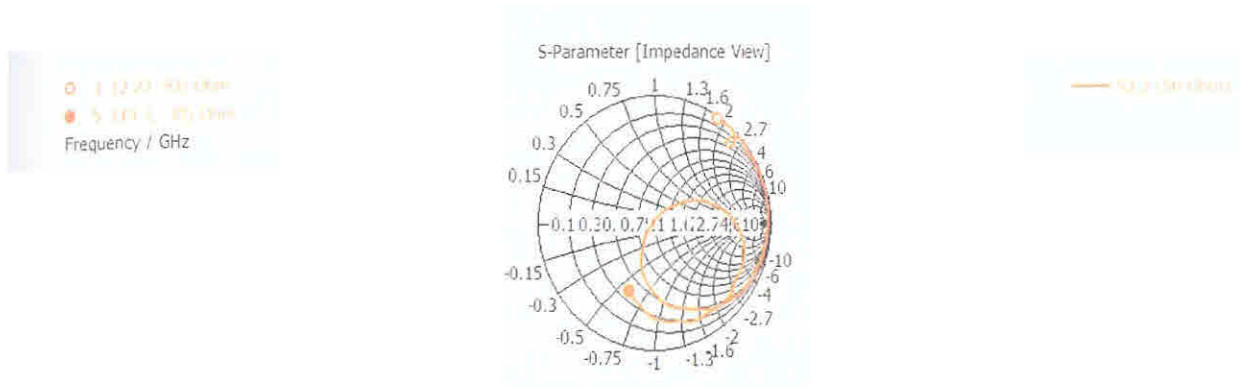
รูปที่ 3.21 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่า  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  และ  $S_{22}$  เมื่อทำการปรับค่าความยาว  $L_2$

- 3 (6.99, 27.2) Ohm
  - 5 (50.5, 91.6) Ohm
- Frequency / GHz



—  $S_{1,1}$  (50 Ohm)

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสั้ง (พอร์ตที่ 1)



ข ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศภาครับ (พอร์ตที่ 2)

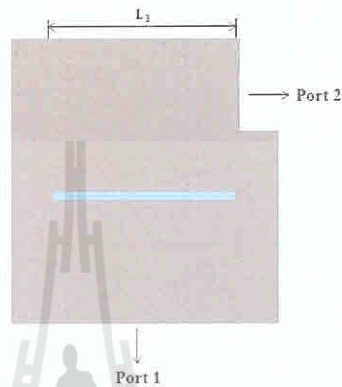
รูปที่ 3.22 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ เมื่อปรับค่าความยาว  $L_2$

จากผลการจำลองในรูปที่ 3.21 และรูปที่ 3.22 พบว่า เมื่อปรับค่าความยาว  $L_2$  โดยเริ่มตั้งแต่ 19.78 มิลลิเมตร จนถึง 20.18 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าในช่วงความยาว 19.78 - 19.98 มิลลิเมตร จะมีความถี่ที่ใกล้เคียงกันมากและมีค่า  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  ที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อทำการปรับความยาวเพิ่มขึ้นอีกเป็น 20.08 - 20.18 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่ากราฟมีค่าความถี่ที่สูงขึ้น ส่วนค่า  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  มีค่าเข้าใกล้ 0 dB ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศภาคส่ง (พอร์ตที่ 1) และสายอากาศภาครับ (พอร์ตที่ 2) เท่ากับ  $50.5 - j91.6$  โอห์ม และ  $19.3 - j30$  โอห์ม ตามลำดับ ซึ่งอิมพีแดนซ์ของสายอากาศภาครับค่าที่ได้ยังไม่ใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ที่เราต้องการทำการแมตซ์

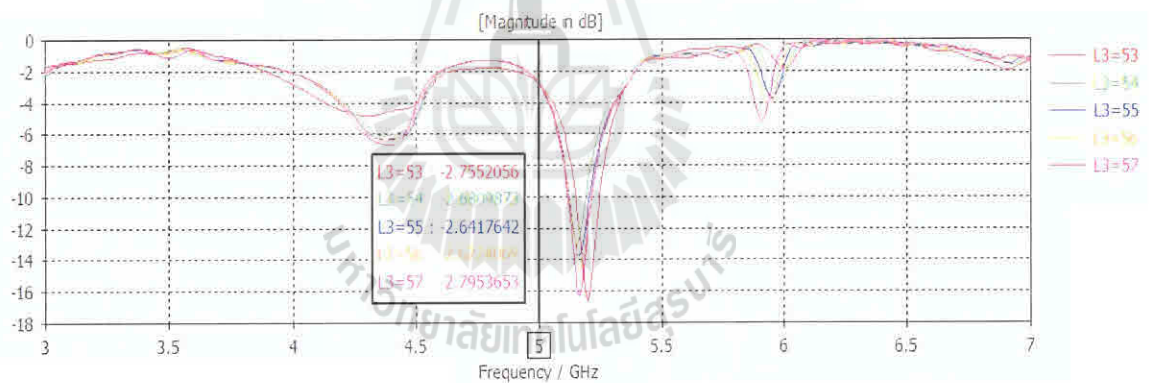
ในการจำลองนี้กลุ่มของคณะผู้จัดทำได้เลือกความยาว  $L_2$  เท่ากับ 19.98 มิลลิเมตร โดยค่าความถี่ที่ได้คือ 5.128 GHz ซึ่งใกล้เคียงกับวัตถุประสงค์ที่เราต้องการ โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -16.11 dB, ค่า  $S_{12}$  เท่ากับ -1.52 dB, ค่า  $S_{21}$  เท่ากับ -1.60 dB และค่า  $S_{22}$  เท่ากับ -20.06 dB

### 3.4.3 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว $L_3$

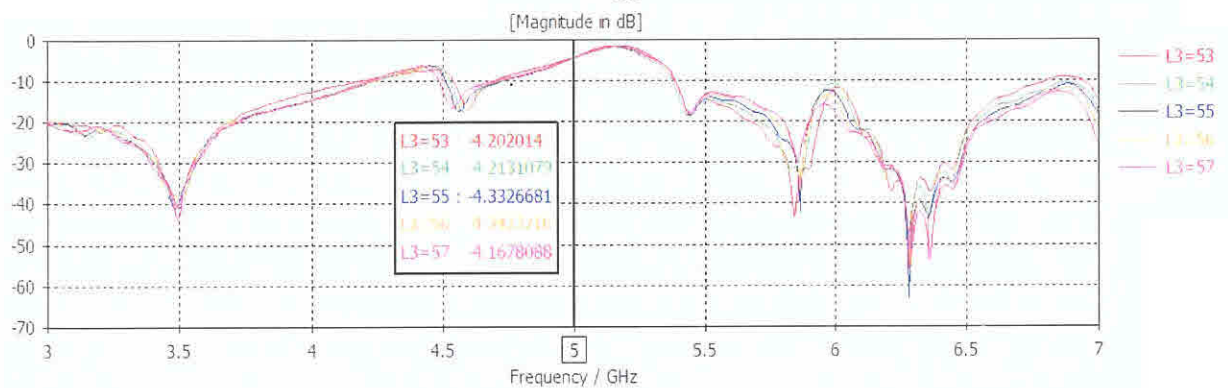
ในเบื้องต้นทำการจำลองผลกระทบจากการเพิ่มความยาว  $L_3$  ดังแสดงในรูปที่ 3.23 จาก 53 - 57 มิลลิเมตร ซึ่งในการจำลองครั้งนี้จะมีค่า  $D = 17.78$  มิลลิเมตร และค่า  $L_2 = 19.98$  มิลลิเมตร เพื่อทำการเปรียบเทียบ  $S_{11}, S_{12}, S_{21}$  และ  $S_{22}$  ในการปรับค่าแต่ละค่า ซึ่งแสดงผล ดังรูปที่ 3.24 และแสดงค่าอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 3.25



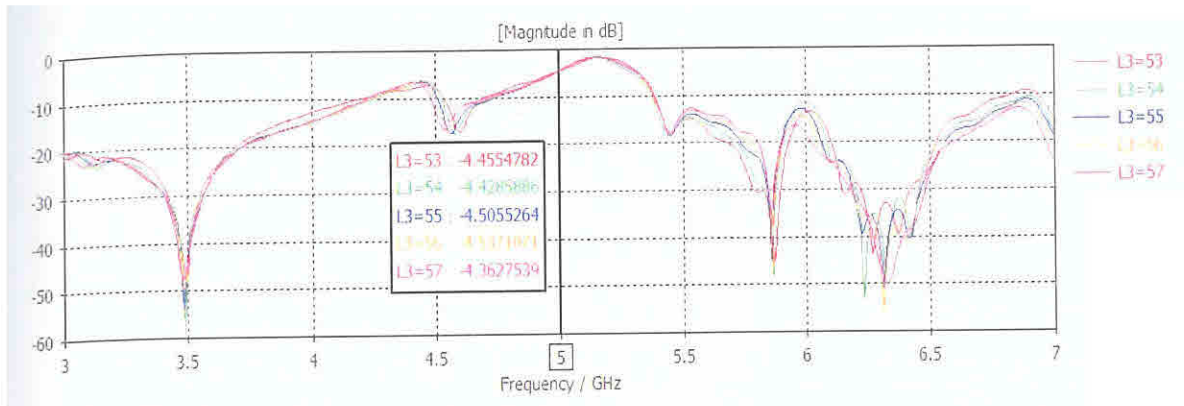
รูปที่ 3.23 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว  $L_3$



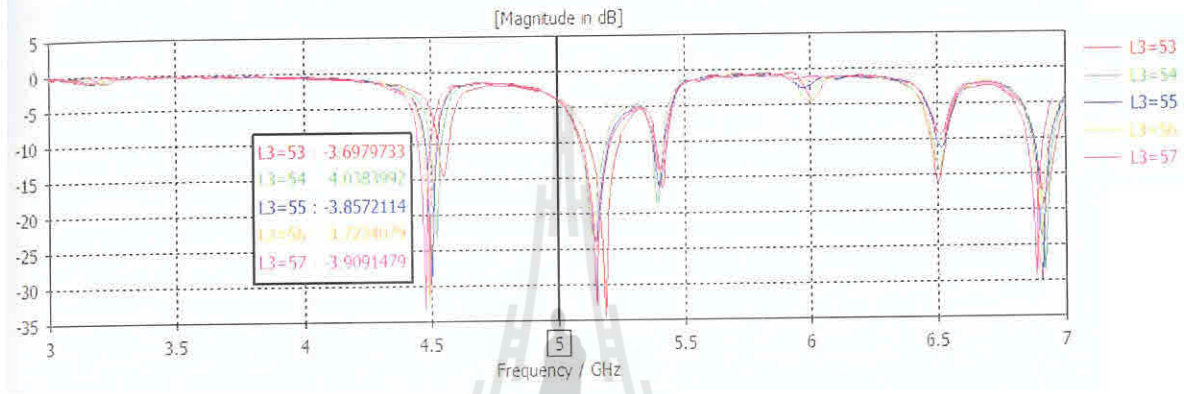
#### ค่า $S_{11}$



#### ค่า $S_{12}$

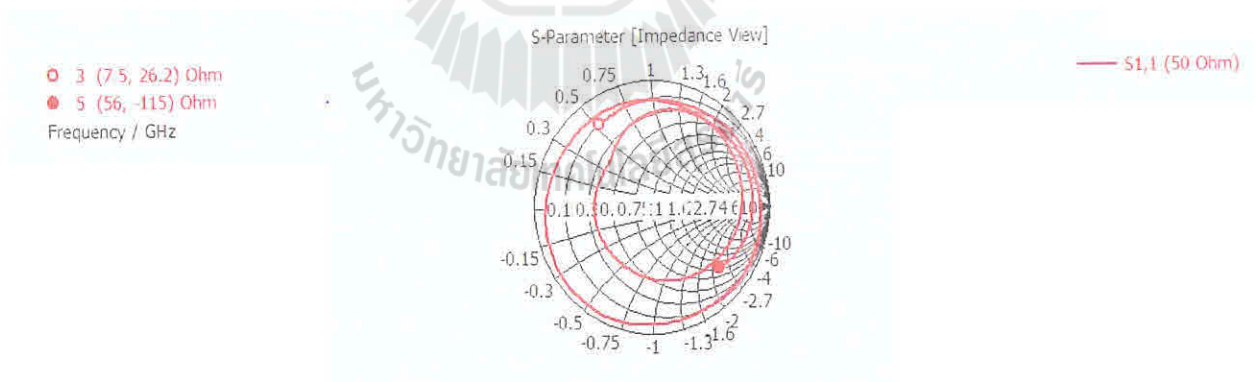


ค่า  $S_{21}$

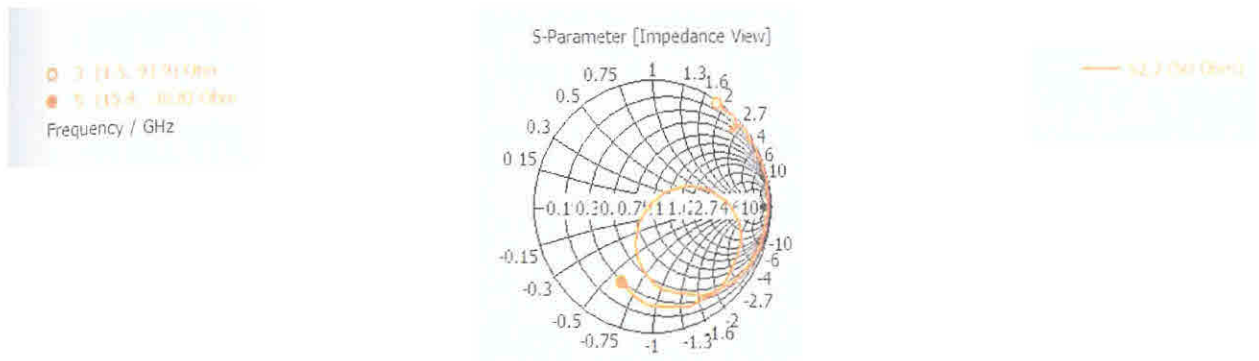


ค่า  $S_{22}$

รูปที่ 3.24 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่า  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  และ  $S_{22}$  เมื่อทำการปรับค่าความยาว  $L_3$



ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศส่ง (พอร์ตที่ 1)



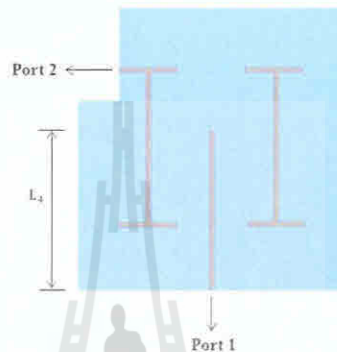
ก ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศส่ง (พอร์ตที่ 2)  
รูปที่ 3.25 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ เมื่อปรับค่าความยาว  $L_3$

จากผลการจำลองพบว่าเมื่อทำการปรับค่าความยาว  $L_3$  ตั้งแต่ 53 - 57 มิลลิเมตร พบว่าที่ความถี่ 5 GHz ค่า  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  จะมีค่าไม่คงที่ ส่วนค่า  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  เริ่มออกจาก 0 dB เมื่อเทียบกับรูปที่ 3.19ข และรูปที่ 3.19ค ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศส่ง (พอร์ตที่ 1) และสายอากาศภาครับ (พอร์ตที่ 2) เท่ากับ  $56 - j115$  โอห์ม และ  $15.4 - j30.8$  โอห์ม ตามลำดับ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศภาครับ (พอร์ตที่ 2) ที่ได้ยังไม่ใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ที่เราต้องการทำการแมตซ์ แต่จากรูปที่ 3.24ก และรูปที่ 3.24ง ค่า  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  ที่มีค่าต่ำที่สุดและอยู่ใกล้กับความถี่ที่เราต้องการ และมีค่า  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  เข้าใกล้ 0 dB อยู่ที่ความถี่ 5.164 GHz ซึ่งที่ความถี่ 5.164 GHz ค่า  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นและความถี่สูงขึ้น ส่วนค่า  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  จะมีค่าเข้าใกล้ 0 dB มากยิ่งขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความยาว  $L_3$

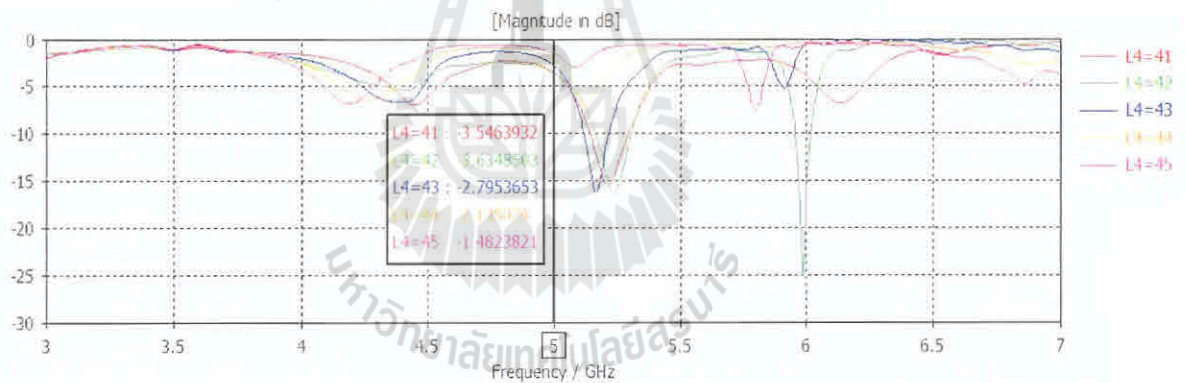
ในจำลองนี้กลุ่มของคณะผู้จัดทำได้เลือกความยาว  $L_3$  เท่ากับ 55 มิลลิเมตร โดยค่าความถี่ที่ได้คือ 5.164 GHz ซึ่งใกล้เคียงกับวัตถุประสงค์ที่เราต้องการ โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -13.77 dB,  $S_{12}$  เท่ากับ -1.50 dB,  $S_{21}$  เท่ากับ 1.61 dB และค่า  $S_{22}$  เท่ากับ -18.78 dB

### 3.4.4 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว $L_4$

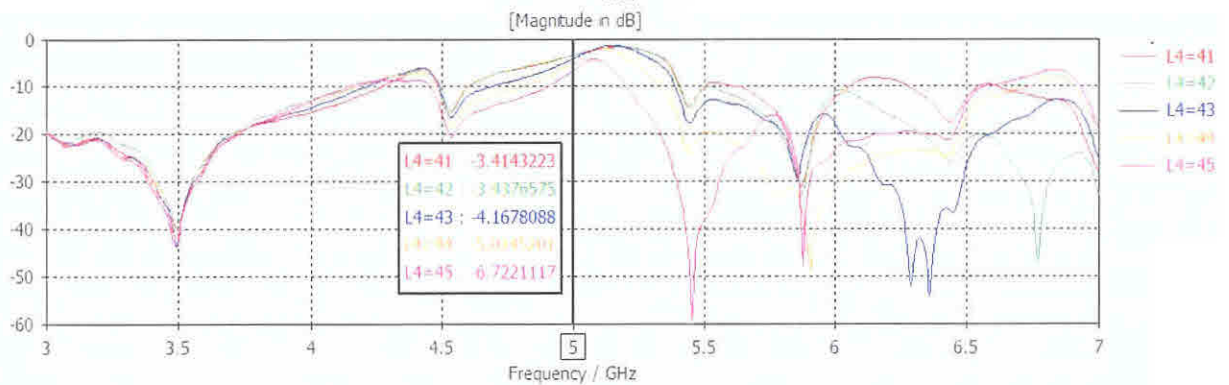
ในเบื้องต้นทำการจำลองผลกระทบจากการปรับค่าความยาว  $L_4$  ดังแสดงในรูปที่ 3.26 จาก 41 - 45 มิลลิเมตร ซึ่งในการจำลองครั้งนี้จะมีค่า  $D = 17.78$  มิลลิเมตร,  $L_2 = 19.98$  มิลลิเมตร และค่า  $L_3 = 55$  มิลลิเมตร เพื่อดูผลกระทบจากการเพิ่มความยาว  $L_4$  เพื่อทำการเปรียบเทียบ  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  และ  $S_{22}$  ในการปรับค่าแต่ละค่า ซึ่งแสดงผล ดังรูปที่ 3.27 และแสดงค่าอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 3.28



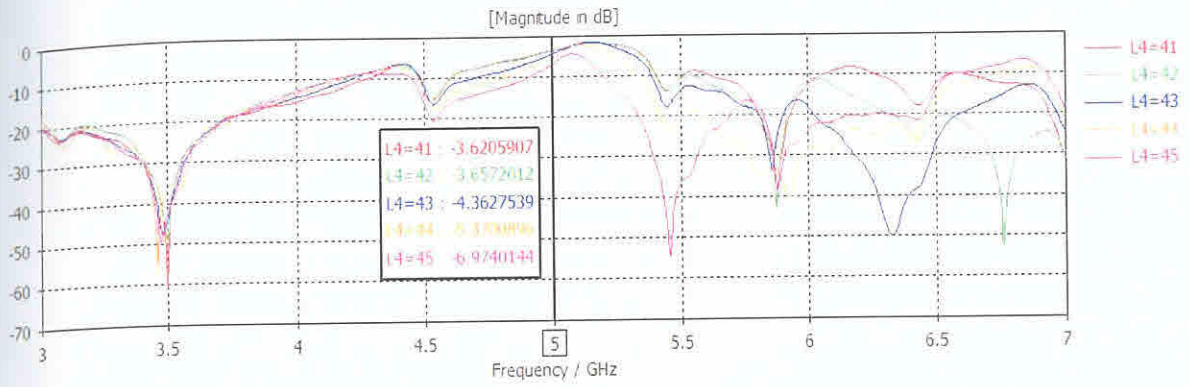
รูปที่ 3.26 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว  $L_4$



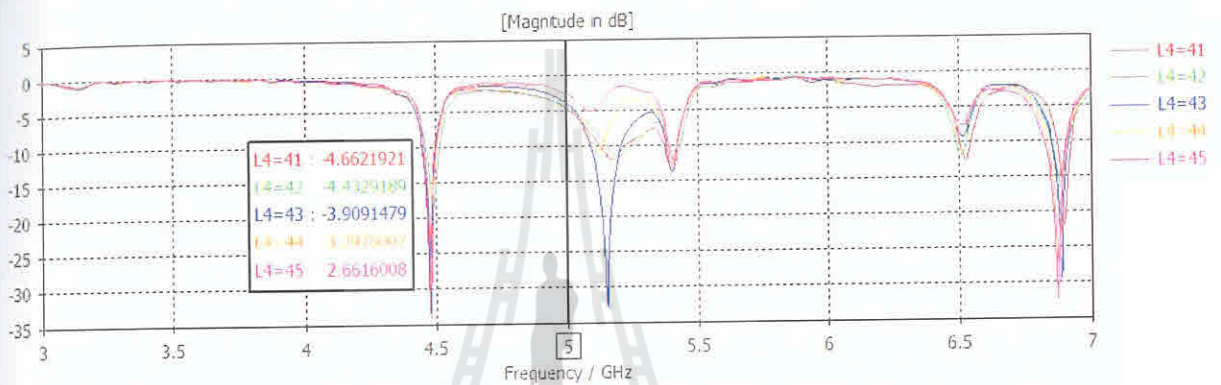
ค่า  $S_{11}$



ค่า  $S_{12}$

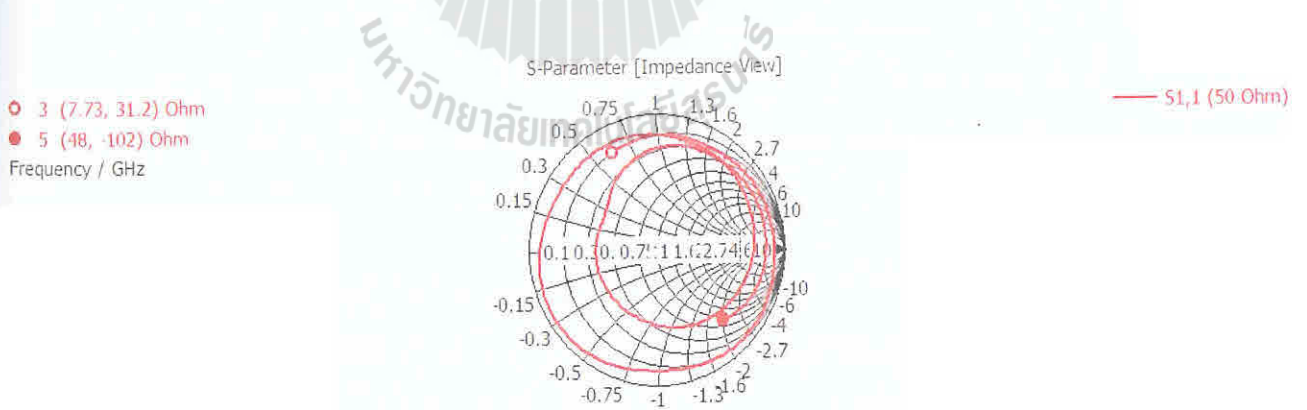


ค่า  $S_{21}$



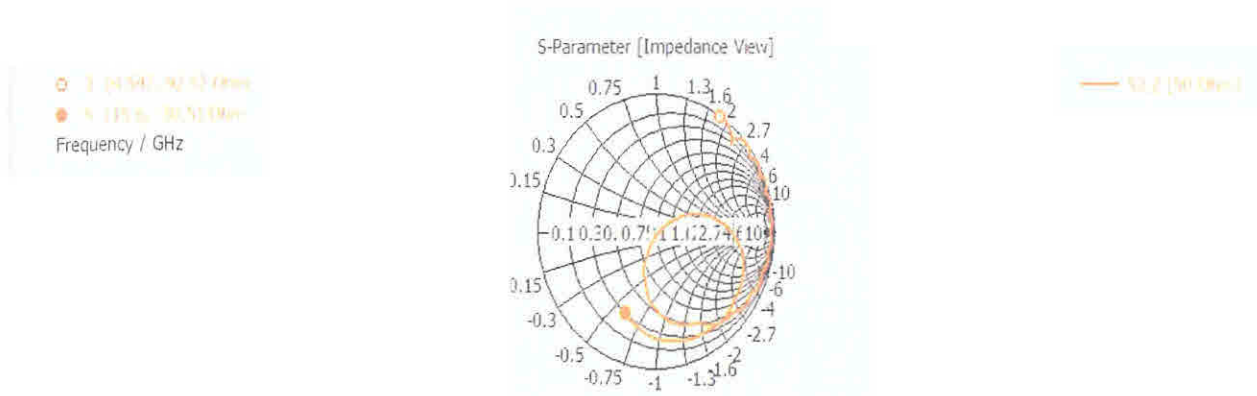
ค่า  $S_{22}$

รูปที่ 3.27 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่า  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  และ  $S_{22}$  เมื่อทำการปรับค่าความยาว  $L_4$



ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศภาคส่ง (พอร์ตที่ 1)





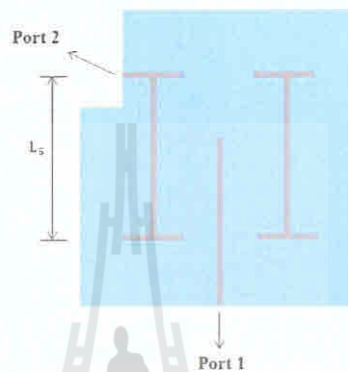
ข ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศภาคส่ง (พอร์ตที่ 2)  
รูปที่ 3.28 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ เมื่อปรับค่าความยาว  $L_4$

จากผลการจำลองพบว่าความยาว  $L_4$  จะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์คือ เมื่อทำการปรับค่าความยาว  $L_4$  จาก 41-45 มิลลิเมตร ค่าความถี่ที่ได้จะไม่คงที่ ซึ่งความถี่ที่มีค่า  $S_{11}$  ต่ำที่สุดอยู่ที่ความถี่ 5.212 , 5.988, 5.164, 5.124, 5.8 GHz ตามลำดับ โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -15.485, -25.03, -16.23, -7.00, -7.53 dB ตามลำดับ และความถี่ที่มีค่า  $S_{22}$  ต่ำที่สุดอยู่ที่ความถี่ 4.476, 4.488, 5.148, 4.48 และ 4.48 GHz ตามลำดับ โดยมีค่า  $S_{22}$  เท่ากับ -33.09, -19.45, -32.86, -29.56 และ -34.22 dB ตามลำดับ แต่ถ้าดูที่ความถี่ 5 GHz จะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มความยาว  $L_4$  ค่า  $S_{11}$  ,  $S_{22}$  จะมีค่ามากขึ้น ส่วนค่า  $S_{12}$  ,  $S_{21}$  จะมีค่าน้อยลง ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศภาคส่ง (พอร์ตที่ 1) และสายอากาศภาครับ (พอร์ตที่ 2) เท่ากับ  $48 - j102$  โอห์ม และ  $15.6 - j30.5$  โอห์ม ตามลำดับ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศภาครับ (พอร์ตที่ 2) ค่าที่ได้ยังไม่ใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ที่เราต้องการทำการแมตซ์

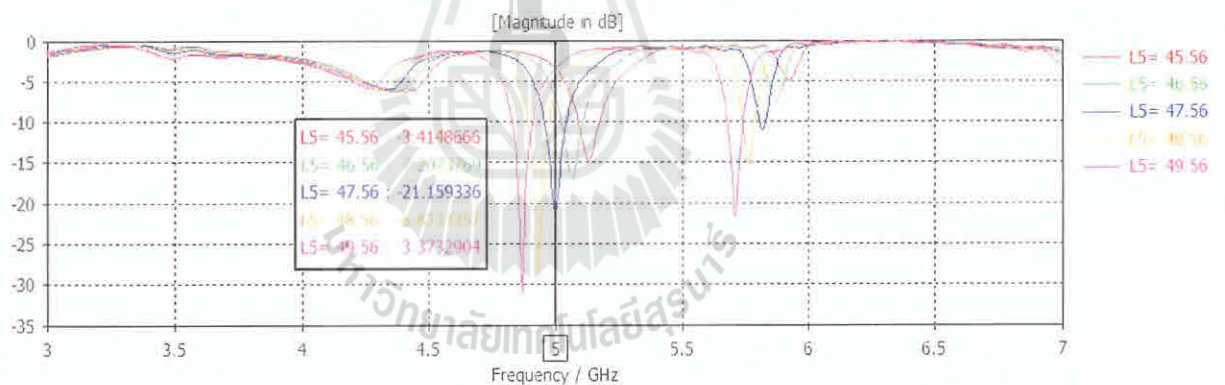
ในการจำลองนี้กลุ่มของคณะผู้จัดทำได้เลือกความยาว  $L_4$  เท่ากับ 43 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นค่าที่มี  $S_{11}$  ต่ำสุดอยู่ที่ความถี่ 5.164 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใกล้เคียงกับความถี่ที่ต้องการออกแบบ และมีค่า  $S_{11}$  ,  $S_{22}$  ,  $S_{12}$  และ  $S_{21}$  ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ

### 3.4.5 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว $L_5$

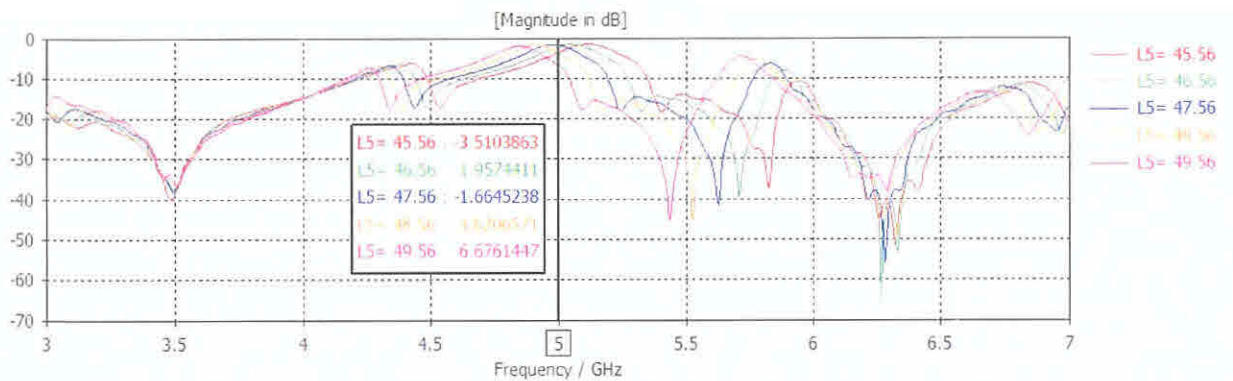
ในเบื้องต้นทำการจำลองผลกระทบจากการปรับค่าความยาว  $L_5$  ดังแสดงในรูปที่ 3.29 จาก 45.56 - 49.56 มิลลิเมตร ซึ่งในการจำลองครั้งนี้จะมีค่า  $D = 17.78$  มิลลิเมตร,  $L_2 = 19.98$  มิลลิเมตร, ค่า  $L_3 = 55$  มิลลิเมตร และค่า  $L_4 = -43$  มิลลิเมตร เพื่อทำการเปรียบเทียบ  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  และ  $S_{22}$  ในการปรับค่าแต่ละค่า ซึ่งแสดงผล ดังรูปที่ 3.30 และแสดงค่าอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 3.31



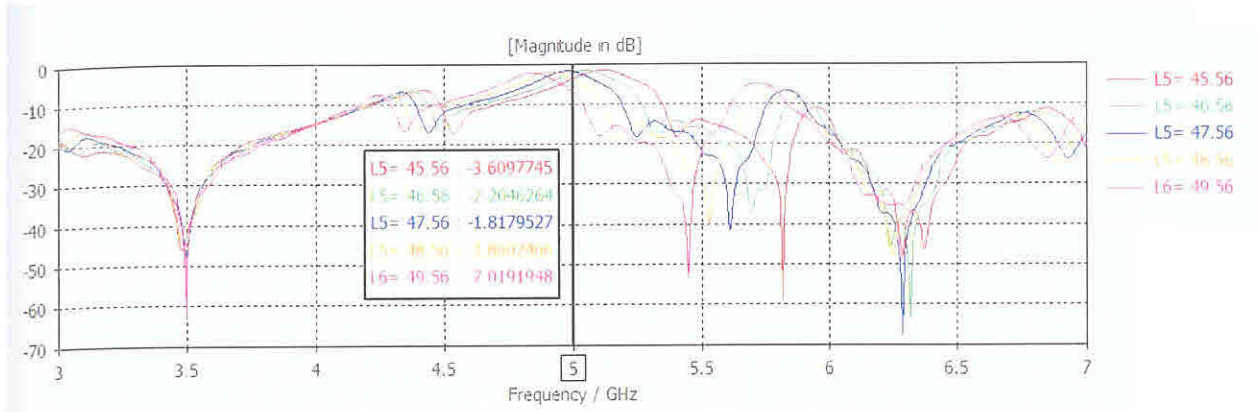
รูปที่ 3.29 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว  $L_5$



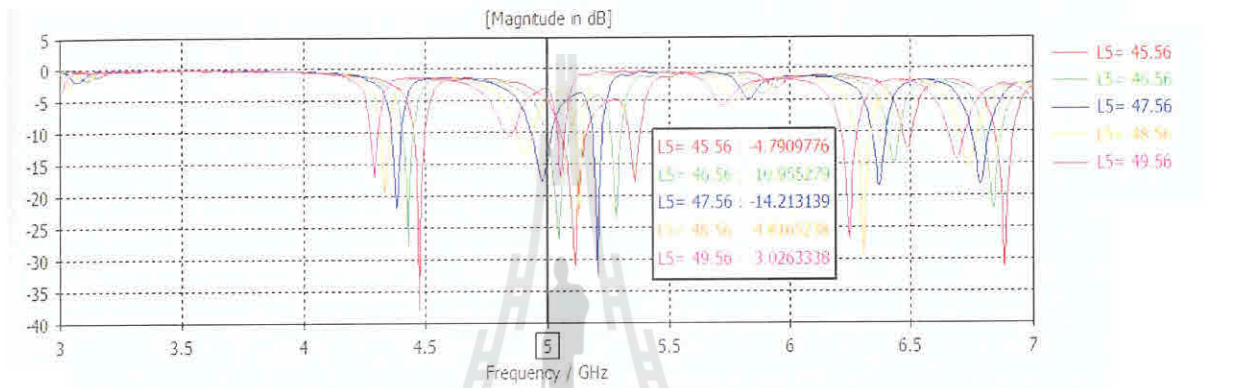
#### ก ค่า $S_{11}$



#### ข ค่า $S_{12}$

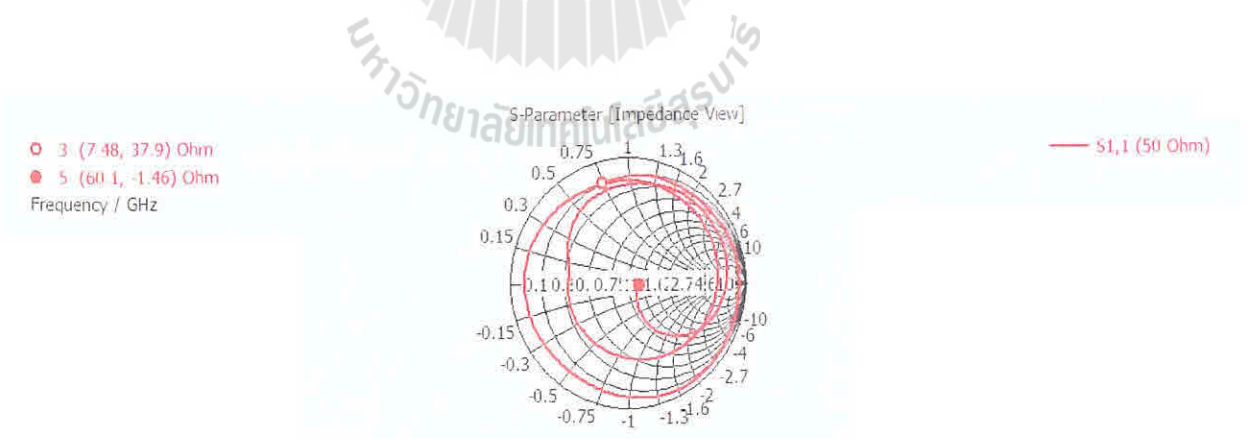


ค่า  $S_{21}$

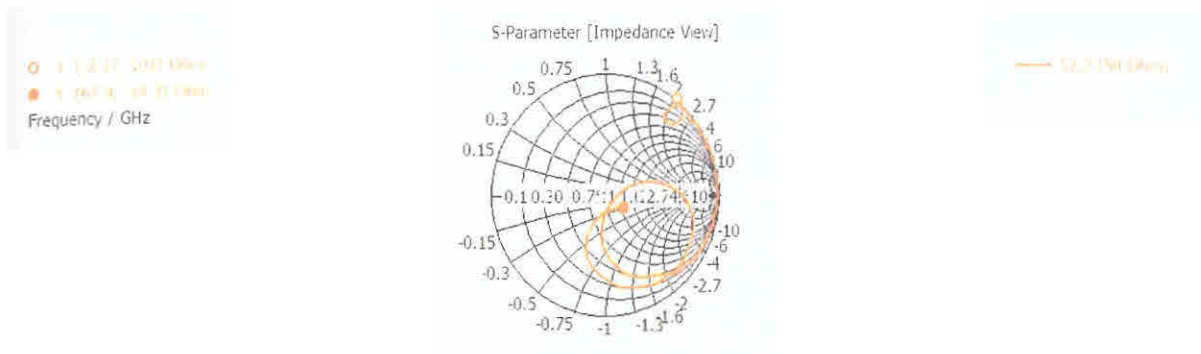


ค่า  $S_{22}$

รูปที่ 3.30 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่า  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  และ  $S_{22}$  เมื่อทำการปรับค่าความยาว  $L_5$



ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศภาคส่ง (พอร์ตที่ 1)



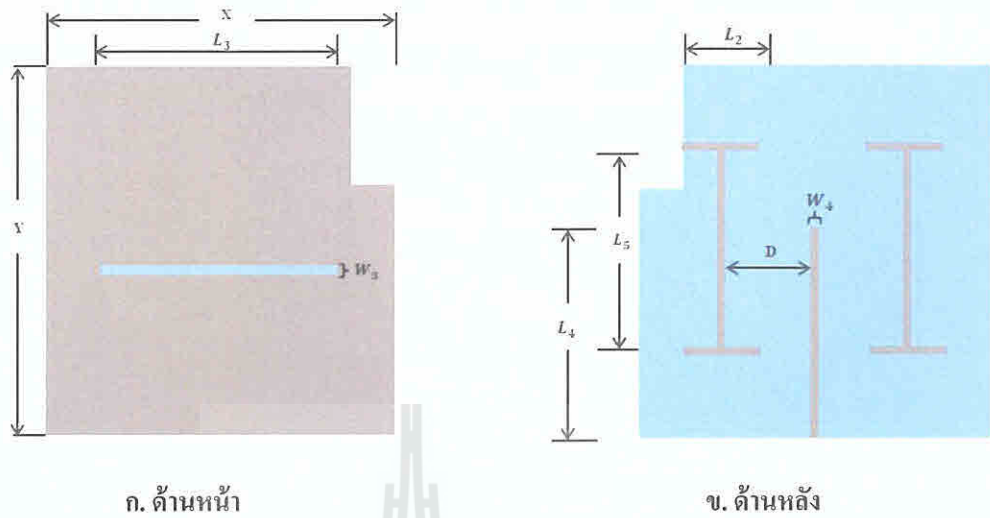
ข ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศภาคส่ง (พอร์ตที่ 2)

รูปที่ 3.31 แสดงค่าอิมพีแดนซ์

จากผลการจำลองพบว่า เมื่อปรับค่า  $L_5$  จะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ คือเมื่อทำการปรับค่าความยาว  $L_5$  เริ่มจากความยาว 45.56 มิลลิเมตร ไปถึง 49.56 มิลลิเมตร จะเห็นว่า เมื่อยังทำการเพิ่มค่า  $L_5$  ความถี่จะยิ่งต่ำลง และเมื่อเพิ่มความยาวของไมโครสตริปจนมีค่าเท่ากับ 47.56 มิลลิเมตร จะได้ความถี่ที่ 5 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ต้องการ โดยมีค่า  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  และ  $S_{22}$  เท่ากับ -21.16, -1.66, -1.82 และ -14.21 dB ตามลำดับ และมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศภาคส่ง (พอร์ตที่ 1) และสายอากาศภาครับ (พอร์ตที่ 2) ใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการทำการแมตช์ นั่นคือ เท่ากับ  $60.1 - j1.46$  โอห์ม และ  $67.9 - j14.3$  โอห์ม ตามลำดับ

ในการจำลองนี้กลุ่มของคณะผู้จัดทำได้เลือกความยาวไมโครสตริปมีค่าเป็น 47.56 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นค่าความถี่ที่ต้องการออกแบบนั้นคือ 5 GHz

สรุปค่าที่ใช้ในการออกแบบไมโครสตริปไลน์ที่ความถี่ 5 GHz ดังแสดงในตารางที่ 3.5



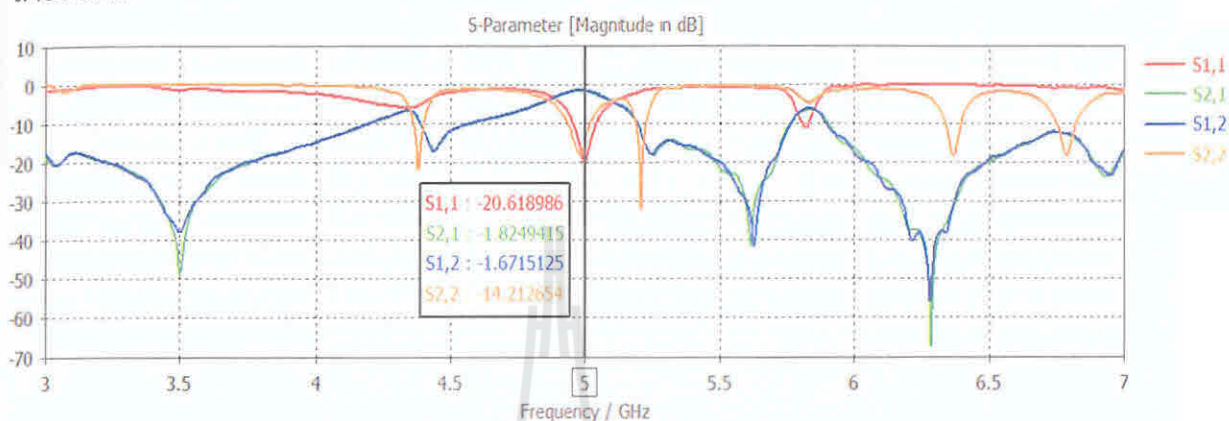
รูปที่ 3.32 การออกแบบระบบป้อนที่ความถี่ 5 GHz

ตารางที่ 3.5 สรุปค่าที่ใช้ในการออกแบบระบบป้อนไมโครสตริปไลน์ที่ความถี่ 5 GHz

ค่าพารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการออกแบบ / ขนาดทางกายภาพ (mm)
$X$	85
$Y$	85
$w_3$	1.8
$w_4$	1.8
$L_2$	19.98
$L_3$	55
$L_4$	43
$L_5$	47.56
$D$	17.78

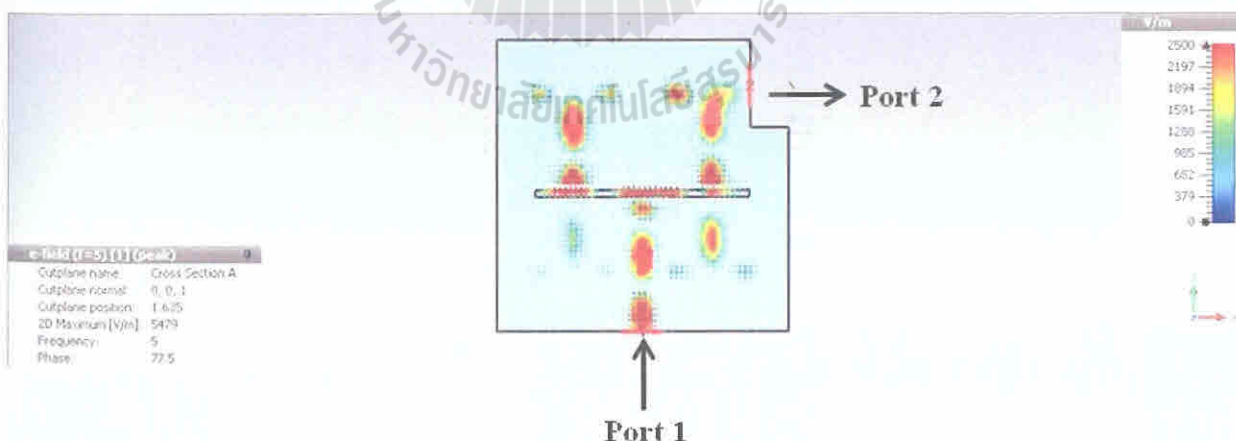
เมื่อทำการออกแบบตามค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ ระบบป้อนไมโครสตริปไลน์จะให้ความถี่ที่ 5GHz และมีค่า  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  และ  $S_{22}$  เท่ากับ -21.16, -1.66, -1.82 และ -14.21 dB ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.31

ทางคณะผู้จัดทำได้เปลี่ยนขนาดความกว้างไมโครสตริปไลน์ที่คำนวณได้ดังแสดงในตารางที่ 3.2 เนื่องจาก เมื่อออกแบบระบบป้อนไมโครสตริปจะเกิดการเหนี่ยวนำของสายอากาศ ดังนั้น ทางคณะผู้จัดทำจึงปรับความกว้างของไมโครสตริปไลน์จาก 3.008 เป็น 1.8 เพื่อลดการเหนี่ยวนำของสายอากาศ

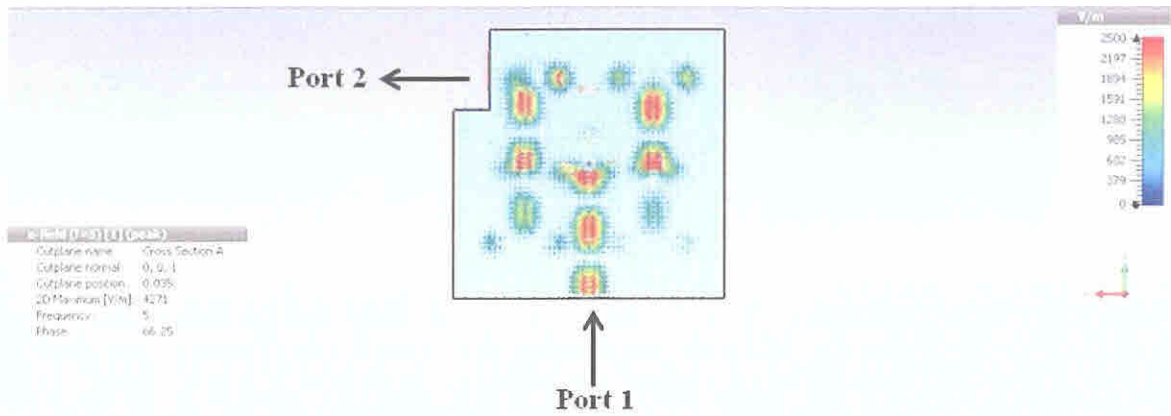


รูปที่ 3.33 กราฟแสดงค่า  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  และ  $S_{22}$

จากรูปที่ 3.31 เห็นได้ว่า เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆแล้ว ที่ความถี่ 5 GHz ค่า  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  และ  $S_{22}$  เป็นตามที่ต้องการ คือ ค่า  $S_{11}$ ,  $S_{12}$  มีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ที่เราต้องแมตช์ และค่า  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  มีค่าใกล้เคียง 0 dB จึงทำให้สายอากาศนี้สามารถรับส่งคลื่นหา กันได้เป็นอย่างดี ไม่มีการจางหายระหว่างทาง ดังแสดงในรูปที่ 3.34ก และรูปที่ 3.34ข



ก รูปแบบการแผ่คลื่นของสนามไฟฟ้า กรณีปรับค่าพารามิเตอร์แล้ว (ด้านหน้า)

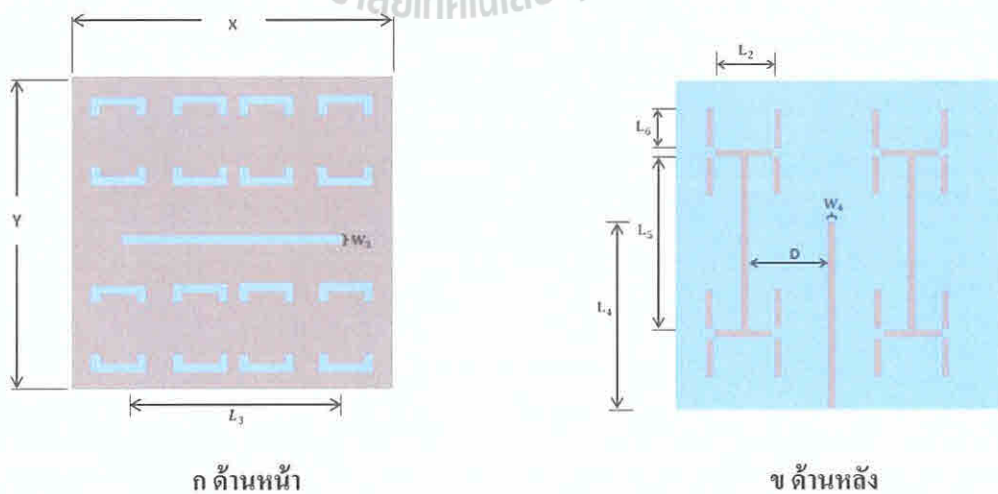


ข รูปแบบการแผ่คลื่นของสนามไฟฟ้า กรณีปรับค่าพารามิเตอร์แล้ว (ด้านหลัง)

รูปที่ 3.34 แสดงรูปการแผ่คลื่นของสนามไฟฟ้า

### 3.5 การออกแบบสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ขนาด $4 \times 4$ และไมโครสตริปไลน์ ที่ความถี่ 5 GHz

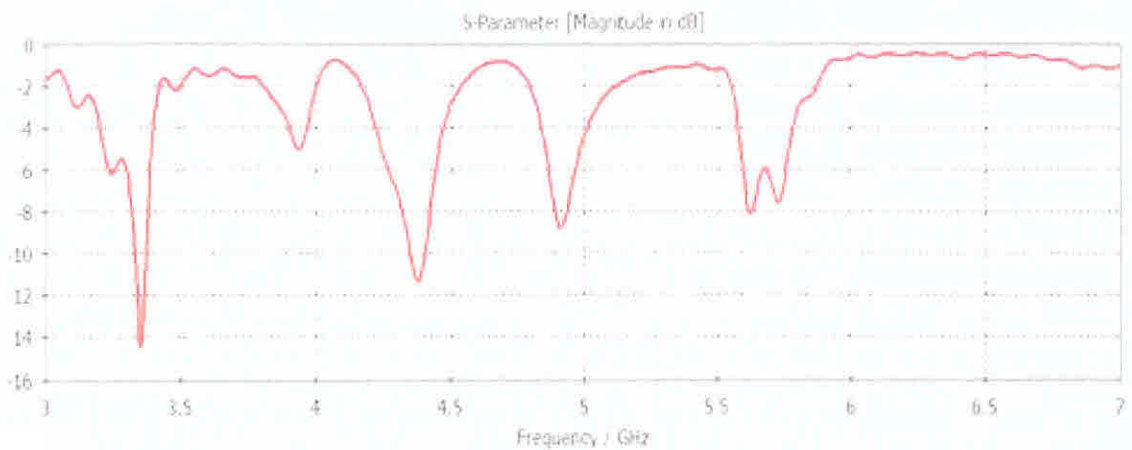
ในการจำลองนี้เป็นการนำเอาสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) มารวมกับไมโครสตริปไลน์ที่ความถี่ 5 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3.32 เพื่อนำไปใช้งานในการตรวจสอบสิ่งผิดปกติของวัสดุที่เราต้องการตรวจสอบโดยที่ไม่ทำลายวัสดุนั้น แต่เมื่อนำสายอากาศมารวมกับไมโครสตริปไลน์ที่ได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ในเบื้องต้นแล้ว จะพบว่าค่า  $S_{11}$  จะเกิดการผิดเพี้ยนเป็นอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.36 ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่ เพื่อให้ได้ค่าความถี่ที่ 5 GHz และมีค่า  $S_{11}$  แมตซ์กับค่าอิมพีแดนซ์ที่ 50 โอห์ม ซึ่งค่า  $S_{11}$  กับค่าอิมพีแดนซ์จะมีความสัมพันธ์กัน ดังแสดงไว้ในสมการที่ 3.1ข และ 3.1ค



ก ด้านหน้า

ข ด้านหลัง

รูปที่ 3.35 สายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ขนาด  $4 \times 4$  และระบบป้อนไมโครสตริปไลน์ ที่ความถี่ 5 GHz



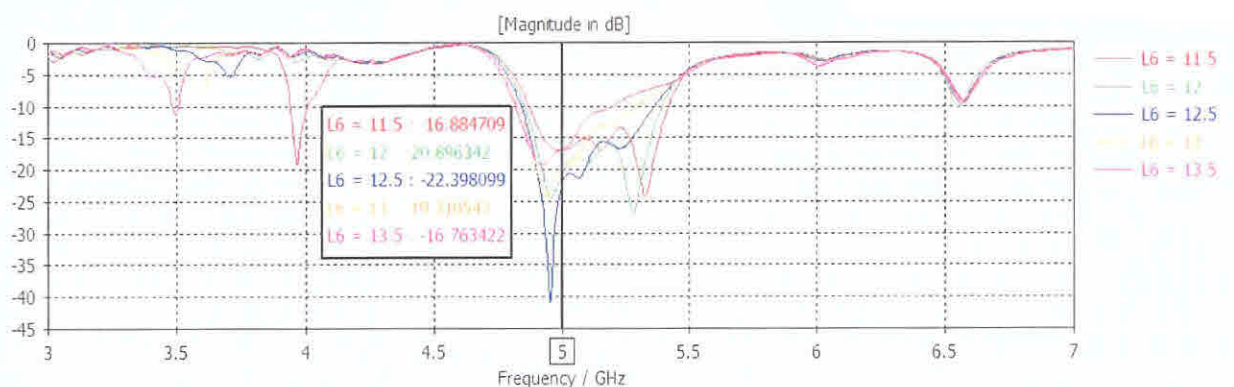
รูปที่ 3.36 กราฟแสดงค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศแบบสล롯 (Slot Antenna)

### 3.5.1 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว $L_6$ เมื่อมีสายอากาศ (Slot Antenna)

ในเบื้องต้นทำการจำลองผลกระทบจากการปรับค่าความยาว  $L_6$  ดังแสดงในรูปที่ 3.37 จาก 11.5 - 13.5 มิลลิเมตร ซึ่งในการจำลองครั้งนี้จะให้ค่าทุกค่าคงที่ เพื่อดูผลกระทบจากการปรับค่าความยาว  $L_6$  เพื่อเปรียบเทียบค่า  $S_{11}$  ในการปรับค่าแต่ละค่า ซึ่งแสดงผลค่า  $S_{11}$  ดังรูปที่ 3.38 และแสดงค่าอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 3.39



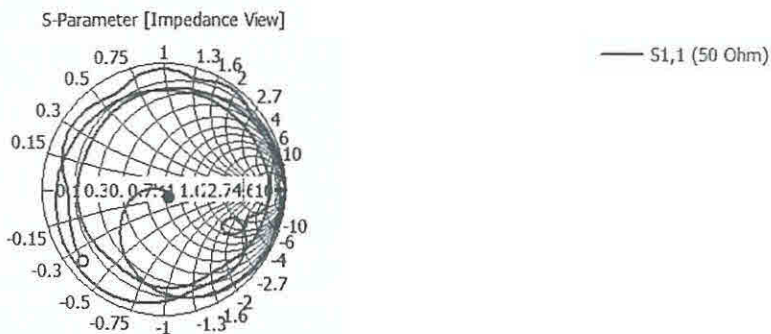
รูปที่ 3.37 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว  $L_6$



รูปที่ 3.38 การเปรียบเทียบค่า  $S_{11}$  เมื่อปรับค่าความยาว  $L_6$



- 3 (4.13, -18.5) Ohm
  - 5 (53.4, -7.1) Ohm
- Frequency / GHz



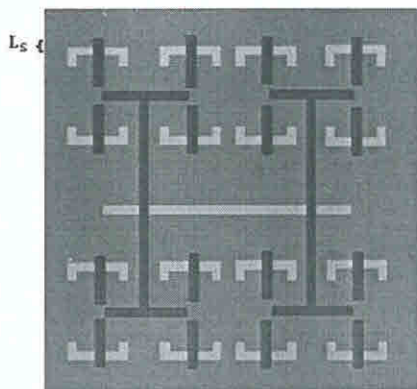
รูปที่ 3.39 ค่าอิมพีแดนซ์ เมื่อปรับค่าความยาว  $L_6$

จากผลการจำลองพบว่า เมื่อปรับค่าความยาว  $L_6$  ที่ความถี่ 5 GHz ยิ่งเพิ่มความยาว  $L_6$  ค่า  $S_{11}$  จะยิ่งต่ำลง แต่เมื่อเลขความยาวที่ 12.5 ไป ค่า  $S_{11}$  ที่ความถี่ 5 GHz จะสูงขึ้น และมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 53.4-j7.1 โอห์ม ซึ่งเป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่ใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์เราต้องการทำการแมตซ์

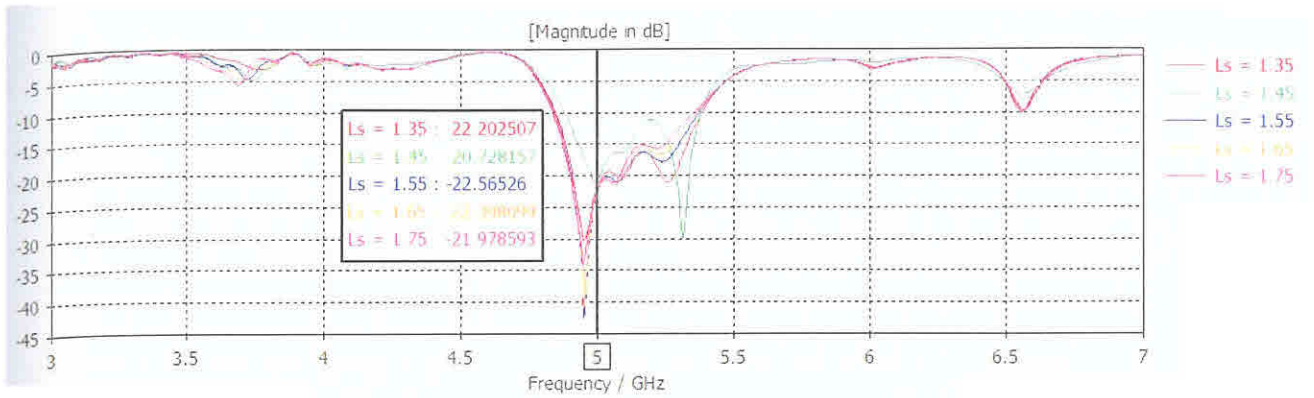
ในการจำลองนี้กลุ่มของคณะผู้จัดทำได้เลือกความยาว  $L_6$  เท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นค่าที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ที่ต้องการออกแบบนั่นคือ 4.952 GHz และมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -41.01 dB โดยที่แถบช่วงความถี่ตั้งแต่ 4.844 - 5.36 GHz ซึ่งเป็นความถี่ครอบคลุมความถี่ที่เราต้องการใช้งาน

