

สายอากาศเพื่อวัดความชื้นกระดาษ  
ANTENNA FOR MEASURING HUMIDITY OF PAPER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

สายอากาศเพื่อวัดความชื้นกระดาษ  
ANTENNA FOR MEASURING HUMIDITY OF PAPER

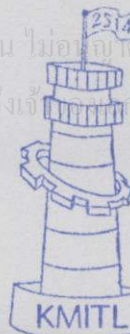
นางสาวรัชดา อินทรีย์ 54011073  
นางสาวรุจิรา วิเชียรชัย 54011091

อาจารย์ที่ปรึกษา  
ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557



ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว  
.....  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
2 / 5 / 58  
วิศวกรรมโทรคมนาคม  
Telecommunications Engineering



ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว  
.....  
กรรมการผู้ตรวจชิ้นงาน  
30 / 04 / 58  
วิศวกรรมโทรคมนาคม  
Telecommunications Engineering

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศเพื่อวัดความชื้นกระดาษ

ANTENNA FOR MEASURING HUMIDITY OF PAPER

ผู้จัดทำ

1. นางสาวรัชดา อินรัญ 54011073
2. นางสาวจรีรา วิเชียรชัย 54011091



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

( ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการตามวัตถุประสงค์ที่จัดทำตั้งใจไว้ทุกประการโดยได้รับ คำแนะนำเกี่ยวกับแนวทางในการศึกษา ออกแบบ และสร้าง จากอาจารย์ที่ปรึกษา คือ ศาสตราจารย์ ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ ที่ให้ข้อมูลและคำแนะนำที่ดีในการดำเนินงานและช่วยเหลือ สนับสนุนในทุกด้านตลอดจน พี่ๆปริญญโทและเอก ที่สอนใช้เครื่องมือวัด ให้คำแนะนำในการ ออกแบบ เพื่อนๆ ทำให้งานชิ้นนี้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งใจไว้ ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ท่านอาจารย์และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

ท้ายสุดขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ คณะผู้จัดทำเสมอมาจนสำเร็จลุล่วง



คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศเพื่อวัดความชื้นกระดาษ  
ANTENNA FOR MEASURING HUMIDITY OF PAPER

โดย นางสาว รัชดา อินทร์ 54011073  
นางสาว รุจิรา วิเชียรชัย 54011091

อาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

**บทคัดย่อ**

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการสร้างเครื่องวัดความชื้นกระดาษ ซึ่งเริ่มจากการวัดค่า relative dielectric constant และ relative dielectric loss factor ของกระดาษที่ความชื้นต่างๆ โดยความถี่ที่ใช้คือ 2450 MHz สร้างสายอากาศผสมสัญญาณ มีวงจรรวมสัญญาณที่ความถี่ 50 MHz เพื่อรวมสัญญาณจากสายอากาศผสมสัญญาณสองตัว จากนั้นขยายสัญญาณโดยใช้วงจรขยายสัญญาณ ค่าโวลต์เตจที่ได้เป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณความชื้นในกระดาษ โดยกำหนดว่าความชื้นที่ต้องการจะต้องไม่เกิน 14 %

**ABSTRACT**

This dissertation presents the construction of a paper moisture meter. Firstly, the value of relative dielectric constant and relative dielectric loss factor of the paper was measured at different humidity. The operating frequencies are 2400 and 2450 MHz for two antenna mixers which have a power combiner at the frequency of 50 MHz to combine the signals from the two ports. Then the signal was amplified by an amplifier and the voltage value is used to indicate the amount of moisture in the paper. The required humidity value must not exceed 14%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VI
<b>บทที่ 1</b>	
<b>บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	1
<b>บทที่ 2</b>	
<b>ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>2</b>
2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลาง	2
2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับทฤษฎีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	2
2.3 การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น	4
2.4 ทฤษฎีสายส่ง	7
2.4.1 วงจรสมมูลและอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ	8
2.4.2 ความเร็วการแพร่คลื่นในสายส่ง	10
2.4.3 สายส่งที่ไม่มีการสูญเสีย	13
2.4.3.1 สายส่งลัดวงจรที่ปลายสาย	14
2.4.3.2 สายส่งที่เปิดปลาย	14
2.4.4 สายส่งที่มีการสูญเสีย	15
2.4.4.1 สายส่งลัดวงจรที่ปลายสาย	16
2.4.4.2 สายส่งที่เปิดปลาย	16
2.5 โครงสร้างสายนำสัญญาณไมโครสตริป	16
2.5.1 การหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะและค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	18
สัมพัทธ์ประสิทธิผล	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

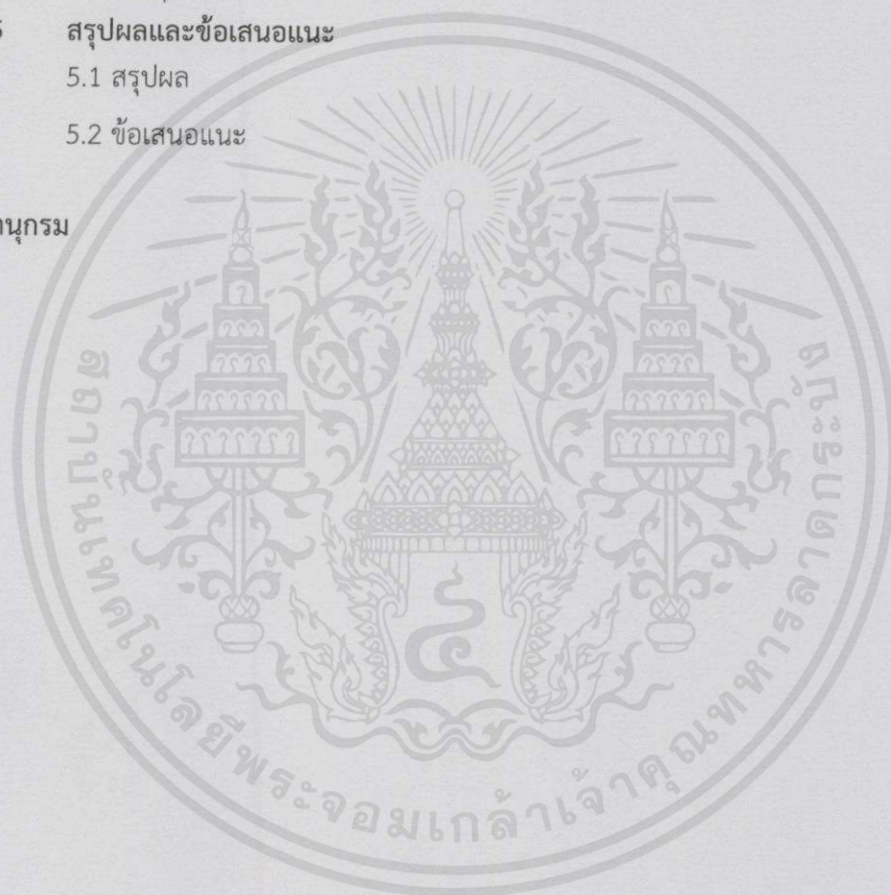
## สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	2.6 การหาความชื้นในกระดาษ	19
	2.7 ชนิดของสายอากาศที่ใช้ศึกษา	19
	2.7.1 สายอากาศควอไซด์ยาภิ	19
	2.8 วงจรผสมสัญญาณ	20
	2.9 วงจรผสมสัญญาณแบบใช้ไดโอดเดี่ยว	23
	2.10 วงจรแบ่งหรือรวมกำลังสัญญาณวิลคินสัน	24
	2.11 วงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณ	25
	2.12 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า	27
	2.12.1 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบไม่มีภาวะไฟฟ้า	27
	2.12.2 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบมีภาวะไฟฟ้า	28
บทที่ 3	<b>การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์</b>	<b>31</b>
	3.1 การออกแบบ	31
	3.1.1 การหาค่า RELATIVE DIELECTRIC CONSTANT และ RELATIVE DIELECTRIC LOSS ของกระดาษที่ความชื้นต่างๆ	31
	3.1.2 ผลการออกแบบวงจรรวมและแบ่งสัญญาณที่ความถี่ 50 เมกกะเฮิร์ต	35
	3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	36
	3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง	37
	3.3.1 การทดลองเพื่อหาความถี่ที่นำไปสร้างสายอากาศเพื่อวัดความชื้นกระดาษ	37
	3.3.2 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน	39
	3.3.3 การออกแบบการทดลองเพื่อหาความแตกต่างโวลต์เตจของกระดาษที่ความชื้นต่างๆ	39
บทที่ 4	<b>ผลการทดลอง</b>	<b>43</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1 ผลการทดสอบวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟคเตอร์การสูญเสียของ กระดาศที่ความถี่ต่างๆ	43
4.2 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน	44
4.3 ผลการทดสอบเพื่อหาความแตกต่างโวลต์เตจของกระดาศที่ความถี่ ต่างๆ	45
<b>บทที่ 5</b> <b>สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	<b>49</b>
5.1 สรุปผล	49
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>51</b>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 คลื่นที่สะท้อนและส่งผ่านเมื่อคลื่นตกกระทบตั้งฉากรอยต่อของตัวกลางสองชนิด	4
2.2 วงจรสมมูลของสายส่ง	8
2.3 วงจรสมมูลอย่างง่าย วงจรสมมูลของสายส่งที่ไม่มีการสูญเสีย	9
2.4 การต่อแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงกับวงจรสมมูลของสายส่ง	10
2.5 การต่อสายส่ง (ไม่มีการสูญเสีย) กับโหลด $Z_L$	13
2.6 สายส่ง (ไม่มีการสูญเสีย) ที่ถูกลัดวงจรที่ปลาย	14
2.7 สายส่ง (ไม่มีการสูญเสีย) ที่ถูกเปิดวงจรที่ปลาย	14
2.8 การต่อสายส่ง (มีการสูญเสีย) กับโหลด $Z_L$	15
2.9 โครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป	17
2.10 รูปแบบการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	17
2.11 ส่วนประกอบของของสายอากาศควอดริเพล็กซ์	20
2.12 แสดงสัญญาณที่ถูกผสมแล้วของ 2 สัญญาณ	21
2.13 องค์ประกอบทางความถี่ของกระบวนการผสมสัญญาณย่านความถี่วิทยุ	21
2.14 สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของวงจรผสมสัญญาณ	22
2.15 วงจรผสมสัญญาณแบบใช้ไดโอดเดี่ยว	23
2.16 วงจรแบ่งหรือรวมกำลังสัญญาณวิลคินสันแบบพื้นฐาน	24
2.17 การทำงานของวงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ	26
2.18 เค้าโครง PCB ของวงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ	26
2.19 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบไม่มีกระแสไฟฟ้า	27
2.20 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบมีกระแสไฟฟ้า	29
3.1 โครงสร้างสายส่งไมโครสตริป	32
3.2 สายส่งไมโครสตริประนาบด้านบน	33
3.3 สายส่งไมโครสตริประนาบด้านข้าง	34
3.4 การกำหนดพอร์ตของอุปกรณ์	34
3.5 บล็อกไดอะแกรมการทดลองวัดวงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ (RF)	35
3.6 ผลการทดลองวัดวงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณที่ความถี่ 50 เมกกะเฮิร์ต	36
3.7 ภาพจำลองการต่ออุปกรณ์ในการทดลอง	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

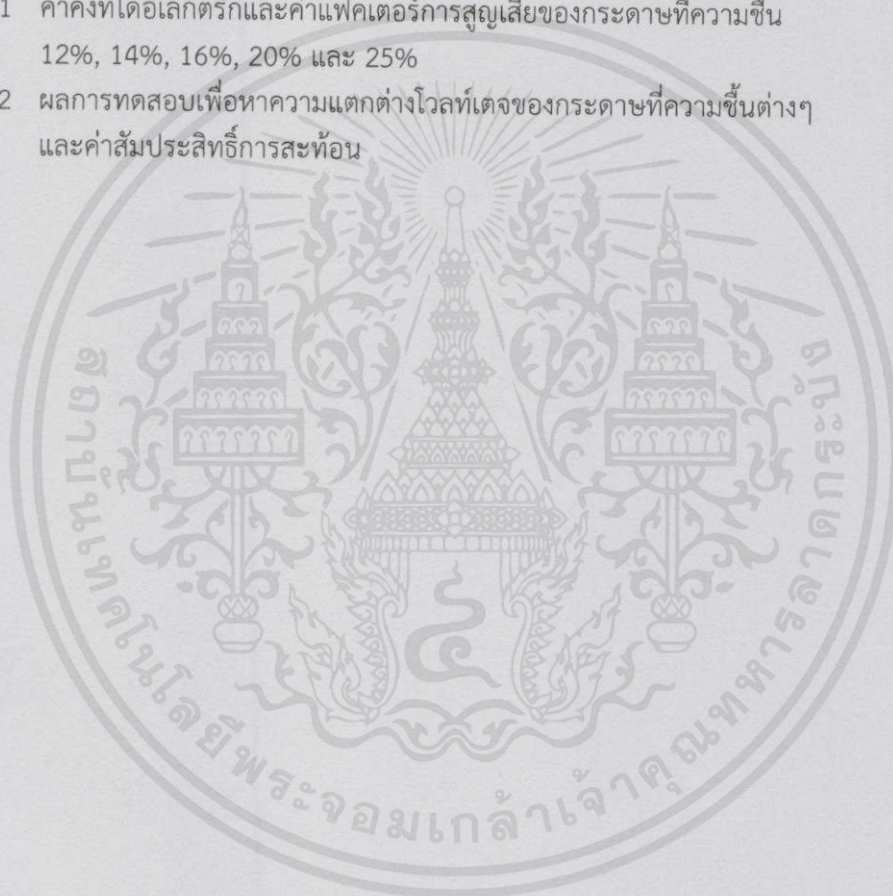
## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
3.8 ภาพการต่ออุปกรณ์ในการทดลอง	38
3.9 การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน	39
3.10 บล็อกไดอะแกรมของการทดลองหาความแตกต่างโวลต์เตจของกระดาศที่ความถี่ต่างๆ	41
3.11 การต่ออุปกรณ์เพื่อการทดลอง	41
4.1 สายส่งสัญญาณไมโครสตริป	43
4.2 การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและหาระยะในการวางกระดาศ	44
4.3 การทดสอบเพื่อหาความแตกต่างโวลต์เตจของกระดาศที่ความถี่ต่างๆ	45
4.4 กราฟแสดงค่าโวลต์เตจที่ความถี่ต่างๆ	47
4.5 กราฟแสดงค่าโวลต์เตจช่วงความถี่ที่สนใจ	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
3.1	น้ำหนักกระดาษที่ความชื้น 12%, 14%, 16%, 20% และ 25%	37
3.2	น้ำหนักกระดาษที่ความชื้น 12%, 13%, 14%, 15%, 16%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%	30
4.1	ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกและค่าแฟคเตอร์การสูญเสียของกระดาษที่ความชื้น 12%, 14%, 16%, 20% และ 25%	44
4.2	ผลการทดสอบเพื่อหาความแตกต่างโวลต์เตจของกระดาษที่ความชื้นต่างๆ และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอุตสาหกรรมการซื้อ-ขายกระดาษรีไซเคิล ปัญหาที่พบคือ การโง่งน้ำหนักกระดาษของผู้ขายกับพนักงานผู้รับซื้อเพื่อให้ได้ราคาที่สูงขึ้น ทำให้ทางโรงงานขาดทุน จึงเกิดแนวคิดในการสร้างเครื่องวัดความชื้นของกระดาษแทนการใช้แรงงานคนวัดเพื่อลดปัญหาการโง่งน้ำหนักรีดของกระดาษเป็นที่มาของโครงการวิจัยเรื่องสายอากาศเพื่อวัดความชื้นกระดาษ เริ่มแรกทำการวัดค่า Relative dielectric constant และ relative dielectric loss factor ของกระดาษที่ความชื้นต่างๆ เพื่อเลือกความถี่ที่จะใช้สร้างสายอากาศ โดยความถี่ที่ใช้คือ 2450 MHz สร้างสายอากาศผสมสัญญาณ มีวงจรรวมและแบ่งสัญญาณที่ความถี่ 50 MHz โดยใช้สายอากาศผสมสัญญาณส่งคลื่นไปในกระดาษ และมีสายอากาศเป็นตัวรับ เพื่อดูค่าโวลต์เตจที่กระดาษแต่ละความชื้นว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างไร ค่าโวลต์เตจที่ได้เป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณความชื้นในกระดาษ โดยกำหนดว่าความชื้นที่ต้องการจะต้องไม่เกิน 14 % เพื่อนำสายอากาศเพื่อวัดความชื้นกระดาษแทนการใช้แรงงานคนในโรงงานอุตสาหกรรม

#### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.) เพื่อศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟคเตอร์การสูญเสีย ทดลองหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟคเตอร์การสูญเสียของกระดาษที่ความชื้นต่างๆ
- 2.) เพื่อทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่กระดาษแต่ละความชื้นว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างไร

#### 1.3 ขอบเขตของปริญญาณิพนธ์

จากภาคเรียนที่ 1 ศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟคเตอร์การสูญเสีย ได้ทดลองหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟคเตอร์การสูญเสียของกระดาษที่ความชื้นต่างๆ ในภาคเรียนที่ 2 ใช้สายอากาศผสมสัญญาณส่งคลื่นไปในกระดาษและมีสายอากาศเป็นตัวรับ เพื่อดูค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่กระดาษแต่ละความชื้นว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลาง

การเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลาง หากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านตัวกลางที่ต่างชนิดกันจะมีความเร็วของการเคลื่อนที่ที่ต่างออกไป เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านตัวกลางใดๆ ทำให้อุณหภูมิประจุของอะตอม หรือโมเลกุลเกิดการสั่นสะเทือนแล้วแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลาง หากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางด้วยตัวกลางที่ต่างชนิดกันจะมีความเร็วของการเคลื่อนที่ที่ต่างออกไป เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านตัวกลางใดๆ ทำให้อุณหภูมิประจุของอะตอม หรือโมเลกุลเกิดการสั่นสะเทือนแล้วแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดิม เกิดคลื่นรวมซึ่งแตกต่างกันไปตามชนิดของตัวกลางนั้น ซึ่งขึ้นกับค่า  $\epsilon$  และ  $\mu$  ของตัวกลางใดๆ [1]

#### 2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับทฤษฎีค่าสภาพยอมไฟฟ้า

ค่าสภาพยอมไฟฟ้า (permittivity,  $\epsilon$ ) เป็นสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัสดุ ซึ่งค่าสภาพยอมไฟฟ้าประกอบด้วย  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$  โดยค่า  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  F/m และ  $\epsilon_r$  คือค่า relative permittivity โดยค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะประกอบด้วย  $\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$  ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon'_r$ ) และแพคเตอร์การสูญเสีย ( $\epsilon''_r$ ) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความมีขั้ว (polarity) ของวัสดุที่อุณหภูมิใดๆ วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง จัดเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก (dielectric material) มีความเป็นขั้ว (polar) สูง สามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้ จึงเป็นตัวนำไฟฟ้าไม่ดี หรือเป็นฉนวนไฟฟ้า ในทางฟิสิกส์ เราทราบว่าสำหรับตัวเก็บประจุที่มีจำนวนประจุอยู่ที่แผ่นโลหะทั้งสองคงที่ เมื่อใส่วัสดุไดอิเล็กตริกเข้าไปจะให้ความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่าลดลง เพราะสนามไฟฟ้าเดิมทำให้โมเลกุลของไดอิเล็กตริกกลายเป็นโมเลกุลไดโพล ซึ่งจะสร้างสนามไฟฟ้าต้านสนามไฟฟ้าเดิม เมื่อให้ไฟฟ้ากระแสสลับกับตัวเก็บประจุ ทิศทางของโมเลกุลไดโพลจะเปลี่ยนกลับไปกลับมาตามสนามไฟฟ้า ถ้าความถี่สูงพอ โมเลกุลไดโพลจะกลับตัวไม่ทัน จนไม่สามารถสร้างสนามไฟฟ้าออกมาต้านสนามไฟฟ้าเดิมได้ หรือในกรณีที่สารไดอิเล็กตริกเป็นของเหลว ที่ความถี่สูงๆ โมเลกุลจะไม่สามารถกลับตัวตามสนามไฟฟ้าเดิม ซึ่งในกรณีนี้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะลดลง ยิ่งความถี่สูงมากขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะลดลงมาก สนามไฟฟ้าต้านที่เกิดขึ้นจะลดลงเช่นกัน ในปัจจุบันมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาวัสดุที่มีส่วนผสมทางเคมีที่ต่างกัน ดังนั้น คุณสมบัติทางไฟฟ้า จึงเป็นปริมาณที่จำเป็นต้องทราบอย่างแน่ชัด เราสามารถจำแนกวัสดุได้โดยใช้คุณสมบัติไดอิเล็กตริก ซึ่งพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้สำหรับบอกความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ ค่าสภาพยอม ( $\epsilon$ ) และค่าความซึมซาบได้ ( $\mu$ ) ค่าสภาพยอมเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถของวัสดุในสนามไฟฟ้า ค่าสภาพยอมประกอบด้วยส่วนจริง ( $\epsilon'$ ) ที่เรียกว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริก และส่วนจินตภาพ ( $\epsilon''$ ) ที่เรียกว่าตัวประกอบสูญเสีย ดังนั้นสามารถแสดงค่าสภาพยอมได้ดังนี้

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.1)$$

โดยที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกบ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุในการเก็บพลังงานไฟฟ้า ตัวประกอบสูญเสียบ่งบอกถึงพลังงานของสนามไฟฟ้าที่สูญเสียในตัววัสดุ นอกจากนี้พารามิเตอร์ที่มักใช้อยู่บ่อยครั้งเรียกว่าแทนเจนต์การสูญเสีย (Loss tangent) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างตัวประกอบสูญเสียกับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ค่าสภาพยอมของวัสดุมักถูกนอร์มอลไลซ์ (Normalized) ด้วยค่าสภาพยอมของสุญญากาศและเรียกใหม่ว่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (2.2)$$

โดยที่  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  F/m นอกจากนี้ค่าตัวประกอบสูญเสียสัมพัทธ์สามารถเขียนให้อยู่ในฟังก์ชันของสภาพนำ ( $\sigma$ ) ได้ดังนี้

$$\epsilon_r'' = \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (2.3)$$

ค่าสภาพยอมเป็นพารามิเตอร์หนึ่งในสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเมื่อสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่านได้จะทำให้รู้ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในตัวกลางนั้นได้[2]

โดยที่

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (relative dielectric constant,  $\epsilon_r'$ ) คือค่าที่แสดงความสามารถของวัสดุในการกักเก็บพลังงานไว้เมื่อนำมาวางใส่สนามไฟฟ้ากระแสสลับถ้าค่านี้สูงแสดงว่าเก็บพลังงานได้มากแต่ค่านี้จะเปลี่ยนตามอุณหภูมิและความชื้นของวัตถุ

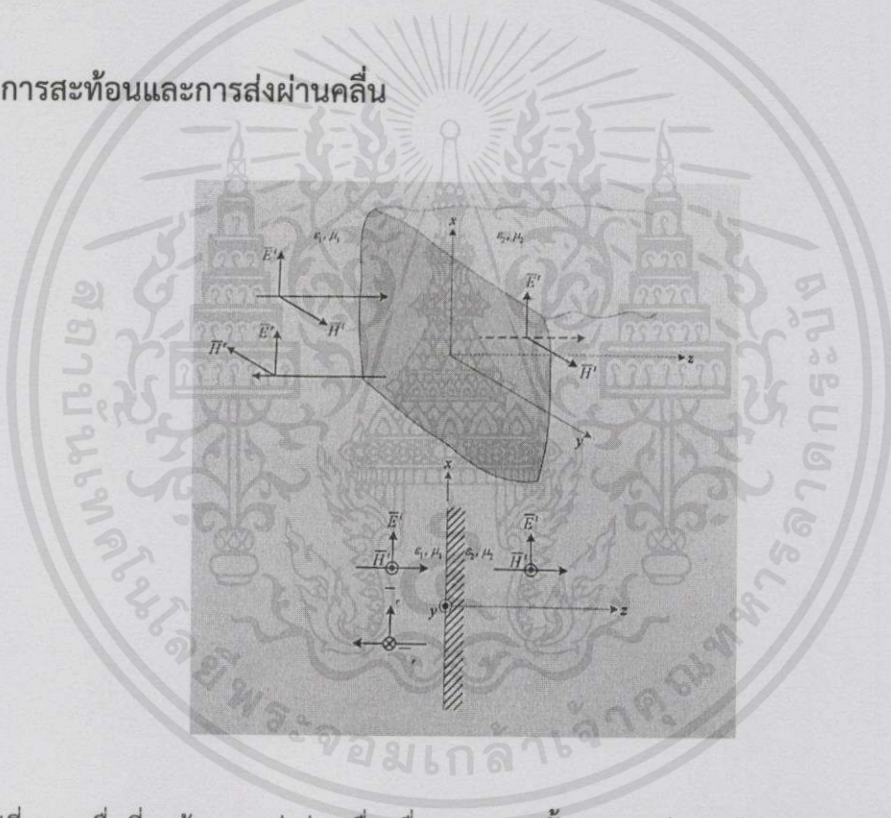
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแฟคเตอร์การสูญเสีย (relative dielectric loss,  $\epsilon_r''$ ) คือค่าที่แสดงความสามารถของวัสดุที่จะกระจายพลังงานไฟฟ้ากลายเป็นพลังงานความร้อน ถ้าค่านี้สูงจะเกิดความร้อนสูง คำว่า “loss” หรือสูญเสียหมายถึงการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ค่าเหล่านี้จะทำให้ทราบเกี่ยวกับความสามารถในการเป็นฉนวนไฟฟ้า

$$\epsilon_r'' = \epsilon_r' \tan(\delta) \quad (2.2)$$

จากสมการค่า loss tangent ( $\tan(\delta)$ ) แสดงให้เห็นถึงระดับการทะลุทะลวงของสนามไฟฟ้าและระดับการกระจายพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ค่าเหล่านี้ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าวัสดุจะเกิดความร้อนดีขึ้น [1]

### 2.3 การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น



รูปที่ 2.1 คลื่นที่สะท้อนและส่งผ่านเมื่อคลื่นตกกระทบบนตงฉากรอยต่อของตัวกลางสองชนิด [2]

เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางในตัวกลางที่หนึ่งที่มีคุณสมบัติประจำตัวเป็น  $\mu_1$   $\epsilon_1$  มาตกกระทบบนตงฉากกับรอยต่อระหว่างตัวกลางที่หนึ่งกับตัวกลางที่สองที่มีคุณสมบัติประจำตัวเป็น  $\mu_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\epsilon_2$  ดังแสดงในรูป 2.1 บางส่วนของส่วนคลื่นจะเดินทางเข้าไปในตัวกลางที่สองและบางส่วนจะสะท้อนกลับมากน้อยขึ้นอยู่กับค่า  $\mu$  และ  $\epsilon$  ของตัวกลางทั้งสอง

ถ้าสมมติให้สนามไฟฟ้ามีขนาด  $E_0$  และมีทิศทางตามแนวแกน  $x$  จะแสดงสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบบรรอด้วย  $\bar{E}_i$  ซึ่งมีค่า

$$\bar{E}_i = \hat{a}_x E_0 e^{-j\beta_1 z} \quad (2.3)$$

สำหรับสนามไฟฟ้าที่สะท้อนกลับ  $\bar{E}_r$  และสนามไฟฟ้าที่ส่งผ่าน  $\bar{E}_t$  จะเป็น

$$\bar{E}_r = \hat{a}_x \Gamma^b E_0 e^{+j\beta_1 z} \quad (2.4)$$

และ

$$\bar{E}_t = \hat{a}_x T^b E_0 e^{-j\beta_2 z} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\Gamma^b$  และ  $T^b$  เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นที่รอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสอง

จากสมการที่ (2.3) ถึง (2.5) จะพบว่าสนามไฟฟ้าทั้งสามส่วนมีการโพลาไรซ์เดียวกัน คือ  $\hat{a}_x$  เนื่องจากรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสองเป็นระนาบ

เมื่อแทนสนามไฟฟ้าส่วนต่างๆ ในสมการของแมกซ์เวลล์ จะหาส่วนประกอบต่างๆ ของสนามแม่เหล็กได้ ดังนี้

$$\bar{H}_i = \hat{a}_y \frac{E_0}{\eta_1} e^{-j\beta_1 z} \quad (2.6)$$

$$\bar{H}_r = -\hat{a}_y \frac{\Gamma^b}{\eta_1} E_0 e^{+j\beta_1 z} \quad (2.7)$$

$$\bar{H}_t = \hat{a}_y T^b \frac{E_0}{\eta_2} e^{-j\beta_2 z} \quad (2.8)$$

$\eta_1$  และ  $\eta_2$  เป็นอิมพีแดนซ์อินทรินสิคของตัวกลางที่หนึ่งและสองตามลำดับ

เมื่ออาศัยเงื่อนไขในขอบเขตที่สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีความต่อเนื่องที่บริเวณรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง จะได้ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อน และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านดังนี้

$$1 + \Gamma^b = T^b \quad (2.10)$$

$$\frac{1}{\eta_1} (1 - \Gamma^b) = \frac{1}{\eta_2} T^b \quad (2.11)$$

เมื่อแก้สมการ (2.10) และ (2.11) จะหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่รอยต่อได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Gamma^b = \frac{E_r}{E_i} = -\frac{H_r}{H_i} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (2.12)$$

$$T^b = \frac{E_t}{E_i} = \frac{\eta_2}{\eta_1} \frac{H_t}{H_i} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} = 1 + \Gamma^b \quad (2.13)$$

จะเห็นว่าทั้ง  $\Gamma^b$  และ  $T^b$  มีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติประจำตัวของตัวกลางทั้งสอง ซึ่งจะไม่มีการสะท้อน ( $\Gamma^b = 0$ ) เมื่อ  $\eta_1$  มีค่าเท่ากับ  $\eta_2$

เมื่อต้องการหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ตำแหน่งที่ห่างจากรอยต่อจะได้โดยการหาอัตราส่วนของสนามที่ตำแหน่งนั้น ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\Gamma(z = -l_1) = \frac{E_r(z)}{E_i(z)} \Big|_{z=-l_1} = \frac{\Gamma^b E_0 e^{+j\beta_1 z}}{E_0 e^{-j\beta_1 z}} \Big|_{z=-l_1} = \Gamma^b e^{-j2\beta_1 l_1} \quad (2.14)$$

$$\Gamma \begin{pmatrix} z_2 = l_2 \\ z_1 = -l_1 \end{pmatrix} = \frac{E_t(z_2)}{E_i(z_1)} \Big|_{z_1=-l_1} = \frac{T^b E_0 e^{-j\beta_2 l_2}}{E_0 e^{j\beta_1 l_1}} = T^b e^{-j(\beta_2 l_2 + \beta_1 l_1)} \quad (2.15)$$

ความหนาแน่นกำลังงานเฉลี่ยของคลื่นในส่วนต่างๆ จะมีค่าดังนี้

$$\bar{S}_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}(\bar{E} \times \bar{H}^*) = \hat{a}_z \frac{|E_0|^2}{2\eta_1} \quad (2.16)$$

$$\bar{S}_{av}^r = \frac{1}{2} \text{Re}(\bar{E}^r \times \bar{H}^{r*}) = -\hat{a}_z |\Gamma^b|^2 \frac{|E_0|^2}{2\eta_1} = -\hat{a}_z |\Gamma^b|^2 \bar{S}_{av} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_{av}^t &= \frac{1}{2} \text{Re}(\bar{E}^t \times \bar{H}^{t*}) = \hat{a}_z |T^b|^2 \frac{|E_0|^2}{2\eta_2} = \hat{a}_z |T^b|^2 \frac{\eta_1}{\eta_2} \frac{|E_0|^2}{2\eta_1} \\ &= \hat{a}_z |T^b|^2 \frac{\eta_1}{\eta_2} \bar{S}_{av} = \hat{a}_z (1 - |\Gamma^b|^2) \bar{S}_{av} \end{aligned} \quad (2.18)$$

