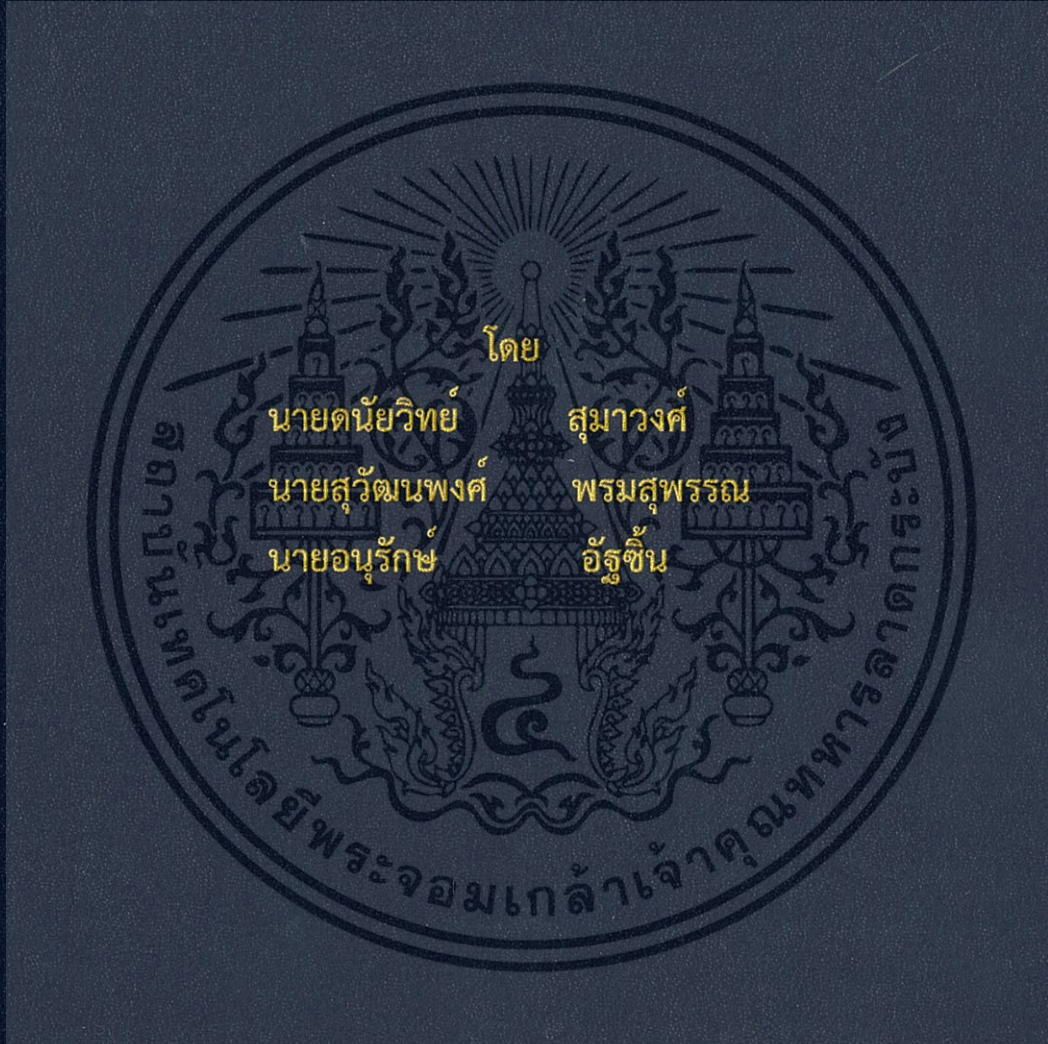


สายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกน  
Antenna With Three-Axis Radiation



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกน  
ANTENNA WITH THREE-AXIS RADIATION



โดย

นายदनัยวิทย์ สุมาวงศ์	55010420
นายสุวัฒน์พงษ์ พรหมสุพรรณ	55011367
นายอนุรักษ อัฐชิน	55011404



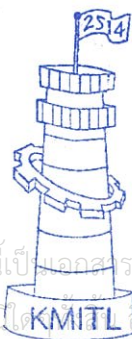
อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **144357**  
รับเดือนปี **24 พ.ย. 2559**

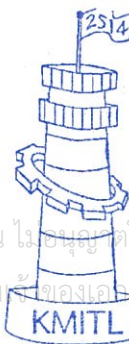
b. 12819797  
i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558



ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว

*[Signature]*  
.....  
อาจารย์ที่ปรึกษา



ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

*[Signature]*  
.....  
กรรมการผู้ตรวจชิ้นงาน

ปริญญาโทปีการศึกษา 2558

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกน

Antenna With Three-Axis Radiation

ผู้จัดทำ

1. นายคณัยวิทย์ สุมาวงศ์ 55010420
2. นายสุวัฒน์พงศ์ พรหมสุพรรณ 55011367
3. นายอนุรักษ์ อัฐชื่น 55011404



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์และสนับสนุนของ รศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร ที่ได้มอบโอกาส ความเมตตา การใส่ใจดูแลและให้คำปรึกษาต่างๆ รวมทั้งให้คำแนะนำความรู้ด้านวิชาการ ทักษะ การใช้อุปกรณ์ทดสอบสายอากาศ แนวคิดและกระบวนการทางงานวิจัย จนกระทั่งชี้แนะแนวทาง และข้อคิดต่างๆสำหรับการดำเนินชีวิตอย่างดียิ่งเสมอให้กับลูกศิษย์กลุ่มนี้ ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกๆท่านตลอดช่วงการศึกษาที่ผ่านมาอันซึ่งได้ ประสิทธิ์ประสาทองค์วิชาความรู้ต่างๆให้กับกลุ่มข้าพเจ้า

ขอขอบคุณสมาชิกห้องปฏิบัติการวิจัย สายอากาศ และการประยุกต์แม่เหล็กไฟฟ้า ที่คอยให้ความช่วยเหลือต่างๆ มีคำแนะนำดีๆมอบให้ตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมา และคอยให้กำลังใจ อย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย ดูแล ความเป็นอยู่ทุกอย่าง คอยสนับสนุนส่งเสริมให้โอกาสทางด้านการศึกษา และเป็นผู้ให้กำลังใจ ที่สำคัญ จนทำให้ประสบความสำเร็จในการทำรายงานฉบับนี้ คุณค่าและองค์ความรู้อันเป็นประโยชน์ ในรายงานฉบับนี้ ทางกลุ่มขอมอบแต่บิดา มารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง รวมทั้งครูอาจารย์ผู้มี พระคุณที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ทางกลุ่มข้าพเจ้า

दनयववथ सुढावक  
सुवढनणक ढरढसुढरण  
अनुरकष अडुषन

ผู้จัดทำ

สายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกน

ANTENNA WITH THREE-AXIS RADIATION

โดย	นายदनัยวิทย์	สุมาวงศ์	55010420
	นายสุวัฒน์พงษ์	พรมสุพรรณ	55011367
	นายอนุรักษ	อัฐชิน	55011404

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

#### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและสร้างสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกนที่ตั้งฉากกันสำหรับวิเคราะห์ค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ (SAR) ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอสามารถทำงานที่ย่านความถี่ 2.45 GHz และสายอากาศมี  $|S_{11}|$  ที่ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 2.4 GHz ถึง 2.484 GHz และมีอัตราขยายของสายอากาศมากกว่า 1.5 dBi และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสามแกนที่ตั้งฉากกัน เพื่อที่จะรับค่ากำลังงานให้ได้เป็นมาตรฐานอ้างอิงเดียวกัน และนำค่ากำลังงานสนามไฟฟ้าที่ได้จากสายอากาศทั้งสามแกน เพื่อนำมาคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะโดยนำค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากสายอากาศมาคำนวณค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะและแสดงผล

#### ABSTRACT

This thesis represents a design and a fabrication of the antenna with three-axis radiation for the specific absorption rate (SAR). The antenna can operate the frequency range of 2.45 GHz and  $|S_{11}|$  less than -10 dB in the frequency range of 2.4 GHz to 2.484 GHz and gain over 1.5 dBi with a perpendicular three-axis radiation pattern to obtain the power to perform the same standard reference and transform to the electric power from the three-axis antenna to calculate the specific absorption rate (SAR) and monitor the final result.

## สารบัญ

	หน้า	
กิตติกรรมประกาศ	I	
บทคัดย่อ	II	
สารบัญ	III	
สารบัญรูป	V	
สารบัญตาราง	VIII	
<b>บทที่ 1</b>	<b>บทนำ</b>	<b>1</b>
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์	2
	1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
<b>บทที่ 2</b>	<b>ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
	2.1 บทนำ	3
	2.2 หลักการและทฤษฎีสายอากาศไดโพล	3
	2.3 พารามิเตอร์ของสายอากาศ	9
	2.4 ค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ	17
	2.5 งานวิจัยที่มีมาก่อน	18
	2.6 สรุป	21
<b>บทที่ 3</b>	<b>การออกแบบและการจัดทำ</b>	<b>22</b>
	3.1 การออกแบบ	22
	3.2 โครงสร้าง	22
	3.3 สรุป	34

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4	
คุณสมบัติของสายอากาศ	35
4.1 บทนำ	35
4.2 สายอากาศ	35
4.3 ขั้นตอนและผลการทดสอบสายอากาศ	36
4.4 สรุป	45
บทที่ 5	
การทดสอบสมรรถนะสายอากาศกับชุดเครื่องอ่านค่าอัตราการดูดซับ คลื่นจำเพาะ	46
5.1 บทนำ	46
5.2 ออกแบบส่วนอุปกรณ์	47
5.3 ออกแบบส่วนโปรแกรม	49
5.4 ผลการทดสอบชุดแสดงค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะในห้องไร้การ สะท้อน	51
5.5 สรุป	52
บทที่ 6	
สรุปผลและข้อเสนอแนะ	53
6.1 สรุปผล	53
6.2 ข้อเสนอแนะ	53
บรรณานุกรม	54

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	4
2.2	5
2.3	6
2.4	7
2.5	8
2.6	8
2.7	10
2.8	11
2.9	13
2.10	14
2.11	15
2.12	16
2.13	18
2.14	19
2.15	20
2.16	20
3.1	22
3.2	23
3.3	24
3.4	25

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.5	อัตราขยายของสายอากาศเริ่มต้นที่วางในแนวแกน X	25
3.6	โครงสร้างของสายอากาศที่วางในแนวแกน Y	26
3.7	$ S_{11} $ ของสายอากาศที่วางในแนวแกน Y	27
3.8	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่วางในแนวแกน Y	27
3.9	อัตราขยายของสายอากาศที่วางในแนวแกน Y	28
3.10	โครงสร้างของสายอากาศที่วางในแนวแกน Z	29
3.11	$ S_{11} $ ของสายอากาศที่วางในแนวแกน Z	29
3.12	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่วางในแนวแกน Z	30
3.13	อัตราขยายของสายอากาศที่วางในแนวแกน Z	31
3.14	โครงสร้างของสายอากาศแพร่กระจายคลื่นในสามแกน	31
3.15	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกน	32
4.1	โครงสร้างของสายอากาศที่สร้างขึ้น	33
4.2	รูปถ่ายสายอากาศที่สร้างขึ้น	34
4.3	วิธีการทดสอบคุณลักษณะ $ S_{11} $ ของสายอากาศ	35
4.4	เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลอง $ S_{11} $ $ S_{22} $ และ $ S_{33} $ ของสายอากาศ	35
4.5	เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลอง $ S_{12} $ $ S_{21} $ $ S_{13} $ $ S_{31} $ $ S_{23} $ และ $ S_{32} $ ของสายอากาศ	36
4.6	การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	39
4.7	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบในระนาบ XY YZ และ XZ เทียบกับผลจากการจำลองที่ความถี่ 2.45 GHZ	40
4.8	เปรียบเทียบอัตราขยายระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบในระนาบ XY	41
4.9	เปรียบเทียบอัตราขยายระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบในระนาบ YZ	42

4.10 เปรียบเทียบอัตราขยายระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบใน  
ระนาบ XZ

42



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	พารามิเตอร์ของสายอากาศ	23
5.1	ผลการทดสอบค่าสนามไฟฟ้า	51
5.2	ขนาดของสนามไฟฟ้าทั้งสามแกน	51
5.3	เปรียบเทียบค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ	52



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีความก้าวหน้าทางด้านเศรษฐกิจ ทางด้านการศึกษา และทางด้านเทคโนโลยี ทำให้มีผู้ประดิษฐ์คิดค้นเครื่องอำนวยความสะดวกในการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นจำนวนมาก ยิ่งในส่วนของด้านโทรคมนาคมก็มีการประดิษฐ์คิดค้นเครื่องมือสื่อสารออกมามากมายหลายรูปแบบ ในด้านการสื่อสารอุปกรณ์สื่อสารทุกชนิดต้องอาศัยสื่อกลางในการส่งผ่านข้อมูลเพื่อนำข้อมูลไปยังจุดหมายปลายทาง เช่น การคุยโทรศัพท์ทออาศัยสายโทรศัพท์เป็นสื่อกลางในการส่งสัญญาณคลื่นเสียงไปยังผู้รับ เป็นต้น สำหรับการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์อาจใช้สายเชื่อมต่อผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อหรืออาจใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อแบบไร้สายเป็นสื่อกลางในการเชื่อมต่อก็ได้ สื่อกลางในการสื่อสารมีความสำคัญเพราะเป็นปัจจัยหนึ่งที่กำหนดประสิทธิภาพในการสื่อสาร เช่น ความเร็วในการส่งข้อมูล ปริมาณของข้อมูลที่สามารถนำไปได้ในหนึ่งหน่วยเวลา รวมถึงคุณภาพของการส่งข้อมูล

ปัจจุบันการสื่อสารนับว่ามีความสำคัญต่อชีวิตมนุษย์เป็นอย่างมากโดยเฉพาะเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless Communication System) เนื่องจากเป็นการสื่อสารที่ตอบสนองความต้องการใช้งานของผู้ใช้ และสามารถเชื่อมต่อสื่อสารไปได้ทุกหนทุกแห่ง สิ่งเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่จะช่วยผลักดันให้มีการพัฒนาระบบสื่อสารแบบไร้สายให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงอุปกรณ์ในการรับและส่งคลื่นความถี่วิทยุ ในการสื่อสารแบบไร้สายนั้น สายอากาศนับเป็นอุปกรณ์ที่ควรให้ความสำคัญเป็นอย่างมากในการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการเชื่อมต่อแบบไร้สาย เนื่องจากสายอากาศที่ทำหน้าที่รับ-ส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของการสื่อสารแบบไร้สายที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้อยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) โดยวิธีการเหนี่ยวนำกระแสให้กลายเป็นคลื่นวิทยุ (Radio Wave) ส่งผ่านอากาศไปยังเครื่องรับโดยสายอากาศที่เครื่องรับจะรับสัญญาณคลื่นวิทยุที่เข้ามาแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าก่อนนำไปยังภาคอื่น

การสื่อสารแบบไร้สายอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสื่อกลางนำสัญญาณ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถนำมาใช้ในการสื่อสารข้อมูลมีหลายชนิด แบ่งตามช่วงความถี่ที่แตกต่างกัน การสื่อสารแบบไร้สายมีผู้นิยมใช้มากขึ้น เนื่องจากมีความคล่องตัวสูงและสะดวกสบาย มักนิยมใช้กันในพื้นที่ที่การติดตั้งสายนำสัญญาณทำได้ลำบากหรือค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูงเกินไป สื่อกลางของการสื่อสารแบบนี้ เช่น อินฟราเรด (Infrared: IR) ไมโครเวฟ (Microwave) คลื่นวิทยุ (Radio Wave) และ ดาวเทียมสื่อสาร (Communications Satellite)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติการสื่อสารแบบไร้สายจะมีผลกระทบต่อสุขภาพผู้ใช้งานเมื่อใช้เป็นระยะเวลานาน ดังนั้นจึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ (Specific Absorption Rate: SAR) ซึ่งเป็นค่าหนึ่งที่ใช้บ่งบอกถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้ใช้งาน โดยค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ หมายถึง อัตราที่พลังงานถูกดูดกลืนโดยเนื้อเยื่อของร่างกาย มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อกิโลกรัม (W/kg) อัตราการดูดกลืนพลังงานจำเพาะเป็นหน่วยการวัดปริมาณการได้รับรังสี (Dosimetric Measure) ซึ่งใช้กันทั่วไปสำหรับการทดสอบการได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูงกว่า 100 kHz

สำหรับปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกนที่ตั้งฉากกันสำหรับนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเครื่องมือวัดค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ ซึ่งมีการนำเสนอทฤษฎีและการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศ โดยทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศ เพื่อพัฒนาให้ได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะเหมาะสำหรับการทดสอบค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ โดยสายอากาศที่นำเสนอมีคุณลักษณะที่สำคัญ เช่น สามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสามแกนที่ตั้งฉากกัน เป็นต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาทฤษฎีของสายอากาศและคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ
- 2) ออกแบบสายอากาศที่แพร่กระจายคลื่นในสามแกนที่ตั้งฉากกัน
- 3) ประยุกต์การใช้งานสายอากาศที่แพร่กระจายคลื่นในสามแกนที่ตั้งฉากกันเพื่อนำไปทดสอบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ

## 1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์

1. ออกแบบสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในสามแกนที่ตั้งฉากกันเพื่อใช้ทดสอบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ 2.4 GHz - 2.485 GHz และพิจารณาที่ความถี่ 2.45 GHz
2. สร้างสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในสามแกนที่ตั้งฉากกันเพื่อใช้ทดสอบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ 2.4 GHz - 2.485 GHz และพิจารณาที่ความถี่ 2.45 GHz
3. ประยุกต์การใช้งานสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในสามแกนที่ตั้งฉากกันเพื่อนำไปทดสอบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีสายอากาศแบบไดโพล ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ ทฤษฎีของค่าอัตราการใช้พลังงาน และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีมาก่อนของสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกน

#### 2.2 หลักการและทฤษฎีสายอากาศไดโพล

สำหรับสายอากาศเส้นลวดที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเป็นเส้นโค้งถือว่าเป็นสายอากาศที่มีความเก๋แก่ที่สุด เนื่องจากสายอากาศดังกล่าวง่ายต่อการออกแบบและมีราคาถูก จึงนิยมนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ในอดีตสายอากาศเส้นลวดดังกล่าวถูกนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างเป็นสายอากาศไดโพล ซึ่งสายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศที่นิยมนำมาใช้เป็นสายอากาศต้นแบบให้กับสายอากาศประเภทอื่นๆ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการของสายอากาศไดโพลรวมถึงการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และสายอากาศไดโพลได้มีการจำแนกอยู่หลายประเภทตามขนาดความยาวคลื่นเช่น

- ไดโพลจิ๋ว (Infinitesimal Dipole) คือ สายอากาศโพลที่มีความยาวของสายอากาศที่น้อยกว่า  $\lambda/50$
- ไดโพลเล็ก (Small Dipole) คือ สายอากาศไดโพลที่มีความยาวที่มากกว่า  $\lambda/50$  แต่ไม่เกิน  $\lambda/10$
- ไดโพลยาวจำกัด (Finite Length Dipole) คือ สายอากาศที่มีความยาวไม่น้อยกว่า  $\lambda/10$
- ไดโพลครึ่งความยาวคลื่น (Half-Wavelength Dipole) คือ สายอากาศที่มีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความคลื่น ( $\lambda/2$ ) ซึ่งเป็นสายอากาศที่ได้รับความนิยมมากที่สุดสำหรับการออกแบบของสายอากาศไดโพลทั้งหมด

##### 2.2.1 ไดโพลขนาดจิ๋ว [1]

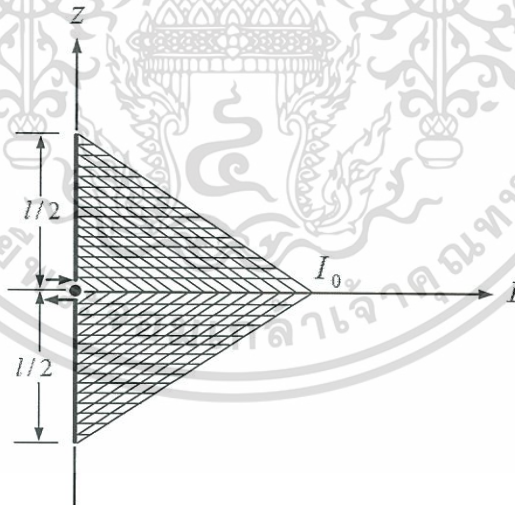
ไดโพลขนาดจิ๋ว (Infinitesimal Linear Dipole) หรือสายอากาศไดโพลที่มีความยาวน้อยกว่าความยาวของคลื่นมากๆ  $l \ll \lambda$  โดยสายอากาศวางตัวตามแนวแกน Z และสมมาตรที่จุดกำเนิด ถึงแม้ว่าไดโพลจิ๋วจะไม่ถูกนำไปใช้ในทางปฏิบัติแต่จะถูกใช้แสดงในรูปของสายอากาศแผ่น

ตัวเก็บประจุ (Capacitor-Plate) หรือบางที่เรียกว่า สายอากาศที่มีโหลดอยู่ด้านบน (Top-Hat-loaded) โดยแผ่นที่ปลายทั้งสองถูกใช้ทำเป็นโหลดเก็บประจุเพื่อที่จะทำให้กระแสในไดโพลมีค่าสม่ำเสมอ เนื่องจากสมมติให้ขนาดของแผ่นที่ปลายทั้งสองมีขนาดเล็กและไม่คำนึงถึงการแผ่พลังงานของแผ่นทั้งสองดังนั้นเส้นลวดจิวที่มีขนาดเล็ก เมื่อมีความยาวสั้นมากๆ  $l \ll \lambda$  และพอมมากๆ ( $a \ll \lambda$  -รัศมีเส้นลวดเล็กมากๆ) การเปลี่ยนแปลงกระแสตามเส้นลวดจึงสมมติให้มีค่าคงที่

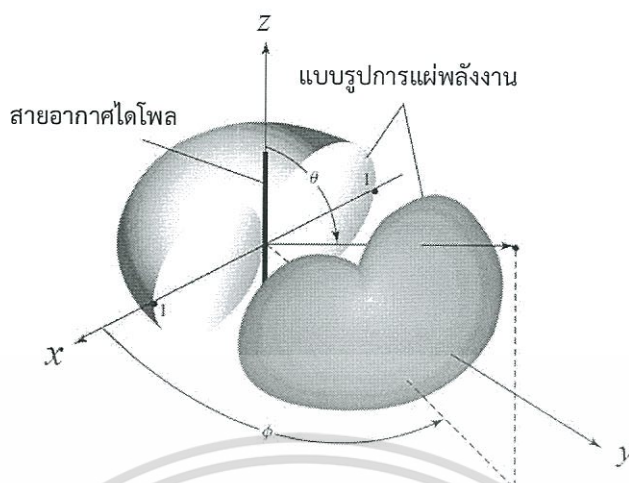
### 2.2.2 ไดโพลขนาดเล็ก

คุณสมบัติการแผ่พลังงานของไดโพลจิวซึ่งมีความยาว  $l \leq \lambda/50$  ถูกพิจารณาในหัวข้อที่แล้วโดยการกระจายของกระแส ถูกสมมติให้มีค่าคงที่ ถึงแม้ว่าการกระจายของกระแสมีค่าคงที่แต่ในทางปฏิบัติแล้วทำไม่ได้เพราะเป็นแค่ปริมาณทางคณิตศาสตร์แต่การกระจายของกระแสจริงๆ จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงสั้นๆ

การประมาณที่ดีกว่าของการกระจายของกระแสบนสายอากาศเส้นลวดซึ่งมีความยาว  $\lambda/50 < l \leq \lambda/10$  คือใช้การกระจายแบบการเปลี่ยนแปลงของรูปสามเหลี่ยม (Triangular Variation) โดยการจัดเรียงรูปทรงที่สะดวกที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ของไดโพล ส่วนใหญ่จะกำหนดให้สมมาตรกับจุดกำเนิดและวางตามแนวแกน Z แสดงดังรูปที่ 2.1 และแบบรูปการแผ่พลังงานในสามมิติของไดโพลจิวแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 การจัดวางโครงสร้างของไดโพลและการกระจายของกระแส [1]



รูปที่ 2.2 แบบรูปการแผ่พลังงานในสามมิติของไดโพลจิว [1]

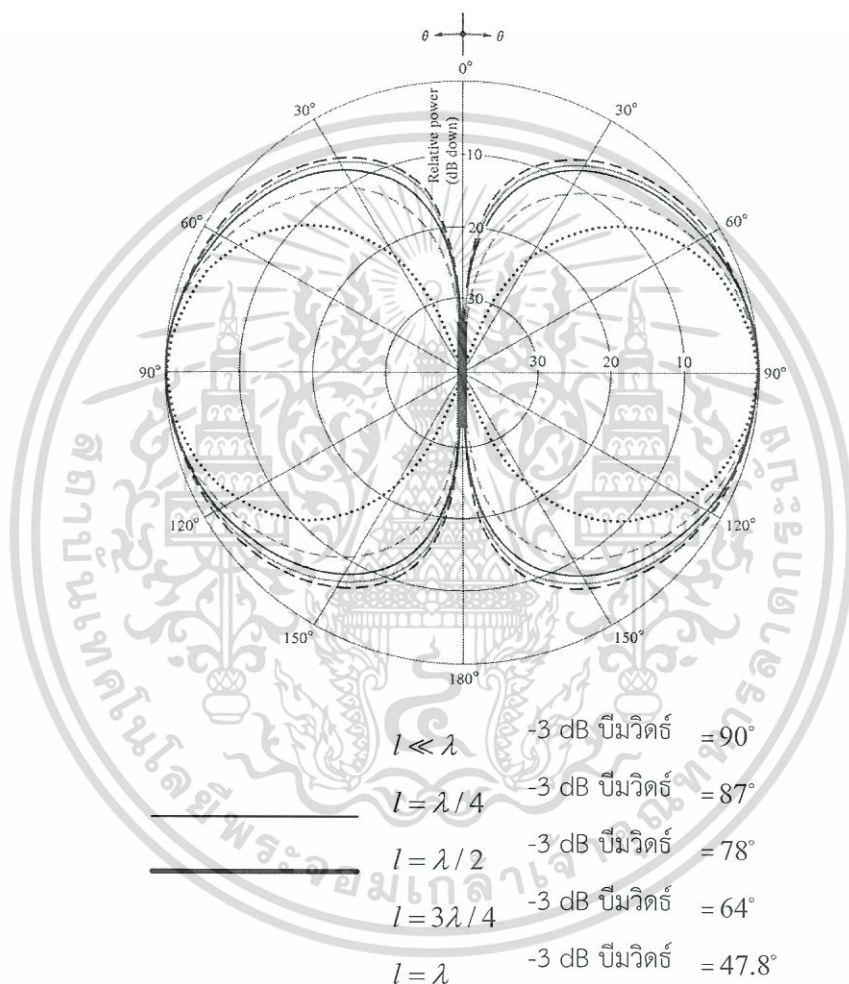
### 2.2.3 ไดโพลความยาวจำกัด

จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาเราจะนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะการแผ่พลังงานของไดโพลที่มีความยาวต่างๆ เพื่อที่จะลดความยุ่งยากของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยข้อสมมติเบื้องต้นคือเส้นลวดบางมากๆ (เส้นผ่านศูนย์กลางเข้าใกล้ศูนย์) โดยข้อสมมติฐานนี้จะดีก็ต่อเมื่อขนาดของเส้นลวดมีขนาดเล็กมากๆ ถ้าเทียบกับความยาวคลื่น

ในรูปที่ 2.3 จะแสดงถึงแบบรูปการแผ่กำลังงานเป็นแบบสองมิติที่ความยาวตามที่กำหนดคือ  $l = \lambda/4$ ,  $\lambda/2$ ,  $3\lambda/4$  และ  $\lambda$  และแสดงเปรียบเทียบกับแบบรูปกำลังสำหรับไดโพลจิว  $l \ll \lambda$  ( $U \sim \sin^2 \theta$ ) จะพบว่าถ้าความยาวของสายอากาศเพิ่มขึ้น ถ้าคลื่นจะมีค่าแคบลง เพราะว่าสภาพเจาะจงทิศทางเพิ่มขึ้นตามความยาว และที่ -3dB บีมวิดธ์แต่ละความยาวมีค่าดังนี้

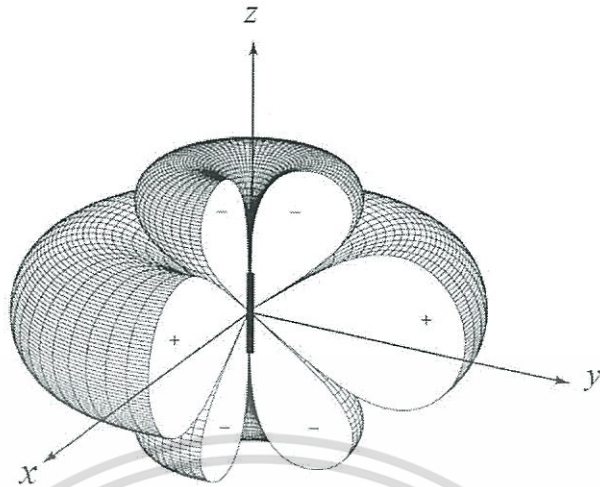
$l \ll \lambda$	3-dB บีมวิดธ์	= 90°
$l = \lambda/4$	3-dB บีมวิดธ์	= 87°
$l = \lambda/2$	3-dB บีมวิดธ์	= 78°
$l = 3\lambda/4$	3-dB บีมวิดธ์	= 64°
$l = \lambda$	3-dB บีมวิดธ์	= 47.8°

เมื่อความยาวของไดโพลเพิ่มมากขึ้นมากกว่าหนึ่งความยาวคลื่น ( $l > \lambda$ ) จำนวนของลำคลื่นก็จะเพิ่มมากขึ้นตามแบบรูปกำลังนอร์มอลไลซ์ของไดโพลความยาว  $l = 1.25\lambda$  แสดงดังรูปที่ 2.4 ในขณะที่รูปที่ 2.4 (ก) แสดงรูปสามมิติขณะที่รูปที่ 2.4 (ข) แสดงรูปสองมิติ ส่วนการกระจายกระแสสำหรับไดโพลที่มีความยาว  $l = \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4$  และ  $2\lambda$  แสดงดังรูปที่ 2.5

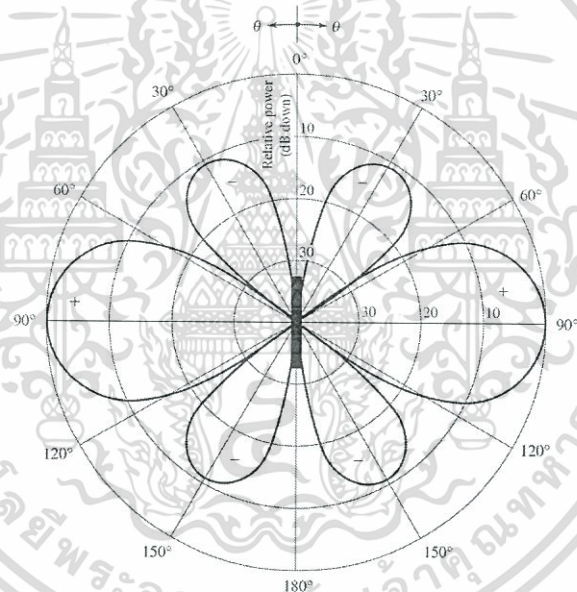


รูปที่ 2.3 แบบรูปเชิงขนาดในระนาบมุมยก (Elevation Plane) สำหรับไดโพลพอมที่มีการกระจายกระแสแบบไซนูซoidalเมื่อ  $l = \lambda/4 \ \lambda/2 \ 3\lambda/4$  และ  $\lambda$  [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



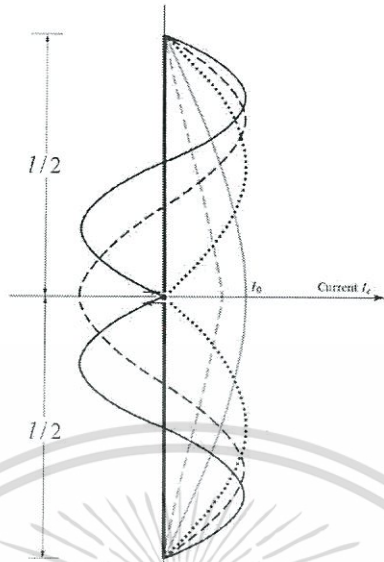
(ก) รูปสามมิติ



(ข) รูปสองมิติ

รูปที่ 2.4 แบบรูปเชิงขนาดสามมิติและสองมิติสำหรับไดโพลผสม เมื่อ  $l = 1.25\lambda$  และมีการกระจายกระแสแบบไซน์ซoidal [1]

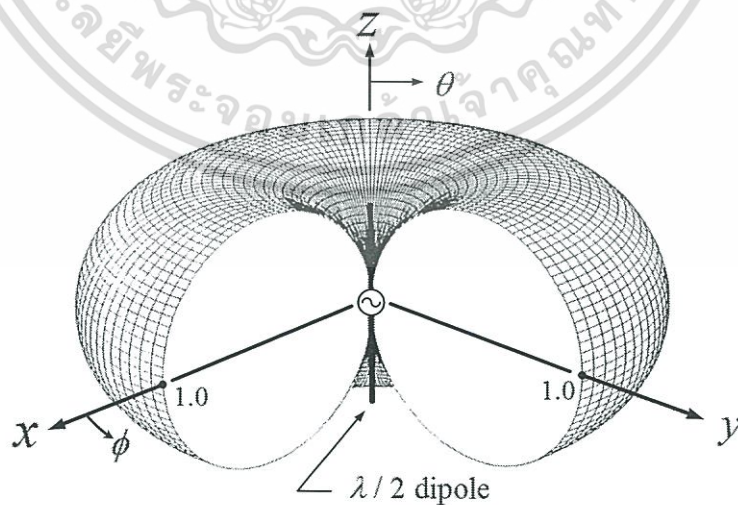
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การกระจายของกระแสตามแนวความยาวของสายอากาศแบบเส้นลวดเชิงเส้น [1]

#### 2.2.4 ไดโพลครึ่งความยาวคลื่น

หนึ่งในสายอากาศที่ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางคือ สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น ( $l = \lambda / 2$ ) ทั้งนี้ เนื่องจากความต้านทานการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลมีค่า 73  $\Omega$  ซึ่งมีค่าใกล้กับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณที่นิยมใช้คือ 50  $\Omega$  หรือ 75  $\Omega$  เมื่อนำมาต่อรวมกันจะทำให้แมตชิ่งได้โดยเฉพาะที่ความถี่ที่เรโซแนนซ์ โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ ของสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 พารามิเตอร์ของสายอากาศ

สายอากาศชนิดต่างๆ ที่มีใช้งานกันอยู่ทั่วไปมีค่าคุณลักษณะและค่าปัจจัยต่างๆ ที่จำเป็นต้องพิจารณาประกอบการประเมินสมรรถนะของสายอากาศเพื่อช่วยตัดสินใจประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานอยู่มากมาย ในส่วนนี้จะกล่าวถึงพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศดังต่อไปนี้

