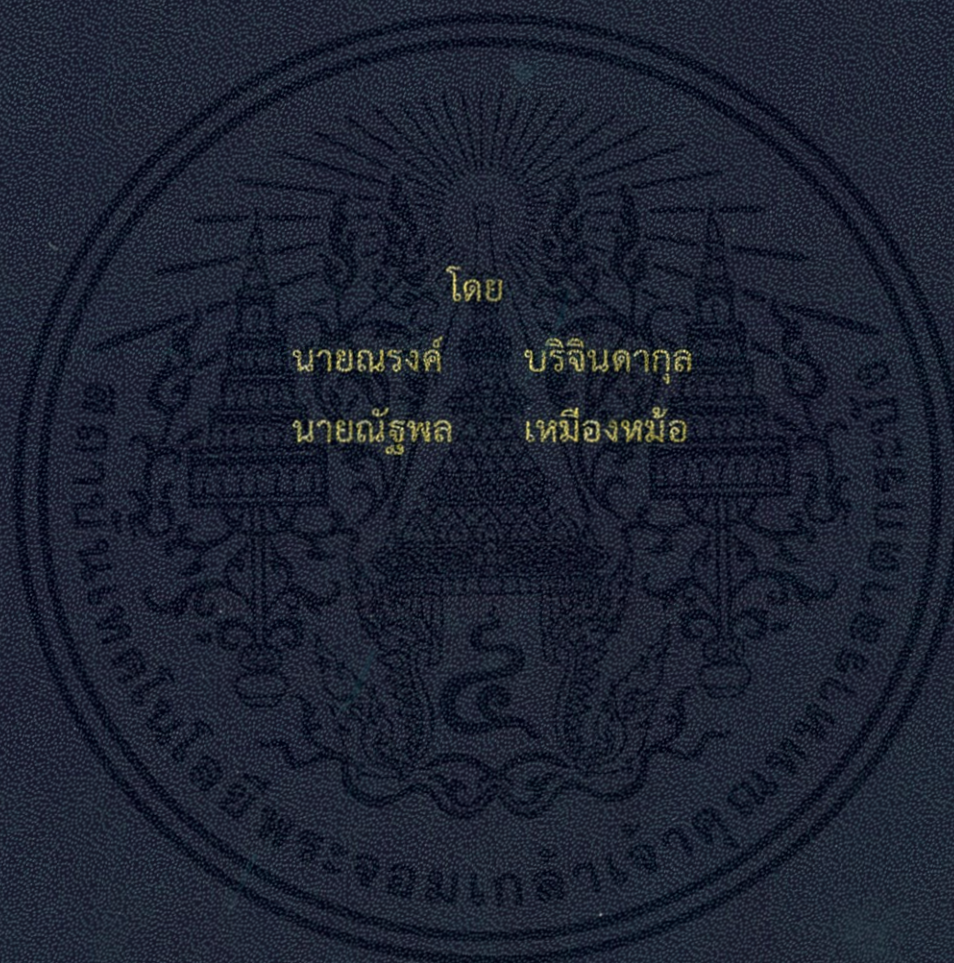


ระบบไมโครเวฟเซ็นเซอร์สำหรับการทดสอบสารละลาย  
MICROWAVE SENSOR SYSTEM FOR TESTING SOLUTION



โดย

นายณรงค์      บริจินตาคูล  
นายณัฐพล      เหมืองหม้อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2555

ระบบไมโครเวฟเซ็นเซอร์สำหรับการทดสอบสารละลาย  
MICROWAVE SENSOR SYSTEM FOR TESTING SOLUTION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบไมโครเวฟเซ็นเซอร์สำหรับการทดสอบสารละลาย  
MICROWAVE SENSOR SYSTEM FOR TESTING SOLUTION

โดย

นายณรงค์ บริจินตกุล

52010296

นายณัฐพล เหมือนหม้อ

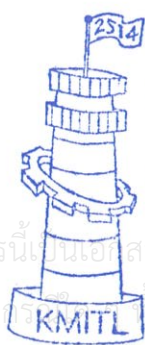
52010350

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

ผศ.ดร.ศรววัฒน์ ชิวปรีชา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2555

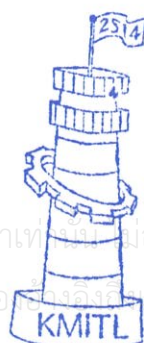


ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว

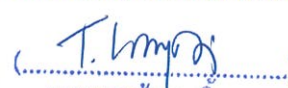
()  
อาจารย์ที่ปรึกษา

11 ม.ค. 56

วิศวกรรมโทรคมนาคม  
Telecommunications Engineering



ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

()  
กรรมการผู้ตรวจชิ้นงาน

14, มีค. 56

วิศวกรรมโทรคมนาคม  
Telecommunications Engineering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้หรือเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์

ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม หากมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งให้เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบไมโครเวฟเซ็นเซอร์สำหรับทดสอบสารละลาย

MICROWAVE SENSOR FOR TESTING SOLUTION

ผู้จัดทำ

- |             |             |          |
|-------------|-------------|----------|
| 1. นายณรงค์ | บริจินดากุล | 52010296 |
| 2. นายณัฐพล | เหมืองหม้อ  | 52010350 |



(รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาศิม)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.ศรวัดน์ ชิวปรีชา)

อาจารย์ที่ปรึกษา

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ โดยได้รับความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรว์ฉนน์ ชิวปรีชาซึ่งได้ให้ความกรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้อง มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมถึงแนะนำแนวทางวิธีการศึกษาและวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ที่ได้รับ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอกทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและตรวจสอบความถูกต้องต่าง ๆ ในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนสามารถดำเนินการให้เสร็จเรียบร้อย และมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น



นายณรงค์ บริจินดากุล  
นายณัฐพล เหมือนหม้อ  
ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบไมโครเวฟเซ็นเซอร์สำหรับการทดสอบการละลาย  
MICROWAVE SENSOR SYSTEM FOR TESTING SOLUTION

โดย นายณรงค์ บริจินดากุล 52010296  
นายณัฐพล เหมืองหม้อ 52010350

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์  
ผศ.ดร.ศรวิวัฒน์ ชิวปรีชา

### บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอระบบไมโครเวฟเซ็นเซอร์สำหรับทดสอบสารละลายจากค่าคุณสมบัติพื้นฐานของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกันไปตามความเข้มข้นของสารละลาย ทำให้การออกแบบเซ็นเซอร์นั้นตั้งอยู่บนพื้นฐานความแตกต่างของตัวกลางที่มีความเข้มข้นไม่เท่ากัน ซึ่งสัญญาณที่ได้จากไมโครเวฟเซ็นเซอร์นั้นจะถูกส่งไปวิเคราะห์ผลด้วยโครงข่ายประสาทเทียมและการวิเคราะห์ถดถอยเพื่อจำแนกสารละลายตามระดับความเข้มข้น

### ABSTRACT

This project presents a concept of using microwave sensor for testing solution. Basic properties of dielectric constant of solution with different concentration are discussed. A microwave sensor is designed, which relies on the distinctive values of the dielectric constant. Signals from the microwave sensor is then detected and sent to process. Using an artificial neural network (ANN) and regression analysis in order to classify the solutions according to their concentration.

## สารบัญ

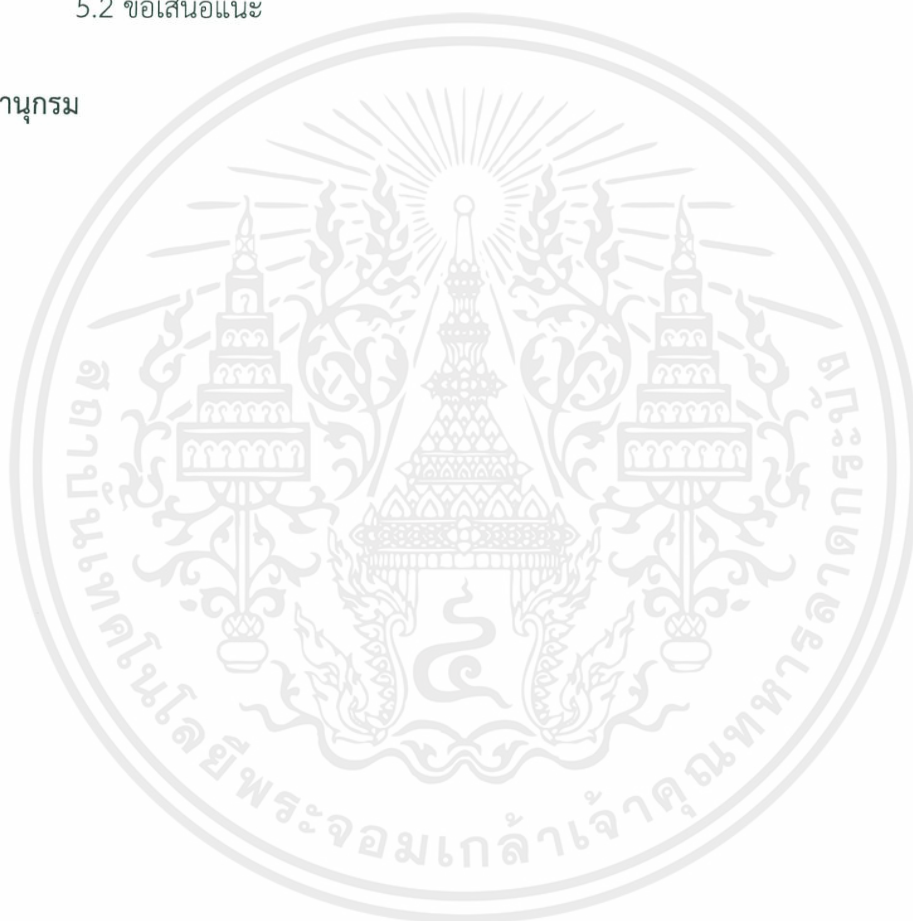
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	X
<b>บทที่ 1</b>	
<b>บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	2
1.3 ทฤษฎีและแนวคิดสำหรับงานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	7
1.5 เนื้อหาของปริิญญานิพนธ์	7
<b>บทที่ 2</b>	
<b>ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>8</b>
2.1 บทนำ	8
2.2 คุณลักษณะของสารไดอิเล็กตริก	8
2.3 บริเวณต่างๆของสนามจากสายอากาศ	26
2.4 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks)	37
2.5 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม	38
2.6 การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม	39
2.7 ประเภทของการเรียนรู้สำหรับโครงข่ายประสาทเทียม	40
2.8 คุณสมบัติและความสามารถที่เป็นประโยชน์ของ ANN	42
2.9 ลักษณะของปัญหาที่เหมาะสมกับ ANN	43
2.10 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม	43
2.11 โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม	44
2.12 โครงข่ายประสาทเทียมที่มีเซลล์ประสาทหลายชั้น (Multi-layer neural network)	45
2.13 การคำนวณโหนดในชั้นซ่อน	50

## สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	2.14 หน่วยประมวลผลสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมและการแสดงผลบนหน้าจอ	50
บทที่ 3	2.15 การวิเคราะห์การถดถอย(Regression analysis)	54
	การออกแบบและการจัดทำปฏิญญานิพนธ์	60
	3.1 บทนำ	60
	3.2 การออกแบบสายอากาศ	61
	3.3 การศึกษาบริเวณสนามที่เหมาะสมแก่การทดสอบด้วยไมโครเวฟ เซนเซอร์	75
	3.4 การออกแบบโครงสร้างภาชนะสำหรับสารละลาย	79
	3.5 การออกแบบวงจรความถี่สูง(Radio frequency circuit)	85
	3.6 การออกแบบวงจรแสดงผล	93
	3.7 วงจรสำหรับประมวลผลโครงข่ายประสาทเทียม	95
	3.8 การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการหาค่าตอบของ $\epsilon'$ และ $\epsilon''$	97
	3.9 การออกแบบการประมวลผลด้วย Regression analysis	98
บทที่ 4	3.10 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	99
	3.11 การจัดเก็บผลการทดลอง	99
	ผลการทดลอง	104
	4.1 การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	104
	4.2 การคำนวณผลของความเข้มข้นที่มีต่อสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่าน	109
	4.3 การทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมในการหาค่าคำตอบของ $\epsilon'$ และ $\epsilon''$	112
	4.4 ผลการทดสอบวงจร	117
	4.5 ผลการทดสอบวงจรผลการทดสอบคลื่นสะท้อนและส่งผ่านสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆ	122

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis)	126
<b>บทที่ 5</b> <b>สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	<b>133</b>
5.1 สรุปผล	133
5.2 ข้อเสนอแนะ	134
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>136</b>



## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	วิธีการทดสอบด้วยการส่งผ่านและสะท้อน	4
1.2	วิธีการส่งผ่านแบบอากาศว่าง	5
1.3	วิธีการทดสอบจากคลื่นสะท้อน	6
2.1	ไดโพลจากจุดประจุกู่เครื่องหมายตรงข้าม	10
2.2	ไดโพลจุดประจุกู่พิจารณาที่ระยะไกล	11
2.3	กลไกจากสนามไฟฟ้าในสารไดอิเล็กตริก	13
2.4	ลักษณะทางกายภาพของโมเลกุลไดโพลที่มีต่อสนามไฟฟ้า	19
2.5	ผิวสัมผัสระหว่างรอยต่อสารไดอิเล็กตริกสมบурณ์ 2 ชนิดในแนวสัมผัส	20
2.6	ผิวสัมผัสระหว่างรอยต่อสารไดอิเล็กตริกสมบурณ์ 2 ชนิดในแนวตั้งฉาก	21
2.7	การหักเหของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสระหว่างไดอิเล็กตริก 2 ชนิด	22
2.8	การแบ่งบริเวณสนามจากสายอากาศ	26
2.9	ช่องเปิดบนระนาบ $z = 0$	27
2.10	การสะท้อนและส่งผ่านที่รอยต่อระหว่างสองตัวกลางไดอิเล็กตริก	32
2.11	แบบจำลองของ Neuron ในคอมพิวเตอร์	38
2.12	แบบจำลองของ Neuron	39
2.13	ฟังก์ชันการกระตุ้นของนิวรอน	39
2.14	การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised learning algorithm)	41
2.15	การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised learning algorithm)	42
2.16	สถาปัตยกรรมของ Feed forward network	44
2.17	สถาปัตยกรรมของ Feedback network	45
2.18	โครงข่ายประสาทเทียมแบบที่มีเซลล์ประสาท 3 ชั้น	46
2.19	ลักษณะของไอซี PIC16F877A	52
2.20	โครงสร้างภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล PIC เบอร์ 16F877A	52
2.21	ลักษณะของไอซี PIC18F4520	53
2.22	โครงสร้างภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล PIC เบอร์ 18F4520	54
2.23	การกระจายตัวของข้อมูลและเส้นกราฟถดถอย	55

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 องค์ประกอบหลักของระบบไมโครเวฟเซนเซอร์	60
3.2 ผลของค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์จากวัสดุฐานรองและอากาศ	62
3.3 ความยาวประสิทธิผลของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยม	63
3.4 สายอากาศไมโครสตริปที่ออกแบบด้วยค่าเริ่มต้น	65
3.5 $ S_{11} $ ของสายอากาศโดยการจำลองจากโปรแกรมซึ่งใช้ค่าเริ่มต้น	70
3.6 ผลของ $ S_{11} $ เมื่อเพิ่มความกว้างของแพทช์	71
3.7 ผลของ $ S_{11} $ เมื่อเพิ่มความยาวของแพทช์	71
3.8 การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าตามแนวยาวของแพทช์	72
3.9 ตำแหน่งป้อนสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อ	72
3.10 ผลของ $ S_{11} $ เมื่อเปลี่ยนจุดป้อนสัญญาณ	73
3.11 ตำแหน่งที่อ้างอิงในการป้อนสัญญาณ	74
3.12 การทดสอบสายอากาศที่คำนวณจากโปรแกรม	75
3.13 คลื่นระนาบตกกระทบกับภาชนะ(มุมมองด้านบน)	76
3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างฝั่งรับและสัญญาณที่รับได้	77
3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างฝั่งรับและสัญญาณที่รับได้เมื่อเพิ่มขนาดครั้งแรก	77
3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างฝั่งรับและสัญญาณที่รับได้เมื่อเพิ่มขนาดครั้งที่สอง	78
3.17 กล้องโพรบที่ออกแบบเริ่มต้น	79
3.18 ผลของ $ S_{11} $ เมื่อปรับโครงสร้างกล่องด้านยาว ( $L$ )	80
3.19 ผลของ $ S_{21} $ เมื่อปรับโครงสร้างกล่องด้านยาว ( $L$ )	81
3.20 ผลของ $ S_{11} $ เมื่อปรับโครงสร้างความหนาขอบกล่อง	82
3.21 ผลของ $ S_{21} $ เมื่อปรับโครงสร้างความหนาขอบกล่อง	83
3.22 กล้องโพรบที่ออกแบบโดยมีสายอากาศส่งส่งและรับ	84
3.23 กล้องโพรบที่มองจากทางด้านหน้าและด้านข้าง	84
3.24 กล้องโพรบที่มองจากทางด้านบน	84

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.25	ลักษณะทางกายภาพของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณแบบขนาน	86
3.26	ลักษณะของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณ	92
3.27	วงจรตรวจจับกำลังสัญญาณความถี่สูง	93
3.28	ลักษณะของวงจรตรวจจับกำลังสัญญาณความถี่สูง	93
3.29	วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า	94
3.30	ลายทองแดงวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า	94
3.31	วงจรวัดแรงดันฟ้า	95
3.32	วงจรประมวลผลสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม	96
3.33	ลายทองแดงวงจรสำหรับประมวลผลโครงข่ายประสาทเทียม	96
3.34	วงจรสำหรับประมวลผลโครงข่ายประสาทเทียม	97
3.35	ระบบการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม	98
3.36	การทดสอบด้วยวิธีการส่งผ่านอากาศว่าง	100
3.37	หลักการคำนวณเพียร์สัน	101
3.38	ลักษณะและสเกลของรีเฟรคโตรีเตอร์	102
3.39	องค์ประกอบของการทดสอบคลื่นสะท้อนและส่งผ่าน	102
3.40	กล่องป้องกันคลื่นในย่านไวไฟรบกวนระบบไมโครเวฟเซนเซอร์	103
3.41	ภายในกล่องซึ่งประกอบไปด้วยสายอากาศส่งและรับรวมไปถึงกล่องโคม	103
4.1	การทดสอบคลื่นสะท้อนและส่งผ่านสารละลาย	104
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าคงตัวไดอิเล็กตริก	105
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและตัวประกอบสูญเสีย	106
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าการสูญเสียแทนเจนท์	107
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายและความสามารถในการซึมผ่าน	108
4.6	$ S_{11} $ สำหรับสายอากาศส่งและรับด้วยโพลาริซั่มร่วม	109
4.7	$ S_{21} $ สำหรับสายอากาศส่งและรับด้วยโพลาริซั่มร่วม	110

## สารบัญญรูป(ต่อ)

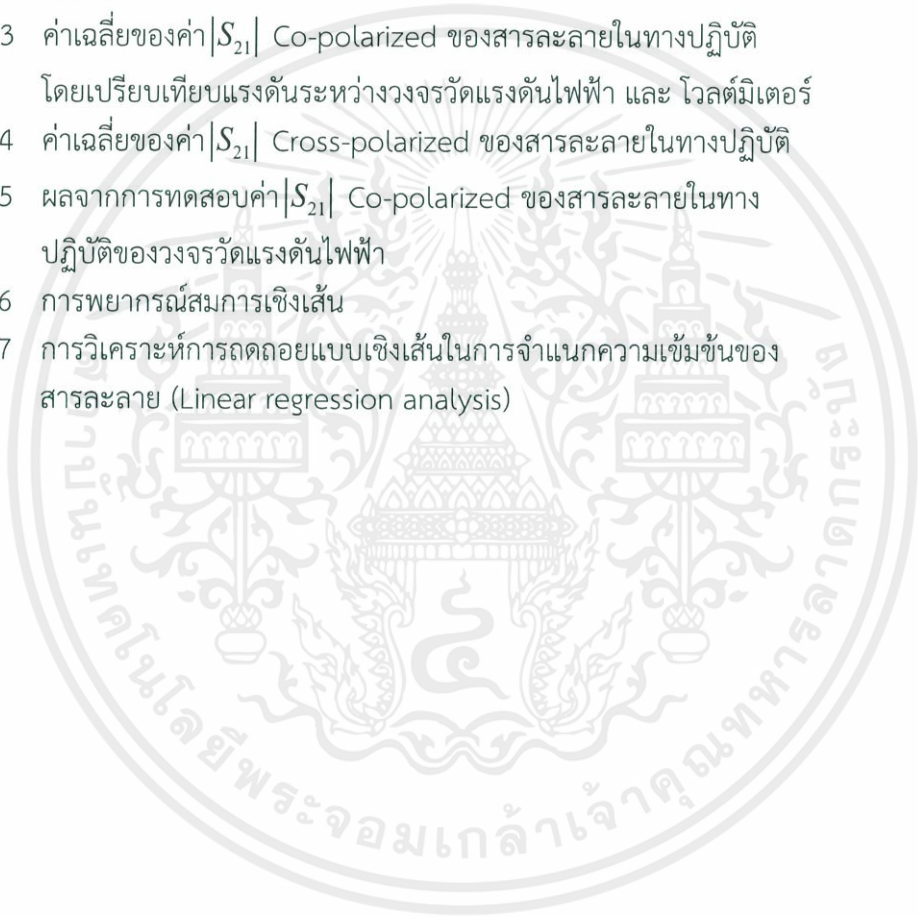
รูปที่	หน้า
4.8 $ S_{11} $ สำหรับสายอากาศส่งและรับด้วยโพลาริไซซ์	110
4.9 $ S_{21} $ สำหรับสายอากาศส่งและรับด้วยโพลาริไซซ์	110
4.10 วงจรเชื่อมต่อสัญญาณ	117
4.11 การทดสอบคลื่นสะท้อนของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณในพอร์ทแรก	118
4.12 การทดสอบคลื่นสะท้อนของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณในพอร์ทที่สอง	118
4.13 การทดสอบคลื่นสะท้อนของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณในพอร์ทที่สาม	119
4.14 การทดสอบคลื่นสะท้อนของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณในพอร์ทที่สี่	119
4.15 การทดสอบการเชื่อมต่อสัญญาณของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณ	121
4.16 ผลการทดสอบการเหนี่ยวนำสัญญาณ	121
4.17 การทดสอบพารามิเตอร์ต่างๆที่คลื่นสะท้อนและส่งผ่าน	123
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความหวานของสารละลายกับแรงดันไฟฟ้า ในรูปแบบการวัดแบบ $ S_{21} $ Co-polarized	127
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าในรูปแบบการวัดแบบ $ S_{21} $ Co-polarized กับความหวานของสารละลายของสมการการวิเคราะห์ แบบถดถอย	130
4.20 หน้าจอแสดงผลช่วงความหวาน 0-10 BRIX	130
4.21 หน้าจอแสดงผลช่วงความหวาน 10-20 BRIX	131
4.22 หน้าจอแสดงผลช่วงความหวาน 20-30 BRIX	131
5.1 แรงดันที่เปลี่ยนไปจากวงจรแสดงผลอันเนื่องมาจากแหล่งจ่ายไม่คงที่	134

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	65
3.2	69
3.3	74
3.4	85
3.5	92
3.6	101
4.1	105
4.2	108
4.3	112
4.4	112
4.5	113
4.6	113
4.7	114
4.8	116
4.9	120
4.10	122
4.11	124

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 ผลจากการทดสอบค่า $ S_{21} $ Cross-polarized ของสารละลายในทางปฏิบัติโดยเปรียบเทียบแรงดันระหว่างวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า และ โวลต์มิเตอร์	124
4.13 ค่าเฉลี่ยของค่า $ S_{21} $ Co-polarized ของสารละลายในทางปฏิบัติ โดยเปรียบเทียบแรงดันระหว่างวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า และ โวลต์มิเตอร์	125
4.14 ค่าเฉลี่ยของค่า $ S_{21} $ Cross-polarized ของสารละลายในทางปฏิบัติ	125
4.15 ผลจากการทดสอบค่า $ S_{21} $ Co-polarized ของสารละลายในทางปฏิบัติของวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า	126
4.16 การพยากรณ์สมการเชิงเส้น	128
4.17 การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นในการจำแนกความเข้มข้นของสารละลาย (Linear regression analysis)	129



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในอุตสาหกรรมต่างๆไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมน้ำตาลหรืออุตสาหกรรมน้ำผลไม้ ซึ่งมีน้ำและน้ำตาลเป็นส่วนประกอบที่เป็นส่วนสำคัญและเป็นส่วนใหญ่นั้น การควบคุมองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตนั้นเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับความหวานจะต้องมีการตรวจสอบและควบคุมปริมาณความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เพื่อให้ได้มาตรฐานที่ดี ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะค้นคว้าวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive) ทำให้สามารถตรวจสอบในระหว่างกระบวนการผลิตโดยไม่สัมผัสและไม่ทำลายอีกทั้งใช้เวลาไม่มาก ที่สำคัญราคาไม่แพงและง่ายต่อการใช้งาน จากการศึกษาพบว่าผู้ที่ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่มีต่ออุณหภูมิที่แตกต่าง ความถี่ที่แตกต่าง รวมไปถึงความเข้มข้นต่างๆกัน ซึ่งประกอบไปด้วยเทคนิคต่างๆในการใช้คลื่นไมโครเวฟในการทดสอบ

สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาในส่วนของการตรวจสอบสารละลายน้ำตาล ซึ่งสามารถนำไปดัดแปลงและประยุกต์ใช้ได้กับการตรวจสอบความเข้มข้นความหวานในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล อุตสาหกรรมการผลิตน้ำผลไม้ หรือแม้กระทั่งการทดสอบค่าความสุกของผลไม้ เนื่องจากแป้งในผลไม้จะแปรสภาพมาเป็นน้ำตาลเป็นส่วนมาก โดยใช้แนวคิดที่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสารละลายที่มีผลต่อค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า โดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการตรวจสอบซึ่งทดสอบจากค่าการสะท้อนและส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในกรณีที่ตัวกลางมีความเข้มข้นแตกต่างกัน

## 1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

ระบบการทดสอบความเข้มข้นสารละลายด้วยไมโครเวฟที่นำเสนอ สามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลายไม่ว่าจะเป็นการทดสอบค่าความเข้มข้นความหวานในอุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมน้ำหวานน้ำผลไม้ แม้กระทั่งใช้เป็นข้อมูลสำหรับการศึกษาถึงระบบไมโครเวฟที่ใช้สำหรับการทดสอบความสุกของผลไม้ โดยระบบการทดสอบความเข้มข้นด้วยคลื่นไมโครเวฟนี้ ใช้หลักการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าสู่ตัวกลางที่เป็นสารละลายความเข้มข้นใดๆซึ่งเป็นวิธีที่ไม่สัมผัสกับสารละลายที่ต้องทดสอบ(Nondestructive) จากนั้นทำการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นต่างๆกันที่ส่งผลต่อ S-parameter ของคลื่นไม่ว่าจะเป็นการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารวมไปถึงการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลางนั้นๆ โดยระบบไมโครเวฟเซ็นเซอร์นี้ประกอบไปด้วยสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่เป็นสายอากาศไมโครสตริป เนื่องจากจุดเด่นของสายอากาศไมโครสตริปได้แก่ขนาดที่กะทัดรัด หน้าสัมผัสแบนราบ รวมไปถึงการออกแบบและสร้างง่ายในราคาที่ไม่แพง โดยสายอากาศไมโครสตริปทั้งสองจะถูกคั่นด้วยวัสดุสำหรับใส่สารละลายซึ่งทำจากโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เนื่องจากมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าใกล้เคียงกับอากาศ  $\epsilon_r = 1$  หลังจากนำสายอากาศไมโครสตริปทั้งสองแปะไว้ข้างกล่องโพลีเมทิลเมทาคริเลตแล้ว จะทำการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลางจากตัวส่งสู่ตัวรับโดยค่า S-parameter ที่ทดสอบได้จะถูกนำไปประเมินกับข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio หลังจากการทดสอบค่า S-parameter แล้ว ข้อมูลจะถูกส่งเข้าสู่โปรแกรมโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ในการตัดสินใจ ข้อมูลที่ส่งเข้าไปและแสดงค่าความหวานออกมาในหน่วย brix ซึ่งเป็นหน่วยมาตรฐานที่ใช้สำหรับทดสอบความหวานตามอุตสาหกรรมต่างๆ

## 1.3 ทฤษฎีและแนวคิดสำหรับงานวิจัย

### 1.3.1 กลไกของไดอิเล็กตริก

วัสดุโดยทั่วไปนั้นประกอบไปด้วยกลไกต่างๆที่เกิดขึ้นกับไดอิเล็กตริกหรือการโพลาไรซ์ ซึ่งจะส่งผลต่อค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าโดยรวม วัสดุไดอิเล็กตริกที่มีประจุไฟฟ้าอยู่ เมื่อมีสนามไฟฟ้าจากภายนอกมากระทำประจุจะทำการเรียงตัวและอยู่ในสภาพโพลาไรซ์เพื่อชดเชยแรงทางไฟฟ้าที่มากระทำโดยประจุบวกและลบจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามกัน ในระดับโมเลกุลนั้น กลไกของไดอิเล็กตริกจะส่งผลต่อพฤติกรรมของค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุโดยโมเลกุลที่มีความเป็นขั้วหรือไดโพล และสารที่เป็นไอออนิกนั้นจะมีปฏิกิริยามากในช่วงความถี่ไมโครเวฟ ยกตัวอย่างโมเลกุลที่

เป็นไดโพลได้แก่มอเลกุลของน้ำ ซึ่งเป็นไดโพลถาวร (Permanent Dipole) จะมีการหมุนตัวของโครงสร้างตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ซึ่งกลไกเหล่านี้ค่อนข้างทำให้เกิดการสูญเสียเป็นสาเหตุให้อาหารเมื่อนำเข้าเตาไมโครเวฟนั้นสูง สำหรับทิศทางการโพลาริซชันของโมเลกุลที่มีขั้ว ซึ่งโมเลกุลที่มีสภาพเชิงขั้วจะเกิดจากอะตอมที่มีการรวมตัวกันด้วยพันธะโคเวเลนต์หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน หลังจากการรวมตัวของอะตอมโดยการแชร์อิเล็กตรอนใช้งานร่วมกันแล้ว การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในโมเลกุลอาจทำให้เกิดความไม่สมมาตรของอิเล็กตรอนชั้นวาเลนซ์ อิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกสุดและก่อให้เกิดไดโพลโมเมนต์อย่างถาวร โมเมนต์เหล่านี้ อาจวางตัวอยู่ด้วยการสุมทิศทางการโพลาริซชันรวมเกิดการหักล้างกันและเป็นศูนย์ หลังจากที่ถูกแรงกระทำจากภายนอกด้วยสนามไฟฟ้า โมเลกุลจะเกิดการบิดขั้วตามสนามไฟฟ้าและก่อให้เกิดทอร์กขึ้นสำหรับโมเลกุลนั้น ท้ายที่สุดโมเลกุลที่มีขั้วเหล่านั้นจะวางตัวอยู่ในทิศทางที่ถูกโพลาริซตามสนามไฟฟ้า [5]

### 1.3.2 การทดสอบด้วยไมโครเวฟ

จากการเพิ่มขึ้นของไมโครเวฟเซ็นเซอร์สำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดเทคนิคและวิธีการต่างๆสำหรับการใช้งานในการทดสอบค่าทางวิศวกรรมด้วยการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ไมโครเวฟจนกระทั่งในที่สุดก็เกิดการประยุกต์ใช้งานมากมายในหลายด้าน ซึ่งส่วนที่พบการใช้งานมากที่สุดคือการใช้งานคลื่นไมโครเวฟในการทดสอบค่าต่างๆไม่ว่าจะเป็น ความชื้นรวมไปถึงขนาดและการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยจุดเด่นที่สำคัญของการใช้คลื่นไมโครเวฟในการทดสอบคือความสามารถในการทดสอบค่าได้โดยปราศจากการสัมผัส (Nondestructive) ซึ่งจะทำให้สิ่งที่ต้องการทดสอบค่าไม่ถูกทำลายโครงสร้างหรือถูกเจือปน โดยการใช้หลักการที่สำคัญในการทดสอบคือการปล่อยให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทะลุผ่านเข้าไปและทำการคำนวณค่าย้อนกลับ

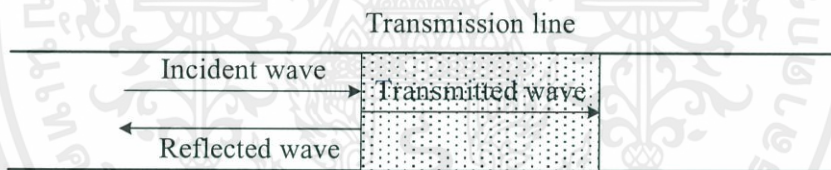
#### 1.3.2.1 Resonator Sensor

ไมโครเวฟเรโซเนเตอร์สร้างจากสายนำสัญญาณซึ่งนำมาใช้งานเพียงส่วนเดียว โดยทำการเชื่อมต่อปลายเปิด โดยชื่อของเรโซเนเตอร์นั้นถูกเรียกตามชนิดของสายนำสัญญาณที่นำมาใช้ เช่น สายโคแอกเซียล ไมโครสตริป สล็อต หรือเรโซเนเตอร์แบบโพรง เมื่อเรโซเนเตอร์ถูกใช้เป็นส่วนเซ็นเซอร์ วัสดุที่ต้องการจะทดสอบจะถูกนำมาวางไว้บนส่วนหนึ่งของสายนำสัญญาณซึ่งจะส่งผลต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายเนื่องจากบางส่วนของเงื่อนไขขอบเขตแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง

(Electromagnetic Boundaries) ส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency) และตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) เปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์ของค่าสภาพยอมไฟฟ้า (Permittivity) ของวัสดุที่นำมาวาง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เรโซแนนซ์และตัวประกอบคุณภาพที่เปลี่ยนแปลงไปนี้จะถูกนำมาเป็นตัวแปรในการพิจารณาวัสดุที่ถูกทดสอบ

### 1.3.2.2 Transmission Sensor

การทดสอบด้วยวิธีการส่งผ่านและสะท้อน ทำได้โดยการนำวัสดุที่ต้องการจะทดสอบสอดเข้าไปในสายนำสัญญาณ (Transmission Line) จากนั้นส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านวัสดุ ซึ่งจากค่าคุณสมบัติของวัสดุจะส่งผลให้เกิดคลื่นส่วนหนึ่งสะท้อนและคลื่นอีกส่วนหนึ่งส่งผ่านดังรูปที่ 1.1 ซึ่งค่าทั้งสองจะบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของวัสดุกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีสองวิธีหลักๆที่นิยมใช้กันคือแบบท่อนำคลื่น (Rectangular Waveguide) และแบบท่อนำคลื่นแกนร่วม (Coaxial Waveguide) ซึ่งแบบวิธีท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมนี้สามารถจัดเตรียมชุดตัวอย่างทดสอบได้ง่ายกว่าแต่แบบท่อนำคลื่นแกนร่วมสามารถทดสอบได้ในช่วงความถี่ที่กว้างกว่า

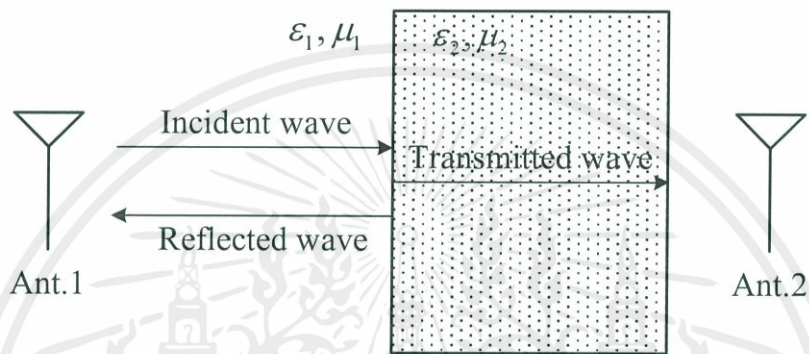


รูปที่ 1.1 วิธีการทดสอบด้วยการส่งผ่านและสะท้อน

### 1.3.2.3 Free Space Sensor

องค์ประกอบพื้นฐานของเซ็นเซอร์แบบส่งผ่านแบบอากาศว่างได้แก่สายอากาศสองตัวซึ่งเป็นสายอากาศที่เป็นตัวส่งและสายอากาศที่เป็นตัวรับ โดยมีวัสดุที่ต้องการทดสอบวางอยู่ระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับเพื่อให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัววัสดุ หลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่จากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง (จากอากาศเข้าสู่วัสดุ) ทำให้อิมพีแดนซ์และความเร็วคลื่นเปลี่ยนแปลงเป็นผลให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบางส่วนสะท้อนกลับและบางส่วนถูกส่งผ่านเข้าสู่วัสดุดังรูปที่ 1.2 ค่าการลดทอนหรือเฟสที่เลื่อนไปและค่าการส่งผ่านบริเวณรอยต่อของ

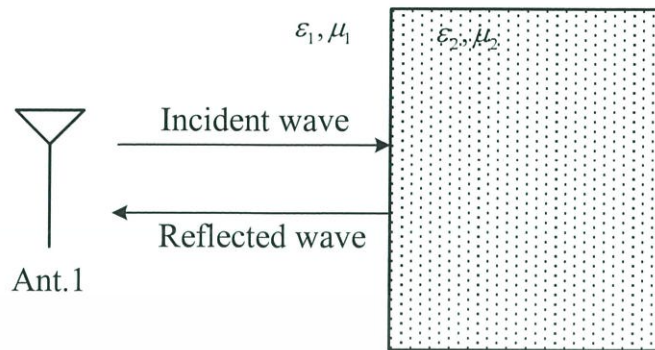
ตัวกลาง จะถูกใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาความเปลี่ยนแปลงและหาความสัมพันธ์ วิธีการส่งผ่านดังกล่าวเหมาะสำหรับการใช้งานในระบบลำเลียงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งด้วยสายพาน ซึ่งถือเป็นสิ่งสำคัญในหน่วยการผลิตสำหรับอุตสาหกรรมต่างๆ หรือแม้กระทั่งใช้กับการตรวจเช็คในท่อต่างๆ



รูปที่ 1.2 วิธีการส่งผ่านแบบอากาศว่าง

#### 1.3.2.4 Reflection Sensor

เซ็นเซอร์ที่ทดสอบคลื่นสะท้อนมีพื้นฐานใกล้เคียงกับแบบการส่งผ่านแบบอากาศว่าง (Free Space Sensor) แตกต่างกันที่แบบการทดสอบคลื่นสะท้อนจะสนใจการทดสอบจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวดังแสดงในรูปที่ 1.3 โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกนำเข้าไปสู่วัตถุที่ต้องการทดสอบโดยตรง ยกตัวอย่างเช่นการใช้งานบนสายนำสัญญาณที่มีปลายเปิดซึ่งมีสายโคแอกเซียลปลายเปิดเป็นที่นิยมใช้งาน โดยมีปลายเปิดที่ตัวนำด้านนอกซึ่งจะถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นหน้าสัมผัสเพื่อให้สามารถวางติดกับผิวของวัตถุหรือใช้ปลายเปิดจุ่มลงหากวัตถุทดสอบเป็นของเหลววิธีการทดสอบด้วยการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กนี้เหมาะสำหรับการใช้งานทดสอบในห้องแลปหรือเป็นการทดสอบตัวอย่างที่มีขนาดไม่ใหญ่



รูปที่ 1.3 วิธีการทดสอบจากคลื่นสะท้อน

#### 1.3.2.5 Radar Sensor

เซ็นเซอร์ที่มีเทคนิคการทดสอบโดยอาศัยหลักการทดสอบด้วยช่วงเวลาที่สั้น (Flight of Time) หรือการพิจารณาจากความถี่ที่สะท้อนกลับ (Echo) นั้นเรียกว่าเรดาร์เซ็นเซอร์ โดยเรดาร์เซ็นเซอร์อาจใช้คลื่นพัลส์ แรงกระตุ้นสั้นๆ คลื่นความถี่ไอเอฟเอ็ม หรืออาศัยหลักการดอปเปลอร์ ซึ่งใช้สำหรับการทดสอบพื้นผิวของวัตถุหรือแม้กระทั่งใช้ทดสอบรูปร่างและตรวจสอบความผิดปกติของพื้นที่หน้าตัดย่อยของวัตถุ

#### 1.3.2.6 Radiometer Sensor

ไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์เซ็นเซอร์ใช้ในการรับรังสีที่แพร่กระจายจากวัตถุดำหรือการแผ่รังสีความร้อน โดยการแผ่รังสีความร้อนจัดว่าเป็นรูปแบบพื้นฐานของการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าวัตถุหรืออนุภาคใดๆที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสัมบูรณ์จะแผ่รังสีความร้อนเสมอ โดยปริมาณการแผ่รังสีของวัตถุใดๆจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิของวัตถุนั้นเป็นเหตุผลที่เราเรียกการแผ่รังสีแบบนี้ว่าการแผ่รังสีของวัตถุดำ จากเหตุผลดังกล่าวทำให้เรดิโอมิเตอร์เซ็นเซอร์ใช้สำหรับการทดสอบอุณหภูมิที่มีระยะห่าง ยกตัวอย่างในกรณีที่มีควันหรือหมอกที่ซึ่งเซ็นเซอร์ที่ใช้หลักการอินฟราเรดไม่สามารถจะใช้งานในสภาวะดังกล่าวได้ เรดิโอมิเตอร์สามารถใช้งานทดแทนข้อจำกัดนั้นได้ รวมถึงสามารถทดสอบอุณหภูมิที่อยู่ภายในของวัตถุอีกด้วยซึ่งนอกจากเทคนิควิธีการดังที่ได้กล่าวมายังมีเทคนิคอื่นที่เป็นการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการทดสอบต่างๆแต่จะขอละไว้เพียงเท่านี้

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

ปฏิญานีพนธ์นี้จะทำการออกแบบระบบไมโครเวฟเซ็นเซอร์สำหรับการใช้ทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโดยประกอบไปด้วยองค์ประกอบทั้งหมด 3 ส่วนได้แก่ ส่วนแรกคือส่วนของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ โดยการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz เนื่องจากเป็นความถี่เสรีที่ไม่ต้องขออนุญาตในการใช้งาน ส่วนต่อมาคือบรรจุกัมมันต์สำหรับใส่สารละลาย โดยการประเมินขนาดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานกับสายอากาศไมโครสตริป จากนั้นส่วนสุดท้ายเป็นการนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการตัดสินใจเพื่อแสดงค่าความเข้มข้นในหน่วยบริกซ์ (brix) ซึ่งเป็นหน่วยความหวานมาตรฐานด้วยการใช้โปรแกรมในการประมาณค่า

## 1.5 เนื้อหาของปฏิญานีพนธ์

สำหรับขอบเขตการศึกษาและออกแบบสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 บทดังนี้