ในตัวกลางที่หนึ่ง สนามไฟฟ้ารวมและสนามแม่เหล็กรวมเป็นผลรวมของสนามที่ตกกระทบรวมกับสนามที่สะท้อนจากรอยต่อ นั่นคือ

$$\bar{E}_1 = \bar{E}_i + \bar{E}_r = \hat{a}_x E_0 e^{-j\beta_1 z} (1 + \Gamma^b e^{+j2\beta_1 z}) = \hat{a}_x E_0 e^{-j\beta_1 z} [1 + \Gamma(z)] \quad (2.19)$$

$$\bar{H}_1 = \bar{H}_i + \bar{H}_r = \hat{a}_y (E_0 / \eta_1) e^{-j\beta_1 z} (1 - \Gamma^b e^{+j2\beta_1 z}) = \hat{a}_y \frac{E_0}{\eta_1} e^{-j\beta_1 z} [1 - \Gamma(z)] \quad (2.20)$$

เราจะอธิบายว่ามีคลื่นสะท้อนมากหรือน้อย โดยใช้อัตราส่วนคลื่น (standing Wave Ratio: SWR) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดต่อค่าต่ำสุดของสนามไฟฟ้า นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$SWR = \frac{|E_1|_{\max}}{|E_1|_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma^b|}{1 - |\Gamma^b|} = \frac{1 + \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1}}{1 - \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1}} \quad (2.21)$$

ถ้ากำหนดค่าความขบเซิมได้ของตัวกลางทั้งสองเท่ากัน ( $\mu_1 = \mu_2$ )  $SWR$  จะกลายเป็น

$$SWR = \frac{|\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}| + |\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}|}{|\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}| - |\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}|} \quad (2.22ก)$$

$$= \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} \quad ; \epsilon_1 > \epsilon_2$$

$$= \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} \quad ; \epsilon_2 > \epsilon_1 \quad (2.22ข)$$

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (2.23)$$

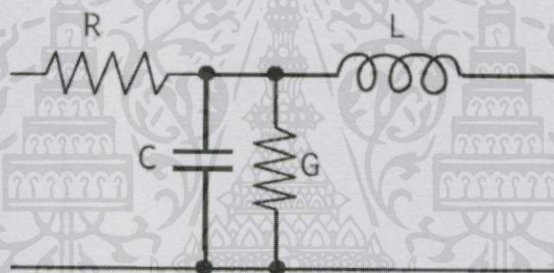
## 2.4 ทฤษฎีสายส่ง

สายส่ง (Transmission line) เป็นตัวกลางที่ใช้เชื่อมโยงส่งถ่ายสัญญาณไฟฟ้า จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายส่งนั้นอาจถูกพิสูจน์ว่าเป็นการส่งถ่ายพลังงานรูปแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า หรืออาจพิจารณาว่าเป็นการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปตามสายส่งจึงนับเป็นส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งในระบบไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็ไฟฟ้ากำลังหรือไฟฟ้าสื่อสาร ในระบบไฟฟ้ากำลังสายส่งตัวกลางให้พลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าถูกส่งผ่านไปยังผู้ใช้ในพื้นที่ต่างๆ ในระบบไฟฟ้าสื่อสารสายส่งจะเป็นตัวนำสัญญาณในการสื่อสารจากผู้ส่งต้นทางไปยังผู้รับปลายทาง สำหรับระบบวิทยุที่ใช้การแพร่คลื่นแบบไร้สายก็ยังต้องมีการใช้สายส่งเพื่อใช้เชื่อมโยงสัญญาณระหว่างเครื่องส่ง ไปยังสายอากาศก่อนที่จะแพร่ออกไปเป็นคลื่น หรือนำสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศส่งไปยังเครื่องรับ และด้วยความถี่วิทยุเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูงสายนำสัญญาณที่จะใช้เป็นช่องทางหรือตัวกลางให้สัญญาณทางไฟฟ้าที่ความถี่สูงเดินทางผ่านไบนั้นจึงมีความสำคัญมาก จากลักษณะสมบัติของตัวกลางเมื่อสัญญาณที่ส่งผ่านนั้นมีความสูงจะเกิดปัญหาและอุปสรรคที่สำคัญ อันได้แก่ เรื่อง การสูญเสีย (Loss) ในสายส่ง การสะท้อน (Reflection) สัญญาณรบกวน (Noise) รวมไปถึง การแทรกสอด (Interference) ของสัญญาณที่เดินทางในสายนำสัญญาณหลายเส้น เป็นต้น [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 วงจรสมมูลและอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

สายส่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่พิจารณาว่าเป็นอุปกรณ์ประเภทกระจาย (Distributed element) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ขนาดทางกายภาพใหญ่กว่าความยาวคลื่น ในการวิเคราะห์สายส่งนั้นจึงแตกต่างจากการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์ประเภทลัมป์ (Lump element) โดยทั่วไป ในกรณีของอุปกรณ์ประเภทกระจายนี้ แรงดันและกระแส ณ จุดต่างๆ บนตัวอุปกรณ์สามารถพิจารณาว่ามีขนาดและเฟสแตกต่างกันได้ อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์นั้นก็จะมีโครงสร้างวงจรสมมูลที่แทนด้วยอุปกรณ์ประเภทลัมป์ โดยการแบ่งสายส่งออกเป็นส่วนเล็กๆ ต่อเรียงกันจากโครงสร้างของสายส่งตั้งได้กล่าวไปในหัวข้อก่อนหน้านั้น เมื่อแบ่งส่วนสายส่งออกเป็นช่วงสั้นๆต่อกันสามารถเขียนวงจรสมมูลของสายส่งแต่ละส่วนด้วยอุปกรณ์ประเภทลัมป์ได้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ (L) ต่ออนุกรมเกิดจากความเหนี่ยวนำในตัวเส้นลวด ตัวเก็บประจุ (C) ต่อขนานนั้นเกิดจากโครงสร้างที่มีตัวนำวางขนานกันไปในระยะใกล้ๆ กัน ตัวต้านทาน (R) ต่ออนุกรมแทนความต้านทานของตัวนำของวัสดุที่ใช้ทำสายส่ง และความนำ (G) ต่อขนานแทนความนำของฉนวนที่คั่นระหว่างตัวนำ



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของสายส่ง [3]

R ความต้านทานต่อหน่วยความยาวของตัวนำทั้งสอง [ $\Omega /m$ ]

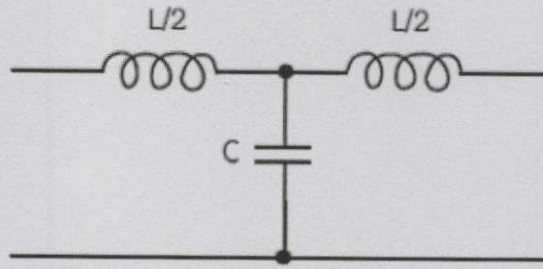
L ความเหนี่ยวนำต่อหน่วยความยาวของตัวนำทั้งสอง [ $H/m$ ]

G ความนำต่อหน่วยความยาวของตัวนำทั้งสอง [ $S/m$ ]

C ความจุต่อหน่วยความยาวของตัวนำทั้งสอง [ $F/m$ ]

โดยความต้านทาน (R) ที่แทนการสูญเสียของตัวนำนั้นจะมีค่าน้อย และความนำ (G) ที่แทนการสูญเสียของฉนวนก็จะมีค่าน้อยเช่นกัน ในการใช้งานหลายๆ กรณีค่าทั้งสองนี้อาจไม่มีนัยสำคัญที่จะคำนึงถึง วงจรสมมูลอย่างง่ายหรือวงจรสมมูลของสายส่งที่ไม่มีการสูญเสียจึงสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลอย่างง่าย วงจรสมมูลของสายส่งที่ไม่มีการสูญเสีย [3]

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.2 เป็นวงจรสมมูลของสายส่งที่มีความยาวหนึ่ง ค่าความต้านทาน ค่าความนำ ค่าความจุและความเหนี่ยวนำในวงจรจะเป็นค่าต่อความยาวตามลักษณะโครงสร้างและวัสดุของสายส่งแต่ละเส้น ซึ่งในสายส่งเส้นหนึ่งจะประกอบไปด้วยวงจรสมมูลลักษณะเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนถึงอนันต์ ฉะนั้นถ้าจะพิจารณาวงจรสมมูลของสายส่งเส้นหนึ่งจะพบว่าประกอบด้วยวงจรเช่นนี้ต่อเรียงติดกัน (Cascade)

อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic impedance) เป็นค่าสำคัญประจำสายส่งแต่ละเส้น เกิดจากลักษณะโครงสร้างและวัสดุของสายส่งนั้น มีความสำคัญเมื่อนำสายส่งไปเชื่อมต่อกับเครื่องส่งหรือเครื่องรับจะต้องมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ขาออกของเครื่องส่ง หรืออิมพีแดนซ์ขาเข้าของเครื่องรับ เพื่อไม่ให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไปสามารถพิจารณาได้ว่าส่วนของสายส่งที่พิจารณาเป็นข่ายวงจรรูปแบบ T ต่ออยู่กับอิมพีแดนซ์ค่าหนึ่งเมื่อสายส่งมีความยาวไปถึงอนันต์ อิมพีแดนซ์นี้ถูกเรียกว่า อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ  $Z_0$  จะได้ว่า

$$Z_0 = \frac{Z_1}{2} + \frac{(Z_1 Z_2 / 2) + Z_0 Z_2}{Z_2 + (Z_1 / 2) + Z_0} \quad (2.24)$$

$$Z_0 = \frac{Z_1 Z_2 + (Z_1^2 / 2) + Z_1 Z_0 + (2 Z_1 Z_2 / 2) + 2 Z_0 Z_2}{2 [Z_2 + (Z_1 / 2) + Z_0]} \quad (2.25)$$

$$Z_0^2 = Z_1 Z_2 + \left( \frac{Z_1}{2} \right)^2 \quad (2.26)$$

ถ้าสายส่งถูกแทนด้วยวงจรสมมูลลักษณะส่วนย่อยของข่ายวงจรรูปแบบ T เช่นไปเรื่อยๆจนถึงอนันต์ เทอมที่สองของสมการ (2.26) จะถูกหารด้วยจำนวนส่วนย่อยวงจรนี้ ซึ่งในกรณีที่มีส่วนย่อยเข้าสู่อนันต์ เทอมที่สองของสมการ (2.26) จะหายไปเหลือเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_0^2 = Z_1 Z_2 \quad (2.27)$$

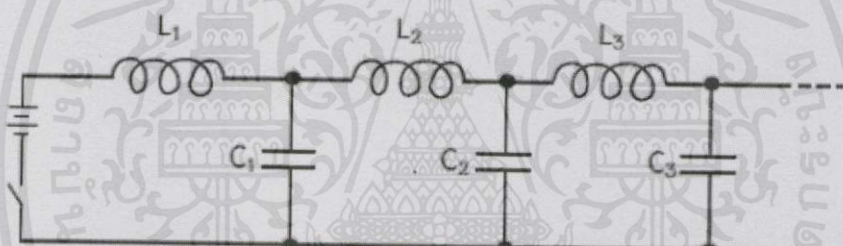
เมื่อแทนค่า  $Z_1, Z_2$  ด้วยค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุประจุได้

$$Z_0 = \sqrt{2\pi fL \times \frac{1}{2\pi fC}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.28)$$

จากผลที่ได้ตามสมการ (2.28) พบว่าค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะจะขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุประจุของสาย

#### 2.4.2 ความเร็วการแพร่คลื่นในสายส่ง

จากวงจรสมมูลของสายส่งตามรูปที่ 2.3 เมื่อต่อแหล่งจ่ายให้กับสายส่ง สัญญาณจากแหล่งจ่ายจะใช้เวลาในการเดินทางถึงปลายสายอีกด้านหนึ่ง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยการต่อแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงให้กับสายส่งดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.4 การต่อแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงกับวงจรสมมูลของสายส่ง [3]

ณ เวลา  $t=0$  ปิดวงจรสวิตช์ต่อแหล่งจ่ายให้กับสายส่ง ด้วยคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ แรงดันจะตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ทั้งหมดในขณะที่ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะเป็นศูนย์และจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากการอัดประจุผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ทำให้ ณ เวลานั้นจึงไม่มีแรงดันที่จะไปอัดประจุให้กับ  $C_2$  เมื่อเวลาผ่านไป  $C_1$  ถูกอัดประจุมากขึ้นจนแรงดันเข้าใกล้แหล่งจ่าย  $C_2$  จึงเริ่มถูกอัดประจุผ่าน  $L_2$  และจะต้องใช้เวลาในการอัดประจุจนมีแรงดันสูงขึ้นเท่ากับแหล่งจ่ายจึงสามารถอัดประจุให้กับ  $C_3$  ต่อไปได้ ด้วยลักษณะสมบัติความสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสายส่ง จึงทำให้เวลาที่ใช้ในการอัดประจุแก่  $C_1, C_2, C_3$  เท่ากัน จะพบว่าเวลาการเดินทางของสัญญาณในการอัดประจุแต่ละช่วงหนึ่งหน่วยความยาวเท่ากับ

$$t = \sqrt{LC} \quad (2.29)$$

ละความเร็วในการเดินทางของสัญญาณในสายส่ง (Propagation velocity;  $v_p$ ) เท่ากับความยาวสายส่ง ( $l$ ) หารด้วยเวลาที่ใช้ในหนึ่งหน่วยความยาว

$$v_p = \frac{l}{\sqrt{LC}} \quad (2.30)$$

จะเห็นว่าความเร็วของสัญญาณในสายส่ง จะขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำและความจุประจุของสายส่ง

จากที่ได้กล่าวในตอนต้นแล้วว่า การวิเคราะห์สายส่ง อาจพิจารณาเป็นการเดินทางของสัญญาณ ในรูปแบบของการแพร่คลื่นแรงดันและกระแสในสายส่ง ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลตามรูปที่ 2.2 จะได้สมการคลื่นแรงดันและกระแสสภาวะคงตัวดังนี้

$$\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L)I(z), \quad (2.31ก)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)V(z), \quad (2.31ข)$$

แก้สมการ (2.31ก) และ (2.31ข) เพิ่มหาค่าแรงดันและกระแส

$$\frac{d^2V(z)}{dz^2} - \gamma^2 V(z) = 0, \quad (2.32ก)$$

$$\frac{d^2I(z)}{dz^2} - \gamma^2 I(z) = 0, \quad (2.32ข)$$

โดยที่  $\gamma$  เป็นค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นเชิงซ้อน (Complex propagation constant)

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.33)$$

ได้ผลลัพธ์ของสมการเป็นคลื่นเดินทางดังนี้

$$V(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z}, \quad (2.34ก)$$

$$I(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z}, \quad (2.34ข)$$

โดยที่เทอม  $e^{-\gamma z}$  แทนคลื่นเดินทางในทิศทาง  $+z$  และเทอม  $e^{\gamma z}$  แทนคลื่นเดินทางในทิศทาง  $-z$  แทนค่าแรงดันที่ได้จากสมการ (2.34ก) ลงในสมการ (2.31ก) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I(z) = \frac{\gamma}{R + j\omega L} [V_0^+ e^{-\gamma z} - V_0^- e^{\gamma z}]$$

เปรียบเทียบกับสมการ (2.34ก) จะได้อิมพีแดนซ์คุณลักษณะดังนี้

$$Z_0 = \frac{R + j\omega L}{\gamma} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.35)$$

เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสในสายส่งดังนี้

$$\frac{V_0^+}{I_0^+} = Z_0 = \frac{-V_0^-}{I_0^-}$$

ดังนั้นสมการ (2.34ข) สามารถเขียนใหม่ในรูป

$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-\gamma z} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{\gamma z} \quad (2.36)$$

ซึ่งเมื่อเปลี่ยนกลับไปในโดเมนเวลาก็จะได้รูปคลื่นแรงดันตามสมการ

$$v(z, t) = |V_0^+| \cos(\omega t - \beta z + \phi^+) e^{-\alpha z} + |V_0^-| \cos(\omega t - \beta z + \phi^-) e^{-\alpha z} \quad (2.37)$$

และความยาวคลื่นในสายส่ง

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (2.38)$$

ความเร็วเฟสหรือความเร็วของการแพร่กระจายคลื่นในสายส่งเท่ากับ

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \lambda f \quad (2.39)$$

ในกรณีสายส่งที่ไม่มีการสูญเสียค่า  $R=G=0$  จะได้ค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่น (Propagation constant) ดังนี้