### 2.3.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

การพิจารณาว่าสายอากาศจะมีคุณลักษณะที่เพียงพอต่อการใช้งานได้หรือไม่นั้น นอกจากจะพิจารณาเฉพาะ  $|S_{11}|$  แล้วยังสามารถที่จะพิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR) ได้เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นการใช้หลักการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสองตัวกลาง ซึ่งหากว่าทั้งสองตัวกลางมีอิมพีแดนซ์เท่ากันจะส่งให้คลื่นมีการส่งผ่านได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่มีการสูญเสีย ในทางกลับกันหากสองตัวกลางมีค่าอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันมากๆ จะส่งผลให้การส่งผ่านของคลื่นมีการสูญเสียหรือเกิดการสะท้อนกลับ ซึ่งหมายความว่ากำลังงานส่วนใหญ่ที่ส่งให้สายอากาศไม่สามารถที่จะแพร่ออกไปในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ซึ่งกรณีส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นเมื่ออิมพีแดนซ์ระหว่างสองตัวกลางมีค่าที่ไม่เท่ากันหรือมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งในกรณีดังกล่าวนี้จะส่งผลให้ไม่มีการส่งผ่านอย่างสมบูรณ์หรือเกิดการสะท้อนกลับทั้งหมด จะเป็นการเกิดการสะสมพลังงานไว้บางส่วน ซึ่งสามารถพิจารณาการสะท้อนได้จากสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $\Gamma$ ) ได้จากสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \quad (2.1)$$

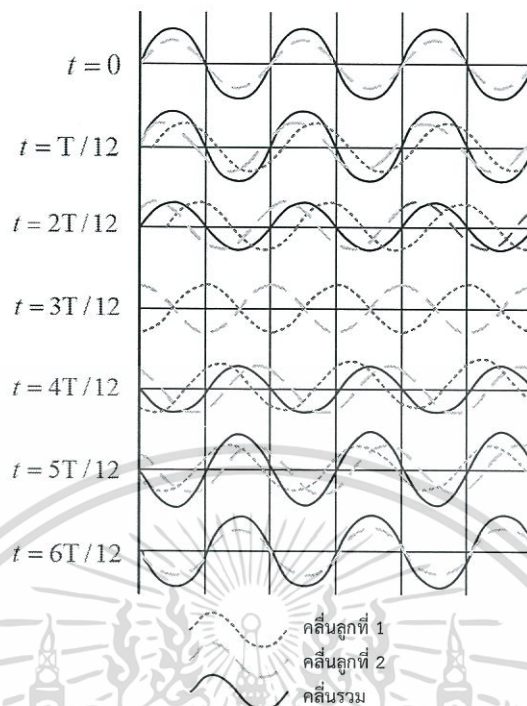
เมื่อ  $Z_{in}$  คือ อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ

$Z_o$  คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ

$$RL(\text{dB}) = -20 \log |\Gamma| \quad (2.2)$$

### 2.3.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio; SWR)

ถ้าคลื่นที่มีแอมพลิจูดและความถี่เท่ากันสองคลื่นที่เคลื่อนที่บนสายส่งในทิศทางตรงข้ามกัน คลื่นทั้งสองจะรวมตัวกันและหักล้างซึ่งกันและกันสลับไปมา ผลที่ได้จะเรียกว่าคลื่นนิ่ง (Standing Wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเกิดคลื่นนิ่ง

รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่าคลื่นทั้งสองรวมตัวกันและหักล้างกันได้อย่างไร โดยอัตราส่วนคลื่นนิ่งจะแบ่งได้เป็นสองประเภทคืออัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio; VSWR) และอัตราส่วนคลื่นนิ่งกระแส (Current Standing Wave Ratio; ISWR)

อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันคือ อัตราส่วนระหว่างแรงดันสูงสุดกับแรงดันน้อยสุดดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (2.3)$$

ในทำนองเดียวกันอัตราส่วนคลื่นนิ่งกระแสคือ อัตราส่วนระหว่างกระแสสูงสุดกับกระแสน้อยสุดดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$ISWR = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (2.4)$$

โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลื่นนิ่งกับค่าการสูญเสียย้อนกลับแสดงดังสมการที่ 2.5

$$SWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2.5)$$

### 2.3.3 ระยะเวลาของสายอากาศ (Field Region)

ระยะเวลาของสายอากาศ คือ ระยะที่บอกว่าสายอากาศมีการสะสมพลังงานหรือมีการแผ่กระจายคลื่นออกมา โดยระยะเวลาของสายอากาศแบ่งเป็น 3 ระยะดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ระยะเวลาของสายอากาศที่ระยะต่างๆ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

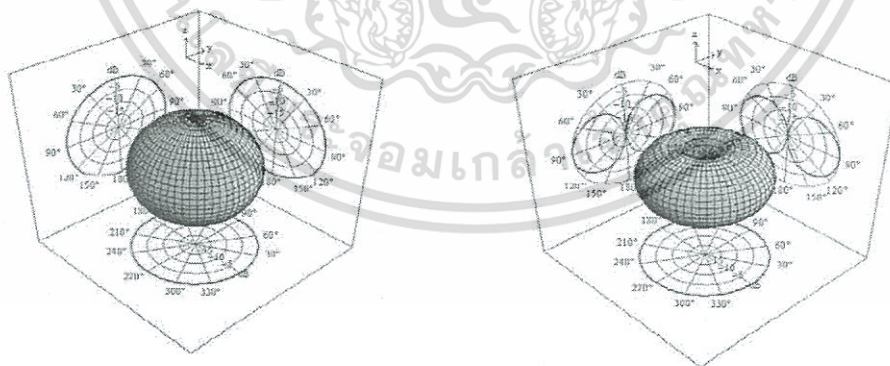
$R_1$  - ระยะสนามระยะใกล้รีแอคทีฟ (Reactive Near Field) คือระยะที่วัดจากสายอากาศ ไปจนถึง  $0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$  หรือระยะที่อยู่ระหว่าง  $0 \leq R_1 < 0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$  โดยที่  $D$  คือมิติที่กว้างที่สุดของสายอากาศ ที่ระยะนี้จะพบว่าสายอากาศจะไม่แพร่กระจายคลื่นออกมาแต่จะสะสมพลังงานในรูปรีแอคทีฟ กำลังงานที่คำนวณได้จะอยู่ในรูปของส่วนจินตภาพ

$R_2$  - ระยะสนามระยะใกล้ที่แพร่กระจายคลื่น (Radiation Near Field) คือระยะตั้งแต่  $0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$  ไปจนถึง  $\frac{2D^2}{\lambda}$  หรือ  $0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R_2 < \frac{2D^2}{\lambda}$  ที่ระยะนี้สายอากาศจะแพร่กระจายคลื่นออกมาบางส่วนและสะสมไว้บางส่วน กำลังงานที่คำนวณได้จะอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน

$R_3$  - ระยะสนามระยะไกล (Far Field) คือระยะตั้งแต่  $\frac{2D^2}{\lambda}$  เป็นต้นไปหรือ  $\frac{2D^2}{\lambda} \leq R_3 < \infty$  ที่ระยะนี้สายอากาศจะแพร่กระจายคลื่นออกมาหมด กำลังที่คำนวณได้จะเป็นส่วนจริง โดยที่  $D$  คือมิติที่กว้างที่สุดของสายอากาศ

### 2.3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

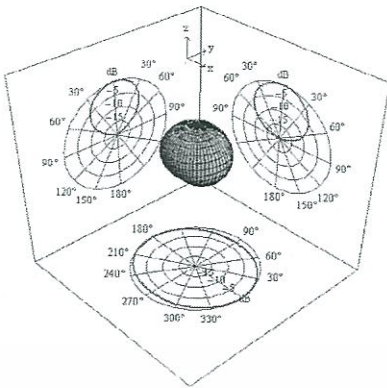
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นคือการแสดงทางกราฟของคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะหาได้จากระยะสนามระยะไกลและแสดงเป็นฟังก์ชันของการระบุทิศทาง โดยทั่วไปแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะแบ่งได้เป็น 4 รูปแบบ คือ แบบไม่ชี้ทิศทาง (Non-directional) แบบรอบทิศทาง (Omni-directional) แบบทิศทางเดียว (Uni-directional) และแบบสองทิศทาง (Bi-directional) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ต่อไปนี้



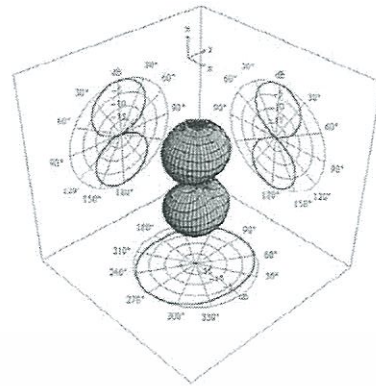
(ก) แบบไม่ชี้ทิศทาง

(ข) แบบรอบทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) แบบทิศทางเดียว

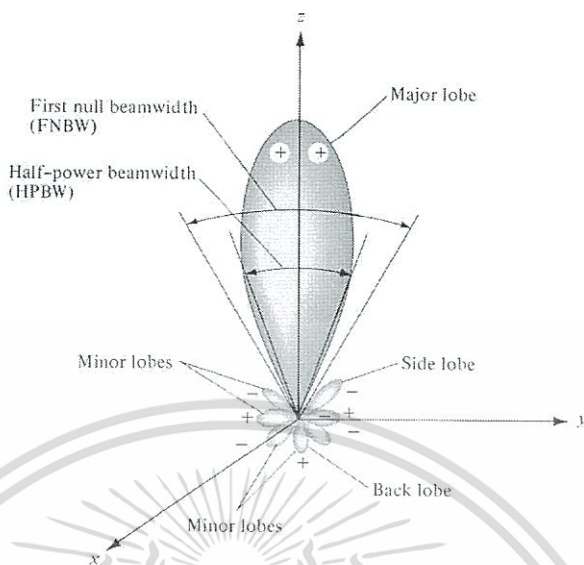


(ง) แบบสองทิศทาง

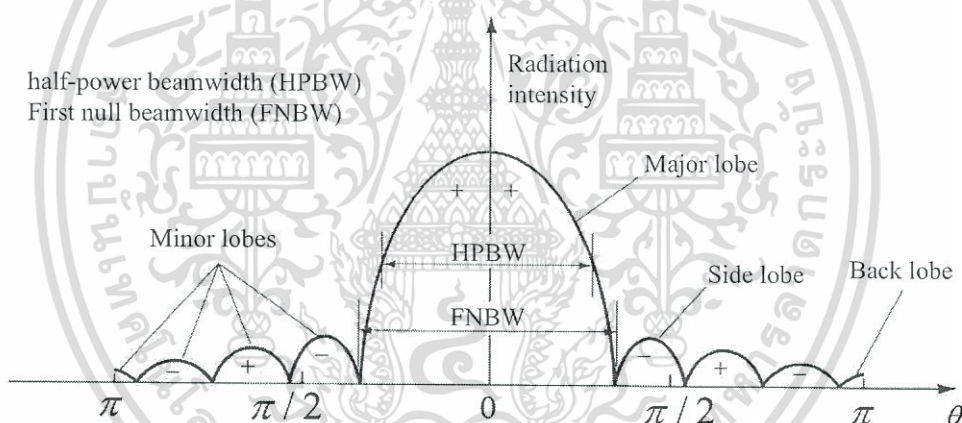
### รูปที่ 2.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

โดยทั่วไปแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศขณะที่เป็นสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีความเหมือนกันทุกประการ ในการวัดจึงสามารถทำได้โดยให้สายอากาศทดสอบทำงานในภาคส่งหรือภาครับก็ได้ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีหลายลักษณะ เช่น แบบรูปการโพลาไรซ์และแบบรูปสภาพเจาะจงทิศทาง แบบรูปเหล่านี้เป็นประโยชน์ในการใช้ประกอบพิจารณาเพื่อประยุกต์ใช้งานสายอากาศในลักษณะงานเฉพาะต่างๆ

ในแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะประกอบด้วยระดับสัญญาณที่ชี้ไปในทิศทางต่างๆ ปกติระดับสัญญาณที่มียอดสูงสุดเป็นตัวกำหนดแนวเล็งหลักของสายอากาศ ระดับสัญญาณนี้เรียกว่า ลำคลื่นหลัก (Major Lobe) และระดับสัญญาณอื่นๆ เรียกว่าลำคลื่นย่อย (Minor Lobe) โดยลำคลื่นย่อยมีอยู่สองลักษณะคือลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe) และลำคลื่นย่อยด้านหลัง (Back Lobe) ซึ่งระดับลำคลื่นย่อยมีความสำคัญในการออกแบบสายอากาศเนื่องจากลำคลื่นย่อยเป็นทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในทิศทางที่ไม่พึงประสงค์



(ก) ลำคลื่นการแผ่กำลังงานและบีมวิดธ์ของแบบรูปสายอากาศ



(ข) สเกลในเชิงเส้นของแบบรูปกำลังและความสัมพันธ์กับลำคลื่นและบีมวิดธ์  
รูปที่ 2.10 ลำคลื่นการแผ่กำลังงานและบีมวิดธ์ของสายอากาศ [1]

รูปที่ 2.10 (ก) และ (ข) ลำคลื่นของสายอากาศจะมีการพิจารณาความกว้างลำคลื่น โดยความกว้างลำคลื่นมีผลต่อการพิจารณาความสามารถในการกำหนดรายละเอียดการตรวจวัดข้อมูลในการสำรวจข้อมูลระยะไกล หรือพื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณ เช่นในการให้บริการการสื่อสารผ่านดาวเทียม เป็นต้น โดยทั่วไปนิยามของความกว้างลำคลื่นสองแบบที่นิยมใช้กัน ได้แก่

- ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beam Width; HPBW) คือ ขนาดเชิงมุมของลำคลื่นหลักที่วัดตรงช่วงระหว่างตำแหน่งที่กำลังคลื่นลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังสูงสุด

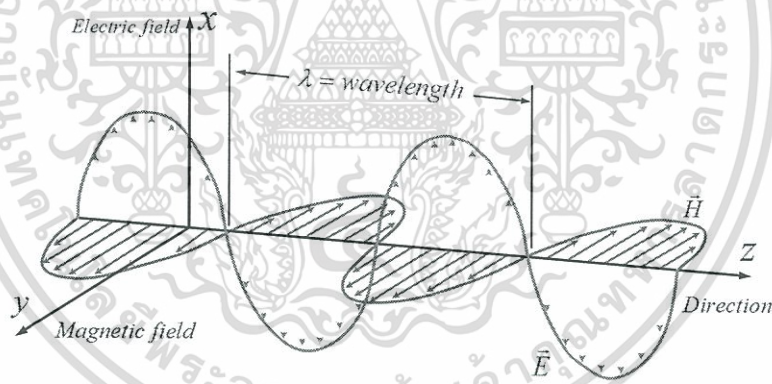
- ความกว้างลำคลื่น ณ จุดศูนย์คู้แรก (First Null Beam Width; FNBW) คือ ขนาดเชิงมุมของลำคลื่นหลักที่วัดตรงช่วงระหว่างตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์คู้แรก

### 2.3.5 โพลาริเซชันของคลื่นระนาบ (Polarization) [2]

โพลาริเซชันของคลื่นระนาบโดยทั่วไปแล้วคลื่นระนาบไม่ได้มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าชี้ไปในทิศทางเดียวอย่างในรูปที่ 2.11 เสมอไปจากสมการดังต่อไปนี้

$$\left. \begin{aligned} \vec{E} &= (M_x \vec{i}_x + M_y \vec{i}_y) k^2 e^{-jkz} \\ \vec{H} &= (-M_x \vec{i}_y + M_y \vec{i}_x) (\omega \epsilon - j\sigma) k e^{-jkz} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

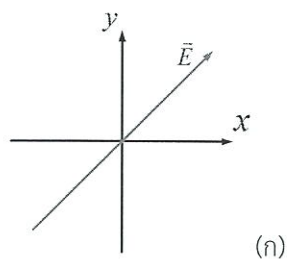
จะเห็นได้ว่าถ้าเฟสของ  $M_x$  และ  $M_y$  ไม่เท่ากันทิศทางของสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  หรือ  $\vec{H}$  จะเปลี่ยนไปตามเวลา ในการนิยามของการโพลาริเซชันนี้ เราถือเอาทิศทางของปลายของ  $\vec{E}$  บนระนาบที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เป็นหลัก เช่น ทิศทางของปลายสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  เป็นเส้นตรงเราเรียกการโพลาริเซชันกรณีนี้ว่า การโพลาริเซชันเชิงเส้น (Linear Polarization) ถ้าเป็นการโพลาริเซชันแบบเส้นตรงที่ขนานกับพื้นโลก เราเรียกว่า การโพลาริเซชันแบบขนานกับพื้นโลก (Horizontal Polarization) ถ้าตั้งฉากกับพื้นโลกเรียกว่า การโพลาริเซชันแบบตั้งฉากกับพื้นโลก (Vertical Polarization)



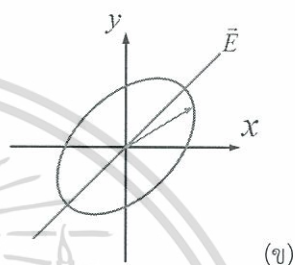
รูปที่ 2.11 คลื่นระนาบเคลื่อนที่ในทิศ Z [2]

และโพลาริเซชันในแบบอื่นๆ ก็จะถูกที่คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกไปที่อธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลาต่างๆ การแบ่งอาจแบ่งออกเป็น 3 แบบคือการโพลาริเซชันเชิงเส้น การโพลาริเซชันแบบวงกลม การโพลาริเซชันแบบวงรี ซึ่งแต่ละแบบขึ้นอยู่กับความถี่ของยอดของเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า และถ้าดูจากเฟส  $M_x$  และ  $M_y$  เราสามารถสรุปเป็นภาพได้ดังรูปที่ 2.12

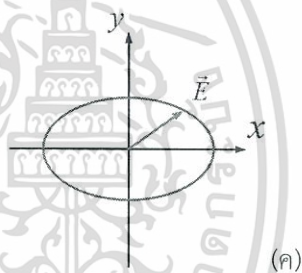
1. เมื่อเฟสของ  $M_x$  เท่ากับ  $M_y$  จะได้  
โพลาริเซชันแบบเส้นตรงตามรูป (ก)



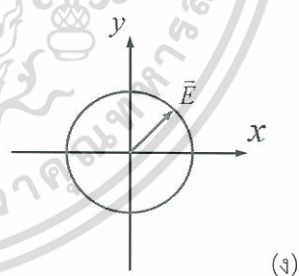
2. เมื่อเฟสของ  $M_x$  ไม่เท่ากับ  $M_y$  และ  $\theta \neq \pi/2$   
จะได้โพลาริเซชันแบบวงรีตามรูป (ข)