### 3.5.2 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว $L_s$ เมื่อมีสายอากาศ (Slot Antenna) ขนาด 4x4

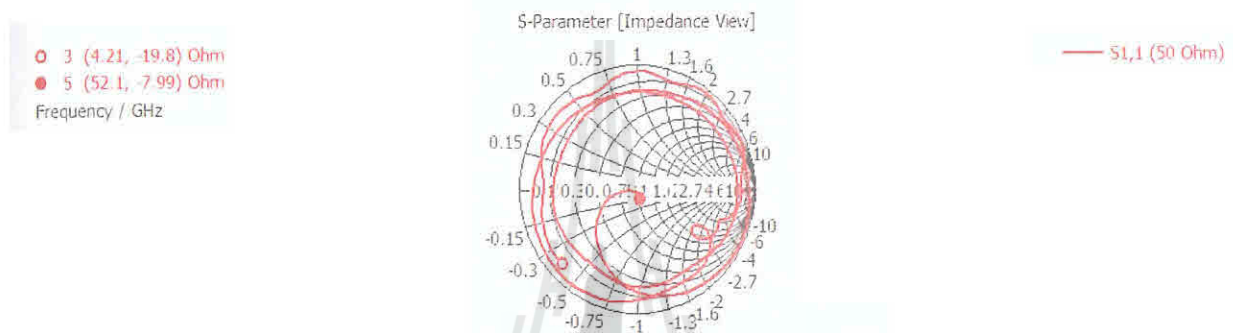
ในเบื้องต้นทำการจำลองผลกระทบจากการปรับค่าความยาว  $L_s$  ดังแสดงในรูปที่ 3.40 จาก 1.35 - 1.75 มิลลิเมตร ซึ่งในการจำลองครั้งนี้ให้ค่า  $L_6 = 12.5$  มิลลิเมตร เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มความยาวไมโครสตริปเพื่อเปรียบเทียบ  $S_{11}$  ในการปรับค่าแต่ละค่า ซึ่งแสดงผลค่า  $S_{11}$  ดังรูปที่ 3.41 และแสดงค่าอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 3.42



รูปที่ 3.40 การศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าความยาว  $L_s$



รูปที่ 3.41 การเปรียบเทียบค่า  $S_{11}$  เมื่อปรับค่าความยาว  $L_s$



รูปที่ 3.42 ค่าอิมพีแดนซ์ เมื่อปรับค่าความยาว  $L_s$

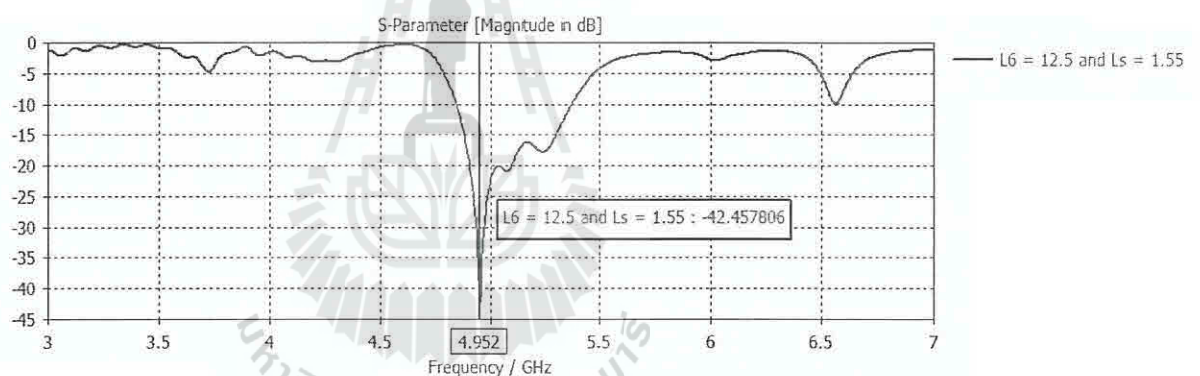
จากผลการจำลองพบว่า เมื่อปรับค่าความยาว  $L_s$  ที่ความถี่ 5 GHz ค่า  $S_{11}$  จะมีค่าไม่คงที่ ซึ่งค่าที่  $S_{11}$  มีค่าต่ำสุดคือ  $L_s$  เท่ากับ 1.55 มิลลิเมตร โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -22.56 dB และมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 52.1-j7.99 โอห์ม ซึ่งเป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่ใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์เราต้องการทำการแมตซ์ ซึ่งวิธีการปรับค่าความยาว  $L_s$  เป็นวิธีพื้นฐานที่สำคัญในการทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ในการจำลองนี้กลุ่มของคณะผู้จัดทำได้เลือกยาว  $L_s$  มีค่าเป็น 1.55 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นค่าที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ที่ต้องการออกแบบนั่นคือ 4.952 GHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -42.46 dB โดยที่แถบช่วงความถี่ตั้งแต่ 4.848 - 5.372 GHz ซึ่งเป็นความถี่ครอบคลุมความถี่ที่เราต้องการใช้งาน

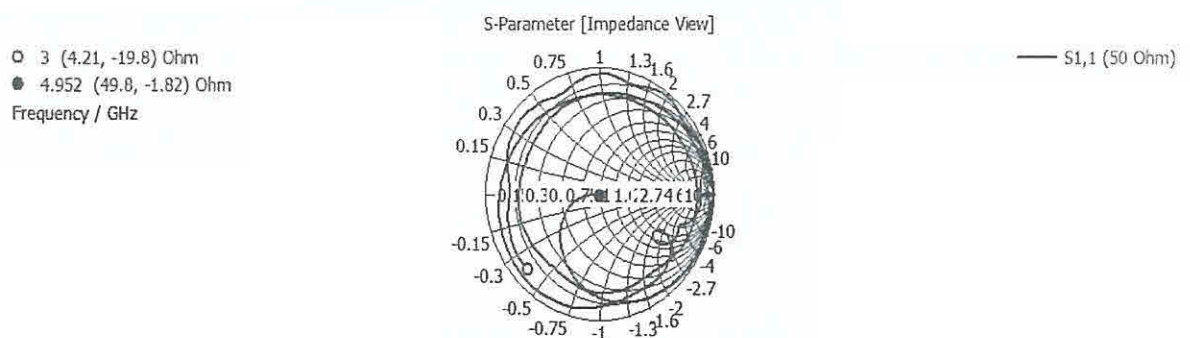
ตารางที่ 3.6 สรุปค่าที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบสลีต (Antenna Slot) และระบบป้อนไมโครสตริปไลน์ที่ความถี่ 5 GHz

ค่าพารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการออกแบบ / ขนาดทางกายภาพ (mm)
$L_6$	12.5
$L_s$	1.55

เมื่อทำการออกแบบตามค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ จะได้สายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna) ที่มีความถี่ครอบคลุมย่านความถี่ ตั้งแต่ 4.848 - 5.372 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่เราต้องการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 3.43 และแสดงค่าอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 3.44



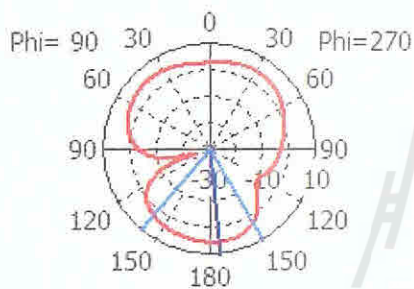
รูปที่ 3.43 กราฟแสดงค่า  $S_{11}$  ของระบบสายอากาศ



รูปที่ 3.44 ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสายอากาศ

เมื่อนำเสาอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) มารวมกับไมโครสตริปไลน์ที่มีความถี่ 5 GHz เพื่อนำไปใช้งานในการตรวจสอบสิ่งผิดปกติของวัสดุที่เราต้องการตรวจสอบ โดยที่ไม่ทำลายวัสดุนั้น แต่เมื่อนำเสาอากาศมารวมกับไมโครสตริปไลน์ที่ได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ในเบื้องต้นแล้ว จะพบว่าค่า  $S_{11}$  จะเกิดการผิดเพี้ยนเป็นอย่างมาก ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงได้ปรับค่าพารามิเตอร์เพิ่ม นั่นคือ ค่า  $L_6$  และ  $L_5$  พบว่าความถี่ที่ค่า  $S_{11}$  ต่ำสุดคือ 4.952 GHz โดยค่า  $S_{11}$  มีค่าเท่ากับ -42.46 และมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $49.8 - j1.82$  โอห์ม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ที่ต้องการแมตซ์

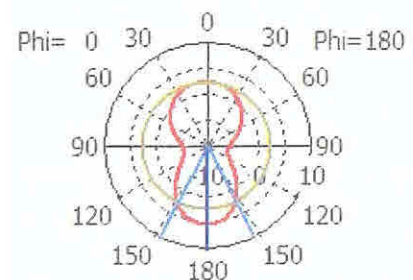
Farfield Directivity Abs (Phi=90)



Theta / Degree vs. dBi

ระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane)

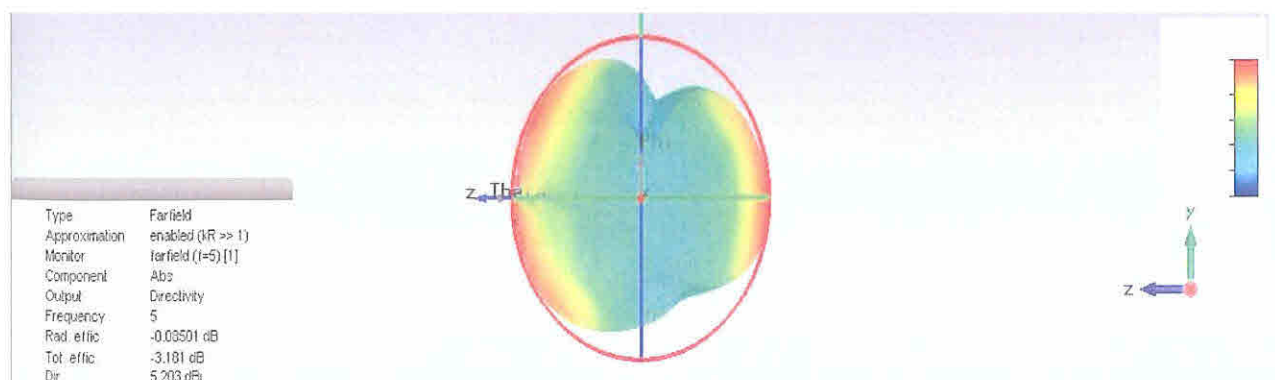
Farfield Directivity Abs (Phi=0)



Theta / Degree vs. dBi

ระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane)

รูปการแผ่พลังงาน 2มิติ



รูปการแผ่พลังงาน 3มิติ

รูปที่ 3.45 รูปการแผ่พลังงานของเสาอากาศสล็อต (Slot Antenna) ขนาด 4x4

จากรูปที่ 3.45 เป็นการนำสายอากาศขนาด 1 อีลีเมนต์มารวมกันเป็นสายอากาศขนาด 4x4 ทำให้เห็นว่าทิศทางการแผ่กระจายคลื่นออกทั้งสองทิศทาง นั่นคือคลื่นแผ่กระจายออกทั้งด้านหน้าและด้านหลังของสายอากาศ โดยคลื่นออกทางด้านหน้ามากกว่าด้านหลังเนื่องจากการส่งคลื่นออกทางสายอากาศสล็อต (Slot Antenna) มากกว่าไมโครสตริปไลน์ ซึ่งทางคณะผู้จัดทำจะนำคลื่นที่ออกทางสายอากาศสล็อตไปใช้ในการตรวจหาวัสดุสิ่งแปลกปลอมในวัสดุนั้น โดยที่ไม่ทำลายชิ้นงาน โดยใช้คุณสมบัติการสะท้อนของคลื่น

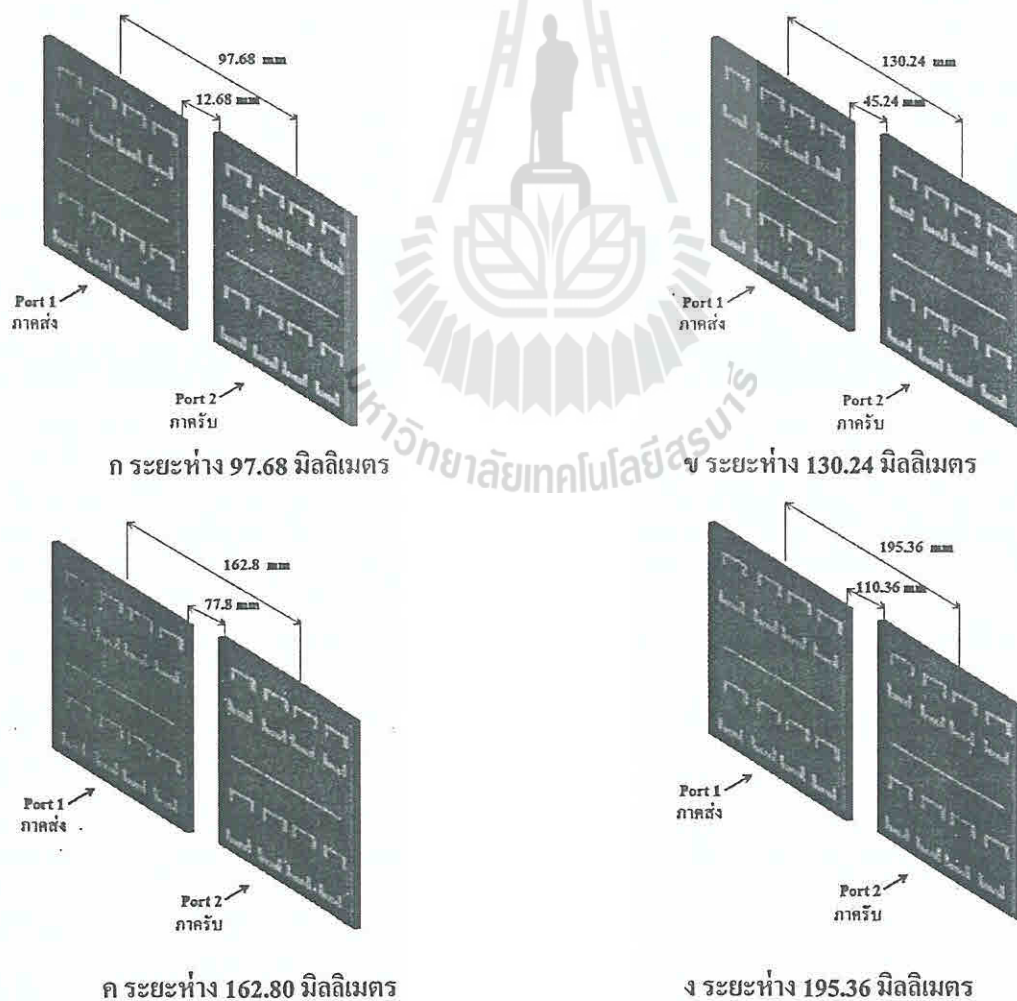
**ตารางที่ 3.7** สรุปค่าที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศสล็อต (Slot Antenna) เพื่อใช้งานตรวจสอบความผิดปกติในวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ค่าพารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการออกแบบ / ขนาดทางกายภาพ (mm)
$X$	85
$Y$	85
$W_3$	1.8
$W_4$	1.8
$L_2$	19.98
$L_3$	55
$L_4$	43
$L_5$	47.56
$L_6$	12.5
$L_s$	1.55
$D$	17.78

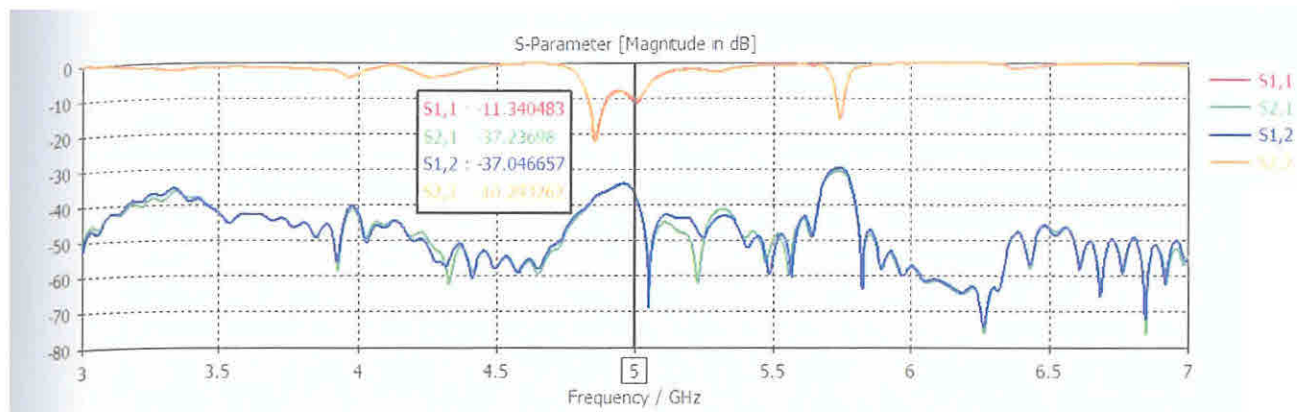
### 3.6 การจำลองการรับส่งคลื่นของสายอากาศสล롯 (Slot Antenna) กรณีไม่มีวัสดุ

#### แปลกปลอม

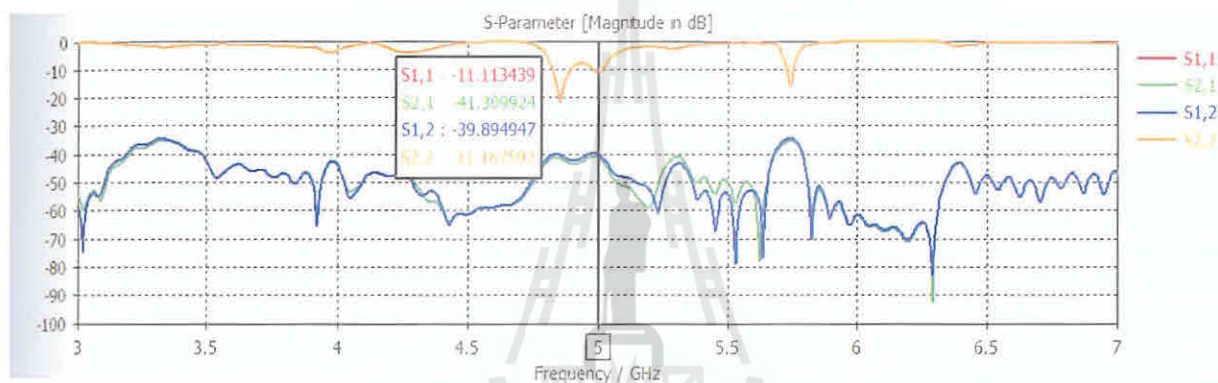
ในการจำลองการรับส่งคลื่นของสายอากาศสลอต (Slot Antenna) กรณีไม่มีวัสดุแปลกปลอม ซึ่งในการจำลองเราจะใช้สายอากาศที่มีพารามิเตอร์เหมือนกัน โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศสลอต แสดงในตารางที่ 3.7 ซึ่งในการจำลองนี้คณะผู้จัดทำให้สายอากาศภาคส่งและภาครับอยู่ห่างกัน 97.68, 130.24, 162.80, 195.36 มิลลิเมตร และให้สายอากาศทั้งภาคส่งและภาครับทำงานที่ละตัวโดยใช้สวิตช์เกียร์แผ่นทองแดงแทนสวิตช์ในการส่งคลื่นไปให้สายอากาศ เพื่อให้สายอากาศตัวนั้นสามารถทำงานได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.46 และหันสายอากาศไปในทิศทางเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบค่า  $S_{21}$  ว่าระยะห่างของสายอากาศเท่าใดเหมาะสมแก่การนำไปใช้งานตรวจสอบสิ่งผิดปกติในวัสดุ เนื่องจากระยะห่างของสายอากาศจะส่งผลต่อการรับส่งคลื่นจากสายอากาศภาคส่งไปยังสายอากาศภาครับ ดังแสดงใน รูปที่ 3.47



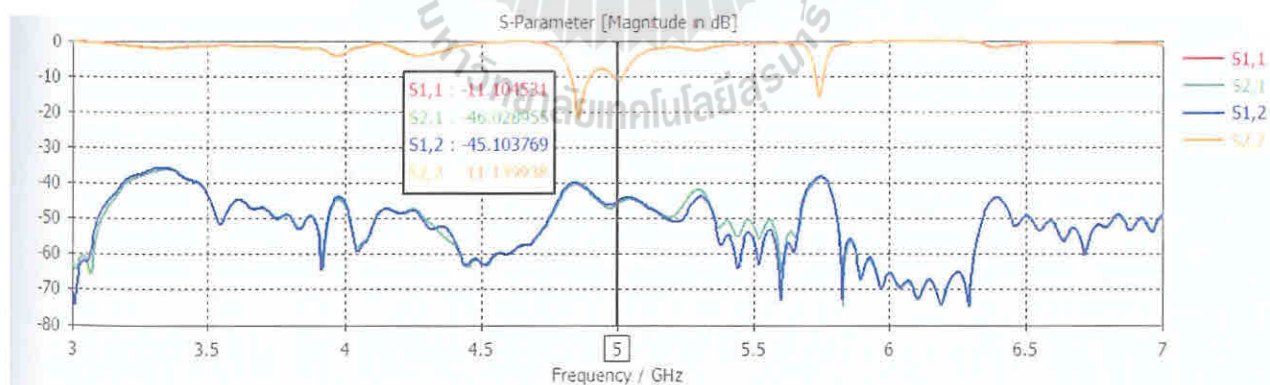
รูปที่ 3.46 สายอากาศภาครับและภาคส่งอยู่ห่างกัน 97.68, 130.24, 162.80, 195.36 มิลลิเมตร กรณีไม่มีวัสดุ



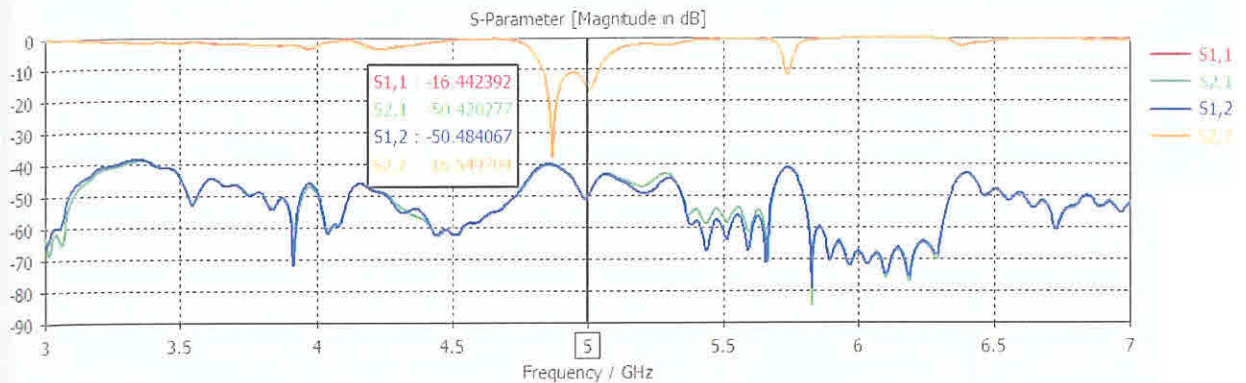
ก ค่า  $s$  - parameter ระยะห่างกัน 97.68 มิลลิเมตร



ข ค่า  $s$  - parameter ระยะห่างกัน 130.24 มิลลิเมตร



ค ค่า  $s$  - parameter ระยะห่างกัน 162.80 มิลลิเมตร



ง ค่า  $s$  -  $parameter$  ระยะห่างกัน 195.36 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.47 ค่า  $s$  -  $parameter$  สายอากาศภาครับและภาคส่งอยู่ห่างกัน 97.68, 130.24, 162.80, 195.36 มิลลิเมตร กรณีไม่มีวัสดุ

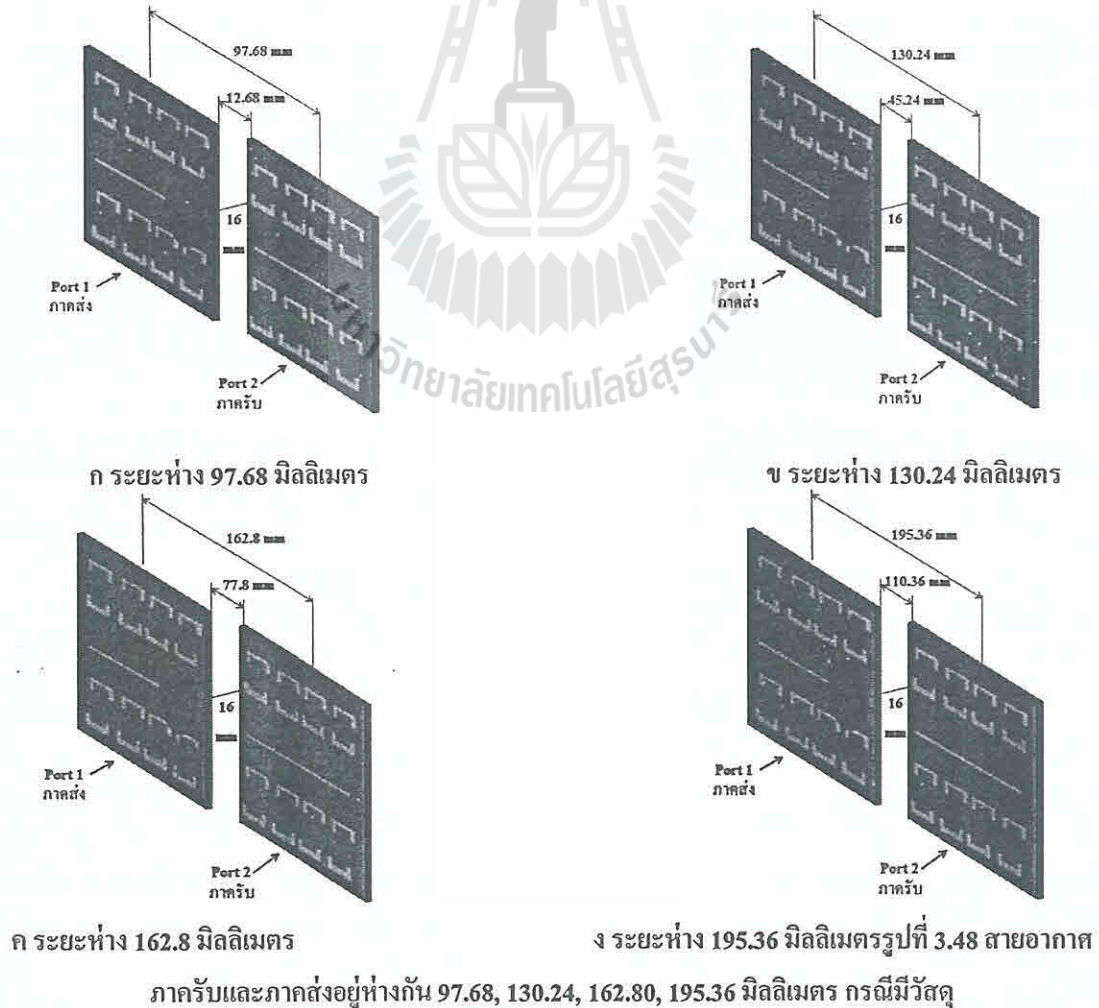
จากรูปที่ 3.46 และ รูปที่ 3.47 จะพบว่าเมื่อวางสายอากาศภาคส่งและภาครับให้มีระยะห่างระหว่างกัน เท่ากับ 97.68, 130.24, 162.80 และ 195.36 มิลลิเมตร ค่า  $S_{21}$  จะมีค่าแตกต่างกัน กล่าวคือ เมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่า  $S_{21}$  มีค่าน้อยลง สาเหตุคือ เมื่อคลื่นเดินทางออกจากสายอากาศภาคส่งและไม่กระทบกับวัตถุใดๆ คลื่นจะเดินทางต่อไปเรื่อยๆ และเกิดการจางหาย เนื่องจากไม่มีคลื่นสะท้อนกลับมายังสายอากาศภาครับ จึงทำให้ค่า  $S_{21}$  มีค่าน้อย ในระยะ 97.68 มิลลิเมตร จะมีค่า  $S_{21}$  เท่ากับ -37.24 dB, ระยะ 130.24 มิลลิเมตร จะมีค่า  $S_{21}$  เท่ากับ -41.31 dB, ระยะ 162.80 มิลลิเมตร จะมีค่า  $S_{21}$  เท่ากับ -46.03 dB และระยะ 195.36 มิลลิเมตร มีค่า  $S_{21}$  เท่ากับ -50.42 dB

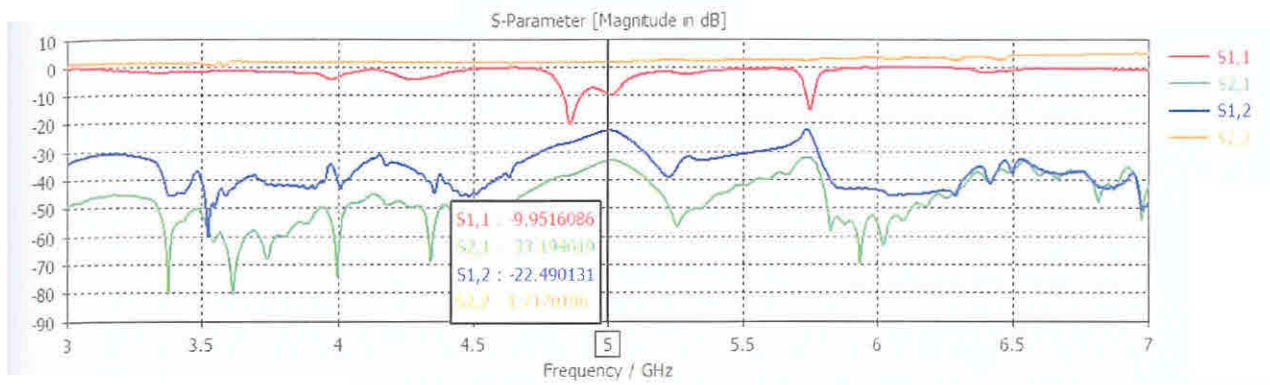
สังเกตได้ว่า ในระยะที่ 97.68 มิลลิเมตร จะได้ค่า  $S_{21}$  เท่ากับ -37.24 dB ซึ่งมีค่ามากที่สุด อีกทั้งยังมีระยะห่างระหว่างสายอากาศใกล้กันที่สุด จึงอาจทำให้คลื่นเกิดการเหนี่ยวนำกันขึ้นระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ แต่เมื่อทำการเพิ่มระยะห่างระหว่างสายอากาศจะทำให้การเหนี่ยวนำของสายอากาศมีผลกระทบน้อยลง