บทที่ 1 บทนำกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาตลอดจนความน่าสนใจของปัญหาและแนวคิดพื้นฐานที่นำมาใช้ในการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและความรู้พื้นฐานของคุณสมบัติไดโพลีเลกทริกที่สนใจ ควบคู่กับทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารวมถึงทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศที่นำมาใช้ในการวิจัย

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศที่ใช้ในงานด้วยการจำลองโปรแกรมรวมถึงการออกแบบบรรจุกัมมันต์ที่เหมาะสมสำหรับใส่สารละลายความเข้มข้นใดๆที่ใช้ในการทดสอบ และศึกษาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นที่มีผลต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

บทที่ 4 กล่าวถึงการวิเคราะห์วิธีการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นและค่าทางแม่เหล็กไฟฟ้าและศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม

บทที่ 5 วิจารณ์และสรุป โดยกล่าวถึงภาพรวมของงานวิจัยทั้งเชิงทฤษฎีและทางปฏิบัติตลอดจนข้อเสนอแนะต่างๆเพื่อใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาาระบบให้เหมาะสมกับการใช้งาน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในการพิจารณาสารที่เป็นฉนวนหรือไดอิเล็กตริก (Dielectrics) สารนี้แตกต่างจากตัวนำในทางอุดมคติคือไม่มีประจุอิสระที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในเนื้อสารเพื่อทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำขึ้น ประจุทั้งหมดจะถูกกักอยู่ภายในโมเลกุล หรือโครงผลึกของโมเลกุลด้วยแรงของคูโลมบ์ เมื่อมีการกระตุ้นสนามไฟฟ้าเข้าไปในเนื้อสารจะมีผลเพียงทำให้ประจุเหล่านั้นเคลื่อนหรือบิดตัวเพียงเล็กน้อย แต่ไม่เคลื่อนออกจากตำแหน่งที่ประจำอยู่ จึงนำไปสู่การก่อให้เกิดโครงสร้างไดโพลไฟฟ้า (Electric Dipole) ขึ้น สิ่งที่เกิดขึ้นทำให้มีการขยายความต่อเนื่องไปถึง การทดสอบได้ค่าความยินยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Permeability) หรือที่เรียกกันว่า ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) การแยกออกเป็นสองขั้วหรือการโพลาไรซ์ (Polarization) ของตัวกลางนั้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า ซึ่งมีขนาดและทิศทางที่อาจจะแตกต่างกันไปตามชนิดของสารไดอิเล็กตริกที่ถูกกระตุ้นด้วยสนามนั้น ค่าเหล่านั้นอาจต่างไปจากค่าในที่ว่างอิสระ ได้มีการพัฒนาเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ สำหรับสนามที่ผิวสัมผัสตรงรอยต่อระหว่างสารไดอิเล็กตริก 2 ชนิดเพิ่มเติมขึ้นมาเพื่อนำไปใช้อธิบายและประเมินความแตกต่างของสารเหล่านี้

การเคลื่อนหรือบิดตัวของประจุที่กล่าวมาแล้วนั้น เป็นหลักการที่ก่อให้เกิดกลไกการสะสมพลังงานขึ้น นอกจากนั้นผลตอบสนองของสารไดอิเล็กตริกโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มีต่อสนามที่แปรตามเวลาในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีความสำคัญอย่างมากต่อการทำความเข้าใจในปรากฏการณ์ฟิสิกส์ต่างๆ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าสารส่วนใหญ่จะมีสภาพเป็นสารที่มีคุณลักษณะเป็นได้ทั้งไดอิเล็กตริกและตัวนำ นั่นก็คือ สารที่เราพิจารณาว่าเป็นไดอิเล็กตริก อาจจะมีความเป็นตัวนำแฝงอยู่เล็กน้อย และสารบางอย่างที่เราคิดว่าเป็นตัวนำ บางทีก็อาจจะเกิดการโพลาไรซ์ขึ้นภายในเนื้อสารได้เล็กน้อยเช่นกัน ความคิดที่ออกมานอกกรอบของการวิเคราะห์เชิงอุดมคตินี้ จะนำไปสู่พฤติกรรมที่น่าสนใจบางประการ เช่น ผลกระทบต่อการแพร่กระจายคลื่นเฉพาะแบบ

#### 2.2 คุณลักษณะของสารไดอิเล็กตริก

##### 2.2.1 การประพอดิตัวของสารไดอิเล็กตริก

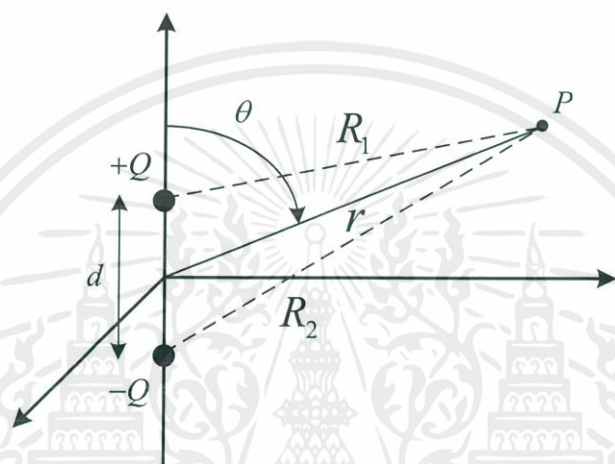
สารไดอิเล็กตริกที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้านั้น สามารถที่จะพิจารณาได้เช่นเดียวกับกับการจัดเรียงตัวของไดโพลไฟฟ้าที่เล็กมากในที่ว่างอิสระ ซึ่งก่อตัวขึ้นจากทั้งประจุบวกและลบของแกนไดโพลที่ไม่เป็นระเบียบ โดยโครงสร้างของคู่ประจุเหล่านี้มิได้เป็นประจุอิสระในเนื้อสาร ดังนั้น

จึงไม่สามารถนำไปสู่กระบวนการเหนี่ยวนำกระแสขึ้นมาได้ แต่ทว่ากลับถูกยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงทางอะตอมหรือโมเลกุล ผลตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าภายนอกจะทำให้มันเคลื่อนตำแหน่งไปเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะเรียกประจุเหล่านี้ว่า ประจุยึดเหนี่ยว (Bound Charge) และจะแตกต่างกับประจุอิสระที่เราได้นำมาคำนวณหาค่าความนำของสาร ประจุยึดเหนี่ยวสามารถทำตัวเป็นแหล่งจ่ายเสมือนที่จ่ายสนามสถิตได้ เราจึงต้องนำเสนอตัวแปรใหม่คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก หรือจัดสรรค่าความยินยอมทางไฟฟ้าที่ต่างไปจากความยินยอมทางไฟฟ้าในที่ว่างอิสระ ด้วยวิธีการที่แตกต่างออกไปนี้ทำให้เราสามารถนำไปใช้พิจารณากับประจุทุกชนิดที่อยู่ภายในเนื้อสารไดอิเล็กตริกได้ เราสามารถนำเอาสมการก่อนหน้าซึ่งยังไม่ได้รับการแก้ไขตัดแปลงมาใช้ในการสร้างทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสารไดอิเล็กตริก ในแนวความคิดของการนำเสนอการโพลาไรซ์  $\bar{P}$  ค่าความยินยอมทางไฟฟ้า  $\epsilon$  และค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์  $\epsilon_r$  รวมทั้งการพัฒนาสมการความสัมพันธ์ในเชิงปริมาณของค่าต่างๆ เหล่านี้ [7]

สารไดอิเล็กตริกทั้งหมดมีคุณสมบัติต่างๆ เป็นคุณสมบัติร่วม ไม่ว่าจะเป็นสารที่มีสถานะของแข็ง ของเหลว ก๊าซ หรือแม้กระทั่งสารพวกนี้จะมีลักษณะเป็นผลึกหรือไม่ก็ตาม ซึ่งคุณสมบัตินั้นก็คือความสามารถในการกักเก็บพลังงานทางไฟฟ้านั่นเอง การกักเก็บพลังงานนี้ตั้งอยู่บนความหมายของการเคลื่อนตำแหน่งภายในที่ประจุยึดเหนี่ยวค่าบวกและลบต้านกับแรงอะตอมในโมเลกุลปกติ การเคลื่อนหรือบิดตัว (Displacement) ต้านกับแรงที่ควบคุมอยู่ คล้ายกับการยกน้ำหนักหรือการยืดสปริง จึงเทียบได้กับพลังงานศักย์ แหล่งจ่ายพลังงานที่วุ่นคือสนามจากภายนอก ส่วนการเคลื่อนที่ของประจุเพียงเล็กน้อยนี้บางทีก็อาจจะก่อให้เกิดกระแสที่กระชากผ่านแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นตัวสร้างสนามก็ได้

กลไกสำหรับการเคลื่อนตัวของประจุนี้ จะแตกต่างกันไปตามความแตกต่างของสารไดอิเล็กตริก บางโมเลกุลที่อยู่ในเทอมของ โมเลกุลแบบมีขั้ว (Polar Molecule) จะมีการเคลื่อนตัวอย่างถาวรระหว่างจุดศูนย์ถ่วงของประจุบวกและลบ จากนั้นประจุแต่ละคู่จะทำตัวเป็นไดโพล โดยปกติแล้วไดโพลจะจัดเรียงกันอย่างอิสระในทิศทางที่ไม่เป็นระเบียบตลอดทั่วทั้งภายในเนื้อสาร และจะมีการจัดเรียงโมเลกุลตามสนามที่ถ่ายมาจากภายนอกไปในทิศทางเดียวกัน สนามที่มีความเข้มมากขึ้นจะทำให้การเคลื่อนของประจุบวกและลบเพิ่มมากขึ้น สำหรับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Nonpolar Molecule) จะไม่มีการจัดเรียงกันเป็นไดโพล จนกว่าจะมีการใส่สนามไฟฟ้าเข้าไป ประจุทั้งบวกและลบจะเคลื่อนไปในทิศทางตรงกันข้าม ตามทิศทางที่สวนกับการเหนี่ยวนำโดยสนาม และทำให้เกิดไดโพลขึ้น ซึ่งจะถูกจัดเรียงกันไปตามสนามไฟฟ้า [7]

สำหรับไดโพลไฟฟ้า หรือ ไดโพล นั้นเป็นการเรียกลักษณะของประจุจุดคู่หนึ่งที่มีขนาดเท่ากัน แต่มีเครื่องหมายตรงกันข้าม วางห่างกันด้วยระยะใกล้เคียงกันมาก เมื่อเทียบกับระยะจากประจุทั้งสองไปยังจุด  $P$  ที่เป็นจุดที่ต้องการหาค่าสนามและศักย์ไฟฟ้า ประจุไดโพลดังแสดงในรูปที่ 2.1 ระยะห่างจากประจุทั้งสองถึงจุด  $P$  อธิบายได้โดยอาศัยพิกัดทรงกลม  $r, \theta$  และ  $\phi = 90^\circ$  ซึ่งอยู่ในมุมมองที่สมมาตรตามแนวราบ ประจุบวกและลบทั้งสองมีระยะห่างต่อกัน  $d$  และมีพิกัดฉากเป็น  $(0, 0, d/2)$  และ  $(0, 0, -d/2)$  ตามลำดับ

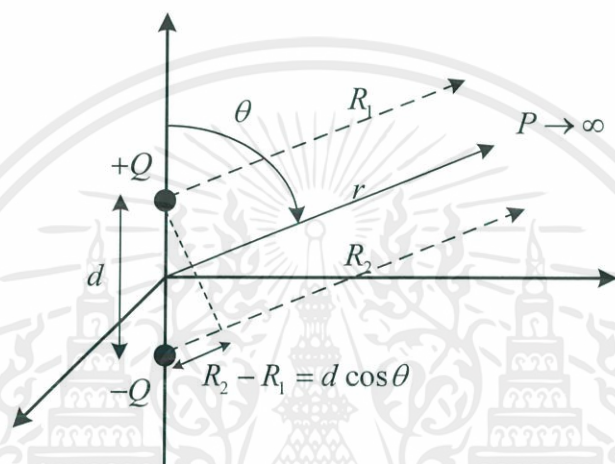


รูปที่ 2.1 ไดโพลจากจุดประจุคู่เครื่องหมายตรงข้าม

จากโครงสร้างดังกล่าวเราสามารถหาผลรวมของความเข้มสนามไฟฟ้า โดยการรวมค่าของสนามที่ได้จากประจุที่ละจุดประจุเข้าด้วยกัน หรือหาค่าศักย์ไฟฟ้าก่อนเป็นอย่างไร โดยเป็นวิธีที่ง่ายกว่าแบบแรก ทั้ง 2 กรณีต่างก็สามารถนำมาหาค่าหนึ่งจากอีกค่าหนึ่งได้เช่นกัน ซึ่งในกรณีนี้เราเลือกที่จะคำนวณศักย์ไฟฟ้าก่อนซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายกว่า เนื่องจากเราสามารถที่จะหาศักย์ไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งของแต่ละประจุก่อน แล้วจึงนำมารวมกันในเชิงปริมาณสเกลาร์ขนาดและทิศทางของเวกเตอร์  $\vec{E}$  ที่ขึ้นกับตำแหน่งที่พิจารณานั้นจะคำนวณได้ง่าย โดยการใช้ค่าลบของเกรเดียนต์  $V$  ซึ่งทางเลือกนี้นับว่าเป็นวิธีที่ง่ายกว่าโดยจะให้ระยะห่างจากประจุ  $Q$  และ  $-Q$  ไปยังจุด  $P$  เป็น  $R_1$  และ  $R_2$  ตามลำดับแล้วเขียนค่าศักย์ไฟฟ้าวรรวมได้เป็น

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{R_2 - R_1}{R_1 R_2} \right) \quad (2.1)$$

พิจารณาที่ระนาบ  $z=0$  เป็นจุดกึ่งกลางระหว่างประจุทั้งสอง และเป็นจุดที่อยู่ในแนวซึ่ง  $R_1 = R_2$  เสมอ ดังนั้นจึงมีศักย์ไฟฟ้ารวมเป็นศูนย์ที่ทุกๆ จุดตามแนวนี้จนถึงระยะอนันต์ สำหรับที่ระยะซึ่งเป็นจุดที่  $R_1 = R_2$  และผลคูณ  $R_1 R_2$  ที่เป็นตัวหารอาจจะแทนได้ด้วย  $r^2$  อย่างไรก็ดี เทอมของตัวส่วนไม่อาจจะประมาณค่าได้ เพื่อป้องกันไม่ให้ความผิดพลาดเกิดขึ้นในคำตอบเมื่อศักย์ไฟฟ้ามีค่าเข้าใกล้ศูนย์ในขณะที่เราพิจารณาที่ระยะไกลมากจากประจุใดโพล เมื่อกลับมาพิจารณาที่ประจุคู่ใดโพล จะเห็นได้จากรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ไดโพลจุดประจุคู่พิจารณาที่ระยะไกล

ซึ่ง  $R_2 - R_1$  อาจสามารถประมาณค่าอย่างง่ายโดยสมมติให้  $R_1$  และ  $R_2$  ขนานกันซึ่งจะได้

$$R_2 - R_1 = d \cos \theta \quad (2.2)$$

และจะได้ผลลัพธ์ของสมการ (2.1) เป็น

$$V = \frac{Qd \cos \theta}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (2.3)$$

สำหรับสนามไฟฟ้า จะพบว่าที่ระนาบ  $z=0$  ( $\theta=90^\circ$ ) เป็นระนาบที่ศักย์มีค่าเป็นศูนย์โดยการใช้ความสัมพันธ์ทางเกรเดียนต์ในระบบพิกัดทรงกลม

$$\vec{E} = -\nabla V = -\left( \frac{\partial V}{\partial r} \cdot \vec{a}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \cdot \vec{a}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi} \cdot \vec{a}_\phi \right) \quad (2.4)$$

จะได้ว่า

$$\bar{E} = \frac{Qd}{4\pi\epsilon_0 r^3} (2 \cos \theta \cdot \bar{a}_r + \sin \theta \cdot \bar{a}_\theta) \quad (2.5)$$

จากสนามศักย์ไฟฟ้าของไดโพลตามสมการที่ (2.3) ซึ่งสามารถเขียนให้ง่ายขึ้น โดยการนิยามไดโพลโมเมนต์ (Dipole Moment) ขึ้นมาใช้งาน ในขั้นตอนแรกกำหนดเวกเตอร์ระยะห่างระหว่างประจุไดโพลที่มีทิศทางจาก  $-Q$  ถึง  $+Q$  เป็น  $d$  แล้วกำหนดให้ไดโพลโมเมนต์เป็น  $Qd$  โดยใช้สัญลักษณ์แทนด้วย  $\bar{P}$  ดังนี้

$$\bar{P} = Q\bar{d} \quad (2.6)$$

ถ้าในปริมาตร 1 หน่วยมีจำนวนไดโพลอยู่  $n$  ไดโพล จะพบว่าภายในปริมาตร  $\Delta v$  จะมีจำนวนไดโพลทั้งหมด  $n\Delta v$  ไดโพล ไดโพลโมเมนต์ทั้งหมดที่ได้เป็นผลรวมทางเวกเตอร์ดังนี้

$$\bar{P}_{total} = \sum_{i=1}^{n\Delta v} \bar{P}_i \quad (2.7)$$


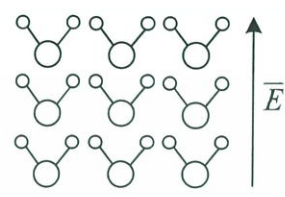



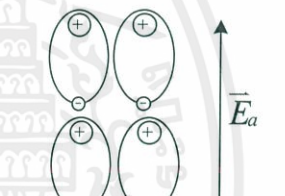
ถ้าไดโพลทั้งหมดถูกจัดเรียงในทิศทางเดียวกัน  $\bar{P}_{total}$  จะมีค่าขึ้นกับปริมาตรที่พิจารณา อย่างไรก็ตามในการจัดเรียงแบบไม่เป็นระเบียบ ก็ยังคงเป็นผลทำให้  $\bar{P}_{total}$  มีค่ารวมเป็นศูนย์

อันดับต่อไปจะเป็นการนิยามให้ การโพลาไรซ์ (Polarization)  $\bar{P}$  คือจำนวนไดโพลโมเมนต์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคือ

$$\bar{P} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta v} \sum_{i=1}^{n\Delta v} \bar{P}_i \quad (2.8)$$

ซึ่งมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อตารางเมตร เราจัดการให้  $\bar{P}$  เป็นเสมือนสนามแบบสม่ำเสมอ ถึงแม้ว่ามันจะเป็นส่วนประกอบที่ไม่สามารถกำหนดออกมาได้อย่างชัดเจน ณ จุดใดจุดหนึ่งภายในอะตอมหรือโมเลกุลใดๆ ก็ตาม และพึงระลึกไว้ว่าค่าของมันที่จุดใดๆ เป็นค่าเฉลี่ยใจปริมาตรที่ลู่ขึ้นมาปริมาตรหนึ่งโดยให้เป็น  $\Delta v$  ที่มีขนาดใหญ่เพียงพอสำหรับเป็นที่อยู่ของโมเลกุลจำนวนหนึ่ง (มีจำนวนโมเลกุลเป็น  $n\Delta v$ ) แต่ก็ควรมีขนาดเล็กพอที่จะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าภายในปริมาตรนั้นได้

โดยที่ค่าการโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นสำหรับไดอิเล็กตริกนั้นสามารถเกิดจากกลไกพื้นฐานทั้งหมด 3 แบบ ดังรูปที่ 2.3

กลไกตามสนามไฟฟ้า	ปราศจากสนามจากภายนอก	มีสนามจากภายนอกมากกระทำ
ไดโพล		
ไอออนิก		
อิเล็กตรอนิกส์		

รูปที่ 2.3 กลไกจากสนามไฟฟ้าในสารไดอิเล็กตริก

1. ไดโพล หรือ การโพลาไรซ์เชิงการวางตัว เกิดกับวัสดุที่มีไดโพลแบบถาวรถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามจากภายนอกเข้ามากระทำ และมักจะมีทิศทางของโพลาไรซ์แบบสุ่ม อย่างไรก็ตามเมื่อมีสนามจากภายนอกเข้ามากระทำ ไดโพลถาวรเหล่านี้จะวางตัวตามทิศทางของสนาม วัสดุประเภทนี้เป็นวัสดุประเภทที่มีขั้ว เช่น น้ำ เป็นต้น

2. ไอออนิก การโพลาไรซ์เชิงโมเลกุล โพลาไรเซชันประเภทนี้พบในวัสดุที่มีสภาพโมเลกุลที่มีพันธะแบบไอออนิก เช่น เกลือ ซึ่งมีอะตอมที่มีประจุบวกและลบ เมื่อมีสนามเข้ามากระทำจากภายนอกโมเลกุลเหล่านี้จะวางตัวตามทิศทางของสนาม

3. การโพลาไรซ์เชิงอิเล็กตรอนิกส์ เป็นโพลาไรเซชันที่พบได้บ่อยในวัสดุทั่วไป เนื่องจากโมเลกุลของวัสดุมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ทำให้เกิดโพลาไรซ์เฉพาะเมื่อมีสนามจากภายนอกเข้า

มากระทำ โดยโพลาริเซชันแบบนี้เกิดจากกลุ่มของอิเล็กตรอน (Electron Cloud) ทำการเลื่อนจุดศูนย์กลางของกลุ่มสัมพันธ์กับทิศทางของสนาม [8]

อันดับต่อไปจะเป็นการแสดงถึงความหนาแน่นของประจุยึดเหนี่ยวในปริมาตรหนึ่ง ส่งผลต่อการกระทำได้เช่นเดียวกับความหนาแน่นประจุอิสระในปริมาตรหนึ่งที่เป็นแหล่งกำเนิดสนามภายนอก เราจะได้ผลลัพธ์คล้ายกับที่ได้จากกฎของเกาส์ การกำหนดค่าลงไปนี้ เราต้องสมมติให้ไดอิเล็กตริกมีโมเลกุลที่ไม่มีโมเลกุลที่ไม่มีการเรียงขั้ว ไม่มีโมเลกุลใดมีไดโพลโมเมนต์ และ  $\vec{P} = 0$  ตลอดทั้งเนื้อสาร ณ ที่ใดๆ ภายในปริมาตรไดอิเล็กตริกหนึ่งๆ เมื่อเลือกพื้นที่ผิวเล็กๆ ค่าหนึ่งเป็น  $\Delta\vec{S}$  แล้วใส่สนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  เข้าไป สนามไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์  $\vec{P} = Q\vec{d}$  ในแต่ละโมเลกุล และถ้าให้ความหมายของ  $\Delta\vec{S}$  เป็นปริมาณเวกเตอร์ของผิวปิดภายในสารไดอิเล็กตริกแล้ว  $\Delta\vec{S}$  จะมีทิศทางพุ่งออกและจำนวนประจุที่เป็นประจุยึดเหนี่ยวรวมที่เพิ่มขึ้นภายในผิวปิดนี้หาได้จากการอินทิเกรตภายในผิวนั้น

$$Q_b = -\oint_S \vec{P} \cdot d\vec{S} \quad (2.9)$$

สมการข้างต้นนี้มีส่วนที่เกี่ยวข้องกับกฎของเกาส์ ดังนั้นเราจึงต้องสร้างนิยามสำหรับความหนาแน่นฟลักซ์ขึ้นมาใหม่ เพื่อนำไปใช้กับตัวกลางอื่นๆ ที่ไม่ใช่ที่ว่างอิสระ โดยเริ่มจากการเขียนกฎของเกาส์ในเทอมของ  $\epsilon_0 \vec{E}$  และ

$Q_T$  ซึ่งเป็นประจุทั้งหมดที่รวมทั้งประจุยึดเหนี่ยวและประจุอิสระที่อยู่ภายในคือ

$$Q_T = \oint_S \epsilon_0 \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $Q_T = Q_b + Q$  และ  $Q$  คือประจุอิสระรวมภายในผิวปิด  $S$  จะเห็นว่าประจุอิสระไม่มีตัวห้อย เนื่องจากว่าเป็นประจุชนิดที่มีความสำคัญมากและจะปรากฏอยู่ในสมการชุดของแมกซ์เวลล์ จากนั้นจะได้สมการสำหรับประจุอิสระภายในผิวปิดเป็น

$$Q = Q_T - Q_b = \oint_S (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) \cdot d\vec{S} \quad (2.11)$$

และสามารถกำหนดด้วยความสัมพันธ์ของความหนาแน่นฟลักซ์  $D$  เข้ากับสมการข้างต้นได้เป็น

$$\bar{D} = \epsilon_0 \bar{E} + \bar{P} \quad (2.12)$$

ซึ่งก็คือการนำเทอม  $\bar{D}$  ผสมเข้ากับสมการที่ใช้กับสารที่มีปรากฏการณ์โพลาไรซ์ภายใน ดังนั้น

$$Q = \oint_S \bar{D} \cdot d\bar{S} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $Q$  เป็นประจุอิสระที่อยู่ภายใน ถ้าแยกแยะตามชนิดของความหนาแน่นประจุแบบต่างๆ ในปริมาตรที่พิจารณาจะได้

$$Q_b = \int_V \rho_b dv \quad (2.14)$$

$$Q = \int_V \rho_v dv \quad (2.15)$$

$$Q_T = \int_V \rho_T dv \quad (2.16)$$

จากทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์จะทำให้แปลงสมการที่ (2.9), (2.10) และ (2.13) อยู่ในรูปแบบสมการความสัมพันธ์ทางไดเวอร์เจนซ์ได้เป็น

$$\nabla \cdot \bar{P} = -\rho_b \quad (2.17)$$

$$\nabla \cdot \epsilon_0 \bar{E} = \rho_T \quad (2.18)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho_v \quad (2.19)$$

การนำหลักการไปใช้งานจริงนั้น เราจำเป็นต้องทราบถึงความสัมพันธ์ของความเข้มสนามไฟฟ้า  $\bar{E}$  และโพลาไรเซชัน  $\bar{P}$  ก่อนว่าเป็นอย่างไร ความสัมพันธ์นี้ต้องเป็นฟังก์ชันของชนิดเนื้อสาร แต่จะจำกัดขอบเขตการวิเคราะห์ให้อยู่เฉพาะในกลุ่มของสารพวกไอโซทรอปิก (isotropic) หรือพวกที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง ซึ่งเป็นสารพวกที่มี  $\bar{E}$  และ  $\bar{P}$  ขึ้นแก่กันอย่างเชิงเส้น ในสารไอโซทรอปิกนี้เวกเตอร์ของ  $\bar{E}$  และ  $\bar{P}$  จะขนานกันไปเสมอซึ่งเป็นไปตามการจัดทิศทางของสนามเอง เนื่องจากว่างานทางวิศวกรรมทั่วไปมักใช้สารไดอิเล็กตริกที่เป็นเชิงเส้น การใส่สนามที่มีความ

เข้มพอประมาณจึงมีคุณสมบัติเป็นทิศทางเดียว แต่สารโครงสร้างผลึกเดี่ยวอาจจะเป็นสารแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) หรือมีคุณสมบัติขึ้นกับทิศทาง เนื่องจากโครงสร้างของสารจะมีโครงสร้างที่ซ้ำกันเป็นช่วงไปในเนื้อสาร ซึ่งเป็นผลให้ไดโพลโมเมนต์จัดเรียงตัวกันตามแกนของผลึกได้ง่ายกว่า แต่อาจจะไม่เรียงกันตามทิศทางของสนามที่ใส่เข้าไปก็ได้ [7]

สารจำพวกเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) หรือสารที่จ่ายสนามไฟฟ้าได้เองในตัวนั้น มีความสัมพันธ์ระหว่าง  $\vec{E}$  กับ  $\vec{P}$  ไม่เพียงแต่จะไม่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น แต่ยังปรากฏผลของฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ด้วย นั่นก็คือการโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นจากความเข้มสนามที่ใส่เข้าไป จะขึ้นกับค่าที่ค้างอยู่ภายในสารนั้นด้วย โดยความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่าง  $\vec{E}$  และ  $\vec{P}$  คือ

$$\vec{P} = X_e \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $X_e$  (chi) เป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย เรียกว่า อิเล็กตริกซัสเซพทิบิลิตี หรือ สภาพภูมิไวทางไฟฟ้า (Electric Susceptibility) ของสาร และจากสมการที่ (2.12) จะได้

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + X_e \epsilon_0 \vec{E} = (X_e + 1) \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.21)$$

ซึ่งสามารถที่จะนิยามความสัมพันธ์ภายในวงเล็บใหม่ให้เป็น

$$\epsilon_r = X_e + 1 \quad (2.22)$$

เป็นปริมาณอีกค่าหนึ่งที่ไม่มีหน่วยเช่นกันและต่อมาเรียกกันว่า ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) หรือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) ของสารตัวกลาง ดังนั้น

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon \vec{E} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$  ซึ่ง  $\epsilon$  ก็คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity) ของสาร

สารไดอิเล็กทริกแอนไอโซทรอปิกที่ไม่ใช่สารเนื้อเดียว ไม่สามารถเขียนบรรยายในเทอมของสภาพภูมิไวทางไฟฟ้า หรือความยินยอมไฟฟ้าอย่างง่ายได้ เราพบว่าแต่ละส่วนประกอบของ  $\vec{D}$  เป็นฟังก์ชันของทุกส่วนประกอบของ  $\vec{E}$  และ  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$  มีลักษณะเป็นสมการเมทริกซ์ ซึ่งแต่ละ

ส่วนประกอบของ  $\vec{D}$  และ  $\vec{E}$  เป็นเมทริกซ์แถวตั้งขนาด  $3 \times 1$  และ  $\epsilon$  เป็นเมทริกซ์จัตุรัสขนาด  $3 \times 3$  เมื่อเขียนอยู่ในรูปแบบขยายตามสมการเมทริกซ์จะได้เป็น

$$D_x = \epsilon_{xx}E_x + \epsilon_{xy}E_y + \epsilon_{xz}E_z \quad (2.24)$$

$$D_y = \epsilon_{yx}E_x + \epsilon_{yy}E_y + \epsilon_{yz}E_z \quad (2.25)$$

$$D_z = \epsilon_{zx}E_x + \epsilon_{zy}E_y + \epsilon_{zz}E_z \quad (2.26)$$

ซึ่งจะสังเกตได้ว่าแต่ละส่วนประกอบของเมทริกซ์จะมีค่าขึ้นกับการเลือกแนวแกนของพิกัดในสารที่ไม่ใช่สารเนื้อเดียว การเลือกแกนที่แน่นอนจะทำให้ได้เมทริกซ์อย่างง่ายอันหนึ่ง

เนื่องจาก  $\vec{D}$  และ  $\vec{E}$  (รวมถึง  $\vec{P}$ ) อาจจะไม่ขนานกันเสมอไป ถึงแม้ว่า  $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$  จะเป็นสมการที่ใช้ได้กับสารที่ไม่เป็นสารเนื้อเดียวกก็ตาม เรายังคงใช้  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$  เท่านั้น โดยแปรความหมายสมการให้เป็นสมการแบบเมทริกซ์ แต่จะเน้นไปที่พวกสารเนื้อเดียวแบบเชิงเส้นเท่านั้น จากข้อมูลข้างต้นทำให้เราสามารถรวบรวมสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $\vec{D}$  กับ  $\vec{E}$  ที่แปรไปตามสารได้อิเล็กตริกได้เป็น

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$  และความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้านี้ยังคงมีค่าขึ้นกับประจุอิสระ ทั้งที่เป็นความสัมพันธ์แบบจุดหรือแบบอินทิกรัลจากกฎของเกาส์คือ

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (2.28)$$

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q \quad (2.29)$$

## 2.2.2 สมบัติของไดอิเล็กตริก

เราสามารถแบ่งองค์ประกอบของไดอิเล็กตริกได้สององค์ประกอบได้แก่ หนึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) และ สองตัวประกอบสูญเสียของไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss Factor) โดยค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon'$ ) แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการกักเก็บพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า และ ตัวประกอบสูญเสียของค่าไดอิเล็กตริก ( $\epsilon''$ ) แสดงถึงความสามารถของวัสดุใน

การเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นความร้อน ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและตัวประกอบสูญเสียของไดอิเล็กตริกนี้มีความสำคัญในการบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและวัสดุที่เป็นไดอิเล็กตริก [5]

ขณะที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในวัสดุที่เป็นไดอิเล็กตริก อัตราการส่งผ่านพลังงานจะลดลงและยิ่งในวัสดุที่มีค่าตัวประกอบสูญเสียสูงจะมีการลดลงของกำลังงานอย่างรวดเร็วเนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่สามารถที่จะแทรกซึมผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกไปได้ลึกมาก ซึ่งปัจจัยที่สามารถบ่งชี้ถึงความสามารถในการซึมผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางวัสดุไดอิเล็กตริกก่อนที่จะลดลงนั้นคือค่า ความลึกของกำลังที่แทรกผ่าน (Power Penetration Depth ( $\delta_p$ )) ซึ่งถูกนิยามจากความสามารถของกำลังงานที่ซึมผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกและมีค่ากำลังลดลงไป  $1/e$  หรือ 36.8% จากจุดเริ่มต้นโดยความสามารถในการซึมผ่านนี้ขึ้นกับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและตัวประกอบสูญเสียของวัสดุตั้งสมการ

$$\delta_p = \frac{\lambda_0}{2\pi\sqrt{2\varepsilon'}} (\sqrt{1 + (\varepsilon''/\varepsilon')^2} - 1)^{\frac{1}{2}} \quad (2.30)$$

อันดับต่อไปเราจะทำความเข้าใจกับผลกระทบระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและของเหลวเนื่องจากเราได้ให้ความสนใจกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสารละลายเป็นหลัก ดังนั้นองค์ประกอบสำคัญสำหรับของสารละลายที่เป็นของเหลวนี้ได้แก่น้ำ ซึ่งน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยวางอยู่บนพื้นฐานของกลไกที่เกี่ยวกับการหมุนของไดโพลโมเลกุล เนื่องจากโมเลกุลของน้ำนั้นมีโครงสร้างแบบโมเลกุลที่มีขั้วถาวร (Permanent Dipole) โดยเรามักจะพบโครงสร้างของน้ำในสองลักษณะได้แก่น้ำที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบอิสระเรียกว่า น้ำอิสระ (Free Water) และน้ำยึดเหนี่ยว (Bound Water) ซึ่งน้ำอิสระพบได้ในของเหลวทั่วไปที่มีลักษณะทางกายภาพเป็นของไหล แต่น้ำยึดเหนี่ยวเป็นโครงสร้างที่พบได้ในอาหารแห้งหรือวัสดุที่ถูกทำให้แห้งซึ่งโครงสร้างน้ำยึดเหนี่ยวนั้นไม่สามารถแยกจากวัสดุนั้นได้ เนื่องจากมีพันธะที่ร่วมกันอย่างเหนียวแน่น และจากปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการสูญเสียของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในวัสดุซึ่งก็คือค่าตัวประกอบสูญเสียนั้น ขึ้นกับค่าของน้ำอิสระและน้ำยึดเหนี่ยว หากแต่ว่าในย่านความถี่คลื่นไมโครเวฟที่เราให้ความสนใจนั้น น้ำยึดเหนี่ยวมีผลกระทบน้อยมากจึงทำให้สามารถตัดออกจากการวิเคราะห์ที่ได้คงเหลือแต่น้ำอิสระ ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของน้ำอิสระนั้นได้ถูกทำนายด้วยโมเดลของเดอบายน์ (Debye Models) ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียนั้นแปรตามความสัมพันธ์ของความยาวคลื่น และ อุณหภูมิ ดังนี้

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{1 + (\lambda_s / \lambda)^2} + \varepsilon_0 \quad (2.31)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0 (\lambda_s / \lambda)}{1 + (\lambda_s / \lambda)^2} \quad (2.32)$$

ซึ่ง  $\varepsilon_s$  คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสถิต  $\varepsilon_0$  คือค่าไดอิเล็กตริกทางแสง  $\lambda$  คือความยาวคลื่นของน้ำ และ  $\lambda_s$  คือค่าความยาวคลื่นวิกฤติของตัวถูกละลายที่มีขั้ว

### 2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสารละลาย

สืบเนื่องจากองค์ประกอบหลักของสารละลายนั้นประกอบไปด้วยโมเลกุลของน้ำอิสระ ซึ่งน้ำมีโมเลกุลเป็นลักษณะที่มีขั้วแบบถาวร (Permanent Dipole) ทำให้กลไกหลักที่เกิดขึ้นได้แก่การหมุนของโมเลกุลของไดโพล ซึ่งก่อนที่จะมีสนามจากภายนอกเข้ามากระทำสารละลายนั้น ไดโพลโมเมนต์รวมภายในเท่ากับศูนย์เนื่องจากการวางตัวของไดโพลที่มีลักษณะเป็นแบบสุ่ม (Randomly) ทำให้โพลาริซัลพัธ์เท่ากับศูนย์ แต่ภายหลังจากที่มีสนามจากภายนอกเข้ามากระทำโมเลกุลจะเกิดการวางตัวตามแนวสนามที่เข้ามากระทำดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะทางกายภาพของโมเลกุลไดโพลที่มีต่อสนามไฟฟ้า

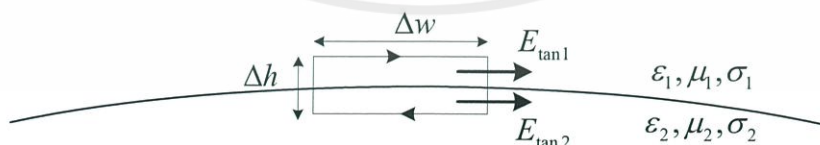
จากสภาวะดังกล่าวทำให้เสถียรภาพของโมเลกุลลดลง ทำให้โมเลกุลต้องกักเก็บพลังงานที่ผ่านเข้ามาเพื่อนำไปใช้ในการต้านการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากก่อนที่จะมีสนามเข้ามากระทำนั้นโมเลกุลอยู่ในสภาวะที่มีเสถียรภาพสูงอยู่ แต่ภายหลังจากเกิดสนามเข้ามากระทำจะส่งผลให้เสถียรภาพนั้นลดลง และต้องมีการต่อต้าน ดังนั้นความสามารถในการดูดซับพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปรตามจำนวนขั้วของไดโพลที่สูญเสียเสถียรภาพไป ถ้าหากมีไดโพลที่สูญเสียเสถียรภาพมากก็จะเกิดการดูดซับพลังงานมากแต่หากไดโพลนั้นมีน้อยก็จะเกิดการดูดซับน้อยลง [3]

สืบเนื่องจากสารละลายดังกล่าวประกอบไปด้วยน้ำและน้ำตาล ทำให้ความสำคัญของน้ำตาลที่ละลายอยู่ในน้ำนั้นส่งผลต่อพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแต่สารละลาย เนื่องจากน้ำตาลที่ละลายอยู่ในน้ำนั้นส่งผลต่อพันธะของน้ำที่เกิดในสารละลาย โดยโมเลกุลของน้ำอิสระนั้นจะมีการเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่มีเสถียรภาพสูงอันเนื่องมาจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลน้ำ ซึ่งพันธะไฮโดรเจนนี้จะส่งผลต่อค่าคุณลักษณะของไดอิเล็กตริก อันตีความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านไมโครเวฟที่มีต่อสารละลายนั้นขึ้นอยู่กับพันธะไฮโดรเจน ซึ่งกลูโคสนั้นมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากที่พร้อมจะก่อให้เกิดพันธะไฮโดรเจน ทำให้ตัวประกอบสูญเสียของไดอิเล็กตริกนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น หากแต่ว่าพฤติกรรมของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกนั้นมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป เนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกนั้นขึ้นอยู่กับสภาพของโมเลกุลไดโพลของน้ำอิสระที่อยู่ในสารละลายมากกว่า ซึ่งถ้าหากมีโมเลกุลของไดโพลจำนวนมากก็จะส่งผลให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกมีค่ามากขึ้น และหากจำนวนโมเลกุลของไดโพลนั้นลดลง จะส่งผลให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกลดลงตามลำดับ ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสารละลายที่เพิ่มความเข้มข้นได้ว่า สารละลายที่มีความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้มีโมเลกุลของไดโพลนั้นลดลงอันเนื่องมาจากหมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคสได้ก่อพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลน้ำ จากโมเลกุลไดโพลที่ลดลงจะส่งผลให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกลดลง จากนั้นเมื่อเกิดพันธะไฮโดรเจนมากขึ้น ก็จะส่งผลให้ค่าตัวประกอบสูญเสียมีค่ามากขึ้นตามค่าเสถียรภาพของพันธะไฮโดรเจน

#### 2.2.4 เงื่อนไขขอบเขตรอยต่อสำหรับไดอิเล็กตริกสมบурณ์

สำหรับการวิเคราะห์ในสารไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน 2 ชนิดวางติดกัน หรืออาจจะเป็นสารไดอิเล็กตริกกับตัวนำ ซึ่งการแก้ปัญหาโจทย์นั้นจะต้องมีเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) เข้ามาร่วมแก้ไขด้วย เริ่มต้นด้วยการพิจารณาผิวสัมผัสระหว่างไดอิเล็กตริก 2 ชนิดที่มีค่าความยินยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เป็น  $\epsilon_1$  และ  $\epsilon_2$  ในบริเวณของสารชนิดแรกและสารชนิดที่สองตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แล้วทำการคำนวณส่วนประกอบสนามในแนวขนาดโดยใช้

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{L} = 0 \quad (2.33)$$



รูปที่ 2.5 ผิวสัมผัสระหว่างรอยต่อสารไดอิเล็กตริกสมบурณ์ 2 ชนิดในแนวสัมผัส

ซึ่งเมื่อเราทำการวนรอบเส้นทางปิดเล็กๆ ของรูปที่แสดงจะได้ผลลัพธ์เป็น

$$E_{\tan 1} \Delta w - E_{\tan 2} \Delta w = 0 \quad (2.34)$$

ส่วนของเส้นทางย่อยที่อินทิกรัลเชิงเส้นมีส่วนประกอบของ  $\vec{E}$  ในแนวตั้งฉากตามเส้นทางส่วนที่มีความยาว  $\Delta h$  ค่าที่ได้สามารถตัดทิ้งได้เพราะ  $\Delta h$  มีค่าลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ และเส้นทางปิดที่เวลานี้ก็คลุมอยู่ที่เฉพาะผิวสัมผัสเท่านั้นจึงทำได้

$$E_{\tan 1} = E_{\tan 2} \quad (2.35)$$

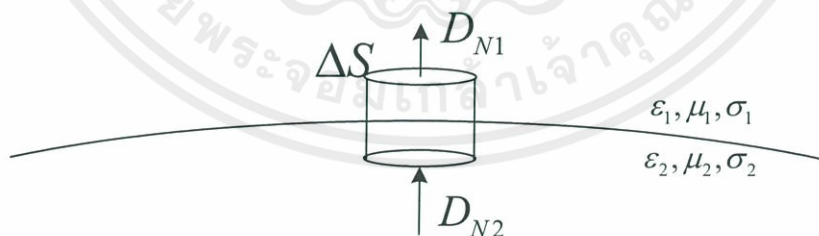
จะเห็นได้ว่าเราก็คงนำกฎแรงดันไฟฟ้าของเคิร์ชฮอฟฟ์มาประยุกต์ใช้ในกรณีนี้ได้ เป็นการแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ความต่างศักย์ระหว่างจุด 2 จุดที่ผิวสัมผัสที่ห่างกันด้วยระยะ  $\Delta w$  มีค่าเดียวกัน ทั้งที่เหนือผิวสัมผัสและที่ใต้ผิวสัมผัสที่รอยต่อ ซึ่งถ้าความเข้มสนามไฟฟ้าในแนวขนานมีความต่อเนื่องเมื่อข้ามผิวรอยต่อแล้ว  $\vec{D}$  ในแนวขนานจะไม่ต่อเนื่องอันเนื่องมาจาก

$$\frac{D_{\tan 1}}{\epsilon_1} = E_{\tan 1} = E_{\tan 2} = \frac{D_{\tan 2}}{\epsilon_2} \quad (2.36)$$

