

รหัสโครงการ SUT7-709-53-12-30



## รายงานการวิจัย

# สายอากาศสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยใช้สายอากาศร่องแบบเรียว (Wireless LAN Antenna using Tapered Slot Antenna)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

# สายอากาศสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยใช้สายอากาศร่องแบบเรียว (Wireless LAN Antenna using Tapered Slot Antenna)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาวเกกทัตธา คำพิกุล

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ตุลาคม 2553

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถดำเนินการได้ และได้รับผลสำเร็จบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้  
ทุกประการ โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2553  
สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวเกวณัฐรา คำพิกุล ผู้ร่วมวิจัยซึ่งช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง  
ด้วยดี

รังสรรค์ วงศ์สรรค์

## บทคัดย่อ

สำหรับการเข้าใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายในปัจจุบัน จะมีจุดเข้าถึง (Access Point : AP) เป็นอุปกรณ์ที่อำนวยความสะดวกในการเข้าถึงเครือข่าย ซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดกระจายสัญญาณและเชื่อมต่ออุปกรณ์ไร้สายเข้าด้วยกันจุดเข้าถึงที่ใช้งานในปัจจุบันนี้เป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีการผลิตภายในประเทศ จึงไม่สามารถพัฒนาเทคโนโลยีได้มากเท่าที่ควร ดังนั้นสายอากาศจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับจุดเข้าถึงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายให้มากขึ้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบและสร้างสายอากาศร่องแบบเรียว (Tapered Slot Antenna : TSA) ที่มีความกว้างแถบครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 6 GHz ซึ่งสามารถรองรับระบบการสื่อสารแบบไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 a/b/g ได้โดยใช้สายอากาศเพียงตัวเดียว และได้นำสายอากาศร่องแบบเรียวมาทำการจัดแถวลำดับแบบวงกลม (circular array) เพื่อเพิ่มอัตราขยาย และเพื่อให้สายอากาศมีคุณลักษณะเช่นเดียวกับสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (omnidirectional antenna) จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานในเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายภายในอาคารขนาดใหญ่ สวนสาธารณะ หรือใช้สำหรับการเชื่อมโยงแบบจุดต่อหลายจุด โดยได้ทำการจำลองผลสายอากาศแถวลำดับด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST (Computer Simulation Technology) จากนั้นทำการสร้างสายอากาศแถวลำดับต้นแบบเพื่อนำไปวัดทดสอบคุณลักษณะเปรียบเทียบกับผลการจำลองผลที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป CST ต่อไป

## **Abstract**

Nowadays, for connect to Wireless Local Area Network (WLAN), the users can conveniently connect to the system via an access point (AP), equipment acting as a signal dispersion and connection point. Currently, equipments for the access points cannot be manufactured domestically resulting in few technology developments. Therefore, an antenna is considered as another option that can be applied with the access point to increase the WLAN's efficiency. In this research, a design and creation of Tapered Slot Antenna (TSA) were proposed with a bandwidth covered frequency ranges from 2 GHz to 6 GHz so as to support the wireless communication system according to the IEEE 802.11 a/b/g. A circular array antenna was arranged from only one Tapered Slot Antenna to increase gain and obtain the antenna with the similar characteristics as the omnidirectional antenna so it can be suitably used for the WLAN application in large buildings, public parks, or for point-to-multipoint interfaces. For analysis and design, CST (Computer Simulation Technology) program is utilized in this research for simulation array antenna. Then the array antenna will be realized and experimented to validate the CST program and the developing analysis tool.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ .....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ .....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย .....	3
ขอบเขตของการวิจัย .....	3
สมมุติฐานของการวิจัย.....	3
วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล.....	3
ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ปรัชญ์นั้วรรณกรรม	
ปรัชญ์นั้วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
สรุป .....	7
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
สายอากาศร่องแบบรีว.....	8
สรุป .....	16
บทที่ 4 การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศ	
ศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองสายอากาศร่องแบบรีว	
ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST.....	17
ศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองสายอากาศแถวลำดับวงกลม	
โดยใช้ร่องแบบรีวด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST .....	29
สรุป .....	45

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 ผลการวัดทดสอบ	
วิธีการสร้างสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ.....	46
ผลการวัดทดสอบตัวแบ่งกำลังงาน .....	48
ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความกว้างแถบ .....	53
ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน .....	56
ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์.....	60
ผลการวัดทดสอบอัตราขยาย.....	62
สรุป .....	67
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
บทสรุป .....	68
ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา .....	69
รายการอ้างอิง .....	71
ประวัติผู้วิจัย .....	75

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์อ้างอิงของสายอากาศร่องแบบเรียว.....	12
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศร่องแบบเรียวต้นแบบ .....	25
ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราขยายจากผลการจำลองสายอากาศร่องแบบเรียวต้นแบบ .....	26
ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราขยายจากผลการจำลองสายอากาศแถวลำดับวงกลม.....	30
ตารางที่ 4.4 ค่าอัตราขยายจากผลการจำลองสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีตัวสะท้อน อะลูมิเนียมรูปทรงต่าง ๆ.....	32
ตารางที่ 4.5 ค่าอัตราขยายจากผลการจำลองสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีแผ่นอะลูมิเนียม ปิดด้านบนและล่าง และมีตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงต่าง ๆ .....	37
ตารางที่ 4.6 ค่าอัตราขยายจากผลการจำลองของสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีตัวสะท้อน อะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกระหว่างมีและไม่มีแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบน และล่าง.....	41
ตารางที่ 5.1 ค่าอัตราขยายของสายอากาศร่องแบบเรียวหนึ่งอิลิเมนต์.....	65
ตารางที่ 5.2 ค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ .....	66
ตารางที่ 5.3 ค่าอัตราขยายจากผลการวัดทดสอบของสายอากาศร่องแบบเรียวหนึ่งอิลิเมนต์ และสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ .....	66
ตารางที่ 6.1 คุณลักษณะสมบัติของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ .....	69



## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 การประยุกต์ใช้งานสายอากาศแถวลำดับวงกลมโดยใช้ร่องแบบเรียว.....	2
รูปที่ 2.1 สายอากาศร่องแบบเรียวรูปแบบต่าง ๆ .....	6
รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศร่องแบบเรียว.....	9
รูปที่ 3.2 เทคนิคการป้อนกำลังงานให้แก่สายอากาศร่องแบบเรียว .....	14
รูปที่ 3.3 การป้อนกำลังงานด้วยเส้นไมโครสตริป .....	15
รูปที่ 3.4 รูปร่างมาตรฐานในการจัดแถวดับของสายอากาศร่องแบบเรียว.....	15
รูปที่ 3.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศร่องแบบเรียว .....	16
รูปที่ 3.6 รูปร่างของแถวลำดับแบบวงกลม.....	16
รูปที่ 4.1 ผลจากการจำลองสายอากาศร่องแบบเรียวด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST .....	18
รูปที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า $A_f$ .....	19
รูปที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า $F_w$ .....	20
รูปที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า $L_g$ .....	21
รูปที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า $R_a$ .....	22
รูปที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อทำการปรับมาตราส่วน ของสายอากาศ .....	23
รูปที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า $H$ .....	24
รูปที่ 4.8 ผลจากการจำลองสายอากาศร่องแบบเรียวต้นแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST .....	26
รูปที่ 4.9 แบบจำลองสายอากาศแถวลำดับวงกลม .....	29
รูปที่ 4.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีระยะในการจัดแถวลำดับ เท่ากับ 183.67 มิลลิเมตร จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST .....	31
รูปที่ 4.11 สายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงต่าง ๆ .....	33
รูปที่ 4.12 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีตัวสะท้อนอะลูมิเนียม รูปทรงกระบอกจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST .....	35
รูปที่ 4.13 แบบสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่าง และตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงต่าง ๆ .....	37
รูปที่ 4.14 ผลการจำลองสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST .....	39
รูปที่ 4.15 ผลจากการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลม .....	42

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.1 โปรแกรม AutoCAD 2008 กำหนดการกัดและตัดแผ่น PCB.....	47
รูปที่ 5.2 โปรแกรม CorelDRAW 9 กำหนดการตัดแผ่น PCB.....	47
รูปที่ 5.3 สายอากาศที่สร้างขึ้น.....	48
รูปที่ 5.4 ตัวแบ่งกำลังงาน .....	49
รูปที่ 5.5 คำสั่งประสิทธิภาพสะท้อนกลับตัวแบ่งกำลังงาน.....	50
รูปที่ 5.6 ผลการวัดทดสอบของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ.....	54
รูปที่ 5.7 ผลการวัดทดสอบและการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ของสายอากาศ แถวลำดับวงกลมต้นแบบ .....	55
รูปที่ 5.8 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน .....	56
รูปที่ 5.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบจากการจำลองผล ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัดทดสอบ.....	57
รูปที่ 5.10 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าจากการวัดทดสอบ .....	60
รูปที่ 5.11 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศร่องแบบรีวหนึ่งอิลิเมนต์.....	62
รูปที่ 5.12 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ .....	64

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ปัจจุบันระบบการสื่อสารแบบไร้สายนับได้ว่าเป็นมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากผู้ใช้งานสามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบเครือข่ายจากพื้นที่ใดก็ได้ที่อยู่ในรัศมีของสัญญาณ ทำให้ผู้ใช้งานได้รับความสะดวกมากขึ้นในการเชื่อมต่อเครือข่าย จากข้อดีของระบบการสื่อสารแบบไร้สายดังกล่าว ส่งผลให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสารแบบไร้สายอย่างกว้างขวาง และเทคโนโลยีหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างสูงในขณะนี้คือ ระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (Wireless Local Area Network หรือ WLAN) ซึ่งเป็นระบบเชื่อมโยงระหว่างคอมพิวเตอร์หรือเครือข่ายคอมพิวเตอร์เข้าด้วยกันหรือเป็นการเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต ด้วยคลื่นวิทยุ (Radio Frequency: RF) แทนการใช้สายเคเบิลในการรับส่งข้อมูล สายอากาศนับเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญในระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย เนื่องจากสายอากาศจะทำหน้าที่ในการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าออกไป โดยมีอากาศเป็นตัวกลาง ซึ่งสามารถแบ่งสายอากาศออกตามการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณได้ 2 แบบ คือ สายอากาศแบบมีทิศทางหรือเจาะจงทิศทาง (directional antenna) และสายอากาศแบบรอบทิศทาง (omnidirectional antenna) สำหรับสายอากาศแบบมีทิศทาง จะมีลักษณะการกระจายคลื่นในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น ทำให้ผู้ใช้งานสามารถบังคับหรือเจาะจงทิศทางการรับส่งคลื่นได้ตามที่ต้องการ สายอากาศประเภทนี้จึงเหมาะสำหรับการใช้งานภายนอกอาคาร ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุด (point-to-point) และสายอากาศแบบรอบทิศทางเป็นสายอากาศที่มีลักษณะการกระจายของคลื่นรอบ ๆ สายอากาศ โดยคลื่นจะถูกแพร่กระจายออกไปทุกทิศทาง เหมาะสำหรับการใช้งานภายในอาคาร หรือใช้สำหรับการเชื่อมโยงแบบจุดไปหลายจุด (point-to-multipoint) โดยส่วนมากแล้วสายอากาศแบบรอบทิศทางที่ใช้งานทั่วไป จะเป็นสายอากาศไดโพลเส้นตรง (linear dipole antenna) ซึ่งมีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรง หักง่าย กำลังขยายต่ำ และมีความกว้างแถบ (bandwidth) ที่แคบ ไม่ครอบคลุมทุกช่วงความถี่ของระบบการสื่อสารแบบไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 b/g (Wi-Fi) ที่ความถี่ 2.45 GHz และมาตรฐาน IEEE 802.11 a ที่ความถี่ 5.25 GHz และ 5.8 GHz จากข้อจำกัดดังกล่าวสายอากาศร่องแบบเรียว (Tapered Slot Antenna หรือ TSA) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายสำหรับใช้งานภายในอาคาร หรือสวนสาธารณะ ที่ต้องการความกว้างแถบครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 6 GHz ซึ่งสามารถรองรับระบบการสื่อสารแบบไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 a/b/g ได้ โดยใช้สายอากาศเพียงตัวเดียว และได้นำสายอากาศร่องแบบเรียวมาทำการจัดแถวลำดับเพื่อเพิ่มอัตราขยาย และความกว้างลำคลื่น (beamwidth) ให้มากขึ้น รูปที่ 1.1(ก) และ (ข) แสดงการประยุกต์ใช้

งานสายอากาศแถวลำดับวงกลมโดยใช้ร่องแบบเรียบ โดยได้ทำการติดตั้งสายอากาศแถวลำดับไว้บน  
กึ่งกลางของเพดานห้อง ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลาง (central hub) ในการเชื่อมต่อกับเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้  
สาย เพื่อส่งสัญญาณให้แก่อุปกรณ์ที่เป็นจุดเข้าถึง (access point) ในเครือข่าย ซึ่งจะเชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน  
และทำการติดตั้งสายอากาศแถวลำดับไว้บนเสาไฟฟ้าในสวนสาธารณะ ตามลำดับ



(ก)

สายอากาศแถวลำดับวงกลมโดยใช้ร่องแบบเรียบ  
ที่ถูกติดตั้งไว้บนเสาไฟสาธารณะ



(ข)

รูปที่ 1.1 การประยุกต์ใช้งานสายอากาศแถวลำดับวงกลมโดยใช้ร่องแบบเรียบ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 ศึกษารูปแบบและออกแบบสายอากาศร่องแบบรีขั้ว สำหรับประยุกต์ใช้งานในเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย

1.2.2 ออกแบบและจำลองผลสายอากาศแถวลำดับ โดยใช้ร่องแบบรีขั้ว ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST (Computer Simulation Technology)

1.2.3 สร้างสายอากาศแถวลำดับ โดยใช้ร่องแบบรีขั้วต้นแบบ เพื่อเปรียบเทียบผลของการวัดทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษารูปแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะสายอากาศร่องแบบรีขั้ว

1.3.2 ศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับ โดยใช้ร่องแบบรีขั้ว

1.3.3 สร้างสายอากาศแถวลำดับ โดยใช้ร่องแบบรีขั้วต้นแบบ เพื่อเปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

## 1.4 สมมุติฐานของการวิจัย

1.4.1 เมื่อทำการออกแบบด้วยสายอากาศร่องแบบรีขั้ว จะส่งผลให้ได้ความกว้างแถบที่กว้างมากขึ้น

1.4.2 เมื่อนำสายอากาศร่องแบบรีขั้วมาจัดแถวลำดับแบบวงกลม (circular array) ทำให้สายอากาศมีอัตราขยายเพิ่มขึ้น และมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในลักษณะรอบทิศทาง

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

1.5.1 วิธีดำเนินการวิจัย

- ศึกษาและสำรวจวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศร่องแบบรีขั้ว
- ศึกษารูปแบบของสายอากาศแถวลำดับวงกลม
- ศึกษาการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST ทำการออกแบบสายอากาศร่องแบบรีขั้วและจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และวิเคราะห์สมรรถนะของสายอากาศ เพื่อใช้งานในระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย
- สร้างสายอากาศร่องแบบรีขั้ว และวัดทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ

- สร้างสายอากาศแฉวลำดับวงกลมโดยใช้ร่องแบบเรียวตันแบบ วัดทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศเปรียบเทียบผลที่ได้จากการ จำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST รวมทั้งสรุปผลงานวิจัย
- จัดทำบทความสำหรับนำเสนอผลการวิจัยและส่งตีพิมพ์
- จัดทำรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

#### 1.5.2 สถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 4 (F4) มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีสุรนารี

#### 1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย

เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป และเป็นบริการความรู้แก่สถาบันการศึกษาและ หน่วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศ หน่วยงานเอกชนหรือบริษัทที่ดำเนินธุรกิจ เกี่ยวกับการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์สื่อสารและโทรคมนาคม

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรม

สายอากาศที่ใช้สำหรับระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายมีด้วยกันหลายแบบหลายชนิด โดยมีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งได้มีการพัฒนาและปรับปรุงมาโดยตลอดเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อมากที่สุด โดยในบทนี้จะกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศที่ใช้สำหรับระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย ซึ่งมีอยู่หลายแบบหลายประเภท เมื่อพิจารณาให้ลึกกลงมาในระดับที่สนใจเพื่อให้สอดคล้องกับงานวิจัยฉบับนี้แล้ว สายอากาศที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าสามารถแบ่งออกเป็น โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักได้แก่ 1.สายอากาศโมโนโพล และ 2.สายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศร่องแบบเรียว

#### 2.1 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

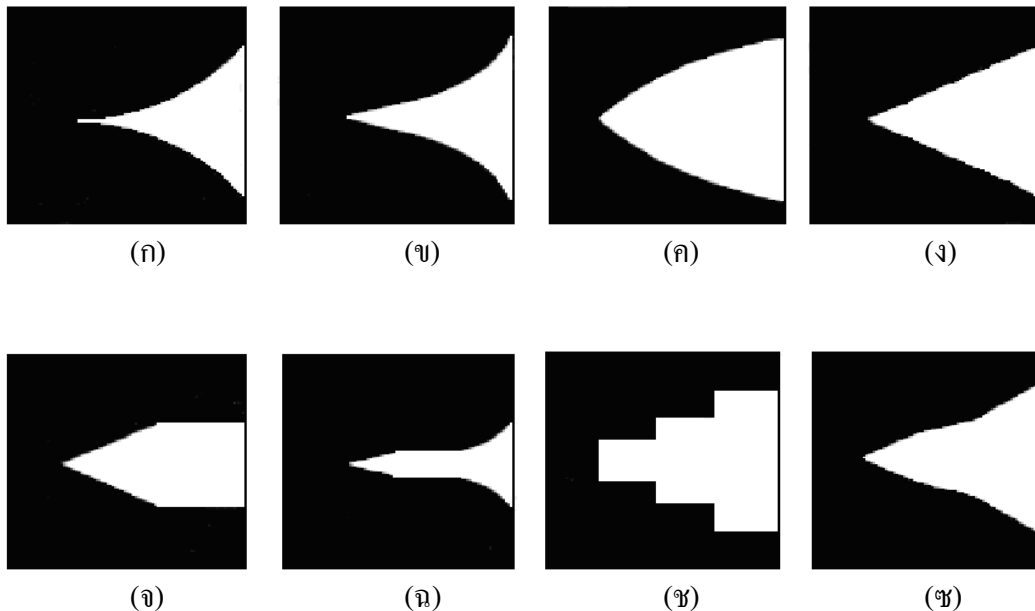
##### 2.1.1 สายอากาศโมโนโพล

สายอากาศที่นิยมนำมาใช้งานในระบบการสื่อสารแบบไร้สายมากที่สุด คือ สายอากาศโมโนโพล (monopole antenna) เนื่องจากเป็นสายอากาศที่มีน้ำหนักเบา และมีโครงสร้างของสายอากาศที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการออกแบบและสร้าง (Chen, Peng and Liang, 2005) โดยส่วนประกอบของสายอากาศที่ทำหน้าที่ในแผ่กระจายคลื่นจะถูกติดตั้งอยู่บนระนาบกราวด์แบบอนันต์ ข้อเสียของสายอากาศโมโนโพล คือ สามารถใช้งานได้เพียงแถบความถี่เดียว

##### 2.1.2 สายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศร่องแบบเรียว

สายอากาศไมโครสตริป (Jame and Hall, 1989) ประกอบด้วยส่วนที่เป็นแผ่นหรือแพทช์ (patch) ที่เป็นตัวนำ โดยทั่วไปจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือวงกลม ซึ่งจะถูกแยกออกจากกันด้วยแผ่นระนาบกราวด์ และมีลักษณะเป็นชั้นหรือที่เรียกว่า วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก ไมโครสตริปได้รับความนิยมอย่างมากในการใช้งานทางด้านสายอากาศ เนื่องจากมีลักษณะแบนราบ ไม่ด้านลมและสามารถติดกับผิวของยานพาหนะได้ และยังมีข้อดีในแง่ของราคาถูก น้ำหนักเบา และมีความสะดวกในการสร้างและการติดตั้ง สายอากาศร่องแบบเรียวเป็นสายอากาศไมโครสตริปอีกประเภทหนึ่งที่มีแถบความถี่กว้าง โดยสายอากาศร่องแบบเรียวมีหลายแบบ (Rajaraman, 2001); (Syeda, 2006) แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งลักษณะของร่องแบบเรียวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ (1) ร่องเรียวที่ไม่เป็นเส้นตรง (non linear tapered slot) ได้แก่ ร่องเรียวแบบเส้นโค้งเอกซ์โพเนนเชียล (exponential tapered slot หรือ vivaldi) ดังรูปที่ 2.1(ก) ร่องเรียวแบบเส้นโค้งสัมผัส (tangential tapered slot) ดังรูปที่ 2.1(ข) และร่องเรียวแบบเส้นโค้งพาราโบลา (parabolic

tapered slot) ดังรูปที่ 2.1(ค) (2) ร่องเรียวที่เป็นเส้นตรง (linear tapered slot) ได้แก่ ร่องเรียวแบบเส้นตรง (linear tapered slot) ดังรูปที่ 2.1(ง) และร่องเรียวแบบเส้นตรงไม่ต่อเนื่อง (broken-linear tapered slot) ดังรูปที่ 2.1(ช) และ (3) ร่องเรียวที่มีความกว้างคงที่ (constant width tapered slot) ได้แก่ ร่องเรียวแบบเส้นตรงคงที่ (linear-constant tapered slot) ดังรูปที่ 2.1(จ) ร่องเรียวแบบเส้นโค้งเอกซ์โพเนนเชียลคงที่ (exponential-constant tapered slot) ดังรูปที่ 2.1(ฉ) และร่องเรียวแบบขั้นบันไดคงที่ (step-constant tapered slot) ดังรูปที่ 2.1(ซ) และนอกจากนี้สายอากาศร่องแบบเรียวยังสามารถออกแบบและสร้างได้ง่ายบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed-Circuit Board : PCB) และมีความง่ายสำหรับการปรับสมดุลของอิมพีแดนซ์ในการป้อนกำลังงานด้วยเส้นไมโครสตริป (Lee and Chen, 1997) ดังนั้นสายอากาศร่องแบบเรียวจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความเหมาะสมทั้งในด้านของวัสดุอุปกรณ์และราคา สำหรับประยุกต์ใช้กับเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายภายในประเทศ



รูปที่ 2.1 สายอากาศร่องแบบเรียวรูปแบบต่าง ๆ (ก) ร่องเรียวแบบเส้นโค้งเอกซ์โพเนนเชียล (ข) ร่องเรียวแบบเส้นโค้งสัมผัส (ค) ร่องเรียวแบบเส้นโค้งพาราโบลา (ง) ร่องเรียวแบบเส้นตรง (จ) ร่องเรียวแบบเส้นตรงคงที่ (ฉ) ร่องเรียวแบบเส้นโค้งเอกซ์โพเนนเชียลคงที่ (ซ) ร่องเรียวแบบขั้นบันไดคงที่ (ช) ร่องเรียวแบบเส้นตรงไม่ต่อเนื่อง



สำหรับงานวิจัยแรกที่ตีพิมพ์เกี่ยวกับสายอากาศร่องแบบเรียว คือ สายอากาศวิวอลดิบนวัสดุฐานรองที่เป็นอะลูมิเนียม (Gibson, 1979) โดยการออกแบบให้ช่องเปิดของปลายสายอากาศต้องมีขนาดใหญ่กว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเนื่องจากสายอากาศร่องแบบเรียวมีคุณลักษณะเป็นแถบกว้าง ซึ่งสามารถทำให้ความกว้างแถบเพิ่มขึ้นได้อีกโดยการเพิ่มไดอิเล็กทริกของวัสดุฐานรอง (Kasturi and Schaubert, 2006) การใช้บาลูนในการปรับสมดุลระหว่างจุดป้อนกำลังงานและสายอากาศ (Lera, Garcia, Rajo, and Segovia, 2006) ส่งผลให้มีอัตราขยายที่ค่อนข้างต่ำ (Kim and Chang, 2004) จึงได้ทำการควบคุมการเลื่อนเฟสด้วยตัวแปลงสัญญาณไพโซอิเล็กทริก (PiezoElectric Transducer : PET) ในระนาบสนามแม่เหล็ก นอกจากนี้ (Elsherbini, Zhang, Lin, Kuhn, Kamel, Fathy, and Elhennawy, 2007) ได้นำเสนอถึงวิธีการเพิ่มอัตราขยายด้วยการลดความกว้างลำคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กให้แคบลงเพื่อให้เกิดความสมมาตรของแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยการเพิ่มแท่งโพลีสไตรีน (polystyrene rod) และยังมีงานวิจัยอีกมากมายที่ได้ศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศร่องแบบเรียว เช่น ศึกษาเปรียบเทียบวัสดุฐานรองที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศแอนติโพลอดวิวอลดิ (antipodal vivaldi antenna) (Hood, Karacolak, and Topsakal, 2007) ระหว่าง RO3006 และ FR4 โดยได้พิจารณาผลของการสูญเสียย้อนกลับ (return loss) แบบรูปคลื่นระยะไกล (far field pattern) การตอบสนองของเฟส (phase response) กลุ่มหน่วง (group delay) และอัตราขยาย พบว่าวัสดุฐานรองที่เป็น FR4 มีความเหมาะสมเนื่องจากให้ผลของการสูญเสียย้อนกลับที่ดี และมีความง่ายในการออกแบบ

## 2.2 รูป

สายอากาศร่องแบบเรียวเป็นสายอากาศไมโครสตริปอีกประเภทหนึ่งที่มีแถบความถี่กว้างซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย สามารถรองรับมาตรฐาน IEEE 802.11 a/b/g ได้ โดยใช้สายอากาศเพียงตัวเดียว สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำสายอากาศร่องแบบเรียวมาจัดแถวลำดับแบบวงกลม เพื่อเพิ่มอัตราขยายและเพื่อให้สายอากาศมีคุณลักษณะเช่นเดียวกันกับสายอากาศแบบรอบทิศทาง ซึ่งมีลักษณะการกระจายของคลื่นรอบ ๆ สายอากาศในระนาบอะซิมุท (azimuth plane) โดยคลื่นจะถูกแผ่กระจายออกไปทุกทิศทาง จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายทั้งภายในและภายนอกอาคาร หรือสวนสาธารณะ