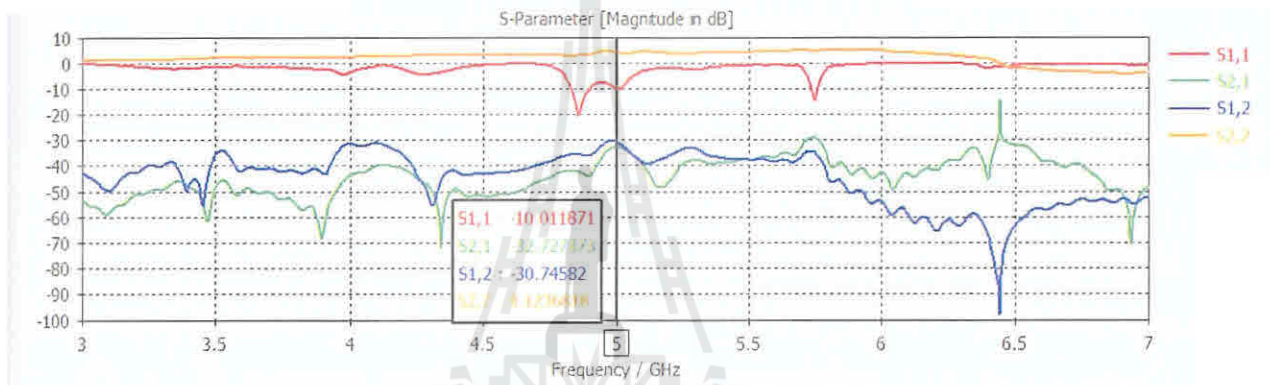
### 3.7 การจำลองการรับส่งคลื่นของสายอากาศสลิต (Slot Antenna) กรณีมีวัสดุแปลกปลอม

ในการจำลองการรับส่งคลื่นของสายอากาศสลิต (Slot Antenna) กรณีมีวัสดุแปลกปลอม ซึ่งในการจำลองเราจะใช้สายอากาศที่มีพารามิเตอร์เหมือนกัน โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ แสดงในตารางที่ 3.7 ซึ่งในการจำลองนี้คณะผู้จัดทำกำหนดให้ระยะห่างของวัสดุแปลกปลอมกับสายอากาศอยู่ห่างกัน 16 มิลลิเมตร และให้วัสดุแปลกปลอมอยู่กึ่งกลางระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ โดยให้สายอากาศทั้งภาคส่งและภาครับทำงานที่ละตัวซึ่งใช้สติกเกอร์แผ่นทองแดงแทนสวิตช์ในการส่งคลื่นไปให้สายอากาศ เพื่อให้สายอากาศตัวนั้นสามารถทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.48 เนื่องจากในการทดลองทางคณะผู้จัดทำได้นำโฟมมาจำลองสถานการณ์ เนื่องจากโฟมสามารถหาได้ง่าย สะดวก และมีราคาไม่สูงมาก โดยโฟมทำหน้าที่เป็นตัวกักปิดวัสดุที่ต้องการค้นหา และหันสายอากาศไปในทิศทางเดียวกัน เพื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $S_{21}$  ว่าระยะห่างของสายอากาศเท่าใดที่ทำให้ค่า  $S_{21}$  มีค่ามากที่สุด ยังมีค่า  $S_{21}$  มากเท่าใด หมายความว่า คลื่นจะเดินทางออกจากสายอากาศภาคส่ง ไปกระทบกับวัตถุ แล้วสะท้อนกลับ ไปยังสายอากาศภาครับ ได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 3.49

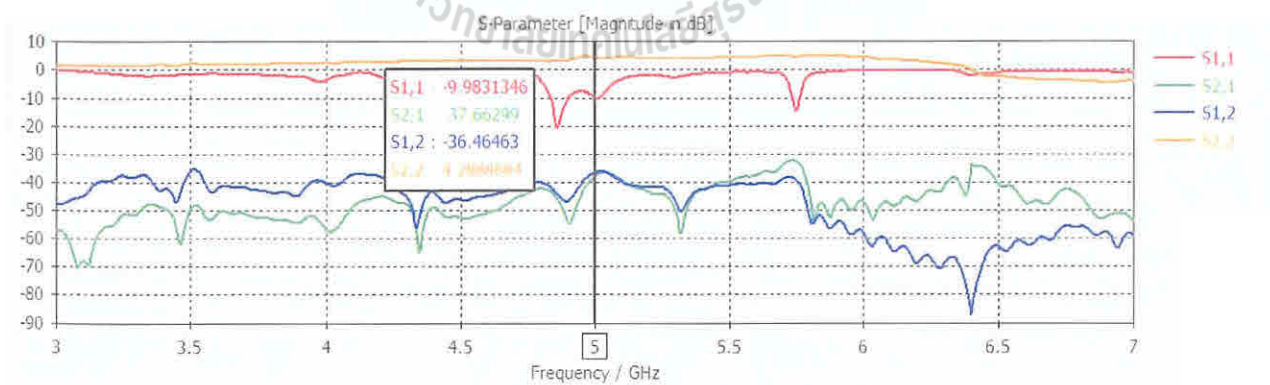




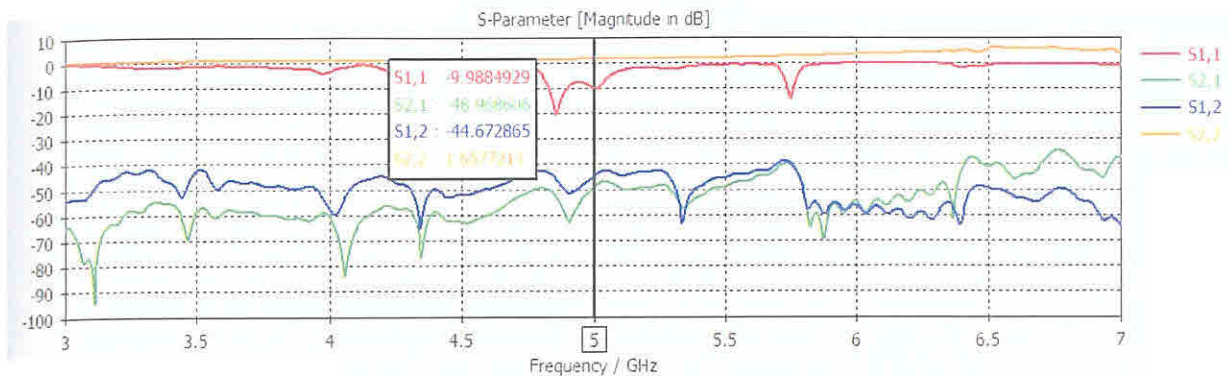
ก ค่า  $s$  - parameter ระยะห่าง 97.68 มิลลิเมตร



ข ค่า  $s$  - parameter ระยะห่าง 130.24 มิลลิเมตร



ค ค่า  $s$  - parameter ระยะห่าง 162.8 มิลลิเมตร



ง ค่า  $s$  –  $parameter$  ระยะห่าง 195.36 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.49 ค่า  $s$  –  $parameter$  สายอากาศภาครับและภาคส่งอยู่ห่างกัน 97.68, 130.24, 162.80, 195.36 มิลลิเมตรกรณีมีวัสดุ

จากรูปที่ 3.48 และ รูปที่ 3.49 จะพบว่าเมื่อวางสายอากาศภาคส่งและภาครับให้มีระยะห่างระหว่างกันเท่ากับ 97.68, 130.24, 162.80 และ 195.36 มิลลิเมตร โดยมีวัสดุอยู่กึ่งกลางระหว่างสายอากาศ โดยเลือกใช้สายอากาศภาครับและภาคส่งตัวที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.50 เมื่อทำการส่งคลื่นจากสายอากาศภาคส่ง (พอร์ตที่ 1) ไปยังสายอากาศภาครับ (พอร์ตที่ 2) และสายอากาศภาครับ (พอร์ตที่ 2) ส่งคลื่นกลับมายังสายอากาศภาคส่ง (พอร์ตที่ 1) ค่า  $S_{21}$ ,  $S_{12}$  ต้องมีค่าเท่ากันหรือต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่จากรูปที่ 3.14 พบว่า  $S_{21}$ ,  $S_{12}$  มีค่าต่างกันมาก เนื่องจากระยะห่างสายอากาศอยู่ใกล้กันทำให้ วัสดุอยู่ห่างจากสายอากาศภาคส่ง (พอร์ตที่ 1) แต่อยู่ใกล้กับสายอากาศภาครับ (พอร์ตที่ 2) เมื่อมีการส่งคลื่นเข้าไปเกิดการสะท้อนของวัตถุพร้อมกับเกิดการเหนี่ยวนำเพิ่มเข้ามาด้วย และเมื่อเพิ่มระยะห่างของสายอากาศ จะเห็นว่า ค่า  $S_{21}$ ,  $S_{12}$  มีแนวโน้มที่มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น เนื่องจากเกิดการเหนี่ยวนำของสายอากาศลดลงแต่ในกรณี 3.14 จะพบว่าค่า  $S_{21}$ ,  $S_{12}$  มีค่าต่างกันมากเช่นกัน เนื่องจากระยะห่างของสายอากาศที่มากเกินไป ฉะนั้นระยะห่างของสายอากาศก็มีการสะท้อนของวัตถุ เราจึงต้องเลือกระยะที่เหมาะสม

จะเห็นได้ว่าสายอากาศภาคส่งและภาครับที่ระยะห่างระหว่าง 130.24 มิลลิเมตร มีค่า  $S_{21}$  มากที่สุด หมายความว่า คลื่นจะเดินทางออกจากสายอากาศภาคส่งไปกระทบกับวัตถุ แล้วสะท้อนกลับไปยังสายอากาศภาครับได้ดีที่สุด

ดังนั้นคณะผู้จัดทำได้เลือกระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับที่ระยะเท่ากับ 130.24 มิลลิเมตร เพื่อนำไปใช้งานในการตรวจสิ่งแปลกปลอมในวัสดุ

## บทที่ 4

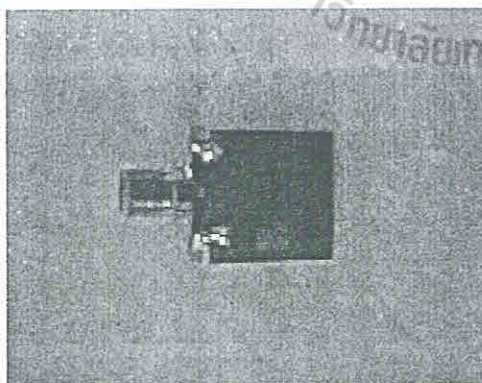
### ผลการทดลอง

#### 4.1 บทนำ

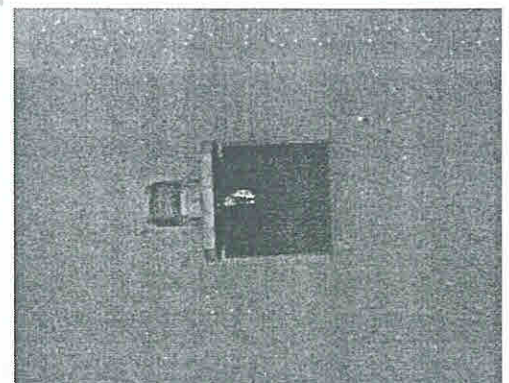
โครงการนี้ได้ใช้โปรแกรม CST Microwave studio มาทำการจำลองแบบและวิเคราะห์สายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna) บนวัสดุฐานรองชนิด FR4 ซึ่งมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.5 ความหนาของวัสดุฐานรอง ( $h$ ) เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร ความหนาของวัสดุตัวนำ ( $t$ ) เท่ากับ 0.035 มิลลิเมตร และมีค่ามุมสัมพัทธ์การสูญเสีย (Loss tangent :  $\tan\delta$ ) เท่ากับ 0.02 ดังนั้นในโครงการนี้จึงนำรูปแบบสายอากาศที่สร้างบนวัสดุรองฐานชนิด FR4 มาสร้างจริง และนำผลที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับผลที่จำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave studio

#### 4.2 ผลการวัดสายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna) 1 อิลี่เมนต์

สายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna) ที่ได้ทำการออกแบบบนวัสดุฐานรองชนิด FR4 ถูกนำไปสร้างจริงโดยมีระนาบกราวด์ขนาด  $15 \times 15$  ตารางมิลลิเมตร สายอากาศจริงแสดงอยู่ในรูปที่ 4.1 โดยสายอากาศที่นำมาสร้างจริง ประกอบด้วยสายอากาศสลีต (Slot Antenna) 1 อิลี่เมนต์ และไมโครสตริปไลน์ ซึ่งไมโครสตริปไลน์ทำหน้าที่ป้อนสัญญาณให้แก่สายอากาศ ในการวัดจะใช้หัวคอนเน็คเตอร์ (connector) ชนิด SMA ต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) เพื่อค่าความถี่, ค่า  $S_{11}$  และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศขนาด 1 อิลี่เมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



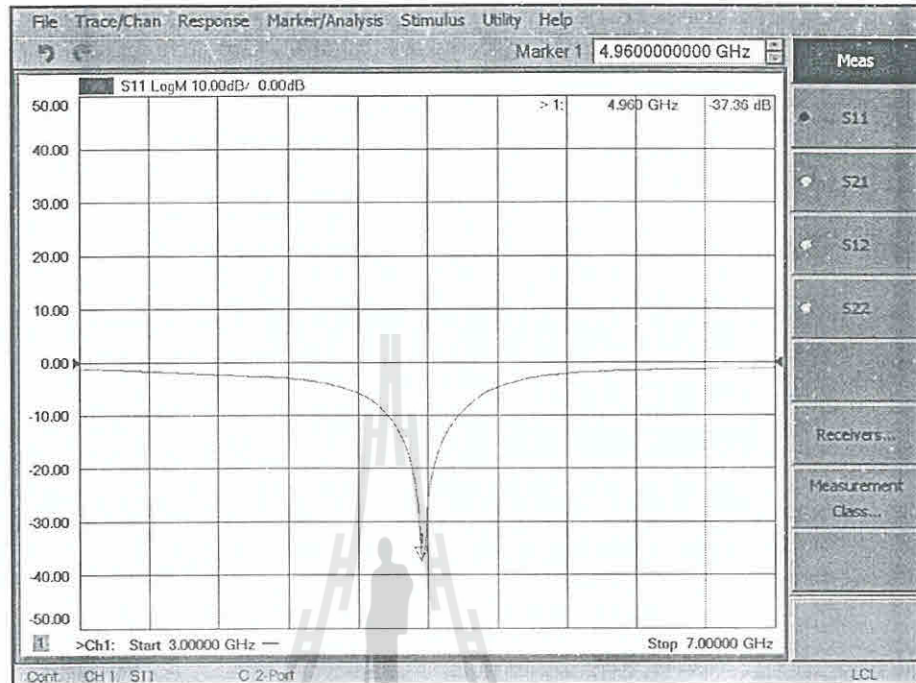
ก ด้านหน้า



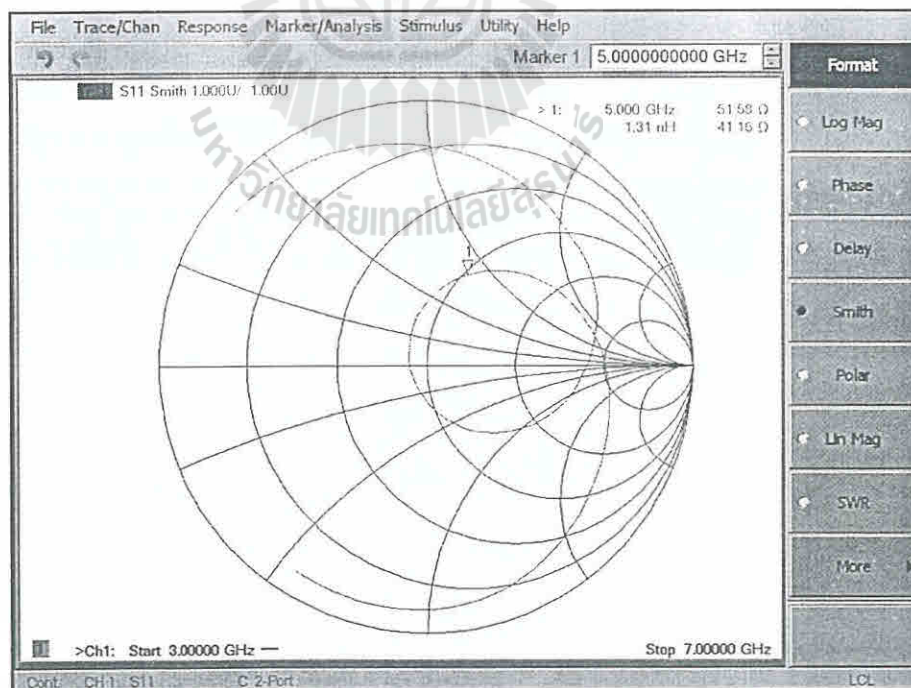
ข ด้านหลัง

รูปที่ 4.1 ภาพจริงของสายอากาศแบบสลีต (Slot Antenna) -ขนาด 1 อิลี่เมนต์

ผลการวัดค่า  $S_{11}$  และค่าอิมพีแดนซ์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)  
ขนาด 1 อิลี่เมนต์



ค่า  $S_{11}$



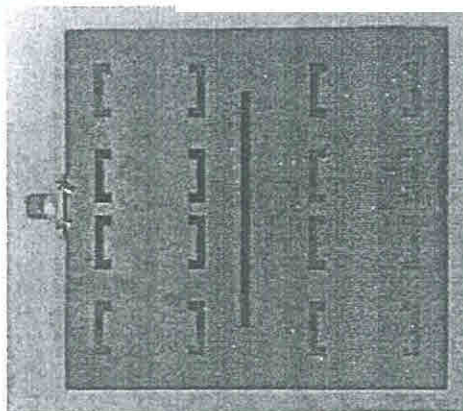
ค่าอิมพีแดนซ์

รูปที่ 4.2 ผลการวัดค่า  $S_{11}$  และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบสลิต (Slot Antenna) 1 อิลี่เมนต์

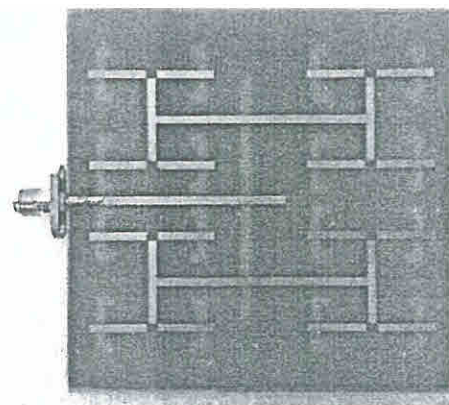
จากผลการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ของสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ขนาด 1 อิลลิเมนต์ จะพบว่าค่า  $S_{11}$  ที่มีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ความถี่ 4.96 GHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -37.36 dB และเมื่อคู่ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 5 GHz เท่ากับ  $51.58 + j41.16$  โอห์ม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองแบบในโปรแกรม CST Microwave Studio ได้ค่า  $S_{11}$  ที่มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ความถี่ 4.98 GHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -20.72 dB และเมื่อคู่ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 5 GHz เท่ากับ  $54.5 - j8.35$  โอห์ม ซึ่งค่าความถี่และค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับความถี่และอิมพีแดนซ์ที่ต้องการ ซึ่งในทางปฏิบัติอาจจะเกิดจากความผิดพลาดในการสร้างชิ้นงาน รวมไปถึงการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมรอบข้าง แต่อย่างไรก็ดีผลที่ได้จากการวัดนั้นสามารถนำไปใช้งานได้จริง และครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการ

#### 4.3 ผลการวัดสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ขนาด 4×4

สายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ขนาด 4×4 ที่ได้ทำการออกแบบบนวัสดุฐานรองชนิด FR4 ถูกนำไปสร้างจริง โดยมีระนาบกราวด์ขนาด 85×85 ตารางมิลลิเมตร สายอากาศจริงแสดงอยู่ในรูปที่ 4.3 โดยสายอากาศที่นำมาสร้างจริง ประกอบด้วยสายอากาศสล็อต (Slot Antenna) ขนาด 4×4 และระบบป้อนไมโครสตริปไลน์ เมื่อป้อนสัญญาณเข้าไมโครสตริปไลน์ คลื่นจะเดินทางตามไมโครสตริปไลน์ไปยังสายอากาศต่างๆ ทำให้สายอากาศทั้ง 16 ตัวสามารถทำงานได้ ซึ่งในการใช้งานทางคณะผู้จัดทำจะใช้สวิตช์เกอ์แทนสวิตช์ และคิดเฉพาะสายอากาศที่ต้องการให้ทำงาน ซึ่งจะต่อหัวคอนเน็คเตอร์ (connector) ชนิด SMA เข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) เพื่อดูค่าความถี่, ค่า  $S_{11}$  และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ดังแสดงใน รูปที่ 4.4



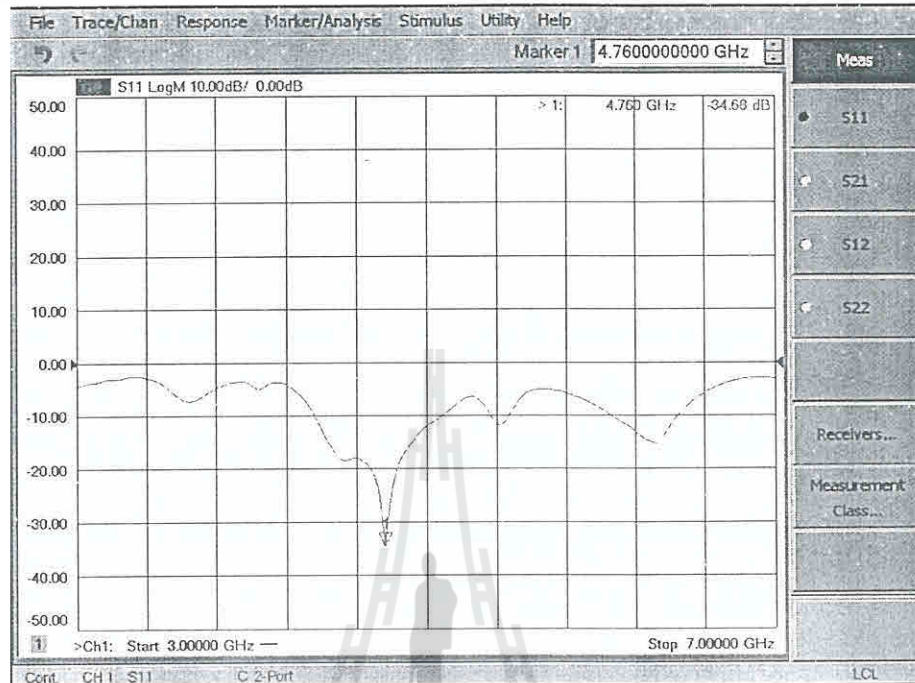
ก ด้านหน้า



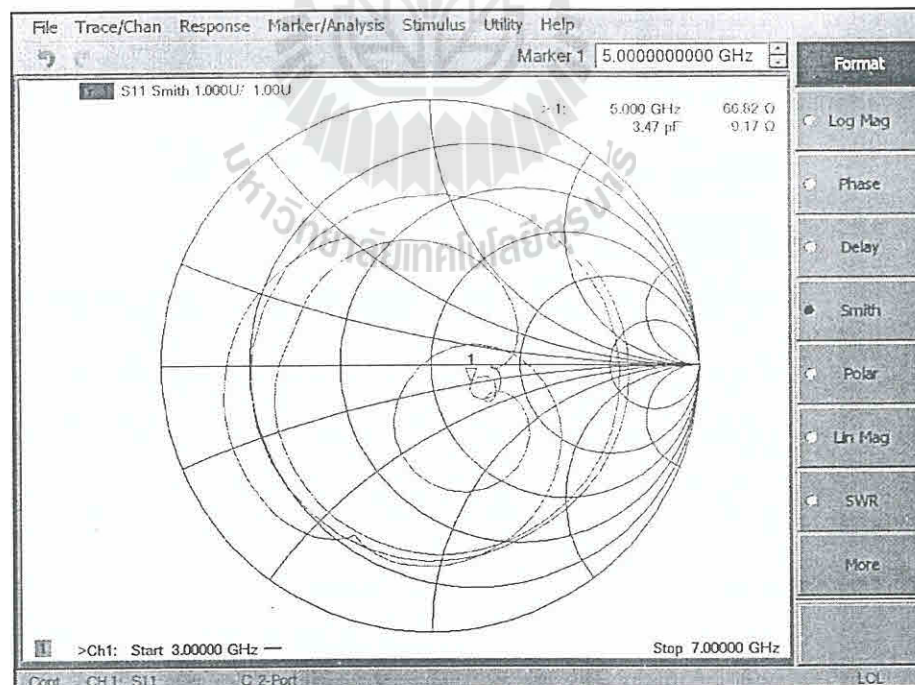
ข ด้านหลัง

รูปที่ 4.3 ภาพจริงของสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ขนาด 4×4

ผลการวัดค่า  $S_{11}$  โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ของสายอากาศ  
สล็อต (Slot Antenna) ขนาด 4×4



ค่า  $S_{11}$



ข ค่าอิมพีแดนซ์

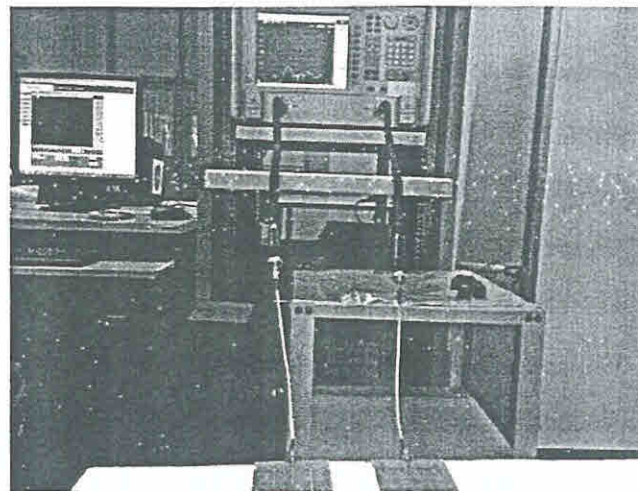
รูปที่ 4.4 ผลการวัดค่า  $S_{11}$  และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสล็อต (Slot Antenna) ขนาด 4×4

จากผลการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ของสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ขนาด  $4 \times 4$  จะพบว่าค่า  $S_{11}$  ที่มีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ความถี่ 4.76 GHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -34.68 dB และเมื่อดูค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 5 GHz เท่ากับ  $66.82 - j9.17$  โอห์ม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองแบบในโปรแกรม CST Microwave Studio ได้ค่า  $S_{11}$  ที่มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ความถี่ 4.952 GHz โดยค่า  $S_{11}$  มีค่าเท่ากับ -42.46 และเมื่อดูค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 5 GHz เท่ากับ  $52.1 - j7.99$  โอห์ม ซึ่งค่าความถี่และค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับความถี่และอิมพีแดนซ์ที่ต้องการ ซึ่งในทางปฏิบัติอาจจะเกิดจากความผิดพลาดในการสร้างชิ้นงาน รวมไปถึงการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมรอบข้าง แต่อย่างไรก็ดีผลที่ได้จากการวัดนั้นสามารถนำไปใช้งานได้จริง และครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการ

#### 4.4 ผลการวัดสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ภาคส่งและภาครับ ขนาด $4 \times 4$

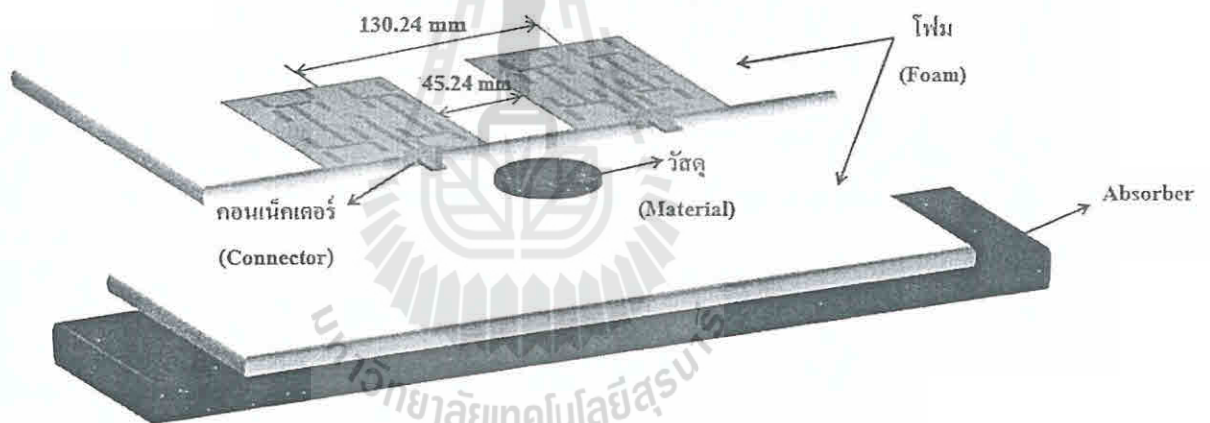
สายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ขนาด  $4 \times 4$  นำมาสร้างจริงบนวัสดุฐานรองชนิด FR4 โดยมีระนาบกราวด์ขนาด  $85 \times 85$  ตารางมิลลิเมตร ซึ่งในการวัดผลจะดูค่าสัมประสิทธิ์ในการส่งผ่าน ( $S_{21}$ ) เป็นหลัก เนื่องจากเราต้องการดูว่าเมื่อส่งคลื่นออกจากสายอากาศภาคส่ง (พอร์ตที่ 1) ไปกระทบกับวัสดุซึ่งเป็นโลหะ แล้วสะท้อนกลับมายังสายอากาศภาครับ (พอร์ตที่ 2) ได้มากน้อยแค่ไหน และนำค่าเหล่านั้นมาคำนวณและพล็อตค่าลงในโปรแกรม Mat lap เพื่อประมวลผลให้ได้เป็นภาพกราฟฟิคที่สามารถบอกลักษณะของวัตถุที่เราต้องการค้นหาได้อย่างถูกต้อง โดยในการจำลองนี้ให้สายอากาศหันไปในทิศทางเดียวกัน และสายอากาศภาครับและภาคส่งอยู่ห่างกัน 130.24 มิลลิเมตร ที่เลื่อระยะ 130.24 มิลลิเมตร เนื่องจากผลการจำลองในโปรแกรม CST Microwave Studio เมื่อนำสายอากาศที่มีระยะห่างระหว่างกันเท่ากับ 130.24 มิลลิเมตร ไปจำลองการรับส่งคลื่นของสายอากาศภาคส่งและภาครับ กรณีมีวัสดุแปลกปลอม จะพบว่าค่า  $S_{21}$  มากที่สุด หมายความว่า คลื่นจะเดินทางออกจากสายอากาศภาคส่งไปกระทบกับวัตถุ แล้วสะท้อนกลับไปยังสายอากาศภาครับ ได้ดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งจะต่อหัวคอนเน็คเตอร์ (connector) ชนิด SMA เข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) เพื่อดูค่าความถี่และค่า  $S_{11}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.6