หรือ

$$\frac{D_{\tan 1}}{D_{\tan 2}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (2.37)$$

เงื่อนไขตรงผิวสัมผัสที่รอยต่อของส่วนประกอบสนามในแนวตั้งฉาก สามารถหาได้โดยใช้กฎของเกาส์กับกล่องเล็กๆ ที่แสดงไว้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ผิวสัมผัสระหว่างรอยต่อสารไดอิเล็กทริกสมบรูณ์ 2 ชนิดในแนวตั้งฉาก

โดยให้แต่ละด้านของกล่องมีขนาดเล็กมากและมีฟลักซ์พุ่งอยู่ทั้งทางด้านบนและทางด้านล่างของกล่องซึ่งจะมีค่าผลต่างเป็น

$$D_{N1}\Delta S - D_{N2}\Delta S = \rho_S\Delta S \quad (2.38)$$

ซึ่งจะได้  $D_{N1} - D_{N2} = \rho_S$

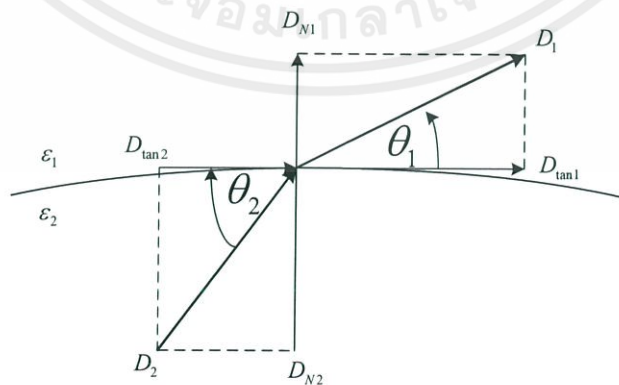
จากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงประจุที่ผิว ซึ่งแท้จริงแล้วไม่ควรจะมีความหนาแน่นประจุยึดเหนี่ยวที่ผิว อันเนื่องมาจากเราได้จัดการให้การโพลาไรซ์ของสารไดอิเล็กตริกที่ได้รับผลมาจากสนามไฟฟ้า แปรเป็นค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกที่ไม่ใช่หนึ่งไปแล้ว ซึ่งก็คือแทนที่เราจะพิจารณาว่ามีประจุยึดเหนี่ยวในสารไดอิเล็กตริก เราเปลี่ยนเป็นใช้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกแทน ผลเหมือนกับว่าไม่มีประจุอิสระบนผิวนั่นเอง เพื่อเป็นการพิจารณาว่าไม่มีประจุอิสระที่ผิวของสารไดอิเล็กตริกสมบูรณ์ ประจุที่ว่าจะต้องได้จากการใส่ประจุเพิ่มเข้าไป ดังนั้นจะเกิดความไม่สมดุลของค่าประจุรวมขึ้นภายในสารไดอิเล็กตริก เราสามารถสมมติให้  $\rho_S$  มีค่าเป็นศูนย์ที่ผิวสัมผัสได้ยกเว้นสำหรับกรณีพิเศษโดยเฉพาะกรณีนี้เท่านั้น ทำให้ได้เป็น

$$D_{N1} = D_{N2} \quad (2.39)$$

หรือสามารถเรียกได้ว่าส่วนประกอบของฟลักซ์ทางไฟฟ้ามีความต่อเนื่องซึ่งจะได้

$$\varepsilon_1 E_{N1} = \varepsilon_2 E_{N2} \quad (2.40)$$

ซึ่งจะพบว่าส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากจะไม่ต่อเนื่อง จากเงื่อนไขเหล่านี้เมื่อนำมาพิจารณาร่วมกัน จะแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์  $\vec{D}$  และ  $\vec{E}$  ที่ผิวสัมผัส ถ้าให้  $\vec{D}_1$  (และ  $\vec{E}_1$ ) วางมุมทำ  $\theta_1$  กับเส้นตั้งฉากของระนาบผิวสัมผัสดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การหักเหของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสระหว่างไดอิเล็กตริก 2 ชนิด

และเนื่องจากส่วนประกอบของ  $\bar{D}$  ในแนวตั้งฉากมีความต่อเนื่อง

$$D_{N1} = D_1 \cos \theta_1 = D_2 \cos \theta_2 = D_{N2} \quad (2.41)$$

อัตราส่วนของส่วนประกอบในแนวขนานโดยสมการที่ (2.23) จะมีค่าเป็น

$$\frac{D_{\tan 1}}{D_{\tan 2}} = \frac{D_1 \sin \theta_1}{D_2 \sin \theta_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$$

หรือ

$$\epsilon_2 D_1 \sin \theta_1 = \epsilon_1 D_2 \sin \theta_2 \quad (2.42)$$

เมื่อนำสมการนี้หารด้วยสมการที่ (2.26) จะได้

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (2.43)$$

จากรูปที่ 2.7 สมมุติว่า  $\epsilon_1 < \epsilon_2$  ดังนั้น  $\theta_1 > \theta_2$  ซึ่งทิศทางของ  $\bar{E}$  บนแต่ละด้านของผิวสัมผัสจะมีทิศเดียวกันกับ  $\bar{D}$  เนื่องจาก  $\bar{D} = \epsilon \bar{E}$  ส่วนขนาดของ  $\bar{D}$  ในบริเวณที่สองอาจหาได้โดยตรงจากสมการที่ (2.26) และ (2.27) คือ

$$D_2 = D_1 \sqrt{\cos^2 \theta_1 + \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}\right)^2 \sin^2 \theta_1} \quad (2.44)$$

และขนาดของ  $\bar{E}_2$  เป็น

$$E_2 = E_1 \sqrt{\sin^2 \theta_1 + \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right)^2 \cos^2 \theta_1} \quad (2.45)$$

จากการพิจารณาสมการข้างต้น จะพบว่า  $\bar{D}$  มีค่ามากกว่าในบริเวณที่มีค่าความยินยอมไฟฟ้าสูงกว่า (ยกเว้นกรณีที่  $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$  ซึ่งขนาดจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง) และ  $\bar{E}$  มีค่าสูงกว่าในบริเวณที่มีค่าความยินยอมทางไฟฟ้าต่ำกว่า (ยกเว้นกรณีที่  $\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ$  ซึ่งขนาดจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง)

ซึ่งจากเงื่อนไขรอยต่อและสมการความสัมพันธ์ของขนาดและทิศทางดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมด ทำให้เราสามารถหาสนามที่รอยต่อด้านใดด้านหนึ่งได้ หากเราทราบค่าสนามอีกด้านหนึ่ง [7]

สำหรับสารที่นำมาใช้งานทางฟิสิกส์นั้น เรามักจะไม่พบสารที่เป็นสารไดอิเล็กตริกที่ปราศจากประจุอิสระเลย เนื่องจากสารทั้งหมดมีค่าความนำไม่เป็นศูนย์ และประจุที่อยู่ภายในตัวกลางเหล่านั้นก็จะเคลื่อนออกมาที่ผิวในที่สุดทำให้เราต้องศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องเงื่อนไขขอบเขตตรงรอยต่อระหว่างตัวนำกับไดอิเล็กตริก เพื่อที่จะช่วยพิจารณาโจทย์และวิธีการแก้ปัญหาต่อไป โดยขั้นตอนแรก จากที่ทราบว่า  $\bar{D}$  และ  $\bar{E}$  เป็นศูนย์ทั้งคู่ภายในตัวนำ ขั้นที่สองคือสนามส่วนประกอบขนาน  $E$  และ  $D$  ก็จะต้องเป็นศูนย์ด้วยทั้งคู่ตามสมการ

$$\oint \bar{E} \cdot d\bar{L} = 0 \quad (2.46)$$

และ  $\bar{D} = \epsilon \bar{E}$  สุดท้ายใช้กฎของเกาส์

$$\oint_S \bar{D} \cdot d\bar{S} = Q \quad (2.47)$$

แสดงให้เห็นอีกครั้งว่าทั้ง  $\bar{D}$  และ  $\bar{E}$  ตั้งฉากกับผิวตัวนำ และ  $D_N = \rho_S$  กับ  $E_N = \rho_S / \epsilon$  เราจะเห็นว่าเงื่อนไขรอยต่อที่ได้พัฒนามาจากเงื่อนไขก่อนหน้า ได้นำมาใช้กับรอยต่อของตัวนำกับที่ว่างอิสระ สอดคล้องกับเงื่อนไขสำหรับรอยต่อของตัวนำกับไดอิเล็กตริกด้วย เพียงแต่แทน  $\epsilon_0$  ด้วย  $\epsilon$  เท่านั้น ดังนั้น

$$D_t = E_t = 0 \quad (2.48)$$

$$D_N = \epsilon E_N = \rho_S \quad (2.49)$$

และอาศัยกฎของโอห์ม

$$\bar{J} = \epsilon \bar{E} \quad (2.50)$$

และจากสมการความต่อเนื่องของกระแส (Continuity equation)

$$\nabla \cdot \bar{J} = -\frac{\partial \rho_v}{\partial t} \quad (2.51)$$

ซึ่งทั้ง  $\bar{J}$  และ  $\rho_v$  ต่างก็เป็นปริมาณที่ประกอบด้วยประจุอิสระ เราจะได้

$$\nabla \cdot \sigma \bar{E} = -\frac{\partial \rho_v}{\partial t} \quad (2.52)$$

หรือ

$$\nabla \cdot \frac{\sigma}{\epsilon} \bar{D} = -\frac{\partial \rho_v}{\partial t} \quad (2.53)$$

ถ้าสมมติว่าตัวกลางเป็นสารเนื้อเดียว ดังนั้น  $\sigma$  และ  $\epsilon$  จะไม่เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งที่วิเคราะห์ จะได้ว่า

$$\nabla \cdot \bar{D} = -\frac{\epsilon}{\sigma} \frac{\partial \rho_v}{\partial t} \quad (2.54)$$

ซึ่งเราจะใช้สมการของแมกซ์เวลล์เข้ามาช่วยจะได้

$$\rho_v = -\frac{\epsilon}{\sigma} \frac{\partial \rho_v}{\partial t} \quad (2.55)$$

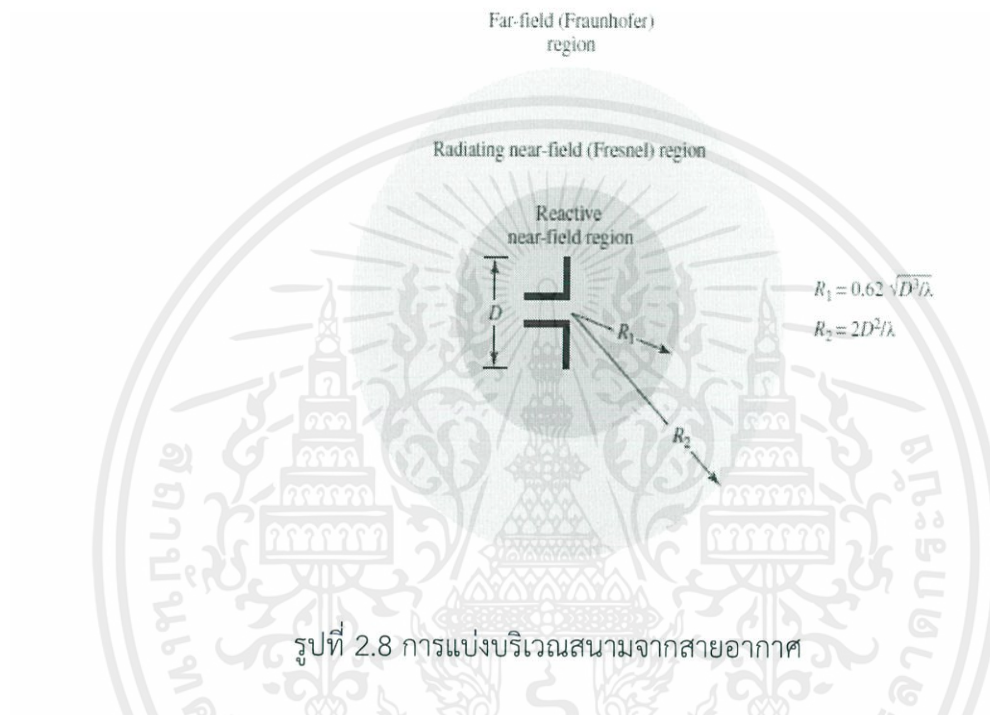
ต่อไปจะทำการสมมติว่า  $\sigma$  ไม่เป็นฟังก์ชันของ  $\rho_v$  ให้ชัดเจนมากขึ้นซึ่งแท้จริงแล้วสมมุติฐานนี้ไม่เป็นจริงเท่าไรเนื่องจากแท้จริงแล้ว  $\sigma$  แปรตามทั้ง  $\rho_v$  และความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) แต่การสมมุตินี้จะทำให้สมการอยู่ในรูปที่ง่ายขึ้นซึ่งอย่างน้อยจะทำให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างตัวนำต่างชนิดกันได้โดยเมื่ออินทิเกรตโดยตรงจะได้

$$\rho_v = \rho_0 e^{-(\sigma/\epsilon)t} \quad (2.56)$$

เมื่อ  $\rho_v =$  ความหนาแน่นประจุที่เวลา  $t=0$  สมการนี้แสดงว่า ความหนาแน่นประจุลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลทุกขณะที่เวลาเปลี่ยนไปด้วยค่าเวลาคงตัวเป็น  $\epsilon/\sigma$  ซึ่งมักจะเรียกกันว่า เวลาในการผ่อนคลายประจุ (Relaxation Time) อาจจะนำมาใช้คำนวณเพื่อแสดงความเป็นตัวนำชนิดดีหรือไม่ดีได้ [7]

## 2.3 บริเวณต่าง ๆ ของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปมักจะเป็นบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือ สนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive-near field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating-near field) และสนามกระจายระยะไกล (Far field) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



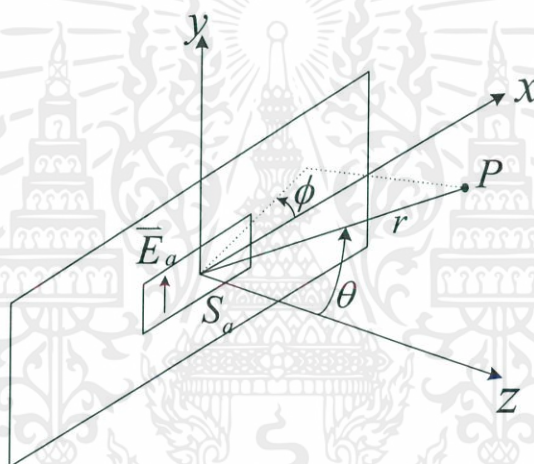
รูปที่ 2.8 การแบ่งบริเวณสนามจากสายอากาศ

### 2.3.1 บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive near-field region)

เป็นบริเวณที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และมีสนามเป็นชนิดแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ บริเวณนี้จะมีระยะทาง  $R < 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$  จากผิวของสายอากาศเมื่อ  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่น และ  $D$  เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ สำหรับการทดสอบไมโครเวฟเซนเซอร์ด้วยบริเวณดังกล่าวจะสามารถรับกำลังที่ผ่านตัวกลางที่มีการสูญเสียได้ดีกว่าการรับในบริเวณอื่น เนื่องจากระยะทางระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งมีระยะทางที่ต่ำที่สุด ทำให้เกิดการสูญเสียเฉพาะจากตัวกลางที่ทำการทดสอบ ซึ่งในบริเวณอื่นๆ จะเกิดการสูญเสียเนื่องจากระยะทางเพิ่มขึ้นอีก ปัญหาสำคัญสำหรับบริเวณสนามระยะใกล้ได้แก่การวิเคราะห์สนาม เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นสนามชนิดแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ดังที่ได้กล่าวไว้ ซึ่งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีองค์ประกอบที่ซับซ้อน จึงทำให้การวิเคราะห์ปัญหาในบริเวณสนามระยะใกล้มีความลำบาก ซึ่งสามารถกระทำได้สองวิธีได้แก่ การหาอินทิเกรตโดยตรงจากฟังก์ชันของกรีน (Green function) หรือการแปลงฟูริเยร์ด้วยวิธีโดเมนเชิงสเปคตรัม ซึ่งวิธีแรกนั้นจะกระทำได้ยากกว่าแต่สามารถไขว้วิเคราะห์ได้ครอบคลุม

ทุกปัญหาหาวิธีที่สอง ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายกว่าแต่จะจำกัดความสามารถในการวิเคราะห์สำหรับปัญหาที่ไม่ซับซ้อนมากนัก

เนื่องจากปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นปัญหาเกี่ยวกับสนามระยะใกล้ที่มีคลื่นเป็นลักษณะคลื่นทรงกลม ทำให้เราไม่สามารถใช้เงื่อนไขขอบเขตและความสัมพันธ์แบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในลักษณะแบบคลื่นระนาบได้ ทำให้ต้องแปลงจากคลื่นทรงกลมไปเป็นคลื่นระนาบก่อนด้วยความสัมพันธ์โดเมนเชิงสเปกตรัม ซึ่งพบว่าในโดเมนเชิงสเปกตรัมนี้มีคลื่นที่เป็นลักษณะคลื่นระนาบ โดยในเบื้องต้นจะทำการอธิบายถึงคุณลักษณะของการแปลงด้วยวิธีเชิงสเปกตรัมโดยใช้สนามที่แพร่จากช่องเปิด (Aperture) ด้วยวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมซึ่งจะทำการแปลงฟูรีเยร์ โดยการใช้คู่การแปลงฟูรีเยร์ในการทำนายคุณสมบัติของช่องเปิด [8] อันดับแรกจะทำการสมมติให้สนามไฟฟ้าที่ช่องเปิดมีค่าเป็น  $\vec{E}_a$  ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ช่องเปิดบนระนาบ  $z = 0$

จากรูปที่กำหนดให้สมมติเราทราบค่าสนามไฟฟ้าที่ช่องเปิดซึ่งอยู่ในระนาบ  $z = 0$  มีค่าเป็น  $\vec{E}_a$  จากนั้นเราต้องการหาสนามที่แพร่ในบริเวณ  $z > 0$  ซึ่งเราไม่จำเป็นต้องทราบรายละเอียดของต้นกำเนิดเพียงแค่ว่าทราบสนามที่เราทำการสมมติ  $\vec{E}_a$  นั้นก็เพียงพอ เนื่องจากสนามสมมติดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดสนามในบริเวณ  $z > 0$  เป็นต้นไป ในการแปลงรูปแบบของสมการคลื่นนี้ให้เป็นคลื่นระนาบ เราจะใช้การแปลงฟูรีเยร์แบบสองมิติ (2 Dimensional Fourier Transform) ซึ่งจากสมบัติการแปลงฟูรีเยร์ สมมติเรามีฟังก์ชันของทั้ง  $x$  และ  $y$  คือ  $w(x, y)$  เราจะสามารถแปลงฟูรีเยร์และแปลงฟูรีเยร์ผกผันได้ดังนี้

$$W(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(x, y) e^{jk_x x + jk_y y} dx dy \quad (2.57)$$

$$w(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(k_x, k_y) e^{-jk_x x - jk_y y} dk_x dk_y \quad (2.58)$$

และสำหรับการแปลงฟูริเยร์ของอนุพันธ์ของฟังก์ชันทางเวลา  $x(t)$  เทียบกับเวลาจะได้

$$F\left[\frac{dx(t)}{dt}\right] = j\omega(F[x(t)]) \quad (2.59)$$

จากสมการคลื่น (Wave Equation) เราสามารถเขียนสมการสนามไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\nabla^2 \bar{E} + k^2 \bar{E} = \nabla \times \bar{M}_i + j\omega \mu \bar{J}_i + \frac{1}{\epsilon} \nabla q_{ev} + j\omega \mu \sigma \bar{E} \quad (2.60)$$

ซึ่งเมื่อเราสมมติว่าที่แหล่งกำเนิดนั้นมี  $\bar{M}_i$ ,  $q_{ev}$  และ  $\sigma$  มีค่าเป็นศูนย์จะได้ว่า

$$\nabla^2 \bar{E} + k^2 \bar{E} = j\omega \mu \bar{J}_i \quad (2.61)$$

ในขณะที่

$$\nabla \cdot \bar{D} = \epsilon \nabla \cdot \bar{E} = q_{ev} \quad (2.62)$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$\nabla \cdot \bar{E} = \frac{q_{ev}}{\epsilon} \quad (2.63)$$

และเมื่อเราทำการพิจารณาในบริเวณ  $z > 0$  จะพบว่า  $\bar{J}_i = q_{ev} = 0$  ดังนั้นจากสมการที่กล่าวมาจะได้เป็น

$$\nabla^2 \bar{E} + k^2 \bar{E} = 0 \quad (2.64)$$

และ

$$\nabla \cdot \bar{E} = 0 \quad (2.65)$$

เมื่อกระจายสมการทั้งสองเราจะได้

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) \bar{E}(x, y, z) = 0 \quad (2.66)$$

และ

$$\frac{\partial E_x(x, y, z)}{\partial x} + \frac{\partial E_y(x, y, z)}{\partial y} + \frac{\partial E_z(x, y, z)}{\partial z} = 0 \quad (2.67)$$

จากนั้นทำการแปลงฟูรีเยร์เทียบกับ  $x$  และ  $y$  จะได้

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} + (k^2 + k_x^2 + k_y^2) \right] \bar{E}(k_x, k_y, z) = 0 \quad (2.68)$$

โดยที่  $\bar{E}(k_x, k_y, z)$  เป็นการแปลงฟูรีเยร์ของสนามไฟฟ้าเทียบกับ  $x$  และ  $y$  ในขณะที่สมการต่อมาได้เป็น

$$k_x E_x(k_x, k_y, z) + k_y E_y(k_x, k_y, z) + j \frac{\partial}{\partial z} E_z(k_x, k_y, z) = 0 \quad (2.69)$$

จากนั้นเราจะกำหนดให้

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \quad (2.70)$$

ซึ่งจะทำให้  $k_z^2$  เท่ากับ

$$k_z^2 = k^2 - k_x^2 - k_y^2 \quad (2.71)$$

สมการที่ (2.67) จะเท่ากับ

$$\frac{\partial^2 \bar{E}(k_x, k_y, z)}{\partial z^2} + k_z^2 \bar{E}(k_x, k_y, z) = 0 \quad (2.72)$$

ในกรณีดังกล่าวเราให้คลื่นเดินทางในทิศทาง  $z > 0$  ทำให้เราสามารถกำหนดพจน์  $e^{\pm jk_z z}$  ได้เหลือเป็น  $e^{-jk_z z}$  ทำให้เราสามารถทำนายคำตอบของสมการก่อนหน้าได้เป็น

$$\bar{E}(k_x, k_y, z) = \bar{f}(k_x, k_y) e^{-jk_z z} \quad (2.73)$$

เมื่อ  $\bar{f}(k_x, k_y)$  เป็นฟังก์ชันไม่ทราบค่า และเมื่อเราทำการแทนคำตอบที่ต้องการทราบค่าดังกล่าวลงไปในสมการที่ (2.68) จะทำให้ได้

$$k_x f_x + k_y f_y + k_z f_z = 0 \quad (2.74)$$

หรือ

$$\bar{k} \cdot \bar{f} = 0 \quad (2.75)$$

จากสมการดังกล่าวบ่งบอกให้ทราบว่า มีเฉพาะสองส่วนประกอบของเวกเตอร์  $\bar{f}$  เท่านั้นที่เป็นอิสระต่อกัน ซึ่งผลอันนี้จะส่งผลบังคับให้สนามไฟฟ้าถูกกำหนดโดยการที่ไดเวอร์เจนซ์มีค่าเป็นศูนย์ดังสมการที่ (2.64) และ (2.68)

จากนั้นเมื่อแปลงฟูรีเยร์ผกผันจะสามารถเขียนสนามไฟฟ้าดังนี้

$$\bar{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{f}(k_x, k_y) e^{-jk \cdot \bar{r}} dk_x dk_y \quad (2.76)$$

เมื่อ  $\bar{k} \cdot \bar{r} = k_x x + k_y y + k_z z$  ซึ่งเมื่อ  $z = 0$  ค่าส่วนประกอบ  $x$  และ  $y$  ของสนามไฟฟ้าต้องมีค่าเท่ากับสนามไฟฟ้าที่สัมผัสกับช่องเปิดซึ่งเรารู้ค่า ดังนั้นถ้าให้  $\bar{f}_x$  แทนส่วนประกอบของ  $x$  และ  $y$  ของ  $\bar{f}$  จะต้องได้ว่า

$$\bar{E}_a(x, y) = \bar{E}_{\tan}(x, y, 0) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{f}_i(k_x, k_y) e^{-jk_x x - jk_y y} dk_x dk_y \quad (2.77)$$

โดยเราสามารถคิดได้ว่าสมการข้างบนนี้เป็นการแปลงฟูรีเยร์ 2 มิติเพราะฉะนั้นถ้าแปลงฟูรีเยร์ ผกผันจะได้ว่า

$$\bar{f}_i(k_x, k_y) = \int \int_{S_a} \bar{E}_a(x, y) e^{jk_x x + jk_y y} dx dy \quad (2.78)$$

จะพบว่า  $\bar{f}_i$  มีค่าเป็นผลจากการแปลงฟูรีเยร์ของสนามบนช่องเปิดนั้น ซึ่งเราสามารถหา  $f_z$  ได้ว่า

$$f_z = \frac{\bar{k}_i \cdot \bar{f}_i}{k_z} = \frac{-k_x f_x - k_y f_y}{\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}} \quad (2.79)$$

ซึ่งเราสามารถหาค่าตอบของสนามไฟฟ้า ณ จุดสังเกตใดๆ ในบริเวณ  $z > 0$  ถ้าสามารถหาอินทิกรัลของการแปลงฟูรีเยร์ผกผันได้ซึ่งอาจทำได้ยาก

### 2.3.2 บริเวณแพร่กระจายคลื่นสนามระยะใกล้ (Radiating near-field/Fresnel region)

เป็นบริเวณของสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอดที่ระยะใกล้กับบริเวณแพร่กระจายคลื่นสนามระยะไกล โดยมีสนามที่แพร่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่การกระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ นั้นแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศ เมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น ในบริเวณนี้จะมีระยะทาง

$$0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R < \frac{2D^2}{\lambda}$$

### 2.3.3 บริเวณสนามระยะไกล (Far-field/Fraunhofer region)

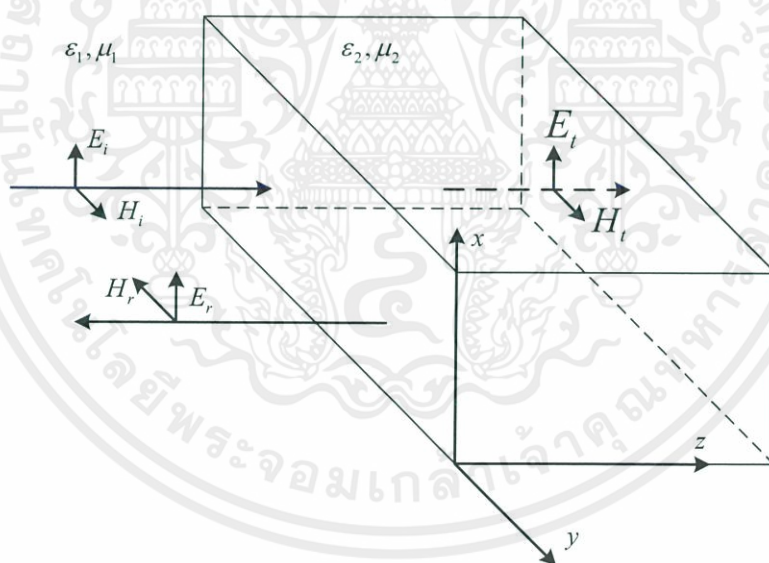
เป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ซึ่งการแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติที่ใหญ่ที่สุดเท่ากับ  $D$  บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง  $R$  มากกว่า  $\frac{2D^2}{\lambda}$  จากสายอากาศซึ่งในบริเวณนี้สนามมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางขอบในบริเวณดังกล่าวมีค่า  $R$  เท่ากับ  $\frac{2D^2}{\lambda}$  และขอบนอกมีค่าเป็นอนันต์ ซึ่งการทดสอบไมโครเวฟ เซนเซอร์ในบริเวณดังกล่าวจะสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายจาก

สายอากาศได้ไม่ยากนัก แต่การทดสอบในบริเวณดังกล่าว จะทำให้สายอากาศรับสามารถรับสัญญาณที่มีค่าต่ำ เนื่องจากการสูญเสียเนื่องด้วยระยะทาง รวมถึงการสูญเสียในตัวกลางซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถตรวจจับสัญญาณได้หรือได้ในปริมาณที่ต่ำมาก

สำหรับการวิเคราะห์ในบริเวณสนามระยะไกลนั้นจะแบ่งออกเป็นสองส่วนได้แก่ การสะท้อนและส่งผ่านรอยต่อระหว่างสองตัวกลางในกรณีที่เกิดการสูญเสีย ซึ่งเป็นการศึกษาพื้นฐานพฤติกรรมต่างๆ บริเวณรอยต่อโดยปราศจากการสูญเสียในตัวกลาง ซึ่งจะพัฒนาต่อไปเป็นการสะท้อนและส่งผ่านรอยต่อระหว่างสองตัวกลางในกรณีที่มีการสูญเสีย

### 2.3.3.1 การสะท้อนและส่งผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างสองตัวกลางโดยปราศจากการสูญเสีย

เราจะพิจารณาการสะท้อนของคลื่นที่เดินทางในตัวกลางที่ปราศจากการสูญเสีย (lossless) โดยการสมมติให้คลื่นที่ตกกระทบมีสนามไฟฟ้าที่มีขนาด  $E_0$  และมีทิศทางตามแนวแกน  $x$  ฝังอยู่ในตัวกลางแรกที่มีคุณสมบัติของตัวกลางเป็น  $\epsilon_1, \mu_1$  และ  $\eta_1$  จากนั้นจึงไปตกกระทบตัวกลางที่สองที่มีคุณสมบัติของตัวกลางเป็น  $\epsilon_2, \mu_2$  และ  $\eta_2$  [3] ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การสะท้อนและส่งผ่านที่รอยต่อระหว่างสองตัวกลางไดอิเล็กตริก

จะส่งผลให้สนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ  $\vec{E}_i$  สนามไฟฟ้าที่สะท้อน  $\vec{E}_r$  และสนามไฟฟ้าที่ส่งผ่าน  $\vec{E}_t$  เป็น

$$\bar{E}_i = E_0 e^{-jk_1 z} \bar{a}_x \quad (2.80)$$

$$\bar{E}_r = (\Gamma) E_0 e^{+jk_1 z} \bar{a}_x \quad (2.81)$$

$$\bar{E}_t = (T) E_0 e^{-jk_1 z} \bar{a}_x \quad (2.82)$$

เมื่อ  $\Gamma$  และ  $T$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่านตามลำดับ โดยในที่นี้เราจะทำการพิจารณาสนามไฟฟ้าเป็นหลัก ซึ่งเมื่ออาศัยความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์คลื่นดังสมการ

$$Z_w = \frac{E_x^+}{H_y^+} = -\frac{E_x^-}{H_y^-} = \eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.83)$$

เราสามารถอาศัยกฎมือขวาในการหาค่าประกอบของสนามแม่เหล็กได้เป็น

$$\bar{H}_i = \frac{E_0}{\eta_1} e^{-jk_1 z} \bar{a}_y \quad (2.84)$$

$$\bar{H}_r = -(\Gamma) \frac{E_0}{\eta_1} e^{+jk_1 z} \bar{a}_y \quad (2.85)$$

$$\bar{H}_t = (T) \frac{E_0}{\eta_1} e^{-jk_1 z} \bar{a}_y \quad (2.86)$$

จากนั้นอาศัยเงื่อนไขขอบเขตสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ณ รอยต่อของสองตัวกลางเราจะพบความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่านว่า

$$1 + \Gamma = T \quad (2.87)$$

$$\frac{1}{\eta_1} (1 - \Gamma) = \frac{1}{\eta_2} T \quad (2.88)$$

และเราจะพบว่า

$$\Gamma = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} = \frac{E_r}{E_i} = -\frac{H_r}{H_i} \quad (2.89)$$

และ

$$T = \frac{2\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = 1 + \Gamma = \frac{E_t}{E_i} = \frac{\eta_2}{\eta_1} \frac{H_t}{H_i} \quad (2.90)$$

ดังนั้นคลื่นระนาบที่สะท้อนและส่งผ่านจะสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่าน ซึ่งจะมีกรณีเดียวที่ไม่เกิดการสะท้อนนั่นก็คือ  $\eta_1 = \eta_2$  หรือเดินทางในตัวกลางเดียวกัน

### 2.3.3.2 การแพร่กระจายคลื่นในสารไดอิเล็กตริก

สำหรับการแพร่กระจายคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางที่เป็นสารไดอิเล็กตริกนั้น เราจะทำการกำหนดให้สารไดอิเล็กตริกนั้นมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า  $\epsilon$  และค่าความซึมซาบแม่เหล็ก  $\mu$  ในตัวกลางเนื้อเดียว (Homogeneous) ที่มีค่า  $\epsilon$  และ  $\mu$  คงที่ทุกทิศทาง และมีลักษณะเป็นไอโซทรอปิก (Isotropic) ที่มีค่าไม่แปรไปตามทิศทาง ทำให้เราสามารถใช้สมการคลื่นของเฮล์มโฮลต์ซ์ดังนี้

$$\nabla^2 \vec{E} - \gamma^2 \vec{E} = 0 \quad (2.91)$$

เมื่อ

$$\vec{E}(x, y, z) = E_x(x, y, z)\vec{a}_x + E_y(x, y, z)\vec{a}_y + E_z(x, y, z)\vec{a}_z \quad (2.92)$$

สมการของเฮล์มโฮลต์ซ์จะเป็น

$$\nabla^2 \vec{E} - \gamma^2 \vec{E} = \nabla^2 (E_x \vec{a}_x + E_y \vec{a}_y + E_z \vec{a}_z) - \gamma^2 (E_x \vec{a}_x + E_y \vec{a}_y + E_z \vec{a}_z) = 0 \quad (2.93)$$

ทำให้เราสามารถลดรูปได้เป็น

$$\nabla^2 E_x(x, y, z) - \gamma^2 E_x(x, y, z) = 0 \quad (2.94)$$

$$\nabla^2 E_y(x, y, z) - \gamma^2 E_y(x, y, z) = 0 \quad (2.95)$$

$$\nabla^2 E_z(x, y, z) - \gamma^2 E_z(x, y, z) = 0 \quad (2.96)$$

โดยที่  $\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)$  และจะได้ว่า

$$\gamma = \pm\sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = \pm(\alpha \pm j\beta) \quad (2.97)$$

เมื่อ

- $\gamma$  คือ ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น (Propagation Constant)
- $\alpha$  คือ ค่าคงที่การลดทอนคลื่น (Attenuation Constant ( $Np/m$ ))
- $\beta$  คือ ค่าคงที่เฟส (Phase Constant ( $rad/m$ ))

ผลกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและเนื้อสารของไดอิเล็กตริกนั้นเกิดจากความสัมพันธ์ของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเชิงซ้อน (Complex Permittivity) ดังนี้

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' + j\varepsilon_r'') \quad (2.98)$$

จากคำตอบของสมการเฮล์มโฮลต์ซโดยคลื่นเคลื่อนที่ไปในทิศ  $z > 0$  จะได้คำตอบสมการเป็น

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-\gamma z} = \vec{E}_0 e^{-jkz} \quad (2.99)$$

เมื่อ  $jk = \alpha + j\beta$  และค่าจากสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนของสารไดอิเล็กตริก ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ได้ว่า

$$k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} = \omega\sqrt{\mu(\varepsilon' + j\varepsilon'')} = \omega\sqrt{\mu\varepsilon'}\sqrt{1 - j\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}} \quad (2.100)$$

ดังนั้น

$$\alpha = \text{Re}\{jk\} = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon'}{2}}\left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1\right)^{1/2} \quad (2.101)$$

และ

$$\beta = \text{Im}\{jk\} = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon'}{2}} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} + 1 \right)^{1/2} \quad (2.102)$$

ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่าค่าคงที่การลดทอนมีค่าไม่เป็นศูนย์นั้น ทำให้เกิดการลดทอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางที่เป็นสารไดอิเล็กตริก ซึ่งเทอมอัตราส่วน  $\epsilon''/\epsilon'$  คือการสูญเสียแทนเจนต์ (Loss Tangent) ที่เป็นอัตราส่วนที่บ่งชี้ถึงความสูญเสียในวัสดุที่เป็นสารไดอิเล็กตริก

### 2.3.3.3 การสะท้อนและส่งผ่านที่รอยต่อระหว่างสองตัวกลางที่มีการสูญเสีย

จากเบื้องต้นเราได้ทำการพิจารณาการสะท้อนและส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่าง 2 ตัวกลางที่แตกต่างกันโดยปราศจากการสูญเสีย อันดับต่อมาเราจะทำการพิจารณาการสะท้อนและส่งผ่านของคลื่นเมื่อมีการสูญเสียในตัวกลาง โดยเรายังคงให้ความสำคัญไปในการพิจารณาการตกกระทบแบบตั้งฉากอยู่ โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่านนั้นจะยังมีลักษณะคงเดิม หากแต่ต้องรวมผลของค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น (Propagation Constant) และค่าของอิมพีแดนซ์ภายในเนื้อสารที่เปลี่ยนไป [7] ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\vec{E}_i = E_0 e^{-\alpha_1 z} e^{-j\beta_1 z} \vec{a}_x$$

$$\vec{H}_i = \frac{E_0}{\eta_{10}} e^{-\alpha_1 z} e^{-j\beta_1 z} \vec{a}_y$$

$$\vec{E}_r = (\Gamma) E_0 e^{+\alpha_1 z} e^{+j\beta_1 z} \vec{a}_x$$

$$\vec{H}_r = -(\Gamma) \frac{E_0}{\eta_1} e^{+\alpha_1 z} e^{+j\beta_1 z} \vec{a}_y$$

$$\vec{E}_t = (T) E_0 e^{-\alpha_2 z} e^{-j\beta_2 z} \vec{a}_x$$

$$\vec{H}_t = (T) \frac{E_0}{\eta_2} e^{-\alpha_2 z} e^{-j\beta_2 z} \vec{a}_y \quad (2.103)$$

และค่าคงที่การสะท้อนรวมไปถึงส่งผ่านได้เป็น

$$\Gamma = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1}$$

$$T = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (2.104)$$

ซึ่งจะมีสนามไฟฟ้าในตัวกลางแรกเป็น

$$E_1 = E_i + E_r = E_0 e^{-\alpha_1 z} e^{-j\beta_1 z} (1 + \Gamma e^{+2\alpha_1 z} e^{+j2\beta_1 z}) \bar{a}_x \quad (2.105)$$

เมื่อ  $E_0 e^{-\alpha_1 z} e^{-j\beta_1 z}$  คือ คลื่นจร (Traveling Wave)  
 $(1 + \Gamma e^{+2\alpha_1 z} e^{+j2\beta_1 z})$  คือ คลื่นนิ่ง (Standing Wave)

และสนามแม่เหล็กในตัวกลางแรกเป็น

$$H_1 = H_i + H_r = \left(\frac{E_0}{\eta_1}\right)_0 e^{-\alpha_1 z} e^{-j\beta_1 z} (1 - \Gamma e^{+2\alpha_1 z} e^{+j2\beta_1 z}) \bar{a}_y \quad (2.106)$$

เมื่อ  $\left(\frac{E_0}{\eta_1}\right)_0 e^{-\alpha_1 z} e^{-j\beta_1 z}$  คือ คลื่นจร (Traveling Wave)  
 $(1 - \Gamma e^{+2\alpha_1 z} e^{+j2\beta_1 z})$  คือ คลื่นนิ่ง (Standing Wave)

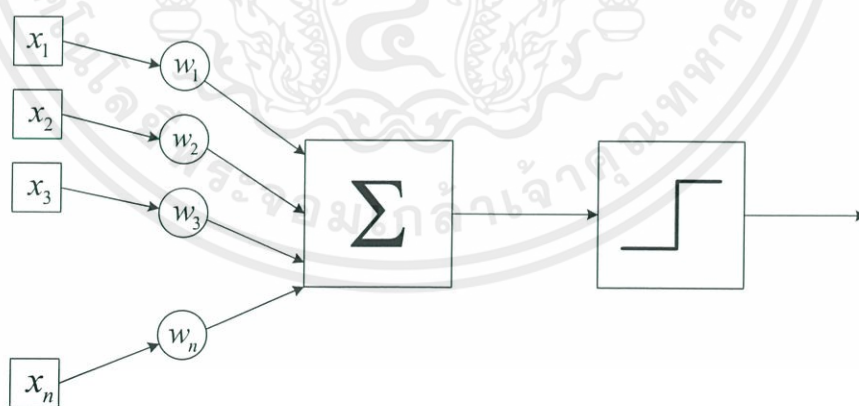
## 2.4 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks)

ในส่วนของการประมวลผลเพื่อหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ นั้น ได้ทำการพิจารณาทั้งหมดสามพารามิเตอร์จากส่วนของเซนเซอร์ ซึ่งส่วนแรกได้แก่คลื่นสะท้อนจากสายอากาศส่ง ส่วนถัดมาคือคลื่นส่งผ่านแบบโพลาไรซ์ตรงกัน และส่วนสุดท้ายได้แก่คลื่นส่งผ่านแบบโพลาไรซ์ไขว้ ซึ่งจากสมมุติฐานคาดว่าคลื่นสะท้อนจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนของสายอากาศส่งเนื่องจากตัวกลางที่เปลี่ยนค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าตามความเข้มข้น ซึ่งก็เป็นไปได้ที่จะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการแพร่กระจายคลื่น อีกทั้งในสองส่วนถัดมาควรจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันเนื่องจากคลื่นที่ส่งผ่านจะต้องลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นอันเนื่องมาจากจำนวนไดโพลโมเลกุลลดลงหลังจากเพิ่มความเข้มข้น อีกทั้งยังมีพันธะระหว่างน้ำและน้ำตาลมากซึ่งส่งผลต่อการลดทอนของ