3. เมื่อเฟสของ  $M_x$  และ  $M_y$  ต่างกันเท่ากับ  
 $\pi/2$   
- ถ้า  $|M_x| \neq |M_y|$  จะเป็นโพลาริเซชันแบบวงรีที่  
มีแกนหลักอยู่บนแกน  $x$  และ  $y$  ตามรูป (ค)



- ถ้า  $|M_x| = |M_y|$  จะเป็นโพลาริเซชันแบบ  
วงกลมตามรูป (ง)



รูปที่ 2.12 โพลาริเซชันแบบต่างๆ [2]

โพลาริเซชันแบบวงรีและแบบวงกลมนั้นทิศทางการหมุนของ  $\vec{E}$  อาจจะเป็นแบบตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาก็ได้ ในการนิยามให้ถือหลักดังนี้ คือ เมื่อเรากำหนดระนาบ  $XY$  คงที่ระนาบหนึ่งและเมื่อเรามองจากทิศทางของสายอากาศส่ง ถ้าสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  ที่ปรากฏบนระนาบนี้หมุน

ตามเข็มนาฬิกาเรากำหนดว่าเป็นโพลาริเซชันแบบตามเข็มนาฬิกาหรือแบบหมุนเวียนขวา และถ้า  $\vec{E}$  หมุนวนเข็มนาฬิกา ก็จะเป็นโพลาริเซชันแบบทวนเข็มนาฬิกาหรือหมุนเวียนซ้าย

## 2.4 ค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ

อัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ (Specific Absorption Rate: SAR) หมายถึง อัตราที่พลังงานไฟฟ้าถูกดูดซับเข้าสู่เนื้อเยื่อของร่างกาย มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อกิโลกรัม (W/Kg) ซึ่งเป็นหน่วยการวัดปริมาณการได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งใช้กันทั่วไปสำหรับวัดการได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูงกว่า 100 kHz

ค่าดูดกลืนพลังงานจำเพาะ คือค่าอัตราการดูดกลืนพลังงานของเนื้อเยื่อจากได้รับรังสีชนิด Radio frequency หรือตัวย่อคือ RF (ริงส์อาร์เอฟ) โดยมีหน่วยเป็น วัตต์ต่อกิโลกรัม (W/kg) เช่น เอสเออาร์ทั่วร่างกายจากการใช้โทรศัพท์มือถือ = 1 วัตต์/กิโลกรัม หมายความว่า ขณะใช้โทรศัพท์มือถือ เนื้อเยื่อของร่างกายในส่วนต่างๆ 1 กิโลกรัม กรัมจะดูดกลืนพลังงานจากรังสีอาร์เอฟเป็นจำนวน 1 วัตต์

การวัดค่าอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะโดยทั่วไปคิดเฉลี่ยทั้งหมดของร่างกาย หรือในปริมาตรขนาดเล็ก (1 กรัม หรือ 10 กรัมของเนื้อเยื่อ) ในประเทศสหรัฐอเมริกาและแคนาดา โดยองค์กร Federal Communications Commission (FCC) ได้กำหนดขีดจำกัดของค่าอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ (SAR Limit) ให้มีค่าไม่เกิน 1.6 วัตต์ต่อกิโลกรัม ที่ปริมาตรเนื้อเยื่อ 1 กรัม ส่วนในยุโรปโดยองค์กร International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) ได้กำหนดขีดจำกัดของค่าอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะไว้ให้ไม่เกิน 2.0 วัตต์ต่อกิโลกรัม (คิดที่ปริมาตรเนื้อเยื่อ 10 กรัม)

$$SAR = \frac{1}{\rho} Q_{ext} = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2 \quad (2.7)$$

$SAR$  = อัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในเนื้อเยื่อ (W/kg)

$Q_{ext}$  = ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายนอกเนื้อเยื่อ (W/m<sup>3</sup>)

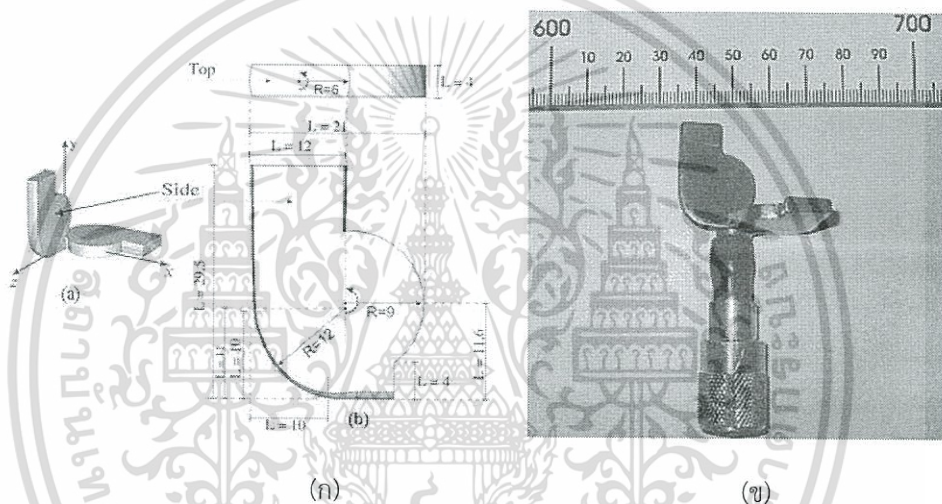
$E$  = ความเข้มของสนามไฟฟ้า (V/m)

$\sigma$  = สภาพความนำไฟฟ้าของเนื้อเยื่อ (S/m)

$\rho$  = ความหนาแน่นจำเพาะ (kg/m<sup>3</sup>)

## 2.5 งานวิจัยที่มีมาก่อน

สำหรับในรายงานความก้าวหน้าฉบับนี้ได้เริ่มต้นทำการศึกษางานวิจัยของ E.S.Pires และคณะ ซึ่งมีการนำเสนอเรื่อง A New Quasi – Isotropic Antenna for Ultra – Wideband Application [3] ในปี 2007 ซึ่งงานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศที่มีขนาดกะทัดรัดสำหรับการใช้งานในย่านความถี่ Ultra – Wideband (UWB) ซึ่งสามารถใช้งานในย่านความถี่ตั้งแต่ 2.17 GHz - 2.68 GHz โดยสายอากาศนี้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Quasi – Isotropic ซึ่งมีโครงสร้างและภาพถ่ายโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ก) และ 2.13 (ข) และมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศดังกล่าวตามรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 โครงสร้างสายอากาศ (ก) รูปทรงทางเรขาคณิต (ข) ภาพถ่ายโครงสร้าง [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

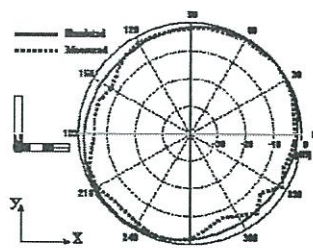


Fig. 3. Measured radiation patterns at 2.2 GHz in the yx plan.

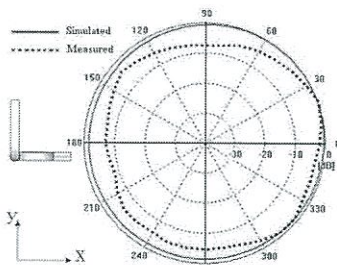


Fig. 6. Measured radiation patterns at 2.6 GHz in the yx plan.

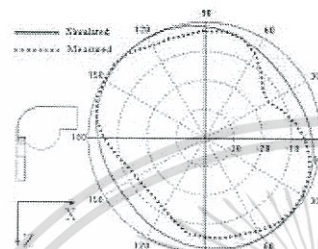


Fig. 4. Measured radiation patterns at 2.2 GHz in the xz plan.

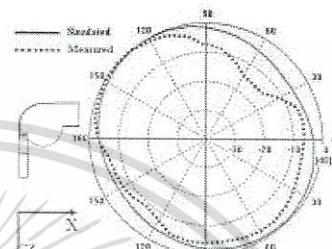


Fig. 7. Measured radiation patterns at 2.6 GHz in the xz plan.

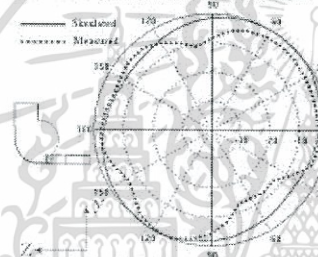


Fig. 5. Measured radiation patterns at 2.2 GHz in the yz plan.

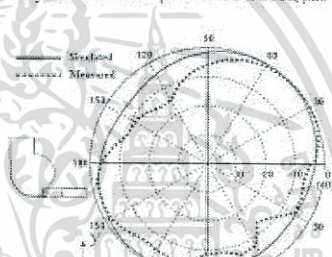
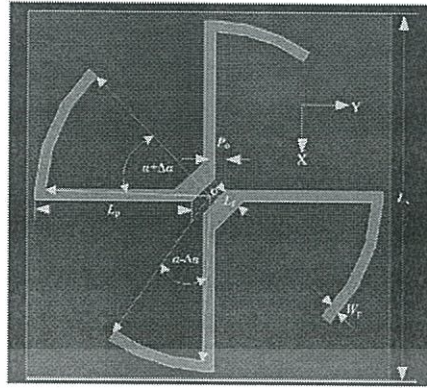


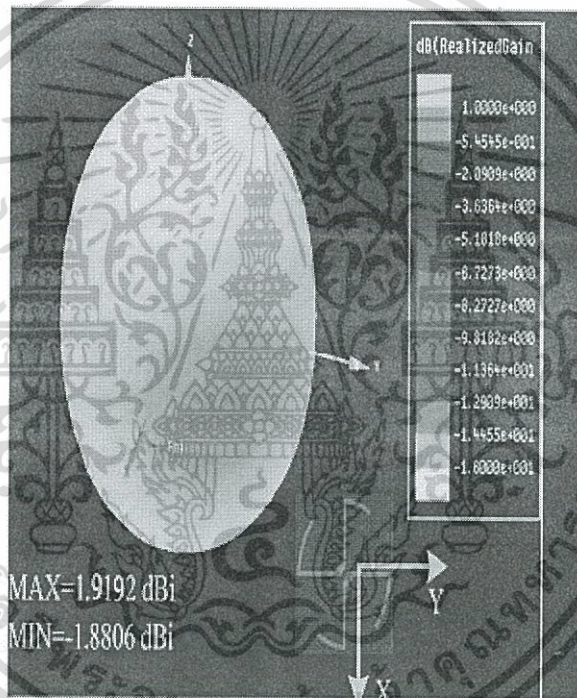
Fig. 8. Measured radiation patterns at 2.6 GHz in the yz plan.

รูปที่ 2.14 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ [3]

และต่อมาในปี 2013 Praturi Vivekanand และ Pillem Ramesh นักวิจัยจากอินเดีย ได้ทำการศึกษา Isotropic Radiation Using Crossed Dipoles [4] ซึ่งบทความนี้ได้กล่าวถึง ผลกระทบของสายอากาศแบบแผ่นชนิด Isotropic – Radiated สำหรับความถี่ 2.5 GHz (WLAN) และสายอากาศนี้ออกแบบโดยใช้การวางสายไดโพลเป็นรูปกากบาท ดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยการ กำหนดความยาวของไดโพลที่เป็นรูปกากบาท ทำให้สายอากาศนี้อยู่ในย่านความถี่ 2.5 – 2.58 GHz และในการวิจัยครั้งนี้เป็นการจำลองการสร้างสายอากาศ ซึ่งทำให้ได้ผลลัพธ์ระหว่างค่าอัตราขยาย สูงสุดกับค่าอัตราขยายต่ำสุด ได้แก่ 1.9192 dBi และ 1.8806 dBi ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 การวางสายอากาศไดโพลเป็นรูปกากบาท [4]



รูปที่ 2.16 ผลลัพธ์การจำลองแบบรูปการแพร่กระจายของสายอากาศ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 สรุป

ในบทนี้ได้เสนอทฤษฎีของสายอากาศไดโพล พารามิเตอร์ของสายอากาศ ค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ รวมถึงงานวิจัยที่มามาก่อนที่สามารถดูเป็นแนวทางหรือสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้

สายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกน มีความซับซ้อนและยุ่งยากและมีความละเอียด เนื่องจากต้องใช้งานกับอุปกรณ์อื่นๆอีกด้วย โดยในที่นี้ทางกลุ่มจะเลือกใช้สายอากาศบนแผ่นพิมพ์โดยที่ทางกลุ่มได้เลือกใช้สายอากาศแบบไดโพล โดยเบื้องต้นจะใช้หลักการในการออกแบบสายอากาศ จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่มีความเหมาะสมและให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยพิจารณา  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราการขยาย ในบท 3 และ 4 ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

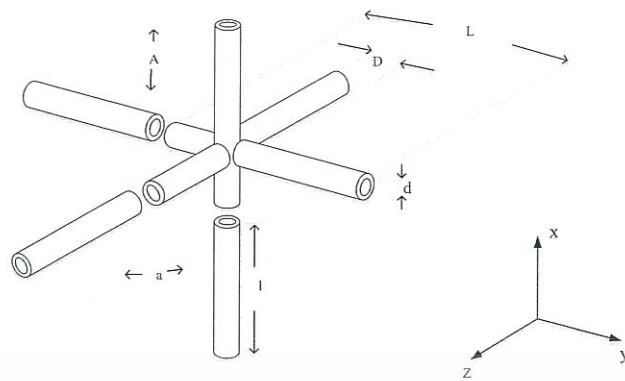
### การออกแบบและการจัดทำ

#### 3.1 การออกแบบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการออกแบบสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกนที่ใช้งานในย่านความถี่ 2.45 GHz โดยใช้ทฤษฎีที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 และจะนำมาออกแบบโดยโปรแกรมเพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่ได้คำนวณทางทฤษฎี โดยจะมุ่งเน้นพิจารณาคุณสมบัติของสายอากาศ ซึ่งประกอบไปด้วย  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยาย เพื่อจะศึกษาถึงผลกระทบต่อสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบ ซึ่งการเริ่มต้นของการออกแบบสายอากาศนั้นจะเริ่มต้นจากการกำหนดความยาวของสายอากาศไดโพลให้มีความยาวเป็น  $\lambda/2$

#### 3.2 โครงสร้าง

การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศในเบื้องต้นโดยใช้ทฤษฎีของสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นมาเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น สำหรับใช้ในการคำนวณความยาวทั้งหมดของสายอากาศ โดยการออกแบบสายอากาศในแต่ละโครงสร้างนั้นจะใช้โปรแกรมจำลอง และศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ โดยพิจารณา  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB จึงจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ โดยจำลองศึกษาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ได้ออกแบบนั้นจะใช้โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® สำหรับการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศโดยอยู่ในรูปไดโพลไขว้กันสามแกนตามแกน X Y และ Z ตามลำดับ ให้ความยาวทั้งหมดของแต่ละแกนเป็น  $\lambda/2$  และแบ่งให้แขนแต่ละข้างของไดโพลมีความยาวเท่ากันเท่ากับ  $\lambda/4$  โดยกำหนดให้ระยะห่างแขนแต่ละข้างเป็น 2 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะห่างที่เชื่อมต่อกับสายนำสัญญาณที่เป็นชนิด SMA มีอิมพีแดนซ์โดยความถี่ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณ คือ 2.45 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้งาน โดยโครงสร้างของสายอากาศเริ่มต้นจะแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศแพร่กระจายคลื่น

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศ

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (mm)
$D$	3.0
$d$	2.0
$L$	29.0
$L$	19.0
$R$	2.0
$a$	7.5
$A$	18.5

ซึ่ง  $D$  คือ รัศมีภายนอกของท่อทองเหลือง

$d$  คือ รัศมีภายในของท่อทองเหลือง

$L$  คือ ความยาวของโครงสร้างหลักของสายอากาศ

$l$  คือ ความยาวของแขนไดโพล

$R$  คือ ระยะห่างของแขนไดโพล

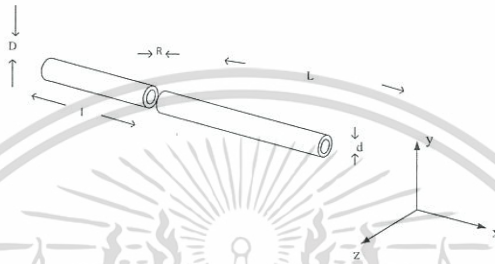
$a$  คือ ระยะจากแนวแกนที่ตั้งฉากกันด้านสั้น

$A$  คือ ระยะจากแนวแกนที่ตั้งฉากกันด้านยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 สายอากาศเริ่มต้นที่มีการวางในแนวแกน X

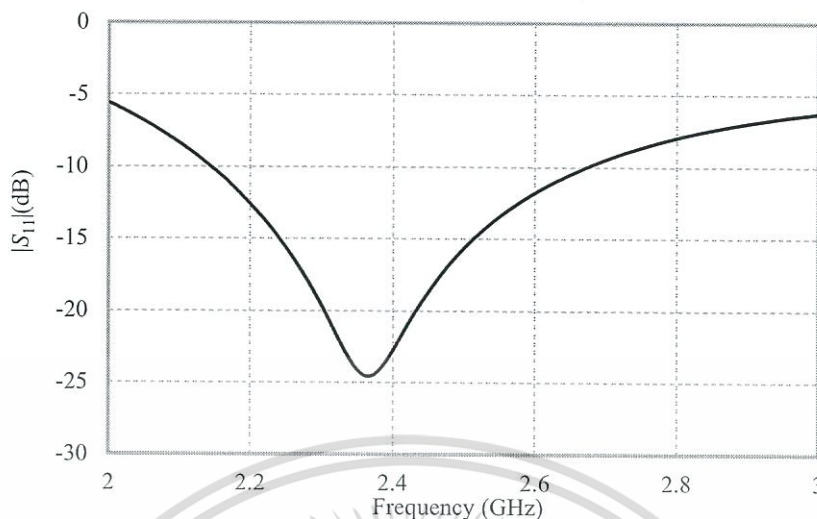
สำหรับการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศเริ่มต้นโดยอยู่ในรูปไดโพลตามแกน X ให้ความยาวทั้งหมดเป็น  $\lambda/2$  และแบ่งให้แขนแต่ละข้างของไดโพลมีความยาวเท่ากันเท่ากับ  $\lambda/4$  โดยกำหนดให้ระยะห่างแขนแต่ละข้างเป็น 2 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะห่างที่เชื่อมต่อกับสายนำสัญญาณที่เป็นชนิด SMA มีอิมพีแดนซ์โดยความถี่ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณคือ 2.45 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้ งาน ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศเริ่มต้นจะแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของสายอากาศเริ่มต้นที่วางในแนวแกน X