ภาคส่ง  
(Port 1)      ภาครับ  
(Port 2)

กรูปรูปในการจำลองการตรวจสอบวัสดุถึงแปลกปลอม

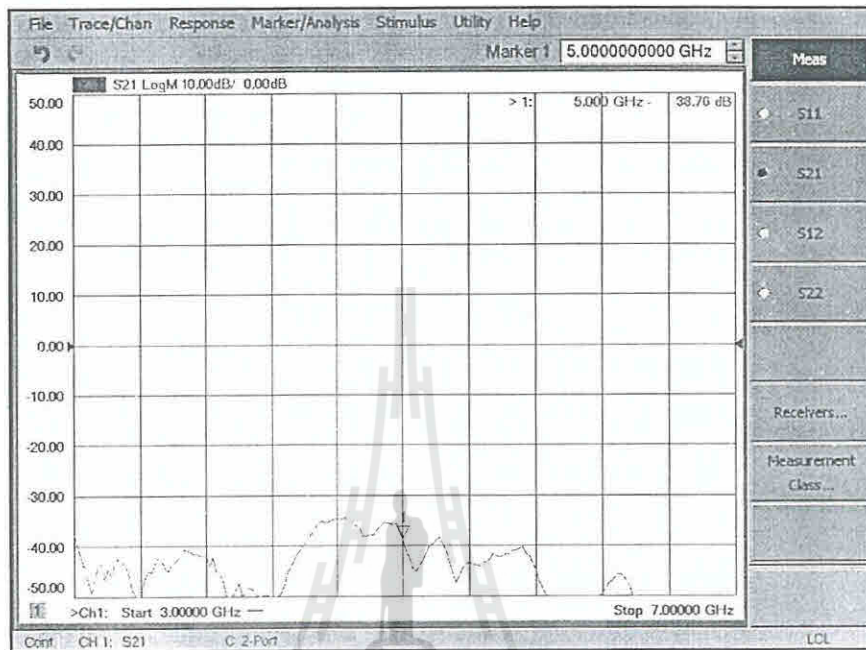


ข ลักษณะการจำลองการตรวจสอบวัสดุแปลกปลอม

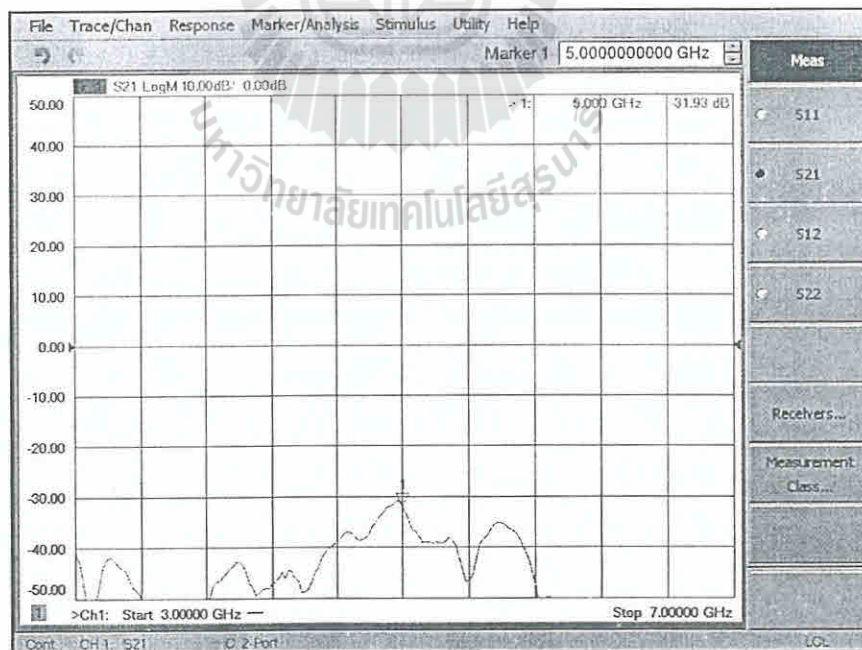
รูปที่ 4.5 รูปการจำลองการตรวจสอบวัสดุแปลกปลอม

จากรูปที่ 4.5 เป็นการจำลองการตรวจสอบวัสดุแปลกปลอมที่เราไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยในการจำลองนี้จะวางสายอากาศสี่เหลี่ยม (Slot Antenna) ขนาด 4x4 โดยให้ด้านหน้าของสายอากาศวางคว่ำบนแผ่นโฟม และวางวัสดุที่เราต้องการทำการค้นหาไว้ด้านล่างแผ่นโฟม โดยให้ตำแหน่งวัสดุอยู่กึ่งกลางระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ และมีแผ่น Absorber อยู่ด้านล่างสุด เป็นตัวช่วยดูดซับคลื่นคลื่น

ผลการวัดค่า  $S_{21}$  โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ของสายอากาศ  
 สล็อต (Slot Antenna) ขนาด 4×4



ก ค่า  $S_{21}$  แบบไม่มีวัตถุ



ข ค่า  $S_{21}$  แบบมีวัตถุ

รูปที่ 4.6 ภาพผลการวัดค่า  $S_{21}$  แบบมีวัตถุและไม่มีวัตถุ

จากรูปที่ 4.6 ผลการวัดค่า  $S_{21}$  โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) สายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ขนาด  $4 \times 4$  จะพบว่าค่า  $S_{21}$  กรณีไม่มีวัตถุ เท่ากับ  $-38.76$  dB และในกรณีที่มีวัตถุ เท่ากับ  $-31.93$  dB ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลในการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio จะพบว่า  $S_{21}$  กรณีไม่มีวัตถุ เท่ากับ  $-41.31$  dB และในกรณีที่มีวัตถุ เท่ากับ  $-32.73$  dB จะสังเกตเห็นว่าค่า  $S_{21}$  กรณีไม่มีวัตถุและมีวัตถุ ในการวัดจริงกับการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio นั้นมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากในทางปฏิบัติอาจจะเกิดความผิดพลาดจากการสร้างชิ้นงานรวมไปถึงการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก

ซึ่งจะเห็นได้ว่ากรณีไม่มีวัตถุ นั้นค่า  $S_{21}$  มีค่าน้อยกว่ากรณีที่มีวัตถุ เนื่องจากกรณีที่ไม่มีวัตถุเมื่อคลื่นเดินทางออกจากสายอากาศส่งและไม่กระทบกับวัตถุใดๆ คลื่นจะเดินทางต่อไปเรื่อยๆและเกิดการจางหาย เนื่องจากไม่มีคลื่นสะท้อนกลับมายังสายอากาศรับ จึงทำให้ค่า  $S_{21}$  มีค่าน้อย ซึ่งในทางปฏิบัติจะมีการเหนี่ยวนำระหว่างสายอากาศด้วยจึงทำให้ได้ค่า  $S_{21} = -38.76$  แต่ในกรณีที่มีวัตถุจะมีค่า  $S_{21}$  มาก เนื่องจากเมื่อสายอากาศส่งส่งคลื่นออกไปกระทบกับวัตถุ และคลื่นจะสะท้อนกลับมาสายอากาศรับ

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดจากเครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ Network Analyzer และการจำลองผลโดยโปรแกรม CST Microwave studio ตามคุณลักษณะสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) บนวัสดุฐานรอง FR4

คุณสมบัติ	ความถี่ที่ต้องการ	
	ผลวัดจากเครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ	ผลจำลองจากโปรแกรม CST
ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	4.952	4.760
$S_{11}$ (dB)	-41.87	-34.68

คุณสมบัติ	ความถี่ที่ต้องการ	
	ผลวัดจากเครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ	ผลจำลองจากโปรแกรม CST
ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)	5	5
$S_{21}$ แบบไม่มีวัสดุ (dB)	-38.76	-41.31
$S_{21}$ แบบมีวัสดุ (dB)	-31.93	-32.73

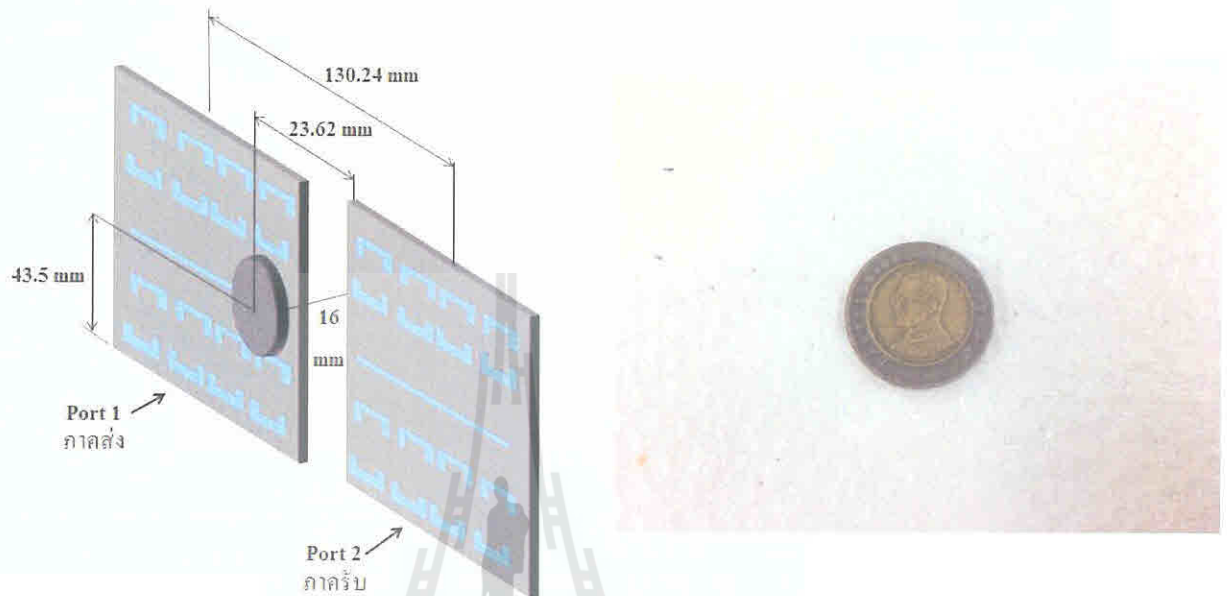
จากผลการจำลองผลโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio จะเป็นผลการทดลองที่เชื่อถือได้เป็นอย่างดี และถือว่าสามารถนำไปสร้างชิ้นงานได้จริง เพราะไม่มีปัญหาจากสิ่งแวดล้อมภายนอก จากการสร้างชิ้นงานจริงเพื่อศึกษาเป็นต้นแบบตามวัตถุประสงค์ของโครงการจะพบว่า ผลจากการวัดจริงจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย เนื่องด้วยสภาวะแวดล้อมโดยรอบ ความชำนาญของผู้ใช้อุปกรณ์ และหลักการการสร้างชิ้นงานที่ขาดความชำนาญจึงมีผลต่อผลการวัดชิ้นงานจริง

#### 4.5 ผลการเปรียบเทียบรูป 2 มิติ ระหว่างผลที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio กับผลการวัดจริงจากสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ขนาด 4x4

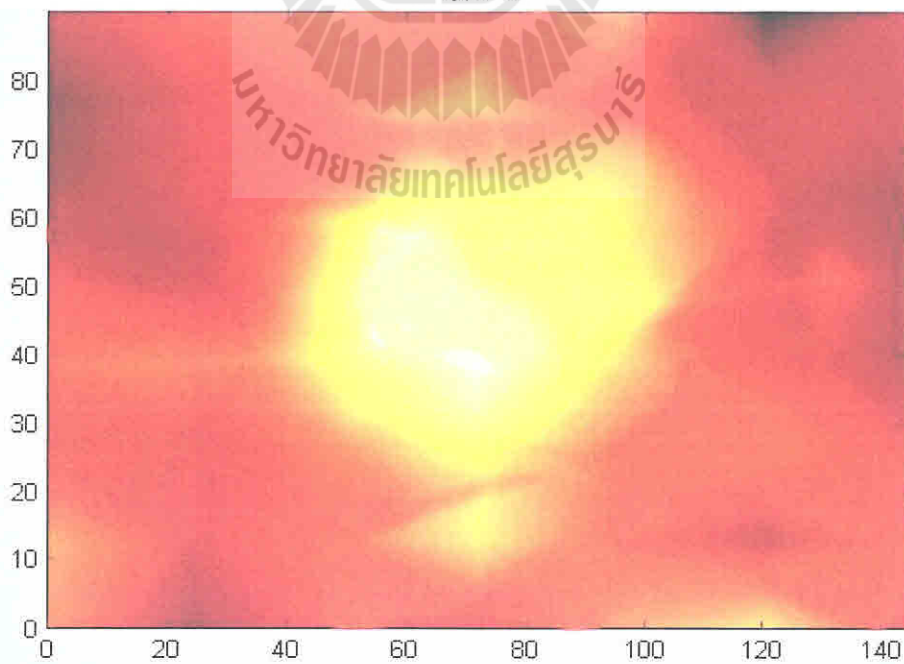
ในโครงการนี้เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาความสามารถของสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ที่ส่งคลื่นไมโครเวฟ เพื่อตรวจสอบวัสดุแปลกปลอม โดยนำค่า  $S_{21}$  ที่วัดได้มาสร้างเป็นภาพ 2 มิติ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ชิ้นงาน โดยชิ้นงานยังอยู่ในสภาพคงเดิมมากที่สุด.

จากผลการวัดจริงและผลที่ได้จากการจำลองผลในโปรแกรม CST Microwave Studio ที่นำผลที่วัดได้จากค่า  $S_{21}$  มาสร้างเป็นภาพ 2 มิติ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบทั้งสองวิธีพบว่า มีลักษณะใกล้เคียงกันมาก และสามารถนำภาพ 2 มิติที่ได้ไปวิเคราะห์ถึงลักษณะของวัสดุแปลกปลอมในชิ้นงานที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งการจำลองผลในโปรแกรม CST Microwave Studio และจากการวัดจริงโดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) จะทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 5 กรณี ดังนี้

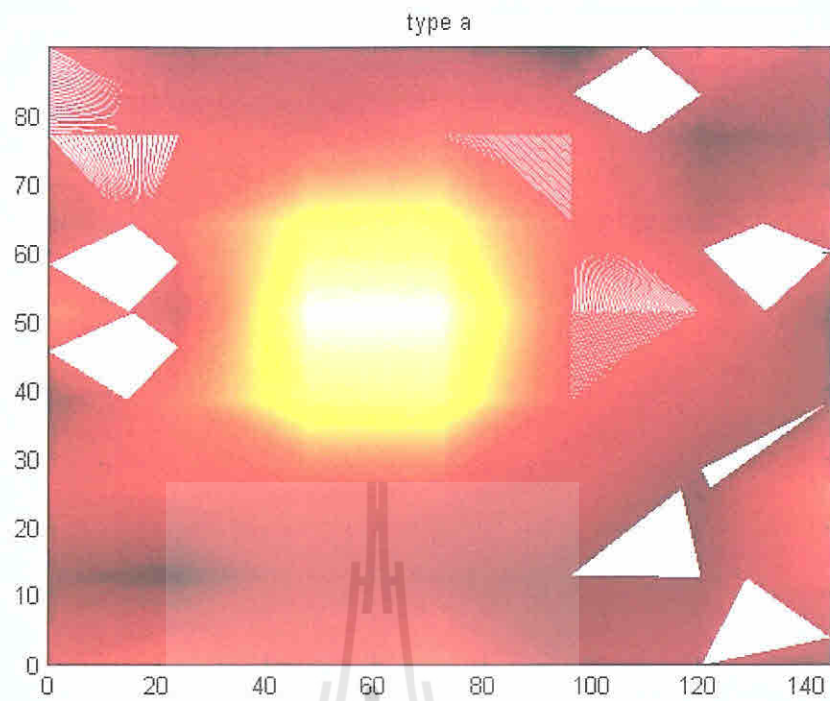
**กรณีที่ 1** มีวัสดุแผ่นวงกลมมีรัศมี  $R = 12.5$  มิลลิเมตร ความหนา  $d = 1$  มิลลิเมตร บรรจุอยู่ในชิ้นงานที่พิกัด  $(x, y, z) = (65.12, 42.5, 16)$  มิลลิเมตร ดังนั้นในการทดสอบจริงจึงใช้เหรียญสิบบาทเป็นวัสดุแปลกปลอมบรรจุอยู่ในโพม ดังแสดงในรูปที่ 4.7



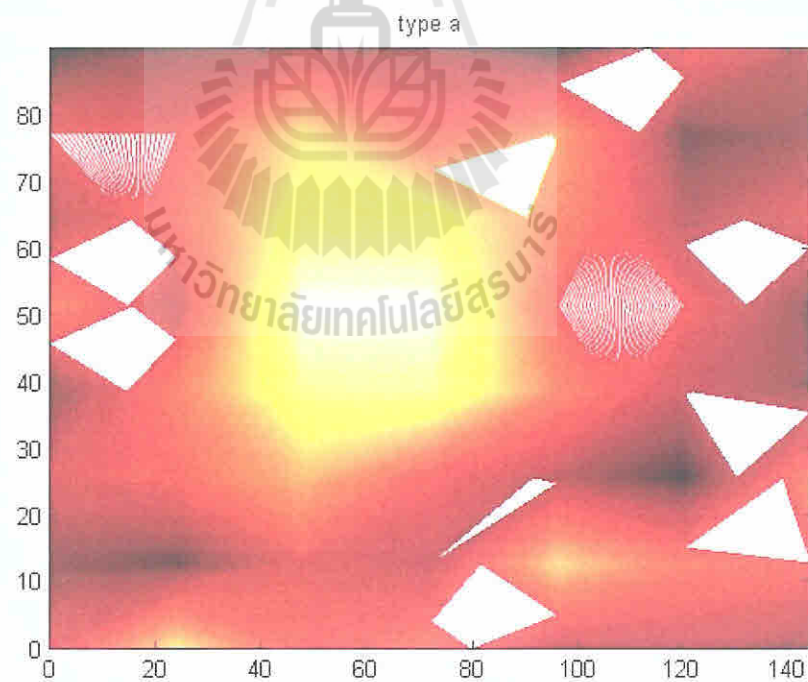
ก ภาพแสดงการทดสอบการตรวจหาวัสดุแปลกปลอม



ข ภาพ 2 มิติ จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ใช้จุดตกกระทบ 256 จุด



ค ภาพ 2 มิติ จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ใช้จุดตกกระทบ 56 จุด

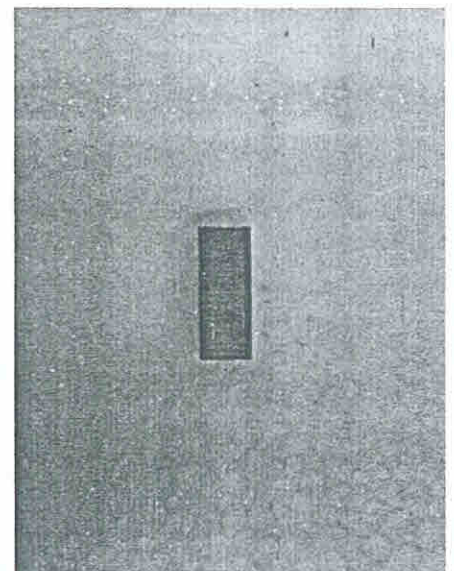
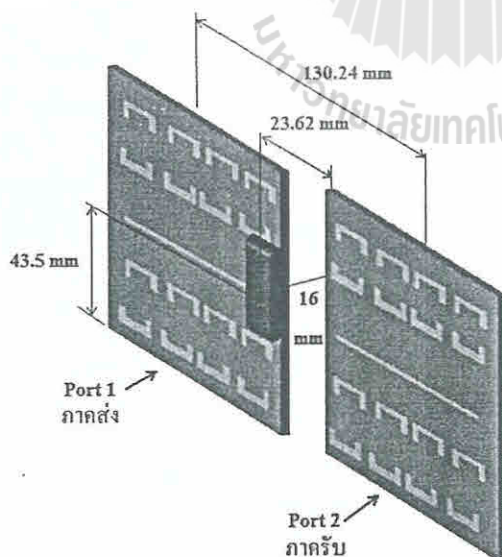


ง ภาพ 2 มิติ จากการวัดจริง ใช้จุดตกกระทบ 56 จุด  
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบรูปที่วัดจากโปรแกรม CST กับ การวัดจริง

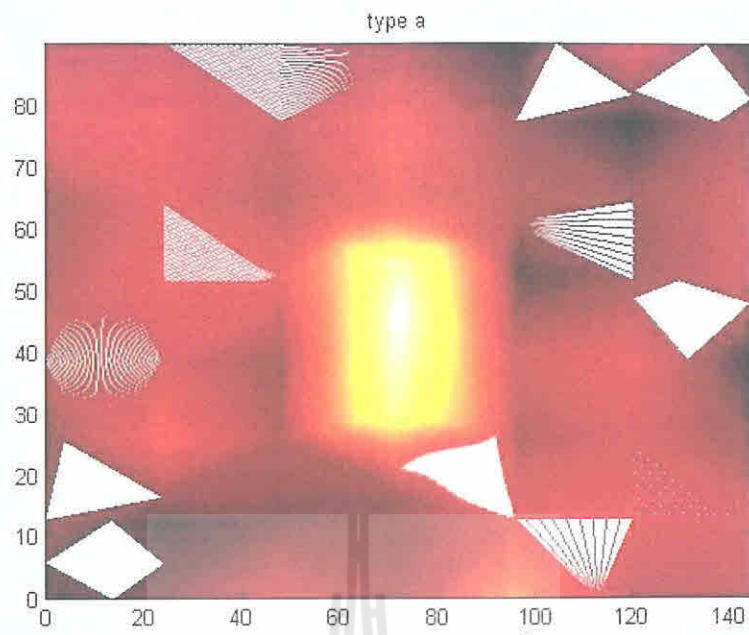
จากรูปที่ 4.7ข และ 4.7ค แตกต่างกันที่ใช้สายอากาศในการตรวจสอบ ซึ่งรูปที่ 4.7ข จะใช้จุดตกกระทบของสายอากาศในการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมในวัสดุ 256 จุด จะพบว่าไม่เกิดช่องสี่เหลี่ยมขึ้นเลย และมีลักษณะเป็นวงกลมแต่จะมีการผิดเพี้ยนนิดหน่อย เนื่องจากบางจุดที่ใช้ในการตรวจสอบมีการซ้ำกัน ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำได้คำนวณหาจุดตกกระทบที่ไม่ซ้ำกันและครอบคลุมวัสดุ จะพบว่าสามารถใช้จุดตกกระทบของสายอากาศ 56 จุดในการตรวจสอบได้ และจากรูปที่ 4.7ค เป็นการใช้อยู่จุดตกกระทบของสายอากาศในการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมในวัสดุ 56 จุด พบว่ามีลักษณะที่เป็นวงกลมมากขึ้น แต่จะมีช่องสี่เหลี่ยมเกิดขึ้น เนื่องจากเป็นจุดที่ไม่ได้โดยวัด

ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงได้ใช้สายอากาศ 56 ตัวในการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมในวัสดุ เพื่อประหยัดเวลาในการค้นหา และให้ผลที่ใกล้เคียงกับลักษณะวัสดุที่เราต้องการตรวจสอบ

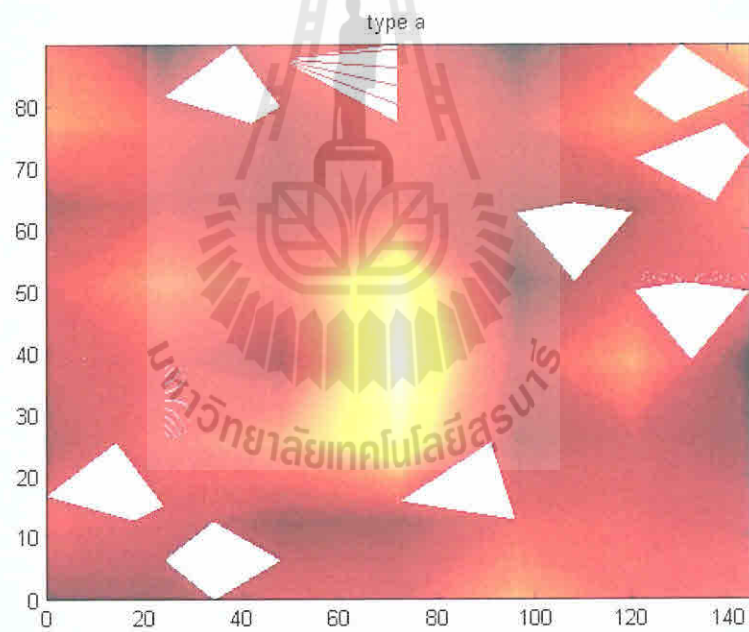
**กรณีที่ 2** มีวัสดุแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาว  $L = 25$  มิลลิเมตร ความกว้าง  $w = 20$  มิลลิเมตร บรรจุอยู่ในชิ้นงานที่พิกัด  $(x, y, z) = (65.12, 42.5, 16)$  มิลลิเมตร ดังนั้นในการทดสอบจริงจึงใช้ลวดเย็บกระดาษ (MAX) เป็นวัสดุแปลกปลอมบรรจุอยู่ในโคม ดังแสดงในรูปที่ 4.8



ก ภาพแสดงการทดสอบการตรวจหาวัสดุแปลกปลอม



ก ภาพ 2 มิติ จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

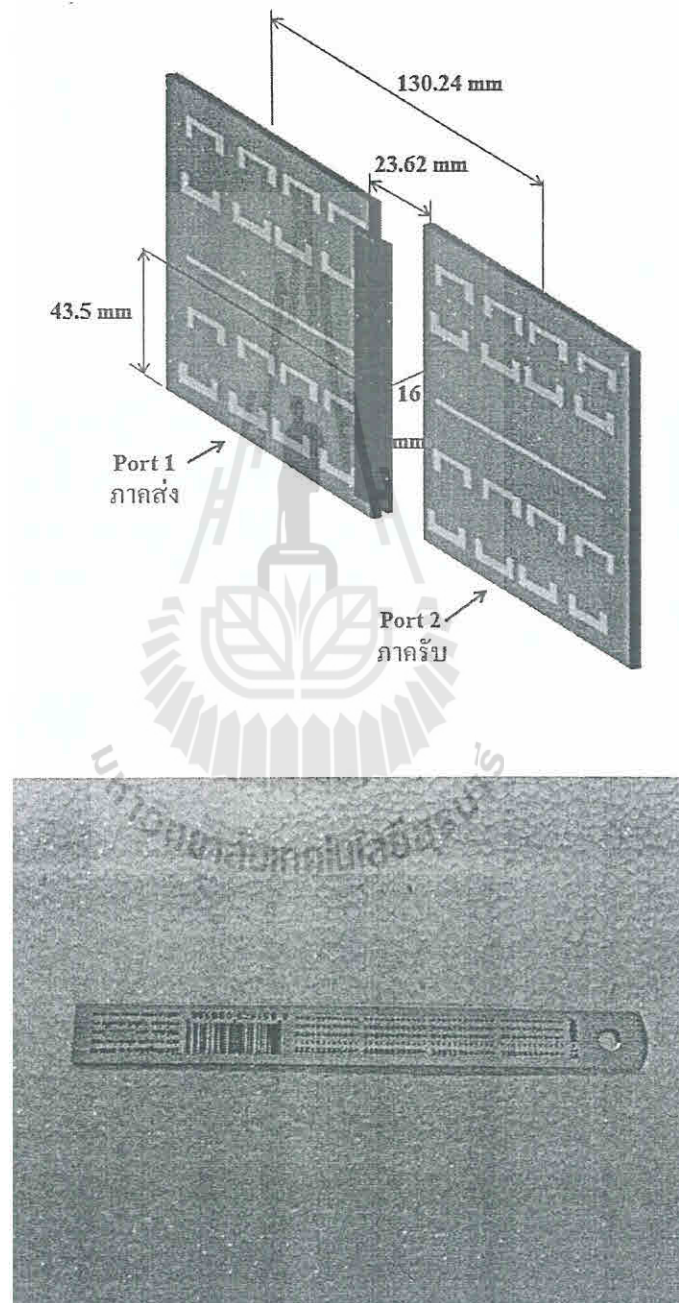


ง ภาพ 2 มิติ จากการวัดจริง

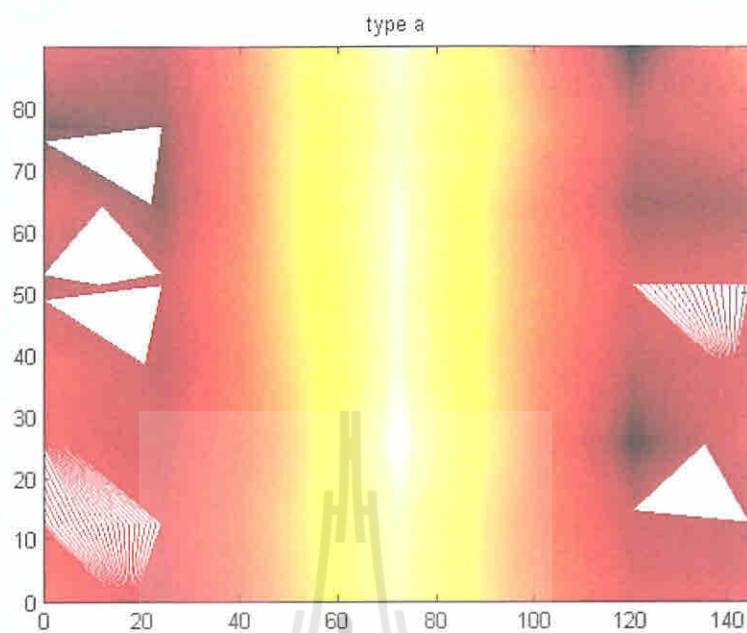
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบรูปที่วัดจากโปรแกรม CST กับ การวัดจริง