คลื่นเนื่องจากถูกดูดซับกำลัง ดังนั้นในส่วนของการประมวลผลจะเป็นการหาความสัมพันธ์ต่างๆ ของพารามิเตอร์ที่มีต่อความเข้มข้นซึ่งในที่นี้ได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมนั้นสามารถหาความสัมพันธ์ของตัวแปรหลายตัวแปรได้ ทั้งแบบที่เป็นไปโนติศทางเดียวกันหรือไม่ก็ตาม ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียม หรือ ที่เรียกกันว่า Artificial Neural Network (ANN) คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ประมวลผลด้วยการคำนวณแบบคอนเนคชันนิสต์ (Connectionist) หรือ ทฤษฎีการความสัมพันธ์เชื่อมโยงของธอร์นไดค์ (Thorndike) ซึ่งจะเป็นทฤษฎีเกี่ยวกับเรื่องของการเรียนรู้ของมนุษย์จากสิ่งเร้าและการตอบสนอง[6] ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมจะจำลองการทำงานของระบบเซลล์ประสาทในสมองมนุษย์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องมือ ที่มีความสามารถในการเรียนรู้การจดจำแบบรูป (Pattern Recognition) และการอุปมาความรู้ (Knowledge deduction) เช่นเดียวกับความสามารถที่มีในสมองมนุษย์ โดยแนวคิดของเทคนิคนี้ได้มาจากการศึกษาข่ายงานไฟฟ้าชีวภาพ (Bioelectric Network) ในสมองของมนุษย์

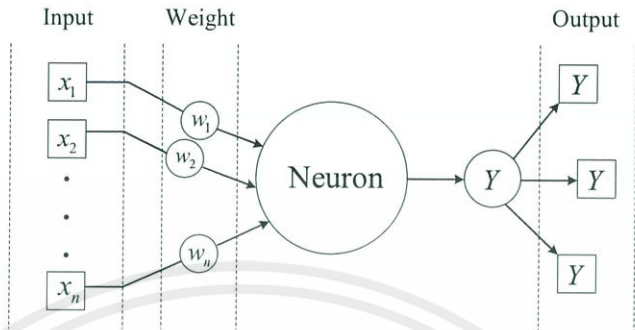
## 2.5 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

สำหรับในคอมพิวเตอร์ Neurons ประกอบด้วย อินพุตและเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 2.11 โดยกำหนดให้อินพุตแต่ละตัวมีค่าตัวถ่วงน้ำหนักเป็นตัวกำหนดน้ำหนักของอินพุตโดย neuron แต่ละหน่วยจะมีค่าระดับอ้างอิงเป็นตัวกำหนดว่าน้ำหนักรวมของอินพุตซึ่งจะเป็นตัวกำหนดการส่งเอาต์พุต ไปยัง neurons ตัวอื่นได้ เมื่อนำแต่ละหน่วยของ neuron มาต่อ ให้ทำงานร่วมกันโดยประมวลผลในทางคณิตศาสตร์ ก็จะเหมือนกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในสมองเพียงแต่ในคอมพิวเตอร์ทุกอย่างเป็นตัวเลข



รูปที่ 2.11 แบบจำลองของ neuron ในคอมพิวเตอร์

## 2.6 การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 2.12 แบบจำลองของ neuron

ตามแบบจำลองที่นำเสนอโดย McCulloch and Pitts ซึ่งถือว่าเป็นแบบจำลองของ neuron ในยุคแรก แสดงไว้ดังรูปที่ 2.12

$$X = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (2.107)$$

โดยที่  $X$  คือ ค่าถ่วงน้ำหนักสุทธิ

จากนั้น  $X$  จะถูกพิจารณาต่อด้วย ลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอน หรือ ฟังก์ชันการกระตุ้น ( $Y$ ) โดย ฟังก์ชันการกระตุ้น ที่นิยมใช้ แสดงดังรูปที่ 2.13

Step function	Sign function	Sigmoid function	Linear function
$Y^{step} = \begin{cases} 1, & \text{if } X \geq 0 \\ 0, & \text{if } X < 0 \end{cases}$	$Y^{sign} = \begin{cases} +1, & \text{if } X \geq 0 \\ -1, & \text{if } X < 0 \end{cases}$	$Y^{sigmoid} = \frac{1}{1 + e^{-X}}$	$Y^{linear} = X$

รูปที่ 2.13 ฟังก์ชันการกระตุ้นของนิวรอน

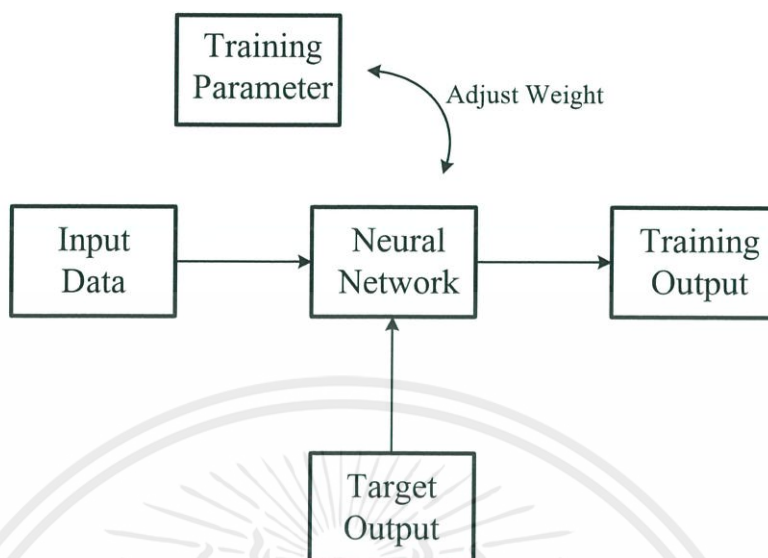
สิ่งสำคัญสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม คือ เราต้องทราบค่า ตัวถ่วงน้ำหนัก และ ค่าระดับอ้างอิง สำหรับสิ่งที่เราต้องการ เพื่อให้คอมพิวเตอร์เรียนรู้และจดจำ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่แน่นอน แต่สามารถกำหนดให้คอมพิวเตอร์ปรับค่าเหล่านั้นได้โดยการสอนให้มันรู้จักรูปแบบของสิ่งที่เราต้องการให้มันรู้จัก เรียกว่า back propagation ซึ่งเป็นกระบวนการย้อนกลับของการรู้จักในการฝึก feed-forward neural networks จะมีการใช้อัลกอริทึมแบบ back propagation เพื่อใช้ในการปรับปรุงน้ำหนักคะแนนของเครือข่าย (network weight) หลังจากใส่รูปแบบข้อมูลสำหรับฝึกให้แก่เครือข่ายในแต่ละครั้งแล้ว ค่าที่ได้รับ (output) จากเครือข่ายจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่คาดหวัง แล้วทำการคำนวณหาค่าความผิดพลาด ซึ่งค่าความผิดพลาดนี้จะถูกส่งกลับเข้าสู่เครือข่ายเพื่อใช้แก้ไขค่าน้ำหนักคะแนนต่อไป

## 2.7 ประเภทของการเรียนรู้สำหรับโครงข่ายประสาทเทียม

เป้าหมายหลักของการนำเอา ANN มาใช้ในงานด้านวิศวกรรมและวิทยาการคอมพิวเตอร์นั้น คือการพัฒนากระบวนการเรียนรู้ของเครื่องจักรหรือที่เรียกกันว่า Machine Learning ให้มีประสิทธิภาพสูง การนำ ANN มาใช้งานแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการฝึกหัด (Training) หรือเรียนรู้ (Learning) และขั้นตอนการทดสอบ (Testing) หรือใช้งานจริง (Working) โดยในขั้นตอนของการ Training นั้นยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก คือ

### 2.7.1 การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning Algorithm)

เป็นการเรียนแบบที่มีการตรวจคำตอบเพื่อให้วงจรช่วยปรับตัว โดยมีชุดข้อมูลที่ใช้นสอนวงจรช่วยจะมีคำตอบไว้คอยตรวจดูว่าวงจรช่วยให้คำตอบที่ถูกหรือไม่ ถ้าตอบไม่ถูก วงจรช่วยก็จะปรับตัวเองเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น (เปรียบเทียบกับคน เหมือนกับการสอนนักเรียนโดยมีผู้สอนคอยแนะนำ) สามารถแสดงส่วนต่างๆ ได้ดังรูปที่ 2.14

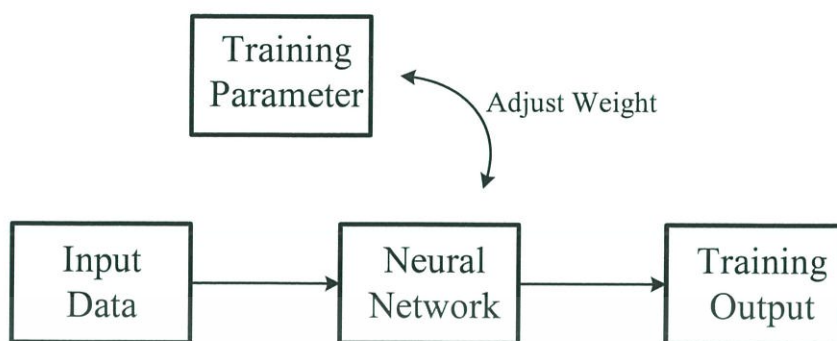


รูป 2.14 การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning Algorithm)

รูปแบบการเรียนรู้แบบมีผู้สอน จะเริ่มด้วยการส่งสิ่งเร้าที่ใช้ในการสอนเข้าไปเป็นอินพุตในโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมสร้างเอาต์พุตออกมา ซึ่งเอาต์พุตจะเป็นอย่างไร ก็ขึ้นอยู่กับสถานะในตอนที่เราเริ่มเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม เอาต์พุตดังกล่าวจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลตอบเป้าหมาย (Target Output) ซึ่งผู้สอน (Teacher) จะเป็นผู้สร้างขึ้น หากผลลัพธ์ทั้งสองมีความแตกต่างกัน นั่นคือมีความคลาดเคลื่อน (Error) เกิดขึ้น ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะถูกนำไปคำนวณเพื่อการปรับแต่งค่าน้ำหนัก (Weight) ต่างๆ ในโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อลดความคลาดเคลื่อนลงให้เหลือน้อยที่สุด การปรับแต่งค่าน้ำหนักโดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนนี้จะขึ้นอยู่กับกฎการเรียนรู้หรือขั้นตอนการคำนวณซึ่งเรียกว่า “อัลกอริทึม” (Algorithm) ที่แตกต่างกันโดยแต่ละอัลกอริทึมจะมีคุณลักษณะ และสมรรถนะแตกต่างกัน

### 2.7.2 การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning Algorithm)

เป็นการเรียนแบบไม่มีผู้แนะนำ ไม่มีการตรวจคำตอบว่าถูกหรือผิด วงจรข่ายจะจัดเรียงโครงสร้างด้วยตัวเองตามลักษณะของข้อมูล ผลลัพธ์ที่ได้ วงจรข่ายจะสามารถจัดหมวดหมู่ของข้อมูลได้ (เปรียบเทียบกับคน เช่น การที่เราสามารถแยกแยะพันธุ์พืช พันธุ์สัตว์ตามลักษณะรูปร่างของมันได้เองโดยไม่มีใครสอน) สามารถแสดงส่วนต่างๆ ได้ดังรูปที่ 2.15



รูป 2.15 การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning Algorithm)

การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนนั้น ไม่จำเป็นต้องมีค่าเป้าหมายของแต่ละข้อมูล ตัวอย่าง ในระหว่างการเรียนรู้ โครงข่ายประสาทเทียมจะได้รับข้อมูลกระตุ้นในรูปแบบต่างๆ และทำการจัดกลุ่มรูปแบบต่างๆ เหล่านั้นตามต้องการ ผลตอบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนนี้จะเป็นการระบุกลุ่มของข้อมูลที่ใส่เข้าไปโดยจะอิงจากวิธีการจัดกลุ่มซึ่งได้เรียนรู้จากข้อมูลที่โครงข่ายเคยพบมา และเนื่องจากขั้นตอนการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนนี้จะมีการระบุกลุ่มของข้อมูลตัวอย่างก่อน เมื่อตัดสินใจได้แล้วว่าข้อมูลใหม่มีลักษณะที่ควรจัดรวมเข้ากลุ่มใด (หรืออาจจะถือเป็นกลุ่มใหม่ก็ได้ในกรณีที่เห็นว่าไม่ควรจัดเข้ากลุ่มใดเลย) หลังจากนั้นจึงมีการปรับคุณลักษณะของกลุ่มโดยการนำลักษณะของข้อมูลใหม่นี้มาช่วยกำหนดแนวทางการจัดด้วย ในการตัดสินใจว่าข้อมูลใหม่นี้ควรจัดรวมเข้ากลุ่มใด ในโครงข่ายประสาทเทียมบางชนิดอาจจะใช้วิธีการแข่งขันกันของกลุ่มต่างๆ ว่ากลุ่มใดควรได้ข้อมูลดังกล่าวไป การเรียนรู้ในลักษณะนี้จะถูกเรียกว่า การเรียนรู้แบบการแข่งขันกัน (Competitive Learning) ซึ่งอีกแง่มุมหนึ่งนับจากจุดเริ่มต้นของการเรียนรู้ซึ่งไม่มีการจัดกลุ่มข้อมูลในแบบใดๆ เลยจนถึงเวลาที่การจัดเสร็จสิ้นแล้ว จะพบว่า การจัดกลุ่มข้อมูลเกิดขึ้นตามคุณลักษณะบางอย่างของข้อมูลตัวอย่าง ซึ่งการจัดกลุ่มนี้เกิดจากการที่โครงข่ายประสาทเทียมประเมินข้อมูลต่างที่ถูกป้อนเข้าไปในระหว่างการเรียนรู้ จนสร้างเป็นวิธีการจัดกลุ่มขึ้นมาได้ ดังนั้น การเรียนรู้ในลักษณะดังกล่าวจึงถูกเรียกว่า การเรียนรู้แบบจัดตัวเอง (Self-Organizing) ด้วย

## 2.8 คุณสมบัติและความสามารถที่เป็นประโยชน์ของ ANN

- 1) มีความยืดหยุ่นสูงจนสามารถจำลองขบวนการของปัญหาใดๆ ได้
- 2) มีความสามารถในการจำลองชุดของคู่ของอินพุตและเอาต์พุตที่มีความซับซ้อนมากจนไม่สามารถจำลองแบบในเชิงน่าจะเป็นได้
- 3) มีความสามารถในการปรับตัวเข้ากับการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม

- 4) มีความสามารถในการตอบสนองต่อข้อมูลที่ไม่เคยเห็น
- 5) ความรู้จะกระจายอยู่ทั่วทั้งโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

## 2.9 ลักษณะของปัญหาที่เหมาะสมกับ ANN

- 1) ตัวอย่างข้อมูลสำหรับการฝึกหัดประกอบด้วย attribute หลากๆค่า
- 2) เอาท์พุทที่ต้องการสามารถเป็นค่าจำนวนเต็มหรือจำนวนจริง หรือเป็น Vector ของจำนวนเต็มหรือจำนวนจริงก็ได้
- 3) ตัวอย่างข้อมูลสามารถมีความผิดพลาดปะปนอยู่ได้
- 4) ไม่มีปัญหากับขั้นตอนการฝึกหัดซึ่งอาจใช้เวลานานมาก
- 5) ต้องการประเมินผลเอาท์พุทอย่างรวดเร็ว
- 6) ไม่ต้องการเข้าใจวิธีการแก้ปัญหา ต้องการเพียงแคให้ปัญหาได้รับการแก้ไขเท่านั้น

## 2.10 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม

การเชื่อมโยงเซลล์ประสาทเทียมจำนวนหนึ่งเข้าด้วยกันเป็นโครงข่ายประสาทเทียมนั้น สามารถเชื่อมโยงแบบใดก็ได้โดยไม่มีขอบเขตจำกัด อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วเทคนิคการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมมักจะถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้กับสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่มีลักษณะเฉพาะเท่านั้น สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่พบทั่วไป ซึ่งจะมีลักษณะหลักๆ คือ

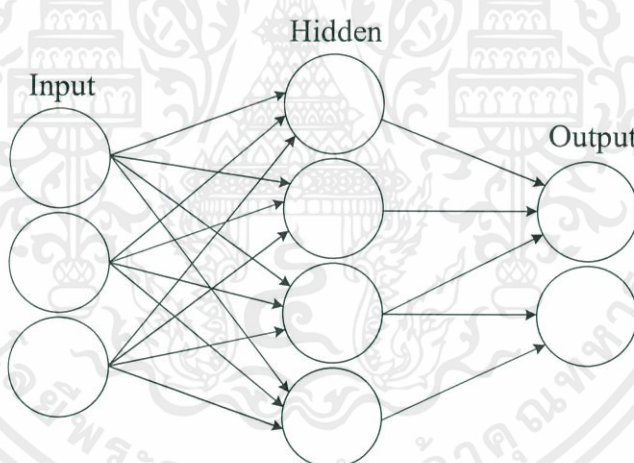
1. จำนวนชั้น จะประกอบด้วยชั้นต่างๆ คือ ชั้นนำเข้า (Input Layer) ชั้นนำออก (Output Layer) และชั้นซ่อน (Hidden Layer) ซึ่งจะอยู่ระหว่างชั้นนำเข้าและชั้นนำออกในโครงข่ายประสาทเทียมอาจมีชั้นซ่อนได้หลายชั้น
2. การเชื่อมต่อระหว่างชั้น ทุกๆโหนดในชั้นนำเข้าจะส่งสัญญาณไปยังทุกๆโหนดในชั้นซ่อนชั้นแรก และทุกๆโหนดในชั้นซ่อนชั้นแรกจะส่งสัญญาณไปยังทุกๆโหนดในชั้นถัดไปจนในที่สุดทุกๆโหนดในชั้นซ่อนชั้นสุดท้ายจะส่งสัญญาณไปยังทุกๆโหนดในชั้นนำออก
3. การทำงานของชั้นต่างๆ ชั้นนำเข้าไม่มีการประมวลผลทำหน้าที่รับสัญญาณเข้าแล้วกระจายออกไปยังแต่ละโหนดในชั้นถัดไปเท่านั้น แต่ส่วนชั้นซ่อน และชั้นนำออกนั้นจะมีการประมวลผลก่อนกระจายออกไปยังโหนดชั้นถัดไป

## 2.11 โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมจะมีลักษณะเป็นการประกอบกันของรูปแบบโครงสร้าง ดังต่อไปนี้

### 2.11.1 แบบป้อนไปข้างหน้า (Feed forward network)

ข้อมูลที่ประมวลผลในโครงข่ายประสาทเทียมจะถูกส่งไปในทิศทางเดียวจากชั้นนำเข้าสู่ต่อมาเรื่อยๆ จนถึงชั้นส่งออก โดยไม่มีการย้อนกลับของข้อมูล หรือแม้แต่โหนดในชั้นเดียวกันก็ไม่มี การเชื่อมต่อระหว่างกัน อาจจัดได้เป็น 2 แบบย่อย คือ แบบมีชั้นของเซลล์ประสาทชั้นเดียว (Single Layer) และแบบมีชั้นของเซลล์ประสาทหลายชั้น (Multilayer) โดยปกติแล้วการเชื่อมโยงจะถูกกำหนดขึ้นระหว่างชั้นที่ติดกัน โดยจะมีการเชื่อมโยงระหว่างเซลล์ประสาทเทียมทุกตัวจากชั้นหนึ่งๆ ไปยังเซลล์ประสาทเทียมทุกตัวในชั้นต่อไป ซึ่งในบางสถาปัตยกรรมอาจมีการเชื่อมโยงข้ามชั้นก็ได้ ดังรูปที่ 2.16

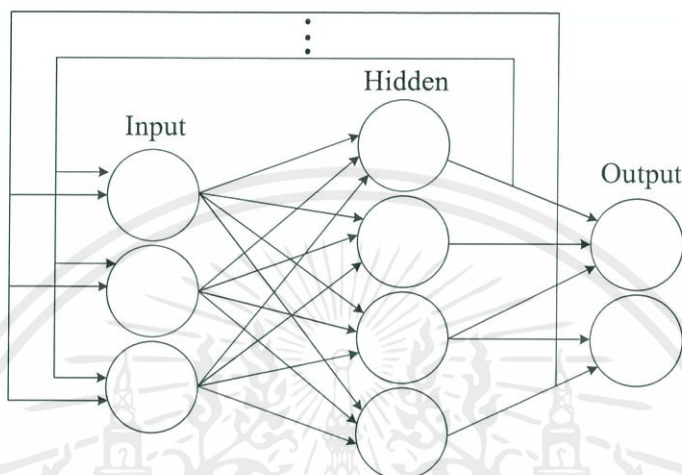


รูปที่ 2.16 สถาปัตยกรรมของ Feed forward network

### 2.11.2 แบบมีการป้อนกลับ (Feedback network)

ข้อมูลที่ประมวลผลในโครงข่ายประสาทเทียมจะมีการเชื่อมโยงที่ถูกกำหนดขึ้นระหว่างเซลล์ประสาทเทียมในชั้นหนึ่งๆ ย้อนกลับไปยังชั้นอื่นๆ ก่อนหน้านั้น หรือแม้แต่

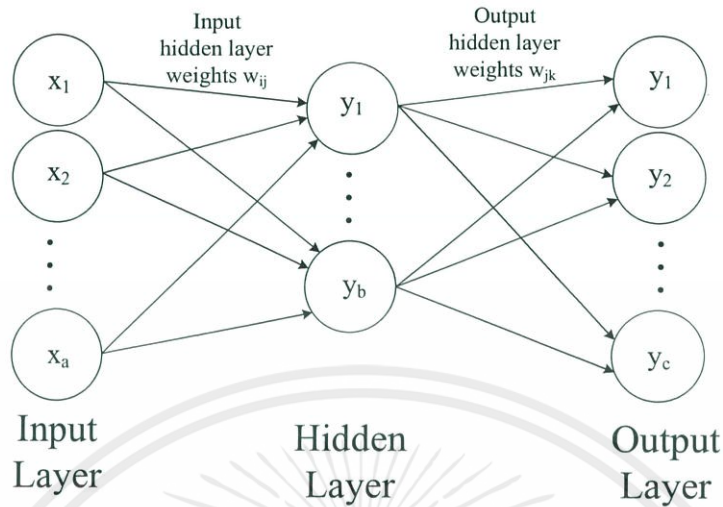
ภายในชั้นเดียวกันเอง จะมีการป้อนกลับเข้าไปยังโครงข่ายประสาทเทียมหลายๆครั้ง จนกระทั่งได้คำตอบออกมา (บางที่เรียกว่า recurrent network) ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 สถาปัตยกรรมของ Feedback network

## 2.12 โครงข่ายประสาทเทียมที่มีเซลล์ประสาทหลายชั้น (Multi-layer neural network)

เป็นโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วยหลายชั้น ซึ่งอาจจะมีชั้นซ่อน 1 ชั้น หรือมากกว่าก็ได้ โดยในแต่ละชั้นจะประกอบด้วยโหนด หรือเปรียบได้กับตัวเซลล์ประสาท และมีการเชื่อมต่อโดยมีค่าน้ำหนักของเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างโหนดของแต่ละชั้น ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 โครงข่ายประสาทเทียมแบบที่มีเซลล์ประสาท 3 ชั้น

โดยที่

ดัชนี  $i, j$  และ  $k$  กล่าวถึง neurons ในชั้นอินพุต ชั้นซ่อน และชั้นเอาต์พุต ตามลำดับ ชุดข้อมูลอินพุต  $x_1, x_2, \dots, x_n$  จะถ่ายทอดผ่านโครงข่ายจากซ้ายไปขวา ชุดข้อมูล error  $e_1, e_2, \dots, e_l$  จะถ่ายทอดย้อนกลับจากขวาไปซ้าย

โดยชุดข้อมูล error เริ่มจากชั้นเอาต์พุตและทำงานย้อนกลับมายังชั้นซ่อน ชุดข้อมูล error ที่เอาต์พุตของ neuron  $k$  คำนวณได้จาก

$$e_k(p) = y_{d,k}(p) - y_k(p) \quad (2.108)$$

โดยที่  $y_{d,k}(p)$  = เอาต์พุตที่ต้องการ (เป้าหมาย) ของ neuron  $k$

ดังนั้น เราจะใช้สมการในการอัปเดตค่า weights ของชั้นเอาต์พุต ดังนี้ .

$$w_{jk}(p+1) = w_{jk}(p) + \Delta w_{jk}(p) \quad (2.109)$$

โดยที่  $\Delta w_{jk}(p)$  = ตัวถ่วงน้ำหนักสะสม

ซึ่งตัวถ่วงน้ำหนักสะสมในโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่มีเซลล์ประสาทหลายชั้นสามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta w_{jk}(p) = \alpha \times y_j(p) \times \delta_k(p) \quad (2.110)$$

โดยที่  $\delta_k(p)$  = error gradient ที่ neuron k ในชั้นเอาต์พุต

Error gradient สามารถหาได้จากการอนุพันธ์ของฟังก์ชันการกระตุ้นคูณกับ error ของ neuron เอาต์พุต ดังนั้น สำหรับ neuron k ในชั้นเอาต์พุตจะได้

$$\delta_k(p) = \frac{\partial y_k(p)}{\partial X_k(p)} \times e_k(p) \quad (2.111)$$

โดยที่  $y_k(p)$  = เอาต์พุตของ neuron k

$X_k(p)$  = อินพุตของ neuron k

จากฟังก์ชันการกระตุ้นแบบ Sigmoid ดังสมการที่ (2.12) สามารถแทนได้ดังนี้

$$\delta_k(p) = \frac{d\left\{\frac{1}{1 + \exp[-X_k(p)]}\right\}}{dX_k(p)} \times e_k(p) = \frac{\exp[-X_k(p)]}{\{1 + \exp[-X_k(p)]\}^2} \times e_k(p) \quad (2.112)$$

ดังนั้น เราจะได้

$$\delta_k(p) = y_k(p) \times [1 - y_k(p)] \times e_k(p) \quad (2.113)$$

ถ้าต้องการหาตัวถ่วงน้ำหนักสะสมในชั้นซ่อน เราจะสามารถหาได้จากสมการเดียวกัน คือ

$$\Delta w_{ij}(p) = \alpha \times x_i(p) \times \delta_j(p) \quad (2.114)$$

โดยที่  $\delta_j(p)$  = error gradient ที่ neuron j ในชั้นซ่อนและกำหนดให้

$$\delta_j(p) = y_j(p) \times [1 - y_j(p)] \times \sum_{k=1}^l \delta_k(p) w_{jk}(p) \quad (2.115)$$

โดยที่  $l$  = จำนวนของ neuron ในชั้นเอาต์พุต และ

$$y_j(p) = \frac{1}{1 + e^{-x_j(p)}}; \quad X_j(p) = \sum_{i=1}^n x_i(p) \times w_{ij}(p) - \theta_j \quad (2.116)$$

โดยที่  $n$  = จำนวนของ neurons ในชั้นอินพุต

ขั้นตอนการเรียนรู้แบบโครงข่ายประสาทเทียมที่มีเซลล์ประสาทหลายชั้น

ขั้นตอนที่ 1: การตั้งค่าเริ่มต้น (Initialization)

กำหนดค่าค่าตัวถ่วงน้ำหนักและระดับชั้นอ้างอิงของโครงข่ายแบบสุ่มตัวเลขและกระจายค่าให้อยู่ในช่วงดังนี้

$$\left( -\frac{2.4}{F_i}, +\frac{2.4}{F_i} \right) \quad (2.117)$$

โดยที่  $F_i$  = จำนวนรวมอินพุตของ neuron

ขั้นตอนที่ 2: การกระตุ้น (Activation)

(a) คำนวณเอาต์พุตที่เกิดขึ้นของ neurons ในชั้นซ่อน

$$y_j(p) = \text{sigmoid} \left[ \sum_{i=1}^n x_i(p) \times w_{ij}(p) - \theta_j \right] \quad (2.118)$$

โดยที่  $n$  = จำนวนอินพุตของ neuron  $j$  ในชั้นซ่อน

(b) คำนวณเอาต์พุตที่เกิดขึ้นของ neuron ในชั้นเอาต์พุต

$$y_k(p) = \text{sigmoid} \left[ \sum_{j=1}^m x_{jk}(p) \times w_{jk}(p) - \theta_k \right] \quad (2.119)$$

โดยที่  $m$  = จำนวนอินพุตของ neuron  $k$  ในชั้นเอาต์พุต

ขั้นตอนที่ 3: การเรียนรู้ (Weight Training)

การปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนักในกระบวนการ back-propagation

(a) คำนวณค่า error gradient ของ neurons ในชั้นเอาต์พุต

$$\delta_k(p) = y_k(p) \times [1 - y_k(p)] \times e_k(p) \quad (2.120)$$

โดยที่  $e_k(p) = y_{d,k}(p) - y_k(p)$

คำนวณค่าตัวถ่วงน้ำหนักสะสม

$$\Delta w_{jk}(p) = \alpha \times y_j(p) \times \delta_k(p) \quad (2.121)$$

อัปเดตค่าตัวถ่วงน้ำหนักของเอาต์พุต neurons

$$w_{jk}(p+1) = w_{jk}(p) + \Delta w_{jk}(p) \quad (2.122)$$

(b) คำนวณค่า error gradient ของ neurons ในชั้นซ่อน

$$\delta_j(p) = y_j(p) \times [1 - y_j(p)] \times \sum_{k=1}^l \delta_k(p) w_{jk}(p) \quad (2.123)$$

คำนวณค่าตัวถ่วงน้ำหนักสะสม

$$\Delta w_{ij}(p) = \alpha \times x_i(p) \times \delta_j(p) \quad (2.124)$$

อัปเดตค่าตัวถ่วงน้ำหนักในชั้นซ่อน

$$w_{ij}(p+1) = w_{ij}(p) + \Delta w_{ij}(p) \quad (2.125)$$

ขั้นตอนที่ 4: การวนซ้ำ (Iteration)

ทำการเพิ่มการวนซ้ำ  $p$  ไปอีก 1 จากนั้นกลับไปทำในขั้นตอนที่ 2 และทำซ้ำกระบวนการเดิมทั้งหมดจนกระทั่งไม่เกิดความผิดพลาดอีก

## 2.13 การคำนวณโหนดในชั้นซ่อน (The Node Number in Hidden Layer)

จำนวนโหนดในชั้นซ่อนที่เกี่ยวข้องกับความซับซ้อนของปัญหาและอิทธิพลที่มีผลโดยตรงกับศักยภาพของโครงข่ายที่ไม่เป็นเชิงเส้น ต่อไปนี้จะกล่าวถึงสูตรในการคำนวณโหนดในชั้นซ่อน

$$p = \begin{cases} n + 0.618(n - m); n \geq m \\ m - 0.618(m - n); n < m \end{cases} \quad (2.126)$$

โดยที่  $n$  = จำนวนโหนดอินพุต

$m$  = จำนวนโหนดเอาต์พุต

$p$  = จำนวนโหนดในชั้นซ่อน

## 2.14 หน่วยประมวลผลสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมและการแสดงผลบนหน้าจอ

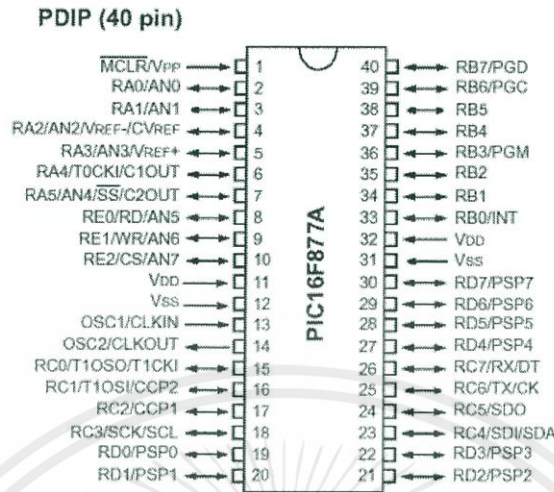
หลังจากทำการประมวลผลโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อการคำนวณหาค่าของตัวถ่วงน้ำหนักด้วยโปรแกรม MATLAB เรียบร้อยแล้ว จะทำการนำค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้จากการเรียนรู้ของโปรแกรมไปเข้าสู่หน่วยประมวลผลที่เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานและมีขนาดเล็กกะทัดรัด ซึ่งในที่นี้จะต้องใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้งหมดสองส่วน โดยที่ส่วนแรกใช้สำหรับการแสดงผล ส่วนที่สองสำหรับการประมวลผลโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้จะเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ 16F877A และ 18F4520 ซึ่งเป็นของบริษัทไมโครชิพ (Microchip) ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์แบบแรกๆ ที่ประมวลผลแบบ RISC Processor (Reduced Instruction Set Computer) และโครงสร้างภายในยังประกอบด้วยฮาร์ดแวร์ฟังก์ชันโมดูลสำหรับใช้งานพิเศษต่างๆ เช่น โมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (A/D), USART, Time/Counter, SPI และ PWM เป็นต้น

คุณสมบัติเบื้องต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A

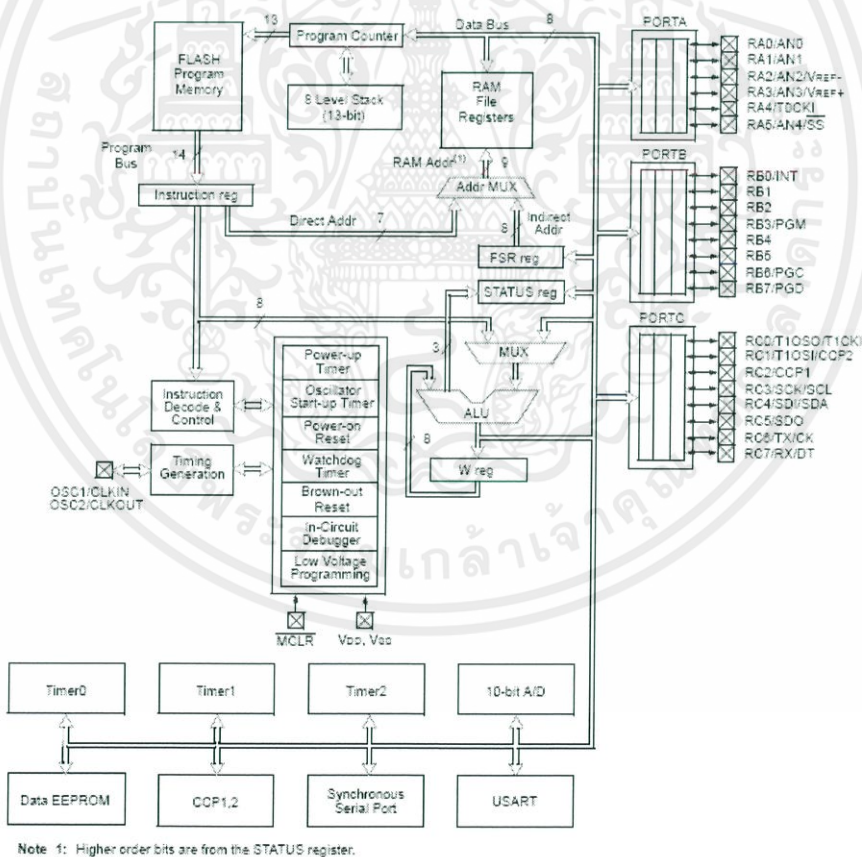
1. มีคำสั่งให้ใช้งาน 35 คำสั่ง
2. คำสั่งหนึ่งๆ ใช้เวลาทำงาน 1 ถึง 2 Cycle
3. ทำงานได้สูงสุดที่ 20MHz
4. ทำงานแบบ Pipe-line
5. หน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบ Flash มีขนาด 8Kbytes
6. มี RAM ขนาด 368 ไบต์

7. มี EEPROM ขนาด 256 ไบต์
8. ตอบสนองกับอินเทอร์รัพต์ทั้งหมด 14 แหล่ง
9. มี Stack ให้ใช้ได้สูงสุด 8 ระดับ
10. มีระบบ Power On Reset, Power Up Timer, Oscillator Start-up timer
11. Watchdog timer
12. มีระบบ Code Protection
13. มีโหมดประหยัดพลังงาน
14. สัญญาณนาฬิกามีหลายโหมดให้เลือกใช้งาน (XTAL หรือ วงจร RC)
15. สามารถโปรแกรมด้วยไฟ +5 VDC
16. ใช้การโปรแกรมแบบ In-Circuit Serial Programming
17. ทำงานที่ไฟเลี้ยง 2 VDC ถึง 5.5 VDC
18. Current Sink และ Current Source อยู่ที่ 25mA
19. มี Timer/Counter 3 ตัว
20. มีโมดูล Capture/Compare/PWM อีก 2 ชุด
21. มี A/D Converter แบบ 10 บิต จำนวน 8 ช่องนำเข้าไปในตัว
22. มีระบบ USART สำหรับต่อกับ การสื่อสารแบบ RS232
23. มีระบบตรวจจับไฟเลี้ยง (Brown-out reset)
24. มี I/O พอร์ตทั้งหมด 5 พอร์ต คือ พอร์ต A BC D และ E มี I/O รวมกัน 33 ขา คือ
  - PORT A 6 ขา คือ RA0 ถึง RA5
  - PORT B 8 ขา คือ RB0 ถึง RB7
  - PORT C 8 ขา คือ RC0 ถึง RC7
  - PORT D 8 ขา คือ RD0 ถึง RD7
  - PORT E 3 ขา คือ RE0 ถึง RE2

ซึ่งลักษณะของไอซีและโครงสร้างภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล PIC เบอร์ 16F877A จะแสดงดังรูปที่ 2.19 และรูปที่ 2.20 ตามลำดับ



รูปที่ 2.19 ลักษณะของไอซี PIC16F877A



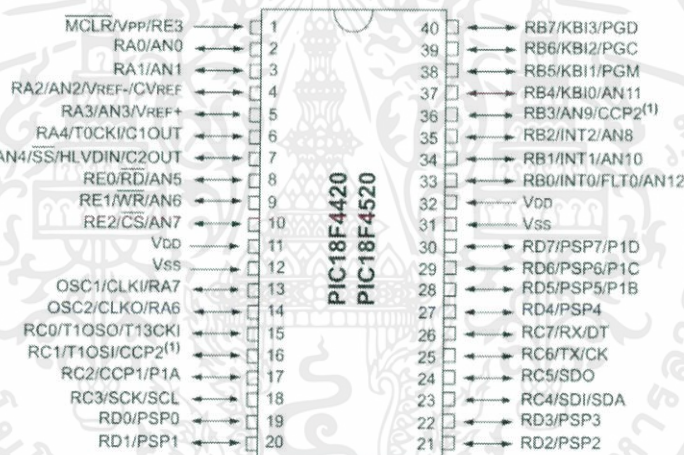
รูปที่ 2.20 โครงสร้างภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล PIC เบอร์ 16F877A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

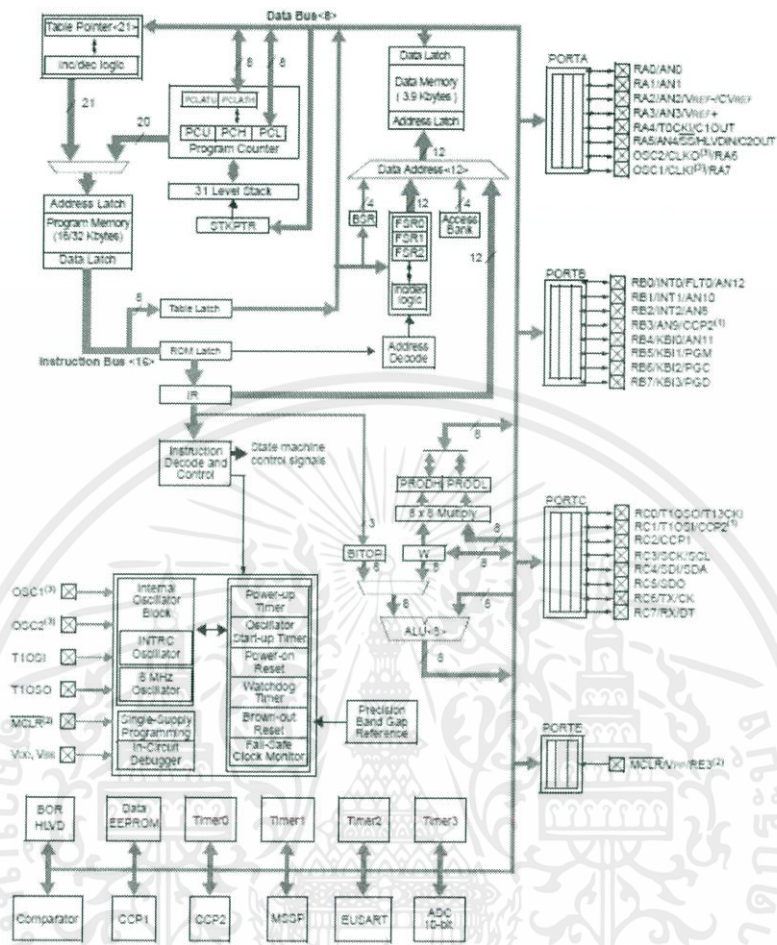
สำหรับในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4520 นั้นมีคุณสมบัติทั่วไปเหมือนกับ PIC16F877A แต่ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4520 จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันคือ

1. ทำงานสูงสุดได้ที่ 40 MHz
2. หน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบ Flash มีขนาด 32 Kbytes
3. มี RAM ขนาด 1536 ไบต์
4. มี EEPROM ขนาด 256 ไบต์

โดยที่ลักษณะของไอซีและโครงสร้างภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล PIC เบอร์ 18F4520 จะแสดงดังรูปที่ 2.21 และรูปที่ 2.22 ตามลำดับ



รูปที่ 2.21 ลักษณะของไอซี PIC18F4520



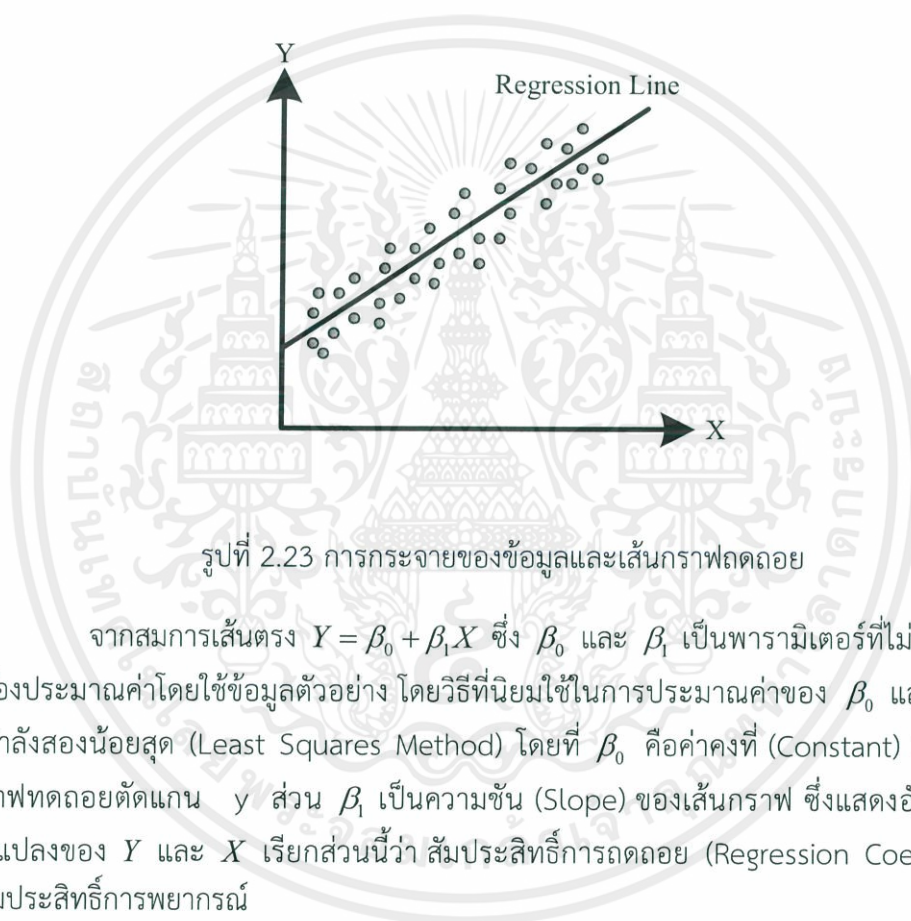
รูปที่ 2.22 โครงสร้างภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล PIC เบอร์ 18F4520