## บทที่ 3

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

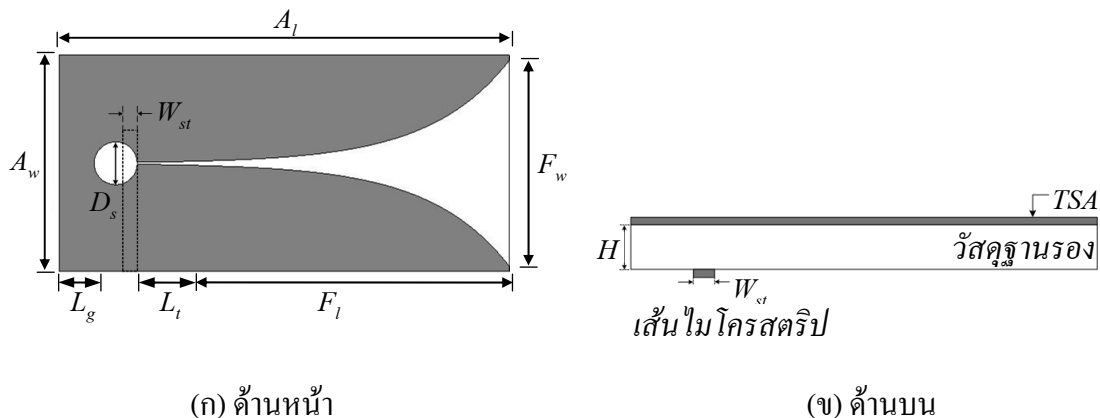
สายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากสำหรับการประยุกต์ใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปได้สามส่วน ได้แก่ (1) ส่วนบนจะเป็นแผ่นตัวนำที่ใช้สำหรับการแพร่กระจายคลื่น (2) ส่วนที่เป็นวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกซึ่งกั้นกลางระหว่างระนาบกราวด์และแผ่นตัวนำ และ (3) ระนาบกราวด์ สำหรับแผ่นตัวนำโดยทั่วไปมักจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือวงกลม สายอากาศไมโครสตริปมีความสะดวกในการสร้างลงในแผ่นวงจรพิมพ์ โดยที่แผ่นตัวนำจะถูกวางไว้ที่ด้านหนึ่งของแผ่นวงจรพิมพ์ และอีกด้านหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นแผ่นระนาบกราวด์ สำหรับความแม่นยำของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองถือว่ามีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเดินทางของคลื่น ความถี่เรโซแนนซ์ และคุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ในการป้อนกำลังให้แก่สายอากาศไมโครสตริปสามารถทำการป้อนกำลังได้หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกันสี่วิธี ได้แก่ เส้นไมโครสตริป (microstrip line) เส้นแกนร่วม (coaxial line) โพรบแกนร่วม (coaxial probe) และอะเพอร์เจอร์เชื่อมต่อ (aperture coupling) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เน้นในส่วนของการป้อนกำลังด้วยเส้นไมโครสตริป โดยตัวป้อนกำลังที่นำมาต่อกับสายอากาศควรมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลเท่ากับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย โดยสายนำสัญญาณที่จะต่อเข้ากับเครื่องมือวัดและทดสอบสายอากาศนั้น ส่วนใหญ่จะมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการแมตช์อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศไมโครสตริปให้มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปมีพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องคำนึงถึง ได้แก่ ความถี่ปฏิบัติงานของสายอากาศ (operating frequency :  $f_c$ ) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง (dielectric constant :  $\epsilon_r$ ) และความสูงของไดอิเล็กตริกหรือความสูงของวัสดุฐานรอง (high :  $h$ )

#### 3.1 สายอากาศร่องแบบเรียว

สายอากาศร่องแบบเรียวหรือสายอากาศรอยบาก (notch antenna) เป็นสายอากาศไมโครสตริปซึ่งจัดว่าเป็นสายอากาศประเภทคลื่นจร (traveling-wave antennas) สายอากาศร่องแบบเรยวนั้นมีข้อดีหลายประการ อาทิเช่น มีโครงสร้างที่ง่าย น้ำหนักเบา ออกแบบ สร้างและติดตั้งเพื่อใช้งานได้ง่าย และสามารถใช้งานร่วมกับ MICs (microwave integrated circuits) ได้ เนื่องจากสายอากาศมีลักษณะที่เป็นร่องแบบเรียว จึงเหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความถี่ปฏิบัติการที่มีแถบความถี่กว้าง

### 3.1.1 โครงสร้างของสายอากาศร่องแบบเรียว

สายอากาศร่องแบบเรยวนั้นมีด้วยกันหลายรูปแบบดังได้กล่าวในบทที่ 2 โดยทุกรูปแบบจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่เหมือนกัน จะแตกต่างกันก็เพียงแต่พื้นที่ของการแผ่พลังงานเท่านั้นเนื่องจากข้อจำกัดของข้อมูลในการออกแบบสายอากาศร่องแบบเรียวรูปแบบต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีเพียงสายอากาศร่องแบบเรียวที่เป็นร่องเรียวแบบเส้นโค้งเอกซ์โพเนนเชียลและร่องเรียวแบบเส้นตรงเท่านั้นที่ได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง (Kai Fong Lee, and Wei Chen, 1997) งานวิจัยนี้ได้นำสายอากาศร่องแบบเรียวที่มีรูปร่างของร่องเรียวแบบโค้งแบบเอกซ์โพเนนเชียลหรือสายอากาศวิวอลติ สำหรับการประยุกต์ใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของความกว้างลำคลื่นกับมุมการเปิดที่ชัดเจนและแบบรูปของอิมิตันซ์จะมีจุดศูนย์ (null) น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับร่องเรียวแบบเส้นตรง (Amena Kauser Syeda, 2006) รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของสายอากาศร่องแบบเรียว ซึ่งถูกสร้างด้วยวัสดุที่เป็นไมโครสตริปที่ประกอบด้วยร่องเรียวที่โค้งแบบเอกซ์โพเนนเชียลบนแผ่นโลหะมีวัสดุฐานรองกึ่งกลางซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก  $\epsilon_r$  และมีความสูง  $h$  โดยป้อนกำลังเข้าที่ด้านหลังของสายอากาศ



(ก) ด้านหน้า

(ข) ด้านบน

รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศร่องแบบเรียว

สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้จาก (Amena Syeda, 2006)

- $A_l$  คือ ความยาวของสายอากาศ (antenna length) ควรมีค่ามากกว่าความยาวคลื่น
- $A_w$  คือ ความกว้างของสายอากาศ (antenna width) ควรมีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่ความถี่ต่ำสุด
- $F_l$  คือ ความยาวของร่อง (flared slotline length) ควรมีค่าเท่ากับความยาวคลื่นที่ความถี่ต่ำสุด

- $F_w$  คือ ความกว้างของร่อง (flared slotline width) ควรมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่ความถี่ต่ำสุด
- $D_s$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมของสตัป (diameter of circular slot stub) ควรมีค่าเท่ากับหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นของร่อง
- $L_t$  คือ ความยาวของส่วนที่เป็นเส้นตรงของร่อง (length of uniform section of slotline)
- $L_g$  คือ ความยาวชดเชยด้านหลังสตัป (backwall offset)
- $W_{st}$  คือ ความกว้างของเส้นไมโครสตริป (microstrip line width)
- $H$  คือ ความสูงของวัสดุฐานรอง (substrate height)

สามารถคำนวณหาสมการความโค้งเอกซ์โพเนนเชียลได้จากสมการ

$$y = C_1 e^{Rz} + C_2 \quad (2.1)$$

โดยที่

$$C_1 = \frac{y_2 - y_1}{e^{Rz_2} - e^{Rz_1}} \quad (2.2)$$

และ

$$C_2 = \frac{y_1 e^{Rz_2} - y_2 e^{Rz_1}}{e^{Rz_2} - e^{Rz_1}} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $P_1(y_1, z_1)$  คือ จุด  $(y_1, z_1)$  จุดแรกที่เริ่มโค้งเอกซ์โพเนนเชียล

$P_2(y_2, z_2)$  คือ จุด  $(y_2, z_2)$  จุดสุดท้ายของเส้นโค้งเอกซ์โพเนนเชียล

ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์อ้างอิงต่าง ๆ ของสายอากาศร่องแบบเรียวแสดงได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนดให้มีความถี่ปฏิบัติการในช่วง 2 GHz ถึง 6 GHz และป้อนกำลังงานด้วยเส้นไมโครสตริป 50 โอห์ม

ความยาวของร่อง หรือ  $F_l$  หาได้จาก

$$F_l = \lambda_0 = \frac{C}{f_{\min}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2 \times 10^9 \text{ Hz}} = 150 \text{ mm}$$

ความกว้างของร่อง หรือ  $F_w$  หาได้จาก

$$F_w = \frac{\lambda_0}{2} = \frac{C}{2 \times f_{\min}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2 \times (2 \times 10^9) \text{ Hz}} = 75 \text{ mm}$$

ความยาวของสายอากาศ หรือ  $A_l$  หาได้จาก

$$A_l = F_l + \frac{\lambda_0}{4} = 150 + \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{4 \times (2 \times 10^9) \text{ Hz}} = 187.5 \text{ mm}$$

ความกว้างของสายอากาศ หรือ  $A_w$  เมื่อกำหนดให้ จุดสุดท้ายของร่องเรียว (end of the tapered) กว้างเท่ากับ 2 มิลลิเมตร จะได้

$$A_w = F_w + 2(\text{end of the taper}) = 75 + 2(2) = 79 \text{ mm}$$

เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมของสตั๊ป หรือ  $D_s$  หาได้จาก

$$D_s = \frac{\lambda_s}{4} = \frac{\left( \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} \right)}{4 \times f_{\min}} = \frac{\left( \frac{1}{\sqrt{(4\pi \times 10^{-7})(4.4)(1)(8.854 \times 10^{-12})}} \right)}{4 \times 2 \times 10^9 \text{ Hz}} = 17.86 \text{ mm}$$

ความยาวของส่วนที่เป็นเส้นตรงของร่อง หรือ  $L_t$  และ ความยาวชดเชยด้านหลังสตั๊ป หรือ  $L_g$  เมื่อกำหนดให้  $L_t = L_g$  จะได้

$$L_g = L_t = \frac{\left( \frac{\lambda_0}{4} - D_s \right)}{2} = \frac{\left( \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{4 \times 2 \times 10^9 \text{ Hz}} - 17.86 \right)}{2} = 9.82 \text{ mm}$$

ความกว้างของเส้นไมโครสตริป หรือ  $W_{st}$  หาได้จาก

$$H' = \left( \frac{Z_0 \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{119.9} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left( \ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{\pi} \right)$$

$$\frac{W_1}{H} = \left( \frac{(\exp H')}{8} - \frac{1}{4 \exp H'} \right)^{-1}$$

เมื่อ  $f = 2.45$  GHz,  $H = 1.6$  mm,  $Z_0 = 50 \Omega$ ,  $\epsilon_r = 4.4$

และ  $\lambda_0 = \frac{V}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.45 \times 10^9 \text{ Hz}} = 122.45 \text{ mm}$

ดังนั้นจะได้

$$H' = \left( \frac{50 \sqrt{2(4.4+1)}}{119.9} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{4.4-1}{4.4+1} \right) \left( \ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4.4} \ln \frac{4}{\pi} \right) = 1.53$$

$$\frac{W_1}{(1.6 \times 10^{-3} \text{ m})} = \left( \frac{(\exp(1.53))}{8} - \frac{1}{4 \exp(1.53)} \right)^{-1}$$

$$W_1 = 3.02 \text{ mm}$$

จากค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ทั้งหมด แสดงได้ดังตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์อ้างอิงของสายอากาศร่องแบบรีเว

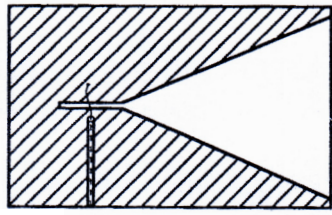
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์อ้างอิงของสายอากาศร่องแบบรีเว

พารามิเตอร์ของสายอากาศร่องแบบรีเว	ขนาด (mm)
$A_t$ : ความยาวของสายอากาศ	187.5
$A_w$ : ความกว้างของสายอากาศ	79
$F_t$ : ความยาวของร่อง	150
$F_w$ : ความกว้างของร่อง	75
$R_a$ : อัตราความโค้งของร่องรีเวเอกซ์โพเนนเชียล	3
$L_g$ : ความยาวชดเชยด้านหลังสตัป	9.82
$L_t$ : ความยาวของส่วนที่เป็นเส้นตรงของร่อง	9.82
$H$ : ความสูงของวัสดุฐานรอง	1.6
$D_s$ : เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมของสตัป	17.86
$W_{st}$ : ความกว้างของเส้นไมโครสตริป	3.02

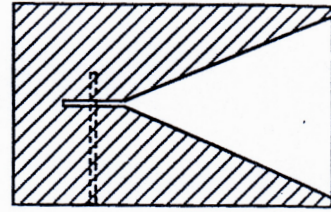
### 3.1.2 วิธีการป้อนกำลังงานสายอากาศร่องแบบเรียว

โดยส่วนมากแล้วสายอากาศร่องแบบเรียวจะมีลักษณะของร่อง (slotline) ที่มีการแผ่อกทำให้การป้อนกำลังงานให้แก่สายอากาศร่องแบบเรียวต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงระหว่างร่องและการส่งผ่านไปยังตัวกลาง (transmission media) ดังนั้นร่องของสายอากาศจะต้องเชื่อมต่อกับจุดป้อนกำลังงานของสายอากาศ สำหรับวิธีการป้อนกำลังงานให้แก่สายอากาศร่องแบบเรียวนั้นมีด้วยกัน 7 วิธี (Richard Q. Lee and Rainee N. Simons, 1997) ได้แก่ (1) การป้อนกำลังงานด้วยเส้นแกนร่วม (coaxial line feed) (2) การป้อนกำลังงานด้วยเส้นไมโครสตริป (microstrip line feed) (3) การป้อนกำลังงานด้วยท่อนำคลื่นที่อยู่บนระนาบเดียวกัน (conventional coplanar waveguide feed หรือ CPW feed) (4) การป้อนกำลังงานด้วยท่อนำคลื่นที่อยู่บนระนาบกราวด์เดียวกัน (ground conventional coplanar waveguide feed หรือ GCPW feed) (5) การป้อนกำลังงานด้วยท่อนำคลื่นที่อยู่บนระนาบกราวด์เดียวกัน โดยมีตัวนำด้านหลังที่มีขอบเขต (conductor-backed finite ground-plane coplanar waveguide feed หรือ FCPW feed) สามารถทำการเชื่อมต่อได้ 2 แบบคือ ให้กำลังงานเชื่อมต่อจากสตริปไปยังร่องของสายอากาศ (strip-to-slot) หรือแบบสตริปศูนย์กลาง (center-strip) และให้กำลังงานเชื่อมต่อจากร่องไปยังร่องของสายอากาศ (slot-to-slot) หรือแบบร่อง (notch) (6) การป้อนกำลังงานด้วยไมโครสตริปไปยังจุดเชื่อมไมโครสตริป (microstrip-to-coupled microstrip feed) และ (7) การป้อนกำลังงานด้วยเส้นสตริป (stripline feed) แสดงดังรูปที่ 3.2

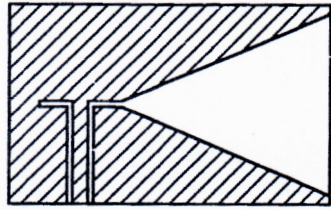
สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วิธีการป้อนกำลังงานด้วยเส้นไมโครสตริปเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ทั้งการออกแบบและการแมตซ์สายอากาศ รูปที่ 3.3 แสดงการป้อนกำลังงานด้วยเส้นไมโครสตริปไปยังร่องของสายอากาศ โดยที่  $\lambda_s$  คือ ความยาวคลื่นของร่อง (slot wavelength) และ  $\lambda_m$  คือ ความยาวคลื่นของไมโครสตริป (microstrip wavelength)



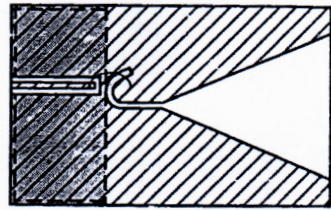
(ก) เส้นแกนร่วม



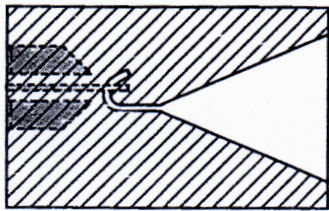
(ข) เส้นไมโครสตริป



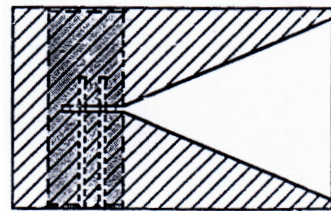
(ค) CPW



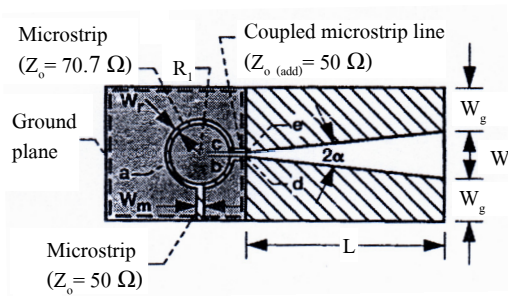
(ง) GCPW



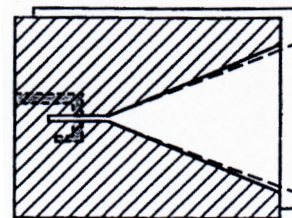
(จ) FCPW/center-strip



(ฉ) FCPW/notch



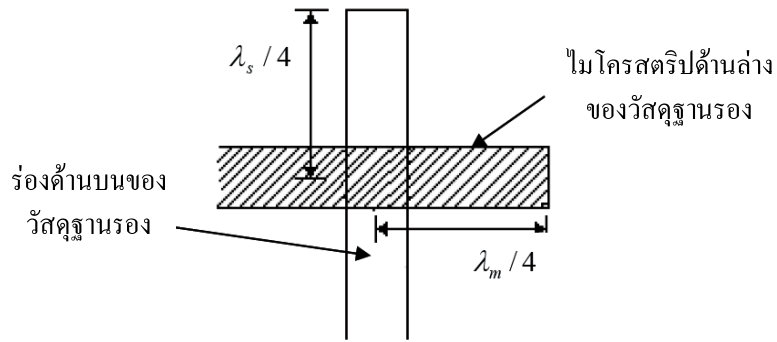
(ช) ไมโครสตริปไปยังจุดเชื่อม



(ซ) เส้นสตริป

รูปที่ 3.2 เทคนิคการป้อนกำลังงานให้แก่สายอากาศร่องแบบเรียบ



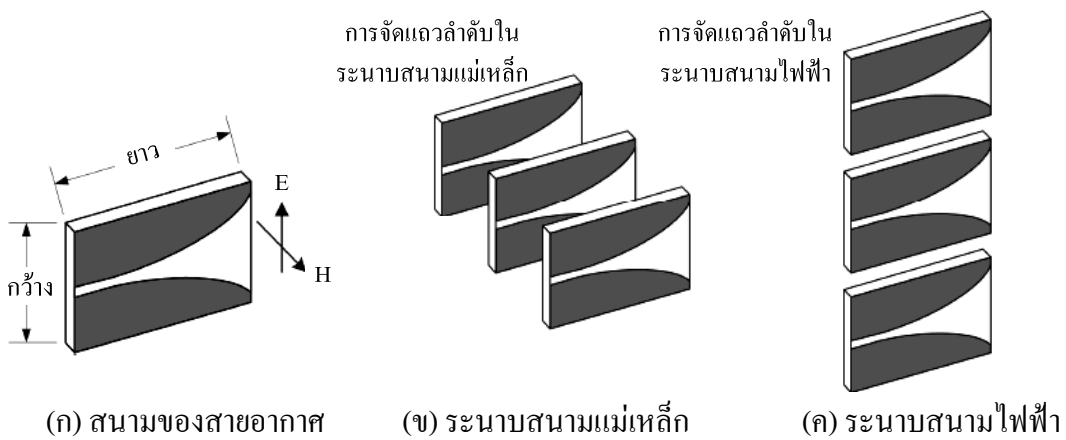


รูปที่ 3.3 การป้อนกำลังงานด้วยเส้นไมโครสตริป

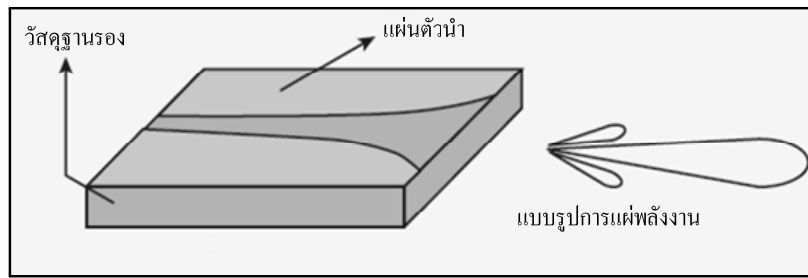
3.1.3 การจัดแวลลำดับของสายอากาศร่องแบบเรียว

รูปที่ 3.4 แสดงรูปร่างมาตรฐานในการจัดแวลลำดับของสายอากาศร่องแบบเรียวโดยรูปที่ 3.4(ก) แสดงสนามของสายอากาศร่องแบบเรียว ทำให้ได้รูปร่างในการจัดแวลลำดับในระนาบสนามแม่เหล็กและระนาบสนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.4(ข) และ (ค) ตามลำดับ

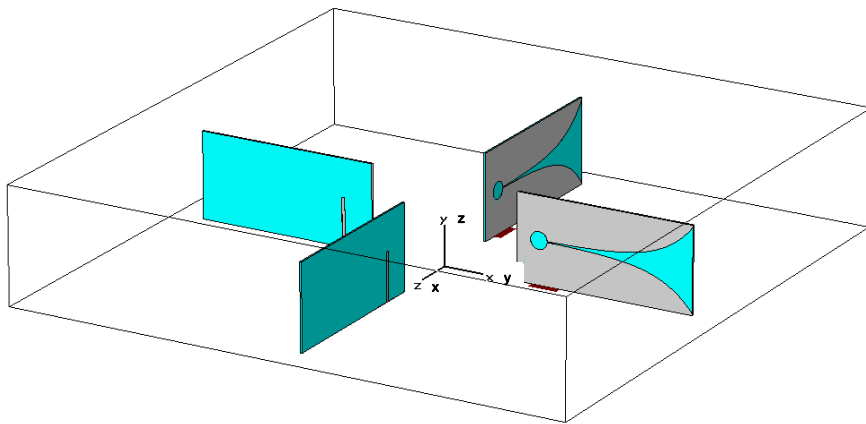
เมื่อจัดประเภทของสายอากาศออกตามการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณพบว่าสายอากาศร่องแบบเรียวเป็นสายอากาศแบบมีทิศทางหรือเจาะจงทิศทาง (directional antenna) คือ มีลักษณะของการกระจายคลื่นในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 3.5 เพื่อให้สายอากาศร่องแบบเรียวมีลักษณะการกระจายของคลื่นรอบ ๆ สายอากาศในระนาบอะซิมูท หรือมีคุณสมบัติเป็นสายอากาศแบบรอบทิศทาง งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบสายอากาศร่องแบบเรียวให้มีการจัดแวลลำดับแบบวงกลม ดังรูปที่ 3.6 ทำให้ได้สายอากาศแวลลำดับวงกลมต้นแบบที่มีความกว้างแถบกว้างตามคุณสมบัติของสายอากาศร่องแบบเรียวและสามารถครอบคลุมพื้นที่ได้มากขึ้น



รูปที่ 3.4 รูปร่างมาตรฐานในการจัดแวลลำดับของสายอากาศร่องแบบเรียว



รูปที่ 3.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศร่องแบบเรียว



รูปที่ 3.6 รูปร่างของแฉวลำดับแบบวงกลม

### 3.2 สรุป

จากทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องของสายอากาศร่องแบบเรียว โดยเริ่มศึกษาจากโครงสร้างของสายอากาศก่อน เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ต่อมาได้ศึกษาในส่วนของการป้อนกำลังงานให้แก่สายอากาศ โดยได้เลือกวิธีการป้อนกำลังงานด้วยเส้นไมโครสตริป เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ทั้งการออกแบบและการแมตช์สายอากาศ และในที่สุดท้ายได้ศึกษารูปแบบของการจัดแฉวลำดับเพื่อให้ได้สายอากาศร่องแบบเรียวที่มีลักษณะการกระจายของคลื่นรอบ ๆ สายอากาศในระนาบอะซิมุท หรือมีคุณสมบัติเป็นสายอากาศแบบรอบทิศทาง

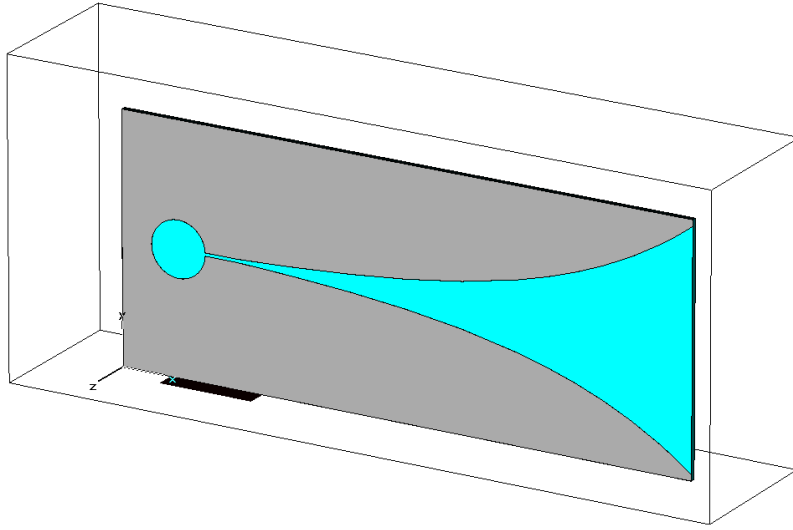
## บทที่ 4

### การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศ

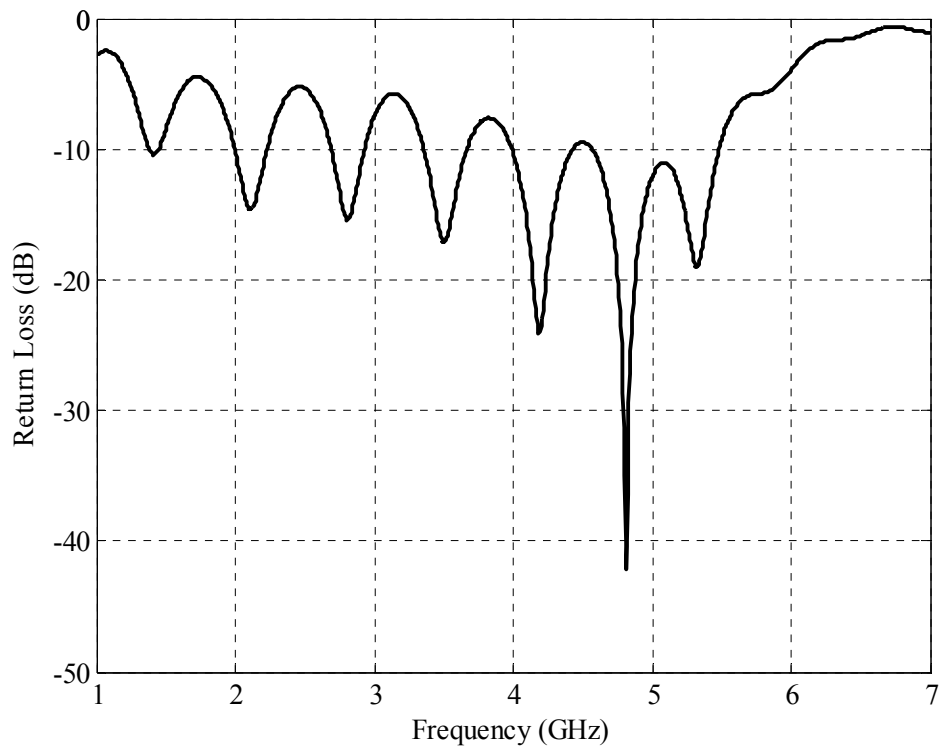
ในบทนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศแถวลำดับวงกลมโดยใช้ร่องแบบรีเวด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของสายอากาศแถวลำดับวงกลมโดยใช้ร่องแบบรีเวสำหรับการประยุกต์ใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย โดยในขั้นตอนแรกได้ทำการออกแบบและจำลองผลสายอากาศร่องแบบรีเวเพียงหนึ่งอิลิเมนต์ เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีความกว้างแถบที่สามารถรองรับระบบการสื่อสารแบบไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 a/b/g ได้ จากนั้นนำสายอากาศร่องแบบรีเวมาทำการจัดแถวลำดับแบบวงกลมเพื่อให้ได้ความกว้างลำคลื่นในระนาบอะซิมุทที่กว้างขึ้นและมีอัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้น

#### 4.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองสายอากาศร่องแบบรีเวด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

จากบทที่ 3 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์อ้างอิงต่าง ๆ ของสายอากาศร่องแบบรีเวได้ดังตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงในการออกแบบสายอากาศร่องแบบรีเว จะได้ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST เป็นแบบจำลองสายอากาศร่องแบบรีเวและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ดังรูปที่ 4.1(ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ในการออกแบบ ดังนั้นจึงได้ทำการปรับค่าที่เหมาะสม เพื่อให้ได้สายอากาศร่องแบบรีเวที่มีความกว้างแถบครอบคลุมช่วงความถี่ปฏิบัติการตั้งแต่ 2 GHz ถึง 6 GHz โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับค่าที่เหมาะสม ได้แก่ ความยาวของสายอากาศ (antenna length :  $A_l$ ) ความกว้างของร่อง (flared slotline width :  $F_w$ ) ความยาวชดเชยด้านหลังสตัป (backwall offset :  $L_g$ ) อัตราความโค้งของร่องรีเวเอกซ์โพเนนเชียล (exponential opening rate :  $R_e$ ) การปรับมาตราส่วนของสายอากาศร่องแบบรีเว และความสูงของวัสดุฐานรอง (substrate height :  $H$ ) ซึ่งจะพิจารณาการปรับค่าที่เหมาะสมจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ



(ก) แบบจำลองสายอากาศ

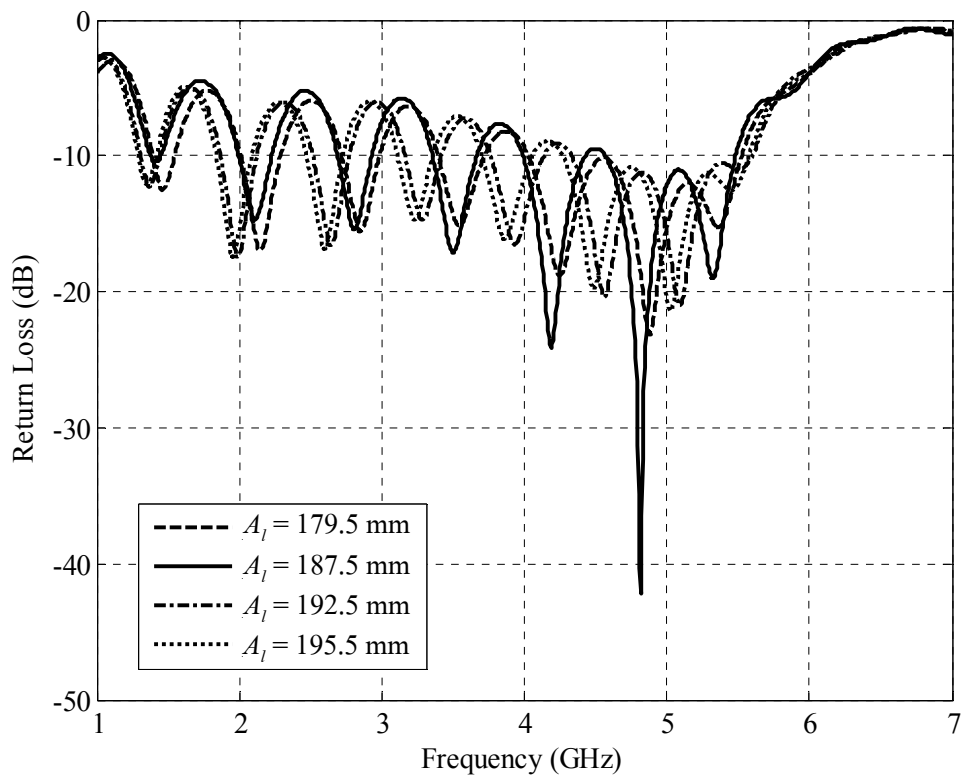


(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

รูปที่ 4.1 ผลจากการจำลองสายอากาศร่องแบบเรียวด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

#### 4.1.1 ความยาวของสายอากาศ

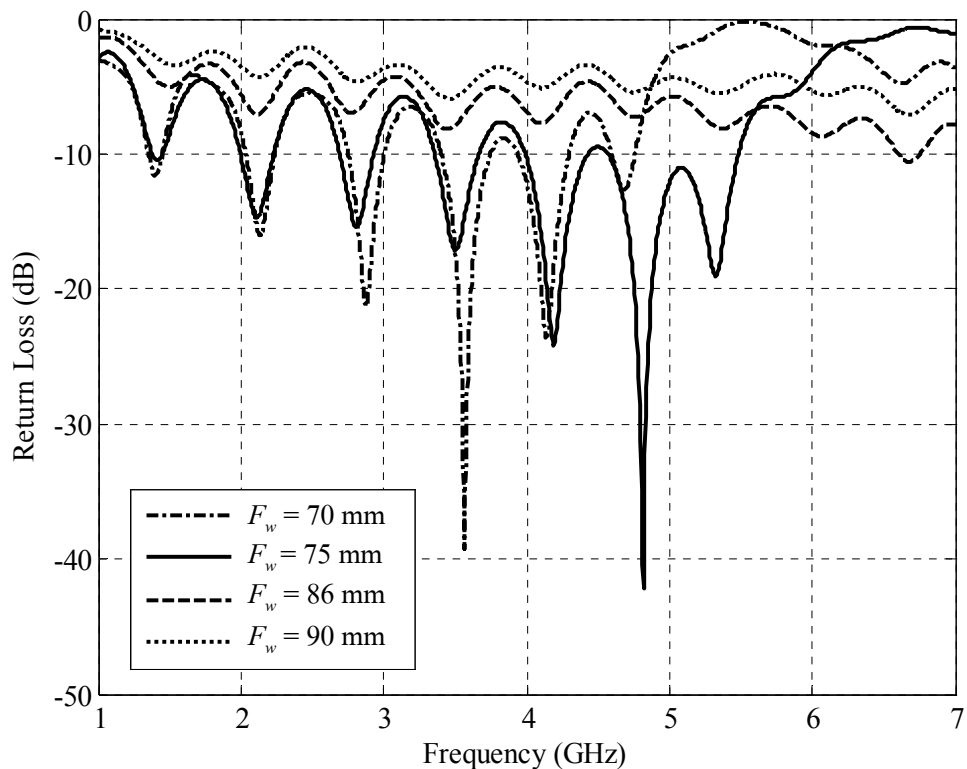
เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของสายอากาศ หรือ  $A_l$  คือ ให้  $A_l$  เท่ากับ 179.5 มิลลิเมตร 187.5 มิลลิเมตร 192.5 มิลลิเมตร และ 195.5 มิลลิเมตร โดยให้ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าคงที่ จากการจำลองผลพบว่าเมื่อสายอากาศร่องแบบรีขามีความยาวเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ มีจำนวนของการแกว่ง (oscillation) ที่เพิ่มขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ดังนั้นจึงเลือกค่าความยาวของสายอากาศเท่ากับค่าอ้างอิงเดิมคือ 187.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $A_l$

#### 4.1.2 ความกว้างของร่อง

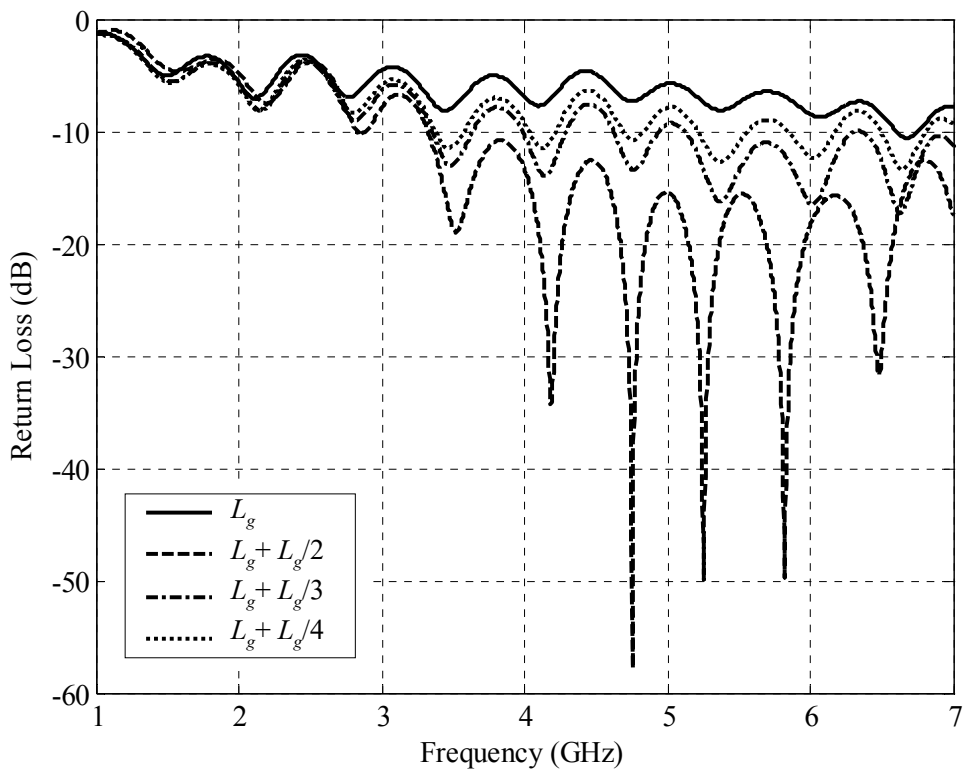
เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของร่อง หรือ  $F_w$  คือ ให้  $F_w$  เท่ากับ 70 มิลลิเมตร 75 มิลลิเมตร 86 มิลลิเมตร และ 90 มิลลิเมตร โดยให้ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าคงที่ พบว่าเมื่อค่า  $F_w$  เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับดีขึ้นเนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ในการแผ่กระจายพลังงาน แต่ถ้า  $F_w$  เพิ่มมากขึ้นจะพบว่าความถี่ปฏิบัติการในช่วงความถี่กลางจะเลื่อนไปยังความถี่ที่สูงขึ้น (Amena Syeda, 2006) แต่จากการจำลองผลจะเห็นได้ว่าเมื่อ  $F_w$  เท่ากับ 75 มิลลิเมตร มีผลของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ดีที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.3 แต่เมื่อนำค่า  $F_w$  เท่ากับ 75 มิลลิเมตร ไปทำการปรับค่าความยาวขดเชยด้านหลังสลับ พบว่าได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ไม่ดี จึงได้ทำการเลือกค่า  $F_w$  เท่ากับ 86 มิลลิเมตร มาทำการปรับค่าความยาวขดเชยด้านหลังสลับ พบว่าได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ดีขึ้น ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป ดังนั้นจึงเลือกค่า  $F_w$  เท่ากับ 86 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $F_w$

### 4.1.3 ความยาวขดเชยด้านหลังสตัป

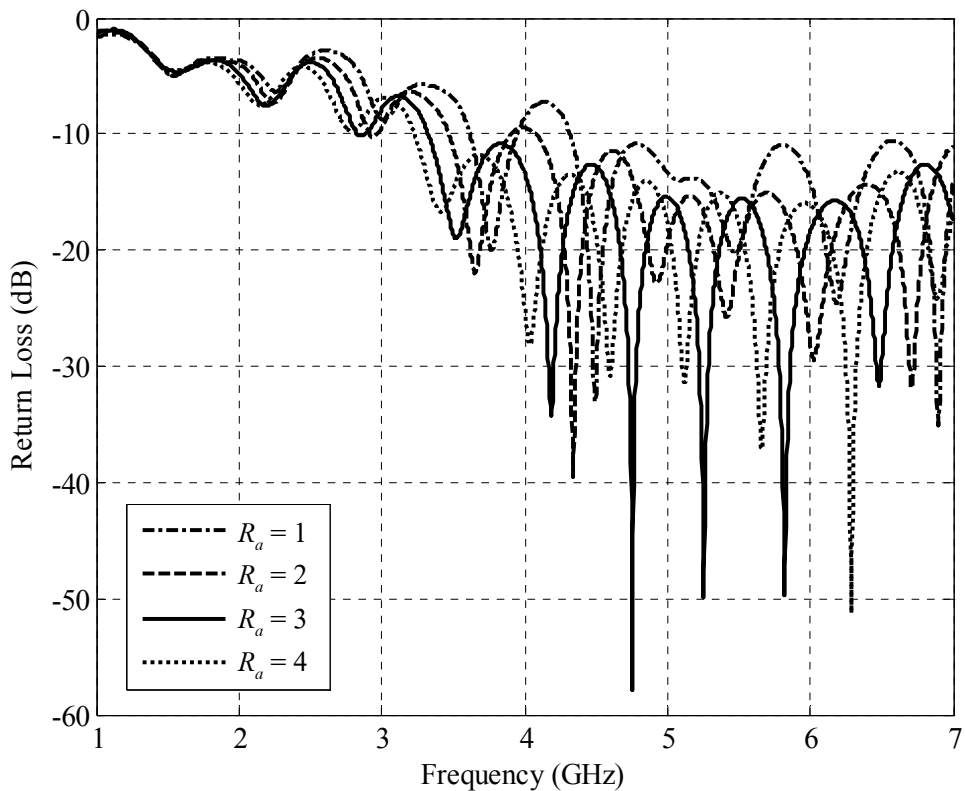
เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวขดเชยด้านหลังสตัป หรือ  $L_g$  คือ ให้  $L_g$  เท่ากับ 9.82 มิลลิเมตร ( $L_g$ ) 12.28 มิลลิเมตร ( $L_g + (L_g/4)$ ) 13.09 มิลลิเมตร ( $L_g + (L_g/3)$ ) และ 14.73 มิลลิเมตร ( $L_g + (L_g/2)$ ) โดยให้ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าคงที่ จากการจำลองผล พบว่าเมื่อค่า  $L_g$  เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับดีขึ้นที่ความถี่ปฏิบัติการ ช่วงความถี่ต่ำ แต่ถ้า  $L_g$  เพิ่มมากขึ้นจะพบว่าความถี่ปฏิบัติการที่ช่วงความถี่กลางจะเลื่อนไปยังความถี่ที่สูงขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.4 ดังนั้นเลือกค่า  $L_g$  เท่ากับ 14.73 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $L_g$

#### 4.1.4 อัตราความโค้งของร่องเรียวเอกซ์โพเนนเชียล

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราความโค้งของร่องเรียวแบบเอกซ์โพเนนเชียล หรือ  $R_a$  คือ ให้  $R_a$  เท่ากับ 1 2 3 และ 4 โดยให้ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าคงที่จากการจำลองพบว่า เมื่อค่า  $R_a$  เพิ่มขึ้น ทำให้ความถี่ปฏิบัติการช่วงความถี่ต่ำลดลง และช่วงความถี่กลางมีการแมตซ์ที่ไม่ดี จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าที่ค่า  $R_a$  เท่ากับ 3 จะให้ผลของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ดีที่สุด เมื่อ  $R_a$  น้อยกว่า 3 พบว่าได้ความถี่ปฏิบัติการที่ช่วงความถี่ต่ำมากกว่า 3 GHz และเมื่อ  $R_a$  มากกว่า 3 พบว่าความถี่ปฏิบัติการที่ช่วงความถี่กลางมีการแมตซ์ที่ไม่ดี มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับมากกว่า -10 dB ดังนั้นเลือกค่า  $R_a$  เท่ากับ 3

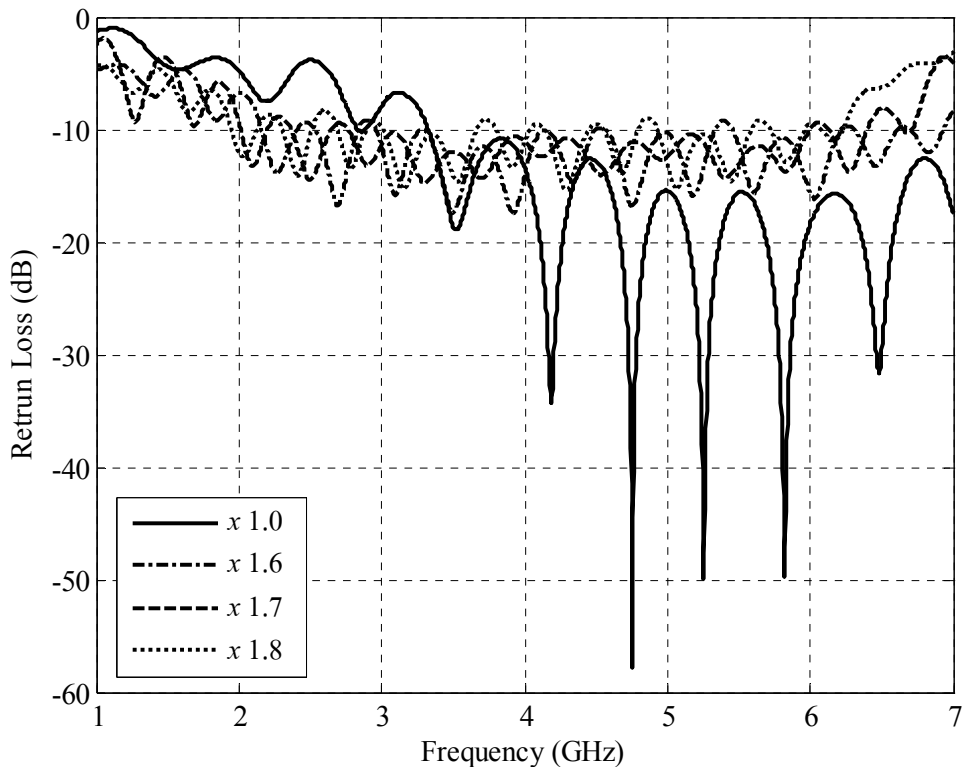


รูปที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $R_a$



#### 4.1.5 การปรับมาตราส่วนของสายอากาศ

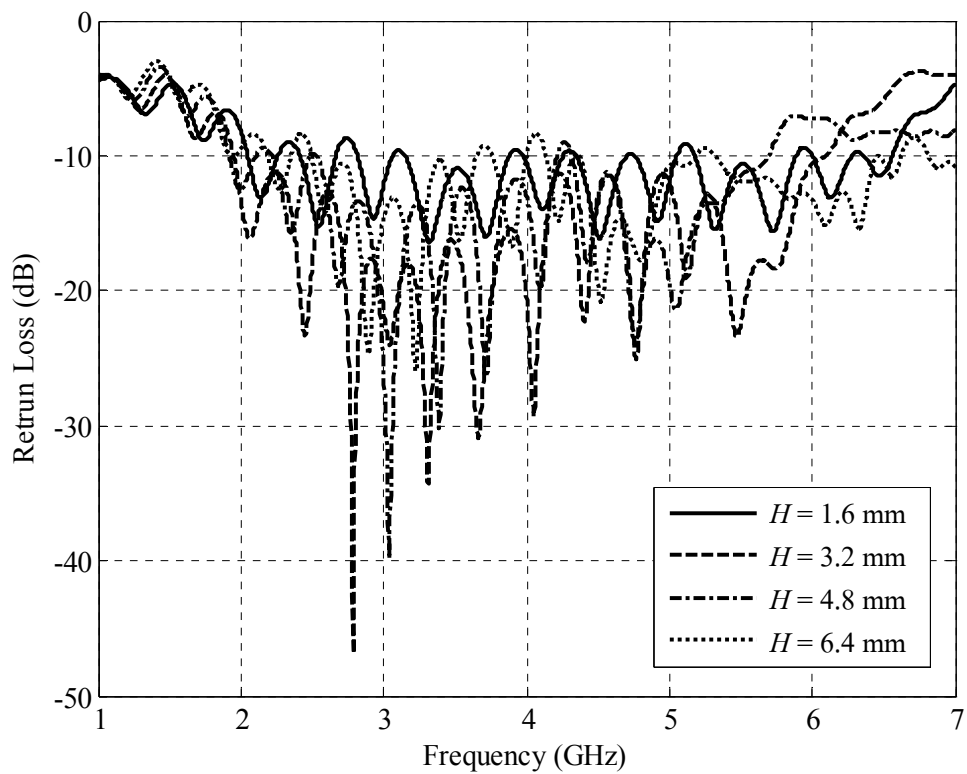
จากผลการจำลองสายอากาศร่องแบบเรียวยจะเห็นว่าเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้ว ผลของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับยังมีความกว้างแถบไม่ครอบคลุมช่วงความถี่ปฏิบัติการ 2 GHz ถึง 6 GHz ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ใช้เทคนิคในการปรับมาตราส่วนของสายอากาศ ซึ่งทำการปรับมาตราส่วนของสายอากาศให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากผลการจำลองที่ได้มีความถี่ปฏิบัติการในช่วงความถี่สูง โดยนำค่าคงที่ได้แก่ 1.6 1.7 และ 1.8 มาคูณเข้ากับพารามิเตอร์ของสายอากาศ พบว่าค่าคงที่ 1.7 ให้ผลของความกว้างแถบครอบคลุมช่วงความถี่ปฏิบัติการ 2 GHz ถึง 6 GHz ตรงตามวัตถุประสงค์ในการออกแบบ แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งกราฟเส้นทึบจะเป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของผลการจำลองสายอากาศร่องแบบเรียวยที่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แล้วแต่ยังไม่ได้มีการคูณค่าคงที่เข้ากับพารามิเตอร์ของสายอากาศ และจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้มีการแมตซ์ที่ไม่ดี ดังนั้นในขั้นตอนต่อไปจึงได้ทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับให้มีการแมตซ์ที่ดีขึ้น โดยการปรับค่าความสูงของวัสดุฐานรอง



รูปที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อทำการปรับมาตราส่วนของสายอากาศ

#### 4.1.6 ความสูงของวัสดุฐานรอง

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของวัสดุฐานรองหรือ  $H$  คือ ให้  $H$  เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร 3.2 มิลลิเมตร 4.8 มิลลิเมตร และ 6.4 มิลลิเมตร โดยให้ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าคงที่ เมื่อค่า  $H$  เพิ่มขึ้น ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่มีการแมตซ์ดีขึ้น จากการจำลองผลพบว่า  $H$  มีค่าเท่ากับ 3.2 มิลลิเมตร มีผลการแมตซ์ที่ดีที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.7 ดังนั้นเลือกค่า  $H$  เท่ากับ 3.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $H$

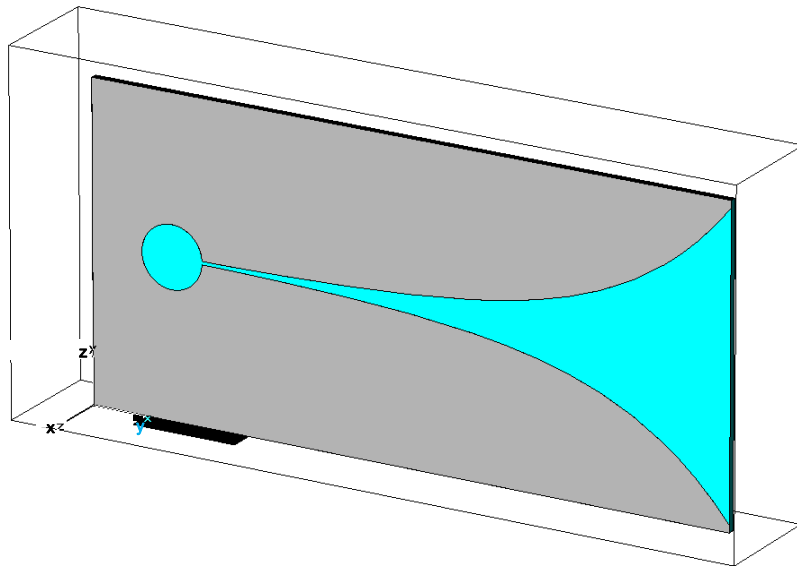
จากการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะได้ผลการจำลองสายอากาศ ร่องแบบเรียวตันแบบที่มีความกว้างแถบครอบคลุมช่วงความถี่ปฏิบัติการตั้งแต่ 2 GHz ถึง 6 GHz แสดงค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศร่องแบบเรียวตันแบบดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.8 แสดงผลการจำลองสายอากาศร่องแบบเรียวตันแบบ จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับมีค่าน้อยกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 6 GHz ดังรูปที่ 4.8(ข) อัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าต่ำกว่า 2 ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 6 GHz เช่นกัน แสดงได้ดังรูปที่ 4.8(ค) สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 4.8(ง) และ (จ) ตามลำดับ ซึ่งมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบเจาะจงทิศทาง โดยผลการจำลองที่ได้มีอัตราขยายดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศร่องแบบเรียวตันแบบ

พารามิเตอร์ของสายอากาศร่องแบบเรียว	ขนาด (mm)
$A_l$ : ความยาวของสายอากาศ	318.8
$A_w$ : ความกว้างของสายอากาศ	153
$F_l$ : ความยาวของร่อง	271.7
$F_w$ : ความกว้างของร่อง	146.2
$R_a$ : อัตราความโค้งของร่องเรียวเอกซ์โพเนนเชียล	3
$L_g$ : ความยาวชดเชยด้านหลังสตัป	25.04
$L_t$ : ความยาวของส่วนที่เป็นเส้นตรงของร่อง	16.69
$H$ : ความสูงของวัสดุฐานรอง	3.2
$D_s$ : เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมของสตัป	30.4
$W_{st}$ : ความกว้างของเส้นไมโครสตริป	5.13

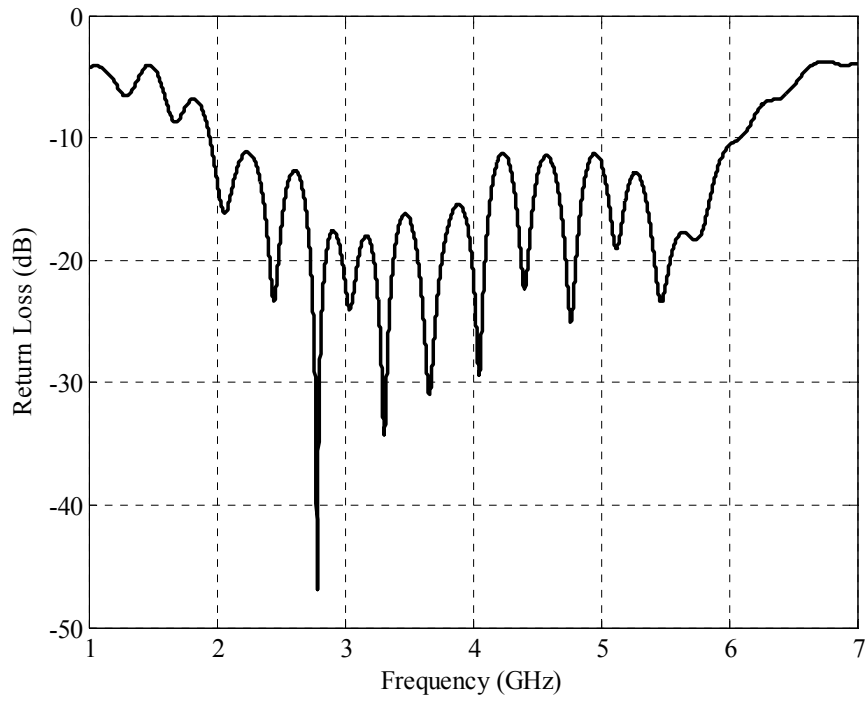
ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราขยายจากผลการจำลองสายอากาศร่องแบบเรียวตันแบบ

ความถี่ (GHz)	อัตราขยาย (dB)
2.45	11
5.25	8.35
5.80	7.37

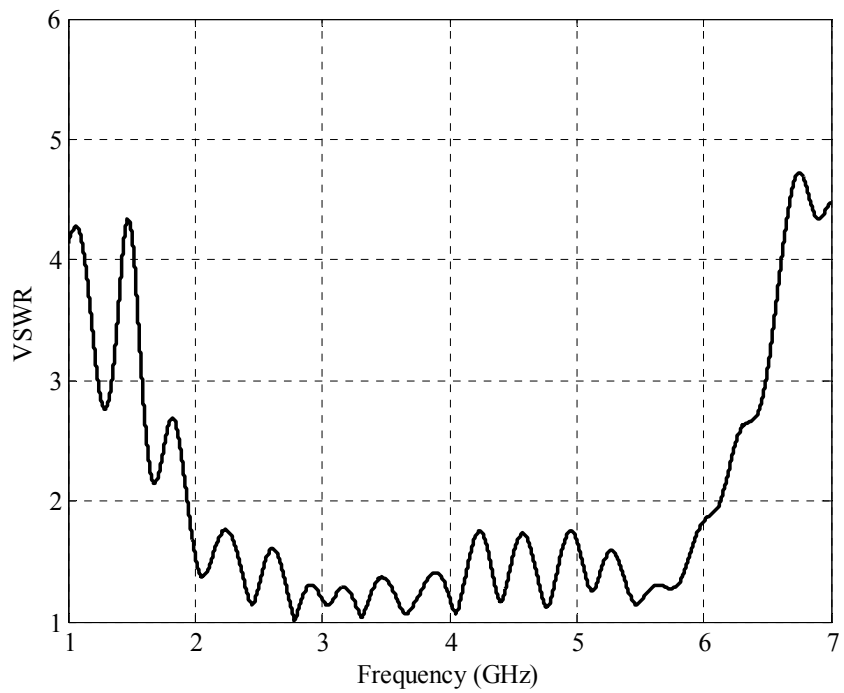


(ก) แบบจำลองสายอากาศตันแบบ

รูปที่ 4.8 ผลจากการจำลองสายอากาศร่องแบบเรียวตันแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