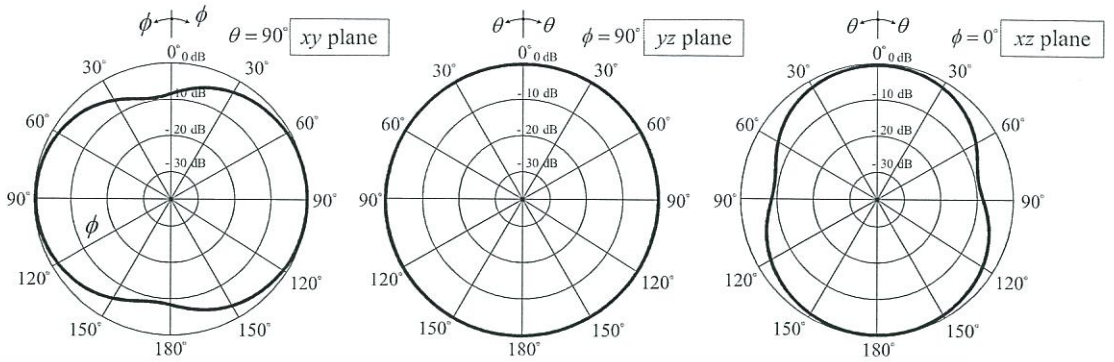
จากรูปที่ 3.2 แสดงถึงโครงสร้างของสายอากาศเริ่มต้นที่วางในแนวแกน X ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.1

ในส่วนถัดไปจะกล่าวถึงคุณสมบัติที่สำคัญของสายอากาศเริ่มต้นที่จะพิจารณาเพื่อนำมาสร้างสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกน โดยแสดงผลการจำลอง  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายของสายอากาศในรูปที่ 3.3 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ



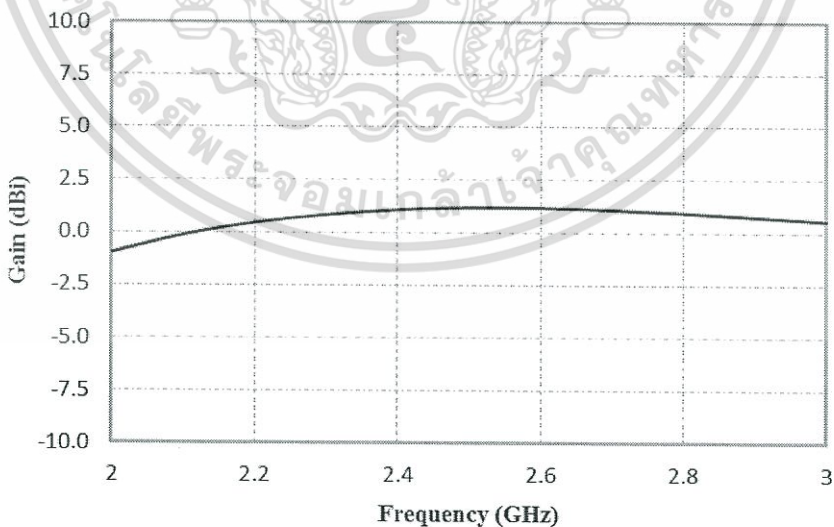
รูปที่ 3.3  $|S_{11}|$  ของสายอากาศเริ่มต้นที่วางในแนวแกน X

จากผลการจำลอง  $|S_{11}|$  ในรูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า -18.5 dB สายอากาศที่จำลองขึ้นนี้มีย่านความถี่ที่  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ 2.14 GHz - 2.66 GHz มีแบนด์วิดท์ 0.52 GHz และมีเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ 21.22% จากผลการจำลอง  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่นำเสนอมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ -24.54 dB ที่ความถี่ 2.36 GHz ในขณะที่ความถี่ที่พิจารณาคือความถี่ 2.4 GHz มีค่า  $|S_{11}|$  เท่ากับ -22.90 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz มี  $|S_{11}|$  เท่ากับ -18.30 dB และที่ความถี่ 2.485 GHz มี  $|S_{11}|$  เท่ากับ -16.20 dB ดังนั้นจากผลการจำลองพบว่า สายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกนสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ที่ใช้งาน (2.4 - 2.485 GHz) ใดๆก็ตามในการพิจารณาคุณสมบัติของสายอากาศต้องทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายของสายอากาศเพื่อยืนยันสมรรถนะของสายอากาศ โดยแสดงผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายของสายอากาศในรูปที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อสายอากาศเริ่มต้นที่วางในแนวแกน X

จากรูปที่ 3.4 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อสายอากาศเริ่มต้นวางในแนวแกน X โดยพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ XY YZ และ XZ ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าในระนาบ XY มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 100.4 องศา และในระนาบ XZ มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 83.1 องศา จากผลการจำลองเมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้ง 3 ระนาบ พบว่าสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว (Omni-directional radiation pattern) อย่างไรก็ตามสายอากาศเริ่มต้นไม่สามารถสร้างแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบไอโซทรอปิก จากนั้นทำการพิจารณาค่าอัตราขยายของสายอากาศเมื่อสายอากาศเริ่มต้นวางในแนวแกน X



รูปที่ 3.5 อัตราขยายของสายอากาศเริ่มต้นที่วางในแนวแกน X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

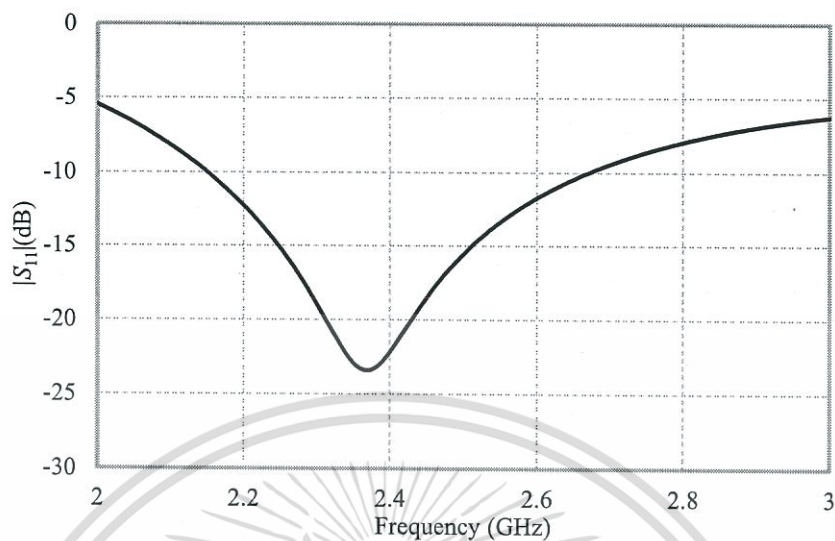
จากรูปที่ 3.5 แสดงอัตราขยายของสายอากาศเริ่มต้นที่วางในแนวแกน X โดยพิจารณาที่ความถี่ 2.4 - 2.485 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้งาน สำหรับความถี่ 2.4 GHz มีอัตราขยายเท่ากับ 1.08 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz มีอัตราขยายเท่ากับ 1.15 dBi และที่ความถี่ 2.485 GHz มีอัตราขยายเท่ากับ 1.18 dBi

จากการพิจารณาสายอากาศเริ่มต้นนั้นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นยังไม่เป็นไอโซทรอปิกจึงมีแนวคิดในการออกแบบสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกนให้มีการวางสายอากาศแบบสามแนวแกนที่ตั้งฉากกันเพื่อให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ต้องการ ดังนั้นในส่วนถัดไปนำเสนอโครงสร้างสายอากาศที่ถูกวางในแนวแกน Y โดยแสดงโครงสร้างสายอากาศในรูปที่ 3.6



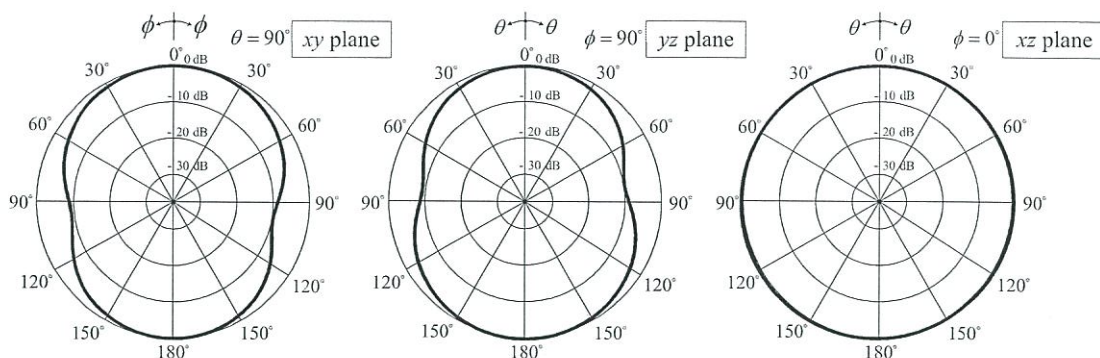
รูปที่ 3.6 โครงสร้างของสายอากาศที่วางในแนวแกน Y

จากรูปที่ 3.6 แสดงถึงโครงสร้างของสายอากาศที่วางในแนวแกน Y ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.1 ถัดไปจะกล่าวถึงคุณสมบัติที่สำคัญของสายอากาศที่วางในแนวแกน Y โดยจะพิจารณาเพื่อนำมาสร้างสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกน โดยแสดงผลการจำลอง  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายของสายอากาศในรูปที่ 3.7 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ



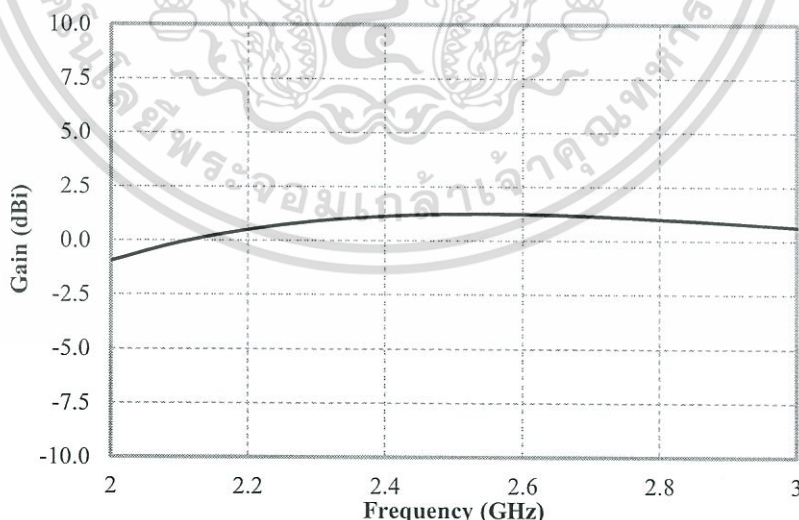
รูปที่ 3.7  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่วางในแนวแกน Y

จากผลการจำลอง  $|S_{11}|$  ในรูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า -18.5 dB สายอากาศที่จำลองขึ้นนี้มีย่านความถี่ที่  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ 2.15 GHz - 2.66 GHz มีแบนด์วิดท์ 0.51 GHz และมีเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ 20.81% จากผลการจำลอง  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่นำเสนอมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ -23.39 dB ที่ความถี่ 2.37 GHz ในขณะที่ความถี่ที่พิจารณาคือความถี่ 2.4 GHz มีค่า  $|S_{11}|$  เท่ากับ -22.27 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz มี  $|S_{11}|$  เท่ากับ -17.99 dB และที่ความถี่ 2.485 GHz มี  $|S_{11}|$  เท่ากับ -16.15 dB ดังนั้นจากผลการจำลองพบว่า สายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกนสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ที่ใช้งาน (2.4 - 2.485 GHz) อย่างไรก็ตามในการพิจารณาคุณสมบัติของสายอากาศต้องทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายของสายอากาศเพื่อยืนยันสมรรถนะของสายอากาศ โดยแสดงผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายของสายอากาศในรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่วางในแนวแกน Y

จากรูปที่ 3.8 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อสายอากาศวางในแนวแกน Y โดยพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ XY YZ และ XZ ซึ่งจากการจำลองพบว่าในระนาบ XY มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 83.1 องศา และในระนาบ YZ มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 83.4 องศา จากการจำลองเมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้ง 3 ระนาบ พบว่าสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว (Omni-directional radiation pattern) อย่างไรก็ตามสายอากาศเริ่มต้นไม่สามารถสร้างแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบไอโซทรอปิก จากนั้นทำการพิจารณาค่าอัตราขยายของสายอากาศเมื่อสายอากาศที่วางในแนวแกน Y



รูปที่ 3.9 อัตราขยายของสายอากาศที่วางในแนวแกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

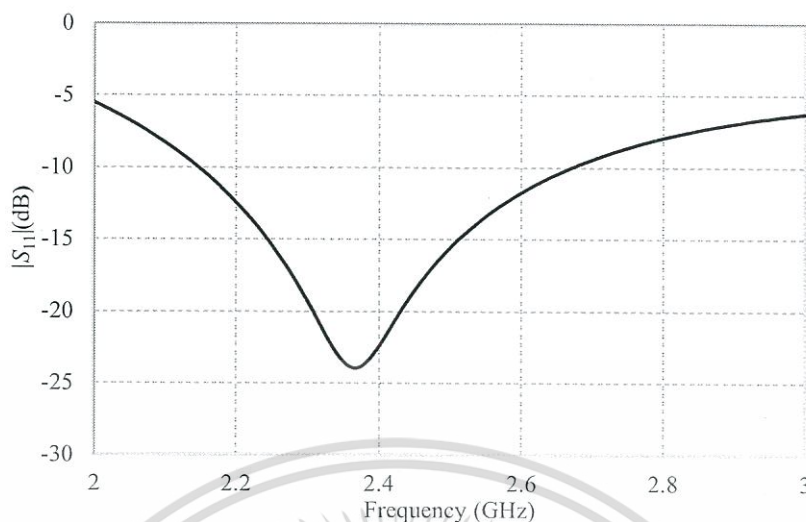
จากรูปที่ 3.9 แสดงอัตราขยายของสายอากาศที่วางในแนวแกน Y โดยพิจารณาที่ความถี่ 2.4 GHz - 2.485 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้งาน สำหรับความถี่ 2.4 GHz มีอัตราขยายเท่ากับ 1.13 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz มีอัตราขยายเท่ากับ 1.20 dBi และที่ความถี่ 2.485 GHz มีอัตราขยายเท่ากับ 1.24 dBi

จากการพิจารณาสายอากาศที่วางในแนวแกน Y นั้นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นยังไม่เป็นไอโซทรอปิกจึงมีแนวคิดในการออกแบบสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกนให้มีการวางสายอากาศแบบสามแนวแกนที่ตั้งฉากกันเพื่อให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ต้องการ ดังนั้นในส่วนถัดไปนำเสนอโครงสร้างสายอากาศที่ถูกวางในแนวแกน Z โดยแสดงโครงสร้างสายอากาศในรูปที่ 3.10



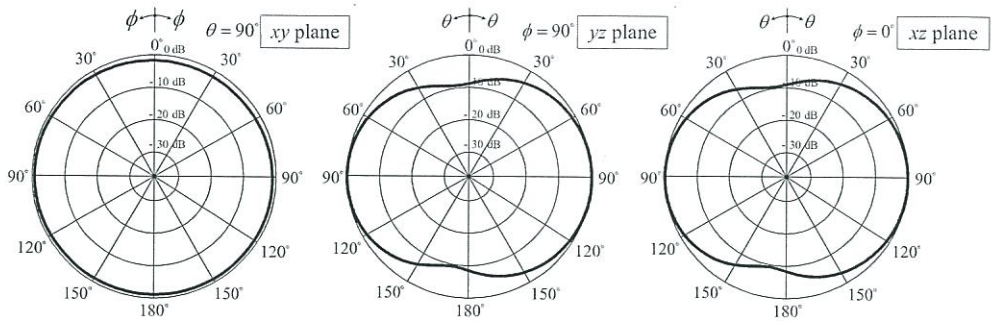
รูปที่ 3.10 โครงสร้างของสายอากาศที่วางในแนวแกน Z

จากรูปที่ 3.10 แสดงถึงโครงสร้างของสายอากาศที่วางในแนวแกน Z ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.1 ถัดไปจะกล่าวถึงคุณสมบัติที่สำคัญของสายอากาศที่วางในแนวแกน Z โดยจะพิจารณาเพื่อนำมาสร้างสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกน โดยแสดงผลการจำลอง  $|S_{11}|$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายของสายอากาศในรูปที่ 3.11 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ



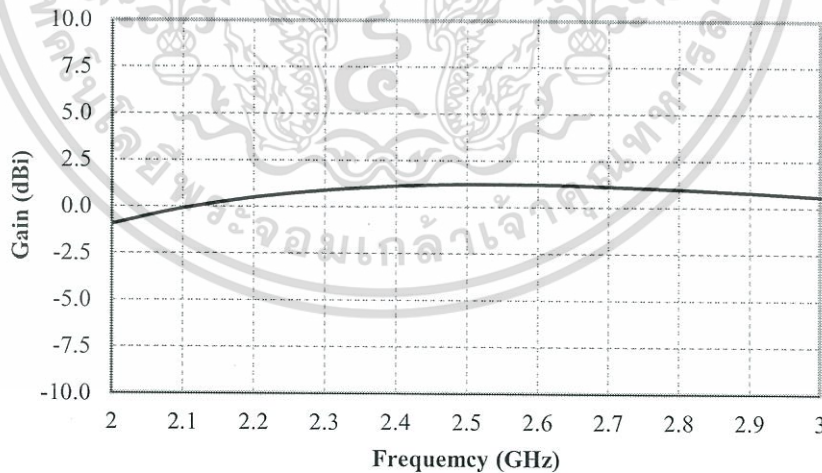
รูปที่ 3.11  $|S_{11}|$  ของสายอากาศในแนวแกน Z