## 2.15 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะและปัจจัยที่ด้วยตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์และลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร หรือ เป็นการวิเคราะห์โดยอาศัยตัวแปรที่ทราบตัวแปรหนึ่งแล้วนำไปพยากรณ์อีกตัวแปรหนึ่งว่าความสัมพันธ์กันในสัดส่วนเท่าใด

### 2.15.1 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น (Linear) โดยมีสมการถดถอยคือ  $Y = \beta_0 + \beta_1 X$  และนำค่า  $X$  และ  $Y$  ทั้งหมดไปพล็อตกราฟบนแกน  $x, y$  แล้วลากเส้นเชื่อมระหว่างจุดที่ปรากฏเส้นกราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของตัวแปร  $X$  และ  $Y$  เรียกว่า เส้นกราฟถดถอย (Regression Line) แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การกระจายของข้อมูลและเส้นกราฟถดถอย

จากสมการเส้นตรง  $Y = \beta_0 + \beta_1 X$  ซึ่ง  $\beta_0$  และ  $\beta_1$  เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า จึงจะต้องประมาณค่าโดยใช้ข้อมูลตัวอย่าง โดยวิธีที่นิยมใช้ในการประมาณค่าของ  $\beta_0$  และ  $\beta_1$  ก็คือวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Squares Method) โดยที่  $\beta_0$  คือค่าคงที่ (Constant) เป็นค่าที่เส้นกราฟถดถอยตัดแกน  $y$  ส่วน  $\beta_1$  เป็นความชัน (Slope) ของเส้นกราฟ ซึ่งแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ  $Y$  และ  $X$  เรียกส่วนนี้ว่า สัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) หรือ สัมประสิทธิ์การพยากรณ์

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X \quad (2.127)$$

เมื่อ

$$Y = \text{ตัวแปรตาม}$$

$$X = \text{ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น}$$

$\beta_0$  = ค่าคงที่ (Constant) เป็นค่าที่ตัดแกน Y

$\beta_1$  = ความชัน (Slope) ของเส้นกราฟ

### 2.15.2 สมการถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear Regression)

สมการถดถอยสามารถหาค่า  $\beta_0$  และ  $\beta_1$  ได้ดังนี้

$$\beta_1 = \frac{\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{n}}{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}} \quad (2.128)$$

$$\beta_0 = \bar{Y} - \beta_1 \bar{X} \quad (2.129)$$

เมื่อ

$\beta_0$  = ค่าคงที่ของสมการถดถอยอย่างง่าย

$\beta_1$  = สัมประสิทธิ์การถดถอยหรือสัมประสิทธิ์การพยากรณ์

$\bar{X}$  = ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น

$\bar{Y}$  = ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของตัวแปรตาม

ข้อตกลงเบื้องต้นในการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย

1. ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น ( $X$ ) และตัวแปรตาม ( $Y$ ) มีความสัมพันธ์ใน รูปแบบเชิงเส้น
2. ตัวแปรตามต้องเป็นข้อมูลชนิดต่อเนื่อง ในขณะที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น จะต้องเป็นตัวแปรที่สามารถกำหนดได้
3. ความแปรปรวนของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นและตัวแปรตามต้องมีค่า เท่ากัน เรียกว่า Homoscedasticity

### 2.15.3 การตรวจสอบค่า $\beta_0$ และ $\beta_1$ โดยใช้ T-statistic

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบว่าค่า  $\beta_0$  และ  $\beta_1$  ที่ได้จากการการคำนวณนั้น ถูกต้องเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์

พิจารณาค่า  $\beta_0$  มีสมมติฐาน 2 กรณีคือ

$H_0 : \beta_0 = 0$  คือ ค่า  $\beta_0$  ที่หาค่าได้จะไม่ปรากฏในสมการถดถอยแบบเชิงเส้น

$H_a : \beta_0 \neq 0$  คือ ค่า  $\beta_0$  ที่หาค่าได้จะปรากฏในสมการถดถอยแบบเชิงเส้น

โดยพิจารณาจากสมการ

$$\sigma_{\beta_0}^2 = \frac{\sum (\beta_0' - \beta_0)^2}{n} \quad (2.130)$$

$$t_{\beta_0} = \frac{\beta_0}{\sigma_{\beta_0}} \quad (2.131)$$

เมื่อ  $\sigma_{\beta_0}^2$  คือ ค่าความแปรปรวนของตัวแปรค่าคงที่ของสมการถดถอย ( $\beta_0$ )

$n$  คือ จำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด

$\beta_0'$  คือ ค่าที่ได้จากการแทนค่าตัวแปรอิสระ ( $X$ ) และตัวแปรตาม ( $Y$ ) ของแต่ละชุดข้อมูลลงในสมการถดถอยแบบเชิงเส้น หรือ สมการที่ 2.127

$t_{\beta_0}$  คือ ตัวแปร T-statistic ของตัวแปร  $\beta_0$

$t_{\alpha/2, n-2}$  คือ ตัวแปร T-statistic ที่ได้ค่าจากตารางการแจกแจง T และ  $\alpha = 0.05$

โดยจะสามารถปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0 : \beta_0 = 0$  ได้เมื่อ  $|t_{\beta_0}| > t_{\alpha/2, n-2}$

พิจารณาค่า  $\beta_1$  มีสมมติฐาน 2 กรณีคือ

$H_0 : \beta_1 = 0$  คือ ค่า  $\beta_1$  ที่หาค่าได้จะไม่ปรากฏในสมการถดถอยแบบเชิงเส้น

$H_a : \beta_1 \neq 0$  คือ ค่า  $\beta_1$  ที่หาค่าได้จะปรากฏในสมการถดถอยแบบเชิงเส้น

โดยพิจารณาจากสมการ

$$\sigma_{\beta_0}^2 = \frac{\sum (Y - Y')^2}{n-2} \quad (2.132)$$

$$t_{\beta_1} = \frac{\beta_1}{\sigma_{\beta_1}} \quad (2.133)$$

เมื่อ  $\sigma_{\beta_1}^2$  คือ ค่าความแปรปรวนของตัวแปรความชันของสมการถดถอย ( $\beta_1$ )  
 $\bar{X}$  คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระ ( $X$ )  
 $Y'$  คือ ค่าตัวแปรตามที่ได้จากการแทนค่าตัวแปรต้นลงในสมการการถดถอยแบบเชิงเส้น หรือ สมการที่ 2.127

จะสามารถปฏิเสธสมมุติฐาน  $H_0 : \beta_1 = 0$  ได้เมื่อ  $|t_{\beta_1}| > t_{\alpha/2, n-2}$

#### 2.15.4 การพิจารณาความเหมาะสมในการใช้ Regression Model ด้วย F-statistic

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบว่าสมการ Regression Model มีความเหมาะสมในการสำหรับการพยากรณ์เพียงใด โดยมีสมมุติฐาน 2 สมมุติฐานคือ

$H_0$  : สมการการถดถอยสามารถพยากรณ์ค่าตอบได้เป็นส่วนน้อย

$H_a$  : สมการการถดถอยสามารถพยากรณ์ค่าตอบได้เป็นส่วนใหญ่

โดยมีสมการดังนี้

$$SS_{Error} = \sum (Y - Y')^2 \quad (2.134)$$

$$SS_{Error} = \sum (Y - \bar{Y})^2 \quad (2.135)$$

$$SS_{Error} = SS_{total} - SS_{Regression} \quad (2.136)$$

$$MS_{Regression} = \frac{SS_{Regression}}{df} \quad (2.137)$$

$$MS_{Error} = \frac{SS_{Error}}{df} \quad (2.138)$$

โดยที่  $df$  คือ degree of freedom หาได้จาก

$$df \text{ ของ } SS_{total} = n - 1 \quad (2.139)$$

$$df \text{ ของ } SS_{Error} = df_{total} - 1 \quad (2.140)$$

$$df \text{ ของ } SS_{Regression} = df_{total} - df_{Error} \quad (2.141)$$

$$F = \frac{MS_{\text{Regression}}}{MS_{\text{Error}}} \quad (2.142)$$

$F_{\text{critical}(\alpha, df_{\text{regression}}, df_{\text{Error}})}$  คือ ค่าของ F-statistic ที่ได้จากการเปิดตารางการ

แจกแจง F เมื่อ  $\alpha = 0.05$

ซึ่งเราจะสามารถปฏิเสธสมมุติฐาน  $H_0$  ได้เมื่อ  $F > F_{\text{critical}(\alpha, df_{\text{regression}}, df_{\text{Error}})}$

Significant-F (ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) คือ P-value ของสมการ Regression Model

โดย  $P\text{-value} > 0.05$  จะเป็นการยอมรับสมมุติฐาน  $H_0$  โดยจะอธิบายว่า Regression Model มีความเชื่อมั่นน้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ที่จะสามารถพยากรณ์คำตอบของได้

$P\text{-value} > 0.05$  จะเป็นการปฏิเสธสมมุติฐาน  $H_0$  โดยจะอธิบายว่า Regression Model มีความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ที่จะสามารถพยากรณ์คำตอบของสมการได้

### 2.15.5 การรับรองค่าความแม่นยำของสมการการถดถอยโดยใช้ Coefficient of Determination

$$R^2 = \frac{SS_{\text{Regression}}}{SS_{\text{total}}} \times 100\% \quad (2.143)$$

ซึ่งค่า  $R^2$  จะอธิบายถึงเปอร์เซ็นต์การแก้ไขปัญหาของสมการการถดถอยว่าสมการการถดถอยสามารถตอบปัญหาได้กี่ส่วนใน 100 ส่วน

$$R^2 - \text{Adjusted} = \left\{ 1 - \frac{n-1}{n-p} \times (1 - R^2) \right\} \times 100\% \quad (2.144)$$

โดยที่  $p$  คือ จำนวนสัมประสิทธิ์ใน Regression Model ( $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots$ )

$$R = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \sqrt{n \sum Y^2 - (\sum Y)^2}} \quad (2.145)$$

โดยที่ค่า R จะบอกถึงความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเชิงเส้นของตัวแปรอิสระ (ตัวแปรต้น) กับตัวแปรตาม

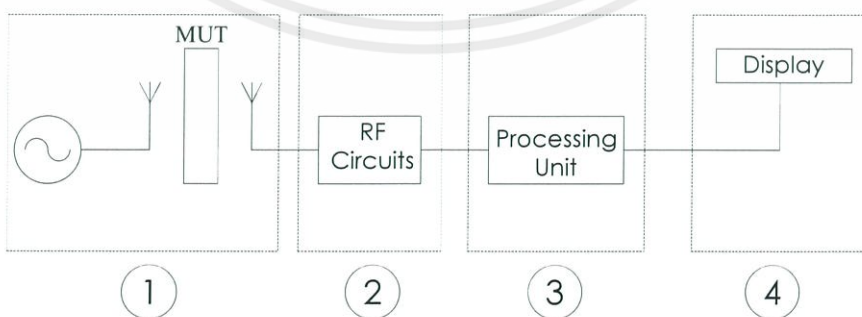
## บทที่ 3

### การออกแบบและการจัดทำปริญญาบัตร

#### 3.1 บทนำ

ระบบการวัดความเข้มข้นสารละลายด้วยไมโครเวฟที่ได้นำเสนอนี้จะใช้การตรวจวัดความเข้มข้นด้วยคลื่นไมโครเวฟนี้ ใช้หลักการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าสู่ตัวกลางที่เป็นสารละลายความเข้มข้นใดๆ ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่สัมผัสกับสารละลายที่ต้องการวัด (non-destructive) จากนั้นทำการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นต่างๆ กันที่ส่งผลต่อ S-parameter ของคลื่นไม่ว่าจะเป็นการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารวมไปถึงการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลางนั้นๆ โดยระบบไมโครเวฟเซนเซอร์นี้ประกอบไปด้วยสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่เป็นสายอากาศไมโครสตริป เนื่องจากจุดเด่นของสายอากาศไมโครสตริปได้แก่ ขนาดที่กะทัดรัด หน้าสัมผัสแบนราบรวมไปถึงการออกแบบและสร้างง่ายในราคาที่ไม่แพง โดยสายอากาศไมโครสตริปทั้งสองจะถูกคั่นด้วยวัสดุสำหรับใส่สารละลายซึ่งทำจากโฟม เนื่องจากมีค่าสภาพยอมไฟฟ้าใกล้เคียงกับอากาศ  $\epsilon_r = 1$  หลังจากนำสายอากาศไมโครสตริปทั้งสองแปะไว้ข้างกล่องโฟมที่บรรจุสารละลายความเข้มข้นใดๆแล้ว จะทำการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลางจากตัวส่งสู่ตัวรับโดยค่า S-parameter ที่วัดได้จะถูกนำไปประเมินกับข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio หลังจากการวัดค่า S-parameter แล้ว ข้อมูลจะถูกส่งเข้าสู่โปรแกรมโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ในการตัดสินใจข้อมูลที่ส่งเข้าไปและแสดงค่าความหวานออกมาในหน่วยบริกซ์ (Brix) ซึ่งเป็นหน่วยมาตรฐานที่ใช้สำหรับวัดความหวานตามอุตสาหกรรมต่างๆ

สำหรับการออกแบบไมโครเวฟเซนเซอร์ จะประกอบไปด้วยสี่องค์ประกอบหลักซึ่งได้แก่ ส่วนของเซนเซอร์ ส่วนของวงจรความถี่สูง ส่วนของวงจรควบคุมการแสดงผล และส่วนของวงจรประมวลผลข้อมูลด้วยโครงข่ายประสาทเทียมหรือการวิเคราะห์ถดถอยดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบหลักของระบบไมโครเวฟเซนเซอร์

โดยส่วนประกอบต่างๆ ของแต่ละองค์ประกอบได้แก่

### 3.1.1 ส่วนของเซนเซอร์

ประกอบไปด้วยสายอากาศสองตัวสำหรับส่งและรับที่ความถี่ 2.45 GHz รวมถึงวัสดุสำหรับใส่สารละลายในการทดสอบ

### 3.1.2 ส่วนของวงจรความถี่สูง

ประกอบด้วยวงจรเชื่อมต่อสัญญาณที่ใช้สำหรับการเหนี่ยวนำสัญญาณทั้งฝั่งส่งและฝั่งรับ ซึ่งฝั่งส่งจะเหนี่ยวนำสัญญาณคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้น ฝั่งรับจะเหนี่ยวนำสัญญาณที่รับได้หลังจากผ่านตัวกลางที่สูญเสียแล้ว ซึ่งค่าที่รับมาทั้งหมดจะถูกส่งผ่านวงจรตรวจจับกำลังสัญญาณความถี่สูง ซึ่งจะทำให้ได้พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับตัดสินใจในหน่วยประมวลผลของโครงข่ายประสาทเทียม

### 3.1.3 ส่วนของวงจรประมวลผล

ประกอบไปด้วยแป้นกดตัวเลข สำหรับนำตัวเลขที่ได้จากจอแสดงผล LCD ป้อนเป็นข้อมูลให้กับหน่วยประมวลผลด้วยโครงข่ายประสาทเทียม หลังจากนั้นจะใช้คอนโทรลเลอร์ได้ที่รับการโปรแกรมด้วยค่าตัวถ่วงน้ำหนักที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ก่อนหน้านี้ ในการประมวลผลเพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารละลายหรือในที่นี้คือความหวานนั่นเอง

### 3.1.4 ส่วนของวงจรควบคุมและแสดงผล

ประกอบไปด้วยส่วนของคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะรับค่าจากวงจรตรวจจับกำลังสัญญาณความถี่สูง จากนั้นจะมีการแปลงค่าจากสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลผ่านการควอนไทซ์ในคอนโทรลเลอร์ จากนั้นจะผ่านคำสั่งสำหรับการแสดงผลออกสู่หน้าจอ LCD เพื่อบอกค่าแรงดันที่ได้

## 3.2 การออกแบบสายอากาศ

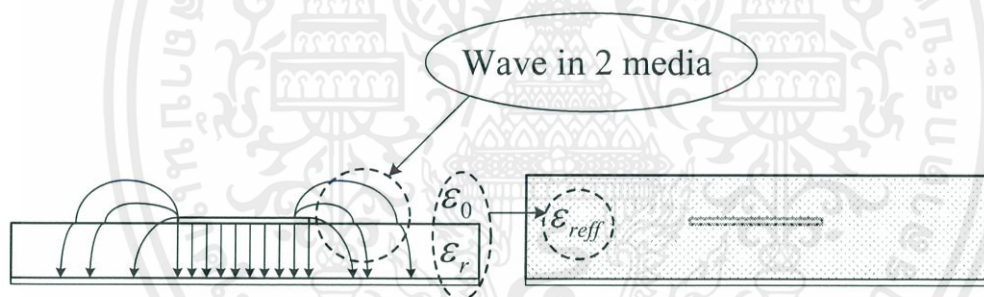
### 3.2.1 การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปรูปลี่เหลี่ยม

การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปมีด้วยกันหลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นแบบจำลองสายนำสัญญาณ (Transmission Line Model) แบบจำลองโพรงคลื่น (Cavity Model) และการวิเคราะห์เต็มคลื่น (Full Wave Analysis) เป็นต้น เนื่องจากวิธีการใช้แบบจำลองสายนำสัญญาณเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุด และให้ผลการวิเคราะห์เป็นที่ยอมรับ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะอธิบายวิธีการวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมด้วยวิธีการใช้แบบจำลองสายนำสัญญาณ [2]

สำหรับกรณีที่เราทราบค่าความถี่เรโซแนนท์และวัสดุฐานรองที่ใช้ เราจะสามารถคำนวณหา ค่าความกว้างของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมได้ดังสมการที่ (3.1)

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.1)$$

การออกแบบไมโครสตริปนั้นมียัตถุประสงค์หลัก คือการกำหนดค่าความกว้างของ ไมโครสตริปและความหนาของวัสดุฐานรองเพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ตามลักษณะที่ต้องการ ซึ่งในแผ่น ตัวนำนั้น จะมีปรากฏการณ์ Fringing Effect ที่สนามไฟฟ้า ณ ขอบของแผ่นตัวนำ จะมีสนามไฟฟ้า ผ่านเกินแผ่นตัวนำ ทำให้พบว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกนั้นไม่สามารถใช้ได้กับวัสดุฐานรอง จึงต้องเพิ่ม ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective Dielectric;  $\epsilon_{reff}$ ) ในการคำนวณหาขนาดของ พารามิเตอร์ต่างๆ [2] ซึ่งค่าไดอิเล็กตริกประสิทธิผลของระบบนั้น จะรวมผลของสารไดอิเล็กตริก ของวัสดุฐานรองและอากาศเข้าด้วยกันดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ผลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจากวัสดุฐานรองและอากาศ

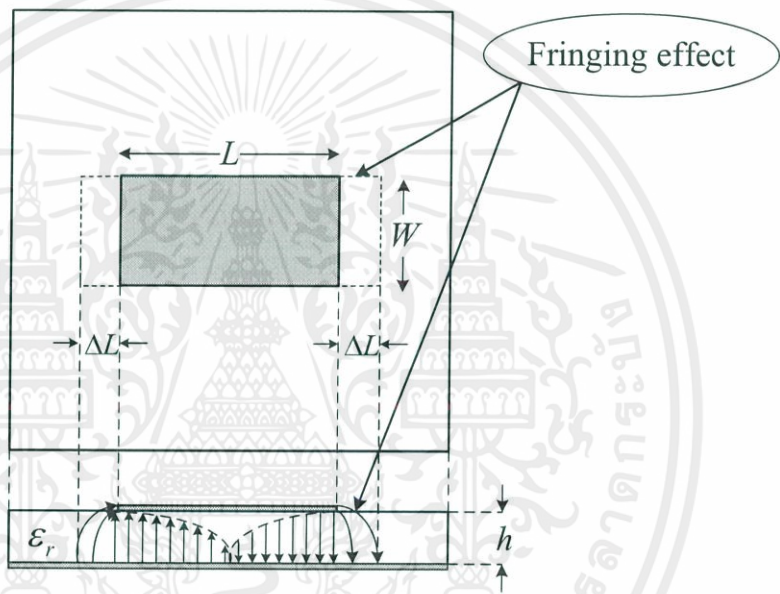
อีกทั้งสารไดอิเล็กตริกทั้งหลายมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ หรือมีดิสเพอร์ชันเชิงวัสดุ ดังนั้น  $\epsilon_{reff}$  ที่หาได้ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ไปด้วยซึ่งค่า  $\epsilon_{reff}$  นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (3.2)

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (3.2)$$

เมื่อ

$$\frac{W}{h} > 1$$

สายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมนั้นเราจะสังเกตที่ขอบด้านกว้างทั้งสอง มีสนามที่ขอบ (Fringing Field) ปรากฏอยู่ หมายความว่าความยาวทางไฟฟ้าของไมโครสตริปจะต้องยาวกว่าความยาว  $L$  นั่นคือความยาวประสิทธิผล (Effective Length) ของแผ่นตัวนำ โดยแผ่นตัวนำที่ใช้ในการคำนวณควรมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งสองด้านเท่ากับ  $\Delta L$  ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ความยาวประสิทธิผลของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยม

โดยสามารถคำนวณหาค่า  $\Delta L$  ได้ตามสมการที่ (3.3)

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.3)$$

จากนั้นทำการคำนวณหาค่าความยาวประสิทธิผลของไมโครสตริปจากผลของ Fringing Effect ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.4)

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (3.4)$$

จากสมการที่ 3.4 ค่าความยาวของแผ่นตัวนำจะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.5)

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (3.5)$$

สำหรับโหมดของคลื่น  $TM_{010}$  (Dominant Mode) ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปจะเป็นฟังก์ชันของความยาวดังสมการที่ (3.6)

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{c}{2L \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.6)$$

เมื่อ  $c$  คือ ความเร็วแสงในอากาศ มีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s

อย่างไรก็ตามค่าความถี่เรโซแนนซ์ในสมการที่ (3.6) นั้นยังไม่คิดผลของสนามที่ขอบ และถ้าหากคิดผลของสนามที่ขอบสมการ (3.6) จะต้องถูกปรับปรุงใหม่ดังสมการที่ (3.7)

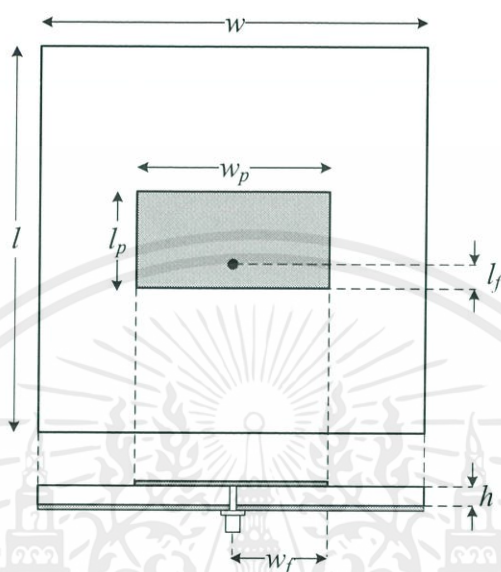
$$\begin{aligned} (f_{rc})_{010} &= \frac{1}{2L_{eff} \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{1}{2(L + \Delta L) \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \\ &= q \frac{1}{2L \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = q \frac{c}{2L \sqrt{\epsilon_r}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\text{เมื่อ } q = \frac{(f_{rc})_{010}}{(f_r)_{010}} \quad (3.8)$$

ค่า  $q$  จะเรียกว่า ตัวประกอบสนามที่ขอบ (Fringe Factor) ซึ่งเมื่อความหนาของวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสนามที่ขอบก็เพิ่มขึ้นตาม เป็นผลให้ระยะห่างระหว่างขอบของร่องที่แพร่กระจายคลื่นห่างกันมากขึ้นและค่าความถี่เรโซแนนซ์ลดลง

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เรานำไปคำนวณเพื่อออกแบบได้ โดยทำการออกแบบสายอากาศที่ทำงานในย่านความถี่ 2.4 GHz - 2.5 GHz ซึ่งจะมีความยาวคลื่นเท่ากับ 12.24 cm

และเลือกใช้วัสดุฐานรองแบบอีพอกซีหนา 1.6 mm ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.3 ซึ่งจะได้ผลการออกแบบด้วยค่าเริ่มต้นดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 สายอากาศไมโครสตริปที่ออกแบบด้วยค่าเริ่มต้น

และมีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและค่าเริ่มต้นจากการคำนวณ

พารามิเตอร์	ขนาด (cm)	ความยาวทางไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz (cm)
$w$	9.00	$0.73 \lambda$
$l$	9.00	$0.73 \lambda$
$w_p$	3.80	$0.31 \lambda$
$l_p$	2.90	$0.23 \lambda$
$w_f$	1.90	-
$l_f$	1.45	-
$h$	0.15	$0.01 \lambda$

เมื่อ

$w$	คือ ความกว้างของแผ่นกราวด์
$l$	คือ ความยาวของแผ่นกราวด์
$w_p$	คือ ความกว้างแพทช์
$l_p$	คือ ความยาวแพทช์
$w_f$	คือ ระยะจุดบ่อนสัญญาณอ้างอิงจากความกว้าง
$l_f$	คือ ระยะจุดบ่อนสัญญาณอ้างอิงจากความยาว
$h$	คือ ความสูงของวัสดุฐานรอง

### 3.2.2 ตัวแปรที่ใช้พิจารณาในการออกแบบ

การทดสอบคุณลักษณะสมรรถภาพของสายอากาศนั้นสามารถทดสอบได้จากความสามารถในการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวสายอากาศ ซึ่งมักจะพิจารณาจากค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งหรือ *VSWR* (Voltage Standing Wave Ratio) โดยใช้หลักการเดียวกับการสะท้อนและส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสองตัวกลาง ซึ่งหากว่าทั้งสองตัวกลางมีอิมพีแดนซ์ที่ตรงกัน ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถส่งผ่านออกไปเป็นส่วนมาก แต่หากว่าอิมพีแดนซ์ไม่ตรงกัน ก็จะส่งผลให้เกิดคลื่นนิ่งเป็นส่วนใหญ่ซึ่งหมายถึงกำลังงานที่จ่ายให้กับสายอากาศไม่สามารถแพร่ออกไปในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ในกรณีที่ซับซ้อนขึ้นกว่าที่กล่าวมาคือเมื่อไม่เกิดการสะท้อน 100% รวมทั้งไม่เกิดการส่งผ่าน 100% จะเกิดกรณีของสายอากาศที่ดูดซับพลังงานบางส่วนที่จ่ายให้ และมีส่วนที่เกิดการสะท้อนกลับ ซึ่งเราสามารถพิจารณาการสะท้อนจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนได้ซึ่งเป็นค่าเชิงซ้อนดังสมการที่ (3.9)

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (3.9)$$

เมื่อ	$Z_{in}$	คือ อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ
	$Z_0$	คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ

จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนดังที่กล่าวมา เราสามารถหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งได้ด้วยความสัมพันธ์ดังนี้

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (3.10)$$

ซึ่งหากเราพิจารณาระบบในลักษณะของโครงข่าย  $N$  พอร์ต ซึ่งจะประกอบไปด้วยคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนตามพอร์ตต่างๆ[4] ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของคลื่นตกกระทบและสะท้อนของแต่ละพอร์ตได้เป็น

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} S_{12} \cdots S_{1N} \\ S_{21} \ddots \\ \vdots \\ S_{N1} S_{N2} \cdots S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

เมื่อ กำหนดให้  $V_n^+$  เป็นแอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบและ  $V_n^-$  เป็นแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนจากพอร์ต  $n$  ใดๆ โดยป้อนกำลังเข้าสู่พอร์ต  $j$  และทำการวัดที่พอร์ต  $i$  จะทำให้สามารถนิยามเมทริกซ์การกระจาย (Scattering Matrix) ได้ด้วยความสัมพันธ์

$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0; k \neq j} \quad (3.12)$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าว ทำให้สามารถพิจารณาเมทริกซ์การกระจายร่วมกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสำหรับระบบในลักษณะของโครงข่าย 2 พอร์ตและหาความสัมพันธ์ได้เป็น

$$S_{11} = \left. \frac{V_1^-}{V_2^+} \right|_{V_2^+ = 0} = \Gamma \quad (3.13)$$

ซึ่งหมายถึง  $S_{11}$  จะมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนและ

$$S_{21} = \left. \frac{V_2^-}{V_1^+} \right|_{V_2^+ = 0} = T \quad (3.14)$$

โดย  $S_{21}$  จะมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

และเนื่องจากกำลังงานของคลื่นแปรผันตามกำลังสองของสนามไฟฟ้าดังนั้น

$$P = \frac{E^2}{\eta} \quad (3.15)$$

โดยที่  $\eta$  คืออิมพีแดนซ์ของตัวกลาง (Intrinsic Impedance) ทำให้สามารถหาค่าขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่านได้เป็น

$$|S_{11}| = \sqrt{\frac{P_r}{P_i}} \quad (3.16)$$

$$|S_{21}| = \sqrt{\frac{P_t}{P_i}} \quad (3.17)$$

### 3.2.3 หลักการคำนวณด้วยโปรแกรม

การคำนวณด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Method) สามารถช่วยในการพิจารณาสมการสำเร็จรูปที่คำนวณจากสมการของแมกซ์เวลล์พื้นฐาน ซึ่งใช้ภายใต้สภาวะแวล้อมที่มีความซับซ้อนสูงเนื่องจากความสัมพันธ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและตัวกลางมีความซับซ้อนมากรวมไปถึงขอบเขตเงื่อนไขในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนจนไม่สามารถใช้วิธีการเชิงวิเคราะห์ (Analytical Method) ในแบบทั่วไป ทำให้วิธีการเชิงตัวเลขได้เข้ามามีบทบาทในการแก้ไขปัญหาทางแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างมาก ซึ่งโปรแกรมการจำลองที่ใช้ในการคำนวณได้เลือกใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ซึ่งมีพื้นฐานการคำนวณด้วยเทคนิคการอินทิเกรตแบบจำกัด (Finite Integration Technique) ซึ่งเป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ทำการแบ่งโครงสร้างที่ต้องการแก้ปัญหออกเป็นโครงสร้างองค์ประกอบย่อย จากนั้นทำการคำนวณเชิงตัวเลขที่สัมพันธ์กับสมการของแมกซ์เวลล์ต่อองค์ประกอบย่อย ซึ่งผลลัพธ์จะเกิดจากการรวมผลขององค์ประกอบย่อย

### 3.2.4 การคำนวณด้วยโปรแกรมโดยใช้ค่าเริ่มต้น

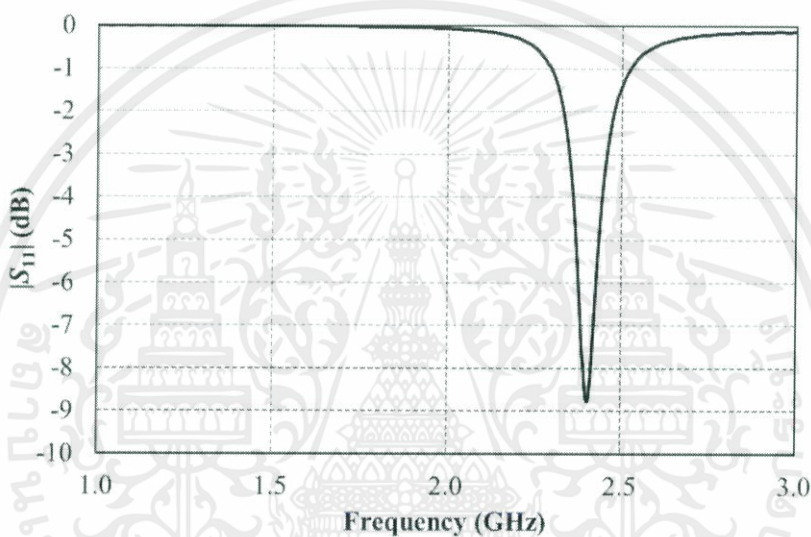
จากการคำนวณด้วยสมการที่ (3.1) ถึง (3.5) ทำให้ได้ค่าเริ่มต้นของสายอากาศไมโครสตริป แต่เนื่องจากวิธีการคำนวณดังกล่าวเป็นวิธีการคำนวณด้วยวิธีการเชิงวิเคราะห์ (Analytical Method) ซึ่งค่าที่ได้นั้นเป็นค่าประมาณและมีความแม่นยำต่ำ จากนั้นจึงนำค่าเริ่มต้นดังกล่าวเข้าไปจำลองด้วยโปรแกรมทางแม่เหล็กไฟฟ้าง่ายๆที่ได้กล่าวมาในตอนต้น ซึ่งก็คือโปรแกรม CST Microwave Studio โดยการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นให้กับโครงสร้างของปัญหาและทำการจำลองด้วยตัวแปรที่เป็นค่าเริ่มต้น โดยจะให้การพิจารณาที่ค่า  $|S_{11}|$  เป็นหลัก เนื่องจากเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศ ซึ่งค่า  $|S_{11}|$  ที่เป็นที่ยอมรับใช้

งานได้นั้นควรมีค่าต่ำกว่า -10dB เป็นต้นไปเนื่องจากมีกำลังงานที่ส่งออกสู่อากาศว่าง (Free Space) ถึง 91% ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการสะท้อนกลับ

$VSWR$	$\Gamma$	$ S_{11} $ (dB)	กำลังงานสะท้อนกลับ (%)	กำลังงานส่งผ่าน (%)
1.000	0.00	$\infty$	0.00	100.00
1.020	0.01	-40.000	0.01	99.99
1.041	0.02	-33.979	0.04	99.96
1.062	0.03	-30.458	0.09	99.91
1.083	0.04	-27.957	0.16	99.84
1.105	0.05	-26.021	0.25	99.75
1.222	0.10	-20.000	1.00	99.00
1.353	0.15	-16.478	2.25	97.75
1.500	0.20	-13.979	4.00	96.00
1.667	0.25	-12.041	6.25	93.75
1.857	0.30	-10.458	9.00	91.00
2.077	0.35	-9.1190	12.25	87.75
2.333	0.40	-7.9590	16.00	84.00
2.636	0.45	-6.9360	20.25	79.75
3.000	0.50	-6.0210	25.00	75.00
3.444	0.55	-5.1930	30.25	69.75
4.000	0.60	-4.4370	36.00	64.00
4.714	0.65	-3.7420	42.25	57.75
5.667	0.70	-3.0980	49.00	51.00
7.000	0.75	-2.4990	56.25	43.75
9.000	0.80	-1.9380	64.00	36.00
12.33	0.85	-1.4120	72.25	27.75
19.00	0.90	-0.9150	81.00	19.00
39.00	0.95	-0.4460	90.25	9.75
199.0	0.99	-0.0870	98.01	1.99

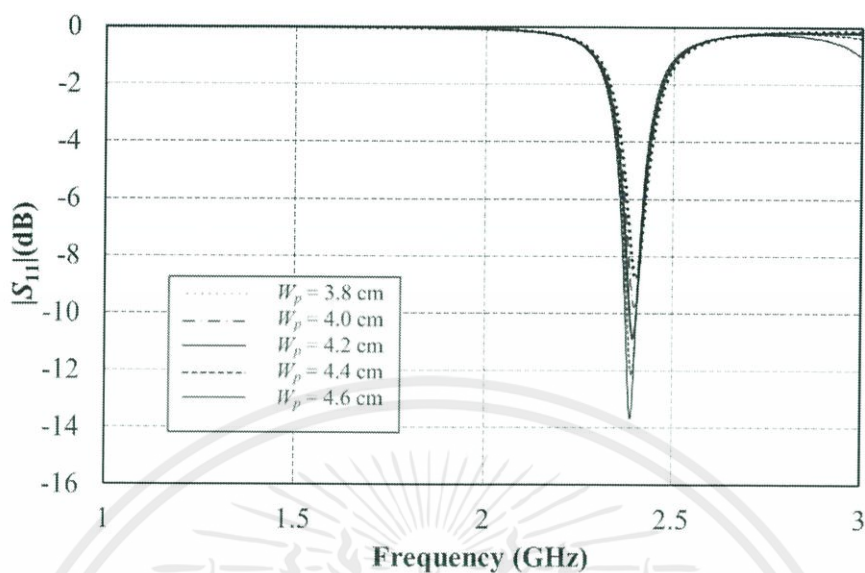
จากการใช้โปรแกรมคำนวณโดยค่าเริ่มต้น พบว่ากราฟที่แสดงค่า  $|S_{11}|$  นั้นมีลักษณะที่เลื่อนออกจากตำแหน่งที่คำนวณไว้ด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์ซึ่งได้วิเคราะห์ให้สายอากาศนั้นเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งที่ความถี่เรโซแนนซ์โครงสร้างของสายอากาศจะเกิดการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีที่สุด แต่เนื่องจากวิธีการคำนวณด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์ดังกล่าวนั้นเป็นวิธีการคำนวณโดยการประมาณ ซึ่ง  $|S_{11}|$  ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมมีค่าเท่ากับ -8.6dB ที่ความถี่ 2.45 GHz ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5  $|S_{11}|$  ของสายอากาศโดยการจำลองจากโปรแกรมซึ่งใช้ค่าเริ่มต้น

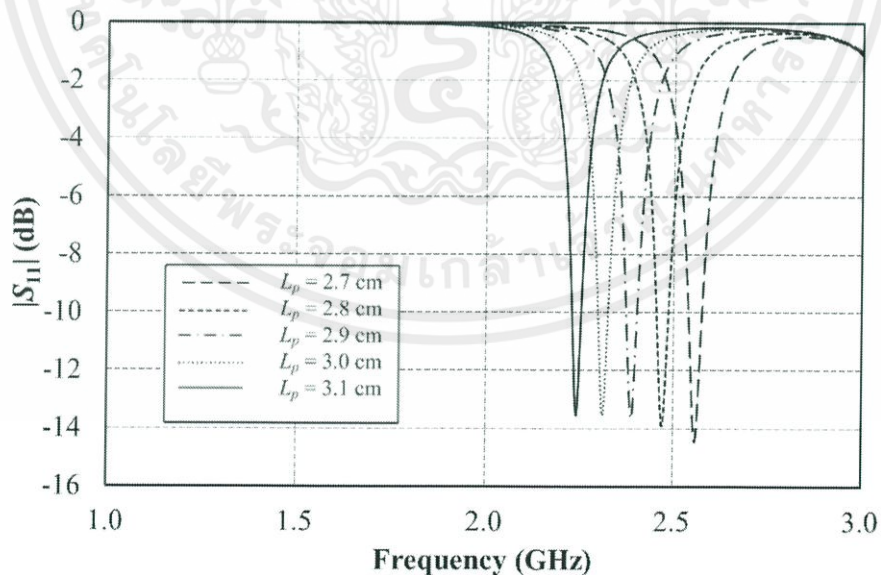
### 3.2.5 การศึกษาผลกระทบต่อการปรับโครงสร้างสายอากาศ

อันดับต่อไปจะเป็นการศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดกับสายอากาศเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไม่ว่าจะเป็นความกว้างและความยาวของตัวแพทช์สายอากาศรวมไปถึงตำแหน่งป้อนสัญญาณ รวมไปถึงพฤติกรรมของการเรโซแนนซ์ของสายอากาศเมื่อมีการเปลี่ยนโครงสร้าง โดยจะทำการศึกษาความกว้างของแพทช์  $W_p$  ก่อนเป็นอันดับแรก จากนั้นเป็นความยาว  $L_p$  และจุดป้อนสัญญาณ โดยจากการจำลองด้วยโปรแกรม ได้ทำการเปลี่ยนค่าความกว้าง  $W_p$  ซึ่งส่งผลต่อการเลื่อนตำแหน่งของความถี่เรโซแนนซ์ไม่มาก แต่ส่งผลถึงความสามารถในการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยสายอากาศเมื่อเพิ่มความกว้างขึ้น จะทำให้เกิดการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีขึ้น สังเกตได้จากค่า  $|S_{11}|$  ที่มีค่าต่ำลงเมื่อเกิดการเพิ่มความยาวขึ้นดังรูปที่ 3.6



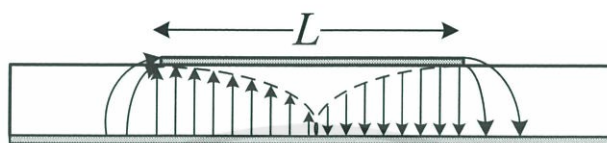
รูปที่ 3.6 ผลของ  $|S_{11}|$  เมื่อเพิ่มความกว้างของแพทช์

จากนั้นเมื่อทำการปรับค่าความยาวของแพทช์  $L_p$  จะสังเกตได้ว่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศเกิดการเลื่อนซึ่งเมื่อทำการเพิ่มความยาวของสายอากาศจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนไปความถี่ต่ำลง และเมื่อลดความยาวของสายอากาศจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนไปที่ความถี่ที่สูงขึ้นดังรูปที่ 3.7



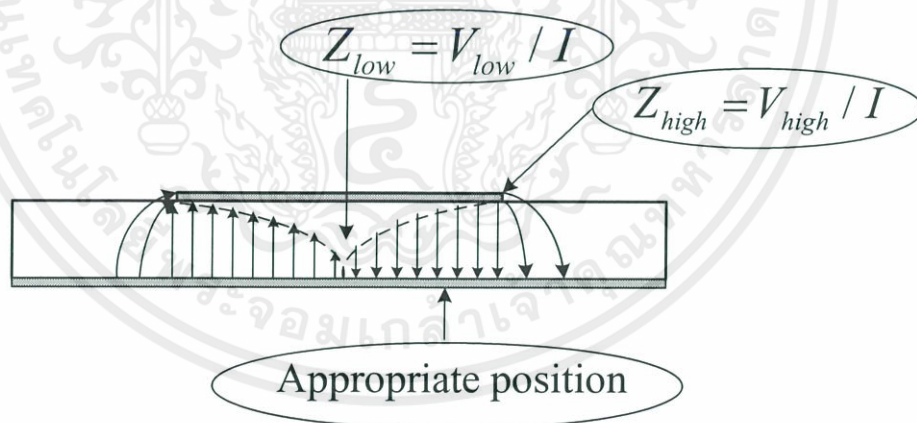
รูปที่ 3.7 ผลของ  $|S_{11}|$  เมื่อเพิ่มความยาวของแพทช์

และเมื่อทำการปรับจุดบ่อนสัญญาณ โดยจะทำการปรับตำแหน่งการบ่อนสัญญาณในแนวเดียวกับความยาวของแพทช์เนื่องจากเป็นแนวที่มีการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าตามแนวยาวของแพทช์