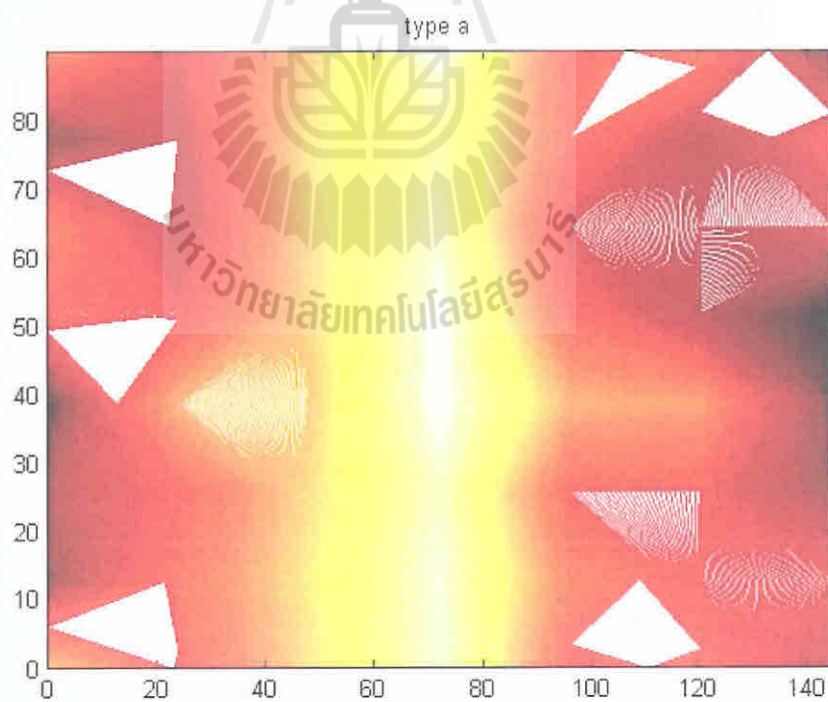
กรณีที่ 3 มีวัสดุแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาว  $L = 85$  มิลลิเมตร ความกว้าง  $W = 20$  มิลลิเมตรบรรจุอยู่ในชิ้นงานที่พิกัด  $(x, y, z) = (65.12, 42.5, 16)$  มิลลิเมตร ดังนั้นในการทดสอบจริงจึงใช้ไม้บรรทัดเป็นวัสดุแปลกปลอมบรรจุอยู่ในโพม ดังแสดงในรูปที่ 4.9



ก ภาพแสดงการทดสอบการตรวจหาวัสดุแปลกปลอม



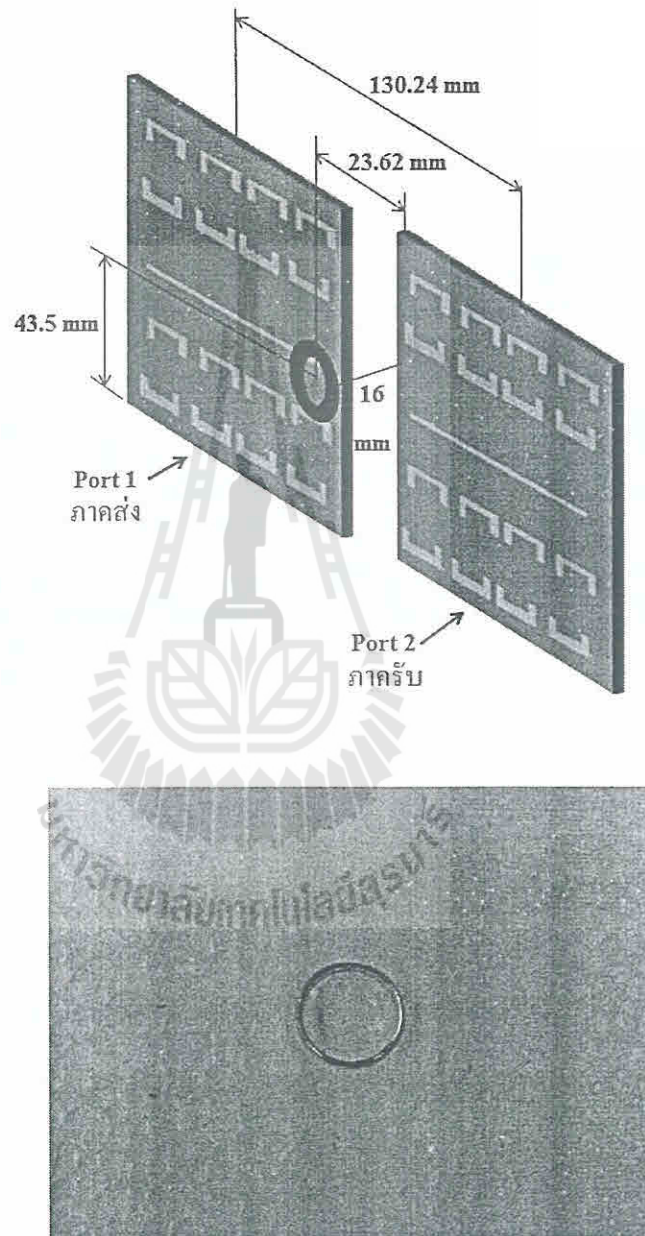
ข ภาพ 2 มิติ จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio



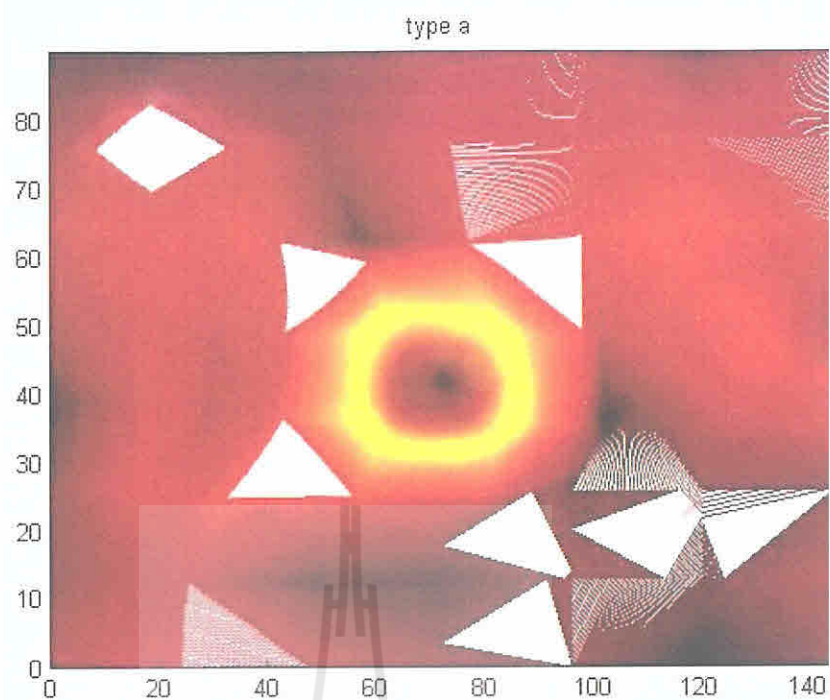
ค ภาพ 2 มิติ จากการวัดจริง

รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบรูปที่วัดจากโปรแกรม CST กับ การวัดจริง

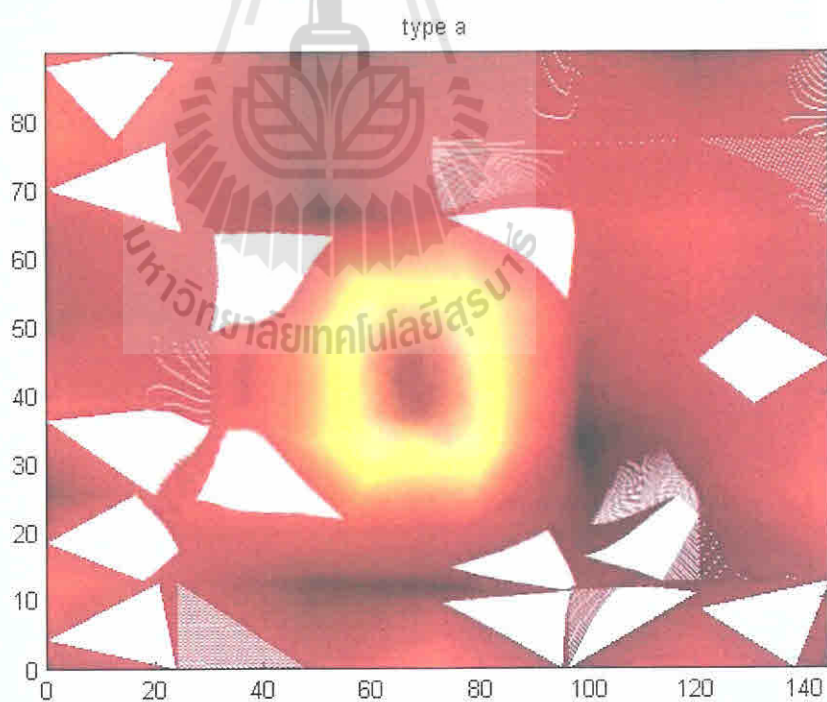
กรณีที่ 4 มีวัสดุแผ่นวงกลมมีรัศมี  $R = 10$  มิลลิเมตร ความหนา  $d = 2$  มิลลิเมตร บรรจุอยู่ภายในชิ้นงานที่พิกัด  $(x, y, z) = (65.12, 42.5, 16)$  มิลลิเมตร ดังนั้นในการทดสอบจริงจึงใช้แหวนเป็นวัสดุแปลกปลอมบรรจุอยู่ในโฟม ดังแสดงในรูปที่ 4.10



ก ภาพแสดงการทดสอบการตรวจหาวัสดุแปลกปลอม



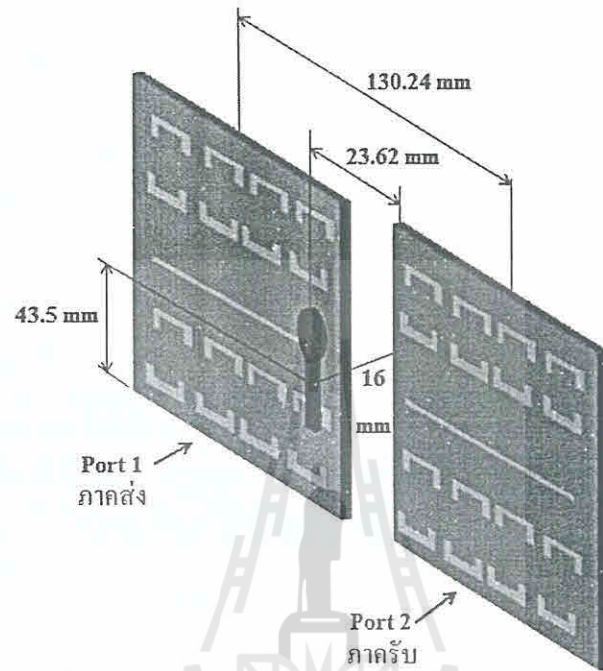
ข ภาพ 2 มิติ จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio



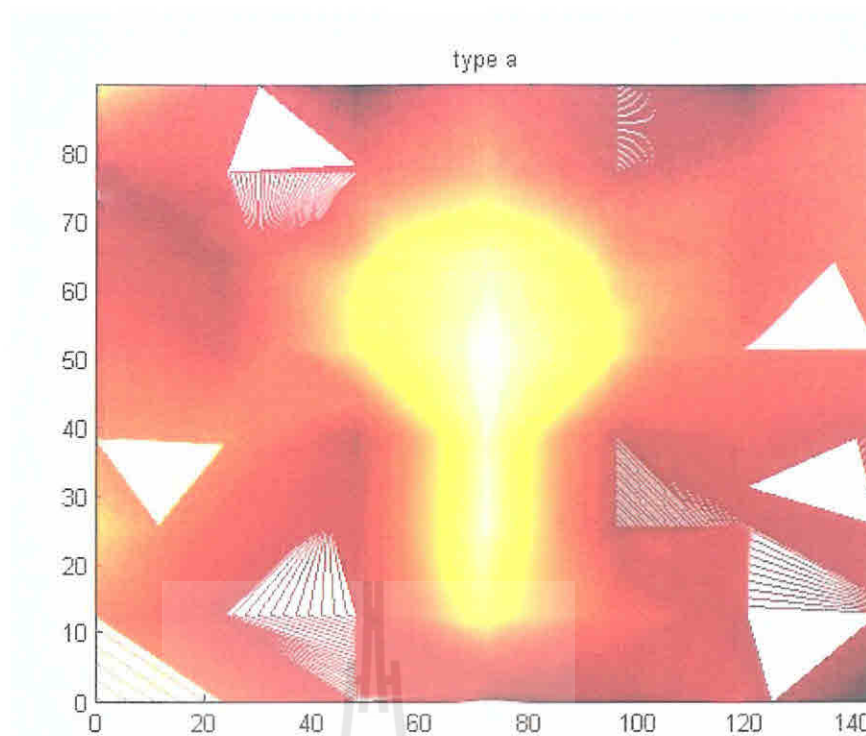
ค ภาพ 2 มิติ จากการวัดค่าจริง

รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบรูปที่วัดจากโปรแกรม CST กับ การวัดจริง

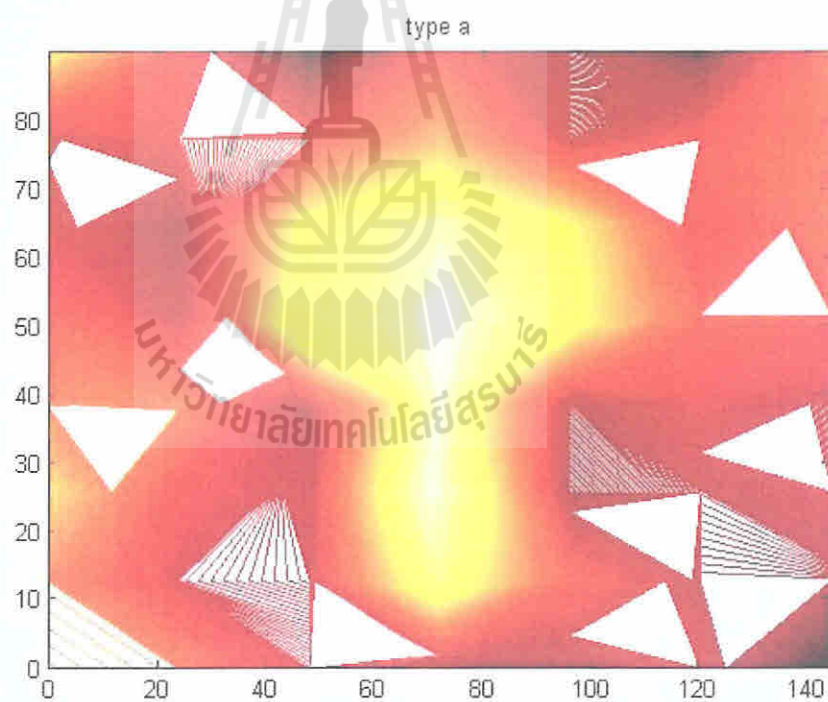
กรณีที่ 5 มีวัสดุแผ่นวงกลมมีรัศมี  $R = 12.5$  มิลลิเมตร ความยาว  $L = 55$  มิลลิเมตร บรรจุอยู่ภายในชิ้นงานที่พิกัด  $(x, y, z) = (65.12, 42.5, 16)$  มิลลิเมตร ดังนั้นในการทดสอบจริงจึงใช้กุญแจเป็นวัสดุแปลกปลอมบรรจุอยู่ในโพรง ดังแสดงในรูปที่ 4.11



ก ภาพแสดงการทดสอบการตรวจหาวัสดุแปลกปลอม



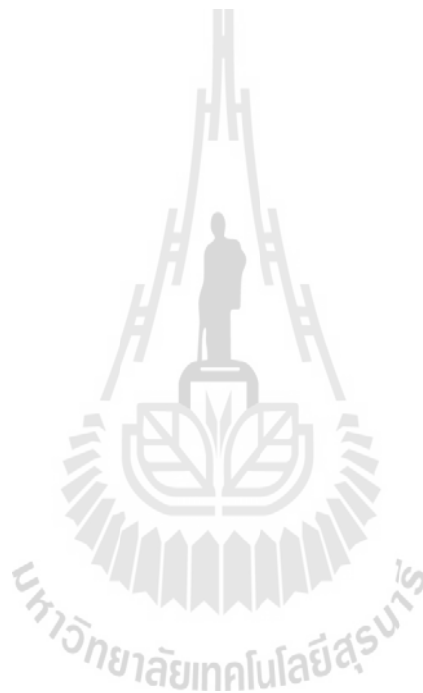
ข ภาพ 2 มิติ จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio



ค ภาพ 2 มิติ จากการวัดค่าจริง

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบรูปที่วัดจากโปรแกรม CST กับ การวัดจริง

จากผลการวัดจริงและผลที่ได้จากการจำลองผลในโปรแกรม CST Microwave Studio ที่วัดค่า  $S_{21}$  มาสร้างเป็นภาพ 2 มิติ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบทั้งสองวิธีพบว่า มีลักษณะใกล้เคียงกันมาก และสามารถนำภาพ 2 มิติ ที่ได้ ไปวิเคราะห์ถึงลักษณะของสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในชิ้นงาน ซึ่งจากการจำลองผลในโปรแกรม CST Microwave Studio และจากการวัดจริงด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) จะทำการวิเคราะห์ 5 กรณี เปรียบเทียบกับผลการจำลองซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าผลการจำลองในโปรแกรม CST Microwave Studio ให้ผลมีความแม่นยำมากกว่าการวัดจริง เนื่องด้วยสภาวะแวดล้อมรอบข้าง อาจส่งผลทำให้เกิดผลกระทบกับการวัดจริงครั้งนี้



## บทที่ 5

### ข้อสรุปของโครงการ

#### 5.1 บทสรุป

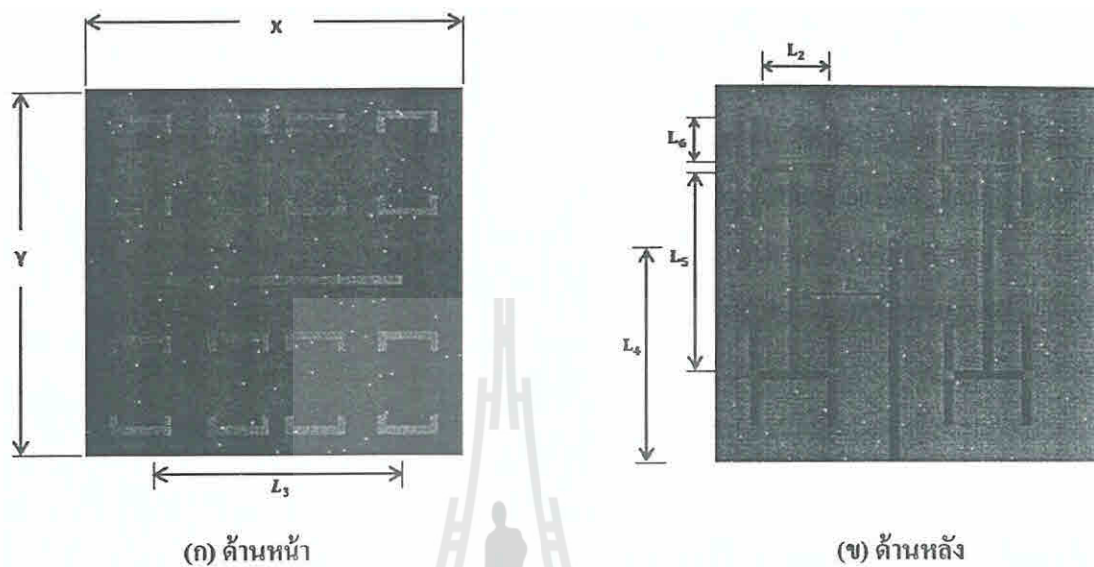
โครงการนี้ได้นำเสนอการตรวจสอบความผิดปกติในวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งในปัจจุบันการค้นหาสิ่งแปลกปลอมหรือความผิดปกติของวัสดุต่างๆที่เราไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการนำข้อมูลเพื่อนำไปซ่อมแซมแก้ไข เช่น รอยร้าวของฝาผนังที่เกิดจากภัยธรรมชาติ การโค้งงอที่ผิดปกติของเหล็กเส้นในคอนกรีต เป็นต้น ดังนั้นในโครงการนี้จึงได้ทำการออกแบบสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ขนาด 4x4 และระบบป้อนไมโครสตริปไลน์ ที่ความถี่ 5 GHz โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อที่จะไม่ทำให้วัสดุบริเวณนั้นเกิดความเสียหายโดยใช้หลักการการทำงานของคลื่น โดยเมื่อคลื่นแผ่ออกจากสายอากาศภาคส่งคลื่นจะเดินทางไปตกกระทบและสะท้อนวัตถุไปยังสายอากาศภาครับ ในการวัดนั้นเราจะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyser) เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแล้วนำค่าเหล่านั้นมาคำนวณและพล็อตค่าลงในโปรแกรม Matlap เพื่อประมวลผลให้ได้เป็นภาพกราฟฟิคที่สามารถบอกลักษณะของวัตถุที่เราต้องการค้นหาได้อย่างถูกต้อง

ส่วนประกอบหลักของโครงการมีดังนี้ 1) แผ่น FR4 ที่มีการออกแบบสล็อตและตัวป้อนเพื่อที่จะส่งคลื่นออกทางด้านที่ต้องการ 2) หัวต่อ Connector 3) เครื่องโครงเครือข่าย (Network Analyzer) 4) วัตถุที่ทำการตรวจสอบ โดยอุปกรณ์เหล่านี้มีหลักการการทำงานคือ นำสายอากาศสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ขนาด 4x4 ที่ทำการออกแบบไว้ ที่ความถี่ 5 GHz วางไว้บนวัตถุที่ต้องการตรวจสอบ โดยหลักการการทำงานจะทำการแผ่กระจายคลื่นออกมาจากสายอากาศแล้วสะท้อนกลับไปที่ตัวรับ เพื่อเก็บค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน และนำไปวิเคราะห์โดยนำค่าที่ได้ ไปใส่ลงในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าตำแหน่งของวัตถุที่ต้องการตรวจสอบ

สำหรับขั้นตอนในการออกแบบสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) ขนาด 4x4 และระบบป้อนแบบไมโครสตริปไลน์ ที่ได้ทำในครั้งนี เริ่มจากการคำนวณหาค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ ( $\lambda_g$ ) ค่าความกว้างและความยาวสายอากาศแบบสล็อต (Slot Antenna) และทำการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ปรับพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ และมีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10dB จากนั้นนำรูปแบบสายอากาศที่ผ่านการจำลองมาแล้วไปทำการสร้างจริง และวัดผลเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบ ซึ่งเราสรุปค่าที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศสล็อต (Slot Antenna) และระบบป้อนไมโครสตริปไลน์ ขนาด 4x4 เพื่อใช้งานตรวจสอบ



ความผิดปกติในวัสดุด้วยคลื่น ไมโครเวฟ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

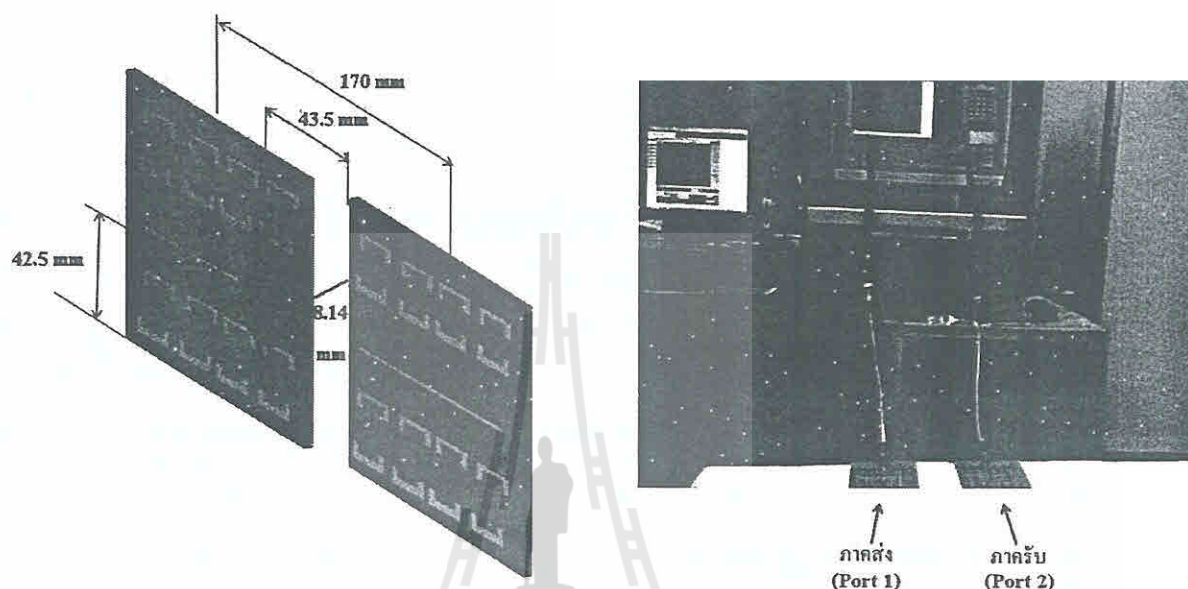


รูปที่ 5.1 สายอากาศสลิต (Slot Antenna) และระบบป้อนไมโครสตริปไลน์ ขนาด 4×4

ตารางที่ 5.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

ค่าพารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการออกแบบ / ขนาดทางกายภาพ (mm)
$X$	85
$Y$	85
$w_3$	1.8
$w_4$	1.8
$L_2$	19.98
$L_3$	55
$L_4$	43
$L_5$	47.56
$L_6$	12.5
$L_s$	1.55
$D$	17.78

จากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม CST Microwave Studio ทางคณะผู้จัดทำได้นำมาสร้างสายอากาศจริง เพื่อทำการทดสอบความผิดปกติในวัสดุที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและไม่ทำลายชิ้นงานนั้น ซึ่งในการจำลองการตรวจสอบความผิดปกติในวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การจำลองการตรวจสอบความผิดปกติในวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ

จากผลการทดลองพบว่า โครงงานเรื่องการตรวจสอบสิ่งผิดปกติของวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟนี้สามารถตรวจพบวัตถุสิ่งแปลกปลอมในชิ้นงานทดลอง และมีตำแหน่งตรงตามที่ใส่ไว้ได้อย่างชัดเจน

เนื้อหาในบทนี้เป็นการกล่าวถึงบทสรุปของโครงงานการตรวจสอบความผิดปกติในวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งประกอบไปด้วยปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน วิธีการแก้ไข ข้อเสนอแนะ และวิธีการพัฒนาโครงงานต่อไป

## 5.2 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไข้ปัญหา

ในการทำโครงการเรื่องการตรวจสอบสิ่งผิดปกติของวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ ปัญหาที่เราพบได้บ่อย แสดงดังตารางที่ 5.1 ซึ่งประกอบด้วยปัญหาต่างๆที่พบ สาเหตุของปัญหา รวมทั้งวิธีการแก้ไข้ปัญหา

**ตารางที่ 5.1**

ปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน	สาเหตุและวิธีการแก้ไข้
1.การจำลองชิ้นงานและอ่านค่าจากผลการทดสอบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio	สาเหตุขาดความรู้และประสบการณ์ในการใช้โปรแกรม CST Microwave Studio วิธีการแก้ไข้ เข้าพบอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการเพื่อขอคำแนะนำ และสอบถามรุ่นที่บัณฑิตศึกษาที่ชำนาญเกี่ยวกับการใช้โปรแกรมเพื่อศึกษาวิธีการอย่างละเอียด
2.การสร้างลายวงจรที่มีตำแหน่งตรงตามแบบจำลองในโปรแกรม	สาเหตุ หลังจากที่เราได้สติกเกอร์ที่มีความแม่นยำตามแบบจำลองในโปรแกรมแล้วขั้นตอนนี้คือการแปะสติกเกอร์ลงในแผ่นปริ้น โดยเราจะทำการแปะด้วยมือ จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน วิธีการแก้ไข้ ใช้ความแม่นยำโดยการอิงขอบของแผ่นปริ้น FR4 ที่ทำการตัดมาแล้วด้วยเครื่องมือตัดแผ่นปริ้น
3.การทำาทดลองหรือทดสอบชิ้นงาน เพื่ออ่านและเก็บค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน	สาเหตุ เนื่องจากเครื่อง โครงสร้าง หรือเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ มีความเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน ทำให้ค่าที่ได้มีความผิดพลาดอย่างเห็นได้ชัด วิธีการแก้ไข้ ได้ขอคำแนะนำจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ เพื่อขอใช้เครื่องมือที่มีความทันสมัยและมีประสิทธิภาพในการทดสอบ จึงทำให้สามารถอ่านและเก็บค่าได้

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในการใช้โปรแกรม CST Microwave Studio มีการใช้งานทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์สูงพอสมควรในขณะที่ประมวลผล ซึ่งทำให้คอมฯ เกิดมีอาการค้าง และช้า ดังนั้นผู้ใช้งานโปรแกรมนี้ควรใช้ร่วมกับคอมฯ ที่มีสมรรถนะสูง เพื่อความราบรื่นและรวดเร็วในการใช้โปรแกรม

5.3.2 ในการกักลายวงจร ควรหาวิธีที่เหมาะสม เพื่อความคมชัดของลายวงจร แนะนำให้ใช้น้ำยากัดแผ่นปริ้นในปริมาณที่เหมาะสมและไม่ต้องผสมน้ำ สิ่งที่ควรระวังคือ อุปกรณ์หรือวัสดุที่ใช้รองรับน้ำยากัดแผ่นปริ้นควรมีความเหมาะสม เพื่อความปลอดภัยขณะกัดแผ่นปริ้น

5.3.3 ในการทดลองนั้น ไม่แนะนำให้ทดลองกับอุปกรณ์เครื่องมือที่มีความล้ำสมัย หรือมีความเสียหายชำรุดจากการใช้งานที่มีระยะเวลานาน เพราะจะทำให้การทำงานในการวัดค่าและอ่านค่าเกิดความผิดพลาดได้ จึงควรใช้เครื่องมือที่มีความทันสมัย เพื่อประสิทธิภาพในการทดลอง

### 5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

เนื่องจากโครงการนี้ยังมีขอบเขตจำกัดในเรื่องของความแม่นยำที่ใช้ในการตรวจสอบ รวมทั้งความสะดวกในการเชื่อมต่อตัวป้อนในแต่ละตัว ดังนั้นหากต้องการที่จะเพิ่มความแม่นยำในการตรวจสอบให้มากยิ่งขึ้นไปอีก รวมทั้งมีความสะดวกสบายในการวัดค่า ต้องทำการออกแบบชิ้นงานแบบลำดับแถวให้มีความถี่ของสล็อตที่มากขึ้น เช่น 8x8 เป็นต้น อีกทั้งออกแบบให้สามารถนำสวิตซ์มาใช้ร่วมด้วยในการควบคุมการส่งคลื่นให้ออกตามพอร์ตต่างๆที่ต้องการ ซึ่งจะทำให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่มากยิ่งขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

YooJinKim , LuisJofre ,FrancoDeFlaviisandMaria Q. Feng

3D Microwave Imaging Technology For Damage Detection of Concrete Structures

<http://www.ece.uci.edu/rfmems/publications/papers/imaging/C066-SPIE03.pdf>

Yoo Jin Kim , Associate Member ASCE, Luis Jofre, Franco Flaviis and Maria Q. Feng, Associate Member ASCE

3D Microwave Imaging Technology Using Antenna Array For Damage Assessment Of Concrete Structure