จากผลการจำลอง  $|S_{11}|$  ในรูปที่ 3.11 แสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า -18.5 dB สายอากาศที่จำลองขึ้นนี้มีย่านความถี่ที่  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ 2.15 GHz - 2.66 GHz มีแบนด์วิดธ์ 0.51 GHz และมีเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ 20.81% จากผลการจำลอง  $|S_{11}|$  ของสายอากาศที่นำเสนอมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ -23.92 dB ที่ความถี่ 2.37 GHz ในขณะที่ความถี่ที่พิจารณาคือความถี่ 2.4 GHz มีค่า  $|S_{11}|$  เท่ากับ -22.58 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz มี  $|S_{11}|$  เท่ากับ -18.42 dB และที่ความถี่ 2.485 GHz มี  $|S_{11}|$  เท่ากับ -16.53 dB ดังนั้นจากผลการจำลองพบว่า สายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกนสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ที่ใช้งาน (2.4 GHz - 2.485 GHz) อย่างไรก็ตามในการพิจารณาคุณสมบัติของสายอากาศต้องทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายของสายอากาศเพื่อยืนยันสมรรถนะของสายอากาศ โดยแสดงผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายของสายอากาศในรูปที่ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ



รูปที่ 3.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่วางในแนวแกน Z

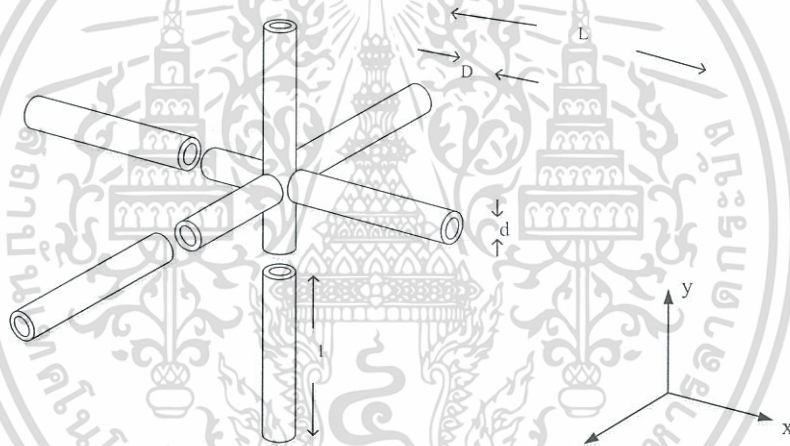
จากรูปที่ 3.12 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อสายอากาศวางในแนวแกน Y โดยพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ XY YZ และ XZ ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าในระนาบ YZ มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 99.6 องศา และในระนาบ XZ มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 82.9 องศา จากผลการจำลองเมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้ง 3 ระนาบ พบว่าสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว (Omni-directional radiation pattern) อย่างไรก็ตามสายอากาศเริ่มต้นไม่สามารถสร้างแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบไอโซทรอปิก จากนั้นทำการพิจารณาค่าอัตราขยายของสายอากาศเมื่อสายอากาศที่วางในแนวแกน Z



รูปที่ 3.13 อัตราขยายของสายอากาศที่วางในแนวแกน Z

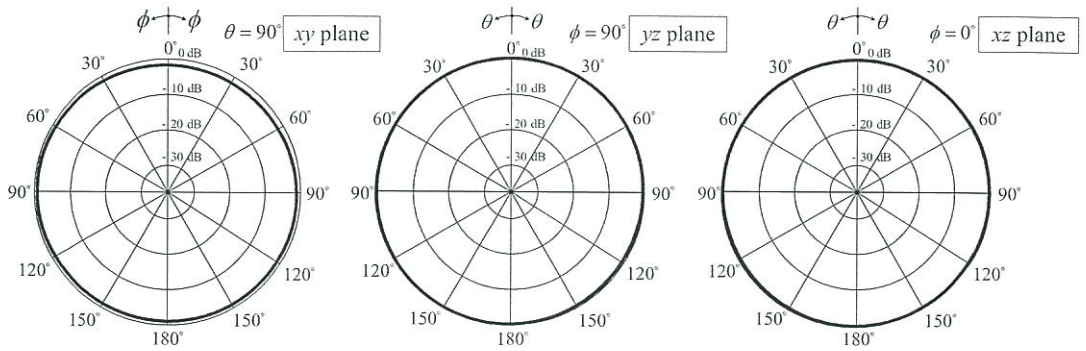
จากรูปที่ 3.13 แสดงอัตราขยายของสายอากาศที่วางในแนวแกน Z โดยพิจารณาที่ความถี่ 2.4 GHz - 2.485 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้งาน สำหรับความถี่ 2.4 GHz มีอัตราขยายเท่ากับ 1.11 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz มีอัตราขยายเท่ากับ 1.18 dBi และที่ความถี่ 2.485 GHz มีอัตราขยายเท่ากับ 1.21 dBi

จากการพิจารณาสายอากาศที่วางในแนวแกน Z นั้นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นยังไม่เป็นไอโซทรอปิกจึงมีแนวคิดในการออกแบบสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกนให้มีการวางสายอากาศแบบสามแนวแกนที่ตั้งฉากกันเพื่อให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ต้องการ ซึ่งในส่วนถัดไปนำเสนอโครงสร้างสายอากาศที่ถูกวางทั้ง 3 แกน โดยแสดงโครงสร้างสายอากาศในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 โครงสร้างของสายอากาศแพร่กระจายคลื่นในสามแกน

จากรูปที่ 3.14 แสดงถึงโครงสร้างของสายอากาศแพร่กระจายคลื่นในสามแกน ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.1 และจากการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของทั้งสามแนวแกนที่ผ่านมาจะได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบต่างๆที่สนใจดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกน

จากรูปที่ 3.15 แสดงถึงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพร่กระจายคลื่น โดยพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเริ่มต้น ซึ่งในระนาบ XY YZ และ XZ ได้ จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเริ่มต้นที่วางในแนวแกน Z แกน X และแกน Y ตามลำดับ ทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นไอโซทรอปิกตามที่ต้องการ

### 3.3 สรุป

การออกแบบสายอากาศเริ่มจากการคำนวณขนาดเริ่มต้นตามทฤษฎีของสายอากาศ ไดโพล ตามด้วยการปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศจนทำให้สายอากาศดังกล่าวมีคุณลักษณะที่เหมาะสม โดยใช้งานในย่านความถี่ 2.4 GHz - 2.485 GHz ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีลักษณะเหมือนกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบไอโซทรอปิก และมีอัตราขยายที่ 2.45 GHz ไม่ต่ำกว่า 1 dBi

## บทที่ 4

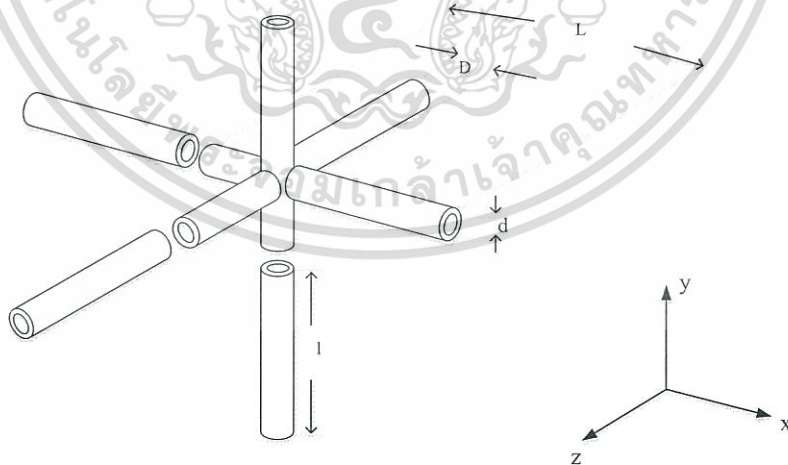
### คุณสมบัติของสายอากาศ

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกน ในย่านความถี่ 2.45 GHz ซึ่งจะพิจารณาคุณลักษณะของ พารามิเตอร์  $|S_{ij}|$  ค่าแยกโดดเดี่ยว แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XY XZ และ YZ รวมถึงอัตราขยายของสายอากาศ ซึ่งพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการสร้างสายอากาศเพื่อนำมาทดสอบได้ถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 3 โดยได้นำผลจากการศึกษาพารามิเตอร์นั้นมาสร้างสายอากาศและทำการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องระหว่างผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

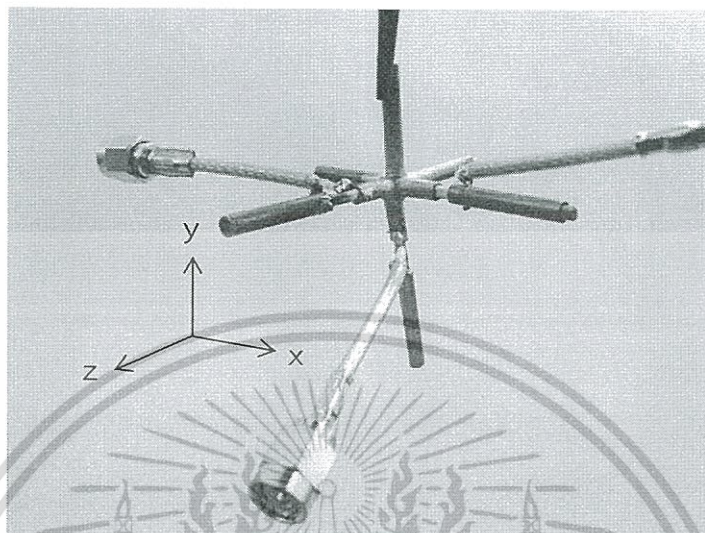
#### 4.2 สายอากาศ

ในหัวข้อนี้นำเสนอสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกนในย่านความถี่ 2.45 GHz เพื่อยืนยันความถูกต้องของการจำลอง โดยสายอากาศดังกล่าวมีช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้ครอบคลุมที่ความถี่ 2.4 GHz - 2.48 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ WLAN มาตรฐานประเทศไทยโดยสายอากาศชนิดนี้ถูกออกแบบโดยใช้ท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาเชื่อมต่อกันดังแสดงในรูปที่ 4.1 และป้อนสัญญาณด้วยสายนำสัญญาณ โดยโครงสร้างของสายอากาศ และพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการสร้างสายอากาศได้กล่าวไว้ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 รูปถ่ายสายอากาศที่ต้นแบบ

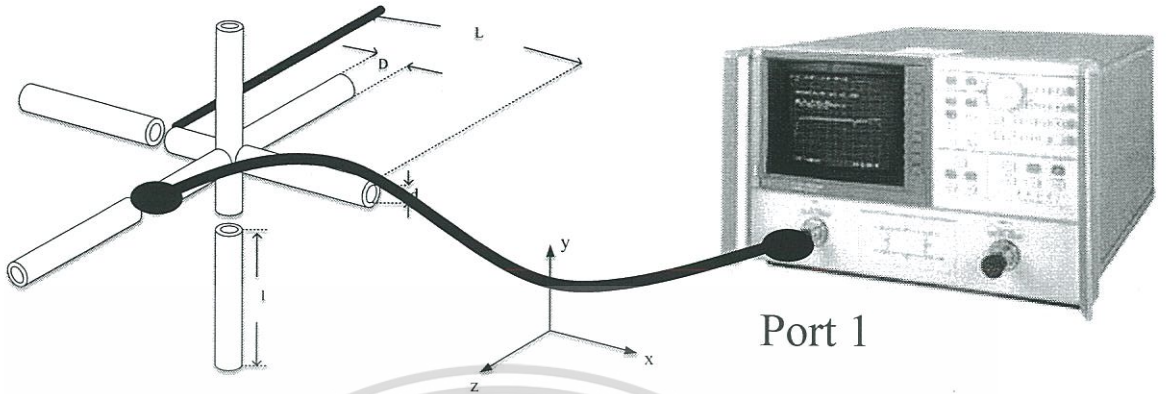
### 4.3 ขั้นตอนและผลการทดสอบสายอากาศ

การทดสอบคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศจำเป็นต้องมีเครื่องมือที่เหมาะสม เพื่อทดสอบสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกนในย่านความถี่ 2.45 GHz มีดังนี้

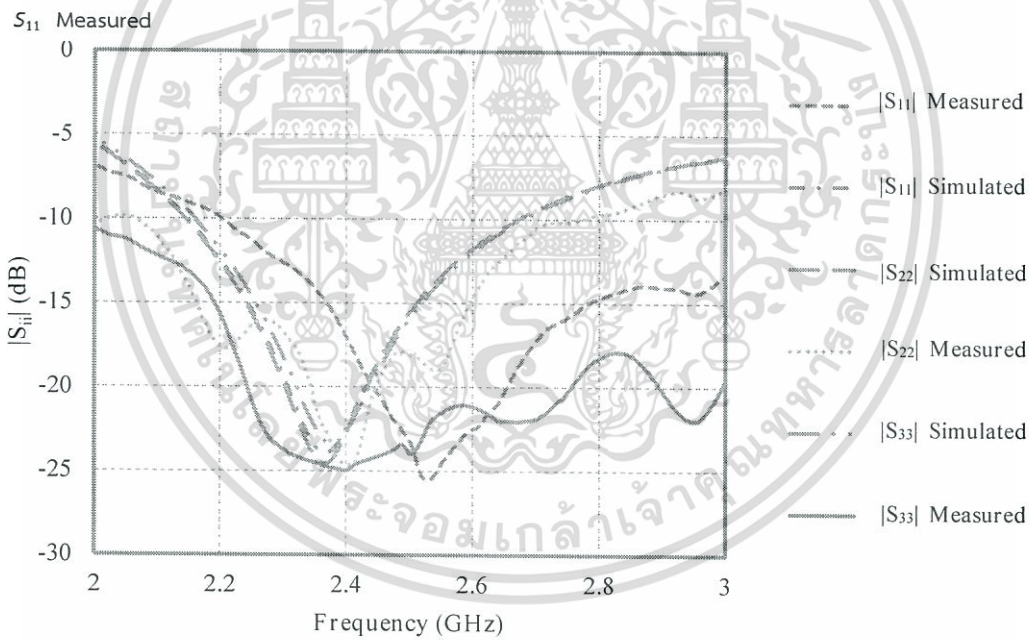
- ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Microwave anechoic chamber)
- เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer)
- สายนำสัญญาณ

#### 4.3.1 การทดสอบคุณลักษณะของ พารามิเตอร์ $|S_{ii}|$

การทดสอบคุณลักษณะของ พารามิเตอร์  $|S_{ii}|$  ทำได้โดยการนำสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกนเชื่อมต่อกับสายนำสัญญาณและพอร์ตที่ 1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดยก่อนที่จะทำการเชื่อมต่อเข้ากับสายอากาศเพื่อจะทดสอบนั้น ควรปรับเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายก่อน โดยปรับเทียบที่ปลายของสายนำสัญญาณเพื่อลดการสูญเสียระหว่างสายนำสัญญาณที่อาจจะส่งผลกระทบต่อ S-Parameter โดยการทดสอบ พารามิเตอร์  $|S_{ii}|$  จะมีวิธีการติดตั้งสายอากาศร่วมกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแสดงในรูปที่ 5.2 โดยสายนำสัญญาณจะมีการเชื่อมต่อกับสายอากาศที่หัวคอนเนคเตอร์ชนิด SMA และผลการทดสอบจะเปรียบเทียบกับผลการจำลองในรูปที่ 5.3

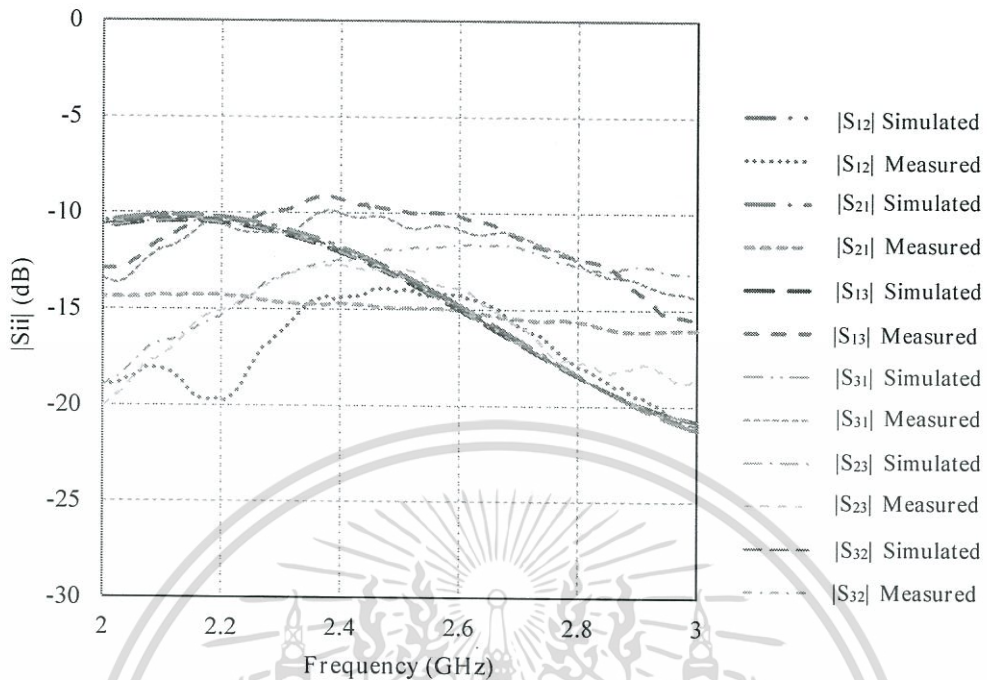


รูปที่ 4.3 วิธีการทดสอบคุณลักษณะ  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลอง  $|S_{11}|$   $|S_{22}|$  และ  $|S_{33}|$  ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลอง  $|S_{12}|$   $|S_{21}|$   $|S_{13}|$   $|S_{31}|$   $|S_{23}|$  และ  $|S_{32}|$  ของสายอากาศ