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{LC}$$

หรือ

$$\beta = \omega\sqrt{LC} \quad (2.40ก)$$

$$\alpha = 0 \quad (2.40ข)$$

ในกรณีสายส่งที่ไม่มีการสูญเสียซึ่งเหมือนกับการวิเคราะห์ตามสมการ (2.5) จะได้อิมพีแดนซ์คุณลักษณะเป็นค่าจำนวนจริงได้เท่ากับ

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ได้ผลลัพธ์สำหรับแรงดันและกระแสในสายส่งที่ไม่มีการสูญเสียสามารถเขียนได้ดังนี้

$$V(z) = V_0^+ e^{-j\beta z} + V_0^- e^{j\beta z} \quad (2.42ก)$$

$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-j\beta z} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{j\beta z} \quad (2.42ข)$$

และความยาวคลื่นในสายส่งที่ไม่มีการสูญเสีย

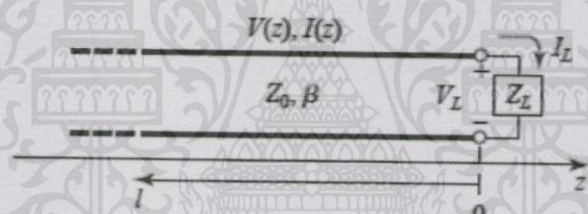
$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{LC}} \quad (2.43)$$

ความเร็วเฟสหรือความเร็วของการแพร่คลื่นในสายส่งเท่ากับ

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.44)$$

เช่นเดียวกับการพิจารณาแล้วตามสมการ (2.30)

### 2.4.3 สายส่งที่ไม่มีการสูญเสีย



รูปที่ 2.5 การต่อสายส่ง (ไม่มีการสูญเสีย) กับโหลด  $Z_L$  [3]

ณ จุดใดๆ บนสายส่งนิยามว่าเป็นค่าอิมพีแดนซ์ ณ จุดนั้น หรืออิมพีแดนซ์ขาเข้า ( $Z_{in}$ ) เมื่อมองจากจุดนั้นเข้าไปยังโหลด โดยจะมีค่าเปลี่ยนไปตามระยะทาง  $l$  ที่นับห่างจากโหลดไปตามสายส่งดังนี้

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta l)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta l)} \quad (2.45)$$

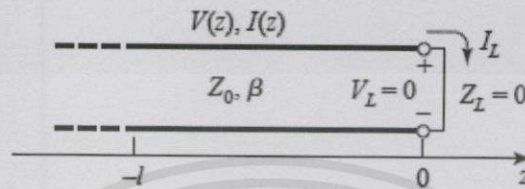
สมการ (2.24) นี้ ใช้ในการหาอิมพีแดนซ์ขาเข้า  $Z_{in}$  ณ ระยะทาง  $l$  จากโหลด เมื่อสายส่งที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ  $Z_0$  ถูกต่อกับโหลด  $Z_L$  เป็นที่รู้จักในนามสมการอิมพีแดนซ์ของสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.3.1 สายส่งลัดวงจรที่ปลายสาย

เมื่อสายส่งถูกลัดวงจรที่ปลายหรือ Short circuit หมายถึงสายส่งที่ต่อกับ

โหลด  $Z_L = 0$



รูปที่ 2.6 สายส่ง (ไม่มีการสูญเสีย) ที่ถูกลัดวงจรที่ปลาย [1]

ที่ระยะ  $Z=0$  คือที่โหลด แรงดันจะมีค่าเท่ากับศูนย์ (ลัดวงจร) ในขณะที่กระแสมีค่าสูงสุด ที่ระยะ  $l$  ใดๆ จากโหลด จะได้อัตราส่วนแรงดันกับกระแสเป็นอิมพีแดนซ์ขาเข้า ณ จุดนั้นๆ ดังนี้

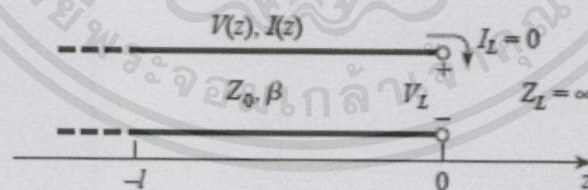
$$Z_m = jZ_0 \tan(\beta l) \quad (2.46)$$

จะได้อิมพีแดนซ์ขาเข้าเป็นค่าจินตภาพล้วนหรือค่ารีแอกแตนซ์เสมอ

## 2.4.3.2 สายส่งที่เปิดปลาย

กรณีของสายส่งที่เปิดปลายหรือ Open circuit หมายถึงสายส่งต่อกับ

โหลด  $Z_L$  มีค่าเป็นอนันต์



รูปที่ 2.7 สายส่ง (ไม่มีการสูญเสีย) ที่ถูกเปิดวงจรที่ปลาย [1]

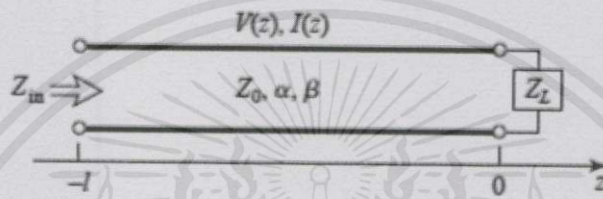
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ระยะ  $Z=0$  คือที่โหลด แรงดันจะมีค่าเท่ากับศูนย์ (เปิดวงจร) ในขณะที่กระแสมีค่าสูงสุด ที่ระยะ  $l$  ใดๆ จากโหลด จะได้อัตราส่วนแรงดันกับกระแสเป็นอิมพีแดนซ์ขาเข้า ณ จุดนั้นๆ ดังนี้

$$Z_{in} = -jZ_0 \cot(\beta l) \quad (2.47)$$

จะได้อิมพีแดนซ์ขาเข้าเป็นค่าจินตภาพล้วนหรือค่ารีแอกแตนซ์เสมอ

#### 2.4.4 สายส่งที่มีการสูญเสีย



รูปที่ 2.8 การต่อสายส่ง (มีการสูญเสีย) กับโหลด  $Z_L$  [3]

ณ จุดใดๆ บนสายส่งนิยามว่าเป็นค่าอิมพีแดนซ์ ณ จุดนั้น หรืออิมพีแดนซ์ขาเข้า ( $Z_{in}$ ) เมื่อมองจากจุดนั้นเข้าไปยังโหลด โดยจะมีค่าเปลี่ยนไปตามระยะทาง  $l$  ที่นับห่างจากโหลดไปตามสายส่งดังนี้

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh(\gamma l)}{Z_0 + Z_L \tanh(\gamma l)} \quad (2.48)$$

เมื่อ  $\gamma = \alpha + j\beta$   
โดยที่

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \left\{ \frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + \left[ \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right]^2} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.49)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \left\{ \frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + \left[ \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right]^2} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.4.1 สายส่งลัดวงจรที่ปลายสาย

เมื่อสายส่งถูกลัดวงจรที่ปลายหรือ Short circuit หมายถึงสายส่งที่ต่อกับ โหลด  $Z_L = 0$

$$Z_{in} = jZ_0 \tanh(\gamma l) \quad (2.51)$$

จะได้อิมพีแดนซ์ขาเข้าเป็นค่าจินตภาพล้วนหรือค่ารีแอกแตนซ์เสมอ

#### 2.4.4.2 สายส่งที่เปิดปลาย

กรณีของสายส่งที่เปิดปลายหรือ Open circuit หมายถึงสายส่งต่อกับ โหลด  $Z_L$  มีค่าเป็นอนันต์

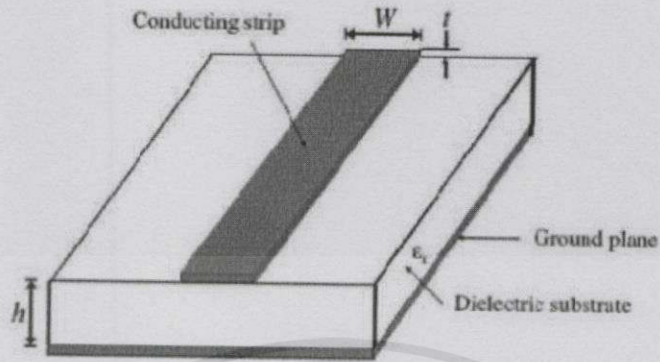
$$Z_{in} = -jZ_0 \coth(\gamma l) \quad (2.52)$$

### 2.5 โครงสร้างสายนำสัญญาณไมโครสตริป

สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปเป็นสายนำสัญญาณแบบระนาบ (Planar Structure) เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และง่ายต่อการ ออกแบบเป็นวงจรรวมไมโครเวฟ (Microwave Integrated Circuits) ดังนั้นควรจะศึกษา รายละเอียดพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปเพื่อจะได้เป็นประโยชน์ในการ ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในระบบสื่อสารย่านไมโครเวฟ

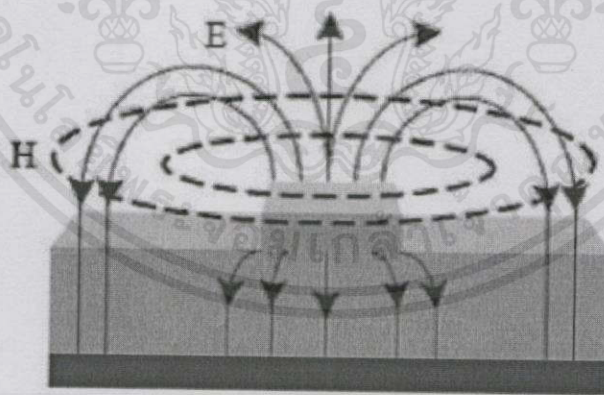
โครงสร้างทั่วไปของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปแสดงดังรูปที่ 2.9 ประกอบด้วยสตริป (Strip) ซึ่งเป็นส่วนที่เป็นสายตัวนำ มีความกว้างเป็น  $W$  และมีความหนาเป็น  $t$  โดยสตริปจะอยู่บนชั้นของฐานรองไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant)  $\epsilon_r$  และมีความหนาเป็น  $h$  สำหรับแผ่นโลหะตัวนำที่อยู่ด้านล่างจะทำหน้าที่ เป็นระนาบกราวด์ (Ground-Plane) ของวงจร [1],[3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป [3]

เนื่องจากพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านชั้นฐานรองบริเวณที่อยู่ระหว่างสตริปกับระนาบกราวด์ ซึ่งเส้นแรงแสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในไมโครสตริปไม่ได้อยู่ในชั้นฐานรองดังรูปที่ 2.10 ดังนั้นรูปแบบการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในไมโครสตริปจึงไม่ใช่รูปแบบแม่เหล็กไฟฟ้าตัดขวางอย่างแท้จริง (TEM Mode) แต่จะเป็นรูปแบบการแพร่กระจายคล้ายรูปแบบ TEM (Quasi-Tem Mode)



รูปที่ 2.10 รูปแบบการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 การหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล

การวิเคราะห์เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristics Impedance,  $Z_o$ ) และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant,  $\epsilon_{eff}$ ) สามารถหาได้ดังนี้ [1]

$$\epsilon_{eff} = \frac{C_d}{C_a} \quad (2.53)$$

$$Z_o = \frac{1}{c\sqrt{C_a C_b}} \quad (2.54)$$

โดยที่ค่า  $C_d$  เป็นค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสตริปเทียบกับชั้นของไดอิเล็กตริกฐานรอง  $C_a$  เป็นค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสตริปเทียบกับชั้นของไดอิเล็กตริกฐานรองที่แทนด้วยอากาศ นั่นคือเป็นค่าคาปาซิแตนซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างสตริปที่ด้านบนของชั้นไดอิเล็กตริกนั่นเอง และค่า  $c$  เป็นค่าความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศมีค่าประมาณ  $3 \times 10^8$  m/s

สำหรับค่าความหนาของแผ่นสตริปที่มีค่าน้อยมาก ( $t$  เข้าใกล้ 0) จะได้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลที่มีความผิดพลาดน้อยกว่า 1% ดังสมการที่ (2.34) ถึง (2.37)

สำหรับค่าอัตราส่วน  $W/h$  ที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ ( $W/h \leq 1$ ) จะได้ว่า

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left\{ \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-0.5} + 0.04 \left[ 1 - \frac{W}{h} \right]^2 \right\} \quad (2.55)$$

$$Z_c = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left[ \frac{8h}{W} + 0.25 \frac{W}{h} \right] \quad (2.56)$$

สำหรับค่าอัตราส่วน  $W/h$  ที่มากกว่าหรือเท่ากับ ( $W/h \geq 1$ ) จะได้ว่า

$$Z_c = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[ \frac{W}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W}{h} + 1.444 \right) \right]} \quad (2.57)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-0.5} \right] \quad (2.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 การหาความชื้นในกระดาศ

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับน้ำหนัก (Weight-Weight Relationships) มีความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับน้ำหนักที่สำคัญเพียง 1 ชนิด คือ

$$\text{Water Content, } W\% = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (2.59)$$

เมื่อ  $W_w$  = น้ำหนักน้ำในกระดาศ (กรัม)

$W_s$  = น้ำหนักกระดาศแห้ง (กรัม)

โดยกำหนด % ความชื้นของกระดาศที่ต้องการ เพื่อหาน้ำหนักน้ำในกระดาศตาม % ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

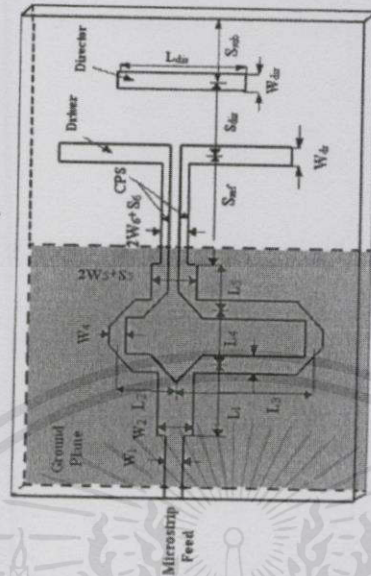
## 2.7 ชนิดของสายอากาศที่ใช้ศึกษา

หน้าที่สำคัญของสายอากาศ คือ การเปลี่ยนรูปพลังงานกลับไปมาระหว่างพลังงานในลักษณะคลื่นบังคับวิถีในสายส่งและพลังงานในช่องว่างอิสระ (free space) สายอากาศจะเปลี่ยนรูปพลังงานจากลักษณะคลื่นบังคับวิถีไปเป็นคลื่นในช่องว่างอิสระที่แพร่กระจายไปในทิศทางที่ต้องการ เมื่อปฏิบัติงานเป็นสายอากาศส่ง และเมื่อปฏิบัติงานเป็นสายอากาศรับ สายอากาศจะเปลี่ยนคลื่นในช่องว่างอิสระที่มาจากทิศทางของสถานีอันพึงประสงค์หรือรวมทั้งคลื่นรบกวนเป็นคลื่นบังคับวิถีในสายส่งและเข้าสู่เครื่องรับในที่สุด [4]

### 2.7.1 สายอากาศควอไซด์ยาก็ (Quasi-Yagi)

สายอากาศควอไซด์ยาก็ เป็นสายอากาศที่ประกอบด้วยคุณลักษณะที่ดีของสายอากาศระนาบซึ่งสายอากาศควอไซด์ยาก็ จะมีโครงสร้างพื้นฐานคล้ายกับสายอากาศยาก็-อูตะ คือการจัดเรียงของสายอากาศไดโพล จะประกอบไปด้วยส่วนของตัวป้อนสัญญาณ (Driver) ตัวกำหนดทิศทาง (Directors) และตัวสะท้อน (Reflector) แต่จะมีข้อแตกต่างกับสายอากาศยาก็-อูตะ ในส่วนของตัวสะท้อนคลื่น ซึ่งตัวสะท้อนคลื่นของสายอากาศควอไซด์ยาก็ นั้นจะเป็นส่วนของแผ่นระนาบกราวด์ที่โตนตัด (ground plane) มีความยาวเพียงแค่จุดเริ่มสายไมโครสตริประนาบร่วมอยู่ในส่วนด้านล่างของฐานรอง (substate) ดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