จากรูปดังกล่าว สามารถพิจารณาได้ว่าเมื่อทำการบ่อนสัญญาณที่จุดปลาย ซึ่งเป็นจุดที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด จะส่งผลให้จุดบ่อนสัญญาณมีอิมพีแดนซ์ที่สูงที่สุดจากความสัมพันธ์  $Z = V / I$  ซึ่งพิจารณาในสถานะที่กระแสไฟฟ้าคงที่ แต่เมื่อเปลี่ยนจุดบ่อนสัญญาณไปที่ตำแหน่งกลางแพทช์ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเข้มสนามต่ำสุดหรือประมาณศูนย์ จากความสัมพันธ์  $Z = V / I$  จะส่งผลให้อิมพีแดนซ์บริเวณกึ่งกลางแพทช์นั้นมีค่าเป็นศูนย์ดังรูปที่ 3.9

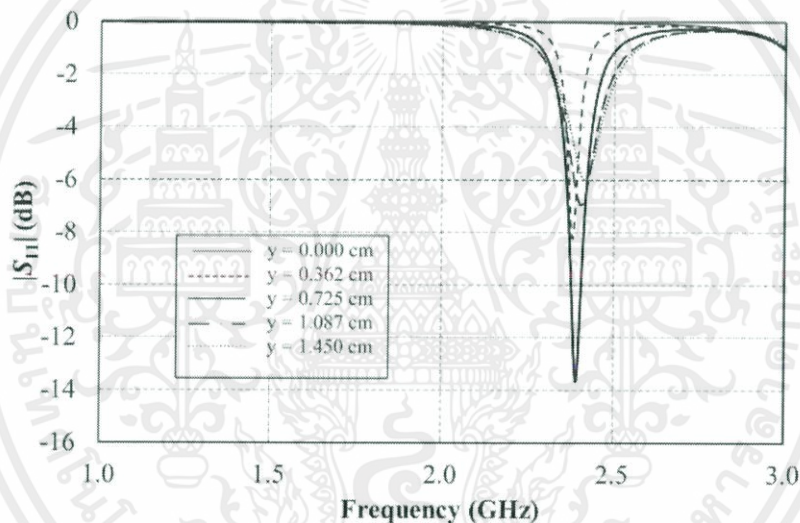


รูปที่ 3.9 ตำแหน่งบ่อนสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อ

ซึ่งในการบ่อนสัญญาณนั้นเป็นการบ่อนด้วยพอร์ตที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ซึ่งในกรณีที่ทำการบ่อนสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ที่ไม่เท่ากับ 50 โอห์ม จะส่งผลให้เกิดคลื่นสะท้อนและเกิดคลื่นนิ่งตามลำดับจากความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนในสมการที่ (3.10) ซึ่งในการบ่อนสัญญาณต้องทำการ

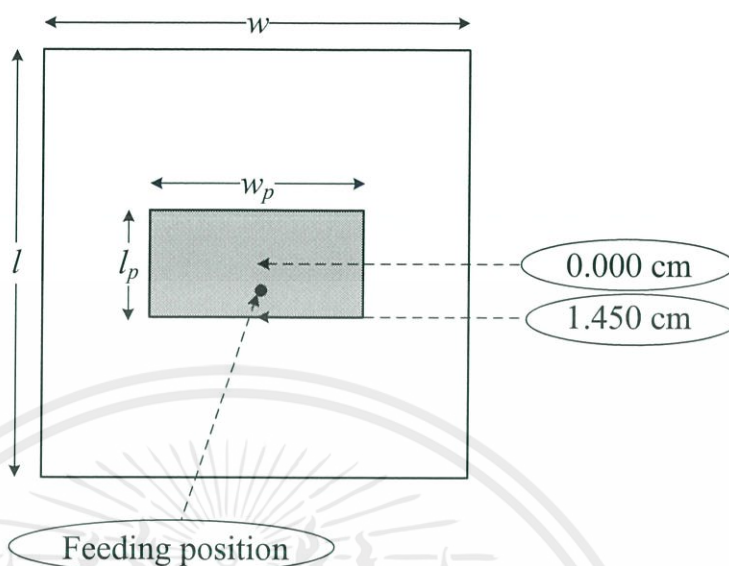
เลือกตำแหน่งที่มีอิมพีแดนซ์ที่ใกล้เคียง 50 โอห์ม มากที่สุด เพื่อที่จะไม่ให้เกิดการสะท้อนและเกิดคลื่นนิ่งภายในสายส่งสัญญาณ (Transmission Line)

สำหรับการคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการบ่อนสัญญาณให้อิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับพอร์ตหรือการแมทซ์ซิ่งที่ดีนั้น ได้ทำการจำลองด้วยโปรแกรมในการบ่อนที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยพิจารณาจากค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศ เนื่องจากหากการบ่อนสัญญาณกระทำในตำแหน่งไม่เหมาะสมแล้ว ส่งผลให้การสะท้อนและคลื่นนิ่งดังที่ได้กล่าวมา ทำให้กำลังของสัญญาณไม่ถูกส่งเข้าสู่สายอากาศอย่างเหมาะสม ซึ่งจะส่งผลต่อสายอากาศในการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และจะแสดงความสามารถในการแผ่โดย  $|S_{11}|$  ดังที่ได้กล่าวมา โดยจะแสดงการจำลองการบ่อนสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ผลของ  $|S_{11}|$  เมื่อเปลี่ยนจุดบ่อนสัญญาณ

เมื่อตำแหน่งในการบ่อนสัญญาณอ้างอิงจากรูปที่ 3.11



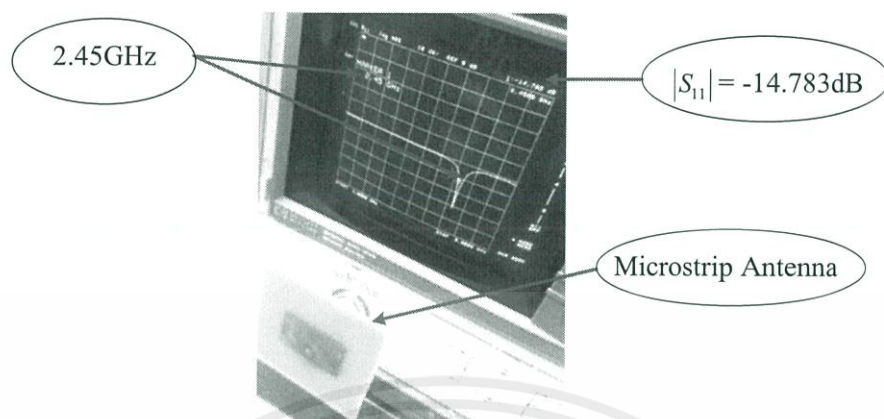
รูปที่ 3.11 ตำแหน่งที่อ้างอิงในการบ่อนสัญญาณ

ซึ่งจากการปรับโครงสร้างของสายอากาศด้วยโปรแกรมทำให้ได้รูปร่างของสายอากาศใหม่ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปหลังจากการจำลองด้วยโปรแกรม

Parameter	Dimension (cm)	ขนาดทางไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz (cm)
$w$	9.00	$0.73 \lambda$
$l$	9.00	$0.73 \lambda$
$w_p$	4.60	$0.37 \lambda$
$l_p$	2.90	$0.23 \lambda$
$w_f$	2.250	-
$l_f$	0.725	-
$h$	0.150	$0.01 \lambda$

ซึ่งจากโครงสร้างดังกล่าวมีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2.47 GHz แต่สามารถใช้งานได้เนื่องจากที่บริเวณความถี่ 2.45 GHz นั้นมีค่า  $|S_{11}|$  ประมาณ -14dB ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานเนื่องจากการแพร่พลังงานถึงเกือบ 96% และมีการสะท้อนกลับเพียงประมาณ 4% โดยโครงสร้างไมโครสตริปดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.12



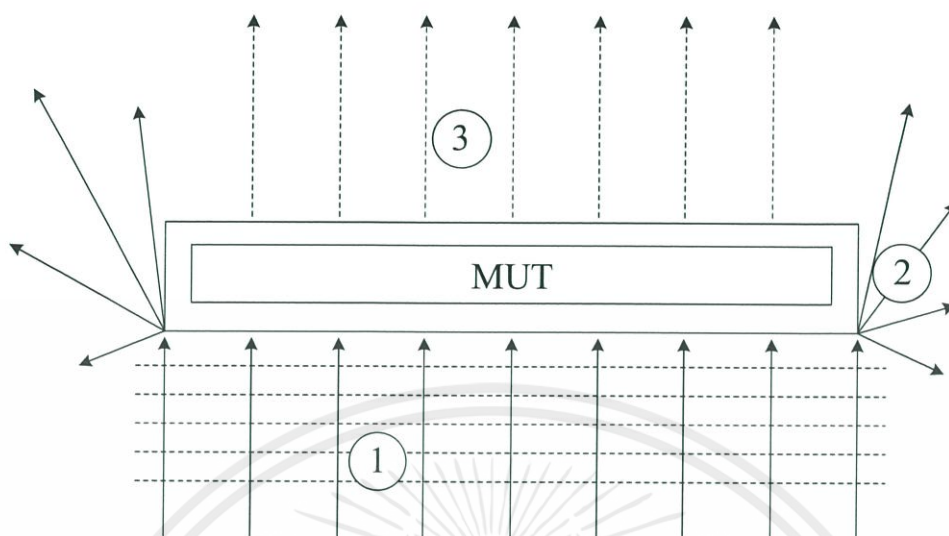
รูปที่ 3.12 การทดสอบสายอากาศที่คำนวณจากโปรแกรม

### 3.3 การศึกษาบริเวณสนามที่เหมาะสมแก่การทดสอบด้วยไมโครเวฟเซนเซอร์

ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทก่อนหน้า ซึ่งสนามสำหรับการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศนั้นเราสามารถที่จะพิจารณาสนามได้ทั้งหมดสามบริเวณได้แก่ บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ บริเวณแพร่กระจายคลื่นสนามระยะใกล้ และบริเวณสนามระยะไกล ซึ่งในกรณีนี้จะทำการศึกษาถึงผลกระทบเพียงสองบริเวณได้แก่บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เนื่องจากกำลังสัญญาณที่ได้หลังจากผ่านตัวกลางที่สูญเสียจะมีค่ามาก และการศึกษาบริเวณสนามระยะไกลเนื่องจากเราสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมคลื่นของสนามระยะไกลได้ง่ายด้วยเหตุผลที่ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่บริเวณนี้เป็นคลื่นระนาบและองค์ประกอบทางไฟฟ้าและแม่เหล็กนั้นมีลักษณะตั้งฉากกัน ทำให้สามารถวิเคราะห์สนามบริเวณรอยต่อได้ไม่ยากนัก โดยจะเริ่มต้นทำการศึกษาที่สนามระยะไกลก่อน จากนั้นจึงศึกษาบริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้

#### 3.3.1 การศึกษาพฤติกรรมในบริเวณสนามระยะไกล

สำหรับสนามระยะไกลนั้น สนามที่ตกกระทบนั้นมีลักษณะเป็นคลื่นระนาบ ซึ่งเราสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของคลื่นที่บริเวณรอยต่อได้ แต่เนื่องจากบริเวณขอบของวัสดุที่มีมุมแหลมนั้น จะส่งผลให้เกิดการกระเจิง (Dispersion) หรือคลื่นเกิดการกระจาย (Diffraction) ส่งผลให้ค่าที่ตรวจจับได้ทางด้านฝั่งรับนั้นมีค่าไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของคลื่นระนาบที่ตกกระทบภาชนะสำหรับการวัดนั้นแสดงดังรูปที่ 3.13



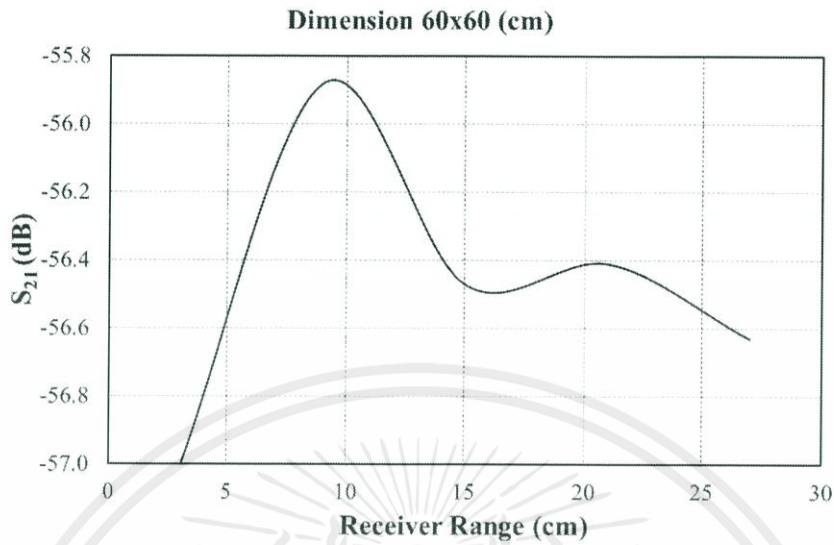
รูปที่ 3.13 คลื่นระนาบตกกระทบกับพลาสมา(มุมมองด้านบน)

จากรูปที่มีบริเวณที่สำคัญอยู่ 3 บริเวณได้แก่

บริเวณที่ 1 เป็นบริเวณที่คลื่นระนาบที่เกิดจากสนามระยะไกลของสายอากาศตกกระทบพลาสมาที่มีสารละลายตัวกลางสูญเสียอยู่ภายใน ซึ่งคลื่นในส่วนที่ตกกระทบ ส่วนหนึ่งจะสามารถผ่านสารละลายไปด้วยอัตราการลดทอนค่าหนึ่ง อีกส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับเนื่องจากความแตกต่างของตัวกลางที่คลื่นเดินทาง

บริเวณที่ 2 เป็นบริเวณที่เกิดการกระเจิงของคลื่น เนื่องจากคลื่นตกกระทบที่ขอบหรือมุมของพลาสมา ทำให้เกิดหน้าคลื่นใหม่ๆ ออกไปหลายทิศทางและส่งผลให้เกิดการแทรกสอดในบริเวณที่ 3

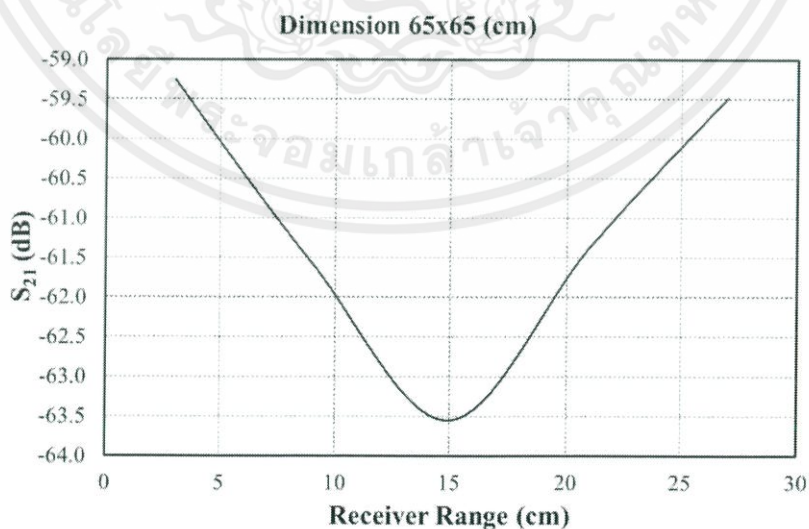
บริเวณที่ 3 เป็นบริเวณฝั่งรับ คลื่นที่อยู่ในบริเวณนี้เกิดจากคลื่นที่ผ่านตัวกลางสูญเสียมาส่วนหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งเกิดจากคลื่นกระเจิงจากขอบในบริเวณขอบของพลาสมา ทำให้หน้าคลื่นบางส่วนเกิดการแทรกสอดและบางส่วนเกิดการหักล้าง ซึ่งบริเวณแรกๆ หลังจากผ่านพลาสมาจะเป็นบริเวณที่เรียกว่าชองเงา (Shadow Region) สำหรับคลื่นที่กระเจิงมา ดังนั้นคลื่นในส่วนนี้จะเกิดการรวมตัวระหว่างคลื่นที่ผ่านพลาสมาและคลื่นกระเจิง ซึ่งที่ระยะที่ต่างกันก็ทำให้รับสัญญาณได้แตกต่างกัน ดังรูปที่ 3.14



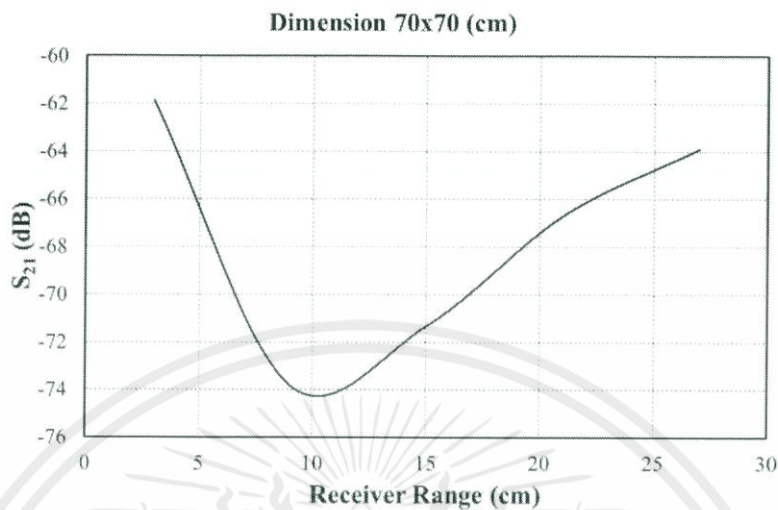
รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างฝั่งรับและสัญญาณที่รับได้

จากรูปดังกล่าว เป็นการศึกษาด้วยการจำลองโดยโปรแกรม ซึ่งทำการหาค่าสัญญาณที่รับได้ทางฝั่งรับ ด้วยระยะที่แตกต่างกันของสายอากาศฝั่งรับ โดยจะพบว่าที่ระยะต่างๆกัน สายอากาศรับสามารถรับสัญญาณได้แตกต่างกัน อันเนื่องมาจากการรวมกันของคลื่นที่ผ่านตัวกลางสูญเสียและคลื่นกระเจิง

จากตัวอย่างก่อนหน้า เป็นการศึกษาถึงผลกระทบโดยทำการคงค่าของขนาดของภาชนะไว้ที่ความกว้าง 60cm และความยาว 60cm ซึ่งอันดับต่อไปจะเป็นการศึกษามลกระทบที่ระยะห่างต่างๆ เมื่อเพิ่มขนาดภาชนะเป็น 65cmx65cm และ 70cmx70cm ดังรูปที่ 3.14 และ รูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างฝั่งรับและสัญญาณที่รับได้เมื่อเพิ่มขนาดครั้งแรก



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างฝั่งรับและสัญญาณที่รับได้เมื่อเพิ่มขนาดครั้งที่สอง

### 3.3.2 การศึกษาพฤติกรรมในบริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้

ในขณะที่การทดสอบในบริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้นั้นมีข้อดีในด้านกำลังทาง ด้านรับ เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะลดการสูญเสียระหว่างทางในอวกาศว่างไป แต่ปัญหาหลัก ของบริเวณนี้คือการวิเคราะห์ในบริเวณนี้ค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากสนามที่แพร่กระจายออกมามี องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามตำแหน่ง ซึ่งทำให้ยากต่อการ วิเคราะห์พฤติกรรม แตกต่างกับสนามระยะไกลที่สามารถวิเคราะห์ได้ง่ายกว่า แต่สนามระยะใกล้ นั้น ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้า เกิดปัญหาของคลื่นกระเจิง รวมไปถึงสัญญาณที่ลดทอนที่มาก ทำให้ สัญญาณที่รับได้ในบริเวณสนามระยะใกล้อยู่ในระดับต่ำมาก ส่วนใหญ่จะต่ำกว่า -50 dB เป็นต้น ไป ส่วนสนามระยะใกล้ถึงแม้จะไม่สามารถวิเคราะห์ได้แต่สัญญาณที่รับได้จากสายอากาศฝั่งรับนั้น รับได้มากกว่า ซึ่งเราจะชดเชยข้อเสียของบริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ ด้วยการโปรแกรม จำลองศึกษาพฤติกรรม และทำการทดสอบเพื่อเทียบเคียงเป็นลำดับต่อไป

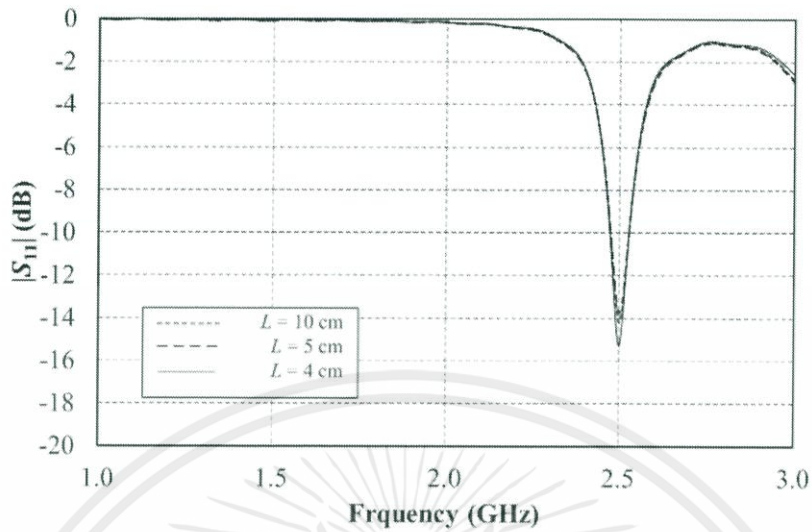
### 3.4 การออกแบบโครงสร้างภาชนะสำหรับสารละลาย

สำหรับภาชนะสำหรับใส่สารละลายนั้น ได้ออกแบบโดยใช้วัสดุโพลีที่มีความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ใกล้เคียงหรือประมาณได้เท่ากับอากาศ  $\epsilon_r = 1$  เพื่อลดจำนวนชั้นรอยต่อ ซึ่งจะส่งผลต่อการสะท้อนและส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยได้ออกแบบโครงสร้างเริ่มต้นดังรูปที่ 3.17



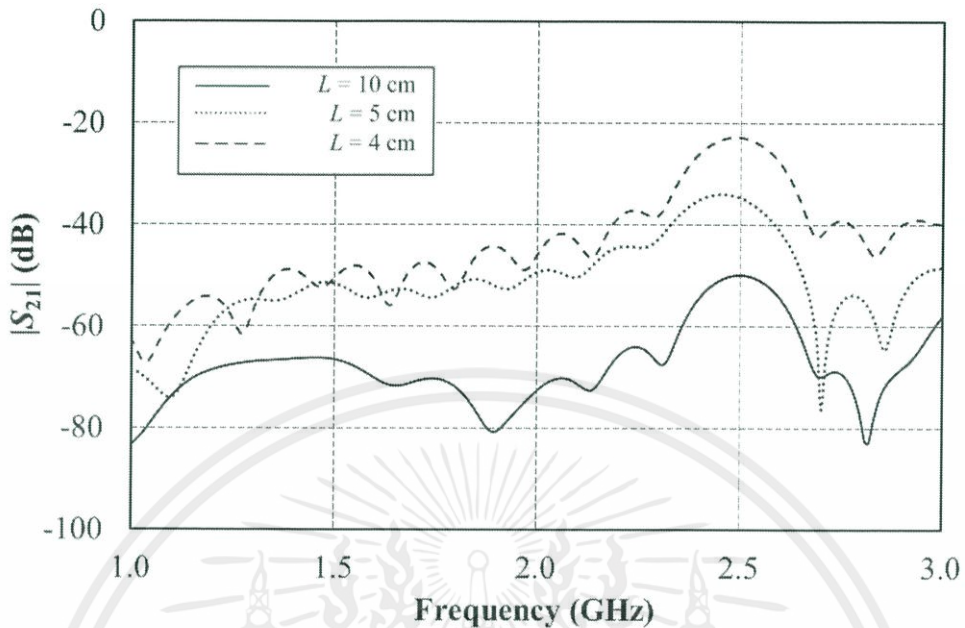
รูปที่ 3.17 กล่องโพลีที่ออกแบบเริ่มต้น

จากโครงสร้างของกล่องโพลีที่ออกแบบเริ่มต้น จึงได้ทำการศึกษาผลของโครงสร้างที่จะมีผลกระทบต่อ การสะท้อนและส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายอากาศ จากการศึกษ โดยการปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่  $W$   $L$   $h$  และ  $D$  โดยมีสายอากาศส่งและสายอากาศรับวางอยู่ในระนาบ  $W$  และ  $h$  ซึ่งมีระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับเป็นระยะห่าง  $L$  พบว่าในระนาบที่นำสายอากาศติดกับกล่องไม่มีผลกระทบใดๆ ตราบใดที่กล่องมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของสายอากาศ ส่วนที่มีผลต่อการสะท้อนและส่งผ่านของคลื่นได้แก่ระยะระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ หรือในแนว  $L$  รวมถึงความหนาของขอบกล่อง  $D$  ซึ่งผลของระยะระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับคือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศจะไม่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศส่ง หรือ  $|S_{11}|$  แต่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน  $|S_{21}|$  จากหลักการเมทริกซ์การกระจาย (Scattering Matrix) ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ผลของ  $|S_{11}|$  เมื่อปรับโครงสร้างกล่องด้านยาว ( $L$ )

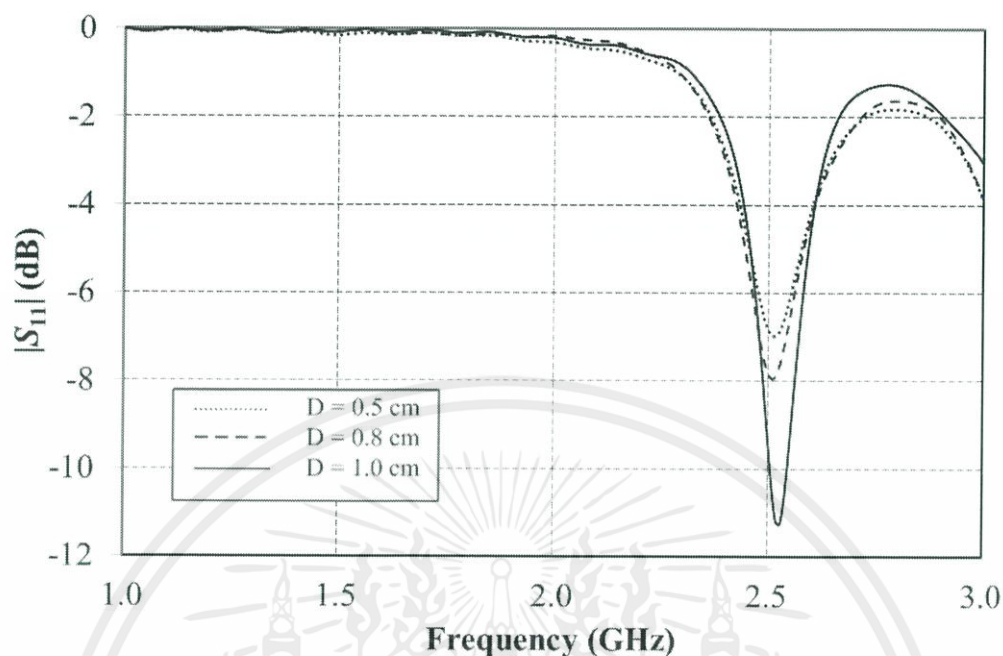
ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าการปรับระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับนั้นไม่ส่งผลต่อค่า  $|S_{11}|$  เนื่องจาก  $|S_{11}|$  พิจารณาเฉพาะสายอากาศส่งโดยคำนึงถึงการเชื่อมต่อระหว่างพอร์ตที่เชื่อมต่อกับสายนำสัญญาณ และสายอากาศซึ่งที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่า  $|S_{11}|$  ตามระยะต่างๆ มีค่าเท่ากับ เมื่อ  $L=10\text{cm}$   $|S_{11}|$  มีค่าเท่ากับ  $-6.067\text{dB}$  ที่ระยะ  $L=5\text{cm}$   $|S_{11}|$  มีค่าเท่ากับ  $-6.063\text{dB}$  และ ที่  $L=4\text{cm}$   $|S_{11}|$  มีค่าเท่ากับ  $-6.181\text{dB}$  แต่การปรับระยะห่างนี้ส่งผลต่อ  $|S_{21}|$  ด้วยเนื่องจากระยะห่างที่มากขึ้นส่งผลให้สัญญาณเกิดการลดทอนระหว่างทาง ซึ่งจะทำให้ค่าที่วัดจากสายอากาศรับหรือพอร์ตสอง เมื่อส่งสัญญาณจากสายอากาศหนึ่งหรือพอร์ตหนึ่งนั้นมีค่าลดลง ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ผลของ  $|S_{21}|$  เมื่อปรับโครงสร้างกล่องด้านยาว ( $L$ )

จากรูปที่ 3.19 สามารถพิจารณาได้ว่า  $|S_{21}|$  เพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างลดลง ซึ่งหมายถึงพอร์ตสองสำหรับสายอากาศรับ สามารถรับสัญญาณได้ดีขึ้นเมื่อระยะห่างน้อยลง โดยที่  $|S_{21}|$  ที่ระยะต่างๆ มีค่าเท่ากับ  $L=10$  cm จะมีค่า  $|S_{21}|$  เท่ากับ  $-50.861$  dB ที่  $L=5$  cm จะมีค่า  $|S_{21}|$  เท่ากับ  $-33.966$  dB และที่  $L=4$  cm จะมีค่า  $|S_{21}|$  เท่ากับ  $-23.311$  dB จากการพิจารณาที่  $L=4$  cm จะมีการสูญเสียในตัวกลางน้อยที่สุด และที่  $L=10$  cm จะมีการสูญเสียในตัวกลางมากที่สุด

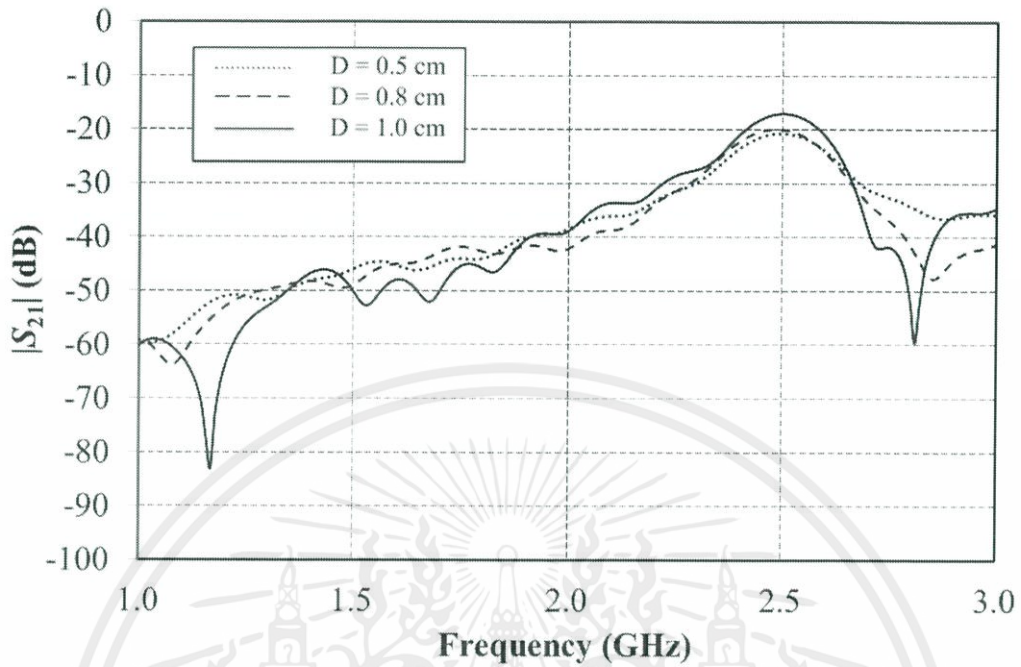
ตัวแปรอันดับต่อมาที่มีความสำคัญและมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนโครงสร้างคือความหนาของขอบกล่อง  $D$  ซึ่งเมื่อทำการปรับความหนาเพิ่มขึ้นและลดลงส่งผลต่อค่า  $|S_{11}|$  เพียงเล็กน้อย แต่ส่งผลกับค่า  $|S_{21}|$  มากกว่า โดยผลของการปรับโครงสร้างความหนาของขอบกล่องที่มีผลต่อ  $|S_{11}|$  แสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ผลของ  $|S_{11}|$  เมื่อปรับโครงสร้างความหนาขอบกล่อง

จากรูปที่ 3.20 สามารถพิจารณาได้ว่าเมื่อเพิ่มขอบของกล่องโพลีให้มีความหนาเพิ่มขึ้น จะเป็นการเพิ่มระยะทางระหว่างสายอากาศก่อนที่จะถึงตัวสารละลายมากขึ้น ซึ่งถึงแม้จะมีผลไม่มาก แต่การเพิ่มขอบของกล่องโพลีสามารถช่วยเพิ่มค่า  $|S_{11}|$  ให้มีค่าที่ดีขึ้นได้ ซึ่งที่ความถี่ 2.45 GHz ระยะความหนาของขอบมีค่าต่างกันส่งผลให้ค่า  $|S_{11}|$  มีค่าเท่ากับ เมื่อความหนาของกล่องเป็น  $D=0.5$  cm  $|S_{11}|$  มีค่าเท่ากับ -4.742 dB เมื่อกล่องมีความหนาเท่ากับ 0.8 cm  $|S_{11}|$  มีค่าเท่ากับ -4.488 dB และเมื่อกล่องมีความหนาเป็น 1.0 cm จะได้  $|S_{11}|$  เท่ากับ -5.239 dB เป็นต้น

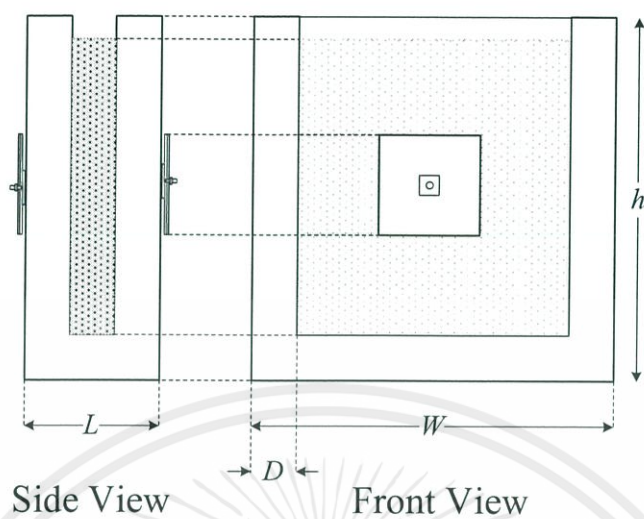
จากผลกระทบของความหนาขอบกล่องที่ส่งผลต่อค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศส่ง ซึ่งเมื่อ  $|S_{11}|$  ของสายอากาศส่งสามารถส่งได้ดีขึ้นก็ย่อมส่งผลต่อ  $|S_{21}|$  ของสายอากาศรับให้ดีขึ้นตามถึงแม้จะอยู่ในสภาวะที่มีการลดทอนของสัญญาณ และในทางตรงกันข้าม เมื่อค่า  $|S_{11}|$  ของสายอากาศส่งมีค่าน้อยก็ย่อมมีสัญญาณออกจากสายอากาศน้อยและผ่านเข้าสู่ตัวกลางจนไปถึงสายอากาศรับน้อยลง โดยค่าของ  $|S_{21}|$  ที่ความหนาขอบต่างๆ กันแสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ผลของ  $|S_{21}|$  เมื่อปรับโครงสร้างความหนาขอบกล่อง

รูปที่ 3.21 แสดงถึงผลของค่า  $|S_{21}|$  เมื่อมีการเพิ่มความหนาของขอบ ซึ่งเมื่อขนาดของขอบกล่องเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า  $|S_{21}|$  มีค่าที่ดีขึ้นโดยที่ขนาดต่างๆ มีค่า  $|S_{21}|$  เท่ากับ เมื่อความหนา  $D=0.5$  cm  $|S_{21}|$  มีค่าเท่ากับ  $-21.322$  dB เมื่อความหนา  $D=0.8$  cm  $|S_{21}|$  มีค่าเท่ากับ  $-20.291$  dB และเมื่อ  $D=1.0$  cm  $|S_{21}|$  มีค่าเท่ากับ  $-18.015$  dB และ ซึ่งค่า  $|S_{21}|$  แตกต่างจาก  $|S_{11}|$  ที่ค่า  $|S_{21}|$  มีค่าลบน้อยจะดีกว่าเนื่องจากเมื่อต้องการตรวจจับสัญญาณสามารถตรวจจับได้โดยไม่ต้องใช้ตัววัดกำลังที่มีความไวสูงนัก (Sensitivity) แตกต่างจากค่า  $|S_{11}|$  ที่ต้องการให้มีค่าลบมาก เนื่องจากมีการสะท้อนกลับของสัญญาณน้อยกว่าสัญญาณที่ส่งเข้าไป

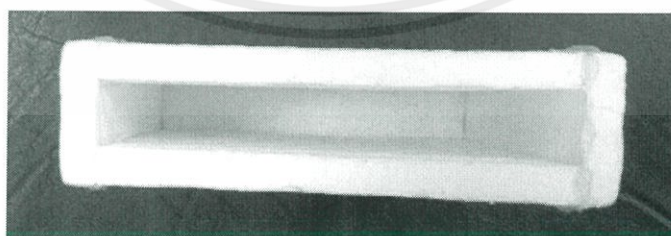
ซึ่งจากการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ของโครงสร้างกล่องโพมแล้วทำให้ได้กล่องโพมที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.22-3.24



รูปที่ 3.22 กล่องโฟมที่ออกแบบโดยมีสายอากาศส่งส่งและรับ



รูปที่ 3.23 กล่องโฟมที่สร้างเมื่อมองจากด้านหน้าและด้านข้าง



รูปที่ 3.24 กล่องโฟมที่สร้างเมื่อมองจากมุมบน

โดยกล่องโพลีเมตริกแล้ว จะมีขนาดโครงสร้างดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ขนาดโครงสร้างของกล่องโพลีเมตริก

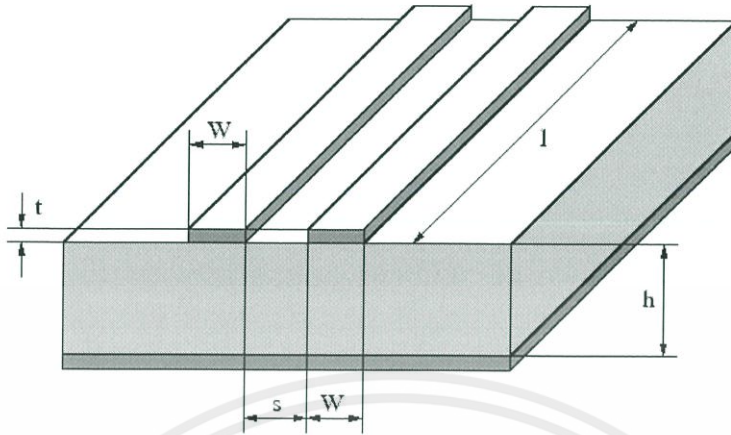
พารามิเตอร์	ขนาด (cm)
$W$	15
$L$	3
$D$	1
$h$	15

เนื่องความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $|S_{11}|$  ของ Co-polarization และ Cross-polarization มีค่าใกล้เคียงกัน จึงจะใช้เพียงแค่ว่า  $|S_{11}|$  ของ Co-polarization เป็นอินพุตสำหรับโปรแกรม แต่จะใช้ค่า  $|S_{21}|$  ของ Co-polarized และ  $|S_{21}|$  ของ Cross-polarized เป็นค่าอินพุตให้กับระบบ และเนื่องจากค่า  $\epsilon'$  (Dielectric Constant) และ  $\epsilon''$  (Loss Factor) ไม่สามารถที่จะหาค่าด้วยสมการคณิตศาสตร์ได้ จึงได้นำเอาโครงข่ายประสาทเทียมเข้ามาช่วยในการประมวลผลหาค่าตอบของค่า  $\epsilon'$  (Dielectric Constant) และ  $\epsilon''$  (Loss Factor)

### 3.5 การออกแบบวงจรความถี่สูง (Radio Frequency Circuit)

#### 3.5.1 วงจรเชื่อมต่อสัญญาณแบบขนาน (Parallel Directional Coupler)

เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ต้องการทำการทำสอบนั้นประกอบไปด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ซึ่งการตรวจจับคลื่นนี้ระหว่างแหล่งจ่ายและสายอากาศได้นั้น ต้องอาศัยวงจรเชื่อมต่อสัญญาณในการเหนี่ยวนำสัญญาณเพื่อใช้ในการตรวจวัด โดยจะทำการออกแบบวงจรเชื่อมต่อสัญญาณแบบขนานที่มีลักษณะเป็นสายนำสัญญาณแบบสตริป เนื่องจากออกแบบง่ายและเป็นที่ยอมรับหลายในการใช้งานย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยออกแบบบนแผ่นพิมพ์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.3 และความสูง ( $h$ ) เท่ากับ 1.5 mm โดยกำหนดให้  $W$  เป็นความกว้างของสายนำสัญญาณ ซึ่งมีขนาดเท่ากันทั้งสองเส้น  $s$  แทนระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณทั้งสอง และ  $l$  แทนความยาวของสายเชื่อมต่อขนาน ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 ลักษณะทางกายภาพของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณแบบขนาน

สำหรับการออกแบบวงจรเชื่อมต่อสัญญาณ จะทำการออกแบบด้วยเทคนิคการออกแบบวงจรเชื่อมต่อสัญญาณบนไมโครสตริปแบบสังเคราะห์ ด้วยเทคนิคดังกล่าว ทำให้สามารถออกแบบวงจรเชื่อมต่อสัญญาณด้วยโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน อีกทั้งไม่จำเป็นต้องทราบถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นอกจากความถี่ที่ใช้งาน พอร์ตที่ต้องการจะเชื่อมต่อ ระดับสัญญาณที่ต้องการให้เหนี่ยวนำ รวมทั้งลักษณะพื้นฐานทางกายภาพของแผ่นพิมพ์ที่ต้องการจะออกแบบ ซึ่งค่าที่ได้จากการออกแบบนั้นก็เพียงพอต่อการใช้งานในระดับทั่วไป สำหรับการออกแบบจะเริ่มต้นด้วยการหาค่าอิมพีแดนซ์โหลดและโหลดคี่ของวงจร โดยอ้างอิงจากอิมพีแดนซ์ของพอร์ต

$$Z_o = \sqrt{Z_{oe} Z_{oo}} \quad (3.18)$$

เมื่อ

$Z_o$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของพอร์ตซึ่งมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม

$Z_{oe}$  และ  $Z_{oo}$  คืออิมพีแดนซ์โหมดคู่และโหมดคี่ตามลำดับ

ซึ่งการใช้เทคนิคการออกแบบด้วยวิธีการแบบสังเคราะห์นั้นจะเริ่มต้นทำการคำนวณความสัมพันธ์ทางกายภาพพื้นฐานด้วยการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณสองเส้นต่อความสูงของวัสดุฐานรอง  $s/h$  รวมไปถึงขนาดความกว้างของสายนำสัญญาณต่อความสูงของวัสดุฐานรอง  $W/h$  ซึ่งการคำนวณจะดำเนินไปตามลำดับดังนี้

ขั้นตอนที่1 การคำนวณหาอิมพีแดนซ์ในโหมดคู่และโหมดคี่

$$Z_{oe} = Z_0 \sqrt{\frac{1+10^{C/20}}{1-10^{C/20}}} \quad (3.19)$$

$$Z_{oo} = Z_0 \sqrt{\frac{1-10^{C/20}}{1+10^{C/20}}} \quad (3.20)$$

โดยที่ค่า C เป็นค่าการเหนี่ยวนำที่เราต้องการให้เกิดซึ่งในกรณีนี้จะกำหนดให้เท่ากับ -10 dB

ขั้นตอนที่2 การคำนวณหาความสัมพันธ์ทางกายภาพของสายนำสัญญาณและระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณ ซึ่งจะเป็นการคำนวณหาขนาดทางกายภาพของระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณทั้งสองสายที่ขนานกันต่อความสูงของวัสดุฐานรองดังนี้

$$\frac{s}{h} = \frac{2}{\pi} \cosh^{-1} \left[ \frac{\cosh\left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{W}{h}\right)_{so}\right] + \cosh\left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{W}{h}\right)_{so}\right] - 2}{\cosh\left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{W}{h}\right)_{so}\right] - \cosh\left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{W}{h}\right)_{se}\right]} \right] \quad (3.21)$$

เมื่อ  $W/h$  คืออัตราส่วนระหว่างความกว้างของสายนำสัญญาณต่อความสูงของวัสดุฐานรองดังนี้

$$\frac{W}{h} = \frac{8 \sqrt{\left[\exp\left(\frac{R}{42.4} \sqrt{\epsilon_r + 1}\right) - 1\right] \frac{7 + (4/\epsilon_r)}{11} + \frac{1 + (1/\epsilon_r)}{0.81}}}{\left[\exp\left(\frac{R}{42.4} \sqrt{\epsilon_r + 1}\right) - 1\right]} \quad (3.22)$$

โดยที่

$$R = \frac{Z_{oe}}{2} \quad \text{หรือ} \quad R = \frac{Z_{oo}}{2} \quad (3.23)$$

ซึ่งถูกกำหนดโดย

$$Z_{ose} = \frac{Z_{oe}}{2}$$

$$Z_{oso} = \frac{Z_{oo}}{2}$$

$$(W/h)_{se} = (W/h)|_{R=Z_{ose}}$$

$$(W/h)_{so} = (W/h)|_{R=Z_{oso}}$$

$$\left(\frac{W}{h}\right)'_{so} = 0.78\left(\frac{W}{h}\right)_{so} + 0.1\left(\frac{W}{h}\right)_{se} \quad (3.24)$$

จากนั้นเราสามารถที่จะหาขนาดของความกว้างของสายเชื่อมต่อสัญญาณได้โดย

$$\left(\frac{W}{h}\right) = \frac{1}{\pi} \cosh^{-1}(d) - \frac{1}{2} \left(\frac{s}{h}\right) \quad (3.25)$$

เมื่อ

$$d = \frac{\cosh\left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{W}{h}\right)_{se}\right](g+1) + g - 1}{2} \quad (3.26)$$

และ

$$g = \cosh\left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{s}{h}\right)\right] \quad (3.27)$$

ขั้นตอนที่ 3 การคำนวณหาความยาวทางกายภาพของสายนำสัญญาณ ( $l$ ) โดยที่

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.28)$$

เมื่อ  $c$  คือความเร็วแสงในอวกาศว่างและ  $f$  คือความถี่ที่ใช้งาน ส่วน  $\epsilon_{eff}$  เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประสิทธิผลอันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าที่มีการแพร่กระจายในสองตัวกลางซึ่งได้แก่ อากาศและวัสดุฐานรองซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\varepsilon_{eff} = \left[ \frac{\sqrt{\varepsilon_{effe}} + \sqrt{\varepsilon_{effo}}}{2} \right]^2 \quad (3.29)$$

ซึ่ง  $\varepsilon_{effe}$  และ  $\varepsilon_{effo}$  เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลที่เกิดจากการประพุดิตัวตั้งตัวเก็บประจุ โดยอ้างอิงจากโหมดการทำงานที่เป็นโหมดคู่และโหมดคี่ตามลำดับ ดังความสัมพันธ์ดังนี้

$$\varepsilon_{effe} = \frac{C_e}{C_{e1}} \quad (3.30)$$

$$\varepsilon_{effo} = \frac{C_o}{C_{o1}} \quad (3.31)$$

ซึ่งจะแบ่งการคำนวณออกเป็นสองแบบได้แก่การคำนวณในโหมดคู่และการคำนวณในโหมดคี่โดยเริ่มต้นจากการคำนวณในโหมดคู่ก่อนดังนี้

$$C_e = C_p + C_f + C'_f \quad (3.32)$$

โดยที่  $C_p$  เป็นค่าความจุไฟฟ้าแบบขนานในวัสดุฐานรองซึ่งจะเท่ากับ

$$C_p = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{W}{h} \quad (3.33)$$

อันดับต่อไปคือ  $C_f$  ซึ่งเป็นค่าความจุไฟฟ้าอันเนื่องมาจากสนามที่ขอบสายนำสัญญาณ (Fringing field) ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์ในกรณีที่สายนำสัญญาณอยู่โดดเดี่ยวเท่ากับ

$$C_f = \frac{\sqrt{\varepsilon_{seff}}}{2cZ_0} - \frac{C_p}{2} \quad (3.34)$$

ซึ่ง  $\varepsilon_{seff}$  คือสภาพยอมไฟฟ้าประสิทธิผลของสายนำสัญญาณโดดเดี่ยวสามารถหาได้จาก

$$\varepsilon_{seff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} - \frac{\varepsilon_r - 1}{2} F(W/h) \quad (3.35)$$

เมื่อ

$$F(W/h) = (1+12h/W)^{-1/2} + 0.041(1-W/h)^2; (W/h \leq 1)$$

$$= (1+12h/W)^{-1/2} \quad ; (W/h \geq 1) \quad (3.36)$$

จากนั้นทำการคำนวณหา  $C'_f$  ด้วยสมการดังนี้

$$C'_f = \frac{C_f}{1 + A(h/s) \tanh(10h/s)} \left( \frac{\epsilon_r}{\epsilon_{seff}} \right)^{1/4} \quad (3.37)$$

เมื่อ

$$A = \exp[-0.1 \exp(2.33 - 1.5 \frac{W}{h})] \quad (3.38)$$

สำหรับขั้นตอนต่อไปจะเป็นการคำนวณค่าความจุในโหมดตีซึ่งค่าความจุรวมในโหมดตีจะเท่ากับ

$$C_o = C_p + C'_f + C_{ga} + C_{gd} \quad (3.39)$$

โดยที่

$$C_{ga} = \epsilon_0 \frac{K(k')}{K(k)} \quad (3.40)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}\frac{K(k')}{K(k)} &= \frac{1}{\pi} \ln \left[ 2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right]; 0 \leq k^2 \leq 0.5 \\ &= \frac{\pi}{\ln \left[ 2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right]}; 0.5 \leq k^2 \leq 1\end{aligned}\quad (3.41)$$

ซึ่ง

$$\begin{aligned}k &= \frac{(s/h)}{(s/h) + (2W/h)} \\ k' &= \sqrt{1 - k^2}\end{aligned}\quad (3.42)$$

ในขณะที่  $C_{gd}$  แสดงถึงค่าความจุทางไฟฟ้าเนื่องจากผลของสนามจากขอบของสายนำสัญญาณในกรณีของโหมดคี่ข้ามช่องว่างระหว่างสายนำสัญญาณสองสายซึ่งจะสามารถคำนวณได้จาก

$$C_{gd} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \ln \left\{ \coth \left( \frac{\pi s}{4h} \right) + 0.65 C_f \left[ \frac{0.02}{(s/h)} \sqrt{\epsilon_r + \left( 1 - \frac{1}{\epsilon_r} \right)} \right] \right\} \quad (3.43)$$

เมื่อ

$$Z_{oe} = \frac{1}{c \sqrt{C_e C_{el}}} \quad (3.44)$$

$$Z_{oo} = \frac{1}{c \sqrt{C_o C_{ol}}} \quad (3.45)$$

ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถจะเขียนใหม่ได้เป็น

$$C_{el} = \frac{1}{c^2 C_e Z_{oe}^2} \quad (3.46)$$

$$C_{ol} = \frac{1}{c^2 C_o Z_{oo}^2} \quad (3.47)$$

ซึ่งจากการคำนวณด้วยขั้นตอนดังกล่าวทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณดัง ตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่าทางกายภาพของการเชื่อมต่อสัญญาณ

พารามิเตอร์	ค่าทางกายภาพ (mm)
$W$	2
$l$	38
$s$	2.8
$t$	0.05
$h$	1.5

จากตารางดังกล่าวทำให้สามารถสร้างวงจรเชื่อมต่อสัญญาณดังรูปที่ 3.26 ซึ่งจากรูปดังกล่าว จะพบว่ามีการใช้ dummy load 50 โอห์ม ซึ่งมีไว้เพื่อทำการทดสอบคลื่นสะท้อนของวงจรในส่วนต่อไป

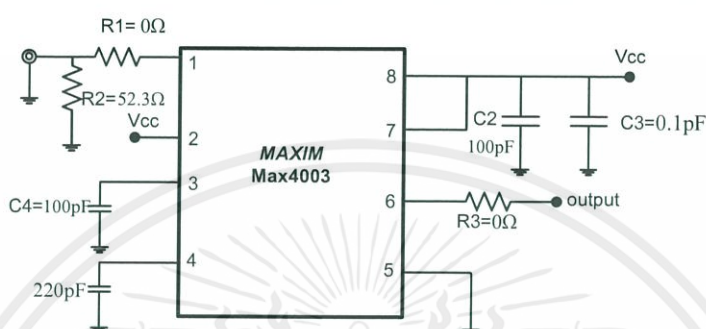


รูปที่ 3.26 ลักษณะของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณ

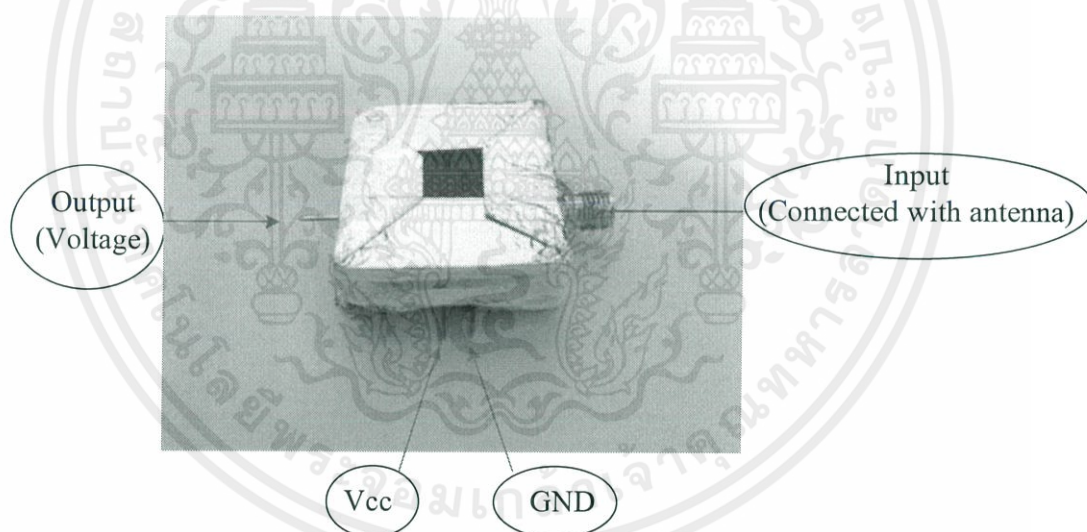
### 3.5.2 วงจรตรวจจับกำลังสัญญาณความถี่สูง (Radio Frequency Power Detector)

การออกแบบวงจรตรวจจับกำลังสัญญาณความถี่สูงได้เลือกออกแบบโดยใช้ชิพเบอร์ MAX4003 ซึ่งเป็นชิพที่มีราคาถูก สามารถขยายสัญญาณด้วยฟังก์ชันลอการิทึมทำให้สามารถตรวจวัดได้ในช่วงที่กว้าง ซึ่งสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ไปจนถึง 2.5 GHz โดยช่วงสัญญาณที่รับได้ตั้งแต่ -45 dBm ถึง 0 dBm โดยใช้พอร์ท 50 โอห์ม ซึ่งใช้แหล่งจ่ายในช่วง

2.7-5.0 โวลต์ และให้สัญญาณขาออกในช่วง 0.2-1.8 โวลต์ โดยวงจรตรวจจับกำลังสัญญาณความถี่สูงได้ใช้ชิพเบอร์ MAX4003 ดังแสดงในรูปที่ 3.27 และลักษณะของวงจรจริงหลังจากทำการป้องกันคลื่นรบกวนดังแสดงในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.27 วงจรตรวจจับกำลังสัญญาณความถี่สูง

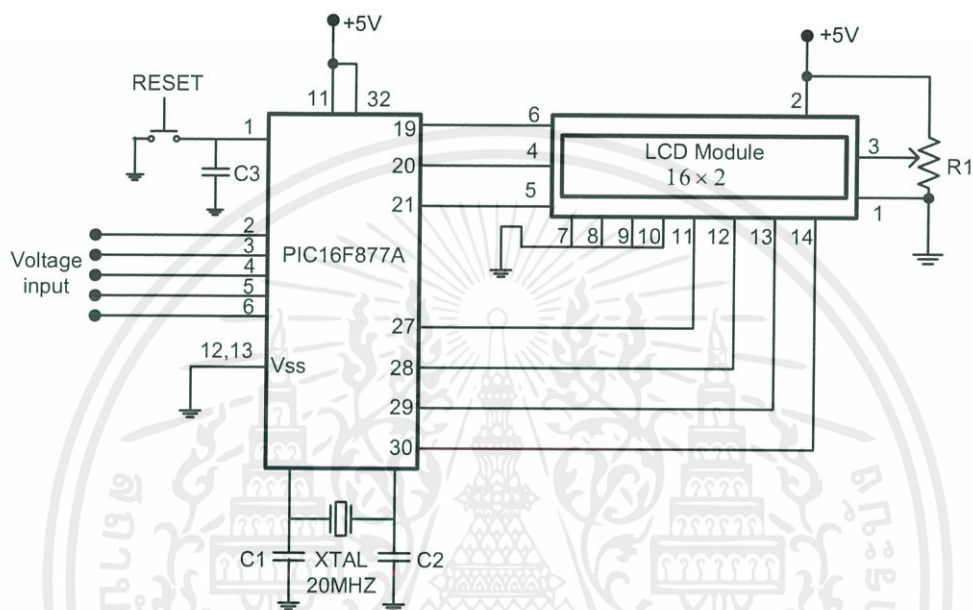


รูปที่ 3.28 ลักษณะของวงจรตรวจจับกำลังสัญญาณความถี่สูง

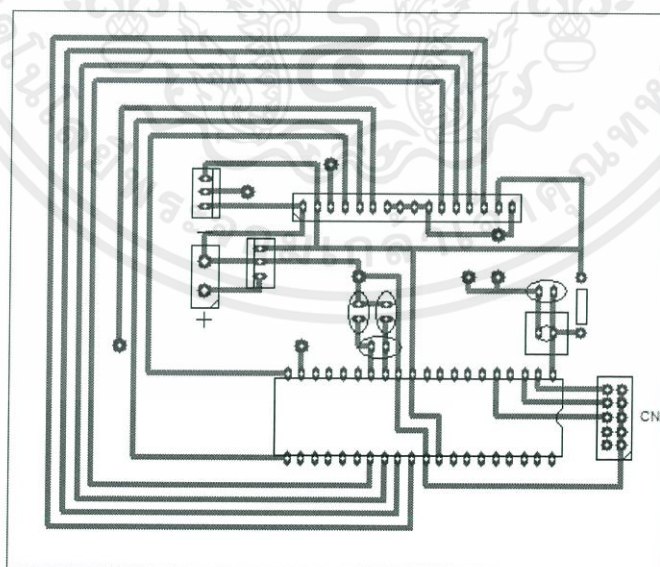
### 3.6 การออกแบบวงจรแสดงผล

หลังจากผ่านวงจรตรวจจับกำลังสัญญาณความถี่สูงแล้วจะได้สัญญาณออกมาเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆ ซึ่งการที่จะนำค่าแรงดันไฟฟ้าง่ามาแสดงผลนั้น จำเป็นต้องมีวงจรที่ใช้ตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและทำการแปลงค่าดังกล่าวให้สามารถแสดงผลออกสู่จอ LCD ได้ โดยการ

ออกแบบวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าจะใช้วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ภายในตัวของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ 16F877A แล้วแปลงค่าที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณ อนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ให้เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าแล้วแสดงผลออกทางหน้าจอแอลซีดี แสดงดัง รูปที่ 3.29-3.31

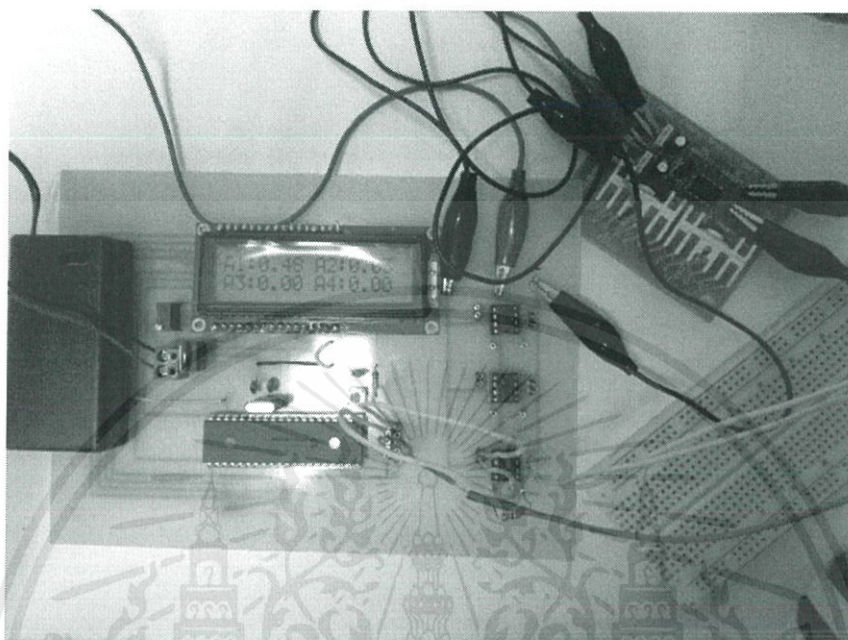


รูปที่ 3.29 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.30 ลายทองแดงวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า

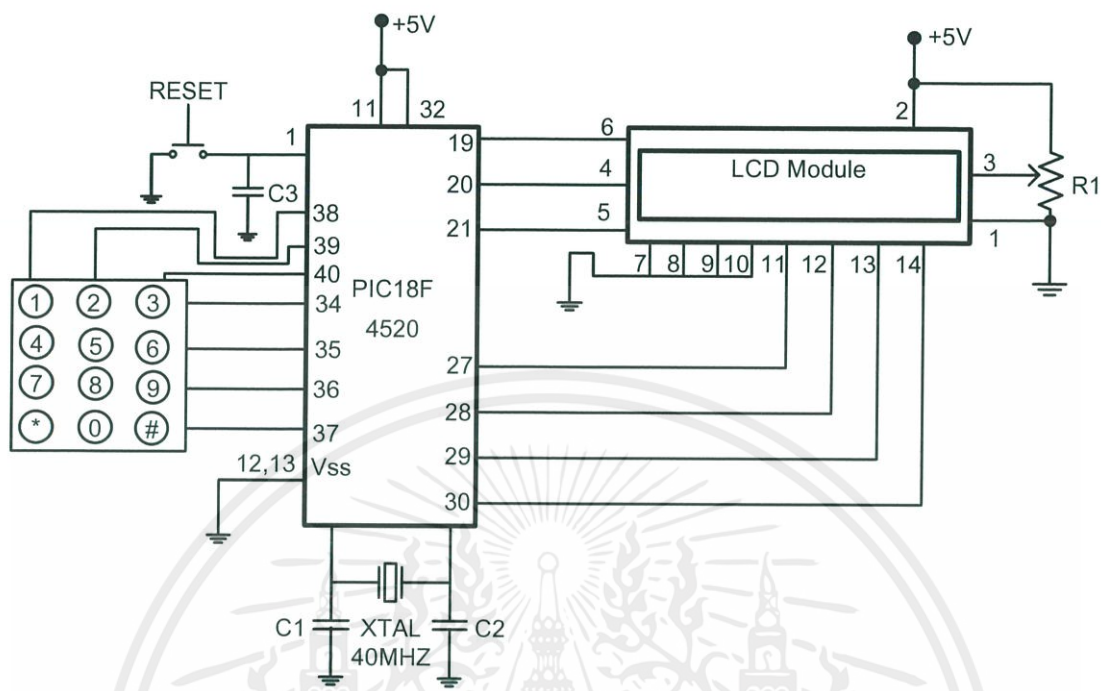
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



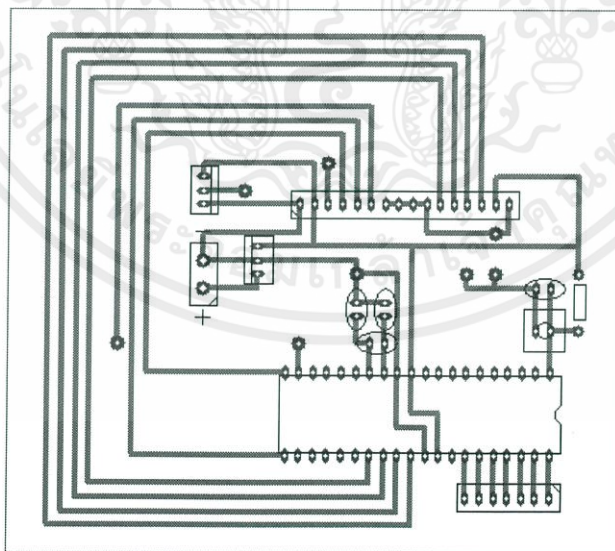
รูปที่ 3.31 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า

### 3.7 วงจรสำหรับประมวลผลโครงข่ายประสาทเทียม

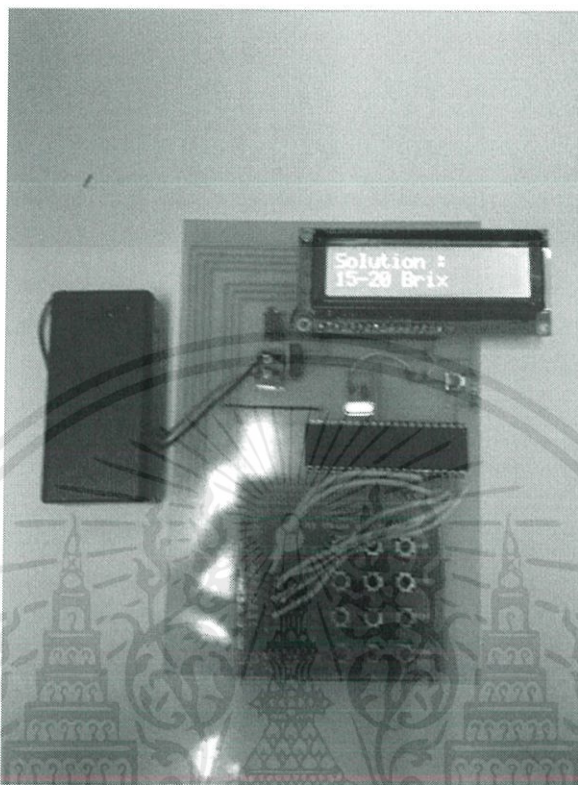
ในส่วนของวงจรประมวลผลจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PICเบอร์ 18F4520 ประมวลผลโครงข่ายประสาทเทียม โดนรับข้อมูลผ่านคีย์แพดและแสดงผลออกทางหน้าต่อแอลซีดี แสดงดังรูปที่ 3.32-3.34



รูปที่ 3.32 วงจรประมวลผลสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม



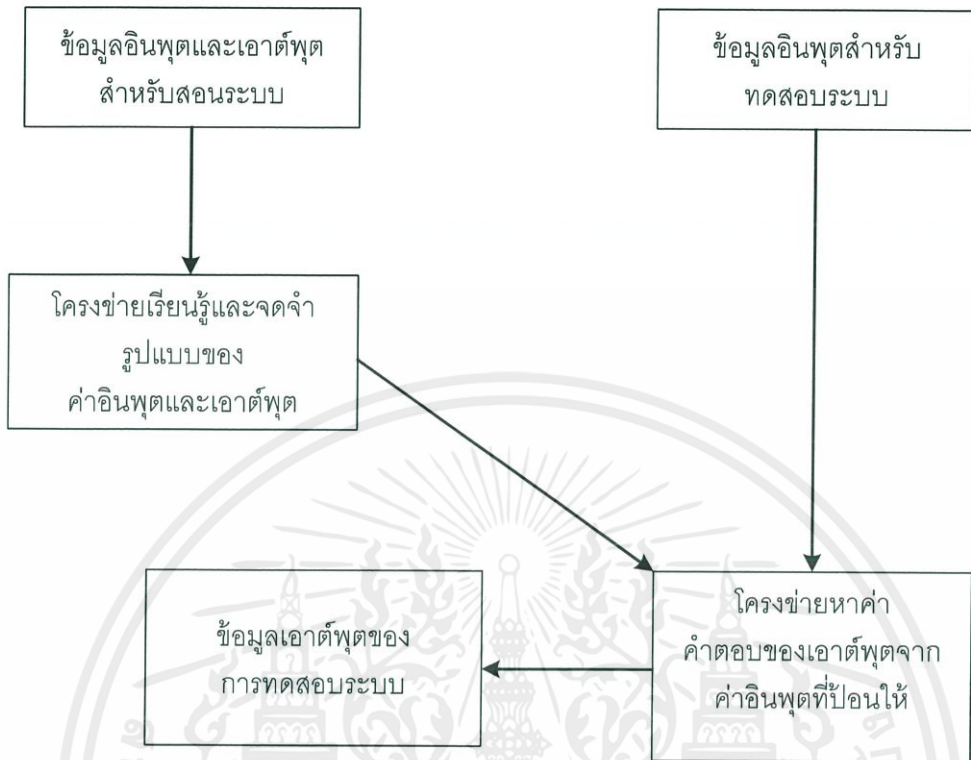
รูปที่ 3.33 ลายทองแดงวงจรสำหรับประมวลผลโครงข่ายประสาทเทียม และการวิเคราะห์สมการถดถอย



รูปที่ 3.34 วงจรสำหรับประมวลผลโครงข่ายประสาทเทียมและการวิเคราะห์สมการถดถอย

### 3.8 การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการหาค่าตอบของ $\epsilon'$ และ $\epsilon''$

การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่ทำการหาค่าตอบของ  $\epsilon'$  (Dielectric Constant) และ  $\epsilon''$  (Loss Factor) จากค่าอินพุต 3 ค่าคือ  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ของ การโพลาไรซ์ร่วม และ  $|S_{21}|$  ของ การโพลาไรซ์ไขว้โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีเซลล์ประสาทหลายชั้น (Multi-layer neural network) โดยมีหลักการทำงานดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 ระบบการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม

เริ่มต้นป้อนข้อมูลอินพุต ( $|S_{11}|, |S_{21}|$ ) ของโพลาริซตั้งกันและ  $|S_{21}|$  ของโพลาริซไขว้ และเอาต์พุต ( $\epsilon'$  (Dielectric Constant) และ  $\epsilon''$  (Loss Factor)) เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมเทียบจดจำลักษณะของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต หลังจากทำการจดจำลักษณะข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต จะทำการป้อนค่าอินพุตแล้วเปรียบเทียบกับค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบและค่าเอาต์พุตจากการเทรนระบบ

### 3.9 การออกแบบเกี่ยวกับการประมวลผลด้วย Regression Analysis

การวิเคราะห์จากสมการถดถอยแบบเชิงเส้นนี้แตกต่างจากการใช้โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมนั้นเหมาะสมกับการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับหลายพารามิเตอร์ ส่วนการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นนั้นเป็นการหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์หลักเพียงตัวเดียวที่ส่งผลต่อความเข้มข้น โดยในการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) จะทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตซึ่งในการศึกษาในครั้งนี้ ค่าอินพุต คือ แรงดันไฟฟ้าของการวัดในรูปแบบของ  $|S_{21}|$  Co-polarized และเอาต์พุต คือ ระดับความหวาน

ของสารละลาย โดยข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์นั้นได้แก่ข้อมูลที่ได้จากการทดลองซึ่งเป็นค่าระดับแรงดันที่ได้จากวงจรตรวจับสัญญาณความถี่สูงซึ่งจะให้ค่าเป็นแรงดันที่มีค่าที่แตกต่างกันตามความเข้มข้นของสารละลาย ซึ่งค่าแรงดันดังกล่าวนั้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลายอย่างเป็นเชิงเส้นซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นได้ ซึ่งหลังจากได้ข้อมูลที่เป็นค่าแรงดันที่ความเข้มข้นต่างๆ จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ว่าความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ที่มีต่อความเข้มข้นของสารละลายนั้นมีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ในรูปแบบของสมการเชิงเส้นหรือไม่ โดยใช้ค่า Multiple R ในการหาความสัมพันธ์ว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด และค่า R Square ซึ่งบอกว่าข้อมูลดังกล่าวมีความเหมาะสมกับการใช้พยากรณ์ในรูปแบบเชิงเส้นมากน้อยเพียงใด จากนั้นเมื่อข้อมูลมีความสัมพันธ์และมีความเหมาะสม จะทำให้สามารถคำนวณสมการถดถอยโดยใช้หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance หรือ ANOVA) โดยใช้ตัวแปรสองตัวได้แก่ T-statistic และ F-statistic เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของสมการถดถอยและความสามารถในการหาคำตอบของสมการถดถอย

### 3.10 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. สายอากาศ
2. วงจรความถี่สูง
3. วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า
4. วงจรการประมวลผลกระจายประสาทเทียมและสมการถดถอย

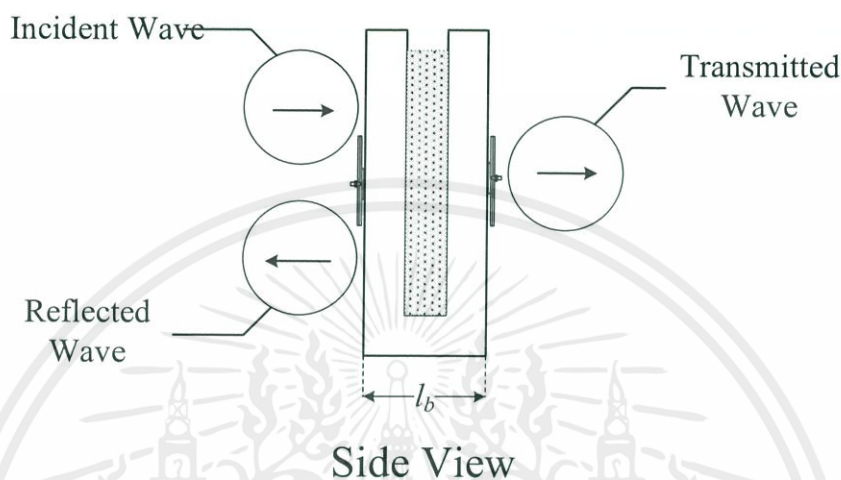
### 3.11 การจัดเก็บผลการทดลอง

#### 3.11.1 วิธีการหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

ในส่วนนี้ จะเป็นการนำเสนอวิธีการหาค่าความเข้มข้นสารละลายด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ไมโครเวฟ เนื่องจากความเข้มข้นสารละลายมีความสัมพันธ์กับค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อน ซึ่งกระทำโดยการทดสอบคลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่านของสายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ตัวกลางทดสอบวางในตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างสายอากาศส่งและรับโดยการคำนวณด้วยโปรแกรมก่อนที่จะสร้างสายอากาศจริงรวมถึงภาชนะและทำการทดสอบในลำดับต่อไป

เนื่องจากวิธีการทดสอบด้วยไมโครเวฟเซ็นเซอร์นั้นมีอยู่หลายวิธี ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้เทคนิคการส่งผ่านอากาศว่าง (Free Space Transmission) เนื่องจากมีจุดเด่นในการทดสอบซึ่งสามารถทดสอบได้โดยปราศจากการสัมผัส และไม่ทำลายวัสดุที่ทดสอบ (Non-destructive) ทั้งนี้เนื่องจากวิธีนี้สามารถทดสอบวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวได้ (Homogeneous Material) โดยที่การทดสอบสารละลายจะนำสารละลายที่ต้องการทดสอบให้อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลาง

และอยู่ในระนาบเดียวกันกับสายอากาศสองตัวได้แก่สายอากาศส่งและสายอากาศรับจากนั้นทำการทดสอบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนที่ตัวกลางของวัสดุที่ต้องการทดสอบและทำการทดสอบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านตัวกลางวัสดุที่ต้องการทดสอบดังรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 การทดสอบด้วยวิธีการส่งผ่านอากาศว่าง

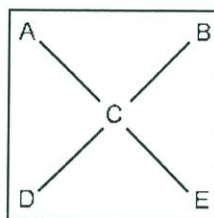
### 3.11.2 การหาค่าความหวานของสารละลาย

#### 3.11.2.1 หน่วยความหวานบริกซ์ (Brix)

ในการทดสอบระดับความหวานของสารละลายนั้นในทางอุตสาหกรรมจะทดสอบความหวานของสารละลาย ในรูปแบบของบริกซ์ (Brix) ซึ่งจะบอกถึงความเข้มข้นของของแข็ง (ซูโครส หรือ น้ำตาลทราย) ที่ละลายอยู่ในสารละลายเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%w/w) ซึ่งมักจะใช้กับน้ำเชื่อม น้ำผลไม้ เป็นต้น โดยให้นิยามของสารละลายที่มีความหวาน 1 บริกซ์ คือ สารละลาย 100 กรัมที่มีน้ำตาลซูโครส (น้ำตาลทราย) ละลายอยู่ 1 กรัม (ที่อุณหภูมิปกติ)

#### 3.11.2.2 การเตรียมสารละลาย (Pearson's Square Law)

หลักการของเพียร์สันนั้นจะเป็นการเตรียมสารละลายที่มีความหวานหรือความเข้มข้นตามที่เรต้องการจากสารละลายตั้งต้น 2 ชนิด โดยเราต้องทราบความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดในหน่วยบริกซ์ (Brix) หรือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยผลลัพธ์สุดท้ายจะอยู่ในรูปแบบของอัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นทั้ง 2 ชนิด โดยในการทำโครงการครั้งนี้จะใช้หลักการของเพียร์สันเพื่อทำน้ำเชื่อมที่มีความหวานตามที่ต้องการ โดยมีหลักการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.37 หลักการคำนวณของเพียร์สัน

เมื่อ

A = ความหวานของน้ำตาลทราย (100 บริกซ์) หรือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

D = ความหวานของน้ำกลั่น (0 บริกซ์) หรือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

C = ความหวานของน้ำเชื่อมที่เราต้องการ (บริกซ์) หรือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

B = อัตราส่วนปริมาณของน้ำตาลทรายที่ต้องใช้ =  $C - D$

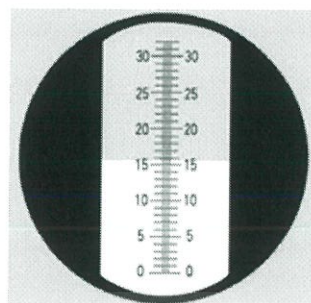
E = อัตราส่วนปริมาณของน้ำกลั่นที่ต้องใช้ =  $A - C$

ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและการเตรียมสารละลายดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 การเตรียมสารละลายความเข้มข้นต่างๆ

ความหวาน (บริกซ์)	อัตราส่วนของน้ำตาลทราย	อัตราของน้ำกลั่น
5	5	95
10	10	90
15	15	85
20	20	80
25	25	75
30	30	70

โดยใช้อุปกรณ์ในการทดสอบบริกซ์ คือ รีแฟรคโตมิเตอร์ (Refractometer) ซึ่งให้เทคนิคการหักเหของแสงเนื่องจากผลึกของน้ำตาลที่ละลายในน้ำ โดยมีลักษณะเครื่องทดสอบรีแฟรคโตมิเตอร์และสเกลสำหรับการทดสอบบริกซ์เมื่อทำการทดสอบความหวานผ่านแสงดังรูปที่ 3.38



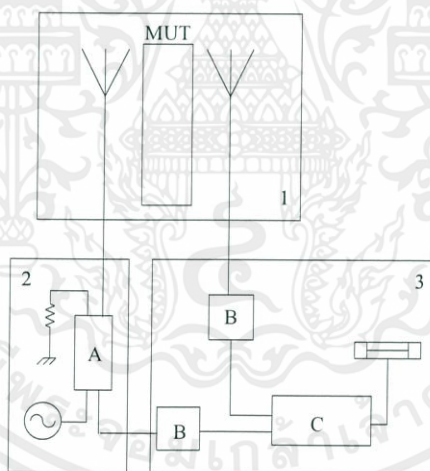
(ก) รีแฟรกโตมิเตอร์

(ข) สเกลปริซึมเมื่อส่องผ่านแสง

รูปที่ 3.38 ลักษณะและสเกลของรีแฟรกโตมิเตอร์

### 3.11.3 การทดสอบคลื่นสะท้อนและคลื่นที่ส่งผ่านตัวกลางสูญเสียหรือสารละลายความเข้มข้นต่างๆ

ในส่วนของไมโครเวฟเซนเซอร์นั้นประกอบไปด้วยองค์ประกอบต่างๆ ซึ่งได้แก่ส่วนของสายอากาศ ส่วนของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณ และส่วนตรวจจับสัญญาณพร้อมแปลงค่าแสดงผลออก LCD ดังรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.39 องค์ประกอบของการทดสอบคลื่นสะท้อนและส่งผ่าน

ส่วนที่ 1 ประกอบไปด้วยสายอากาศไมโครสตริปสองตัวสำหรับส่งและรับ

ส่วนที่ 2 ประกอบไปด้วยวงจรเชื่อมต่อสัญญาณสำหรับตรวจจับค่าคลื่นสะท้อนระหว่างแหล่งจ่ายและสายอากาศ

ส่วนที่ 3 ประกอบไปด้วยวงจรตรวจจับสัญญาณความถี่ไมโครเวฟ พร้อมไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับรับค่าไฟแรงดันและแปลงค่าสู่ดิจิทัล แสดงผลออกทาง LCD

ซึ่งจากองค์ประกอบทั้งสามส่วนนั้นจะถูกใส่ไว้ในกล่องซึ่งป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนในย่านความถี่ 2.45 GHz ซึ่งมาจากสัญญาณไวไฟ โดยระบบการป้องกันคลื่นแม่เหล็กรบกวนสำหรับไมโครเวฟเซนเซอร์ได้ถูกแสดงดังรูปที่ 3.40 และ 3.41



รูปที่ 3.40 กล่องป้องกันคลื่นในย่านไวไฟรบกวนระบบไมโครเวฟเซนเซอร์



รูปที่ 3.41 ภายในกล่องซึ่งประกอบไปด้วยสายอากาศส่งและรับรวมไปถึงกล่องโคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

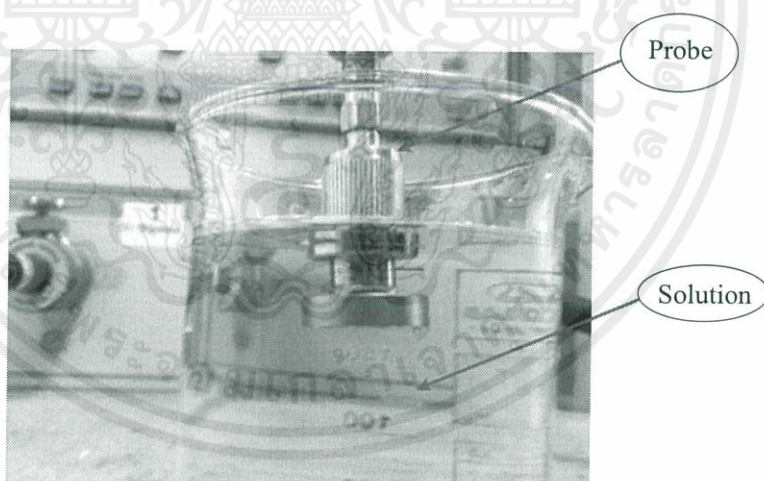
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์วิธีการทดสอบและผลการทดสอบของสายอากาศที่ใช้และศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม รวมถึงนำข้อมูลดังกล่าวเข้าสู่โปรแกรมสำหรับประมวลผลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายหรือความหวานที่มีต่อหน่วยทดสอบมาตรฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรมซึ่งก็คือหน่วยบริกซ์ (Brix)

#### 4.1 การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

เริ่มต้นทำการทดสอบค่าสภาพยอมไฟฟ้าเชิงซ้อนที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นสารละลายโดยใช้ไดอิเล็กตริกโพรบ เพื่อที่จะศึกษาถึงขอบเขตของค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพันธ์ที่มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้น โดยทำการศึกษาความเข้มข้นด้วย Agilent 85070E Dielectric Probe Kit เริ่มตั้งแต่ 0 บริกซ์จนถึง 30 บริกซ์ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งได้ความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.1