#### 4.3.1.1. การทดสอบคุณลักษณะของ $|S_{11}|$

จากรูปที่ 4.4 พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองสอดคล้องกัน โดยผลการทดสอบของ  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า  $-10$  dB มีช่วงความถี่ตั้งแต่  $2.205$  GHz ถึง  $3.00$  GHz โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์  $32.45$  % ของย่านความถี่ที่แสดง ซึ่ง  $|S_{11}|$  ต่ำที่สุดที่ความถี่  $2.535$  GHz เท่ากับ  $-25.489$  dB จะได้ผลการทดสอบของสายอากาศมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลการจำลอง

#### 4.3.1.2 การทดสอบคุณลักษณะของ $|S_{22}|$

จากรูปที่ 4.4 พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองสอดคล้องกัน โดยผลการทดสอบของ  $|S_{22}|$  ต่ำกว่า  $-10$  dB มีช่วงความถี่ตั้งแต่  $2.025$  GHz ถึง  $2.775$  GHz โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์  $30.61$  % ของย่านความถี่ที่แสดง ซึ่ง  $|S_{22}|$  ต่ำที่สุดที่ความถี่  $2.4$  GHz เท่ากับ  $-24.583$  dB จะได้ผลการทดสอบของสายอากาศมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลการจำลอง

#### 4.3.1.3 การทดสอบคุณลักษณะของ $|S_{33}|$

จากรูปที่ 4.4 พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองสอดคล้องกัน ซึ่งจากกราฟได้มีการพิจารณาในช่วงความถี่ 2 GHz - 3 GHz โดยผลการทดสอบของ  $|S_{33}|$  ต่ำกว่า -10 dB มีช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.00 GHz - 3.00 GHz โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ 40.81 % ของย่านความถี่ที่แสดง ซึ่ง  $|S_{33}|$  ต่ำที่สุดที่ความถี่ 2.4 GHz เท่ากับ -24.988 dB จะได้ผลการทดสอบของสายอากาศมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลการจำลอง

#### 4.3.1.4 การทดสอบคุณลักษณะของ $|S_{12}|$

จากรูปที่ 4.5 พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองสอดคล้องกัน โดยผลการทดสอบของ  $|S_{12}|$  ที่ความถี่ 2.4 GHz มีค่าเท่ากับ -14.347 dB ที่ความถี่ 2.485 GHz ที่ใช้งาน มีค่าเท่ากับ -14.027 dB และค่าแยกโดดเดี่ยวระหว่างพอร์ตที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -14.007 dB โดยที่ความถี่ 2 GHz - 3 GHz มีความสอดคล้องกันระหว่างผลจากการจำลองและผลจากการทดสอบ และได้ผลการทดสอบของสายอากาศมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลการจำลอง

#### 4.3.1.5 การทดสอบคุณลักษณะของ $|S_{21}|$

จากรูปที่ 4.5 พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองสอดคล้องกัน โดยผลการทดสอบของ  $|S_{21}|$  ที่ความถี่ 2.4 GHz มีค่าเท่ากับ -14.672 dB ที่ความถี่ 2.485 GHz ที่ใช้งาน มีค่าเท่ากับ -14.904 dB และค่าแยกโดดเดี่ยวระหว่างพอร์ตที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -14.764 dB โดยที่ความถี่ 2 GHz - 3 GHz มีความสอดคล้องกันระหว่างผลจากการจำลองและผลจากการทดสอบ และได้ผลการทดสอบของสายอากาศมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลการจำลอง

#### 4.3.1.6 การทดสอบคุณลักษณะของ $|S_{13}|$

จากรูปที่ 4.5 พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองสอดคล้องกัน โดยผลการทดสอบของ  $|S_{13}|$  ที่ความถี่ 2.4 GHz มีค่าเท่ากับ -9.264 dB ที่ความถี่ 2.485 GHz ที่ใช้งาน มีค่าเท่ากับ -9.799 dB และค่าแยกโดดเดี่ยวระหว่างพอร์ตที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -9.561 dB โดยที่ความถี่ 2 GHz - 3 GHz มีความสอดคล้องกันระหว่างผลจากการจำลองและผลจากการทดสอบ และได้ผลการทดสอบของสายอากาศมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลการจำลอง

#### 4.3.1.7 การทดสอบคุณลักษณะของ $|S_{31}|$

จากรูปที่ 4.5 พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองสอดคล้องกัน โดยผลการทดสอบของ  $|S_{31}|$  ที่ความถี่ 2.4 GHz มีค่าเท่ากับ -9.99 dB ที่ความถี่ 2.485 GHz ที่ใช้งาน มีค่าเท่ากับ -10.345 dB และค่าแยกโดดเดี่ยวระหว่างพอร์ตที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -10.174 dB โดยที่ความถี่ 2 GHz - 3 GHz มีความสอดคล้องกันระหว่างผลจากการจำลองและผลจากการทดสอบ และได้ผลการทดสอบของสายอากาศมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลการจำลอง

#### 4.3.1.8 การทดสอบคุณลักษณะของ $|S_{23}|$

จากรูปที่ 4.5 พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองสอดคล้องกัน โดยผลการทดสอบของ  $|S_{23}|$  ที่ความถี่ 2.4 GHz มีค่าเท่ากับ 12.64 dB ที่ความถี่ 2.485 GHz ที่ใช้งาน มีค่าเท่ากับ -14.994 dB และค่าแยกโดดเดี่ยวระหว่างพอร์ตที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -913 dB โดยที่ความถี่ 2 GHz - 3 GHz มีความสอดคล้องกันระหว่างผลจากการจำลองและผลจากการทดสอบ และได้ผลการทดสอบของสายอากาศมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลการจำลอง

#### 4.3.1.9 การทดสอบคุณลักษณะของ $|S_{32}|$

จากรูปที่ 4.5 พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองสอดคล้องกัน โดยผลการทดสอบของ  $|S_{32}|$  ที่ความถี่ 2.4 GHz มีค่าเท่ากับ -12.462 dB ที่ความถี่ 2.485 GHz ที่ใช้งาน มีค่าเท่ากับ -11.912 dB และค่าแยกโดดเดี่ยวระหว่างพอร์ตที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -12.212 dB โดยที่ความถี่ 2 GHz - 3 GHz มีความสอดคล้องกันระหว่างผลจากการจำลองและผลจากการทดสอบ และได้ผลการทดสอบของสายอากาศมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลการจำลอง

### 4.3.2 แบบรูปการแพร่กระจายของคลื่น (Radiation pattern)

ในการทดสอบหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้มานั้นจะเป็นของสายอากาศภาครับ และใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐานเป็นสายอากาศภาคส่ง เนื่องจากยังไม่ทราบถึงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและโพลาริซ การติดตั้งสายอากาศภาครับและภาคส่งสำหรับการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจึงต้องมีระยะห่างที่มากพอที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะคงที่ หรือเรียกระยะดังกล่าวนี้ว่าระยะสนามระยะไกล (Far-field : R) ที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 [2]

จาก  $D_r + D_t = D$

$$R \geq \frac{2(D^2)}{\lambda} \quad (4.1)$$

โดยที่  $R$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศ

$D$  คือ มิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศ

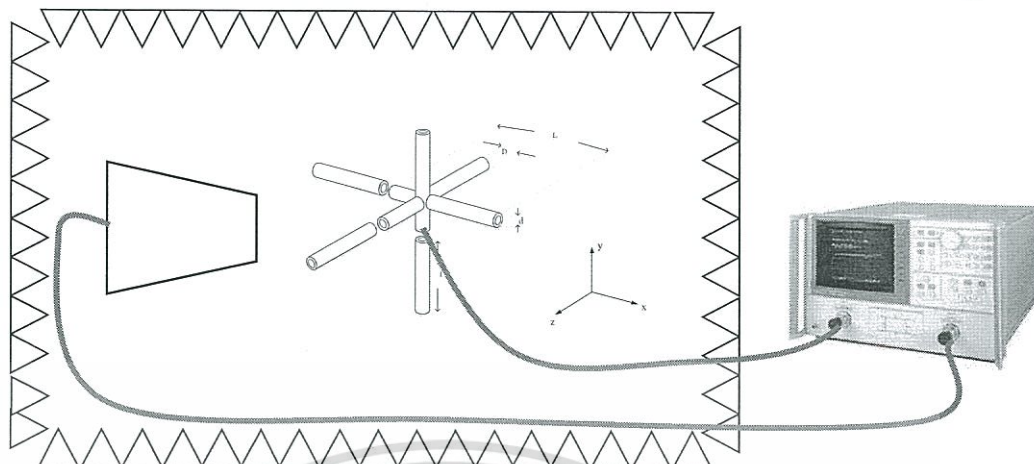
$D_r$  คือ มิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศด้านรับ

$D_t$  คือ มิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศด้านส่ง

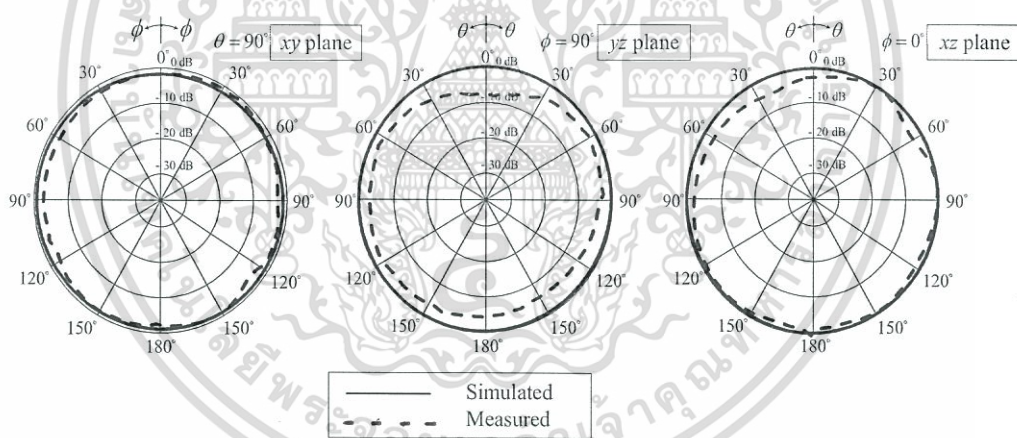
ที่ความถี่ 2.45 GHz ได้ค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 12.25 cm และมีขนาดของสายอากาศด้านรับเท่ากับ 32 cm มีขนาดของสายอากาศด้านส่งเท่ากับ 6 cm นำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ 4.1 ได้

$$R \geq \frac{2(0.32)^2}{0.1225} = 1.67$$

โดยการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกน จะทดสอบในห้องไร้การสะท้อน ซึ่งมีสภาพแวดล้อมใกล้เคียงช่องว่างอิสระ (Free space) โดยการติดตั้งสายอากาศเพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะต้องทำการเชื่อมต่อสายอากาศภาคส่งเข้ากับพอร์ตเชื่อมต่อ 1 และเชื่อมต่อสายอากาศภาครับเข้ากับพอร์ตเชื่อมต่อ 2 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งการวางแนวในการทดสอบสายอากาศสามารถอ้างอิงได้จากรูปที่ 4.1 โดยผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายของสายอากาศแพร่กระจายคลื่นแสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น



รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบในระบบ XY YZ และ XZ เทียบกับผลจากการจำลองที่ความถี่ 2.45 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 พบว่าในระนาบ XY YZ และ XZ ผลการทดสอบและผลการจำลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน มีค่าที่คลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากการจำลองและจากการทดสอบในแต่ละระนาบ ซึ่งวิเคราะห์ถึงสาเหตุของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในผลของการทดสอบเนื่องจากอาจมีการอาจมีการเชื่อมต่อระหว่างสายสัญญาณและคอนเนคเตอร์ ซึ่งอยู่ด้านหลังของสายอากาศภาครับ ในขณะที่สายอากาศมีการหมุน สายนำสัญญาณที่เชื่อมต่อ อยู่ด้านหลังจะเกิดการหมุนตามไปด้วยดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งมีโอกาสที่จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างสายนำสัญญาณร่วมกับสายอากาศภาครับและภาคส่ง และการส่งสัญญาณที่มาจากเครื่องวิเคราะห์โคจรขยายจะต้องผ่านสายนำสัญญาณที่มีความยาวมาสู่สายอากาศ และมีการเชื่อมต่อกันระหว่างคอนเนคเตอร์และสายนำสัญญาณอยู่มาก จึงเป็นผลให้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในผลการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น

#### 4.3.3 อัตราขยาย (Gain)

สำหรับการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศจะใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐานเป็นสายอากาศภาคส่ง ที่มีอัตราขยายเท่ากับ 7 dBi และใช้สายอากาศที่ออกแบบเป็นสายอากาศภาครับเพื่อทดสอบหาอัตราขยาย ซึ่งอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้ทดสอบสามารถคำนวณได้จากสมการ 4.2 และผลการทดสอบอัตราขยายสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8

$$\text{สมการ} \quad (G_{0r})_{dB} + (G_{0t})_{dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right) \quad (4.2)$$

เมื่อ  $G_{0r}$  คือ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง (dBi)

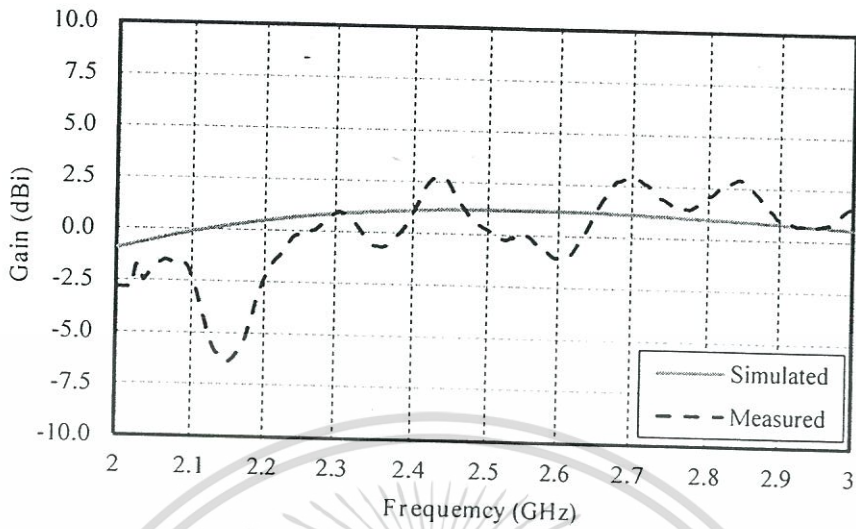
$G_{0t}$  คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับ (dBi)

$R$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ (m)

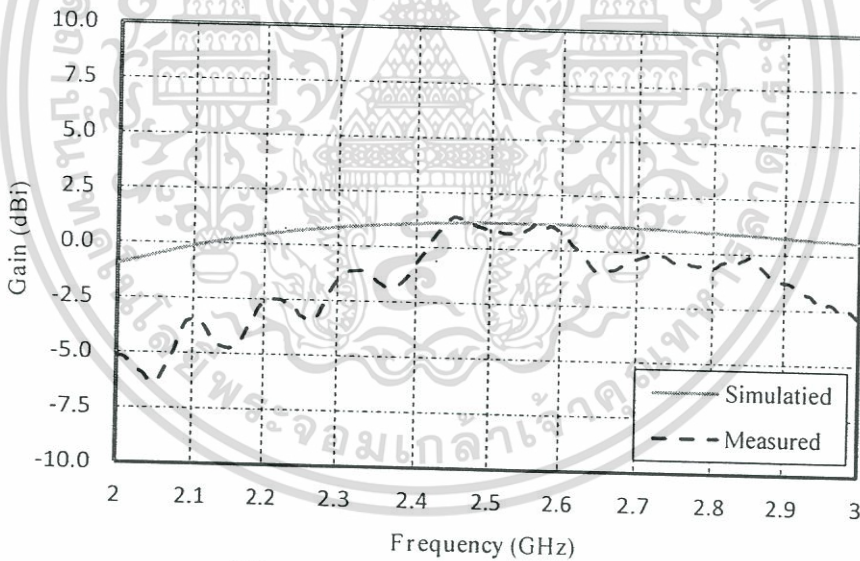
$\lambda$  คือ ความยาวของความถี่ที่ใช้งาน (m)

$P_t$  คือ กำลังของภาคส่ง (W)

$P_r$  คือ กำลังของภาครับ (W)

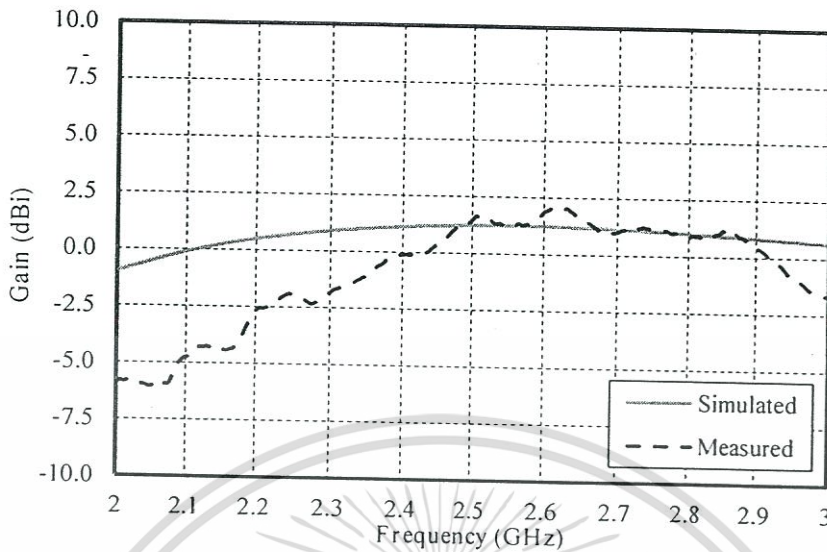


รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบอัตราขยายระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบในระนาบ XY