<http://www.ece.uci.edu/rfmems/publications/papers/imaging/C081-ACES03.pdf>

<http://www.hobbyelec.com/article/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%81%E0%B8%9A%E0%B9%88%E0%B8%87%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%A0%E0%B8%97%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%80%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%AD%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A8>

<http://group.wunjun.com/pimchanok/topic/196658-5153>

<http://kruweerajit1.blogspot.com/p/jhkhkl.html>

[https://app.enit.kku.ac.th/mis/administrator/doc\\_upload/20110930025601.pdf](https://app.enit.kku.ac.th/mis/administrator/doc_upload/20110930025601.pdf)

<http://www.rtir.rmutt.ac.th/bitstream/123456789/379/1/110206.pdf>

<http://www.mindphp.com/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1/91-hosting/2202-bandwidth->

<http://www.mindphp.com/%E0%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B9%84%E0%B8%A3-hosting.html>

[http://www.tpa.or.th/tpanews/upload/mag\\_content/22/ContentFile258.pdf](http://www.tpa.or.th/tpanews/upload/mag_content/22/ContentFile258.pdf)

<http://www.repository.rmutt.ac.th/bitstream/handle/123456789/615/Design%20of%20triple-slot%20microstrip%20antenna%20for%20triple-band.pdf?sequence=3>

### ประวัติผู้เขียน

นายชรินทร์ เล้าเจริญ เกิดวันที่ 13 กันยายน 2535

ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 65 หมู่ 14 ตำบลหนองสาหร่าย อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา 30130

จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนปากช่อง ปีการศึกษา 2555

ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 30000

นางสาวพรอมา พิมพ์ศรี เกิดวันที่ 9 มีนาคม 2537

ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 492 หมู่ 15 ตำบลเสิงสาง อำเภอเสิงสาง จังหวัดนครราชสีมา 30330

จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนเสิงสาง ปีการศึกษา 2555

ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 30000

นางสาวสุพิชชา เลื่อมใสสุข เกิดวันที่ 9 มิถุนายน 2537

ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 467/3 หมู่ 1 ตำบลมิตรภาพ อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี 18180

จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนจุฬารัตน์ราชวิทยาลัยเพชรบุรี

และตอนปลายจากโรงเรียนมวกเหล็กวิทยา ปีการศึกษา 2555

ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 30000

## ภาคผนวก ก

### การออกแบบและการจำลองแบบ

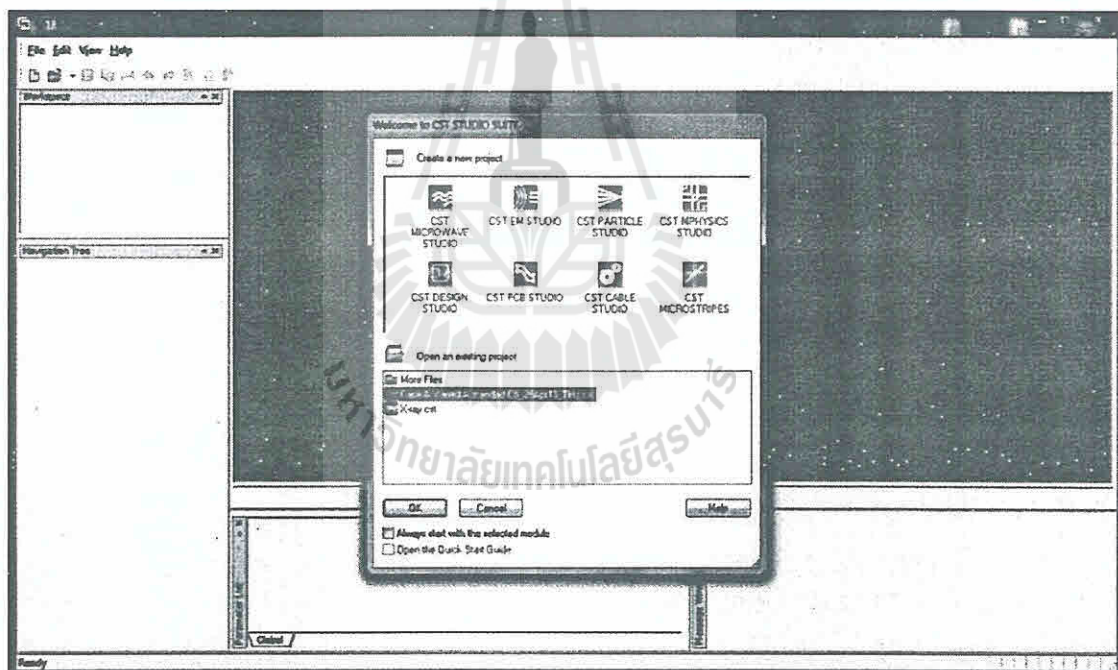
#### กล่าวนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการออกแบบชิ้นงานในโครงการที่ได้คำนวณมาในบทที่ 3 ซึ่งเป็นการคำนวณขนาดต่างๆของชิ้นงานและผลที่ได้รับจากการทดลองเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ต้องการ และสามารถนำไปใช้ต่อในการทดลองและใช้งานจริง

#### 1 การจำลองแบบโดยใช้ CST Microwave Studio

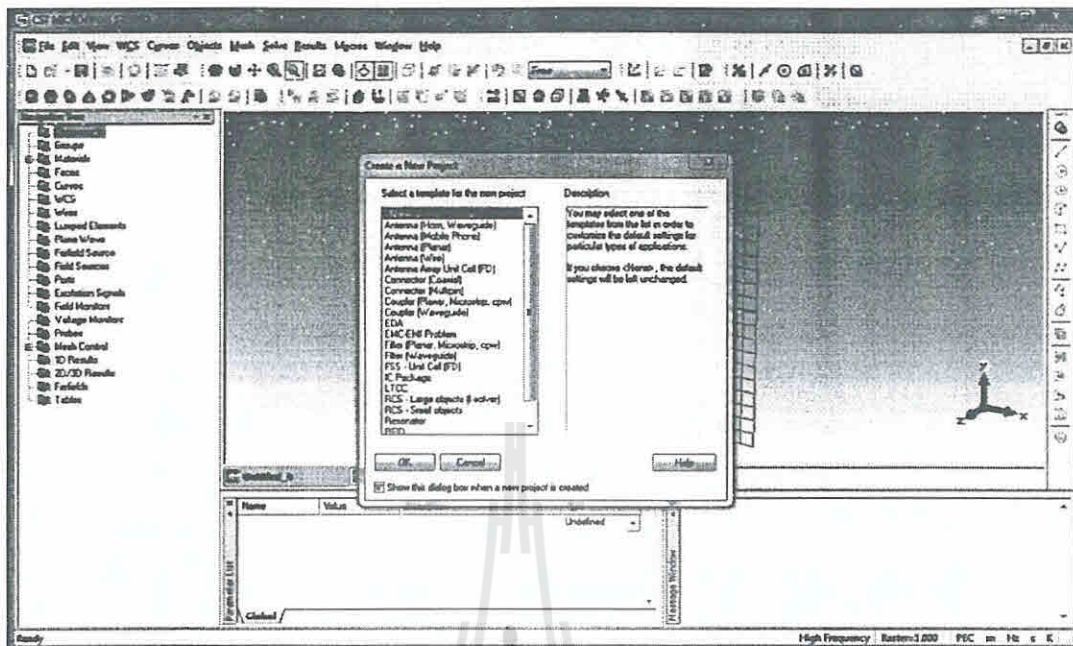
##### 1.1 สายอากาศแบบสล็อตขนาด 1 มิลลิเมตร

##### 1. สร้างสายอากาศแบบที่เราต้องการออกแบบ



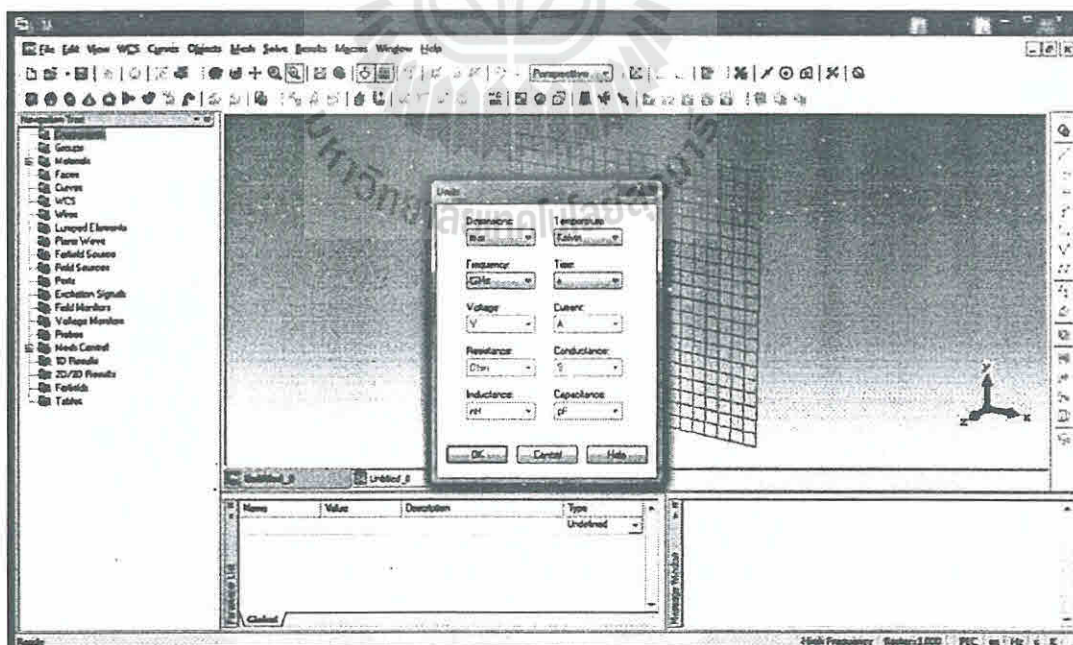
รูปที่ 6.1 เลือกประเภทชิ้นงานที่จะสร้าง

## 2. เลือกชนิดของสายอากาศ



รูปที่ 6.2 เลือกชนิดของสายอากาศ

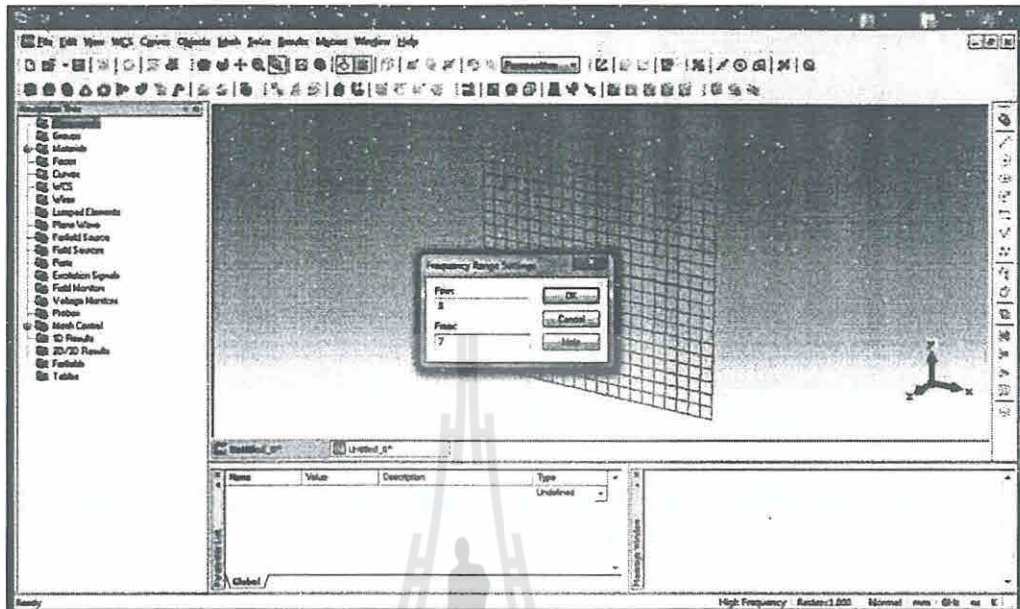
## 3. ตั้งค่าหน่วยต่างๆ ตามที่เราต้องการ



รูปที่ 6.3 ตั้งค่าหน่วยต่างๆ

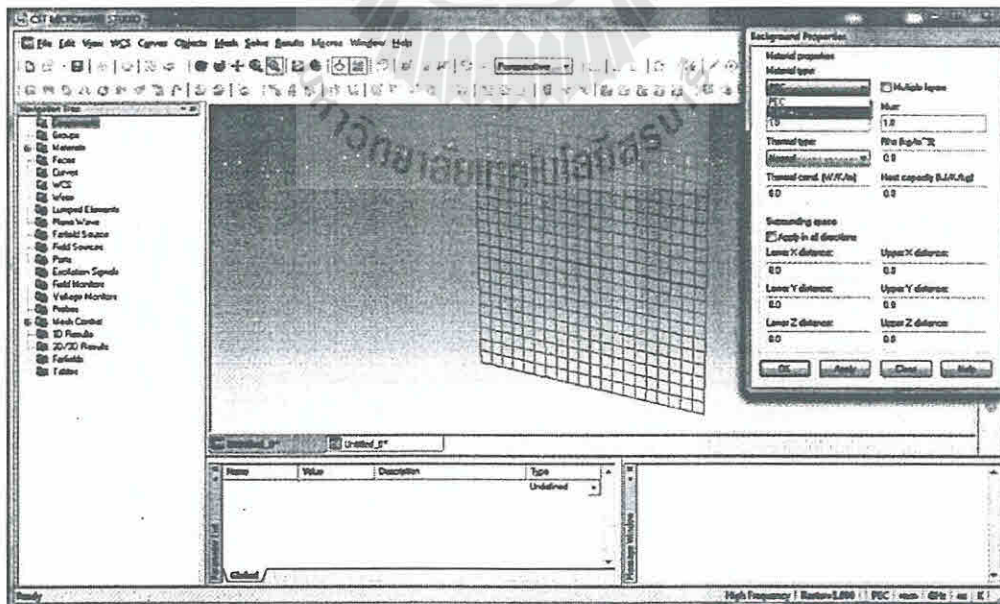


4. เลือกกระยะความถี่ที่ต้องเราการให้แสดง เช่น เราสนใจความถี่ที่ 5GHz จึงเลือกแสดงความถี่ให้อยู่ในระหว่าง 3 – 7 GHz



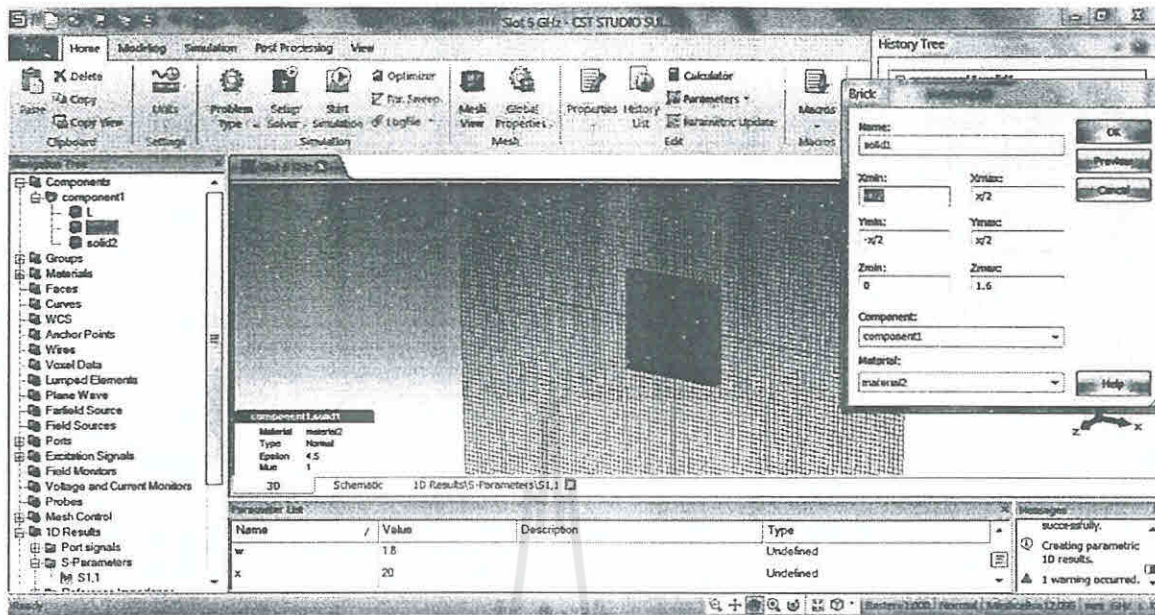
รูปที่ 6.4 การเลือก Frequency Range

5. กำหนดชนิดของวัสดุที่ใช้ในการสร้างชิ้นงาน



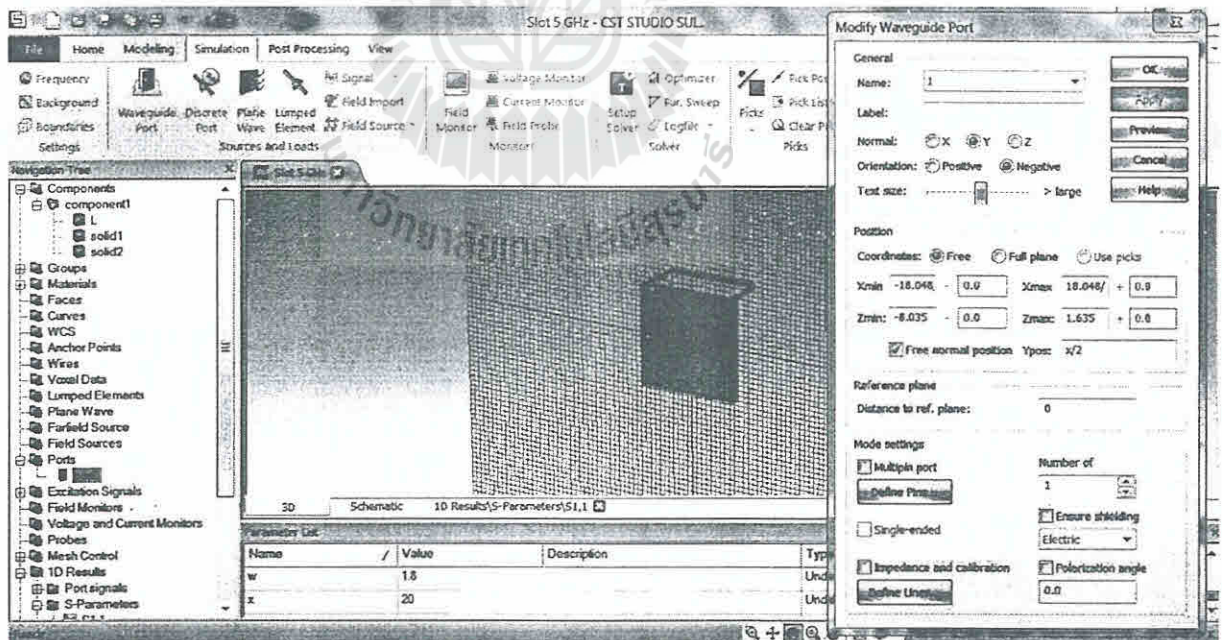
รูปที่ 6.5 กำหนดชนิดของวัสดุที่ใช้ในการสร้างชิ้นงาน

## 6. สร้างชิ้นงานตามที่เราได้คำนวณและทำการออกแบบไว้ ทั้งส่วนที่เป็น SLOT และระบบ FEED



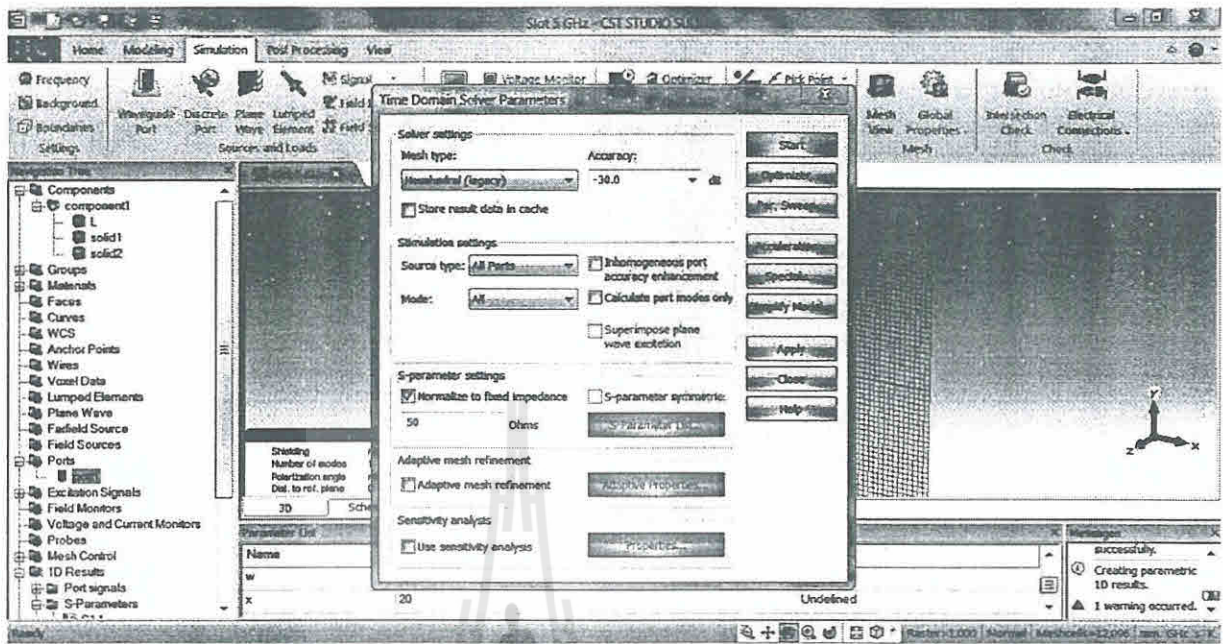
รูปที่ 6.6 การกำหนดค่าตัวแปรของแผ่นจับแสดง

## 7. สร้าง WaveguidePort ตามตำแหน่งที่เราคำนวณไว้ เพื่อที่เราจะได้ทดสอบการปล่อยคลื่น



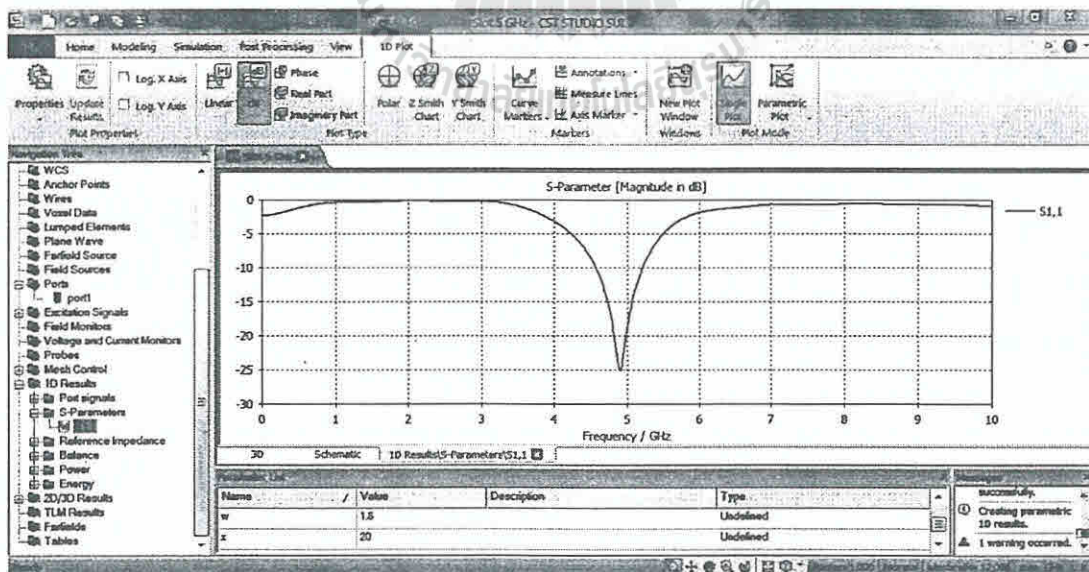
รูปที่ 6.7 สร้าง Waveguide Port

## 8. ทำการทดสอบ Simplify แบบ Normalize ที่ 50 โอห์ม



รูปที่ 6.8 การทดสอบ Simplify

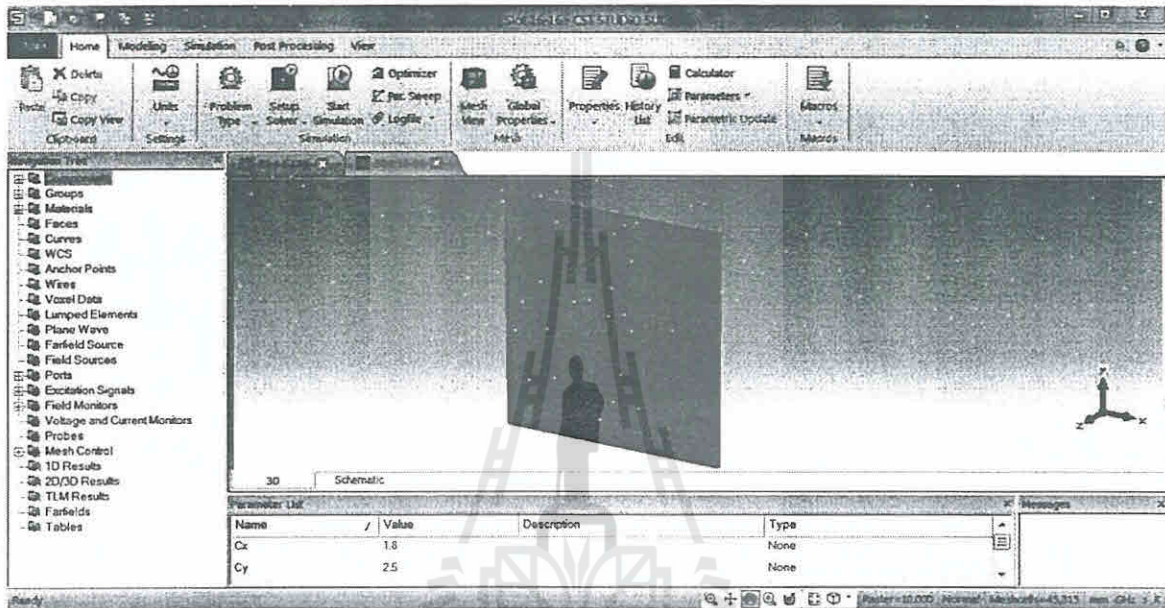
## 9. ค่า S-parameter Magnitude in dB ( $S_{11}$ ) ที่ความถี่ 5 GHz ได้ -25 dB ซึ่งมีย่านความถี่การทำงาน ตั้งแต่ 4.6 – 5.2 GHz



รูปที่ 6.9 ค่า S-parameter Magnitude in dB ( $S_{11}$ )

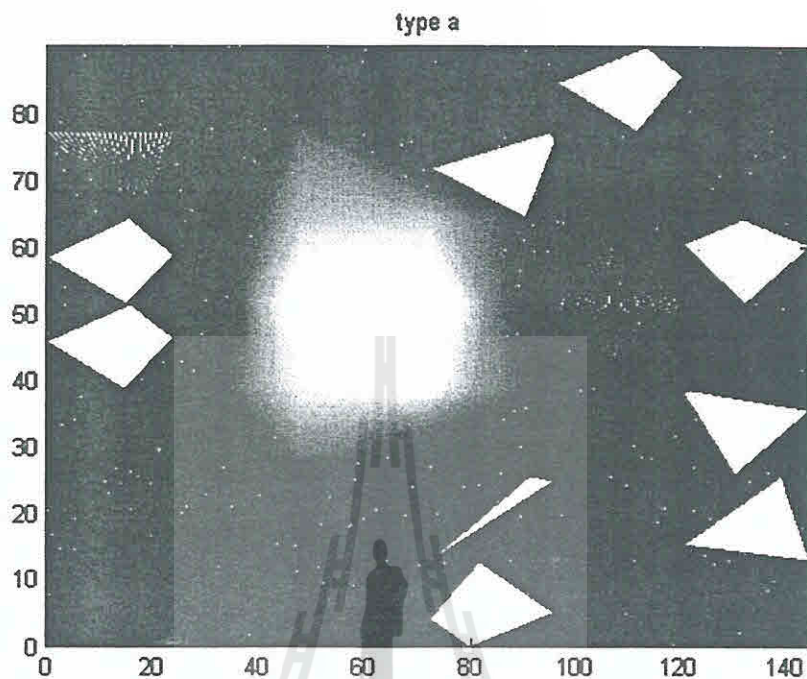
## 1.2 สายอากาศแบบสล็อตที่มีแฉวลำดับ 4x4

การออกแบบสายอากาศแบบสล็อตที่มีแฉวลำดับ 4x4 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบของวัตถุ โดยนำหลักการและรูปแบบ จากสายอากาศแฉวลำดับ 1 อีลีเมนต์ มาวิเคราะห์และออกแบบระบบป้อนใหม่ สำหรับสายอากาศแฉวลำดับ 4x4 เพื่อให้ได้ระบบที่มีการสูญเสียของคลื่นน้อยที่สุด



## ภาคผนวก ข

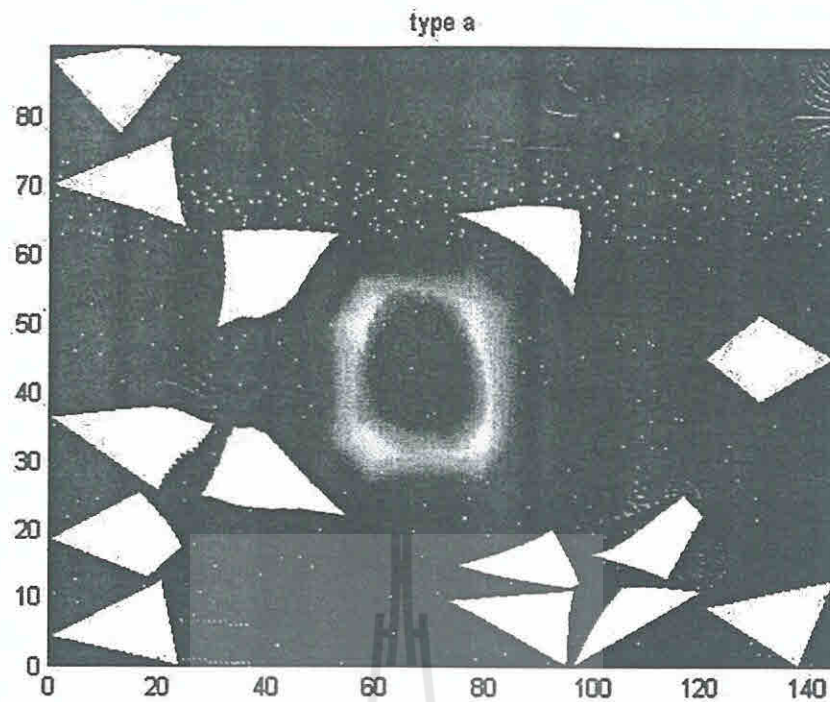
ภาพ 2 มิติ จากการทดสอบจริง



```
clear all
clc
x1=0:24:144;
y1=0:12.857:90;
[X,Y]=meshgrid(x,y);
```

```
Z= [-32.81 -32.12 -32.22 -33.58 -32.67 -32.18 -33.38
-32.67 -32.63 -32.13 -32.20 -32.08 -33.81 -33.15
-32.64 -32.70 -32.64 -33.95 -33.16 -32.06 -33.97
-31.19 -31.86 -33.53 -34.15 -33.91 -32.26 -32.03
-33.52 -32.93 -33.40 -33.93 -33.72 -32.20 -32.11
-34.18 -32.61 -33.36 -33.52 -32.78 -32.70 -32.09
-33.33 -33.58 -33.18 -32.43 -33.59 -32.65 -33.67
-32.86 -33.13 -32.86 -33.20 -32.58 -32.57 -33.77]
```

```
contour(x,y,Z,1000)
shadinginterp
colormaphot
title('type a')
xlabel('x axis (mm)')
ylabel('y axis (mm)')
zlabel('S21 (dB)')
```