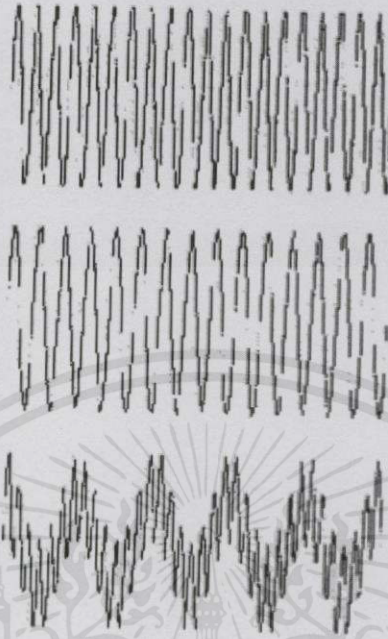
รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของสายอากาศควอดริเพล็กซ์ [4]

สำหรับส่วนประกอบของสายอากาศนั้น จะประกอบด้วยตัวป้อนสัญญาณ ซึ่งความยาวของตัวป้อนสัญญาณจะเป็นส่วนประกอบหลักในการกำหนดค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศและกำหนดความถี่ที่ต้องการ สำหรับส่วนของตัวสะท้อนคลื่นและตัวกำหนดทิศทาง สองส่วนนี้เป็นส่วนที่ทำให้คลื่นแพร่กระจายไปในทิศทางที่เราต้องการ [4]

## 2.8 วงจรผสมสัญญาณ (Mixer)

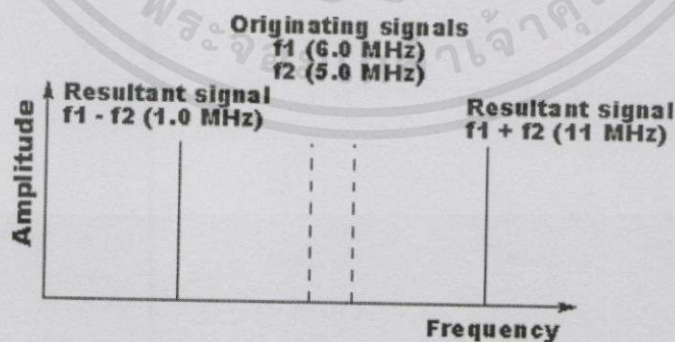
การผสมสัญญาณในย่านความถี่วิทยุเป็นกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดจากการคูณกันของสัญญาณ 2 สัญญาณ ณ ที่เวลาใดๆ และได้ผลลัพธ์หรือเอาต์พุตเป็นรูปคลื่นที่ซับซ้อน โดยเมื่อพิจารณารูป 2.12 สัญญาณบน 2 สัญญาณเป็นอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรผสมสัญญาณ และสัญญาณล่างสุดแสดงสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.12 แสดงสัญญาณที่ถูกผสมแล้วของ 2 สัญญาณ [5]

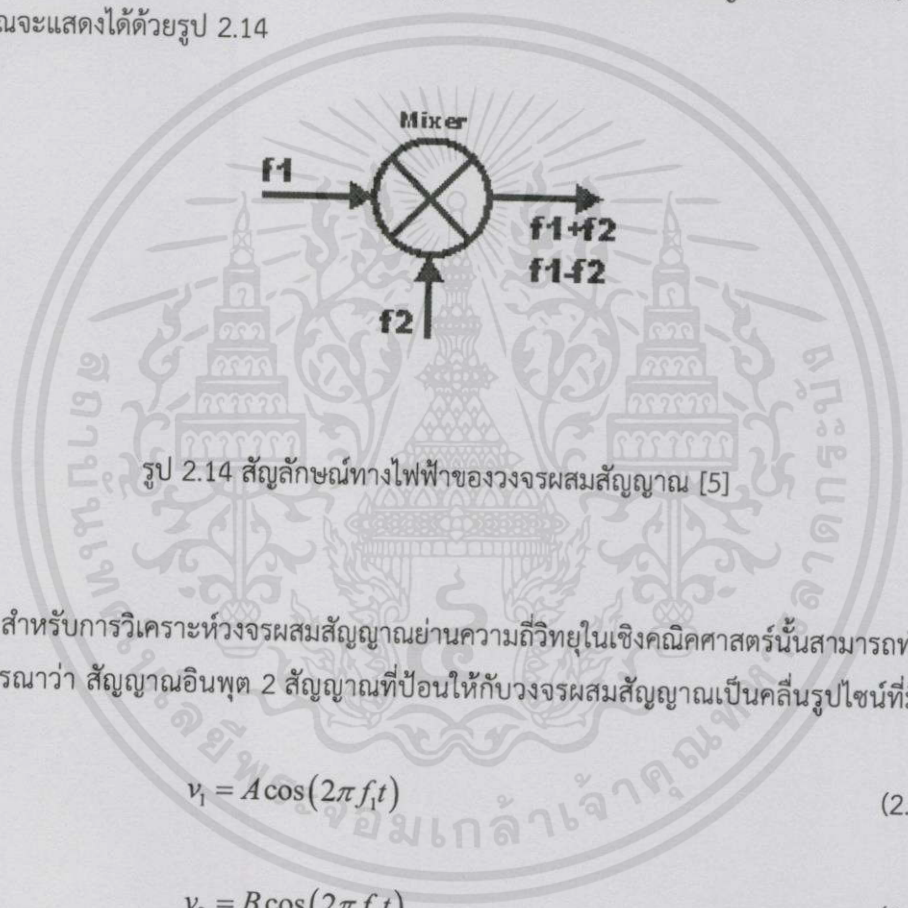
เอาต์พุตของวงจรผสมสัญญาณ จากการพิจารณารูปสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ นั้นพบว่าเป็นสัญญาณที่ซับซ้อนกว่าสัญญาณอินพุต ซึ่งไม่สามารถอธิบายได้โดยง่ายว่าเกิดค่าความถี่ที่แตกต่างกัน นั้นย่อมแสดงว่าการแสดงผลของวงจรผสมสัญญาณในโดเมนทางเวลานั้นไม่สามารถทำได้เลย ดังนั้นจึงแสดงผลในเชิงความถี่ออกมาเป็นดังรูป 2.13 โดยสเปกตรัมที่แสดง



รูป 2.13 องค์ประกอบทางความถี่ของกระบวนการผสมสัญญาณย่านความถี่วิทยุ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปเส้นปะ คือ องค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณ 2 สัญญาณที่ป้อนให้กับวงจรผสมสัญญาณ ส่วนองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณที่ถูกผสมแล้วจะแสดงด้วยค่าเส้นทึบ พบว่าหลังจากผสมกันของสัญญาณ 2 สัญญาณแล้วจะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นความถี่ที่เกิดความถี่ของอินพุตทั้ง 2 ค่าบวกกัน ( $f_1+f_2$ ) และความถี่ผลต่างของความถี่อินพุตทั้ง 2 ค่า ( $f_1-f_2$ ) ยกตัวอย่างเช่น ถ้าให้ความถี่อินพุตของตัวแรกเป็น 5 เมกะเฮิร์ตซ์ และความถี่อินพุตของอีกตัวหนึ่งเป็น 6 เมกะเฮิร์ตซ์แล้ว (รูปเส้นปะ) จะได้องค์ประกอบทางความถี่ของการผสมสัญญาณแล้วเป็น  $6+5=11$  เมกะเฮิร์ตซ์ และความถี่  $6-5=1$  เมกะเฮิร์ตซ์ (รูปเส้นทึบ) ในการเขียนสัญลักษณ์ของวงจรผสมสัญญาณจะแสดงได้ด้วยรูป 2.14



รูป 2.14 สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของวงจรผสมสัญญาณ [5]

สำหรับการวิเคราะห์วงจรผสมสัญญาณย่านความถี่วิทยุในเชิงคณิตศาสตร์นั้นสามารถทำได้โดยพิจารณาว่า สัญญาณอินพุต 2 สัญญาณที่ป้อนให้กับวงจรผสมสัญญาณเป็นคลื่นรูปไซน์ที่มีค่าดังนี้

$$v_1 = A \cos(2\pi f_1 t) \tag{2.60}$$

และ

$$v_2 = B \cos(2\pi f_2 t) \tag{2.61}$$

ตามลำดับ เพราะฉะนั้นจะได้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าเป็น

$$v_o = AB \cos(2\pi f_1 t) \cos(2\pi f_2 t) \tag{2.62}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเอกลักษณ์ทางตรีโกณมิติ

$$\cos(x)\cos(y) = \frac{1}{2}[\cos(x-y) + \cos(x+y)] \quad (2.63)$$

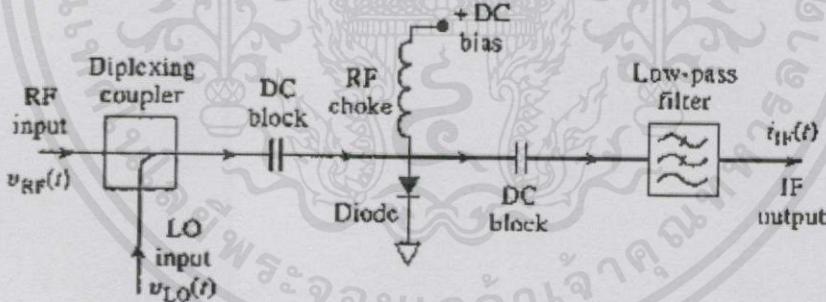
นำไปใช้กับ (2.63) ก็จะได้ค่าเอาต์พุตเป็น

$$v_o = \frac{AB}{2}[\cos\{2\pi(f_1 - f_2)t\} + \cos\{2\pi(f_1 + f_2)t\}] \quad (2.64)$$

ทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นความถี่ผลต่าง  $(f_1 - f_2)$  และความถี่ผลบวก  $(f_1 + f_2)$  ดังแสดงด้วยรูปสเปกตรัมในรูป 2.13 [5]

## 2.9 วงจรผสมสัญญาณแบบใช้ไดโอดเดี่ยว (Single-ended Diode Mixer)

วงจรผสมสัญญาณแบบใช้ไดโอดเดี่ยว เป็นวงจรพื้นฐานของวงจรผสมสัญญาณชนิดอื่นๆ ซึ่งมีองค์ประกอบไม่มาก ต้นทุนต่ำ สร้างง่ายไม่ซับซ้อน ในวงจรจะประกอบด้วยไดโอดเพียง 1 ตัว (ดังรูปที่ 2.15)



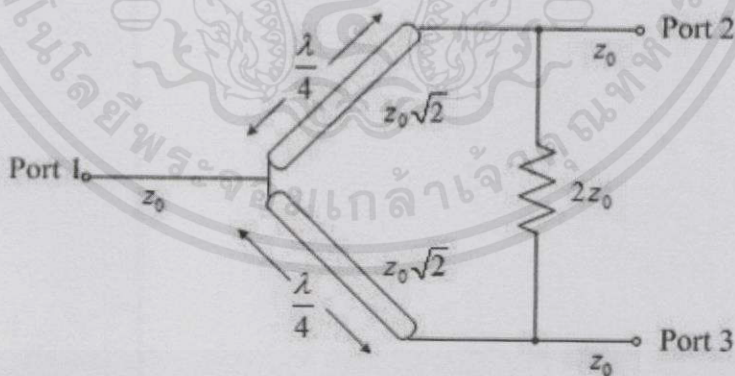
รูปที่ 2.15 วงจรผสมสัญญาณแบบใช้ไดโอดเดี่ยว [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรผสมสัญญาณชนิดนี้ ในส่วนของไดโพลซึ่งจับคู่เปอร์  $i_{IF}(t)$  จะใช้เป็นวงจรไฮบริดจับคู่เปอร์เป็นตัวแยกสัญญาณระหว่างอินพุตทั้งสองอินพุต หรือจะใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อเพื่อรับสัญญาณอินพุตทั้งสองแบบตรงๆเลยก็ได้ ซึ่งจะทำให้การรับสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ (RF) และสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง (LO) เข้าสู่วงจร ซึ่งจะผ่านส่วนที่เป็นวงจรแมทซ์ซึ่งเป็นอันดับแรก สำหรับส่วนของไดโอดต้องมีการป้อนกระแสไฟตรงเพื่อไบอัสให้ไดโอดทำงาน ซึ่งในส่วนนี้จะต้องมีตัวต้านทานควบคุมกระแสไม่ให้เกิน อีกทั้งยังต้องมี RF Choke เพื่อทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณไฟกระแสสลับไม่ให้เข้าไปกับไฟกระแสตรงจากแหล่งจ่ายที่ใช้ในการไบอัสไดโอดและต้องมีตัวเก็บประจุทำหน้าที่บล็อกไฟดีซีจากแหล่งจ่ายไม่ให้ย้อนเข้ามาในวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน และองค์ประกอบสุดท้ายคือส่วนที่เป็นวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน ทำหน้าที่กรองความถี่สูงหรือสัญญาณรบกวนออกไปและยอมให้ความถี่ต่ำ (ความถี่ที่เราต้องการคือความถี่ IF) ผ่านไปได้ ซึ่งทำงานเป็นวงจรผสมสัญญาณแบบใช้ไดโอดเดียวสำหรับลดความถี่

## 2.10 วงจรแบ่งหรือรวมกำลังสัญญาณวิลคินสัน

สำหรับวงจรแบ่งหรือรวมกำลังสัญญาณวิลคินสันมีรูปแบบพื้นฐานประกอบด้วยสายส่งแบบความยาวคลื่นส่วนสี่ 2 เส้น สำหรับความถี่กลาง ( $f_0$ ) มีค่าอิมพีแดนซ์ที่แต่ละพอร์ตเท่ากับ  $z_0$  ที่สายส่งมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $z_0\sqrt{2}$  และมีตัวต้านทานค่าเท่ากับ  $2z_0$  ที่ระหว่างพอร์ตเอาต์พุต ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วงจรแบ่งหรือรวมกำลังสัญญาณวิลคินสันแบบพื้นฐาน (แบบ 2 ทาง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในวงจรนี้จะเกิดค่าการสูญเสียน้อยซึ่งมีประสิทธิภาพ และหากมองวงจรนี้เป็นวงจรแยกสัญญาณ (Power Divider) สัญญาณที่พอร์ตเอาต์พุตทั้ง 2 จะมีค่าที่เท่ากัน โดยกำลังสัญญาณสามารถหาได้จากสมการ

$$P(dB) = 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.65)$$

โดยที่

$P_{in}$  คือ กำลังงานขาเข้า (ใช้ค่าอ้างอิงคือ 1 watt)

$P_{out}$  คือ กำลังงานที่ขาออก

เมื่อกำหนดให้กำลังงานที่ขาเข้าเท่ากับ 1 watt จากวงจรแยกสัญญาณกำลังงานที่ขาออกจะต้องเท่ากับ 0.5 watt ทำการหาค่ากำลังสัญญาณจากสมการ (2.3) จะได้

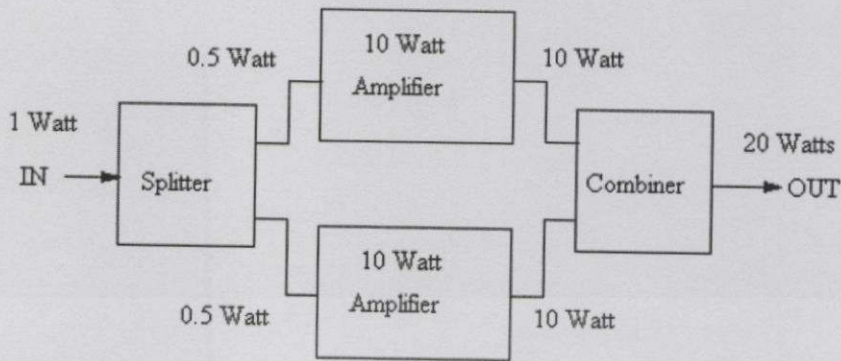
$$\begin{aligned} P(dB) &= 10 \log \left( \frac{0.5}{1} \right) \\ &= -3dB \end{aligned}$$

ซึ่ง  $P_{out}$  ที่ได้จากวงจรแบ่งสัญญาณจะมีค่าเท่ากับ -3 dB (ในอุดมคติ) ซึ่งพอร์ตทุกพอร์ต Matching กัน