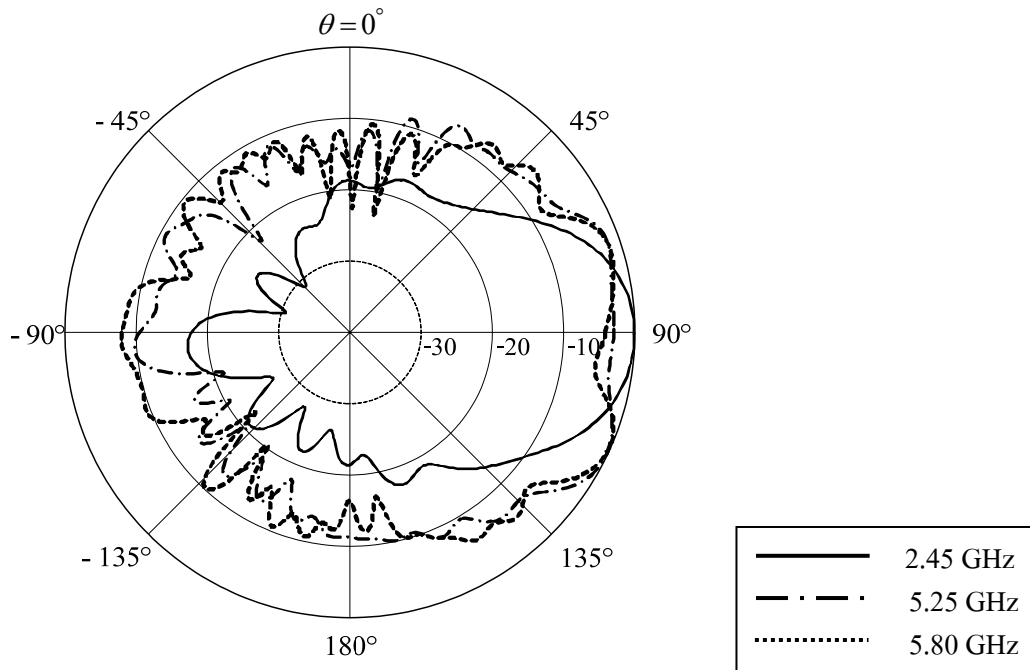


(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

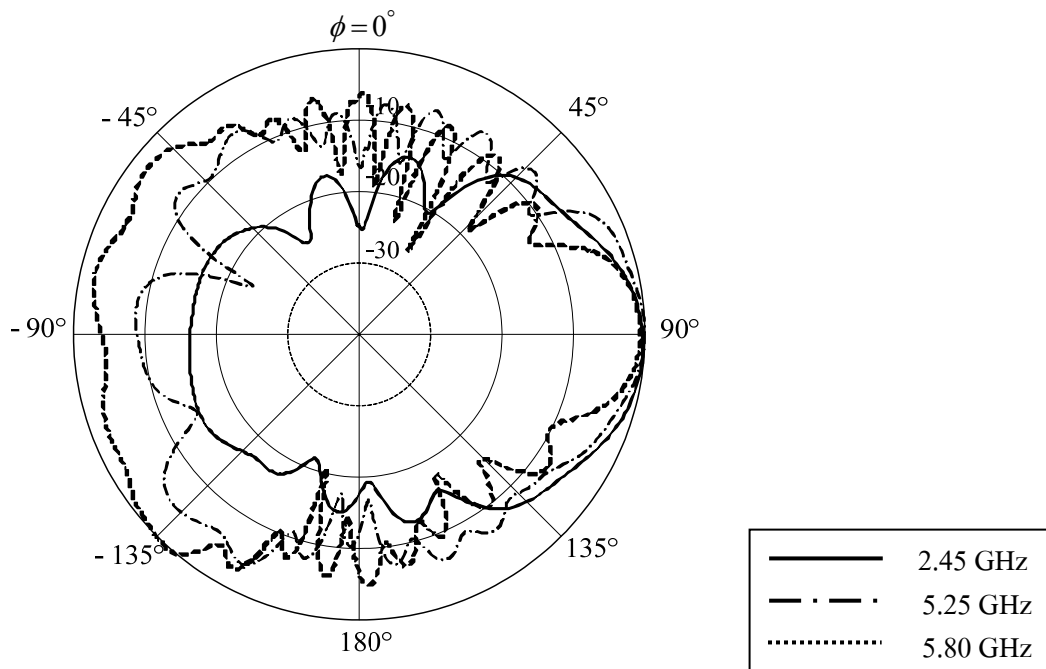


(ค) อัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 4.8 ผลจากการจำลองสายอากาศร่องแบบเรียวต้นแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST (ต่อ)



(ง) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

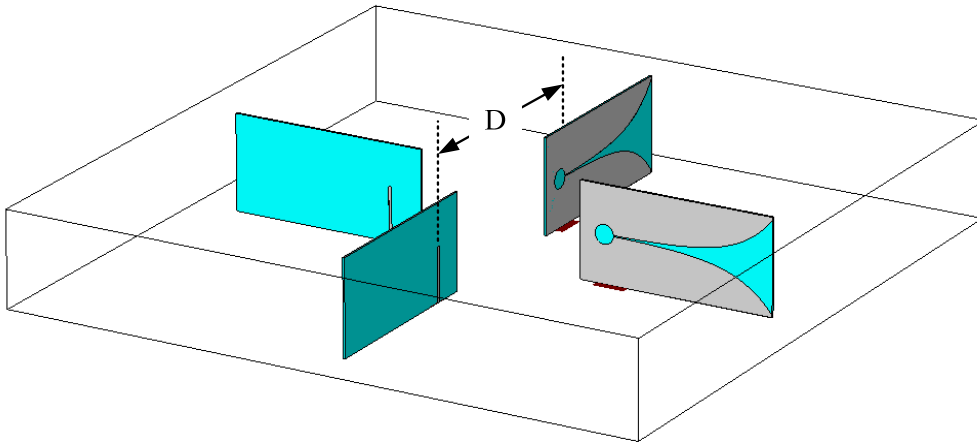


(จ) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.8 ผลจากการจำลองสายอากาศร่องแบบเรียวตันแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST (ต่อ)

#### 4.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองสายอากาศแถวลำดับวงกลม โดยใช้ร่องแบบรีขวิดด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

เมื่อได้สายอากาศร่องแบบรีขวิดต้นแบบแล้ว ในขั้นตอนนี้ต่อไป คือ การออกแบบและจำลองผลสายอากาศแถวลำดับวงกลม งานวิจัยนี้ได้ทำการจัดแถวลำดับแบบวงกลมโดยใช้สายอากาศร่องแบบรีขวิดจำนวน 4 อิลิเมนต์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.9 ทำการปรับหาระยะ (distance :  $D$ ) ที่เหมาะสมในการจัดแถวลำดับแบบวงกลม เพื่อให้สายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีแบบรูปการแผ่แบบรอบตัวในระนาบอะซิมุท สำหรับการประยุกต์ใช้งานในเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายซึ่งมีความกว้างแถบครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 6 GHz สามารถรองรับระบบการสื่อสารแบบไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 a/b/g ได้ จากนั้นได้วิเคราะห์หารูปรางของตัวสะท้อน (reflector) อะลูมิเนียมที่เหมาะสมเพื่อทำหน้าที่ในการลดคลื่นพหุหลัง (back lobe) ซึ่งได้ทำการจำลองผลสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอก สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมเอียง  $45^\circ$  และได้วิเคราะห์หาอัตราขยายสูงสุดของสายอากาศแถวลำดับวงกลมโดยการนำแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและด้านล่างของสายอากาศแถวลำดับวงกลม



รูปที่ 4.9 แบบจำลองสายอากาศแถวลำดับวงกลม

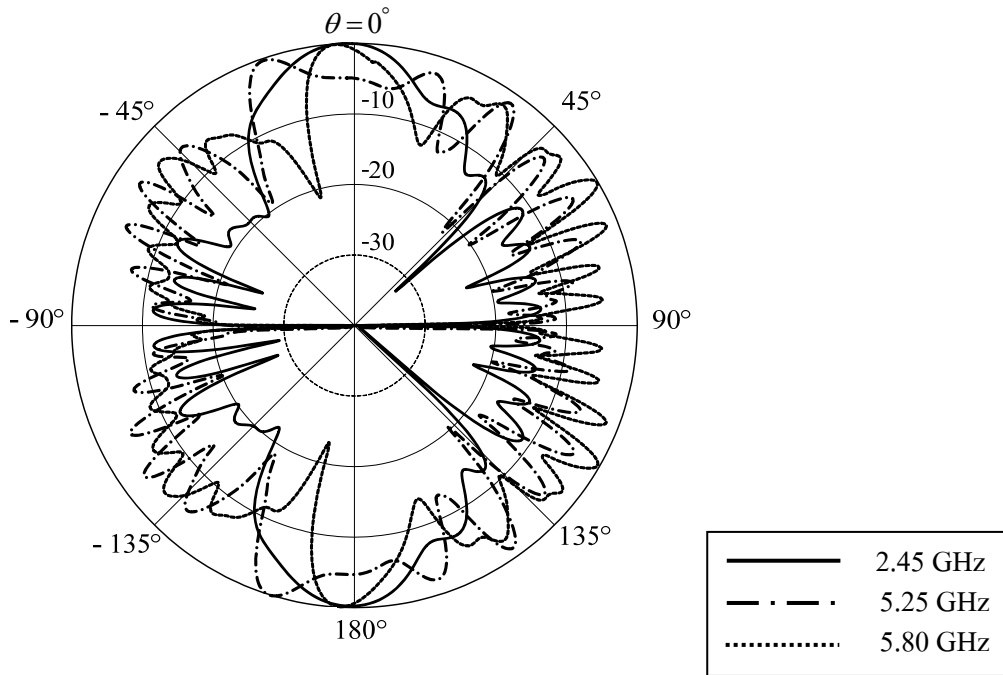
#### 4.2.1 การปรับหาระยะที่เหมาะสมในการจัดแถวลำดับ

สำหรับการปรับหาระยะที่เหมาะสมในการจัดแถวลำดับแบบวงกลม โดยกำหนดให้ระยะในการจัดแถวลำดับ หรือ  $D$  เท่ากับ 122.45 มิลลิเมตร ( $\lambda$ ) 183.67 มิลลิเมตร ( $1.5\lambda$ ) 244.9 มิลลิเมตร ( $2\lambda$ ) และ 306.12 มิลลิเมตร ( $2.5\lambda$ ) จากผลการจำลองพบว่าระยะในการจัดแถวลำดับที่เปลี่ยนไปไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่ง แต่ระยะในการจัดแถวลำดับที่เปลี่ยนไปจะมีผลต่ออัตราขยายและแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลม ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้เลือกระยะในการจัดแถวลำดับเท่ากับ 183.67 มิลลิเมตร เนื่องจากให้อัตราขยายในทุก ๆ ช่วงความถี่ใช้งานสูงสุด แสดงดังตารางที่ 4.3 รูปที่ 4.10(ก) และ (ข) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีระยะในการจัดแถวลำดับเท่ากับ 183.67 มิลลิเมตร จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ตามลำดับ

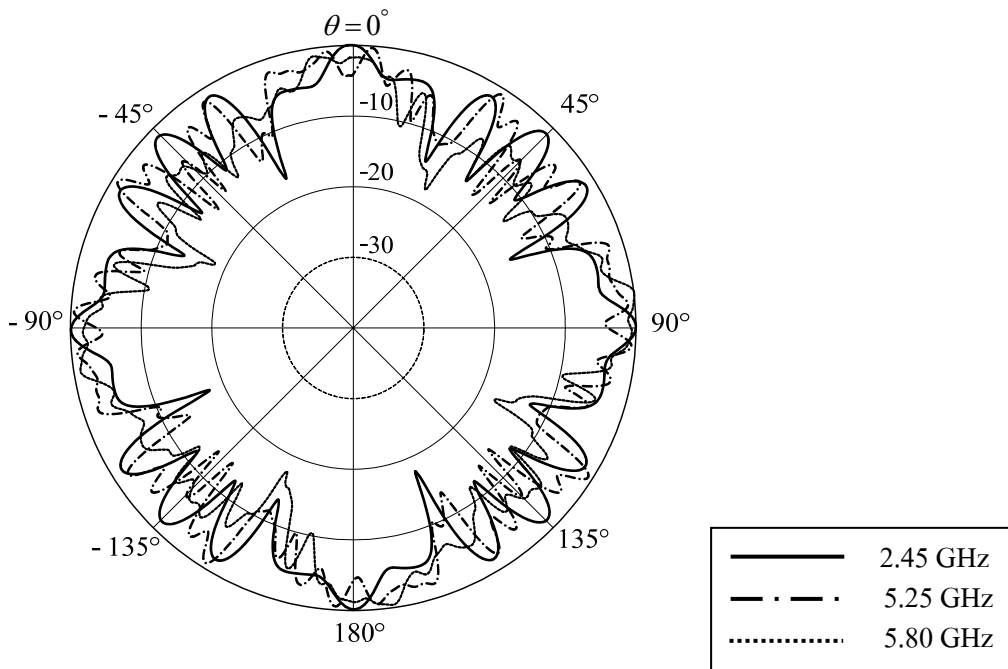
ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราขยายจากผลการจำลองสายอากาศแถวลำดับวงกลม

ความถี่ (GHz)	อัตราขยาย (dB)
2.45	7.47
5.25	6.16
5.80	5.27





(ก) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

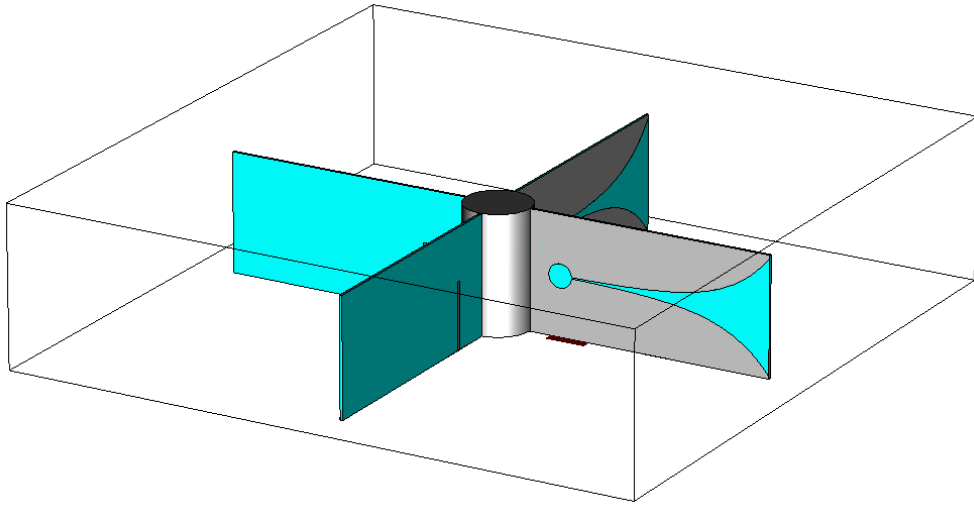
รูปที่ 4.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีระยะในการจัดแถวลำดับเท่ากับ 183.67 มิลลิเมตร จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

#### 4.2.2 การเพิ่มตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปร่างที่เหมาะสมของสายอากาศ แถวลำดับ

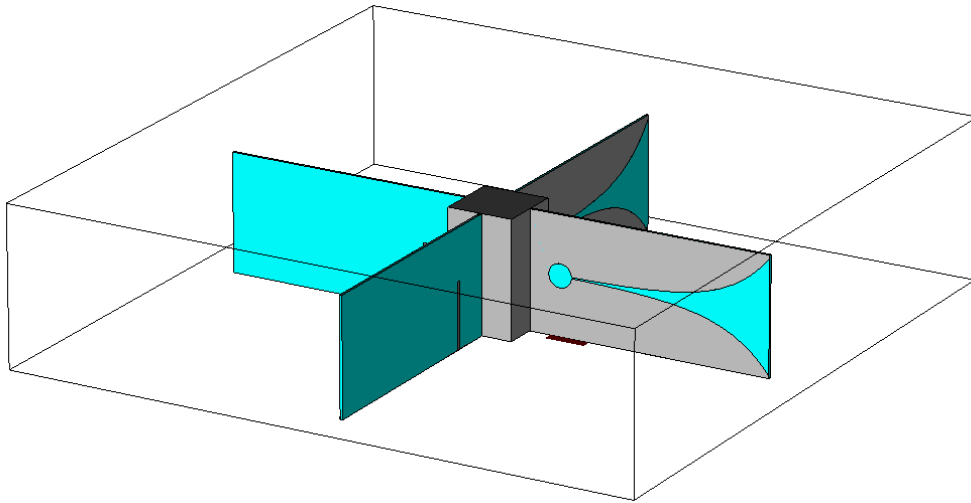
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเพิ่มตัวสะท้อนอะลูมิเนียมที่ตำแหน่งแกนกลางของสายอากาศแถวลำดับวงกลม ซึ่งจะทำหน้าที่ในการสะท้อนคลื่นพูลังให้ไปเสริมกับลำคลื่นด้านหน้า ทำให้สายอากาศแถวลำดับมีอัตราขยายที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งได้ทำการจำลองผลสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปร่างต่าง ๆ ได้แก่ (1) รูปทรงกระบอก (2) รูปทรงสี่เหลี่ยม และ (3) รูปทรงสี่เหลี่ยมเอียง  $45^{\circ}$  แสดงดังรูปที่ 4.11(ก) (ข) และ(ค) ตามลำดับ จากผลการจำลองพบว่าตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปร่างต่าง ๆ ที่เปลี่ยนไปไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่ง แต่จะมีผลต่ออัตราขยายและแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลม ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้เลือกตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกในการทำหน้าที่ลดคลื่นพูลังเนื่องจากให้อัตราขยายในทุก ๆ ช่วงความถี่ใช้งาน โดยเฉลี่ยสูงสุด แสดงดังตารางที่ 4.4 รูปที่ 4.12(ก) และ (ข) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ค่าอัตราขยายจากผลการจำลองสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปร่างต่าง ๆ

ความถี่ (GHz)	อัตราขยาย (dB)		
	รูปทรงกระบอก	รูปทรงสี่เหลี่ยม	รูปทรงสี่เหลี่ยมเอียง $45^{\circ}$
2.45	7.81	7.00	6.97
5.25	5.95	6.23	6.09
5.80	5.58	4.96	5.59

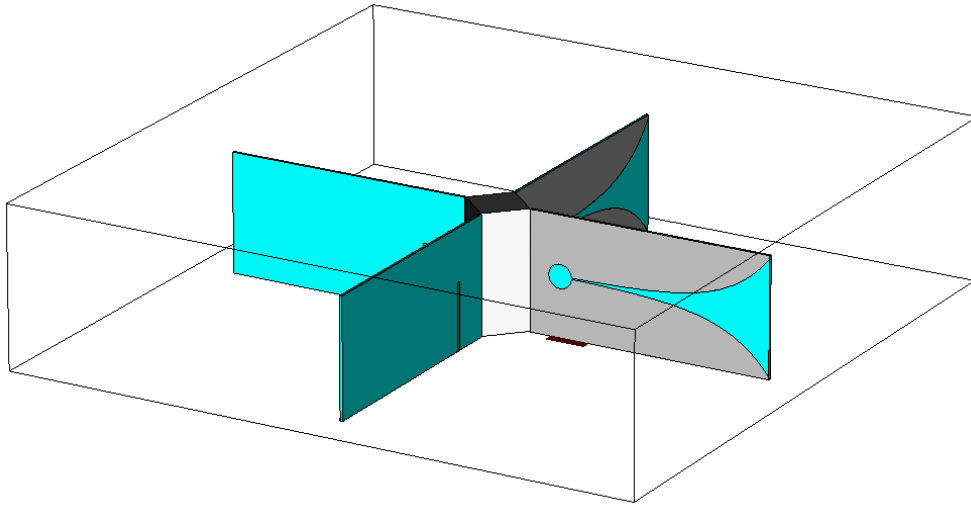


(ก) ตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอก



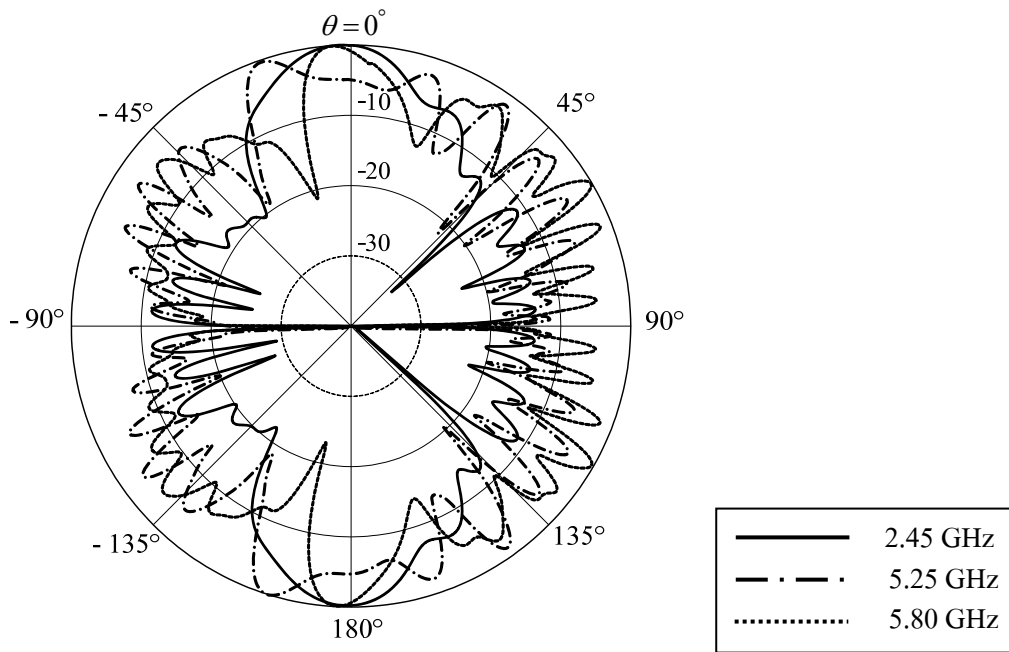
(ข) ตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงสี่เหลี่ยม

รูปที่ 4.11 สายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงต่าง ๆ

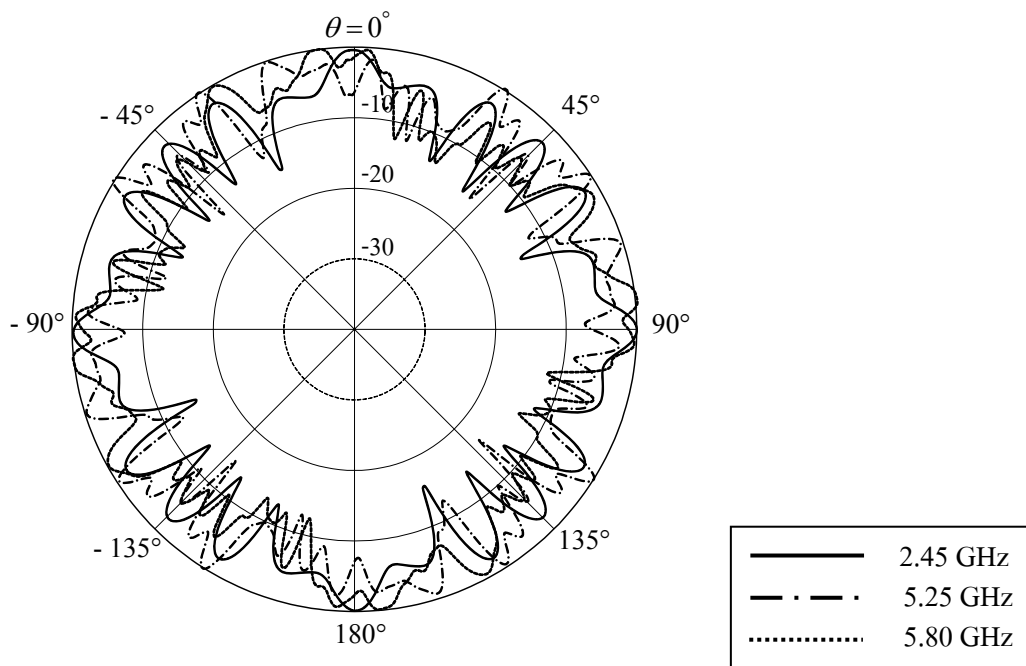


(ค) ตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงสี่เหลี่ยมเอียง  $45^\circ$

รูปที่ 4.11 สายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงต่าง ๆ (ต่อ)



(ค) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า



(ง) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

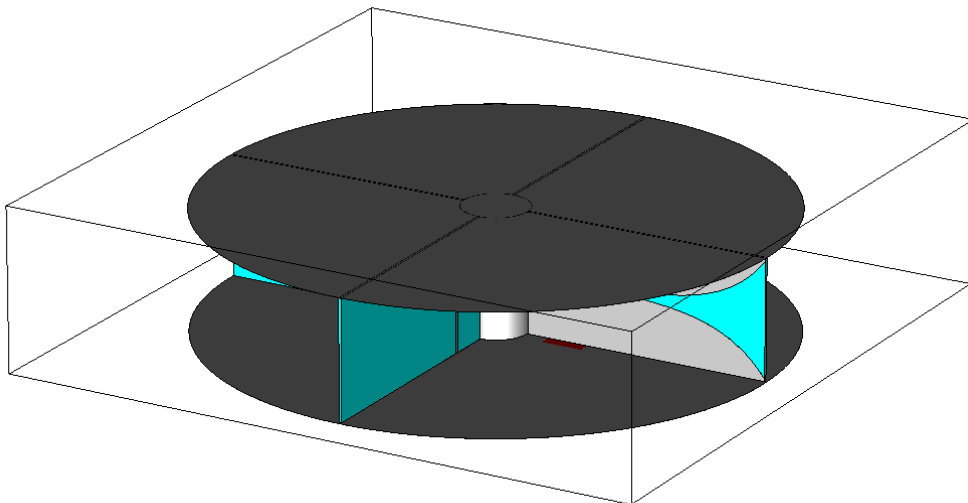
รูปที่ 4.12 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีตัวสะท้อนอะลูมิเนียม  
รูปทรงกระบอกจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

### 4.2.3 การเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศแกลวลำดับ

ในการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศแกลวลำดับวงกลมนั้น งานวิจัยนี้ ได้ใช้แผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่างของสายอากาศแกลวลำดับวงกลม โดยแผ่นอะลูมิเนียม จะทำหน้าที่ในการบีบลำคลื่นทั้งด้านบนและล่างให้เสริมกับลำคลื่นด้านหน้าและหลัง ทำให้มีแบบรูป การแผ่พลังงานในระนาบอะซิมุทที่มีระดับสัญญาณไม่แตกต่างกันในแต่ละมุมมองฯ ส่งผลให้ได้ลำคลื่น ที่ครอบคลุมพื้นที่ในแนวราบกว้างมากขึ้น และมีอัตราขยายของสายอากาศแกลวลำดับวงกลมมากขึ้นด้วย โดยการเพิ่มแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่างของสายอากาศแกลวลำดับวงกลมนี้ ไม่มีผลต่อแถบ ความกว้างและอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ แต่จะส่งผลโดยตรงต่ออัตราขยาย และแบบรูปการแผ่ พลังงานของสายอากาศแกลวลำดับวงกลม และการเพิ่มตัวสะท้อนอะลูมิเนียมที่ตำแหน่งแกนกลางของ สายอากาศแกลวลำดับวงกลม ซึ่งจะทำหน้าที่ในการสะท้อนคลื่นพูลังให้ไปเสริมกับลำคลื่นด้านหน้า ทำให้ได้อัตราขยายที่เพิ่มสูงขึ้น โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองผลสายอากาศแกลวลำดับวงกลมที่มี แผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่าง และตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงต่าง ๆ ได้แก่ (1) รูปทรงกระบอก (2) รูปทรงสี่เหลี่ยม และ (3) รูปทรงสี่เหลี่ยมเอียง  $45^{\circ}$  แสดงดังรูปที่ 4.13(ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ จากผลการจำลองพบว่าสายอากาศแกลวลำดับวงกลมที่มีแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่างจะมีอัตราขยาย ที่สูงกว่า และสายอากาศแกลวลำดับวงกลมที่ใช้ตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกจะมีอัตราขยายสูง ที่สุด แสดงดังตารางที่ 4.5 ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากตารางที่ 4.4 ดังนั้นจะทำให้ได้สายอากาศแกลวลำดับวงกลมต้นแบบ คือ สายอากาศแกลวลำดับวงกลมที่มีที่มีระยะในการจัดแกลวลำดับเท่ากับ 183.67 มิลลิเมตร ใช้ตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกและมีแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่างของ สายอากาศ จากรูปที่ 4.14 แสดงผลการจำลองสายอากาศแกลวลำดับวงกลมต้นแบบ ซึ่งได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับดังรูปที่ 4.14(ก) อัตราส่วนคลื่นนิ่งดังรูปที่ 4.14(ข) แบบรูปการแผ่ พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 4.14(ค) และ (ง) ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าสายอากาศแกลวลำดับวงกลมต้นแบบมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบตัวในระนาบ เดียวที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย และมีอัตราขยายของ สายอากาศที่สูง