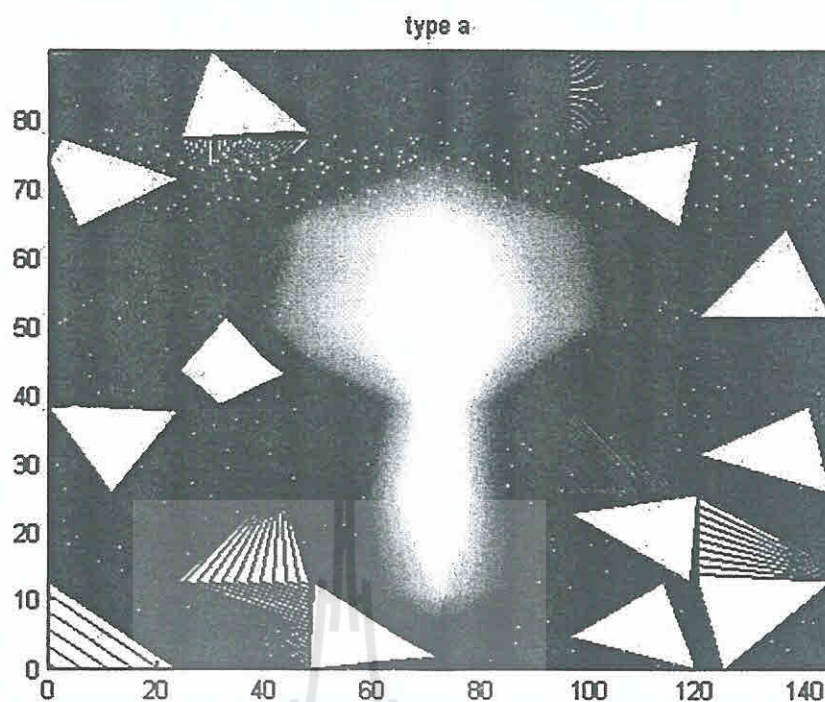
```

clear all
clc
x=0:24:144;
y=0:12.857:90;
[X,Y]=meshgrid(x,y);

Z = [ -31.05 -30.78 -30.86 -31.10 -31.18 -31.56 -31.23
      -31.26 -30.86 -31.34 -31.39 -31.13 -31.28 -31.05
      -31.27 -30.45 -30.53 -28.75 -31.32 -31.22 -31.24
      -31.49 -30.62 -28.32 -29.67 -28.53 -30.93 -30.57
      -31.08 -30.75 -28.21 -30.76 -28.92 -30.62 -30.98
      -30.94 -30.58 -31.33 -29.68 -30.62 -30.44 -30.70
      -31.12 -30.62 -31.10 -31.77 -30.78 -30.74 -30.83
      -31.43 -31.35 -31.27 -30.97 -30.93 -31.25 -30.95]

contour(x,y,Z,1000)
shadinginterp
colormaphot
title('type a')
xlabel('x axis (mm)')
ylabel('y axis (mm)')
zlabel('S21 (dB)')

```



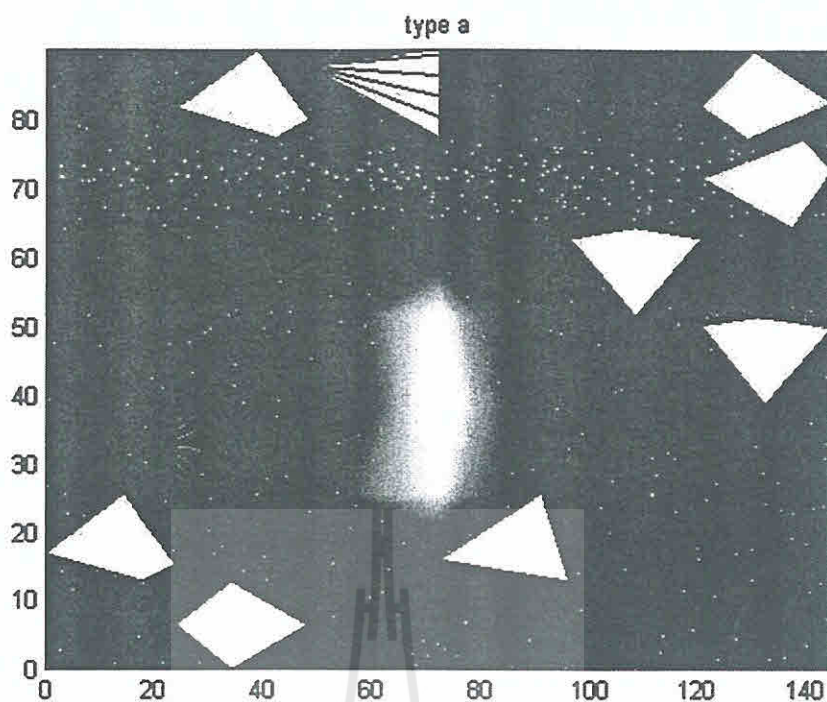
```

clear all
clc
x1=0:24:144;
y1=0:12.857:90;
[X1,Y1]=meshgrid(x1,y1);

Z= [-45.32 -45.33 -45.76 -45.97 -45.97 -45.82 -46.29
-45.33 -45.78 -45.80 -44.71 -45.57 -45.91 -45.91
-44.99 -45.64 -45.84 -44.39 -45.98 -45.89 -45.81
-45.31 -45.28 -45.96 -44.42 -45.92 -45.71 -45.83
-45.52 -45.83 -44.92 -44.33 -44.87 -45.50 -45.50
-45.77 -45.97 -44.80 -44.48 -44.98 -45.69 -45.40
-45.83 -45.69 -45.64 -45.14 -45.86 -45.59 -45.40
-44.91 -45.52 -46.22 -45.58 -45.93 -46.16 -45.36]

figure(1)
contour(x1,y1,Zar,1000)
shadinginterp
colormaphot
title('type a')
xlabel('x axis (mm)')
ylabel('y axis (mm)')
zlabel('S21 (dB)')

```



```

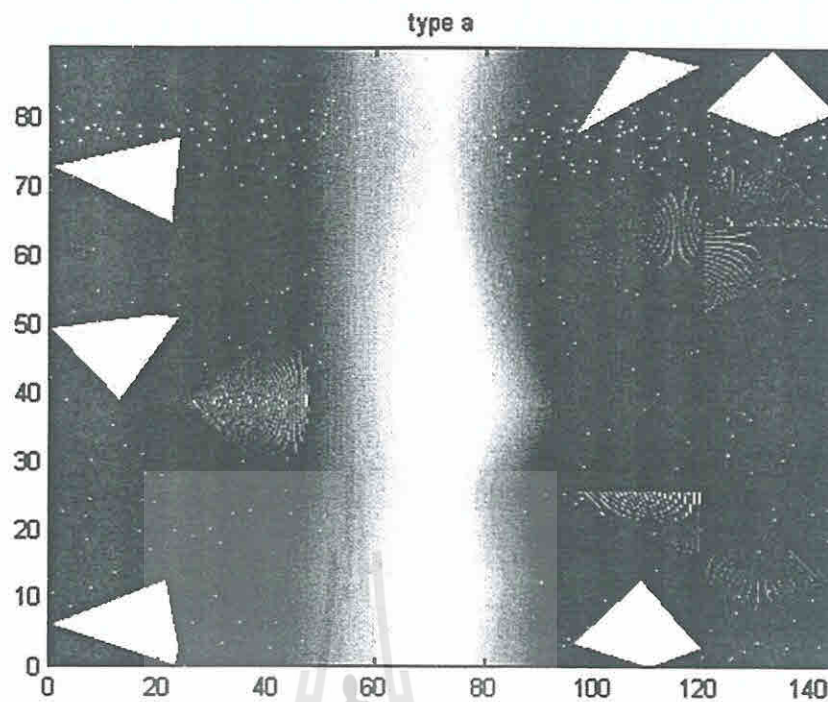
clear all
clc
x1=0:24:144;
y1=0:12.857:90;
[X1,Y1]=meshgrid(x1,y1);

Z= [-30.03 -29.93 -29.57 -29.67 -28.88 -29.79 -29.27
-29.73 -29.63 -29.98 -29.92 -29.49 -29.51 -29.64
-29.90 -29.86 -28.92 -28.16 -29.85 -29.62 -29.95
-29.75 -29.45 -29.82 -27.83 -29.69 -28.79 -30.17
-29.56 -30.15 -29.18 -28.04 -29.67 -29.84 -29.44
-29.93 -29.58 -29.83 -29.51 -29.80 -29.87 -29.64
-28.89 -29.36 -29.74 -29.38 -29.58 -30.06 -29.78
-29.16 -30.19 -29.29 -29.87 -29.63 -29.47 -30.15]

figure(1)
contour(x1,y1,Zar,1000)
shadinginterp
colormaphot
title('type a')
xlabel('x axis (mm)')
ylabel('y axis (mm)')
zlabel('S21 (dB)')

```





```

clear all
clc
x1=0:24:144;
y1=0:12.857:90;
[X,Y]=meshgrid(x,y);

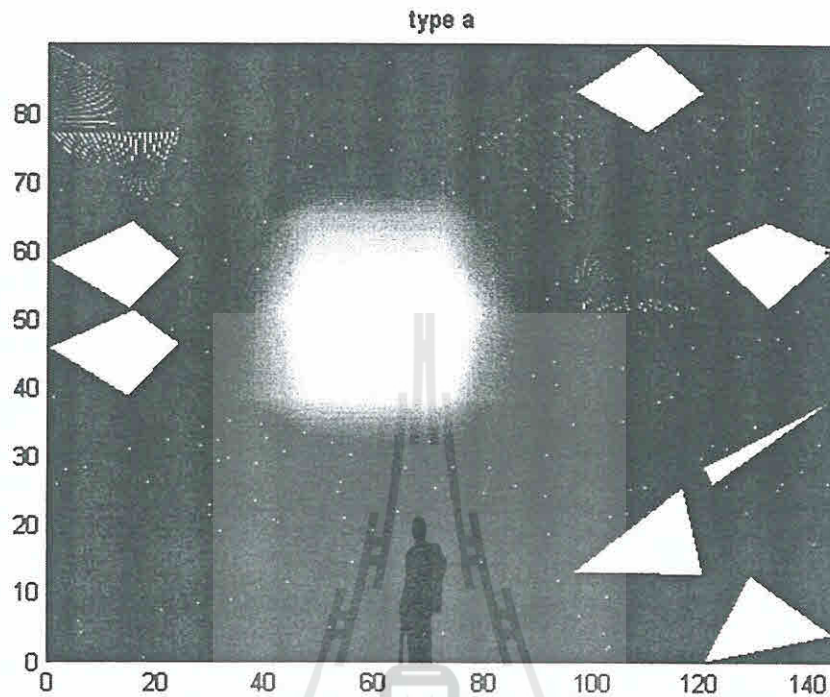
Z= [-53.77 -53.27 -53.97 -55.47 -53.45 -54.02 -53.09
-53.09 -53.15 -53.40 -55.21 -53.87 -53.34 -53.43
-53.11 -53.31 -54.09 -55.11 -53.20 -52.93 -53.12
-53.02 -53.50 -54.10 -55.23 -53.23 -52.53 -52.23
-51.52 -52.43 -53.33 -55.11 -53.54 -52.31 -53.27
-52.20 -52.76 -53.60 -55.22 -53.25 -52.72 -52.62
-51.83 -52.71 -53.42 -55.42 -53.90 -52.48 -53.15
-51.25 -52.47 -53.42 -55.33 -53.22 -51.90 -53.58]

contour(x,y,Z,1000)
shadinginterp
colormaphot
title('type a')
xlabel('x axis (mm)')
ylabel('y axis (mm)')
zlabel('S21 (dB)')

```

## ภาคผนวก ค

ภาพ 2 มิติ จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio



```
clear all
```

```
clc
```

```
x1=0:24:144;
```

```
y1=0:12:857:90;
```

```
[X1,Y1]=meshgrid(x1,y1);
```

```
Z= [-34.64 -33.26 -33.22 -33.28 -33.22 -34.25 -34.60
    -34.83 -34.84 -33.53 -34.30 -34.56 -33.49 -34.84
    -33.99 -33.70 -32.79 -32.59 -33.22 -33.79 -33.27
    -33.20 -33.36 -31.40 -31.35 -32.76 -34.28 -34.81
    -33.86 -34.23 -31.40 -31.23 -33.52 -33.34 -34.87
    -33.26 -33.57 -33.15 -33.08 -33.18 -34.79 -34.58
    -33.27 -33.78 -34.78 -34.53 -33.69 -34.25 -33.64
    -34.86 -34.63 -33.26 -33.89 -33.28 -33.23 -34.54]
```

```
figure(1)
```

```
contour(x1,y1,Zar,1000)
```

```
shadinginterp
```

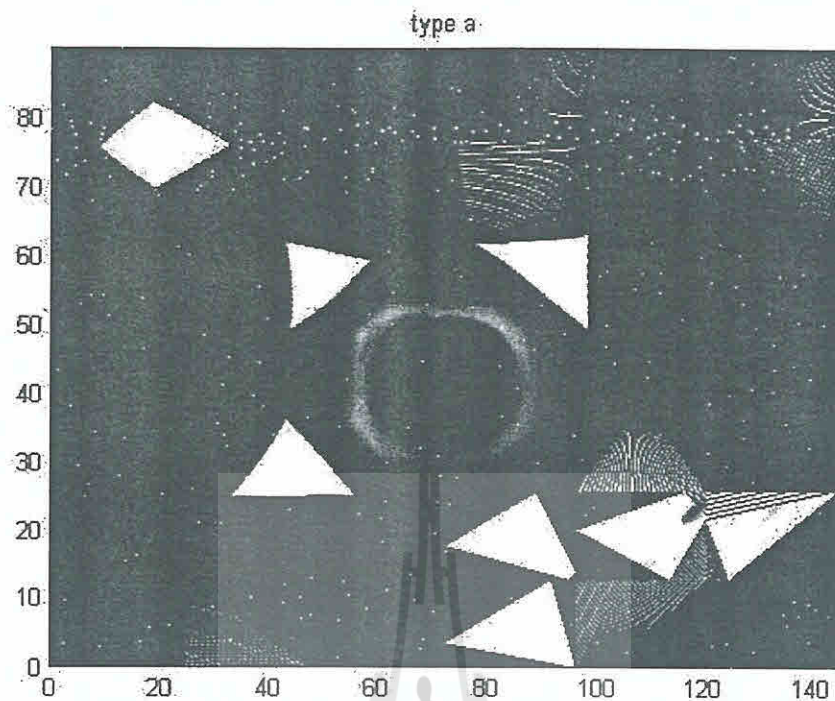
```
colormapphot
```

```
title('type a')
```

```
xlabel('x axis (mm)')
```

```
ylabel('y axis (mm)')
```

```
zlabel('S21 (dB)')
```



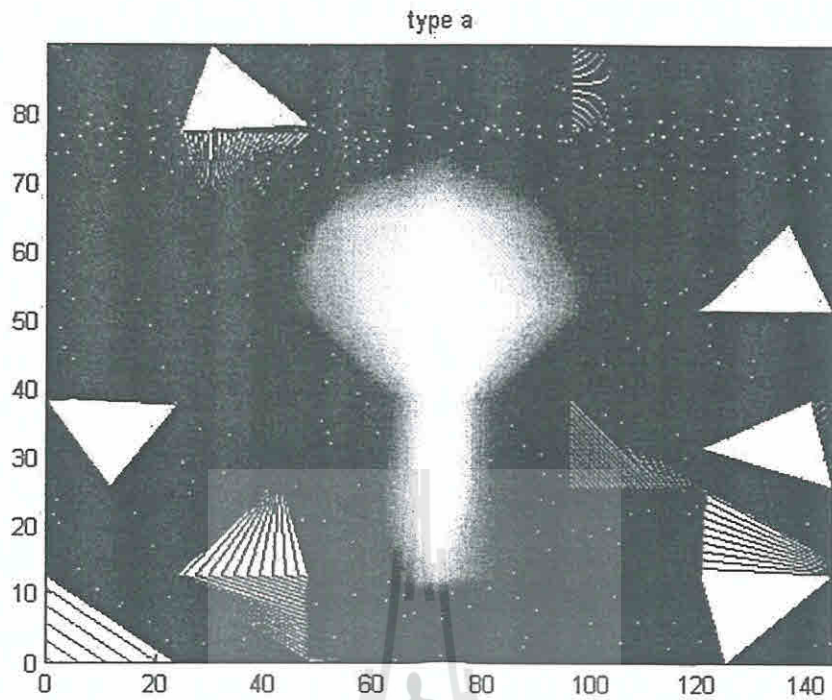
```

clear all
clc
x=0:24:144;
y=0:12.857:90;
[X,Y]=meshgrid(x,y);

Z = [ -31.05 -30.78 -30.86 -31.10 -31.18 -31.56 -31.23
      -31.26 -30.86 -31.34 -31.39 -31.13 -31.28 -31.05
      -31.27 -30.45 -30.53 -29.75 -31.32 -31.22 -31.24
      -31.49 -30.62 -28.32 -28.67 -28.53 -30.93 -30.57
      -31.08 -30.75 -28.21 -30.76 -28.92 -30.62 -30.98
      -30.94 -30.58 -31.33 -29.68 -30.62 -30.44 -30.70
      -31.12 -30.62 -31.10 -30.77 -30.78 -30.74 -30.83
      -31.43 -31.35 -31.27 -30.97 -30.93 -31.25 -30.95]

contour(x,y,Z,1000)
shadinginterp
colormaphot
title ('type a')
xlabel('x axis (mm)')
ylabel('y axis (mm)')
zlabel('S21 (dB)')

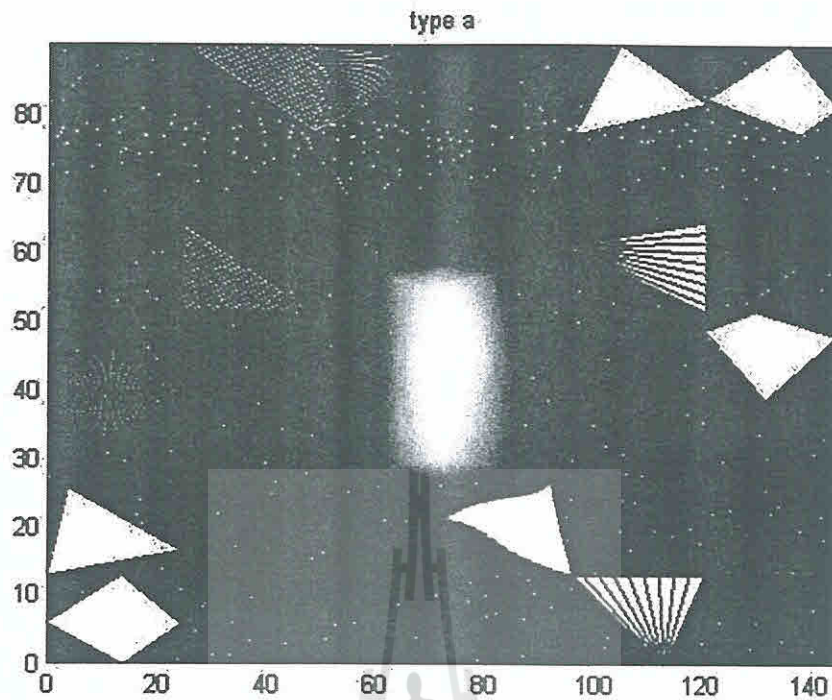
```



```
clear all
clc
x1=0:24:144;
y1=0:12.857:90;
[X1,Y1]=meshgrid(x1,y1);

Z = [-53.77 -54.27 -53.37 -52.47 -53.35 -54.12 -54.09
     -54.09 -54.15 -53.30 -52.41 -53.37 -54.34 -54.43
     -54.11 -54.31 -53.39 -52.21 -53.30 -54.93 -54.12
     -54.02 -54.50 -53.30 -52.33 -53.33 -54.53 -54.23
     -54.52 -54.43 -53.23 -52.31 -53.34 -54.31 -54.27
     -54.20 -54.76 -53.20 -52.32 -53.35 -54.72 -54.62
     -54.83 -54.71 -53.22 -52.42 -53.20 -54.48 -54.15
     -54.25 -54.47 -53.22 -52.33 -53.32 -54.98 -53.58]
```

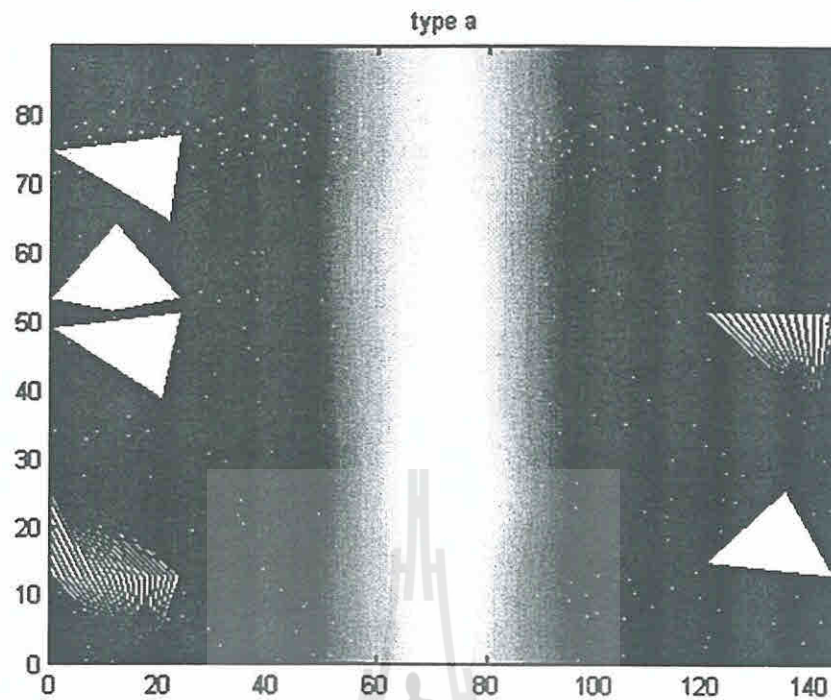
```
figure(1)
contour(x1,y1,Zar,1000)
shadinginterp
colormaphot
title('type a')
xlabel('x axis (mm)')
ylabel('y axis (mm)')
zlabel('S21 (dB)')
```



```
clear all
clc
x1=0:24:144;
y1=0:12.857:90;
[X1,Y1]=meshgrid(x1,y1);

Z = [-30.03 -29.93 -29.57 -29.67 -28.88 -29.79 -29.27
     -29.73 -29.63 -29.98 -29.92 -29.49 -29.51 -29.64
     -29.90 -29.86 -28.92 -28.16 -29.85 -29.62 -29.95
     -29.75 -29.75 -29.82 -27.93 -29.69 -28.79 -30.17
     -29.56 -30.15 -29.18 -28.04 -29.67 -29.84 -29.44
     -29.93 -29.58 -29.83 -29.51 -29.80 -29.87 -29.64
     -29.89 -30.36 -29.74 -29.38 -29.58 -30.06 -29.78
     -29.66 -30.19 -29.29 -29.87 -29.63 -29.47 -30.15];
```

```
figure(1)
contour(x1,y1,Zar,1000)
shadinginterp
colormaphot
title('type a')
xlabel('x axis (mm)')
ylabel('y axis (mm)')
zlabel('S21 (dB)')
```

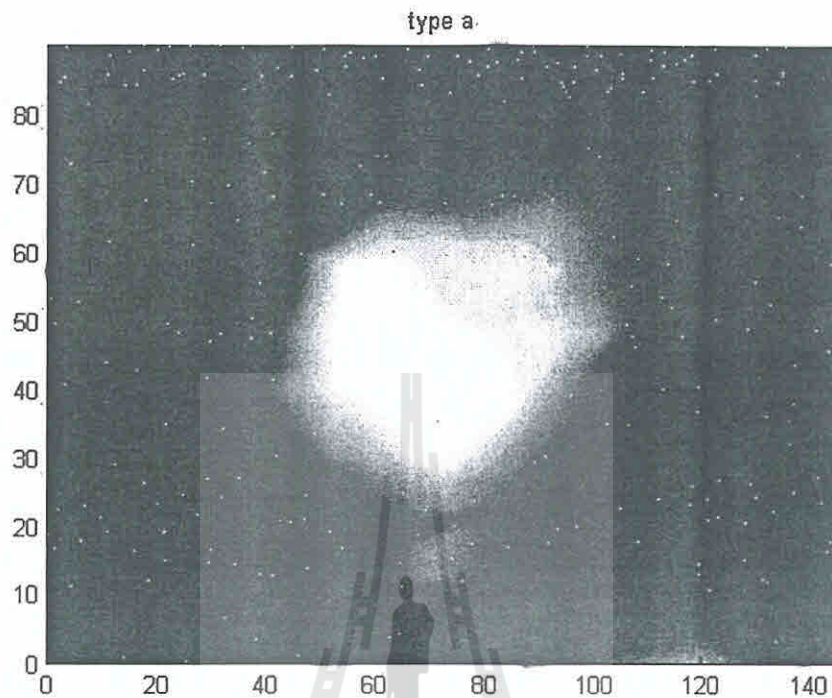


```
clearall
clc
x1=0:24:144;
y1=0:12.857:90;
[X1,Y1]=meshgrid(x1,y1);

Z = [-45.32 -45.33 -45.76 -45.97 -45.97 -45.82 -46.29
     -45.33 -45.78 -45.80 -44.71 -45.57 -45.91 -45.91
     -44.99 -45.64 -45.84 -44.39 -45.98 -45.89 -45.81
     -45.31 -45.28 -45.96 -44.42 -45.92 -45.71 -45.83
     -45.52 -45.83 -44.92 -44.33 -44.87 -45.50 -45.50
     -45.77 -45.97 -44.80 -44.48 -44.98 -45.69 -45.40
     -45.83 -45.69 -45.64 -45.14 -45.86 -45.59 -45.40
     -44.91 -45.52 -46.22 -45.58 -45.93 -46.16 -45.36]
```

```
figure(1)
contour(x1,y1,Zar,1000)
shadinginterp
colormaphot
title('type a')
xlabel('x axis (mm)')
ylabel('y axis (mm)')
zlabel('S21 (dB)')
```

ภาพ 2 มิติ จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio (สายอากาศ 256 ตัว)



```
clearall
clc
x=0:24:144;
y=0:12.857:90;
[X,Y]=meshgrid(x,y);
```

```
Z= [-30.97 -32.96 -32.71 -32.37 -31.72 -31.03 -32.92 -33.37 -33.72 -
31.18 -33.84 -32.53 -33.60 -32.33 -33.14 -32.74
-31.50 -31.46 -31.53 -32.81 -32.81 -31.12 -32.36 -32.88 -33.34
-33.79 -32.36 -33.51 -33.16 -33.75 -33.12 -33.89
-32.56 -33.06 -32.33 -33.68 -31.71 -31.73 -32.30 -32.41 -33.69
-31.06 -32.95 -32.33 -33.99 -32.42 -31.84 -32.38
-31.36 -31.64 -31.11 -31.53 -31.79 -31.58 -31.69 -31.05 -32.39
-33.49 -33.78 -32.52 -33.03 -32.23 -32.08 -34.66
-31.14 -32.24 -31.66 -32.44 -31.97 -31.21 -31.16 -32.71 -31.27
-33.59 -33.35 -33.01 -32.98 -33.61 -32.57 -32.52
-32.37 -31.24 -31.65 -31.25 -31.00 -31.75 -32.38 -31.21 -31.65
-31.35 -31.28 -30.63 -32.38 -33.15 -33.17 -31.69
-32.83 -32.79 -33.71 -32.73 -31.89 -32.53 -32.70 -31.76 -31.08
-32.20 -31.57 -31.00 -32.35 -32.87 -31.90 -33.06
-31.53 -31.32 -31.82 -31.29 -31.75 -32.01 -31.63 -31.64 -31.06
-32.47 -31.06 -33.26 -31.70 -33.91 -32.98 -33.63
-31.58 -32.50 -33.31 -31.64 -32.00 -31.22 -31.70 -31.77 -32.13
-32.32 -32.04 -31.48 -32.99 -31.25 -33.24 -32.84
-32.21 -32.13 -32.58 -31.50 -31.29 -31.68 -31.18 -31.57 -32.45
-32.55 -32.34 -31.70 -31.15 -32.38 -32.40 -31.79
-33.07 -33.44 -32.52 -32.00 -32.48 -31.89 -31.42 -31.32 -31.83
-32.21 -32.31 -31.92 -33.10 -32.14 -32.53 -32.57
```

```

-33.02 -32.10 -30.96 -32.88 -32.02 -31.46 -31.52 -31.17 -31.79
-34.95 -32.31 -31.05 -31.00 -32.24 -33.33 -32.37
-32.91 -31.63 -33.48 -33.82 -31.12 -33.66 -32.11 -32.47 -32.57
-31.14 -32.49 -32.61 -33.88 -31.78 -33.27 -32.61
-32.71 -32.72 -31.93 -32.07 -32.07 -31.06 -31.02 -31.66 -32.75
-32.47 -32.23 -33.75 -33.41 -32.05 -34.08 -32.97
-32.94 -31.76 -31.61 -33.21 -32.25 -33.43 -31.76 -32.11 -31.60
-33.00 -32.85 -33.26 -33.27 -31.59 -31.89 -32.86
-32.08 -32.57 -32.75 -33.43 -31.58 -32.85 -31.55 -32.77 -31.69
-32.15 -33.69 -33.66 -33.97 -33.47 -34.10 -33.27]

```

figure

```

contour(x,y,Z,1000)
shadinginterp
colormaphot
title('type a')
xlabel('x axis (mm)')
ylabel('y axis (mm)')
zlabel('S21 (dB)')

```