## 2.11 วงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณ (Power Combiner)

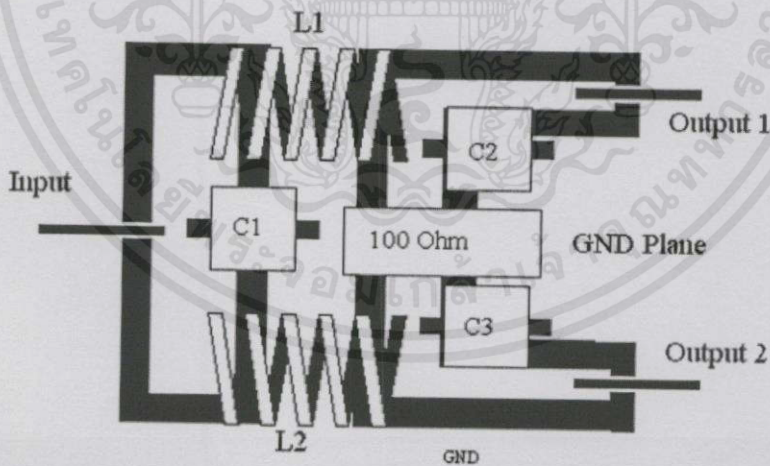
เป็นวงจรที่แบ่งหรือรวมสัญญาณ โดยสามารถรวมสัญญาณจากหลายอินพุตออกมาเป็นเอาต์พุตเดียว และแบ่งสัญญาณจากอินพุตเดียวออกมาเป็นหลายเอาต์พุต สัญญาณขาเข้าจะเท่ากับสัญญาณขาออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 การทำงานของวงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ

จากรูปที่ 2.17 เป็นการดำเนินงานของวงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณแบบ เข้า 1 อินพุต ออก 2 เอาต์พุต หรือ เข้า 2 อินพุต ออก 1 เอาต์พุต เนื่องจากสายอากาศเพื่อวัดความชันกระดาศมี 2 ตัว จึงเลือกใช้



รูปที่ 2.18 เค้าโครง PCB ของวงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

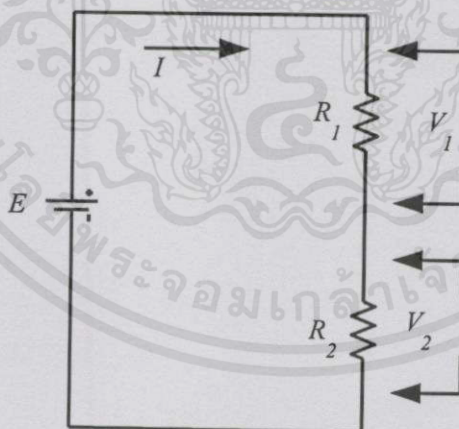
วงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณ (Power Combiner) ในปริยญาณินพจน์นี้ใช้เพื่อรับอินพุตจากเสาอากาศผสมสัญญาณ 2 ตัว เพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตออกมาเพียงเอาต์พุตเดียว และนำเอาเอาต์พุตที่ได้ไปขยายต่อที่ Amplifier

## 2.12 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider)

วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าเป็นวงจรที่ทำหน้าที่แบ่งแรงดันไฟฟ้าออกเป็นระดับต่าง ๆ ตามความต้องการ วงจรมีลักษณะเป็นวงจรแบบอนุกรมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบไม่มีภาระไฟฟ้า (Unloaded Voltage Divider) และวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบมีภาระไฟฟ้า (Loaded Voltage Divider)

### 2.12.1 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบไม่มีภาระไฟฟ้า (Unloaded Voltage Divider)

วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบไม่มีภาระไฟฟ้าเป็นวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ยังไม่ได้ต่อภาระไฟฟ้าเราสามารถที่จะออกแบบการแบ่งแรงดันไฟฟ้าได้ตามความต้องการใช้งานในการคำนวณจึงไม่ต้องนำค่าภาระไฟฟ้ามารคำนวณด้วย



รูปที่ 2.19 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบไม่มีภาระไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป  $R_1$  และ  $R_2$  ทำหน้าที่แบ่งแรงดันไฟฟ้าออกเป็น 2 ช่วงคือ  $V_1$  และ  $V_2$  การคำนวณหาค่า  $V_1$  และ  $V_2$  ถ้าใช้สูตรการคำนวณแบบวงจรถอนุกรมจำเป็นต้องคำนวณหาค่าความต้านทานรวม ( $R_T$ ) และกระแสไฟฟ้า ( $I_T$ ) ของวงจรเสียก่อน ซึ่งทำให้เสียเวลา เราสามารถประยุกต์สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ตัวต้านทานมาใช้ในการคำนวณหาค่า  $V_1$  และ  $V_2$  ได้โดยไม่ต้องใช้ค่าของกระแสไฟฟ้าของวงจรถัดดังนี้

$$V_1 = IR_1 \quad , \quad I = \frac{E}{R_T} \quad (2.66)$$

แทนค่า  $I = \frac{E}{R_T}$  ในสมการจะได้ ,  $V_1 = \frac{E}{R_T} R_1$  แต่  $R_T = R_1 + R_2$

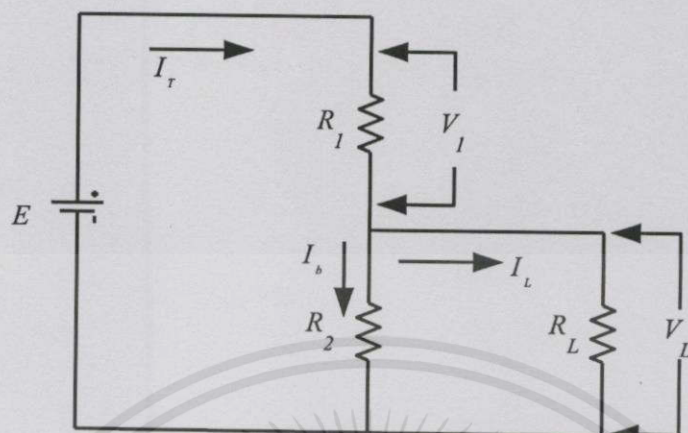
แทนค่า  $R_T = R_1 + R_2$  ในสมการจะได้  $V_1 = E \frac{R_1}{R_1 + R_2}$  (2.67)

ทำนองเดียวกัน  $V_2 = E \frac{R_2}{R_1 + R_2}$  (2.68)

### 2.12.2 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบมีภาระไฟฟ้า (Loaded Voltage Divider)

วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบมีภาระไฟฟ้าจะคล้ายกับวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบไม่มีภาระไฟฟ้าเพียงแต่มีการต่อภาระไฟฟ้าเข้าไปในส่วนที่แบ่งแรงดันไฟฟ้าไว้ ดังนั้นการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าในวงจรจึงต้องคำนึงถึงค่าความต้านทานของภาระไฟฟ้าที่นำไปต่อด้วย โดยการให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทานที่ต่อขนานกับภาระไฟฟ้านั้นมีค่าประมาณ 10% - 20% ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านภาระไฟฟ้าทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแบบมีภาระไฟฟ้า

จากวงจรยวบรวม  $R_1$  และ  $R_L$  ได้ดังสูตร

$$R_T = \frac{R_1 \times R_L}{R_1 + R_L} \quad (2.69)$$

คำนวณหาค่า  $R_T$  ได้จากสูตร

$$R_T = R_1 + R_T \quad (2.70)$$

จากสูตรการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าในวงจร

$$I_T = \frac{E}{R_T} = \frac{E}{R_1 + R_T} \quad \text{และ} \quad V_L = I_T R_T \quad (2.71)$$

แทนค่า  $I_T$  ในสูตร  $V_L = I_T R_T$  จะได้

$$V_L = \frac{E}{R_1 + R_T} \times R_T \quad \text{หรือ}$$

$$V_L = E \times \frac{R_T}{R_T} \quad \text{เมื่อ } R_T = R_1 + R_T \quad (2.71)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

ดังนั้นจึงสามารถใช้สูตร  $V_L = E \times \frac{R_T}{R_T}$  คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าของภาระไฟฟ้าได้

จากการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่มีมาก่อนทำให้นำมาประยุกต์ในการสร้างสายอากาศเพื่อวัดความชื้นกระดาษ โดยสร้างระบบต่างๆ เพื่อส่งคลื่นไปในกระดาษที่ความชื้นต่างๆ ที่ต้องการ เพื่อดูค่าโวลต์เตจ และหาสัมประสิทธิ์การสะท้อน พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ น้ำหนักกระดาษ ความชื้นของกระดาษ และสัมประสิทธิ์การสะท้อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์

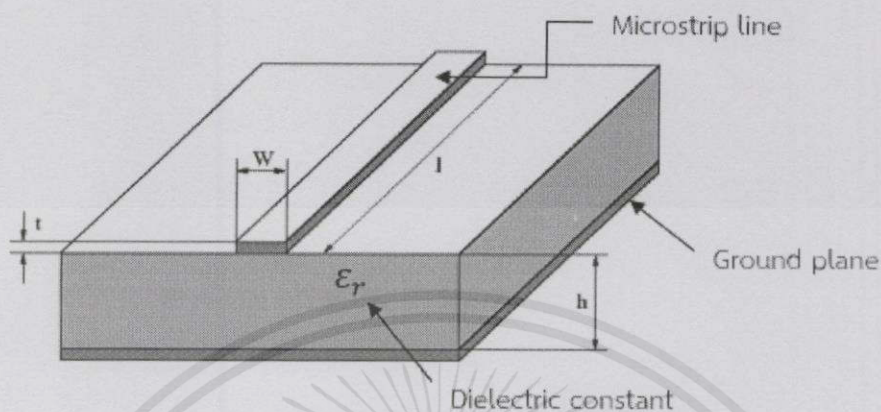
### 3.1 การออกแบบ

โครงการนี้เป็น การสร้างสายอากาศเพื่อวัดความชื้นกระดาษ ส่งคลื่นไปในกระดาษ หาค่ากำลังที่คลื่นส่งผ่าน โดยสายอากาศที่เลือกใช้คือสายอากาศควอไซต์ยาภิแบบไมโครสตริป (Microstrip Quasi-Yagi antenna) โดยที่สายอากาศอยู่บนระนาบด้านบนของแผ่นพิมพ์ ส่วนด้านล่างของแผ่นพิมพ์เป็นระนาบการที่โดนตัด มีความยาวเพียงแค่จุดเริ่มสายไมโครสตริประนาบร่วม (Coplanar stripline) ที่อยู่ด้านบนของแผ่นพิมพ์ โครงสร้างสายอากาศประกอบด้วยสายป้อนไมโครสตริป (Microstrip feed) ตัวแปลงหนึ่งส่วนสี่คลื่น (Quarter-wave transformer) บาลันสายไมโครสตริประนาบร่วม สายอากาศไดรเวนไดโพล (Driven Dipole) และไดเรกเตอร์ไดโพล (Director Dipole) โดยมีไดเรกเตอร์ไดโพลจำนวน 4 อีลีเมนต์ โดยมีสายอากาศตัวที่หนึ่งส่งและสายอากาศอีกตัวหนึ่งรับคลื่น

#### 3.1.1 การหาค่า relative dielectric constant และ relative dielectric loss ของกระดาษที่ความชื้นต่างๆ

สำหรับวงจรไฟฟ้าที่ทำงานในย่านความถี่สูงนิยมใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เพราะสะดวกต่อการนำไปใช้งานในเครื่องมือแบบแอคทีฟและพาสซีฟ สายส่งไมโครสตริป มีโครงสร้างประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ Microstrip Line, Dielectric Substrate และ Ground Plane ดังรูปที่ 3.1 โดยที่แผ่นวงจรที่มีความหนาของชั้นสเตรตเท่ากับ  $h$  มีค่าคงที่ได้อิเล็กทริกเท่ากับ  $\epsilon$ , บริเวณด้านบนมีสายส่งที่ทำจากตัวนำไฟฟ้ามีความหนา  $t$  ความกว้าง  $W$  และบริเวณด้านล่างมีตัวนำทำหน้าที่เป็นกราวด์ เมื่อมีการเดินทางของคลื่นความถี่บนสายส่ง ทำให้เกิดเส้นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่งไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า" ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายส่งไมโครสตริป

การออกแบบแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 คือการสร้างไมโครสตริปไลน์ โดยสร้างให้มีขนาดดังนี้

- $W = 2 \text{ cm}$
- $t = 0.1 \text{ cm}$
- $l = 15 \text{ cm}$

ขั้นตอนที่ 2 คือการสร้างไดอิเล็กทริกซัพสเตรทไดอิเล็กทริกซัพสเตรทคือ กระจกที่นำมาทดลองหาค่าสภาพยอมไฟฟ้า โดยทดลองกับกระจกที่มีความชื้น 10%, 12%, 14%, 16%, และ 18% โดยสร้างให้มีขนาดดังนี้

- $l = 15 \text{ cm}$
- กว้าง = 10.5 cm
- $h = 0.432 \text{ cm}$  (กระจกแห้ง), 0.481 cm (กระจกที่มีความชื้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

หาความชื้นของกระดาชได้จาก

$$\text{Water Content, } W\% = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ  $W_w$  = น้ำหนักน้ำในกระดาช (กรัม)

$W_s$  = น้ำหนักกระดาชแห้ง (กรัม)

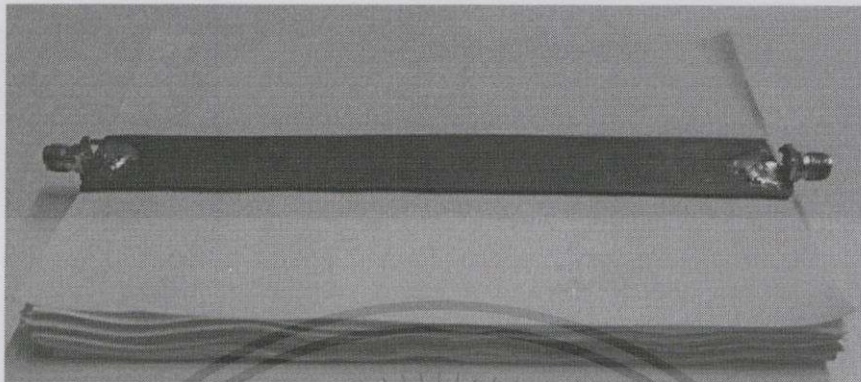
ขั้นตอนที่ 3 คือการสร้างกรวดเพลอน โดยสร้างให้มีขนาดดังนี้

- $l = 15 \text{ cm}$
- กว้าง = 10.5 cm



รูปที่ 3.2 สายส่งไมโครสตริประนาบด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 สายส่งไมโครสตริประนาบด้านข้าง