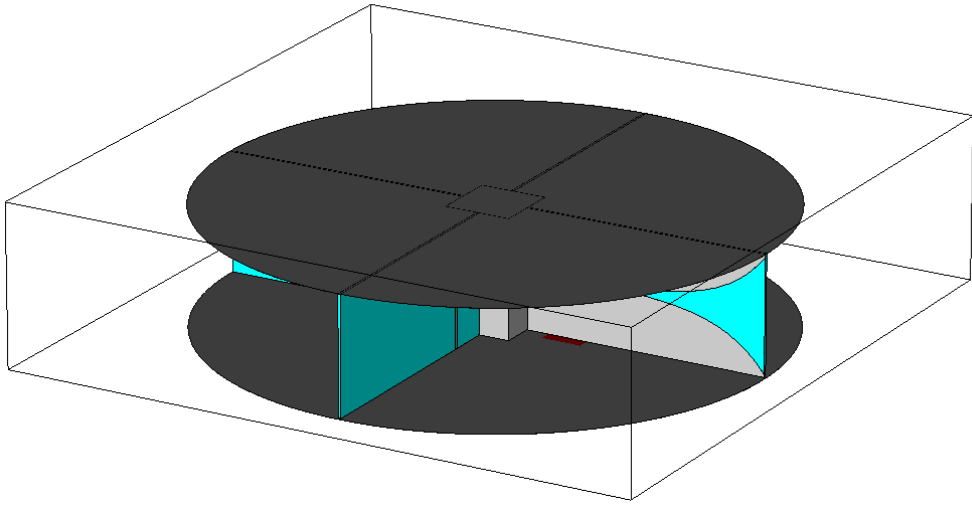
ตารางที่ 4.5 ค่าอัตราขยายจากผลการจำลองสายอากาศแกลวลำดับวงกลมที่มีแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่าง และมีตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงต่าง ๆ

ความถี่ (GHz)	อัตราขยาย (dB)		
	รูปทรงกระบอก	รูปทรงสี่เหลี่ยม	รูปทรงสี่เหลี่ยมเอียง 45°
2.45	12.31	11.80	11.69
5.25	10.03	9.66	8.90
5.80	8.32	8.59	7.32

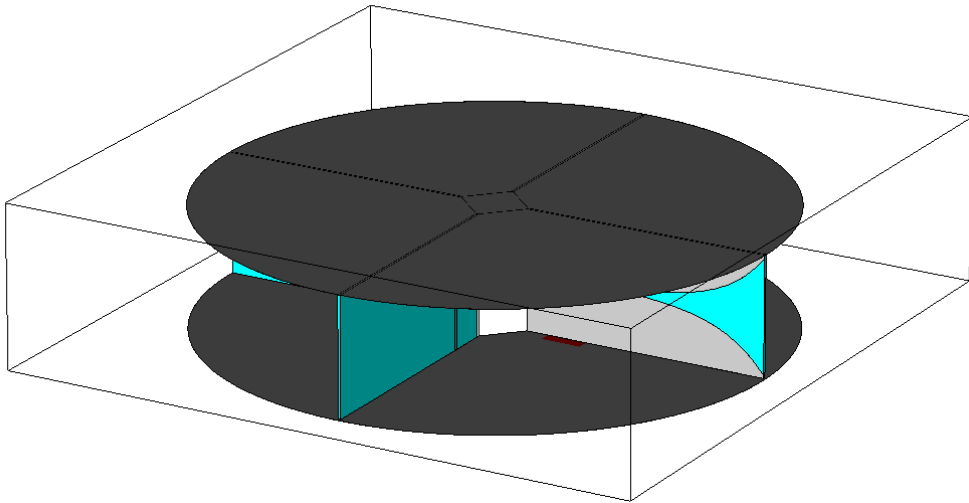


(ก) ตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอก

รูปที่ 4.13 แบบสายอากาศแกลวลำดับวงกลมที่มีแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่าง และตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงต่าง ๆ



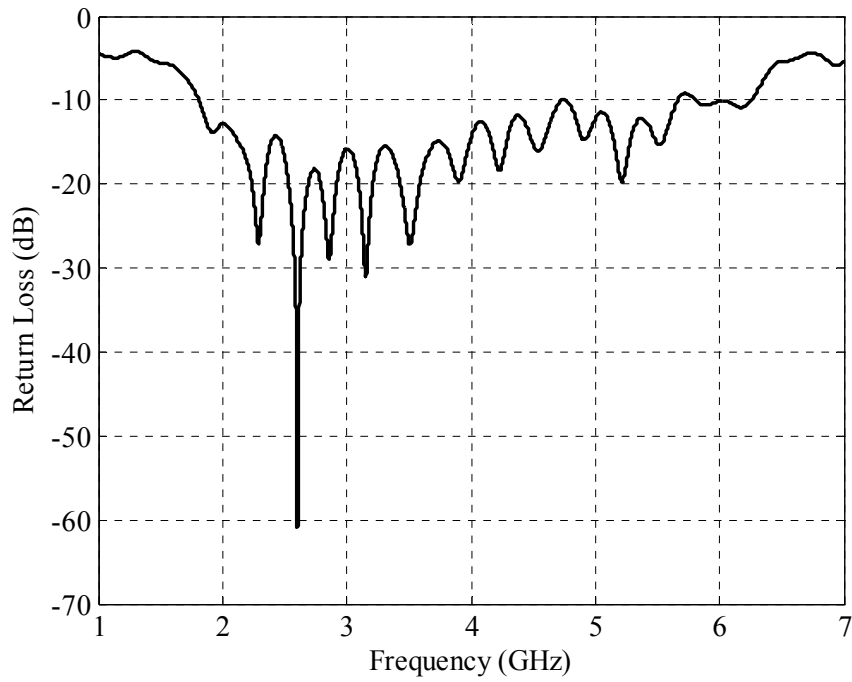
(ข) ตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงสี่เหลี่ยม



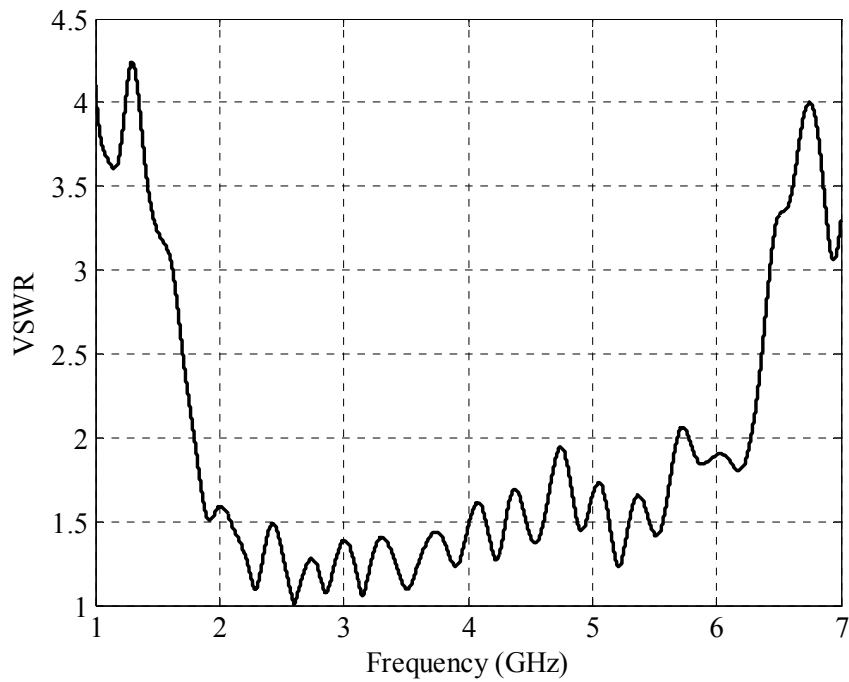
(ค) ตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงสี่เหลี่ยมเอียง  $45^\circ$

รูปที่ 4.13 แบบสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่าง และตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงต่าง ๆ (ต่อ)



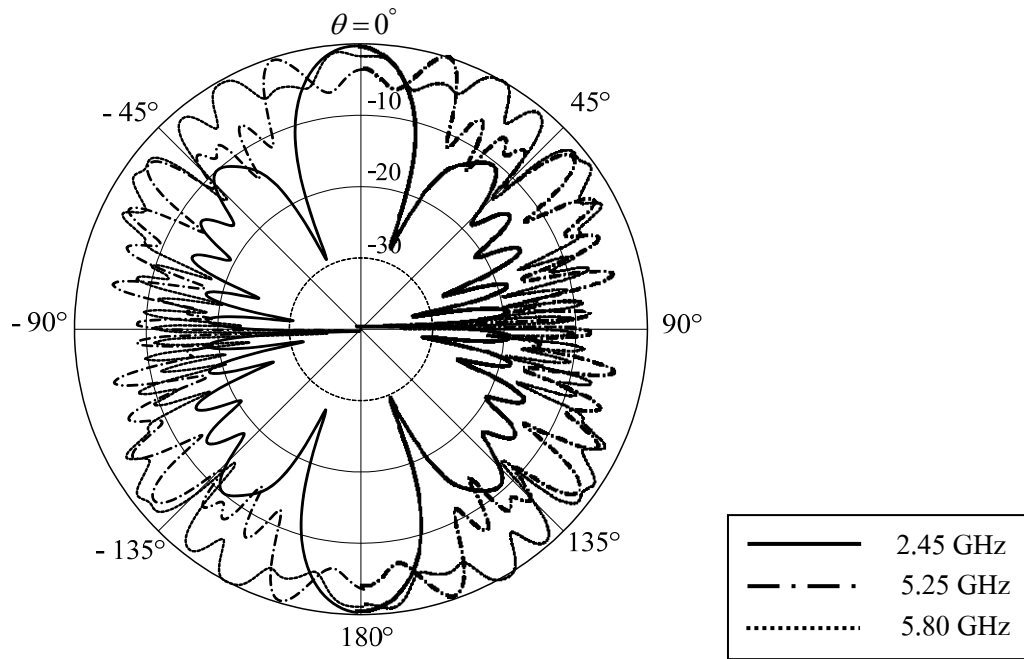


(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

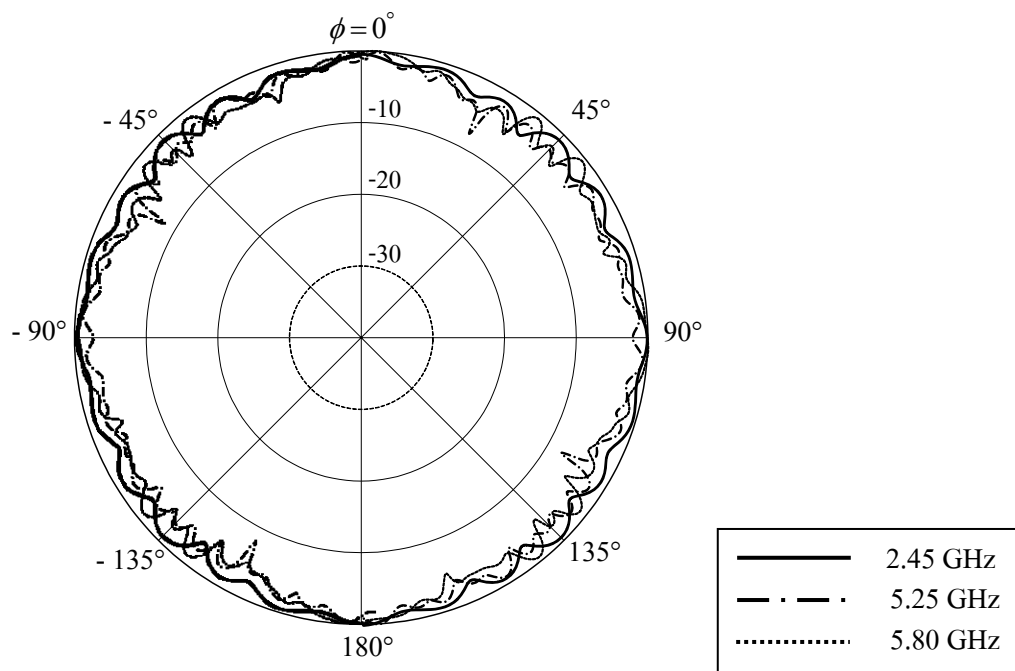


(ข) อัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 4.14 ผลการจำลองสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST



(ค) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า



(ง) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

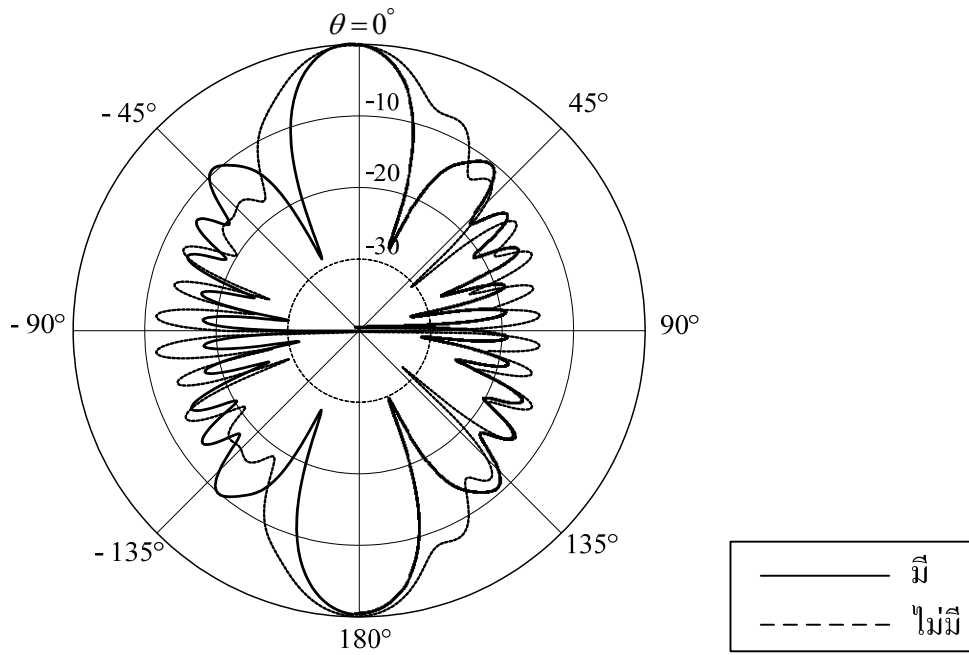
รูปที่ 4.14 ผลการจำลองสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST (ต่อ)

จากการออกแบบและจำลองผลสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST จะเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz มีตำแหน่งของระดับสัญญาณที่ต่ำสุดเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่มุม  $\theta = \pm 23^\circ$  และ  $\theta = \pm 157^\circ$  ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของการใส่แผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่างของสายอากาศ และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการจำลองสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกระหว่างมีและไม่มีแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่าง จะเห็นได้ว่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่างจะมีอัตราขยายที่สูงกว่า แสดงดังตารางที่ 4.6 และยังมีแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบอะซิมุท หรือระนาบสนามแม่เหล็กที่มีระดับของสัญญาณเฉลี่ยไม่แตกต่างกันมากในแต่ละมุมทั้ง 3 แถบความถี่ รูปที่ 4.15 แสดงกราฟเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกระหว่างมีและไม่มีแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่าง โดยรูปที่ 4.15(ก) (ค) และ (จ) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz 5.25 GHz และ 5.8 GHz ตามลำดับ และรูปที่ 4.15(ข) (ง) และ (ฉ) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 2.45 GHz 5.25 GHz และ 5.8 GHz ตามลำดับ

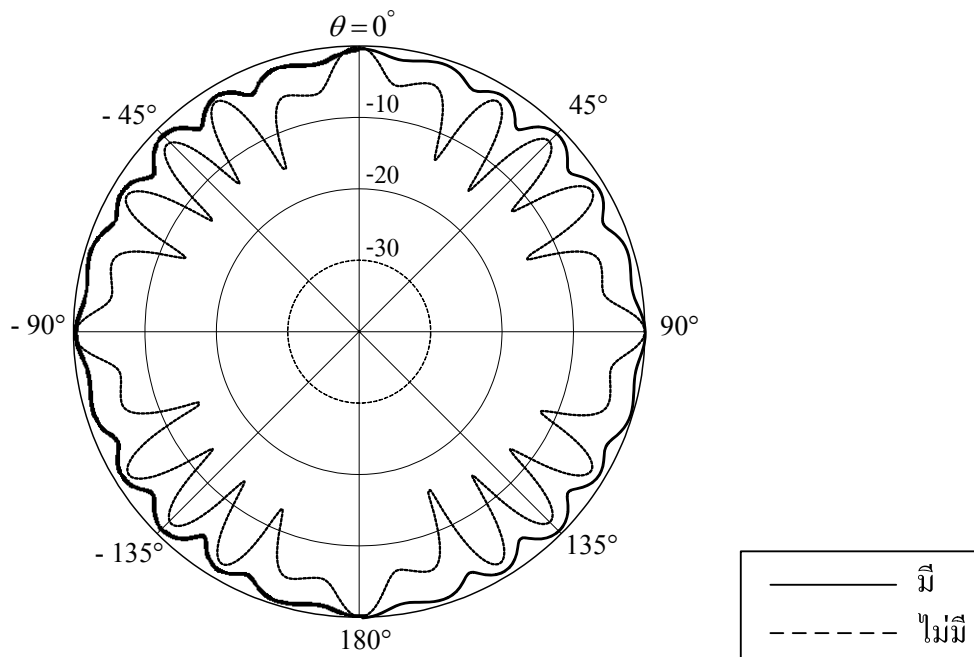
ตารางที่ 4.6 ค่าอัตราขยายจากผลการจำลองของสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่มีตัวสะท้อน

อะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกระหว่างมีและไม่มีแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่าง

ความถี่ (GHz)	สายอากาศแถวลำดับวงกลมไม่มีแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่าง	สายอากาศแถวลำดับวงกลมมีแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่าง
	อัตราขยาย (dB)	อัตราขยาย (dB)
2.45	7.81	12.31
5.25	5.95	10.03
5.80	5.58	8.32

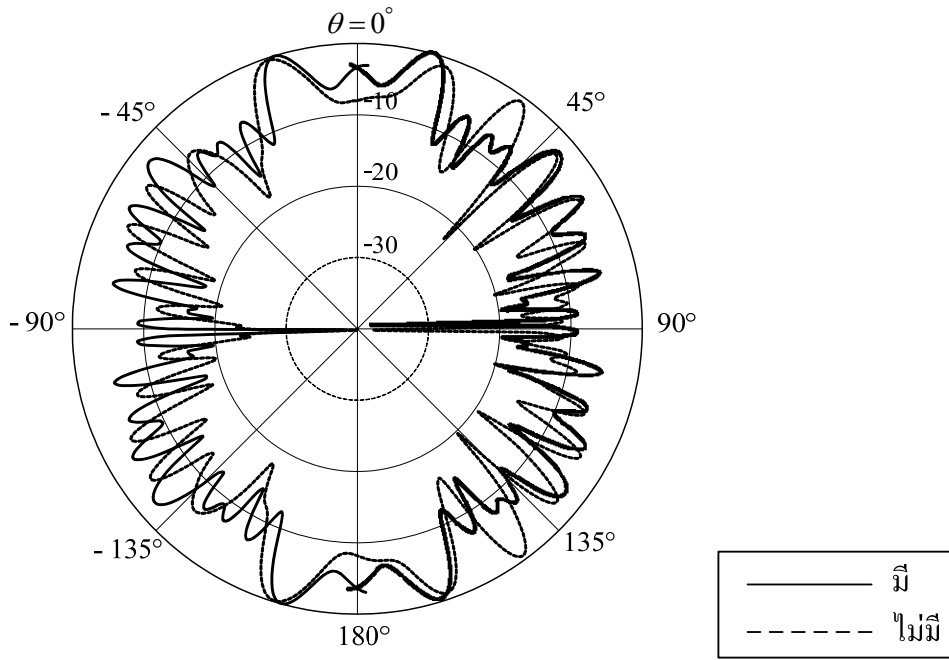


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz

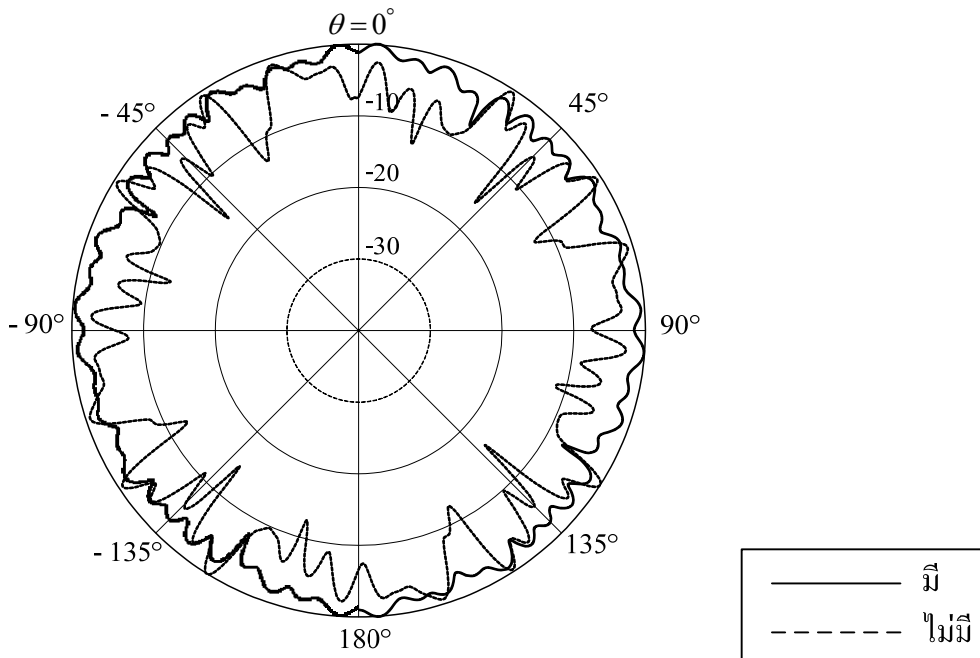


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 2.45 GHz

รูปที่ 4.15 ผลจากการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลม

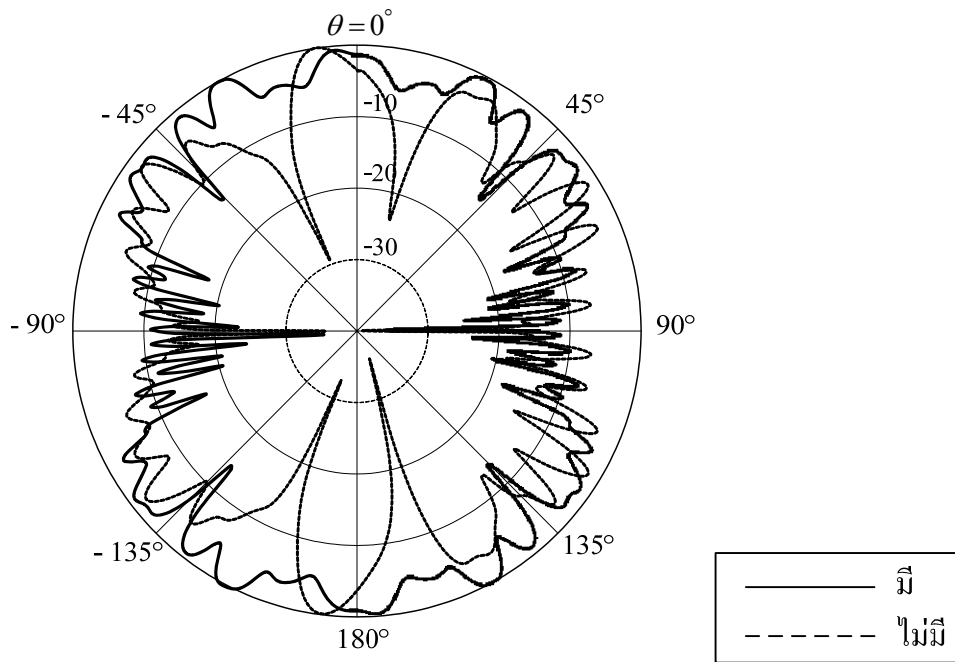


(ค) ระบุทิศทางไฟฟ้าที่ความถี่ 5.25 GHz

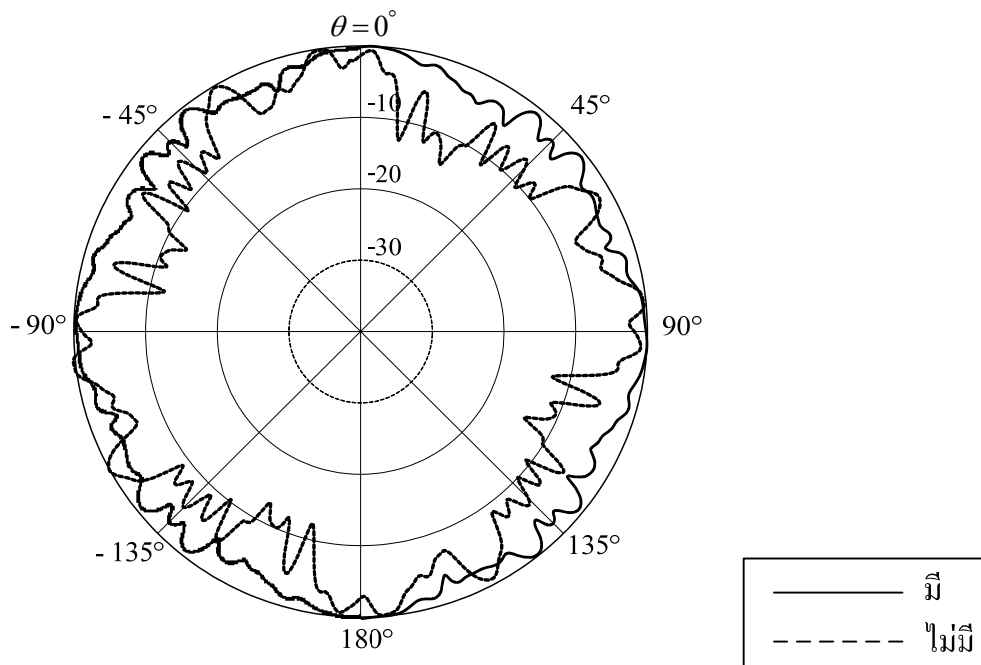


(ง) ระบุทิศทางแม่เหล็กที่ความถี่ 5.25 GHz

รูปที่ 4.15 ผลจากการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลม (ต่อ)



(จ) ระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 5.8 GHz



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 4.15 ผลจากการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลม (ต่อ)