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบอัตราขยายระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบในระนาบ YZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบอัตราขยายระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบในระนาบ XZ

จากรูปที่ 4.8 4.9 และ 4.10 แสดงผลการเปรียบเทียบอัตราขยายของการจำลองและการทดสอบของสายอากาศในระนาบ XY YZ และ XZ ตามลำดับ ที่ความถี่ 2.45 GHz มีอัตราขยายประมาณ 2.22 dBi 1.42 dBi และ 0.41 dBi ตามลำดับ ในที่ความถี่ 2 GHz - 3 GHz มีความสอดคล้องกันระหว่างผลจากการจำลองและผลจากการทดสอบ และสังเกตได้ว่าอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบมีค่าสอดคล้องกับผลการจำลอง ซึ่งในส่วนช่วงความถี่ที่มีอัตราขยายไม่สอดคล้องกับผลการจำลองนั้นเป็นช่วงความถี่ที่ไม่ได้ใช้งาน

#### 4.4 บทสรุป

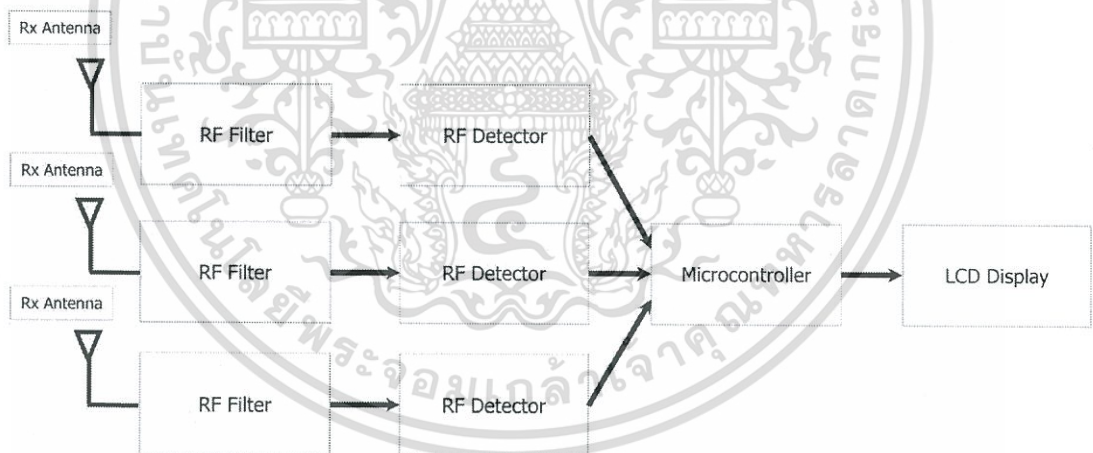
จากผลการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกน พบว่าพารามิเตอร์  $S_{11}$  ที่ทดสอบมีผลที่สอดคล้องกับผลการจำลอง โดยสามารถทำงานที่ย่านความถี่ 2.4 GHz - 2.485 GHz จากผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบไอโซโทรปิกซึ่งสอดคล้องกับจุดประสงค์ในการออกแบบ และพบว่าผลการจำลองและผลการทดสอบมีความสอดคล้องกัน โดยสายอากาศที่ถูกนำเสนอมีอัตราขยายที่ความถี่ 2.45 GHz เท่ากับ 1.35 dBi

## บทที่ 5

### การทดสอบสมรรถนะสายอากาศกับชุดเครื่องอ่านค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ

#### 5.1 บทนำ

ชุดเครื่องอ่านค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ(SAR) ประกอบด้วยสายอากาศภาครับ (Antenna Receivers) วงจรกรองความถี่แถบผ่าน (Bandpass Filter) วงจรตรวจจับสัญญาณ (Detector) ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) และจอแสดงผลแอลซีดี (LCD Display) สำหรับการประมวลผลค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ ในการประมวลผลนั้นจะทำการพิจารณากำลังงานที่ได้รับจากสายอากาศสามแนวแกน (แนวแกน X แนวแกน Y และแนวแกน Z) โดยแต่ละแนวแกนของสายอากาศจะถูกต่อเข้ากับชุดเครื่องอ่าน ซึ่งกำลังงานที่สายอากาศรับได้จะถูกส่งผ่านวงจรกรองความถี่แถบผ่านและวงจรตรวจจับสัญญาณ เข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อประมวลผลค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ โดยแสดงหลักการทำงานดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมของชุดอุปกรณ์แสดงค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ

## 5.2 ออกแบบส่วนอุปกรณ์

### 5.2.1 วงจรกรองความถี่แถบผ่าน (Bandpass Filter)

สำหรับวงจรกรองความถี่ได้เลือกใช้เป็นแบบ Surface Mount ของ TOKO รุ่น TDF2A-2450T-10 มีลักษณะภายนอกดังรูปที่ 5.2 โดยมีความถี่ใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz (Operating Frequency) มีความกว้างความถี่แถบผ่าน (Passband Width) เท่ากับ 100 MHz และมีค่าความต้านทานขาเข้าและขาออก (Input Output Impedance) เท่ากับ 50 ohm



รูปที่ 5.2 วงจรกรองความถี่แถบผ่านที่ความถี่ 2.45 GHz

### 5.2.2 วงจรตรวจจับสัญญาณ (Detector)

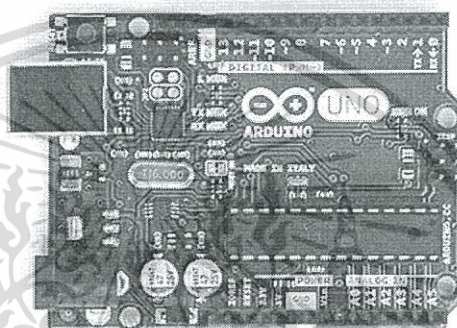
สำหรับวงจรตรวจจับสัญญาณได้เลือกใช้เป็นแบบ Surface Mount ของ Analog Devices รุ่น LF-2.7 GHz RF/IF Gain and Phase Detector มีลักษณะภายนอกดังรูปที่ 5.3 ทำงานในช่วงความถี่ 0 - 2.7 GHz มีขนาดแรงดันขาออก (Magnitude Voltage Output) อยู่ในช่วง 30 mV - 1.8V MHz และมีค่าความต้านทานขาเข้า (Input Impedance) เท่ากับ 50 ohm



รูปที่ 5.3 วงจรตรวจจับสัญญาณ 2.45 GHz

### 5.2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้เลือกใช้บอร์ด Arduino UNO R3 มีลักษณะภายนอกดังรูปที่ 5.4 แรงดันขาเข้า (Input Voltage) อยู่ในช่วง 6-20 V มีขาอินพุตอนาลอก (Analog Input Pins) จำนวน 6 ขา มีขาดีจิตอลอินพุตและเอาต์พุต (Digital I/O Pins) จำนวน 14 ขา โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการคำนวณค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ (SAR) แล้วแสดงค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะผ่านจอแสดงผลแอลซีดี



รูปที่ 5.4 Arduino UNO R3 Board.

### 5.2.4 จอแสดงผล

ในการเลือกจอแสดงผลได้เลือกใช้จอแสดงผลแอลซีดีแบบมีการแสดงผล 2 บรรทัด โดยมีลักษณะภายนอกดังรูปที่ 5.5 โดยใช้จอแสดงผลแอลซีดีแสดงค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ



รูปที่ 5.5 จอแสดงผลแอลซีดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

### 5.3 ออกแบบส่วนโปรแกรม

เขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ และแสดงค่าการดูดซับคลื่นจำเพาะผ่านจอแอลซีดี และได้เลือกเขียนโปรแกรมลงบนบอร์ด Arduino UNO R3 โดยสมการคำนวณค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ ดังสมการ 5.1 คือ

$$SAR = \frac{1}{V} \int_{sample} \frac{\sigma(r)|E(r)|^2}{\rho(r)} dr \quad (5.1)$$

โดยที่  $\sigma$  คือ ค่าความนำไฟฟ้า

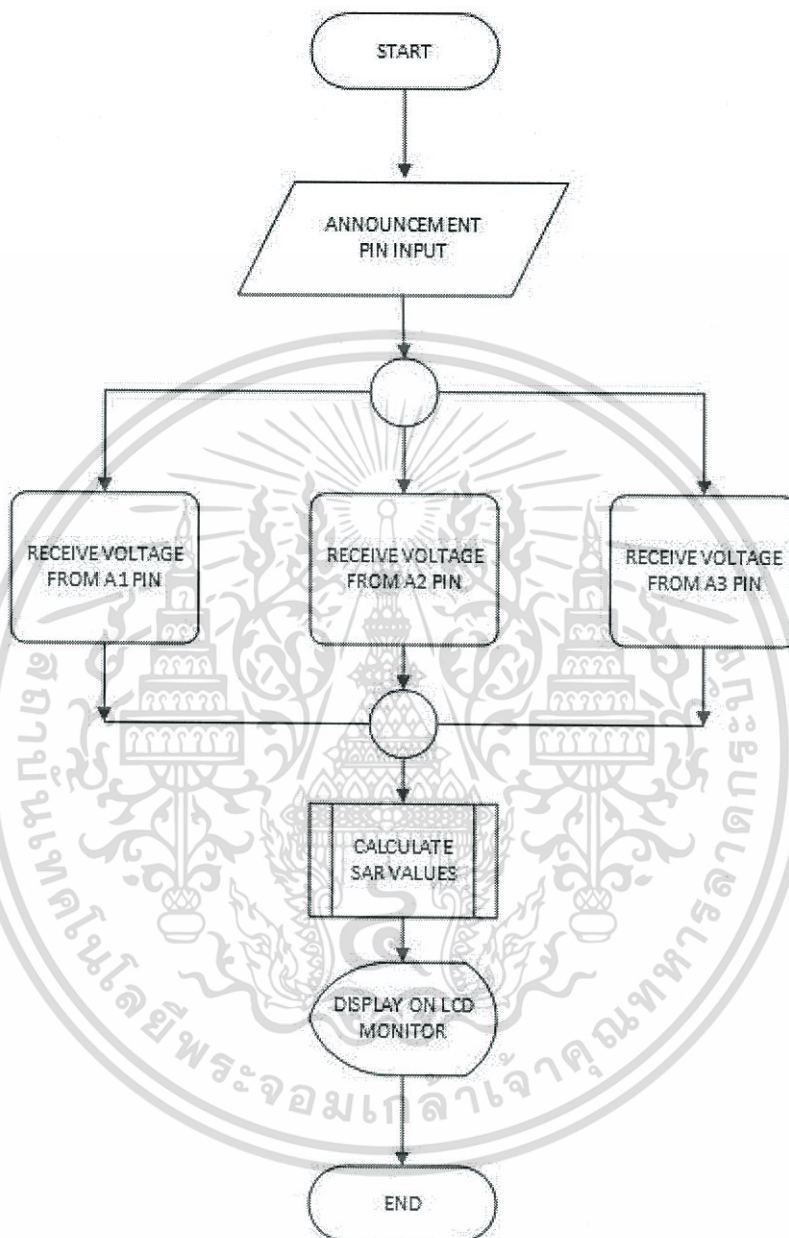
$E$  คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของสนามไฟฟ้า

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง

$V$  คือ ปริมาตรของวัสดุ



โดยมี Flowchart ของโปรแกรมดังต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 ผลการทดสอบชุดแสดงค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะในห้องไร้การสะท้อน

### 5.4.1 ทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรตรวจจับสัญญาณ

ทดสอบค่าสนามไฟฟ้าโดยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรตรวจจับสัญญาณในระยะห่างจากจุดปล่อยสัญญาณเป็นระยะทางต่างๆ และนำค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละแกนที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณหาค่าขนาดสุทธิของสนามไฟฟ้าทั้งสามแกนกับค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ ซึ่งมีผลการทดสอบดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบค่าสนามไฟฟ้า

ระยะห่างระหว่างตัวปล่อยสัญญาณกับชิ้นงาน	ค่าสนามไฟฟ้า		
	แกน X	แกน Y	แกน Z
0 m	0.941 V	0.929 V	0.862 V
1 m	0.939 V	0.927 V	0.858 V
2 m	0.937 V	0.924 V	0.857 V
3 m	0.936 V	0.923 V	0.855 V

ตารางที่ 5.2 ขนาดของสนามไฟฟ้าทั้งสามแกน

ระยะห่างระหว่างตัวปล่อยสัญญาณกับชิ้นงาน	ขนาดของสนามไฟฟ้าสุทธิทั้งสามแกน	ค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ
0 m	1.5914 V	-109.6123 dBm
1 m	1.5870 V	-109.6244 dBm
2 m	1.5820 V	-109.6382 dBm
3 m	1.5797 V	-109.6443 dBm

### 5.4.2 อ่านค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะจากจอแสดงผล

อ่านค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะจากจอแสดงผลโดยนำชิ้นงานไปวางในระยะห่างจากจุดปล่อยสัญญาณเป็นระยะทางต่างๆ บันทึกผลของค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ และนำมาเปรียบเทียบกับค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะในตารางที่ 5.2 ซึ่งจะเปรียบเทียบในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะ

ระยะห่างระหว่างตัว ปล่อยสัญญาณกับ ชั้นงาน	ค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ ได้จากตารางที่ 5.2	ค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ได้ จากการอ่านค่าจากจอแสดงผล
0 m	-109.6123 dBm	-109.4545 dBm
1 m	-109.6244 dBm	-109.4642 dBm
2 m	-109.6382 dBm	-109.4812 dBm
3 m	-109.6443 dBm	-109.4909 dBm

### 5.5 สรุป

จากผลการทดสอบอ่านค่าสัทธิขนาดของสนามไฟฟ้าทั้งสามแกนที่แสดงในตารางที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะห่างระหว่างตัวปล่อยสัญญาณกับชั้นงานมีค่ามากขึ้น ขนาดของสนามไฟฟ้าทั้งสามแกนจะมีค่าลดลง และจากผลการทดสอบอ่านค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะจากจอแสดงผลที่แสดงในตารางที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะห่างระหว่างตัวปล่อยสัญญาณกับชั้นงานมีค่ามากขึ้น ค่าอัตราการดูดซับคลื่นจำเพาะจะมีค่าลดลง

## บทที่ 6

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผล

รายงานเล่มนี้ได้อธิบายถึงความเป็นมาและวัตถุประสงค์ของการสร้างสายอากาศแพร่กระจายคลื่นสามแกนที่ตั้งฉากกัน และอธิบายทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับการออกแบบสายอากาศไดโพล เพื่อนำไปสู่การออกแบบสายอากาศ โดยที่จะนำพารามิเตอร์ต่างๆไปจำลองผลหาวิธีการที่เหมาะสมจากโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO จากนั้นจึงนำไปสร้างและทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศ โดยที่จะทำการศึกษาค้นคว้าผลกระทบสายอากาศเมื่อสายอากาศได้รับสัญญาณที่มีความถี่ 2.45 GHz

การออกแบบสายอากาศเริ่มจากการคำนวณขนาดเริ่มต้นตามทฤษฎีของสายอากาศไดโพล ตามด้วยการปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศจนทำให้สายอากาศดังกล่าวมีคุณลักษณะที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองสอดคล้องกัน โดยผลการทดสอบของ  $|S_{11}| \leq -10$  dB มีช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.00 GHz - 3.00 GHz โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ 40.81 % ซึ่ง  $|S_{11}|$  ต่ำที่สุดที่ความถี่ 2.4 GHz เท่ากับ -24.988 dB และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้จากผลการทดสอบมีผลสอดคล้องกับผลการจำลอง ซึ่งจะคล้ายกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบไอโซทรอปิก ดังรูปที่ 5.7 โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีอัตราการขยายเป็น 1.35 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz

#### 6.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาของผลกระทบของพารามิเตอร์ พบว่าสายอากาศดังกล่าวมีความสามารถที่จะออกแบบเพื่อเพิ่มขนาดของตัวรับ-ส่ง สัญญาณได้มากขึ้น ซึ่งในรายงานเล่มนี้เป็น การนำเสนอการออกแบบและทดสอบสายอากาศเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้สนใจในการออกแบบสายอากาศ เพื่อให้มีโครงสร้างให้ง่ายขึ้นและนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆอีกต่อไป

### บรรณานุกรม

- [1] I.J Bahl and P. Bhartia, “*Microstrip Antenna*,” Artech House, 1980.
- [2] Constantine A. Balanis, “*Antenna Theory: Analysis and design*,” John Wiley & Son, Inc., 2005.
- [3] บัณฑิต วจน์อารยานนท์, “วิศวกรรมสายอากาศ”, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
- [4] E. S. Pires, G. Fontgalland, M. A. B. de Melo, R. M. Valle, G. F. Aragão and T. P. Vuong, “A New Quasi – Isotropic Antenna for Ultra – Wideband Application”, Microwave and Optoelectronics Conference, Brazil, October. 2007.
- [5] G. Pan, Y. Li, Z. Zhang and Z. Feng, “An Isotropic-radiated Planar Antenna Using Two Crossed Dipoles”, Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2012 International Conference on (Volume:3), Shenzhen, China, 5-8 May. 2012.
- [6] P. Vivekanand and P. Ramesh, “Isotropic Radiation Using Crossed Dipoles”, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume4, Issue4, April. 2013.
- [7] Toko Electronic Manufacturing Co Ltd. 2013. SPECIFICATION OF DIELECTRIC FILTER TOKO P/No: TDF2A-2450T-10. [Online]. Available : <http://datasheet.octopart.com/TDF2A-2450T-10%3DP-Toko-datasheet-96396.pdf>
- [8] Analog Devices, Inc. AD8302. [Online]. Available : <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8302.pdf>
- [9] Arduino LLC. Arduino UNO. [Online]. Available : <http://digital.csic.es/bitstream/10261/127788/7/D-c-%20Arduino%20uno.pdf>
- [10] XIAMEN AMOTEC DISPLAY CO.,LTD. SPECIFICATIONS OF LCD MODULE. Available : <https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/ADM1602K-NSW-FBS-3.3v.pdf>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้