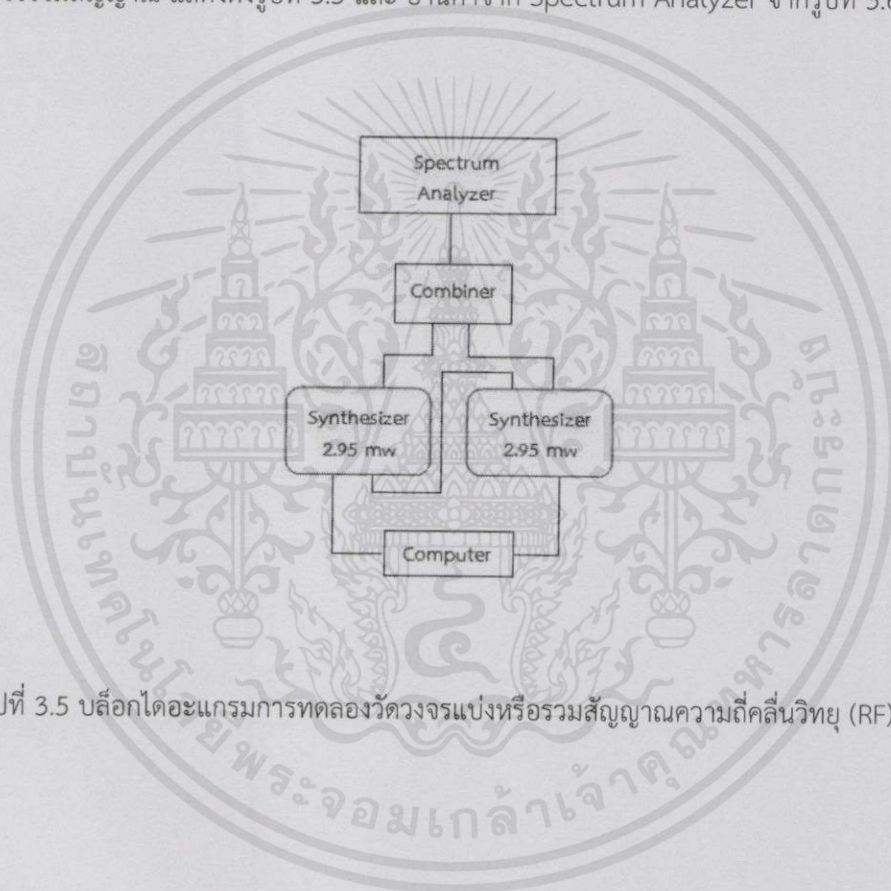


รูปที่ 3.4 การกำหนดพอร์ตของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

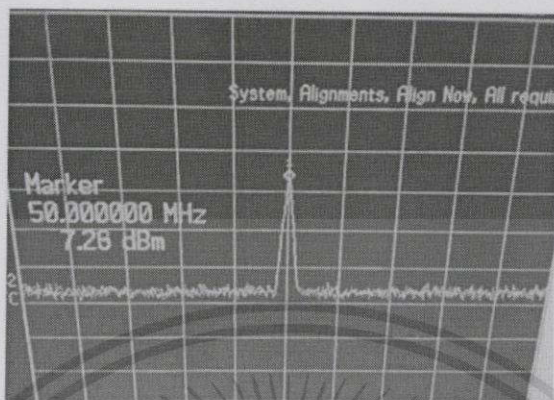
### 3.1.2 ผลการออกแบบวงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณที่ความถี่ 50 เมกกะเฮิร์ต

วงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณที่ความถี่ 50 MHz เป็นอุปกรณ์รวมสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ (RF) จากหลายพอร์ต ให้ออกมารวมกันอยู่สายเส้นเดียว เพื่อต่อกับ Amplifier ของระบบ โดยชนิดวงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณที่เลือกใช้เป็นชนิด passive ไม่ต้องใช้ไฟเลี้ยง จากการออกแบบทำเฉพาะในส่วนวงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณ (RF) โดยปล่อยกำลังงานจาก Synthesizer 2.95 mW 2 พอร์ต ให้กับวงจรรวมสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 3.5 และ อ่านค่าจาก Spectrum Analyzer จากรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมการทดลองวัดวงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ (RF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ผลการทดลองวัดวงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณที่ความถี่ 50 เมกกะเฮิร์ต

วงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณที่ความถี่ 50 เมกกะเฮิร์ต เป็นอุปกรณ์รวมสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ (RF) จากหลายพอร์ต ให้ออกมารวมกันอยู่สายเส้นเดียว เพื่อต่อกับ Amplifier ของระบบ โดยชนิดวงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณที่เลือกใช้เป็นชนิด passive ไม่ต้องใช้ไฟเลี้ยง จากการออกแบบทำเฉพาะในส่วนวงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณ โดยปล่อยกำลังงานจาก Synthesizer 2.95 mW 2 พอร์ต ให้กับวงจรรวมสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ (RF) แสดงดังรูปที่ 3.5 ผลจาก Spectrum Analyzer อ่านค่าได้ 7.26 mW (5.25 dBm) เป็นการรวมสัญญาณจาก 2 พอร์ต ให้ออกมา 1 พอร์ต ทำให้สัญญาณแรงขึ้น ดังรูปที่ 3.6

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Network Analyzersแบบพกพา Agilent Technologies รุ่น Field fox N9916A
2. DSO-X2004A Digital Storage Oscilloscope
3. สายส่งไมโครสตริป
4. กระดาษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. DEO-Nano Development and Education Board

6. Switching Power Supply 5V

7. แผ่นอลูมิเนียม

### 3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง

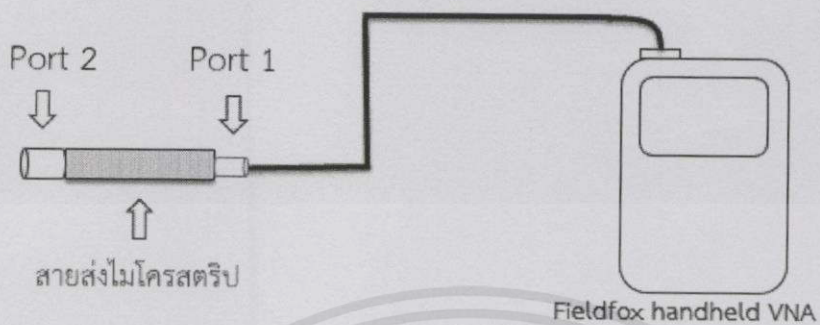
#### 3.3.1 การทดลองเพื่อหาความถี่ที่นำไปสร้างสายอากาศเพื่อวัดความชื้นกระดาษ

ในการออกแบบสายส่งไมโครสตริปได้ออกแบบให้สายส่งไมโครสตริปมีขนาดตามหัวข้อที่ 3.1 โดยที่ต่อ พอร์ต 1 กับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย และ พอร์ต 2 กำหนดให้เป็นสายส่งลัดวงจรที่ปลาย , สายส่งที่เปิดปลาย, และสายส่งที่ปลายสายต่อกับโหลด 50 โอห์ม ตามลำดับ เพื่อวัดค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า ( $Z_{in}$ ) ณ ความชื้น 10%, 12%, 14%, 16%, และ 18% โดยที่แต่ละความชื้นวัดที่ความถี่ 250 MHz, 450 MHz, 650 MHz, 850 MHz, 1050 MHz, 1250 MHz, 1450 MHz, 1650 MHz, 1850 MHz, 2050 MHz, 2150 MHz, 2250 MHz, 2350 MHz, 2450 MHz, และ 2550 MHz และน้ำหนักกระดาษที่ความชื้น 12%, 14%, 16%, 20% และ 25% มีค่าดังตารางที่ 3.1

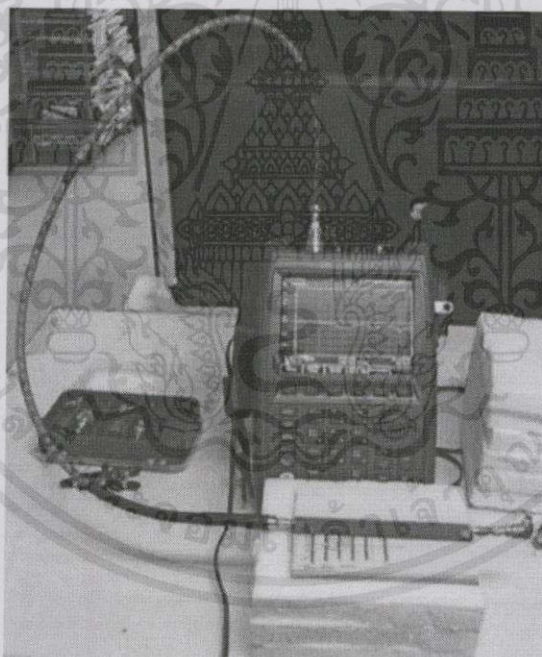
ตารางที่ 3.1 น้ำหนักกระดาษที่ความชื้น 12%, 14%, 16%, 20% และ 25%

ความชื้น(%)	น้ำหนัก(g)
กระดาษแห้ง	36.9
12%	41.328
14%	42.066
16%	42.804
20%	44.28
25%	46.125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ภาพจำลองการต่ออุปกรณ์ในการทดลอง



รูปที่ 3.8 ภาพการต่ออุปกรณ์ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

VSWR คือ อัตราส่วนของโวลต์เตจสูงสุดและโวลต์เตจต่ำสุดของรูปคลื่นนิ่งบนสายนำสัญญาณ VSWR (Voltage Standing wave Ratio) อัตราส่วนนี้เป็นค่าวัดปริมาณที่โหลดผิดไปจากสถานะที่โหลดแมทช์มากน้อยเท่าไร ออกแบบโดยการนำแผ่นอลูมิเนียมสะท้อนกับคลื่นที่ปล่อยมาจากสายอากาศผสมสัญญาณ เลือกระยะคลื่นสะท้อนกลับมากที่สุด เป็นระยะกำหนดความห่างของสายอากาศผสมสัญญาณกับกระดาษ



รูปที่ 3.9 การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

### 3.3.3 การออกแบบการทดลองเพื่อหาความแตกต่างโวลต์เตจของกระดาษที่ความถี่ต่างๆ

เมื่อได้ความถี่ที่ต้องการจากการทดลองข้างต้น ได้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาความแตกต่างกำลังงานของกระดาษที่ความถี่ต่างๆ โดยป้อนสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง (LO) ที่มีความถี่ 2.45 GHz เข้าที่สายอากาศตัวที่ 1 ป้อนสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ (RF) ความถี่ 2.4 GHz เข้าที่สายอากาศตัวที่ 2 ป้อนไฟฟ้ากระแสตรง 0.5 โวลต์ให้กับซีดทึ่ไดโอด ต่อวงจรรวมสัญญาณรวมสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ (RF) จากสองพอร์ต ให้ออกมารวมกันอยู่สายเส้นเดียว เอาต์พุต

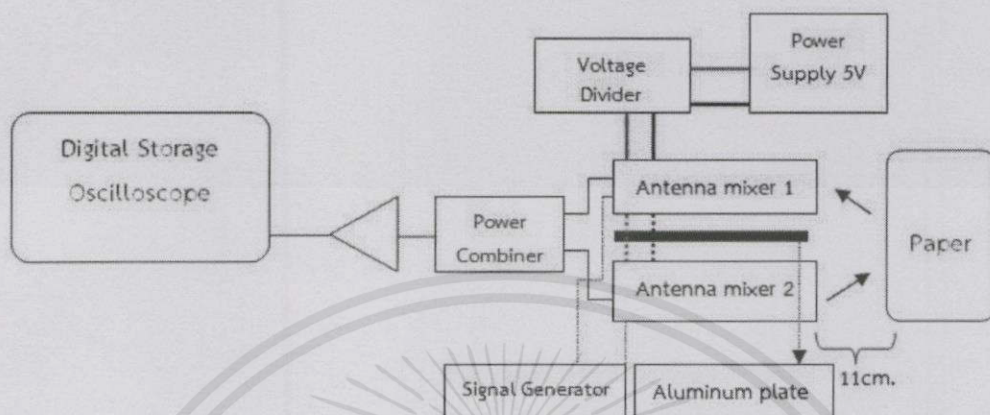
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรรวมสัญญาณต่อกับ Amplifier เพื่อขยายสัญญาณ วัดเอาต์พุตจาก amplifier โดยใช้ DSO-X2004A Digital Storage Oscilloscope อ่านค่าโวลเตจของกระดาศที่ความขึ้น 12%, 13%, 14%, 15%, 16%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100% และน้ำหนักกระดาศที่ความขึ้น 12%, 13%, 14%, 15%, 16%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100% แสดงดังรูปที่ 3.10 และตารางที่ 3.2

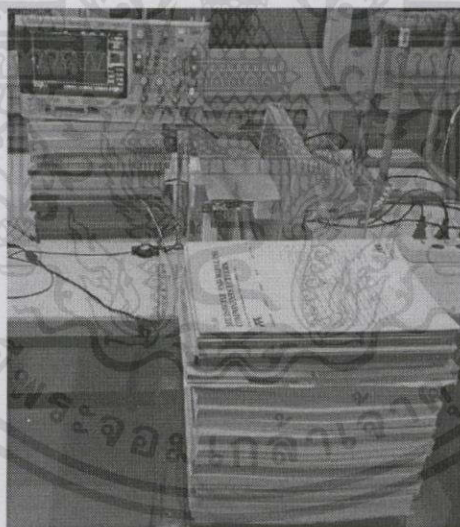
ตารางที่ 3.2 น้ำหนักกระดาศที่ความขึ้น 12%, 13%, 14%, 15%, 16%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%

ความขึ้น (%)	น้ำ (g)
12%	420
13%	455
14%	490
15%	525
16%	560
20%	700
30%	1,050
40%	1,400
50%	1,750
60%	2,100
70%	2,450
80%	2,800
90%	3,150
100%	3,500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า" ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



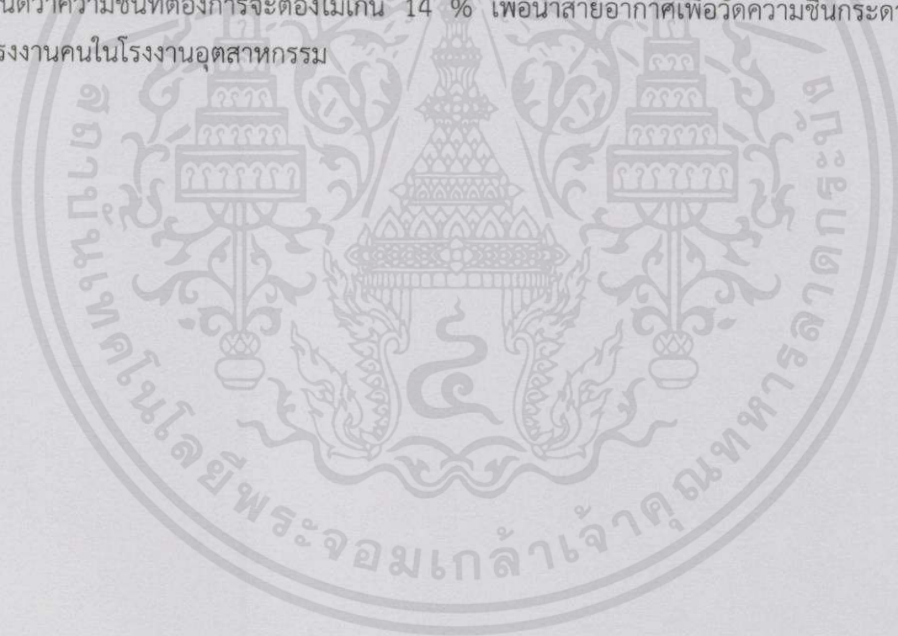
รูปที่ 3.10 บล็อกไดอะแกรมของการทดลองหาความแตกต่างโวลต์เตจของกระดาศที่ความถี่ขึ้นต่างๆ



รูปที่ 3.11 การต่ออุปกรณ์เพื่อการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภาคเรียนที่ 1 ทำการทดลองวัดค่า relative dielectric constant และ relative dielectric loss ของกระดาษที่ความชื้นต่างๆ เพื่อเลือกความถี่ที่จะใช้สร้างสายอากาศ ในภาคเรียนที่ 2 สร้างสายอากาศผสมสัญญาณ โดยขั้นตอนแรกสร้างวงจรรวมและแบ่งสัญญาณที่ความถี่ 50MHz เป็นอุปกรณ์รวมสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ (RF) จากหลายพอร์ต ให้ออกมารวมกันอยู่สายเส้นเดียว เพื่อต่อกับ Amplifier ของระบบ โดยชนิดวงจรรวมและแบ่งสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ (RF) ที่เลือกใช้เป็นชนิด passive ไม่ต้องใช้ไฟเลี้ยง ขั้นตอนต่อไปคือการหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ออกแบบโดยการนำแผ่นอลูมิเนียมสะท้อนกับคลื่นที่ปล่อยมาจากสายอากาศผสมสัญญาณ เลือกระยะ 11 เซนติเมตร ในการวางวัตถุห่างจากสายอากาศผสมสัญญาณ เป็นระยะที่คลื่นสะท้อนกลับมากที่สุดและขั้นตอนสุดท้ายหาความแตกต่างโวลต์เตจของกระดาษที่ความชื้นต่างๆ โดยหลักการคือ สายอากาศผสมสัญญาณตัวที่ 1 ปล่อยคลื่นไปสะท้อนกับกระดาษที่ความชื้นต่างๆ รับสัญญาณที่สะท้อนด้วยสายอากาศผสมสัญญาณตัวที่ 2 อ่านค่าโวลต์เตจแล้วบันทึกผลจาก DSO-X2004A Digital Storage Oscilloscope โดยกำหนดว่าความชื้นที่ต้องการจะต้องไม่เกิน 14 % เพื่อนำสายอากาศเพื่อวัดความชื้นกระดาษแทนการใช้แรงงานคนในโรงงานอุตสาหกรรม