### 4.3 สรุป

สำหรับบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบ และวิเคราะห์สายอากาศแถวลำดับวงกลมโดยใช้ร่องแบบเรียว ซึ่งในขั้นแรกได้ทำการศึกษาโครงสร้างของสายอากาศร่องแบบเรียว จากนั้นทำการวิเคราะห์และออกแบบ เพื่อให้ได้สายอากาศร่องแบบเรียวต้นแบบสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย โดยทำการจัดแถวลำดับแบบวงกลมเพื่อให้สายอากาศมีคุณสมบัติเป็นสายอากาศแบบรอบตัว ที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานครอบคลุมพื้นที่กว้างในระนาบอะซิมุท โดยได้มีการเพิ่มตัวสะท้อนอะลูมิเนียมที่ตำแหน่งแกนกลางของสายอากาศแถวลำดับวงกลมเพื่อลดคลื่นพหุหลัง และได้นำแผ่นอะลูมิเนียมมาปิดด้านบนและล่างของสายอากาศแถวลำดับวงกลมเพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ โดยได้ทำการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ก่อน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของสายอากาศแถวลำดับวงกลมสำหรับการนำไปสร้างสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบต่อไป

## บทที่ 5

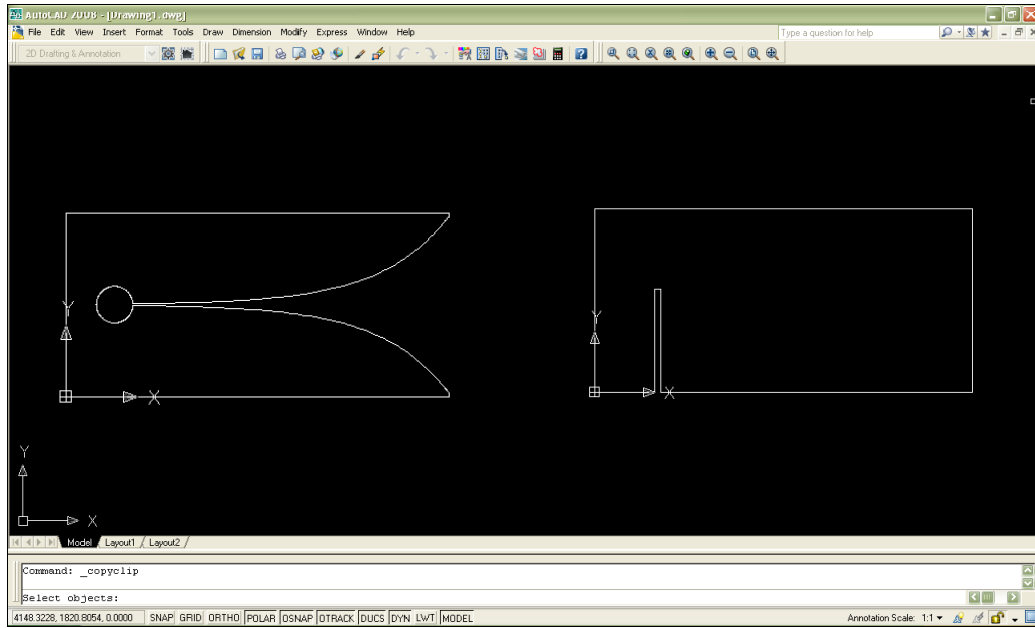
### ผลการวัดทดสอบ

จากทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ตลอดจนการออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศแถวลำดับวงกลมดังกล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 และ 4 ดังนั้นในบทที่ 5 นี้ จะกล่าวถึงการสร้างสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบขึ้น เพื่อทำการวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง แบบรูปการแผ่พลังงานทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก อิมพีแดนซ์ และอัตราขยาย โดยมีตัวแบ่งกำลังงาน (power divider) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการส่งผ่านพลังงานจากเครื่องส่งไปยังสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ โดยในการวัดทดสอบคุณลักษณะข้างต้น จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) รุ่น HP8720C สุดท้ายได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ทั้งสายอากาศร่องแบบเรียวต้นแบบหนึ่งอิลิเมนต์และสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ

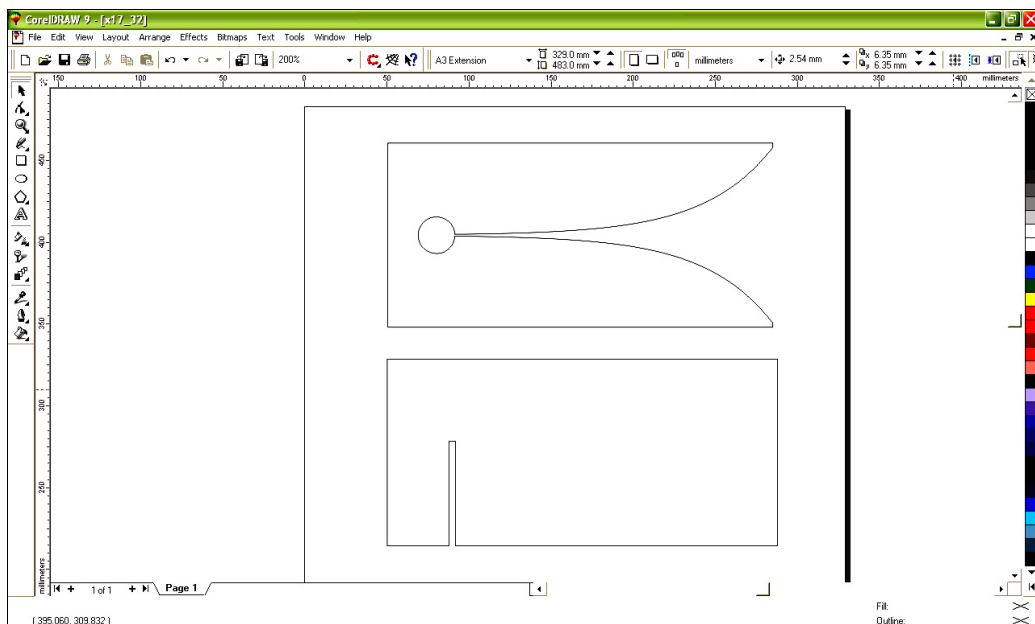
#### 5.1 วิธีการสร้างสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ

จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 จนได้ขนาดและรูปแบบของแถวลำดับของสายอากาศตามที่ต้องการ โดยผลจากการจำลองจะมีนามสกุลเพิ่มข้อมูลคือ MOD ซึ่งจะต้องนำไฟล์ออก (export file) จากโปรแกรมสำเร็จรูป CST และบันทึกข้อมูลนามสกุลเพิ่มข้อมูลที่ได้ คือ ชื่อเพิ่มข้อมูลนามสกุล DXF เมื่อได้เพิ่มข้อมูลแล้ว ได้นำไปจัดแต่งรูปร่างของสายอากาศด้วยโปรแกรม Auto CAD 2008 แสดงดังรูปที่ 5.1 ก่อนนำไปตัดสติ๊กเกอร์โดยใช้โปรแกรม CoreIDRAW 9 ดังรูปที่ 5.2 เพื่อนำไปใช้ในการสร้างสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 5.3 ซึ่งได้ใช้แผ่นไมโครสตริปชนิด FR4 จากนั้นนำสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบต่อเข้ากับหัวต่อชนิด SMA 50 โอห์ม โดยรูปที่ 5.3(ก) แสดงสายอากาศร่องแบบเรียวต้นแบบที่สร้างเสร็จแล้ว และรูปที่ 5.3(ข) เป็นสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบที่ถูกปิดด้านบนและด้านล่างด้วยแผ่นอะลูมิเนียม เพื่อให้ช่วยในการบีบอัดคลื่นให้สามารถครอบคลุมพื้นที่ในระนาบอะซิมูทให้กว้างขึ้นและเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ ตลอดจนเพิ่มความสะดวกสำหรับการวัดทดสอบและการนำไปใช้งานจริง และมีอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อน ที่ตำแหน่งแกนกลางของสายอากาศแถวลำดับวงกลม สำหรับสะท้อนคลื่นพูลังให้แผ่ออกไปด้านหน้าทั้งหมด ซึ่งจะมีผลทำให้ได้อัตราขยายเพิ่มขึ้น

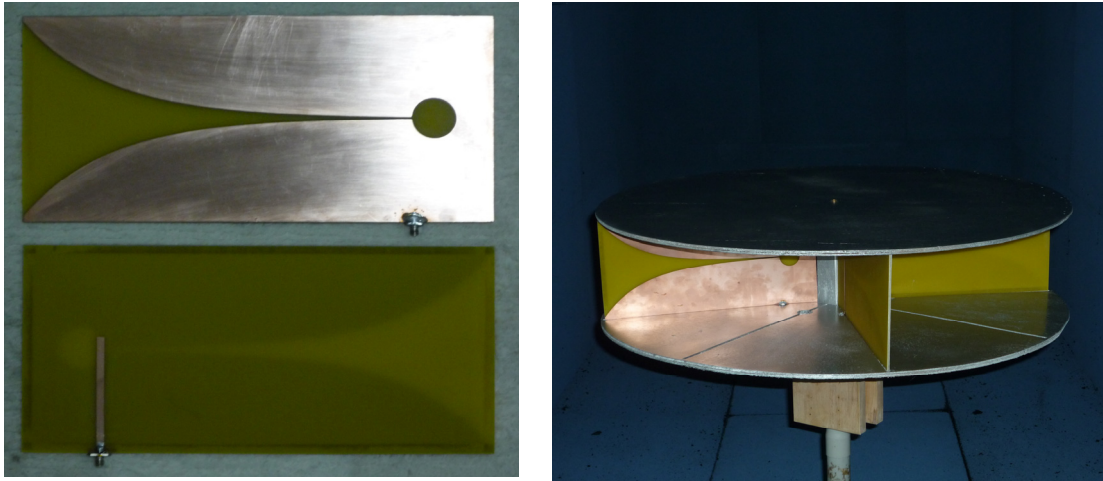




รูปที่ 5.1 โปรแกรม AutoCAD 2008 กำหนดการกัดและตัดแผ่น PCB



รูปที่ 5.2 โปรแกรม CoreIDRAW 9 กำหนดการตัดแผ่น PCB



(ก) สายอากาศร่องแบบรีเวดต้นแบบที่สร้าง      (ข) สายอากาศแฉวลำดับวงกลมต้นแบบที่สร้าง

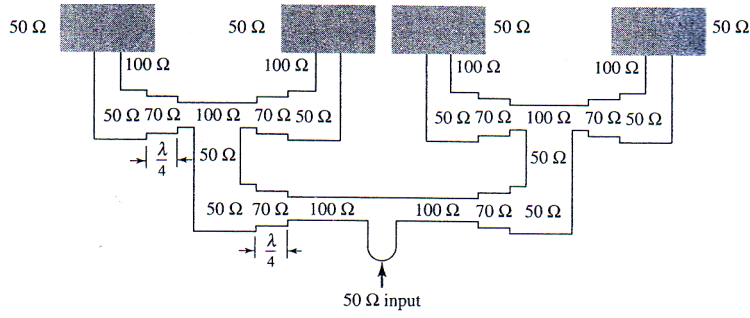
รูปที่ 5.3 สายอากาศที่สร้างขึ้น

## 5.2 ผลการวัดทดสอบตัวแบ่งกำลังงาน

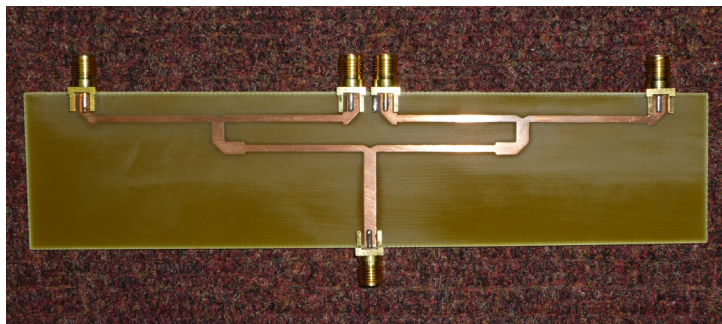
ในรายงานฉบับนี้ได้ใช้ตัวแบ่งกำลังงานเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการแบ่งกำลังจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (อุปกรณ์ภาคส่ง) จากหนึ่งพอร์ตด้านเข้าให้เป็นสี่พอร์ตด้านออกตามจำนวนของสายอากาศร่องแบบรีเวด โดยมีลายวงจรในการออกแบบและตัวแบ่งกำลังงานที่สร้างแสดงดังรูปที่ 5.4(ก) และ (ข) ตามลำดับ และสมการสำหรับคำนวณหาขนาดความกว้างของเส้นสตริป คือ

$$H' = \frac{Z_0 \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left( \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left( \ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{\pi} \right) \quad (5.1)$$

$$\frac{W_1}{h} = \left( \frac{(\exp H')}{8} - \frac{1}{4(\exp H')} \right)^{-1} \quad (5.2)$$



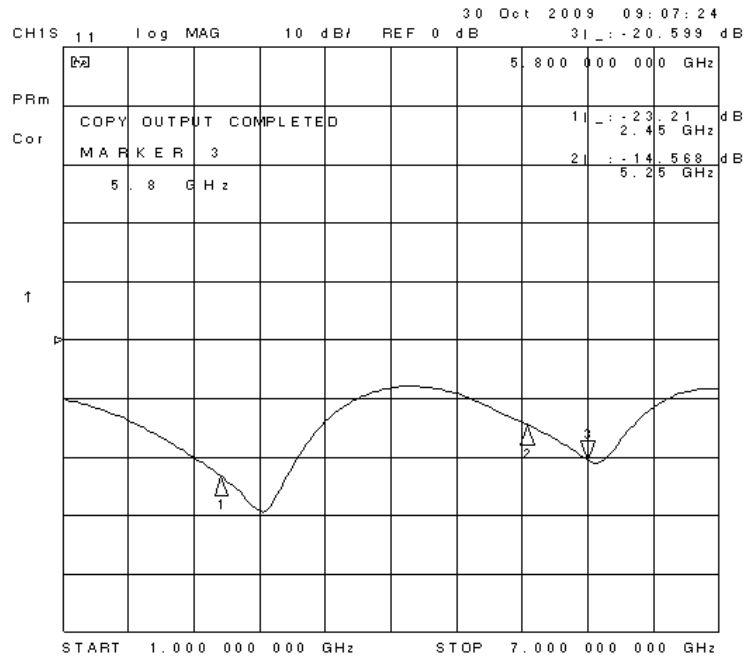
(ก) ลายวงจรที่ใช้ในการออกแบบตัวแบ่งกำลังงาน



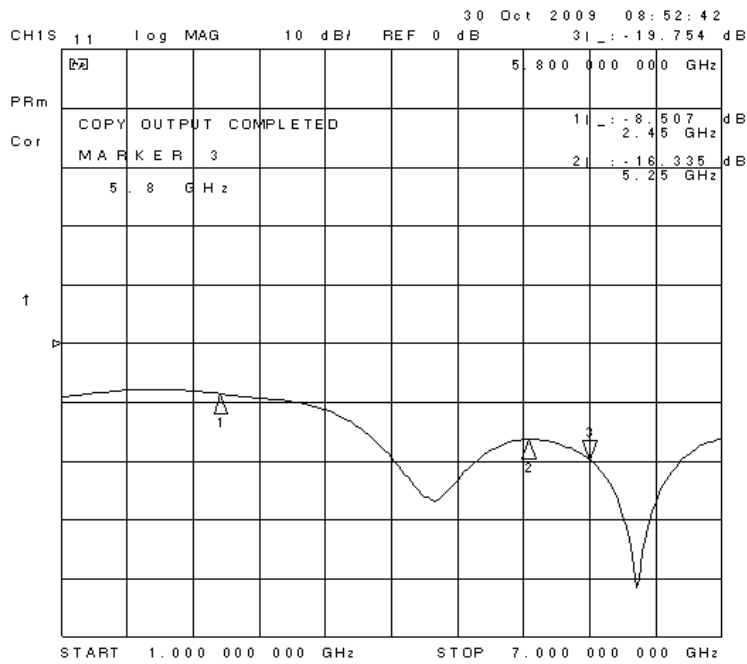
(ข) ตัวแบ่งกำลังงานที่สร้าง

รูปที่ 5.4 ตัวแบ่งกำลังงาน

โดยที่  $W_1$  คือ ความกว้างของไมโครสตริป  $\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก  $Z_0$  คือ อิมพีแดนซ์  
 คุณลักษณะ และ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น จากการออกแบบตามสมการที่ (4.1) และ (4.2) จะได้ความ  
 กว้างของสตริปที่  $Z_0 = 50 \Omega$  เท่ากับ 3.06 มิลลิเมตรที่  $Z_0 = 70 \Omega$  เท่ากับ 1.62 มิลลิเมตรที่  
 $Z_0 = 100 \Omega$  เท่ากับ 0.71 มิลลิเมตร สำหรับการวัดทดสอบการแมตช์ของตัวแบ่งกำลังนั้นได้ทำการวัด  
 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่แต่ละพอร์ตของตัวแบ่งกำลัง โดยพอร์ตที่ทำการวัดทดสอบนั้นจะ  
 ต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายและพอร์ตที่เหลือจะต่อเข้ากับหัวต่อ 50 Ω ถ้า ณ ความถี่ที่พิจารณา  
 มีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB แสดงว่ามีการแมตช์ที่สมบูรณ์ และจากการวัดทดสอบได้ผลดังรูปที่  
 5.5(ก) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่พอร์ตด้านเข้า รูปที่ 5.5(ข) ถึง (จ) แสดงค่า  
 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่พอร์ตด้านออกซึ่งก็คือพอร์ตที่ต่อเชื่อมกับสายอากาศร่องแบบเรียว  
 พอร์ตที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ

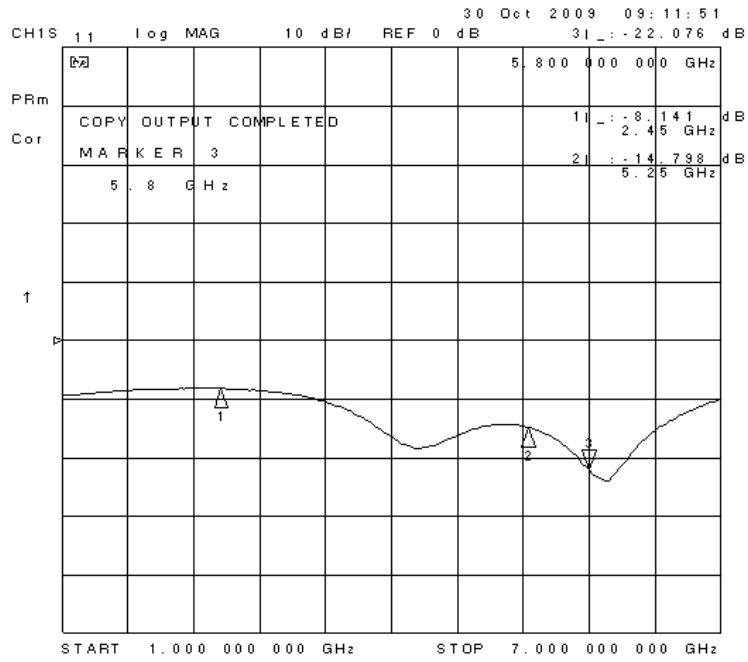


(ก) ที่พอร์ตด้านเข้า

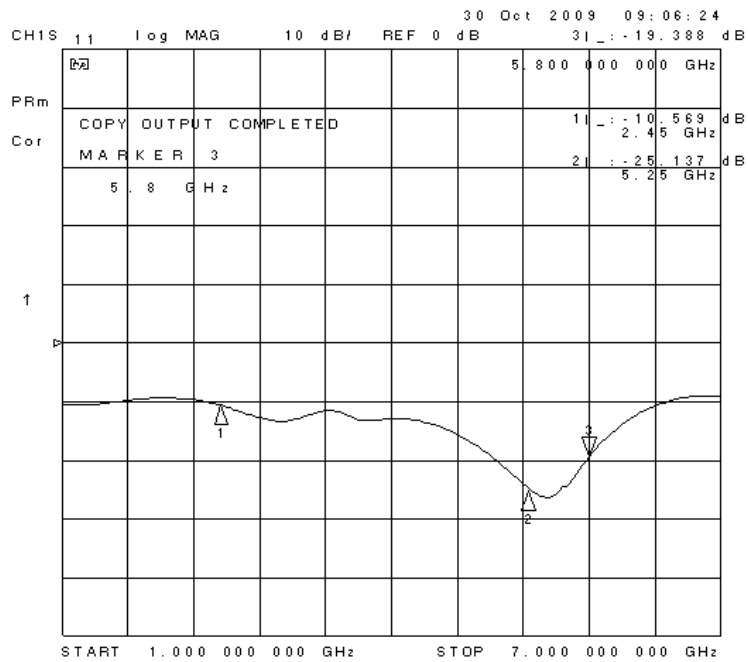


(ข) ที่พอร์ตด้านออกที่ 1

รูปที่ 5.5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับตัวแบ่งกำลังงาน

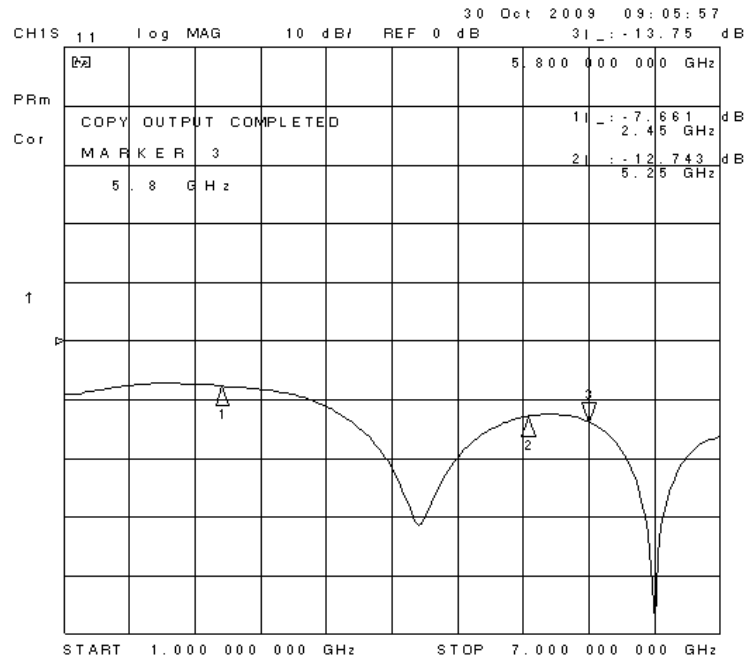


(ค) ที่พอร์ตด้านออกที่ 2



(ง) ที่พอร์ตด้านออกที่ 3

รูปที่ 5.5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับตัวแบ่งกำลังงาน (ต่อ)



(จ) ที่พอร์ตด้านออกที่ 4

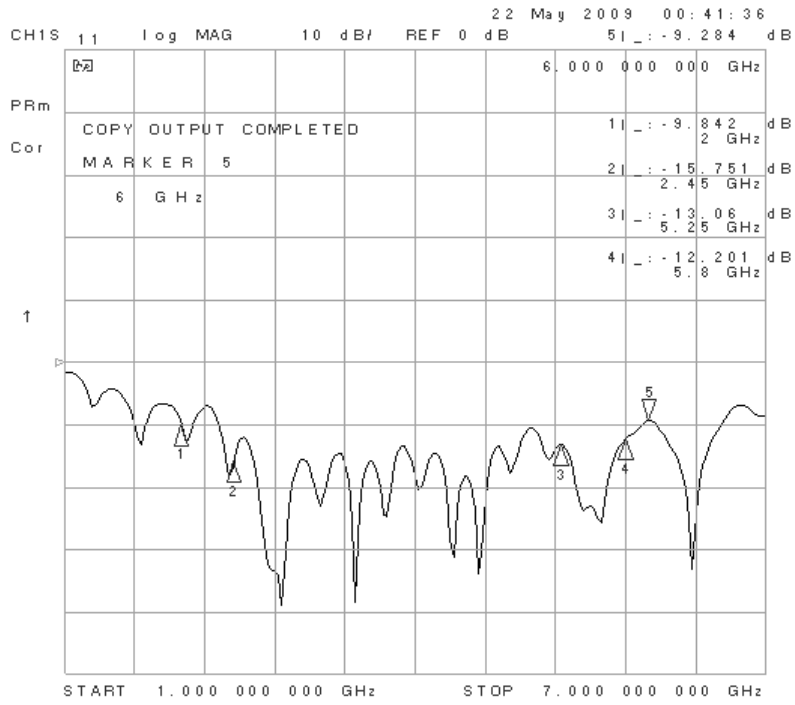
## รูปที่ 5.5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับตัวแบ่งกำลังงาน (ต่อ)

จากผลการวัดทดสอบตัวแบ่งกำลังงาน จะเห็นว่าที่พอร์ตด้านออกทั้ง 4 พอร์ต มีการแมตซ์ยังไม่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะมีผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานรวมของสายอากาศแถวลำดับวงกลม ต้นแบบที่วัดได้ ดังนั้นจึงได้ทำการทำให้เป็นบรรทัดฐาน (normalization) ของผลวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

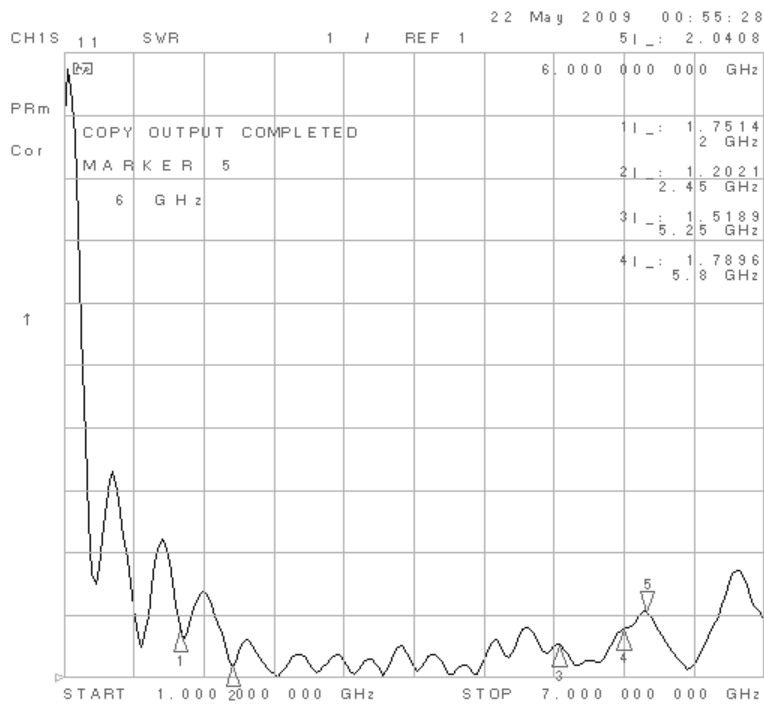
### 5.3 ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความกว้างแถบ

สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาการแมตช์อิมพีแดนซ์ด้านเข้า คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (reflection coefficient) หรือในรูปของพารามิเตอร์  $S_{11}$  และ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR) ในการพิจารณาค่าพารามิเตอร์  $S_{11}$  หมายถึงการสะท้อนกลับของกำลังไฟฟ้าด้านเข้า (port 1) ของสายอากาศ ซึ่งขนาดของ  $S_{11}$  อาจจะมีค่าได้ตั้งแต่ 0 dB ถึง ลบอนันต์ (negative infinity dB) ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 dB แสดงว่าไม่แมตช์อย่างสมบูรณ์ และถ้ามีค่าเป็นลบอนันต์ แสดงว่ามีการแมตช์ที่สมบูรณ์ที่สุด (รังสรรค์ วงศ์สรรค์ และ ชูวงศ์, ม.ป.ป) สำหรับค่า SWR สามารถมีค่าต่ำสุดตั้งแต่ 1 ถึงอนันต์ โดยถ้า SWR มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าสายอากาศนั้นมีการแมตช์ที่สมบูรณ์หมายความว่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าที่ป้อนให้กับสายอากาศมีการแผ่พลังงานออกไปทั้งหมดไม่มีการสะท้อนกลับมา และถ้าสายอากาศมีค่า SWR เท่ากับอนันต์ หมายความว่าสายอากาศนั้นไม่แมตช์ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งออกไปเกิดการสะท้อนกลับมาทั้งหมด ส่งผลให้เครื่องส่งได้รับความเสียหายได้ ในงานประยุกต์ต่าง ๆ ค่าของ  $S_{11}$  จะยอมรับได้ถ้ามีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งจะสอดคล้องกับค่า SWR เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า แสดงว่ามีการแมตช์ที่ดี จากรูปที่ 5.6(ก) แสดงกราฟค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแฉวลำดับวงกลมต้นแบบในรูปของพารามิเตอร์  $S_{11}$  จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าสายอากาศแฉวลำดับวงกลมต้นแบบที่ได้ทำการสร้างขึ้นนั้นมีค่า  $S_{11}$  ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 6 GHz ซึ่งสอดคล้องกับค่า SWR ที่มีค่าต่ำกว่า 2 ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 6 GHz เช่นกัน แสดงดังรูปที่ 5.6(ข)