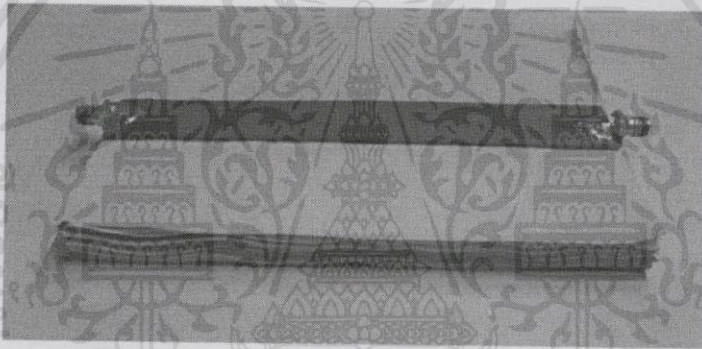


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4 ผลการทดลอง

### 4.1 ผลการทดสอบวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียของกระดาษที่ความชื้นต่างๆ

จากการวิเคราะห์และสร้างสายส่งสัญญาณไมโครสตริป เมื่อทำการสร้างสายส่งสัญญาณไมโครสตริป ได้ดังรูป 4.1 โดยโครงสร้างระบบการทำงานคือโดยที่ต่อพอร์ต 1 กับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย และ พอร์ต 2 กำหนดให้เป็นสายส่งลัดวงจรที่ปลาย, สายส่งที่เปิดปลาย, และสายส่งที่ปลายสายต่อกับโหลด 50 โอห์ม ตามลำดับ เพื่อวัดค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า ( $Z_{in}$ )



รูปที่ 4.1 สายส่งสัญญาณไมโครสตริป

เมื่อทำการทดสอบโดยวัดค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า ( $Z_{in}$ ) ณ ความชื้น 12%, 14%, 16%, 20% และ 25% โดยที่แต่ละความชื้นวัดที่ความถี่ 250 MHz, 450 MHz, 850 MHz, 1050 MHz, 1250 MHz, 2050 MHz, 2150 MHz, 2250 MHz, 2350 MHz และ 2450 MHz แล้วนำมาคำนวณหาค่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและ ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียของกระดาษ โดยความถี่ที่เลือกใช้ในการสร้างสายอากาศคือ 2450 MHz เพราะเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียก็จะเพิ่มมากขึ้นและเมื่ออ้างอิงจากคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำคือ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะลดลงและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียจะเพิ่มขึ้น

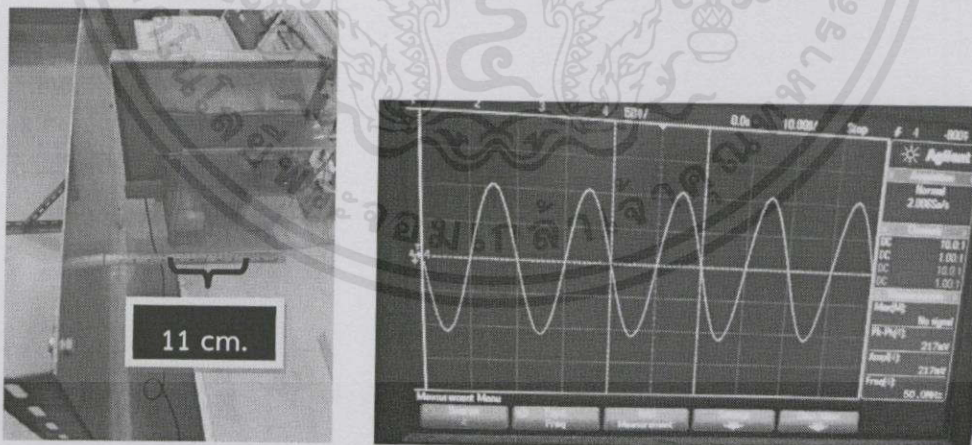
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์และค่าแพคเตอร์การสูญเสียของกระดาษที่ความชื้น 12%, 14%, 16%, 20% และ 25%

ความชื้น	12%	14%	16%	20%	25%
$\epsilon_r'$	1.742	2.266	2.778	3.314	4.395
$\epsilon_r''$	0.12	0.03	0.02	0.018	0.009

#### 4.2 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง (LO) ที่มีความถี่ 2.45 GHz เข้าที่สายอากาศผสมสัญญาณตัวที่ 1 ป้อนสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ (RF) ความถี่ 2.4 GHz เข้าที่สายอากาศผสมสัญญาณตัวที่ 2 ป้อนไฟฟ้ากระแสตรง 0.5 โวลต์ให้กับซีดตีไดโอด เพื่อส่งคลื่นไปสะท้อนกับแผ่นอลูมิเนียมต่อวงจรรวมสัญญาณจากพอร์ตเอาต์พุตจากสายอากาศทั้งสองตัว เอาต์พุตจากวงจรรวมสัญญาณต่อกับ Amplifier เพื่อขยายสัญญาณ วัดเอาต์พุตจาก amplifier โดยใช้ DSO-X2004A Digital Storage Oscilloscope อ่านค่าโวลต์ตรงโดยระยะ 11 เซนติเมตร เป็นระยะที่อ่านค่าโวลต์ตรงได้สูงสุด คือ 217 mV จึงเลือกเป็นระยะที่สายอากาศผสมสัญญาณห่างจากกระดาษที่ใช้ทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.2 และผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนตามสมการที่ 2.23 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและหาระยะในการวางกระดาษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3 ผลการทดสอบเพื่อหาความแตกต่างโวลต์เตจของกระดาศที่ความชื้นต่างๆ

การทดลองเพื่อหาความแตกต่างโวลต์เตจของกระดาศที่ความชื้นต่างๆ โดยป้อนสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง (LO) ที่มีความถี่ 2.45 GHz เข้าที่สายอากาศผสมสัญญาณตัวที่ 1 ป้อนสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ (RF) ความถี่ 2.4 GHz เข้าที่สายอากาศผสมสัญญาณตัวที่ 2 ป้อนไฟฟ้ากระแสตรง 0.5 โวลต์ให้กับซ็อกเก็ตไดโอดต่อวงจรรวมสัญญาณจากพอร์ตเอาต์พุตจากสายอากาศทั้งสองตัว เอาต์พุตจากวงจรรวมสัญญาณต่อกับ Amplifier เพื่อขยายสัญญาณ วัดเอาต์พุตจาก amplifier โดยใช้ DSO-X2004A Digital Storage Oscilloscope อ่านค่าโวลต์เตจของกระดาศที่ความชื้น 12%, 13%, 14%, 15%, 16%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100% แสดงดังรูปที่ 4.2 ได้ผลดังตารางที่ 4.2



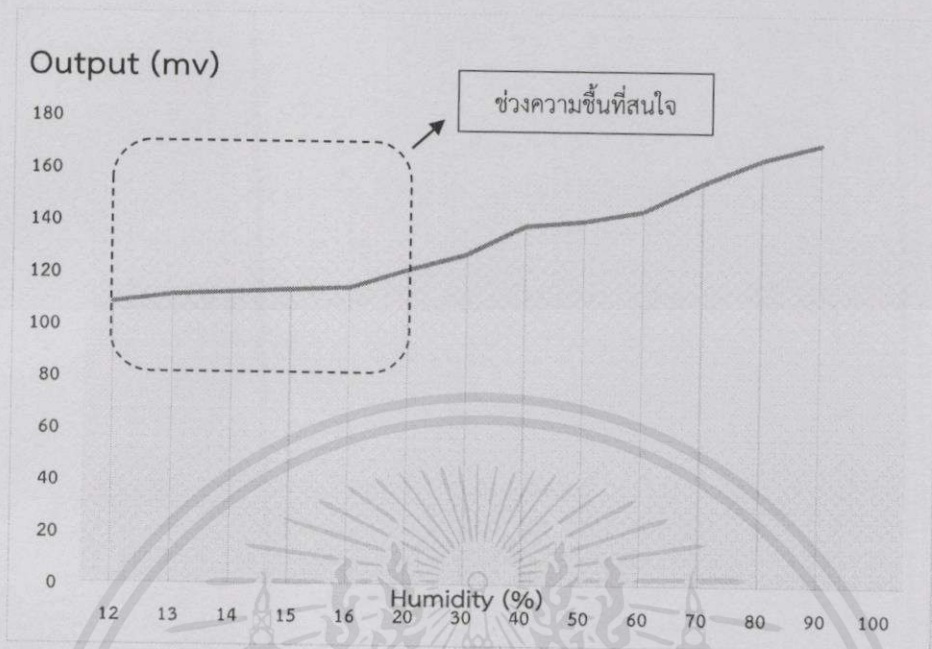
รูปที่ 4.3 การทดสอบเพื่อหาความแตกต่างโวลต์เตจของกระดาศที่ความชื้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

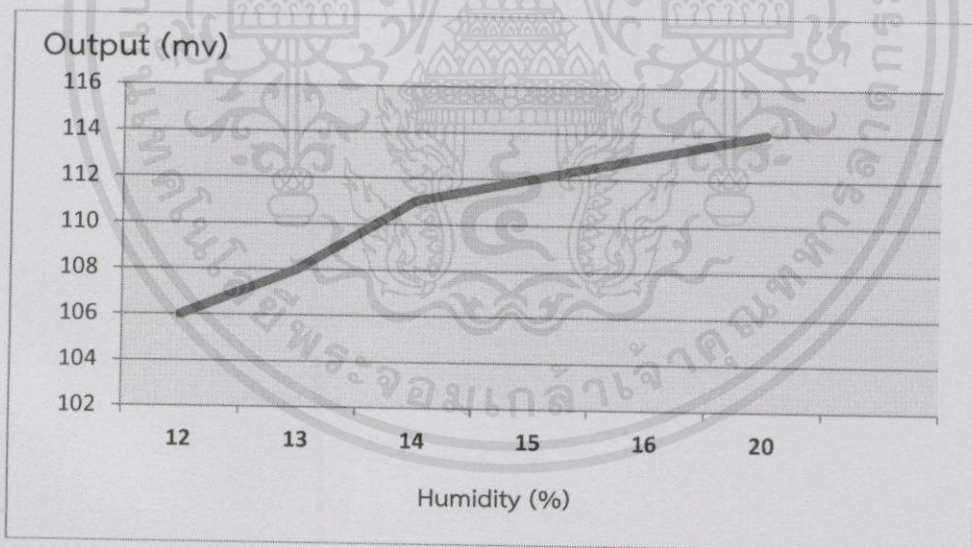
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบเพื่อหาความแตกต่างโวลต์เตจของกระดาษที่ความชื้นต่างๆและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

ความชื้น (%)	Output (mV)	สัมประสิทธิ์การสะท้อน
12	106	0.489
13	108	0.498
14	111	0.512
15	112	0.516
16	113	0.521
20	114	0.525
30	121	0.558
40	127	0.585
50	138	0.636
60	140	0.645
70	144	0.664
80	155	0.714
90	164	0.758
100	170	0.783

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า" ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าโวลต์เตจที่ความชื้นต่างๆ



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าโวลต์เตจช่วงความชื้นที่สนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทดสอบพบว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าโวลต์เตจที่วัดได้จะเพิ่มขึ้นด้วย แสดงให้ทราบว่า ค่าโวลต์เตจที่เพิ่มขึ้นเป็นตัวบ่งบอกปริมาณน้ำในกระดาศ ในปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดการทำงานของสายอากาศเพื่อวัดความชื้นกระดาศที่ความชื้นไม่เกิน 14%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

ในโครงการนี้เป็นการสร้างอุปกรณ์เพื่อวัดความชื้นกระดาษโดยการประยุกต์ใช้งานสายอากาศผสมสัญญาณที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยในส่วนของภาคเรียนที่ 1 นักศึกษาได้ออกแบบสายส่งสัญญาณไมโครสตริปเพื่อทดลองวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแพกเตอร์การสูญเสียของกระดาษที่ความชื้น 10%, 12%, 14%, 16% และ 18% เลือกความถี่ในการสร้างสายอากาศที่ความถี่ 2450 MHz เพราะเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแพกเตอร์การสูญเสียจะเพิ่มมากขึ้นและเมื่ออ้างอิงจากคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำคือ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะลดลงและค่าแพกเตอร์การสูญเสียจะเพิ่มขึ้น จากทั้งสองกรณี ที่ความถี่ 2450 MHz เป็นไปตามของทั้งสองกรณี ในการเลือกความถี่มาใช้ในการสร้างสายอากาศเพื่อวัดความชื้นกระดาษ ในภาคเรียนที่ 2 นักศึกษาได้ออกแบบระบบการทำงานโดยใช้สายอากาศผสมสัญญาณโดยขั้นตอนแรกสร้างวงจรวงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณที่ความถี่ 50 MHz เป็นอุปกรณ์รวมสัญญาณ ความถี่คลื่นวิทยุ (RF) จากสองพอร์ต ให้ออกมารวมกันอยู่สายเส้นเดียว เพื่อต่อกับ Amplifier ของระบบ โดยชนิดวงจรแบ่งหรือรวมสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ (RF) ที่เลือกใช้เป็นชนิด passive ไม่ต้องใช้ไฟเลี้ยง ขั้นตอนต่อไปคือการหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ออกแบบโดยการนำแผ่นอลูมิเนียมสะท้อนกับคลื่นที่ปล่อยมาจากสายอากาศผสมสัญญาณ เลือกระยะ 11 เซนติเมตร ในการวางวัตถุห่างจากสายอากาศผสมสัญญาณ เป็นระยะที่คลื่นสะท้อนกลับมากที่สุดและขั้นตอนสุดท้ายหาความแตกต่างโวลต์เตจของกระดาษที่ความชื้นต่างๆ โดยหลักการคือ สายอากาศผสมสัญญาณตัวที่ 1 ปล่อยคลื่นไปสะท้อนกับกระดาษที่ความชื้นต่างๆ รับสัญญาณที่สะท้อนด้วยสายอากาศผสมสัญญาณตัวที่ 2 พบว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นค่าโวลต์เตจจะเพิ่มขึ้นด้วย ค่าโวลต์เตจนี้จะเป็นตัวบ่งบอกความแตกต่างของความชื้นในกระดาษ โดยกำหนดว่าความชื้นที่ต้องการจะต้องไม่เกิน 14 % เพื่อนำสายอากาศเพื่อวัดความชื้นกระดาษแทนการใช้แรงงานคนในโรงงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดลองผู้ทดลองควรเซตอุปกรณ์ไม่ให้เคลื่อนที่ในการวัดความชื้นแต่ละครั้ง เพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อนของค่าโวลต์เตจและเพื่อให้การวัดผลมีประสิทธิภาพ
2. วงจรแต่ละวงจรมีผลทำให้เกิดสัญญาณรบกวนเมื่อวางอยู่ใกล้กัน ควรใช้อุปกรณ์ที่สามารถกันสัญญาณเพื่อป้องกันความผิดพลาดของผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

## บรรณานุกรม

- [1] วิทวัส เด่นไพโรจน์, สุกฤษฎ์ เตโชทินกร, อภิวัฒน์ ยุตเชียง. “เซ็นเซอร์ไมโครเวฟที่ใช้สายอากาศโมนโพล เชื่อมต่อร่วม.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [2] ไมโนะ ไกรฤกษ์. “วิศวกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า”. กรุงเทพฯ : บริษัท พิมพ์สวย จำกัด, 2544
- [3] Pozar, David M. *Microwave Engineering*. 3<sup>rd</sup> ed. United States of America : John Wiley & Sons, 2005
- [4] จิตรลดา ทองมี, จุฑาภรณ์ โพธิ์เงิน, ณัฐสุดา สุนทรสนิท. “สายอากาศแฉลวดบายาภิ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.
- [5] “RF Mixer & RF Mixing / Multiplication Tutorial. ” <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/mixers/rf-mixers-mixing-basics-tutorial.php>.
- [6] จรินทร์ จุลวานิช. “การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดสามตัวในสามแถบความถี่.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553
- [7] A.V. Hippel, *Dielectric Materials and Application*, Artech House : Boston, London, 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้