รูปที่ 5.7(ก) และ (ข) แสดงกราฟเปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งตามลำดับ



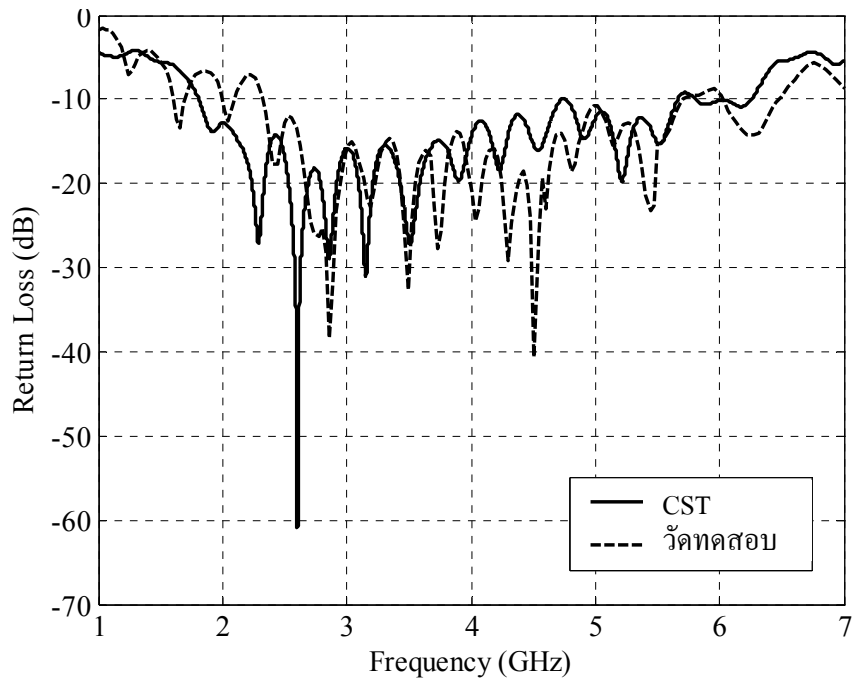
(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ



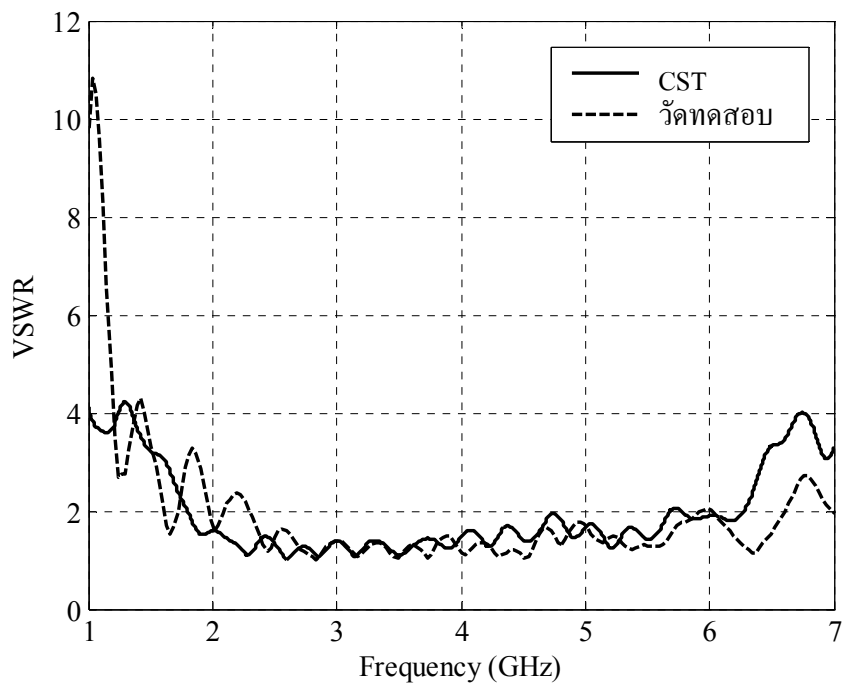
(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 5.6 ผลการวัดทดสอบของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ





(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

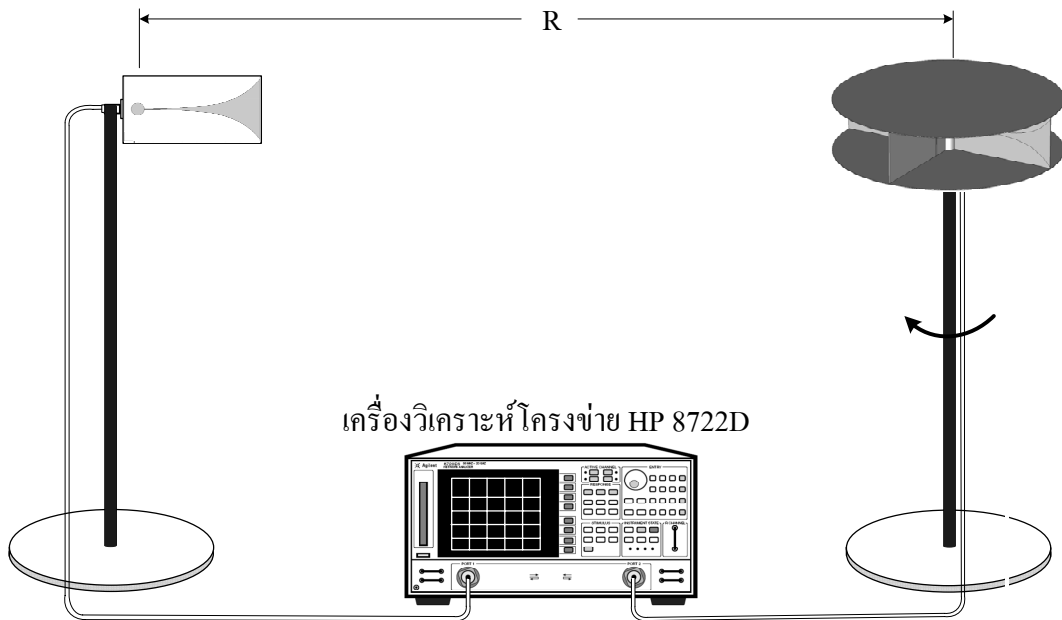


(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

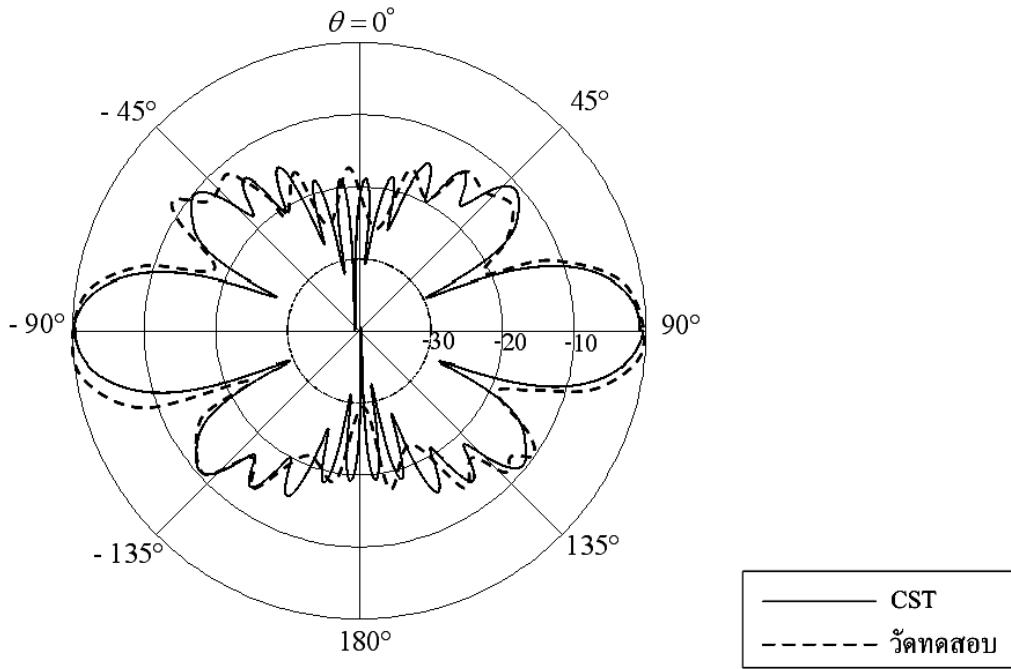
รูปที่ 5.7 ผลการวัดทดสอบและการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ

#### 5.4 ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

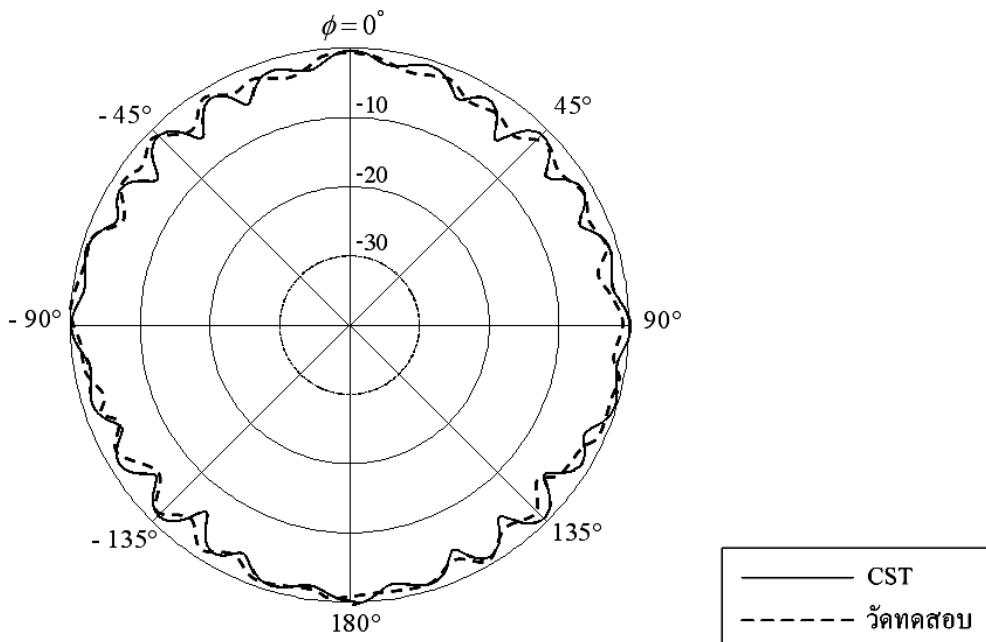
จากรูปที่ 5.8 แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยทำการทดสอบในระยะสนามระยะไกล คือ  $R \geq 2D^2 / \lambda$  ซึ่ง  $R$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศทดสอบและสายอากาศอ้างอิงโดยการทดสอบนี้ได้กำหนดให้ระยะทางมีค่าคงที่ที่ความถี่สูงสุดมีค่าเท่ากับ 82.65 เซนติเมตร และ  $D$  คือขนาดความกว้างของร่องเรียวยของสายอากาศซึ่งมีค่าเท่ากับ 14.62 เซนติเมตร ซึ่งในที่นี้ได้ใช้สายอากาศร่องแบบเรียวย โดยมีความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 2 GHz ถึง 6 GHz หนึ่งอิลิเมนต์มาเป็นสายอากาศอ้างอิงทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่นำมาทดสอบทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาครับ ซึ่งจะมีการหมุนรอบแนวแกนหมุนเพื่อรับคลื่นจากมุม 0 องศาจนถึงมุม 360 องศา โดยได้ทำการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ซึ่งได้แสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และผลจากการวัดทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.9 จะเห็นได้สายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบมีแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบแม่เหล็กที่มีระดับของสัญญาณเฉลี่ยไม่แตกต่างกันในแต่ละมุม ส่งผลให้สามารถครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างกว่า



รูปที่ 5.8 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

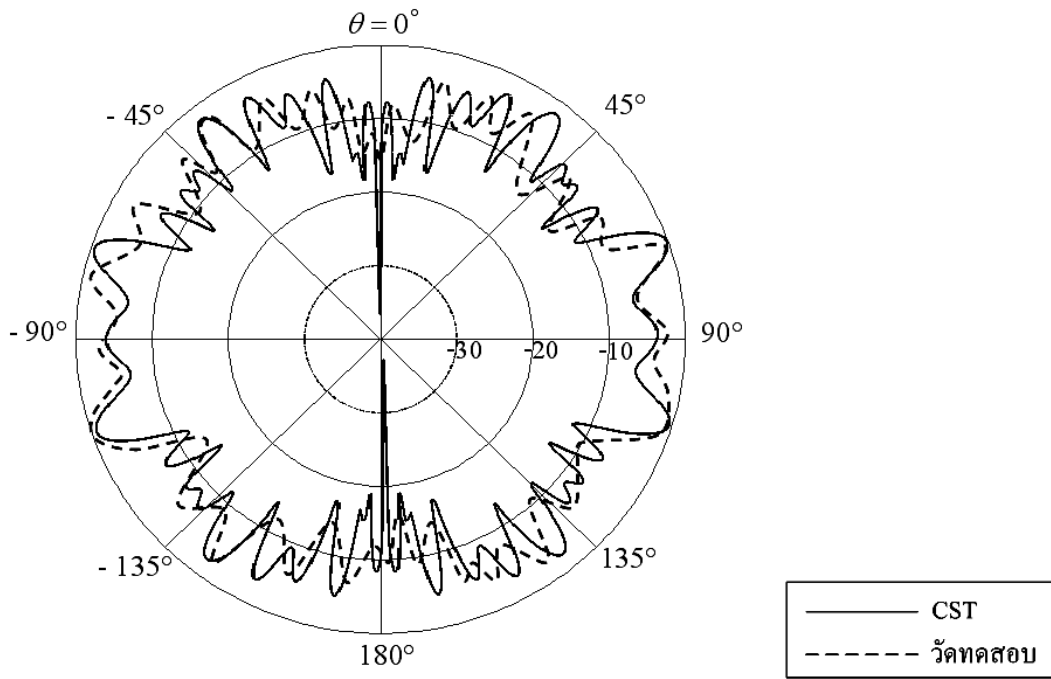


(ก) ระบายสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz

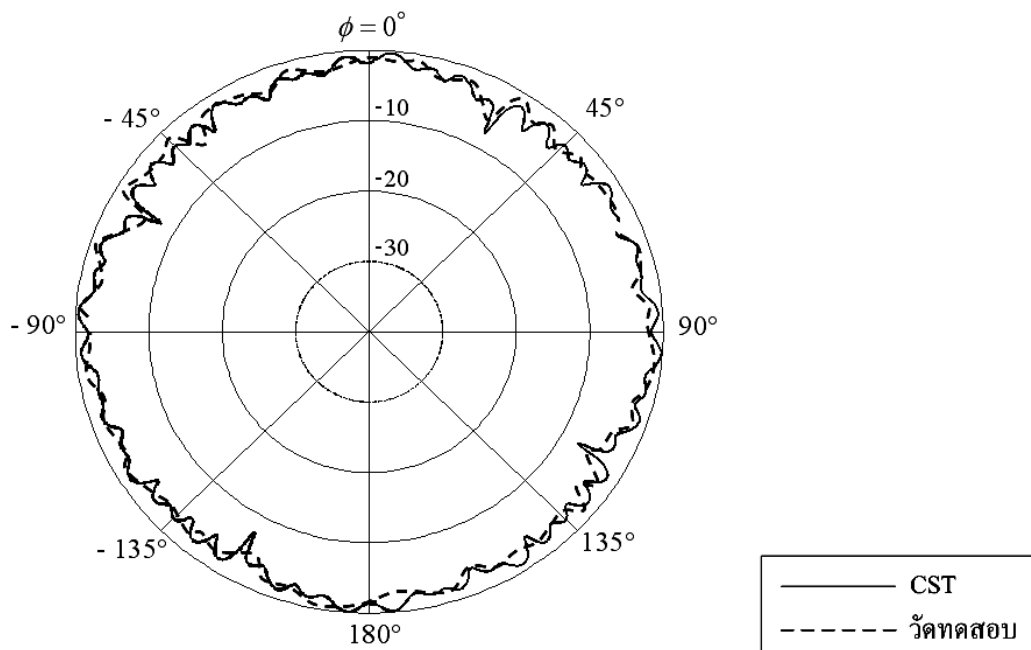


(ข) ระบายสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 2.45 GHz

รูปที่ 5.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแกลวลาคับวงกลมตันแบบจากการจำลองผล  
ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัดทดสอบ

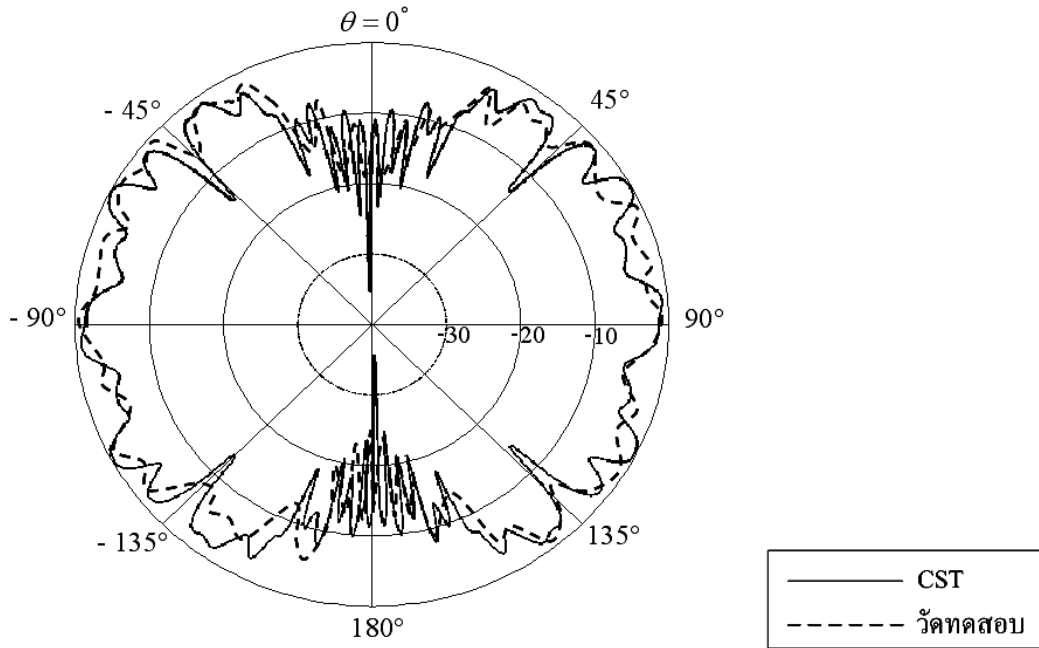


(ค) ระบายสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 5.25 GHz

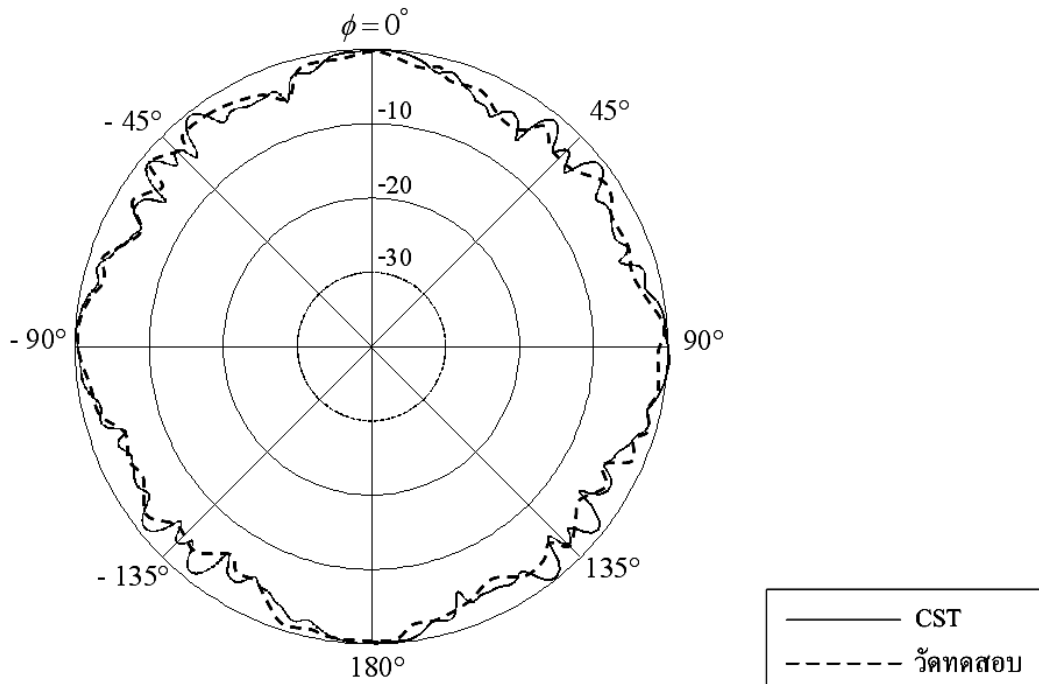


(ง) ระบายสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5.25 GHz

รูปที่ 5.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉกดำดับวงกลมตันแบบจากการจำลองผล  
ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัดทดสอบ (ต่อ)



(จ) ระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 5.8 GHz

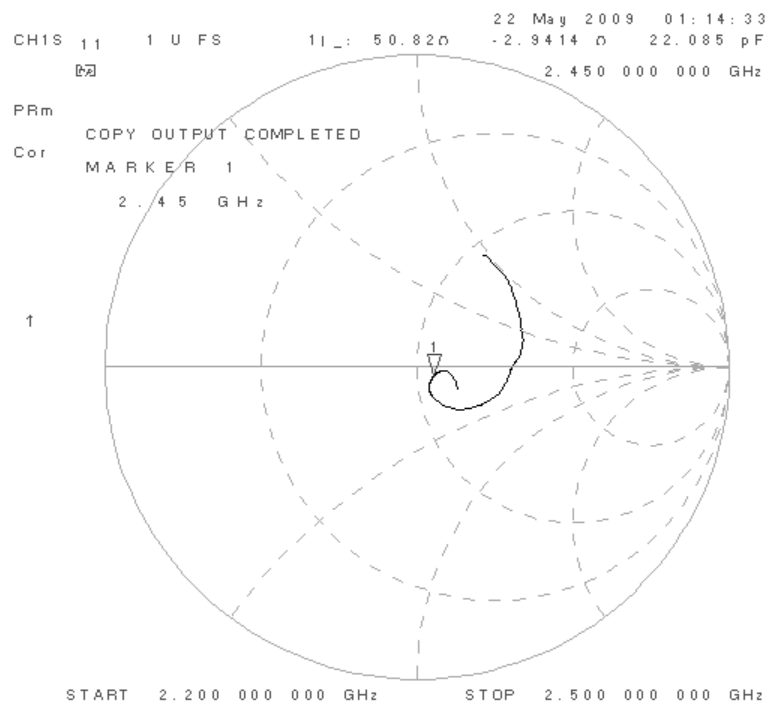


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 5.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมคั่นแบบจากการจำลองผล  
ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัดทดสอบ (ต่อ)

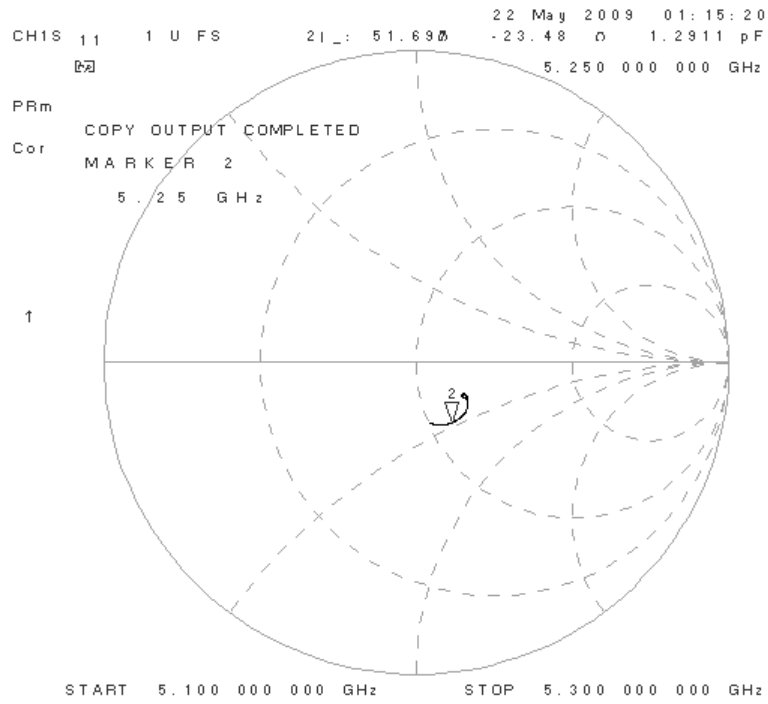
### 5.5 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์

จากการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแกลวลำดับวงกลมต้นแบบ โดยทำการแมตช์ด้วยวงจรแบ่งกำลัง ซึ่งอ้างอิงมาจากทฤษฎีการแบ่งกำลังของวิลคินสัน (Wilkinson divider) ทำหน้าที่ในการป้อนกำลังให้แก่สายอากาศแกลวลำดับ ซึ่งจะกำหนดให้เป็นสายอากาศแกลวลำดับวงกลมต้นแบบ จากรูปที่ 5.10 แสดงผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแกลวลำดับวงกลมต้นแบบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายโดยที่ความถี่ 2.45 GHz 5.25 GHz และ 5.8 GHz มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $50.82 - j2.94$  โอห์ม  $51.69 - j23.48$  โอห์ม และ  $49.94 - j38.19$  โอห์ม ดังรูปที่ 5.13(ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ

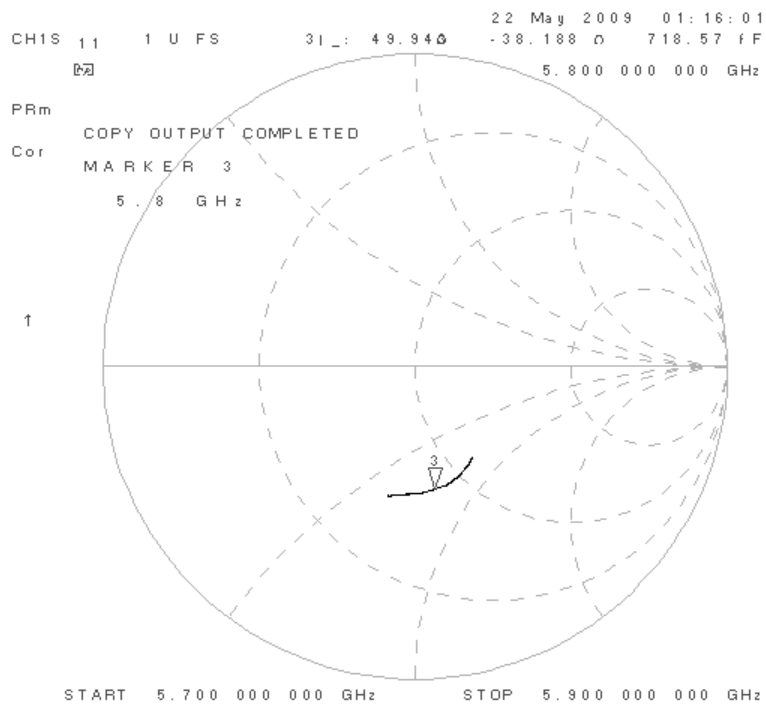


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่ความถี่ 2.45 GHz

รูปที่ 5.10 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าจากการวัดทดสอบ



(ข) ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่ความถี่ 5.25 GHz

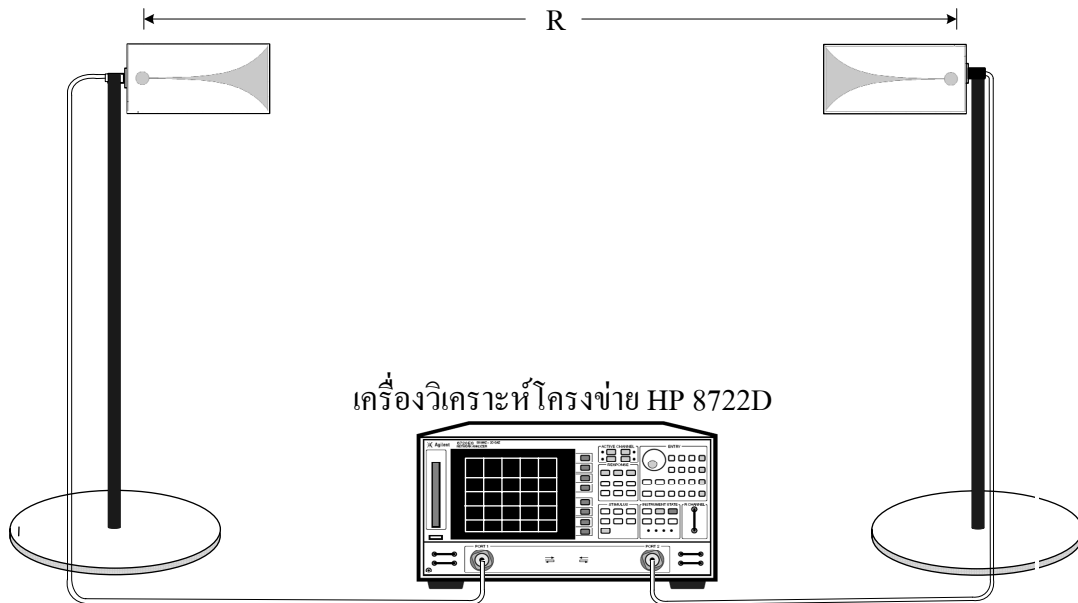


(ค) ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 5.10 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าจากการวัดทดสอบ (ต่อ)

### 5.6 ผลการวัดทดสอบอัตรายาย

สำหรับการวัดอัตรายายของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบนั้นในขั้นตอนแรกได้ทำการวัดอัตรายายของสายอากาศร่องแบบเรียบ เพื่อหาอัตรายายของสายอากาศเพียงอิลิเมนต์เดียวแสดงดังรูปที่ 5.11 ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้สายอากาศสองตัว (two-antenna method) ที่มีลักษณะเหมือนกันสำหรับการวัดทดสอบ โดยตัวหนึ่งใช้ทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่งและอีกตัวหนึ่งที่เหลือจะเป็นสายอากาศภาครับ



รูปที่ 5.11 วิธีการวัดทดสอบอัตรายายของสายอากาศร่องแบบเรียบหนึ่งอิลิเมนต์

จากนั้นใช้สมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission equation) เป็นพื้นฐานในการคำนวณหาค่าอัตรายายของสายอากาศหนึ่งอิลิเมนต์ โดยสมการการส่งผ่านของฟรีสที่นำมาใช้เท่ากับ

$$\frac{P_r}{P_t} = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (5.3)$$

$$G_{dB} = \left( \frac{P_{r,dB} - P_{t,dB} + Loss}{2} \right) \quad (5.4)$$



$$G_{dB} = \left( \frac{P_{r_{dB}} - P_{t_{dB}} + 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)}{2} \right) \quad (5.5)$$

$$G_{r_{dB}} = P_{r_{dB}} - P_{t_{dB}} - G_{t_{dB}} + 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (5.6)$$

โดยที่  $P_t$  คือ กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศส่ง ( $-10 \text{ dB}$ )

$P_r$  คือ กำลังที่รับได้จากสายอากาศรับ

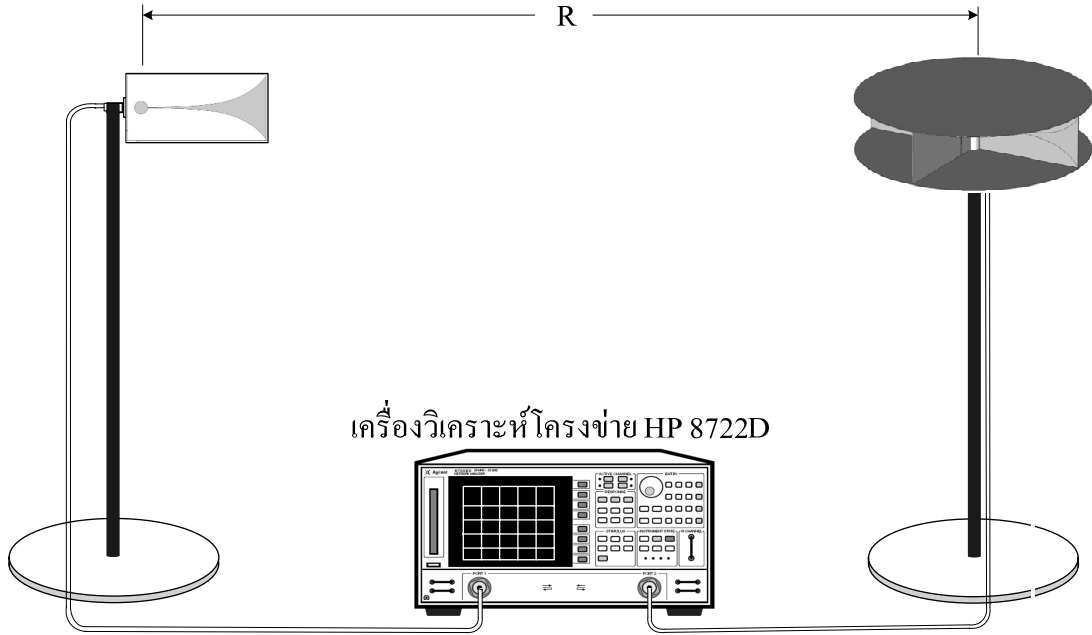
$G_{dB}$  คือ อัตราขยายรวมของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ  
เมื่อสายอากาศทั้งสองตัวมีลักษณะเหมือนกัน

$G_t$  คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง

$G_r$  คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ

$R$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ( $82.65 \times 10^{-2} \text{ m}$ )

และในขั้นตอนต่อมาได้ทำการวัดอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับวงกลม แสดงดังรูปที่ 5.12 โดยกำหนดให้สายอากาศร่องแบบรีวเป็นสายอากาศส่งและสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบเป็นสายอากาศรับ ซึ่งได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายวัดกำลังไฟฟ้าที่รับได้ โดยกำหนดระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่ใช้ในการวัดทดสอบ เท่ากับ 82.65 เซนติเมตร ทั้งที่ความถี่ 2.45 GHz 5.25 GHz และ 5.8 GHz มีกำลังด้านเข้าที่ป้อนให้กับสายอากาศส่งเท่ากับ  $-10 \text{ dB}$



รูปที่ 5.12 วิธีการวัดทดสอบอัตรายายของสายอากาศแฉวถ้ำคัับวงกลมต้นแบบ

### 5.6.1 ผลการวัดทดสอบอัตรายายของสายอากาศร่องแบบเรียบหนึ่งอิลิเมนต์

จากสมการ (5.5) สามารถคำนวณหาอัตรายายของสายอากาศร่องแบบเรียบได้ดังนี้ และแสดงค่าได้ดังตารางที่ 5.1

ที่ความถี่ 2.45 GHz

$$G_{dB} = \left( \frac{(-26.9099 \text{ dB}) - (-10 \text{ dB}) + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times (82.65 \times 10^{-2})}{3 \times 10^8 / 2.45 \times 10^9} \right)}{2} \right) = 10.83 \text{ dB}$$

ที่ความถี่ 5.25 GHz

$$G_{dB} = \left( \frac{(-38.9098 \text{ dB}) - (-10 \text{ dB}) + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times (82.65 \times 10^{-2})}{3 \times 10^8 / 5.25 \times 10^9} \right)}{2} \right) = 8.14 \text{ dB}$$

ที่ความถี่ 5.8 GHz

$$G_{dB} = \left( \frac{(-41.935 \text{ dB}) - (-10 \text{ dB}) + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times (82.65 \times 10^{-2})}{3 \times 10^8 / 5.8 \times 10^9} \right)}{2} \right) = 7.06 \text{ dB}$$

ตารางที่ 5.1 ค่าอัตราขยายของสายอากาศร็องแบบรีวหนึ่งอีลิเมนต์

คุณลักษณะของสายอากาศ ร็องแบบรีวหนึ่งอีลิเมนต์	แถบความถี่		
	2.45 GHz	5.25 GHz	5.8 GHz
อัตราขยาย (dB) (CST)	11	8.35	7.37
อัตราขยาย (dB) (วัดทดสอบ)	10.83	8.14	7.06

### 5.6.2 ผลการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ

จากสมการ (5.6) สามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบที่มีตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกและแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่างได้ดังนี้

ที่ความถี่ 2.45 GHz

$$G_{r_{dB}} = (-25.6299 \text{ dB}) - (-10 \text{ dB}) - (10.83 \text{ dB}) + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times (82.65 \times 10^{-2})}{3 \times 10^8 / 2.45 \times 10^9} \right) = 12.11 \text{ dB}$$

ที่ความถี่ 5.25 GHz

$$G_{r_{dB}} = (-37.2 \text{ dB}) - (-10 \text{ dB}) - (8.14 \text{ dB}) + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times (82.65 \times 10^{-2})}{3 \times 10^8 / 5.25 \times 10^9} \right) = 9.87 \text{ dB}$$

ที่ความถี่ 5.8 GHz

$$G_{r_{dB}} = (-40.865 \text{ dB}) - (-10 \text{ dB}) - (7.06 \text{ dB}) + 20 \log \left( \frac{4 \times \pi \times (82.65 \times 10^{-2})}{3 \times 10^8 / 5.8 \times 10^9} \right) = 8.13 \text{ dB}$$

จากผลการคำนวณจะได้ค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับวงกลม ต้นแบบ จากการวัดทดสอบเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ซึ่งแสดงไว้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ

คุณลักษณะของสายอากาศ แถวลำดับวงกลมต้นแบบ	แถบความถี่		
	2.45 GHz	5.25 GHz	5.8 GHz
อัตราขยาย (dB) (CST)	12.31	10.03	8.32
อัตราขยาย (dB) (วัดทดสอบ)	12.11	9.87	8.13

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าอัตราขยายจากผลการวัดทดสอบของสายอากาศร่องแบบเรียบหนึ่งอิลิเมนต์และสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการนำสายอากาศร่องแบบเรียบมาจัดแถวลำดับแบบวงกลมที่มีตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกและแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่าง จะมีค่าอัตราขยายที่สูงกว่าในทุก ๆ แถบความถี่ และยังมีคุณลักษณะเช่นเดียวกับสายอากาศแบบรอบทิศทาง คือ มีลักษณะการกระจายของคลื่นรอบ ๆ สายอากาศในระนาบอะซิมุท โดยคลื่นจะถูกแผ่กระจายออกไปทุกทิศทาง จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายทั้งภายในและภายนอกอาคาร หรือสวนสาธารณะ

ตารางที่ 5.3 ค่าอัตราขยายจากผลการวัดทดสอบของสายอากาศร่องแบบเรียบหนึ่งอิลิเมนต์ และสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ

ความถี่ (GHz)	สายอากาศร่องแบบเรียบ หนึ่งอิลิเมนต์	สายอากาศแถวลำดับวงกลม ต้นแบบ
	อัตราขยาย (dB)	อัตราขยาย (dB)
2.45	10.83	12.11
5.25	8.14	9.87
5.80	7.06	8.13

## 5.7 สรุป

ในบทนี้ได้แสดงการสร้าง และการวัดทดสอบคุณลักษณะสมบัติของสายอากาศแฉว ลำดับวงกลมต้นแบบ ทั้งนี้เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบ และจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการวัดทดสอบได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในสนามระยะไกลทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ค่าอิมพีแดนซ์ และอัตราขยาย พบว่าผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และจากการวัดทดสอบมีค่าคล้ายคลึงกัน สำหรับผลบางส่วนที่แตกต่างกันซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากข้อจำกัดของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลตลอดจนผลที่เกิดจากการวัดทดสอบในสภาพจริง

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับวงกลมโดยใช้ร่องแบบเรียบ ซึ่งได้นำสายอากาศร่องแบบเรียบมาจัดแถวลำดับแบบวงกลมจำนวน 4 อิลิเมนต์ เพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ และปรับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศร่องแบบเรียบที่เป็นแบบมีทิศทางหรือเจาะจงทิศทางให้เป็นแบบรอบทิศทางหรือแผ่คลื่นออกรอบตัวในระนาบเดียว ซึ่งมีลักษณะของการกระจายคลื่นรอบ ๆ สายอากาศในระนาบอะซิมุท โดยคลื่นจะถูกแผ่กระจายออกไปทุกทิศทาง ทำให้สามารถครอบคลุมพื้นที่บริการได้มากขึ้น สำหรับขั้นตอนในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสายอากาศร่องแบบเรียบในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาหารูปแบบของสายอากาศร่องแบบเรียบ สำหรับการประยุกต์ใช้งานในเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย จากนั้นวิเคราะห์หารูปแบบการจัดแถวลำดับของสายอากาศร่องแบบเรียบ เพื่อให้สายอากาศแถวลำดับมีคุณสมบัติเป็นสายอากาศแบบรอบตัวในระนาบเดียว และวิเคราะห์หาอัตราขยายสูงสุดของสายอากาศแถวลำดับวงกลม ด้วยการปรับหาระยะห่างระหว่างสายอากาศร่องแบบเรียบที่เหมาะสมในการจัดแถวลำดับ และการเพิ่มตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกตลอดจนการเพิ่มแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่างของสายอากาศแถวลำดับวงกลม

สำหรับการออกแบบสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบในงานวิจัยนี้ในเบื้องต้นได้ออกแบบหาสายอากาศร่องแบบเรียบต้นแบบ โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สายอากาศร่องแบบเรียบที่มีความถี่ปฏิบัติการครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 6 GHz ซึ่งสามารถรองรับมาตรฐาน IEEE 802.11 a/b/g ได้ จากนั้นนำสายอากาศร่องแบบเรียบต้นแบบมาจัดแถวลำดับแบบวงกลม จำนวน 4 อิลิเมนต์ เพื่อให้สายอากาศแถวลำดับวงกลมมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบตัวในระนาบเดียว โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศร่องแบบเรียบเท่ากับ 183.67 มิลลิเมตร ในการจัดแถวลำดับ การเพิ่มตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกและการเพิ่มแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่างของสายอากาศแถวลำดับวงกลมส่งผลให้สายอากาศมีอัตราขยายสูงสุด โดยได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST ในการออกแบบเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของสายอากาศแถวลำดับวงกลมก่อน สำหรับรายละเอียดในการออกแบบ การสร้าง การวัด ทดสอบผล รวมทั้งการวิเคราะห์และสรุปผลทั้งหมดได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 และ 5 จากตารางที่ 6.1 เป็นการสรุปคุณลักษณะสมบัติของสายอากาศแถวลำดับวงกลมโดยใช้ร่องแบบเรียบซึ่งเมื่อพิจารณาความกว้างแถบที่ได้จากความต้องการที่จะนำไปใช้งานด้านการสื่อสารแบบไร้สายที่

ตั้งเป้าหมายไว้ นั่น และอัตราขยายของสายอากาศ แถวลำดับวงกลมต้นแบบเมื่อนำผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และจากการวัดทดสอบมาเปรียบเทียบกันพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 6.1 คุณลักษณะสมบัติของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ

คุณลักษณะของสายอากาศ	แถบความถี่		
	2.45 GHz	5.25 GHz	5.8 GHz
ความกว้างแถบ (CST)	(1.8 GHz ถึง 6 GHz) 4.2 GHz		
ความกว้างแถบ (วัดทดสอบ)	(2.2 GHz ถึง 6.4 GHz) 4.2 GHz		
อัตราขยาย (dB) (CST)	12.31	10.03	8.32
อัตราขยาย (dB) (วัดทดสอบ)	12.11	9.87	8.13

## 6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

จากบทสรุปจะพบว่าในงานวิจัยฉบับนี้สายอากาศแถวลำดับวงกลมโดยใช้ร่องแบบรีเวียได้ถูกสร้างจากวัสดุฐานรองของ FR4 ซึ่งมีค่าไดอิเล็กตริกค่าต่ำทำให้สายอากาศมีขนาดใหญ่ หากนำไปประยุกต์สร้างบนวัสดุฐานรองอื่นที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสูงกว่าเพื่อลดขนาดของสายอากาศลงมาก็จะเพิ่มความสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งาน อีกทั้งเป็นการทดสอบคุณลักษณะสมบัติของสายอากาศที่มีต่อวัสดุฐานรองอีกด้วย และอาจทำการวิเคราะห์หารูปร่างของตัวสะท้อนรูปแบบอื่น ๆ หรืออาจเลือกใช้วัสดุอื่นแทนอะลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติในการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่า สายอากาศแถวลำดับวงกลมโดยใช้ร่องแบบรีเวียสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายได้ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 a/b/g และจะเป็นการดียิ่งหากได้มีการนำโครงสร้างของสายอากาศนี้ไปประยุกต์ใช้งานจริงเพื่อพัฒนาสายอากาศต้นแบบนี้ให้มีคุณสมบัติเป็นสายอากาศแบบรอบตัวในระนาบเดี่ยวมากที่สุด หรือพัฒนาสายอากาศต้นแบบโดยออกแบบสายอากาศร่องแบบรีเวียให้มีความถี่ปฏิบัติการที่สามารถประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารสมัยใหม่ เช่น ระบบ WIMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) UWB (Ultra-Wideband) RFID (Radio-Frequency Identification) และอื่น ๆ เพื่อสามารถนำไปใช้ในองค์กรชุมชน ตลอดจนประเทศชาติ เพื่อลดภาวะการนำเข้าจากต่างประเทศต่อไป

ในลำดับสุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่า แนวความคิด วิธีการศึกษาวิเคราะห์และออกแบบ รวมถึงผลการวิเคราะห์และผลการทดลองจากงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์เป็นแนวทางที่ดีให้แก่ ผู้ที่สนใจศึกษาและค้นคว้าในเรื่องของสายอากาศร่องแบบรีขั้ว ทั้งในรูปแบบโครงสร้างในงานวิจัยนี้ รวมถึง โครงสร้างแบบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป



## รายการอ้างอิง

- รังสรรค์ วงศ์สรรคร์ และ ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์. (ม.ป.ป.). **คู่มือการทดลองพื้นฐานของสายอากาศ.**  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- รังสรรค์ วงศ์สรรคร์. (2552). **วิศวกรรมสายอากาศ.** สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชา  
วิศวกรรมศาสตร์ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- I-Fong Chen, Chia-Mei Peng, Sheng-Chieh Liang, "Single Layer Printed Monopole Antenna for  
Dual ISM-Band Operation," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, 53(2):  
1270-1273, 2005.
- Taguchi, M., Egashira, S., Tanaka, K., "Sleeve Antenna with Ground Wires," **IEEE Transactions  
on Antennas and Propagation**, 39(1): 1-7, 1991.
- James, J.D., and Hall, P.S. Handbook of Microstrip Antenna, Vol.1. London, 1989.
- Raviprakash Rajaraman, "Design of A Wideband Vivaldi Antenna Array for the Snow Radar,"  
**Technical Report CReSIS**, 2001.
- Amena Kauser Syeda, "Design of a Wideband Vivaldi Antenna Array and Performance  
Enhancement of Small Vivaldi Arrays Using Baffles," **Technical Report CReSIS TR  
106**, 2006.
- Kai Fong Lee and Wei Chen, "Advance in Microstrip and Printed Antennas," **A Wilet -  
Interscience Publication**, John Wiley and Sons, INC., 1997.
- P. J. Gibson, "The Vivaldi Aerial," Proc. 9<sup>th</sup> European, **Microwave Conference**, pp. 101-105,  
1979.
- Sreenivas Kasturi and Daniel H. Schaubert, "Effect of Dielectric Permittivity on Infinite Arrays of  
Single-Polarized Vivaldi Antennas," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**,  
2006.
- E. De Lera, E. Garcia, E. Rajo, D. Segovia, "A coplanar Vivaldi antenna with wide band balun  
proposal for the low frequency band of the SKA: approach to the FPA solution," **IEEE  
MELECON**, 2006.
- Sang-Gyu Kim and Kai Chang, "Ultra Wideband 8 to 40 GHz Beam Scanning Phased Array using  
Antipodal Exponentially -Tapered Slot Antennas," **IEEE MTT-S Digest**, 2004.

- Adel Elsherbini, Cemin Zhang, Song Lin, Michael Kuhn, Aladin Kamel, Aly E. Fathy and Hadia Elhennawy, "UWB Antipodal Vivaldi Antennas with Protruded Dielectric Rods for Higher Gain, Symmetric Patterns and Minimal Phase Center Variations," **Antennas and Propagation International Symposium**, 2007.
- Aaron Zachary Hood, Tutku Karacolak, Erdem Topsakal, "A Small Antipodal Vivaldi Antenna for Ultra Wide Band Applications," **Antennas and Wireless Propagation Letters**, 2007.
- Marc C. Greenberg, Kathleen L. Virga and Cynthia L. Hammond, "Performance Characteristics of the Dual Exponentially Tapered Slot Antenna (DE TSA) for Wireless Communications Applications," **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, Vol. 52, No. 2, 2003.
- Adrian T. Sutinjo and Edwin Tung, "The Design of a Dual Polarized Vivaldi Array", **Microwave Journal**, 2004.
- H. Y. Wang et al, "Rigorous Analysis of Tapered Slot Antennas on dielectric substrates", **10th International Conference on Antennas and Propagation**, 1997.
- R. Janaswamy and D. H. Schaubert, "Analysis of the Tapered Slot Antenna", **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. AP-35, No. 9, 1987.
- Yngvesson et al, "The Tapered Slot Antenna – A new integrated element for millimeter-wave applications", **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, Vol. 37, No. 2, Feb 1989, pp 365-374..
- Oraizi and Jam, "Optimum Design of Tapered Slot Antenna Profile", **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 51, No. 8, Aug 2003, pp. 1987-1995.
- F. J. Zucker, "Surface and Leaky Wave Antennas", **Antenna Engineering Handbook**, Mc Graw Hill, 1961.
- R. Q. Lee and R. N. Simons, Chapter 9 in "**Advances in Microstrip and Printed Antennas**", John Wiley and Sons, 1997.
- R. Q. Lee and R. N. Simons, "Effect of Curvature on Tapered Slot Antennas", **IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium**, 1996.
- Richard Q. Lee, "Notch Antennas", **NASA Technical Report**, July 2004.
- Pranay Acharya et al, "Tapered Slotline Antennas at 802 GHz", **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, Vol. 41, No. 10, Oct 1993, pp. 1715-1719.

- T. L. Korzeniowski, D. M. Pozar, D. H. Schaubert and K. S. Yngvesson, "Imaging System at 94 GHz using tapered slot antenna elements", **8th IEEE International Conference on Infrared and Millimeter Waves**, Miami Beach, Fl 1983.
- Yngvesson et al, "Endfire Tapered Slot Antennas on Dielectric Substrates", **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. AP-33, No. 12, Dec 1985, pp. 1392-1400.
- R. Q. Lee and Rainee N. Simons, "Overview of Tapered-Slot Antennas" **NASA Tech Report**, May 1998.
- K.C. Gupta, R. Garg and I. J. Bahl, "Microstrip Lines and Slotlines.", Artech House, 1996.
- Schuppert, "Microstrip/Slotline Transitions: Modeling and Experimental Investigation", **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, Vol. 36, No. 8, Aug 1988.
- Simons, Dib, Lee and Katehi, "Integrated Uniplanar Transition for Linearly Tapered Slot Antenna", **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 43, No. 9, 1995.
- E. Gazit, "Improved Design of the Vivaldi Antenna", **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Apr 1998, pp. 89-92.
- J. D. S Langley, P. S. Hall and P. Newham, "Balanced Antipodal Vivaldi Antenna for Wide Bandwidth Phased Arrays", **IEEE Proc. Antennas and Propagation**, Vol. 143, No. 2, Apr 1996, pp. 97-102.
- Sloan et al, "A broadband microstrip to slotline transition", **Microwave and Optical Technology Letters**, Vol. 18, No. 5, Aug 1998, pp. 339-342.
- Constantine A. Balanis, "**Antenna Theory: Analysis and Design**", John Wiley and Sons, 1996.
- J. Shin and D. H. Schaubert, "A Parameter Study of Stripline-Fed Vivaldi Notch Antenna Arrays", **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 47, No. 5, May 1999, pp. 879-886.
- D. H. Schaubert and T. H. Chio, "Parameter Study and Design of Wideband, Widescan Dual-Polarized Tapered Slot Antenna Arrays", **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 48, No. 6, Jun 2000, pp. 879-886.
- S. Kasturi, A. O. Boryszenko and D. H. Schaubert, "Infinite Arrays of Tapered Slot Antennas with and without Dielectric Substrate", **Proceedings of the 2002 Antenna Applications Symposium**, Monticello, IL., Sept 2002, pp. 372-390.

- S. Kasturi and D. H. Schaubert, "Effect of Dielectric Substrate on Infinite Arrays of Single-Polarized Vivaldi Antennas", **Proceedings of the 2003 Antenna Applications Symposium**, 2003.
- D. H. Schaubert, A. O. Boryssenko and T. H. Chio, "Analysis of Finite Arrays of Wideband Tapered Slot Antennas", **Proceedings of the 2002 URSI General Assembly**, Maastricht, The Netherlands, 2002.
- D. H. Schaubert and T. H. Chio, "Wideband Vivaldi Arrays for Large Aperture Antennas", **NFRA International Conference on Perspectives in Radio Astronomy: Technologies for Large Antenna Arrays**, Dwindeloo, Netherlands, pp. 49-57, Apr 1999.
- D. H. Schaubert and J. Shin, "Toward a better understanding of wideband Vivaldi notch antenna arrays", **Antenna Applications Symposium, Monticello, IL**. Sept 1995.
- Wadell, "**Transmission Line Design Handbook**", Artech House, 1991.
- Richard Q. Lee, "Notch Antennas", **NASA Tech Report, Glenn Research Center**, July 2004.
- A. A. Lestari, A. G. Yarovoy, L. P. Ligthart, "Capacitively-Tapered Bowtie Antenna", Conference Proceedings on CD-ROM, **Millennium Conference on Antennas and Propagation**, Davos, Switzerland, 9-14 April 2000.
- A. O. Boryssenko, D. H. Schaubert and C. Craeye, "A wave-based model for mutual coupling and truncation in finite tapered-slot phased arrays", **Proc. of the 2003 Antennas and Propagation Society Symposium**, June 2003.
- S.A. Schelkunoff, "**Advanced Antenna Theory**", John Wiley and Sons, 1952, pp. 160.

## ประวัติผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ เกิดเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม 2507 เกิดที่ ตำบลปากน้ำประแสร์ อำเภอกะลา จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์ เมื่อปี 2532 จากนั้นได้ศึกษาต่อระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ เมื่อปี 2537 จากนั้นได้ศึกษาต่อระดับปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี 2546 ประวัติการทำงานในอดีตเมื่อปี 2532 เป็นอาจารย์ประจำแผนกอิเล็กทรอนิกส์ ที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือเมื่อปี 2532 ถึงปี 2533 เป็นอาจารย์พิเศษคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพมหานคร นอกจากนี้ เมื่อปี 2535 ถึงปี 2536 เป็นที่ปรึกษาด้านอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และได้เป็นหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี 2546 ถึงปี 2548 ปัจจุบันเป็นรองศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นรองอธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นหัวหน้าโครงการพัฒนาและผลิตสื่อการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หัวหน้าโครงการการศึกษาไร้พรมแดน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นอาจารย์พิเศษมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น นายกสโมสรพนักงานสาขาวิชาการและสายปฏิบัติการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (วาระที่ 3)