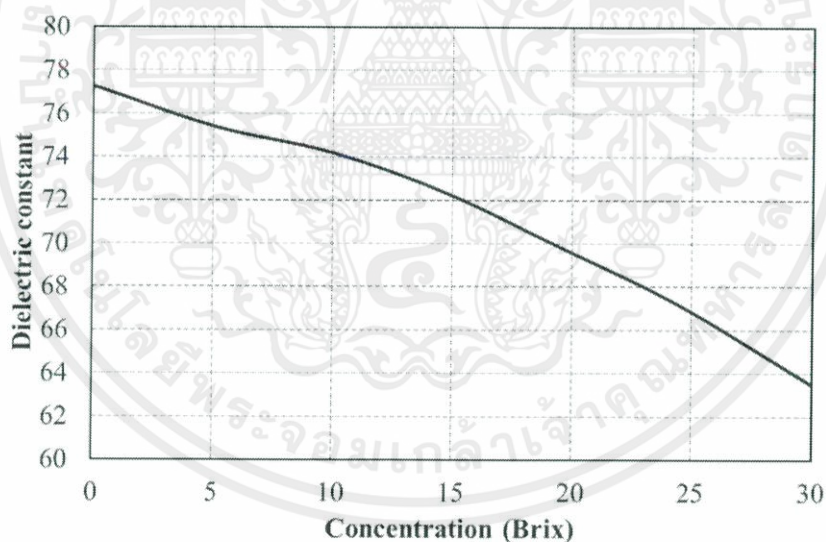


รูปที่ 4.1 การทดสอบค่าไดอิเล็กตริก

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและสภาพยอมทางไฟฟ้าเชิงซ้อน

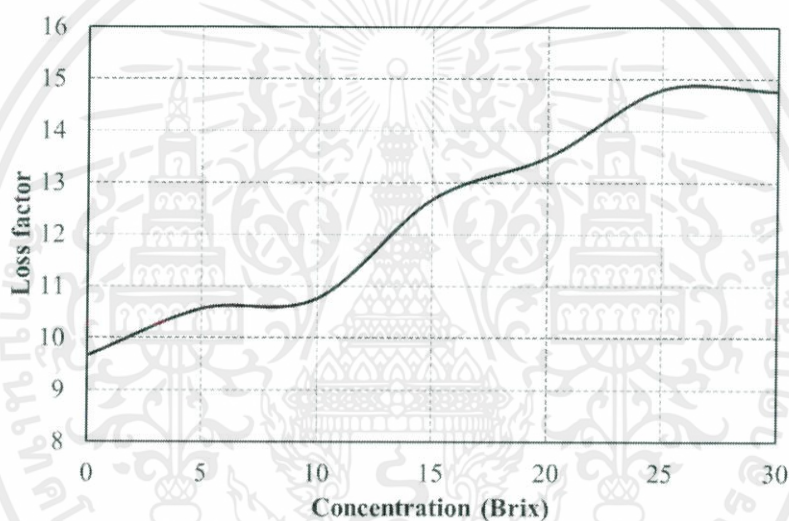
ความเข้มข้น(บริกซ์)	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\tan(\delta)$
0	77.269	9.6627	0.12505
5	75.4101	10.5675	0.14013
10	74.1865	10.7688	0.14515
15	72.2015	12.67715	0.17558
20	69.57005	13.49778	0.19401
25	66.8539	14.7982	0.22135
30	63.4883	14.7737	0.23269

ซึ่งเมื่อทำการศึกษาตัวแปรที่ละส่วนจะพบว่าความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon'$ ) เป็นไปตามรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าคงตัวไดอิเล็กตริก

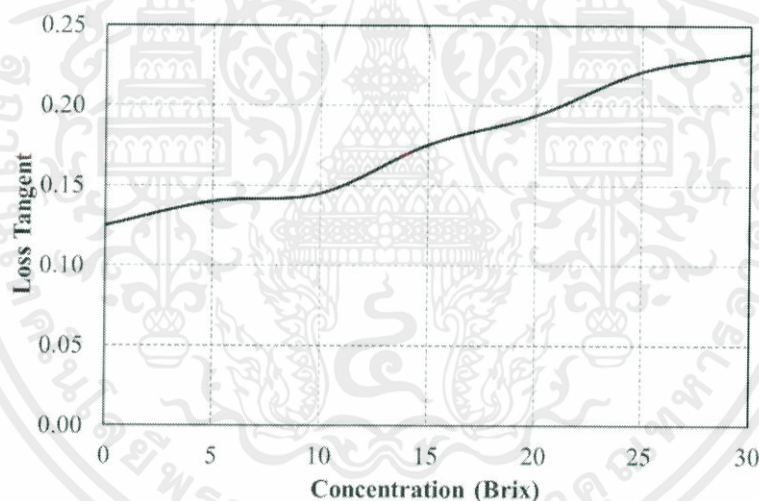
จากความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ทดสอบได้จากไดอิเล็กตริกโพรบ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นขึ้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกมีค่าลดลง สาเหตุเนื่องมาจากสารละลายที่มีความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้มีโมเลกุลของไดโพลนั้นลดลงอันเนื่องมาจากหมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคสได้ก่อนพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลน้ำ และจากโมเลกุลไดโพลที่ลดลงจะส่งผลให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกลดลงเนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกจะมีความสัมพันธ์กับโมเลกุลที่เป็นไดโพลในสารละลาย จากนั้นเมื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและตัวประกอบสูญเสีย ( $\epsilon''$ ) เป็นไปดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและตัวประกอบสูญเสีย

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายที่ผลต่อตัวประกอบสูญเสียที่ทดสอบได้จากไดอิเล็กตริกโพรบเป็นไปดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายจะส่งผลให้ค่าตัวประกอบสูญเสียเพิ่มขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากน้ำตาลที่ละลายอยู่ในน้ำนั้นส่งผลต่อพันธะของน้ำที่เกิดในสารละลาย โดยโมเลกุลของน้ำอิสระนั้นจะมีการเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่มีเสถียรภาพสูงอันเนื่องมาจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลน้ำ ซึ่งพันธะไฮโดรเจนนี้จะส่งผลต่อค่าตัวประกอบสูญเสีย และจากที่กลูโคสนั้นมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากซึ่งพร้อมจะก่อพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำ ทำให้ค่าตัวประกอบสูญเสียของไดอิเล็กตริกนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น

และจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ค่าตัวประกอบสูญเสีย และค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ซึ่งเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon'$ ) มีค่าลดลงทำให้สารละลายมีความสามารถในการกักเก็บกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลดลง หรืออาจจะพิจารณาเชิงโมเลกุลได้ว่าโมเลกุลเชิงขั้วรวมของระบบลดลง ทำให้มีโมเลกุลที่ต้องการพลังงานไปใช้เพื่อต่อต้านสนามไฟฟ้าที่กระทำจากภายนอกลดลง เป็นผลให้การกักเก็บกำลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าลดลง ในทางกลับกันค่าตัวประกอบสูญเสียเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากตัวประกอบสูญเสียเป็นค่าที่บ่งบอกว่าสารละลายสามารถทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการสูญเสียในตัวกลางเป็นรูปความร้อนได้มากเท่าใด ซึ่งหากมองในเชิงโมเลกุลแล้ว พันธะไฮโดรเจนรวมของระบบเพิ่มขึ้นจึงส่งผลต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถผ่านออกได้มีค่าลดลง ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าการสูญเสียแทนเจนต์มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกับค่าตัวประกอบสูญเสียดังรูปที่ 4.4



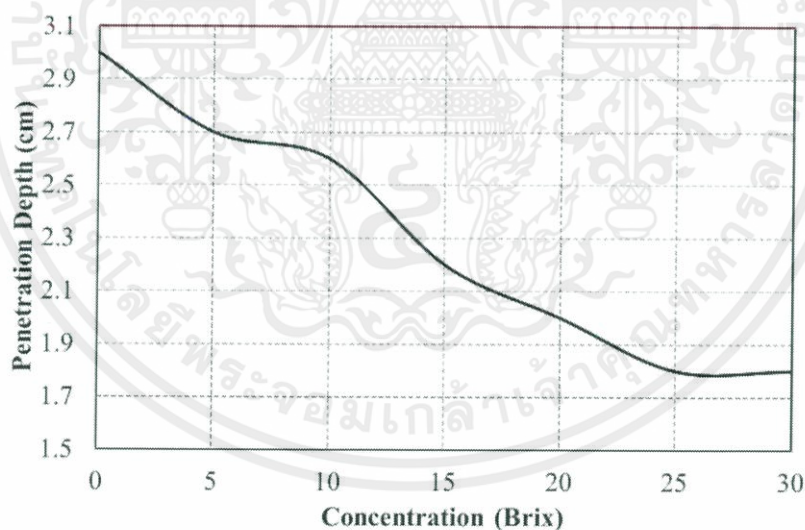
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าการสูญเสียแทนเจนต์

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าการสูญเสียแทนเจนต์ อันดับต่อไปจะเป็นการศึกษาถึงความสามารถของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการผ่านทะลุตัวกลางไดอิเล็กตริก (Penetration Depth) ที่ความเข้มข้นต่างๆ จากสมการที่ (2.32) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและความสามารถในการทะลุผ่านตัวกลาง

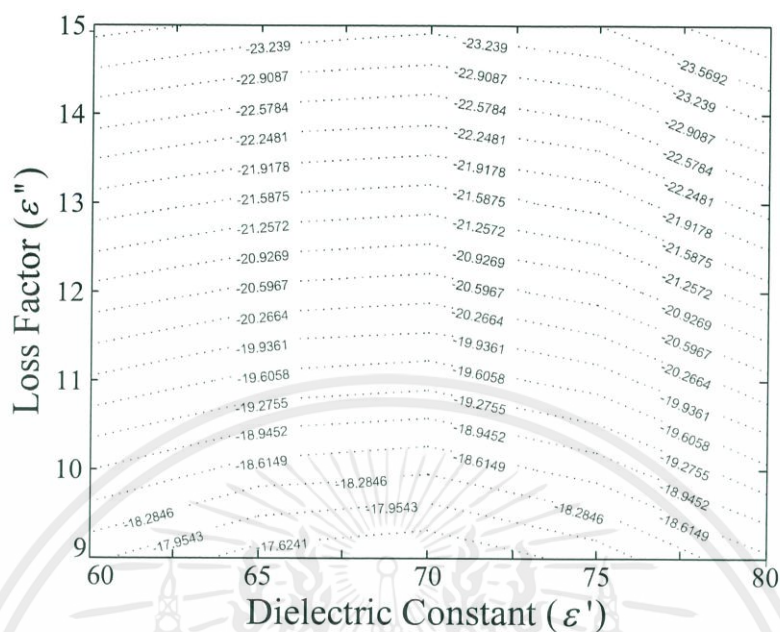
ความเข้มข้น(บริกซ์)	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\delta_p$ (cm)
0	77.269	9.6627	3.0
5	75.4101	10.5675	2.7
10	74.1865	10.7688	2.6
15	72.2015	12.67715	2.2
20	69.57005	13.49778	2.0
25	66.8539	14.7982	1.8
30	63.4883	14.7737	1.8

ซึ่งค่าความสามารถในการทะลุผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกนิยามจากความสามารถของกำลังงานที่ซึมผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกและมีค่ากำลังลดลงไป  $1/e$  หรือ 36.8% จากจุดเริ่มต้นโดยความสามารถในการซึมผ่านนี้ขึ้นกับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและค่าตัวประกอบสูญเสียของวัสดุตั้งสมการที่ (2.32) และสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.5



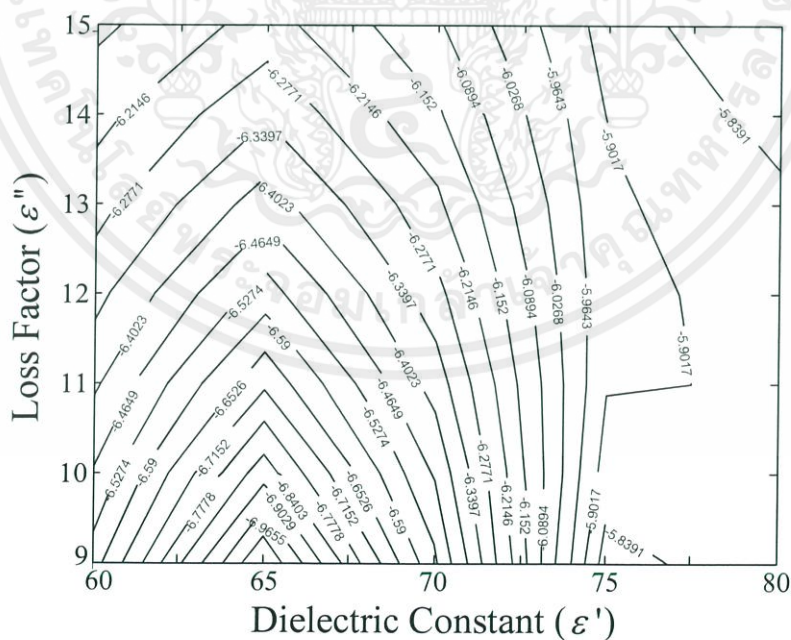
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายและความสามารถในการซึมผ่าน



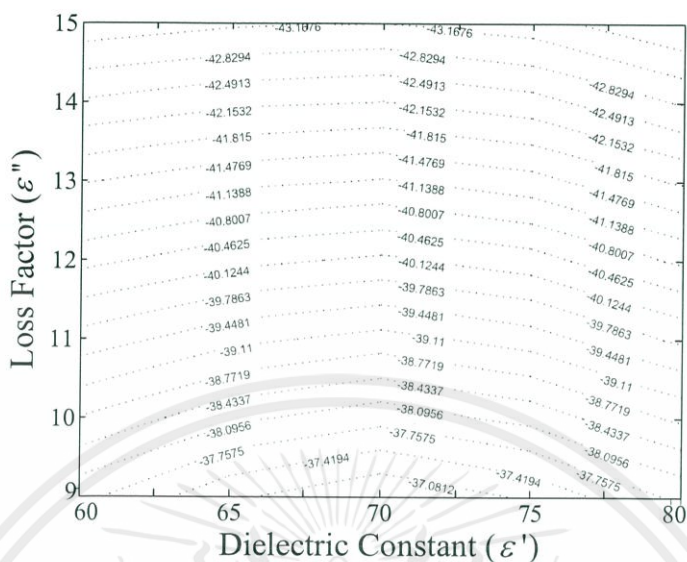


รูปที่ 4.7  $|S_{21}|$  สำหรับสายอากาศส่งและรับด้วยโพลาริไซซ์ร่วม

ซึ่งในส่วนต่อมาจะเป็นการนำเสนอ  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ของการส่งแบบโพลาริไซซ์ไขว้ดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ดังนี้



รูปที่ 4.8  $|S_{11}|$  สำหรับสายอากาศส่งและรับด้วยโพลาริไซซ์ไขว้



รูปที่ 4.9  $|S_{21}|$  สำหรับสายอากาศส่งและรับด้วยโพลาริไซซ์ไขว้

จากรูปที่ 4.6 และ 4.8 ซึ่งเป็นการแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ได้ไอเล็กทริกและตัวประกอบสูญเสียที่มีต่อค่า  $|S_{11}|$  ทั้งในกรณีโพลาริไซซ์ตรงกันและโพลาริไซซ์ตรงข้าม ซึ่งจากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของทั้งไดอิเล็กทริกและตัวประกอบสูญเสียที่มีต่อ  $|S_{11}|$  ไม่มีความเป็นเชิงเส้น ซึ่งแตกต่างจากในรูปที่ 4.7 และ 4.9 ซึ่งเป็นการแสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าคงที่ได้ไอเล็กทริกและตัวประกอบสูญเสียที่มีต่อ  $|S_{21}|$  สำหรับโพลาริไซซ์ตรงกันและโพลาริไซซ์ตรงข้ามตามลำดับ ซึ่งจากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าคงที่ได้ไอเล็กทริกและตัวประกอบสูญเสียนั้นมีความสัมพันธ์ต่อค่า  $|S_{21}|$  อย่างเป็นเชิงเส้นและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นสามารถอนุมานได้ว่าหากเราต้องการใช้พารามิเตอร์  $|S_{11}|$  ควบคู่กับ  $|S_{21}|$  นั้นจำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งสามารถที่จะหาความสัมพันธ์ของข้อมูลได้โดยไม่ต้องเป็นเชิงเส้น แต่ในส่วนการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยนั้น จำเป็นต้องใช้เพียงแค่พารามิเตอร์  $|S_{21}|$  แต่เพียงเท่านั้นเนื่องจากมีแนวโน้มทิศทางความเป็นเชิงเส้นทั้งคู่ และจำเป็นต้องละทิ้งพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  สำหรับการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอย

### 4.3 การทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมในการหาค่าคำตอบของ $\epsilon'$ และ $\epsilon''$

จากค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม ทำให้สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านที่มีต่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและปัจจัยสูญเสีย ซึ่งอันดับต่อไปจะเป็นการนำข้อมูลดังกล่าวเข้าสู่โปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อที่จะใช้กระบวนการของโปรแกรมในการบ่งชี้ความสัมพันธ์ดังกล่าว รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและปัจจัยการสูญเสียที่มีต่อค่าความหวานในหน่วยบริกซ์ โดยตารางความสัมพันธ์จากการคำนวณด้วยโปรแกรมเพื่อที่จะใช้เป็นข้อมูลสำหรับป้อนเข้าสู่โปรแกรม จะแสดงดังตารางที่ 4.3-4.6

ตารางที่ 4.3 ค่า  $|S_{11}|$  ของ Co-polarized

$ S_{11} $	$\epsilon'=60$	$\epsilon'=65$	$\epsilon'=70$	$\epsilon'=75$	$\epsilon'=80$
$\epsilon''=9$	-6.52076	-6.76595	-6.37624	-5.99354	-6.13278
$\epsilon''=10$	-6.43474	-6.62202	-6.32189	-6.01304	-6.10098
$\epsilon''=11$	-6.35812	-6.50149	-6.26702	-6.01434	-6.05971
$\epsilon''=12$	-6.28968	-6.39878	-6.21234	-6.00184	-6.01177
$\epsilon''=13$	-6.22815	-6.30984	-6.15834	-5.97902	-5.95941
$\epsilon''=14$	-6.17242	-6.23164	-6.10526	-5.9486	-5.90433
$\epsilon''=15$	-6.12146	-6.16194	-6.05326	-5.91275	-5.84786

ตารางที่ 4.4 ค่า  $|S_{21}|$  ของ Co-polarized

$ S_{21} $	$\epsilon'=60$	$\epsilon'=65$	$\epsilon'=70$	$\epsilon'=75$	$\epsilon'=80$
$\epsilon''=9$	-18.0299	-17.4775	-17.2938	-17.7491	-18.5633
$\epsilon''=10$	-18.9572	-18.4979	-18.3515	-18.76	-19.5386
$\epsilon''=11$	-19.8942	-19.5063	-19.3856	-19.7553	-20.5056
$\epsilon''=12$	-20.8394	-20.5048	-20.3995	-20.7349	-21.4609
$\epsilon''=13$	-21.7921	-21.4948	-21.3952	-21.6982	-22.4015
$\epsilon''=14$	-22.7517	-22.4779	-22.3746	-22.6448	-23.3251
$\epsilon''=15$	-23.7179	-23.4551	-23.3393	-23.5749	-24.2298

ตารางที่ 4.5 ค่า  $|S_{11}|$  ของ Cross-polarized

$ S_{11} $	$\epsilon'=60$	$\epsilon'=65$	$\epsilon'=70$	$\epsilon'=75$	$\epsilon'=80$
$\epsilon''=9$	-6.55606	-7.09064	-6.54534	-5.81309	-5.88388
$\epsilon''=10$	-6.46966	-6.87608	-6.45772	-5.87359	-5.89988
$\epsilon''=11$	-6.3902	-6.70108	-6.37578	-5.90622	-5.89702
$\epsilon''=12$	-6.31784	-6.55611	-6.29926	-5.91767	-5.87992
$\epsilon''=13$	-6.25214	-6.43413	-6.22767	-5.91316	-5.85228
$\epsilon''=14$	-6.19241	-6.32996	-6.16047	-5.89678	-5.81705
$\epsilon''=15$	-6.13784	-6.23974	-6.09714	-5.87171	-5.77652

ตารางที่ 4.6 ค่า  $|S_{21}|$  ของ Cross-polarized

$ S_{21} $	$\epsilon'=60$	$\epsilon'=65$	$\epsilon'=70$	$\epsilon'=75$	$\epsilon'=80$
$\epsilon''=9$	-37.8777	-37.1535	-36.7431	-37.1275	-37.8257
$\epsilon''=10$	-38.7646	-38.1906	-37.8788	-38.2082	-38.8392
$\epsilon''=11$	-39.6694	-39.2166	-38.9829	-39.2712	-39.8534
$\epsilon''=12$	-40.5885	-40.2325	-40.0599	-40.3171	-40.8641
$\epsilon''=13$	-41.5189	-41.2392	-41.1135	-41.3463	-41.8678
$\epsilon''=14$	-42.4583	-42.2392	-42.1466	-42.3594	-42.8618
$\epsilon''=15$	-43.4049	-43.2315	-43.1618	-43.3564	-43.8438

เนื่องจากค่า ANN  $|S_{11}|$  ของ Co-polarized และ  $|S_{11}|$  ของ Cross-polarized มีค่าใกล้เคียงกันในการสอนด้วยระบบโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งเราสามารถใช้ค่าอินพุตเพียง 3 ค่า ได้แก่  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  แบบ Co-polarized และ  $|S_{21}|$  แบบ Cross-polarized จากนั้นจะทำการปรับค่าตัว  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  ก่อนนำไปทดสอบระบบแล้วนำเข้าโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อหาค่า  $\epsilon'$  (Dielectric Constant) และ  $\epsilon''$  (Loss Factor) โดยใช้ข้อมูลทั้งหมด 105 ค่าในการเทรนโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งจากกระบวนการดังกล่าวเมื่อนำเข้าสู่โปรแกรมด้วยอินพุตทั้งสาม ได้แก่  $|S_{11}|$  และ  $|S_{21}|$  แบบ Co-polarized และ  $|S_{21}|$  แบบ Cross-polarized และป้อนเอาต์พุตที่ต้องการซึ่งได้แก่  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  ซึ่งเมื่อโปรแกรมสามารถจำรูปแบบของข้อมูลได้ก็จะได้ผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลจากการคำนวณรูปแบบความสัมพันธ์ด้วย ANN

$ S_{11} $ Co-polarized	$ S_{21} $ Co-polarized	$ S_{21} $ Cross-polarized	$\epsilon'$ ที่แท้จริง	$\epsilon''$ ที่แท้จริง	$\epsilon'$ จาก ANN	$\epsilon''$ จาก ANN	%e ( $\epsilon'$ )	%e ( $\epsilon''$ )
6.52	18.02	37.87	0.09	0.60	0.0976	0.6590	7.0%	9%
6.43	18.95	38.76	0.10	0.60	0.1042	0.6166	4.0%	2%
6.35	19.89	39.66	0.11	0.60	0.1123	0.5958	12%	0.7%
6.28	20.83	40.58	0.12	0.60	0.1216	0.6001	1.3%	0.16%
6.22	21.79	41.51	0.13	0.60	0.1329	0.5989	2.2%	0.18%
6.17	22.75	42.45	0.14	0.60	0.1448	0.6019	3.4%	0.3%
6.12	23.71	43.40	0.15	0.60	0.1564	0.6041	4.3%	6.8%
6.76	17.47	37.15	0.09	0.65	0.0931	0.6544	3.4%	0.6%
6.62	18.49	38.19	0.10	0.65	0.0978	0.6357	1.3%	2.2%
6.50	19.50	39.21	0.11	0.65	0.1041	0.6311	5.3%	2.9%
6.39	20.50	40.23	0.12	0.65	0.1126	0.6350	6.1%	2.3%
6.30	21.49	41.23	0.13	0.65	0.1237	0.6392	4.8%	1.6%
6.23	22.47	42.23	0.14	0.65	0.1370	0.6426	2.1%	1.1%
6.16	23.45	43.23	0.15	0.65	0.1508	0.6452	0.5%	0.7%
6.37	17.29	36.74	0.09	0.70	0.0933	0.6924	3.6%	1.0%
6.32	18.35	37.87	0.10	0.70	0.0968	0.7107	3.2%	1.5%
6.26	19.38	38.98	0.11	0.70	0.1033	0.7079	6.1%	1.1%
6.21	20.39	40.05	0.12	0.70	0.1125	0.7042	6.2%	0.6%
6.15	21.39	41.11	0.13	0.70	0.1240	0.7020	4.6%	0.2%
6.10	22.37	42.14	0.14	0.70	0.1370	0.7006	2.1%	0.0%
6.05	23.33	43.16	0.15	0.70	0.1498	0.6999	0.1%	0.0%
5.99	17.74	37.12	0.09	0.75	0.0945	0.7424	5.0%	1.0%
6.01	18.76	38.20	0.10	0.75	0.0990	0.7663	1.0%	2.1%
6.01	19.75	39.27	0.11	0.75	0.1066	0.7657	3.0%	2.1%
6.00	20.73	40.31	0.12	0.75	0.1164	0.7593	3.0%	1.2%
5.97	21.69	41.34	0.13	0.75	0.1275	0.7533	1.9%	0.4%

ตารางที่ 4.7 (ต่อ) ผลจากการคำนวณรูปแบบความสัมพันธ์ด้วยโปรแกรม

$ S_{11} $ Co-polarized	$ S_{21} $ Co-polarized	$ S_{21} $ Cross-polarized	$\varepsilon'$ ที่แท้จริง	$\varepsilon''$ ที่แท้จริง	$\varepsilon'$ จาก ANN	$\varepsilon''$ จาก ANN	%e ( $\varepsilon'$ )	%e ( $\varepsilon''$ )
5.94	22.64	42.35	0.14	0.75	0.1387	0.7500	0.9%	0.0%
5.91	23.57	43.35	0.15	0.75	0.1490	0.7490	0.6%	0.1%
6.13	18.56	37.82	0.09	0.80	0.0989	0.7500	9.8%	6.2%
6.10	19.53	38.83	0.10	0.80	0.1053	0.7778	5.3%	2.7%
6.05	20.50	39.85	0.11	0.80	0.1138	0.7844	7.5%	1.9%
6.01	21.46	40.86	0.12	0.80	0.1225	0.7952	2.0%	0.6%
5.95	22.40	41.86	0.13	0.80	0.1318	0.8051	1.3%	0.6%
5.90	23.32	42.86	0.14	0.80	0.1411	0.8118	0.7%	1.4%
5.84	24.22	43.84	0.15	0.80	0.1499	0.8137	0.0%	1.7%

จากการตรวจสอบคำตอบของ  $\varepsilon'$  และ  $\varepsilon''$  ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมกับ  $\varepsilon'$  และ  $\varepsilon''$  ที่แท้จริง พบว่าค่าของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถที่จะให้คำตอบที่มีแนวโน้มไปในทางที่เราต้องการ เมื่อนำ ANN ที่ได้รับการฝึกสอนแล้วมาทดสอบกับข้อมูลใหม่รวม 27 ข้อมูล แล้วนำค่า  $\varepsilon'$  และ  $\varepsilon''$  ที่ได้จาก ANN ไปพิจารณาเพื่อจำแนกระดับความหวานของสารละลาย ตารางที่ 4.7 โดยการใช้พารามิเตอร์ที่ต่างกัน คือ การใช้  $\varepsilon''$  ตัวเดียว และการใช้  $\varepsilon''$  และ  $\varepsilon'$  ร่วมกัน โดยทำการกำหนดให้ระบบทำการแยกช่วงของความหวานออกเป็น 4 ช่วงได้แก่ 0-10 Brix, 10-20 Brix, 20-30 Brix และมากกว่า 30 Brix ซึ่งในตอนท้ายพบว่าการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้พารามิเตอร์  $\varepsilon''$  เพียงตัวเดียวจะให้ข้อมูลที่แม่นยำมากกว่าการวิเคราะห์ข้อมูลโดยพารามิเตอร์  $\varepsilon''$  และ  $\varepsilon'$  ควบคู่กัน

ตารางที่ 4.8 การจำแนกความหวานโดยการพิจารณาจากตัวแปร  $\varepsilon''$  และ  $\varepsilon'$  โดยใช้ค่าจากการ  
จำลองข้อมูล

$ S_{11} $ Co-polarized	$ S_{21} $ Co-polarized	$ S_{21} $ Cross-polarized	$\varepsilon''$ จาก ANN	$\varepsilon'$ จาก ANN	ความหวาน (Brix) ที่แท้จริง	ความหวาน (Brix) โดยพิจารณาจาก $\varepsilon''$	ความหวาน (Brix) โดยพิจารณาจาก $\varepsilon'$ และ $\varepsilon''$
6.01	18.76	38.2	9.77	78.14	5	0-10	0-10
6.00	18.00	38.6	9.66	66.27	1	0-10	ข้อมูลคลุมเครือ
5.9	18.5	37.9	10.00	75.00	6	0-10	0-10
5.99	18.3	38.00	9.67	74.13	3	0-10	0-10
6.00	19.4	39.00	10.25	77.42	7	0-10	0-10
5.90	19.0	38.50	10.35	74.93	8	0-10	0-10
6.10	20.73	40.00	12.47	67.46	15	10-20	ข้อมูลคลุมเครือ
6.10	19.50	38.00	11.61	69.76	11	10-20	10-20
5.90	21.00	40.00	12.32	78.27	18	10-20	ข้อมูลคลุมเครือ
6.0	21.3	41.00	11.72	79.92	19	10-20	ข้อมูลคลุมเครือ
6.0	20.0	37.00	12.30	69.91	16	10-20	10-20
5.97	21.00	37.00	13.35	69.90	17	10-20	10-20
6.23	22.47	42.23	13.88	65.52	25	20-30	20-30
6.20	22.00	41.00	13.46	68.18	22	20-30	20-30
6.10	23.00	43.00	13.18	79.33	21	20-30	ข้อมูลคลุมเครือ
6.20	22.3	42.10	13.73	65.95	23	20-30	20-30
6.00	22.5	40.0	14.82	69.40	30	20-30	20-30
6.20	22.5	42.00	14.04	66.45	27	20-30	20-30

จากตารางที่ 4.8 พบว่าเมื่อทำการใช้พารามิเตอร์สองตัวในการตัดสินใจเลือกช่วงความหวานนั้น จะมีบางช่วงที่ข้อมูลมีความคลุมเครือหรือไม่แน่นอน ซึ่งข้อมูลจากตารางดังกล่าวเป็นข้อมูลที่เกิดจากการสุ่มเพื่อทดสอบระบบที่ใช้ในการแยกช่วงความหวาน โดยจะพบว่าข้อมูลที่มีความคลุมเครือนั้นมีจำนวนถึง 27.77% ของข้อมูลทั้งหมด ซึ่งถือว่าสูง แต่หากพิจารณาพารามิเตอร์เพียงแค่  $\varepsilon''$  เพียงอย่างเดียวจะพบว่าสามารถแยกช่วงความหวานได้ถูกต้องถึง 100%

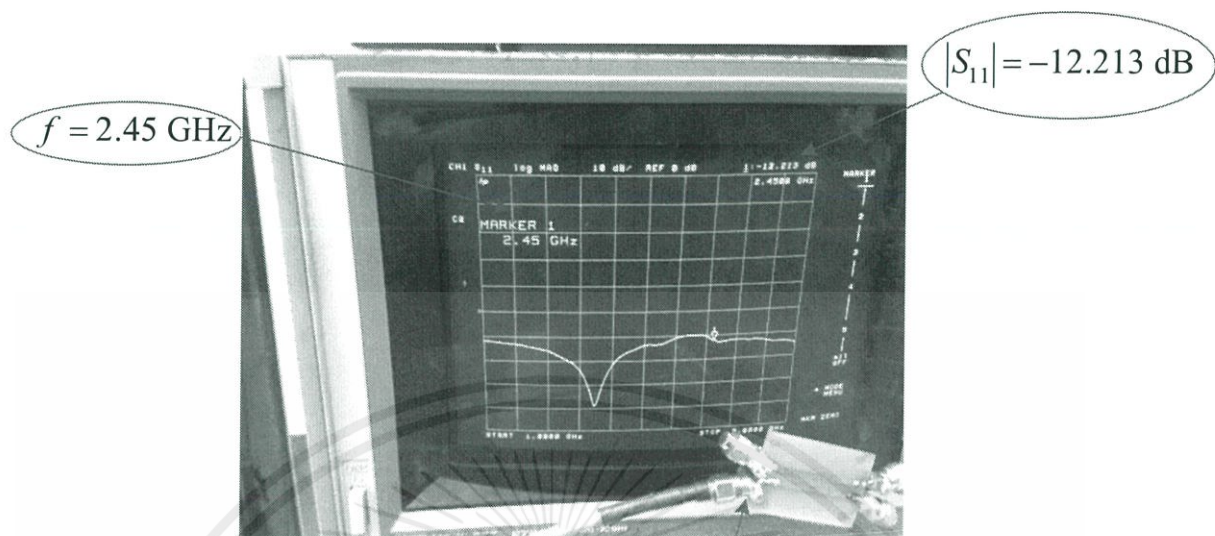
#### 4.4 ผลการทดสอบคลื่นสะท้อนและส่งผ่านสารละลาย

ส่วนต่อไปจะเป็นการแสดงการทดสอบวงจรเชื่อมต่อสัญญาณ และวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า โดยเริ่มต้นที่วงจรเชื่อมต่อสัญญาณดังรูปที่ 4.10 ซึ่งจะทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  ที่พอร์ทแต่ละพอร์ททั้งสี่พอร์ท เพื่อสังเกตคลื่นสะท้อนในแต่ละพอร์ท เนื่องจากหากเกิดคลื่นสะท้อนมากจะส่งผลให้สัญญาณที่ส่งจากแหล่งจ่ายนั้นเกิดการสะท้อนอยู่ภายในวงจรและไม่สามารถส่งไปสู่สายอากาศได้หมด จากนั้นจะทำการทดสอบความสามารถในการเหนี่ยวนำ (coupling level) ในวงจรเป็นอันดับถัดไป



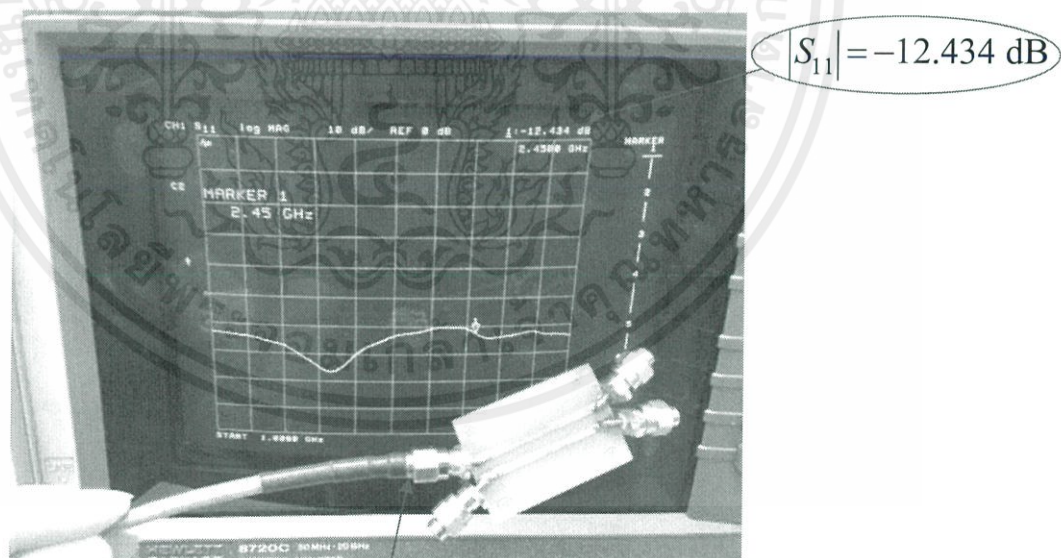
รูปที่ 4.10 วงจรเชื่อมต่อสัญญาณ

จากรูปที่ 4.10 จะพบว่ามีการใส่ dummy load 50 โอห์ม เพื่อทำการโหลดวงจรซึ่งจะทำให้วงจรมีสภาพสมจริงคล้ายกับในการทำงานในขณะที่มีการเชื่อมต่อกับสายอากาศที่มีตัวเชื่อม 50 โอห์ม โดยที่การทดสอบคลื่นสะท้อนทั้งสี่พอร์ทได้แสดงผลดังรูปที่ 4.11-4.14



Port 1

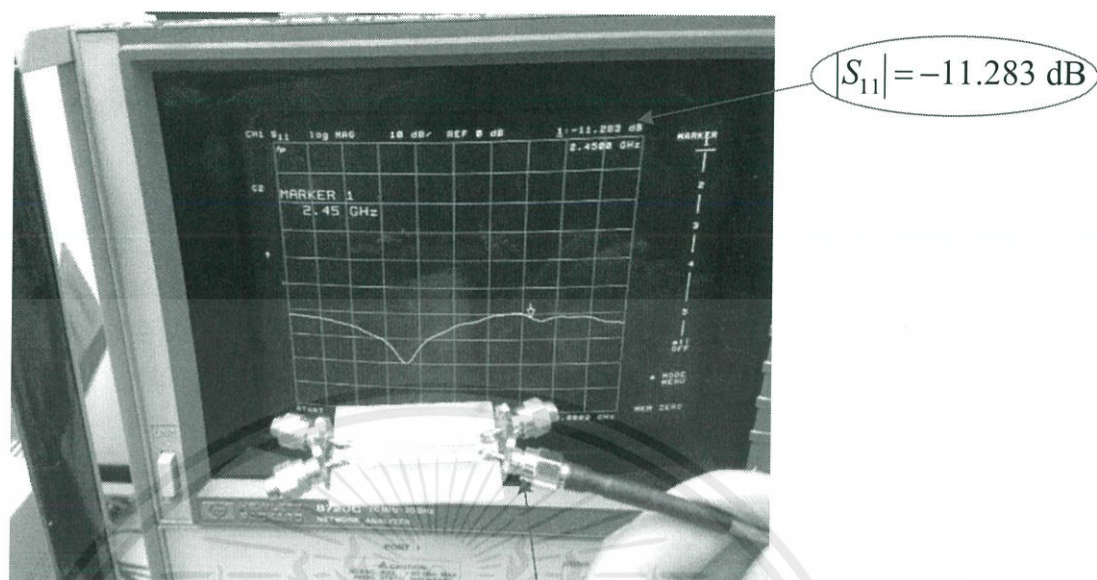
รูปที่ 4.11 การทดสอบคลื่นสะท้อนของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณในพอร์ตแรก



Port 2

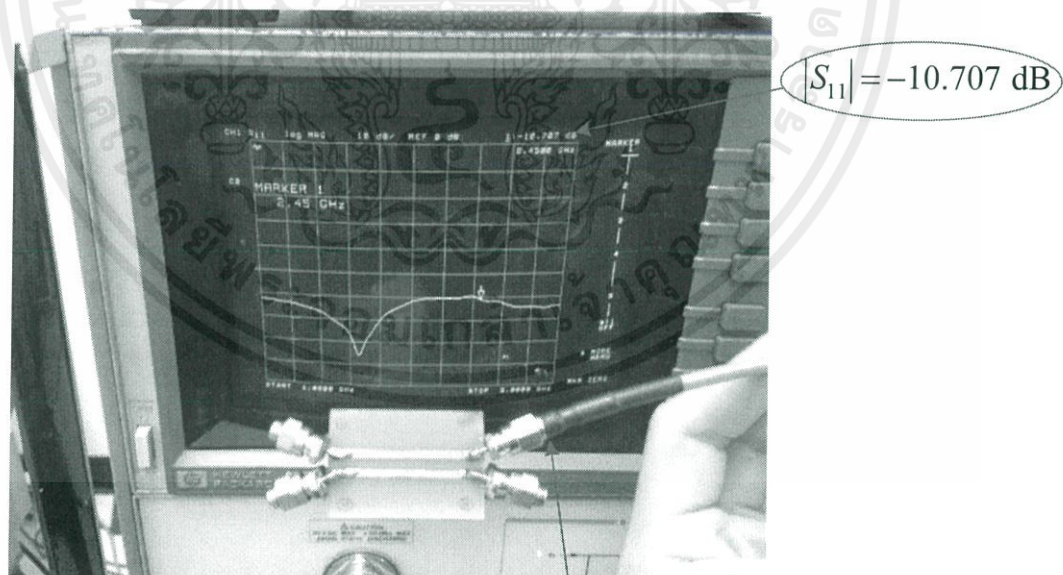
รูปที่ 4.12 การทดสอบคลื่นสะท้อนของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณในพอร์ตที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Port 3

รูปที่ 4.13 การทดสอบคลื่นสะท้อนของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณในพอร์ตที่สาม



Port 4

รูปที่ 4.14 การทดสอบคลื่นสะท้อนของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณในพอร์ตที่สี่

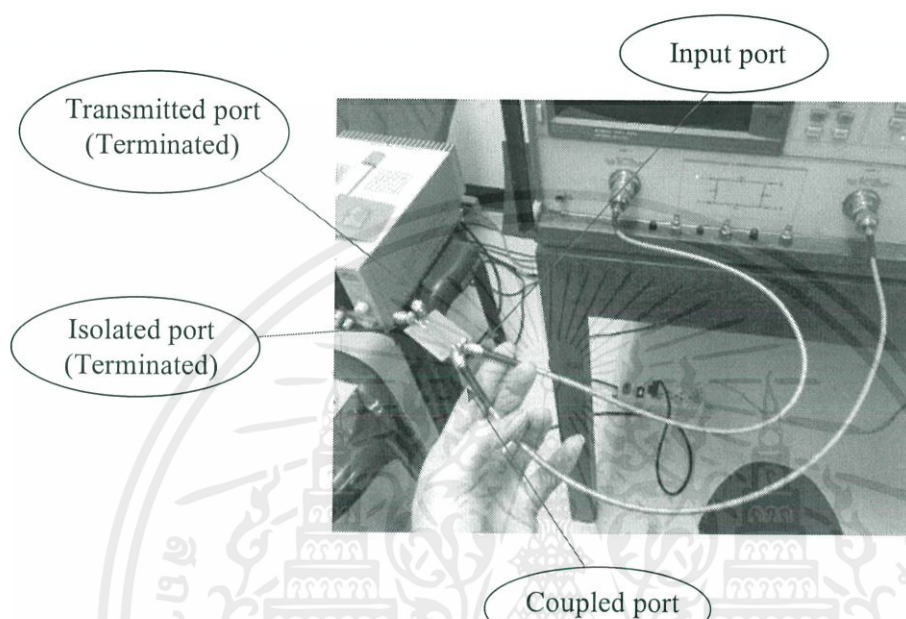
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบพอร์ททั้งสี่ของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณแล้ว พบว่าพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  ของทั้งสี่พอร์ท อยู่ในระดับที่สามารถส่งผ่านกำลังงานได้มากกว่า 90% หรือมีค่า  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ตารางเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการสะท้อนกลับ

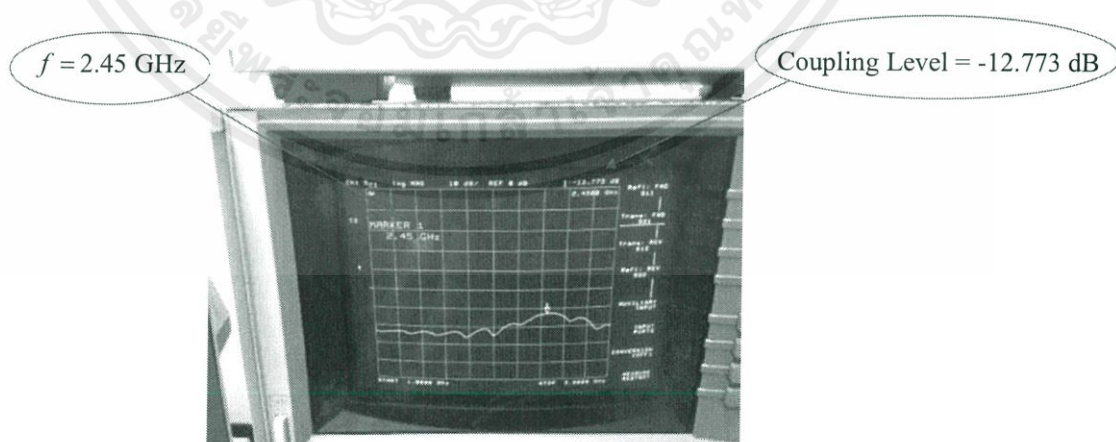
$VSWR$	$\Gamma$	$ S_{11} $ (dB)	กำลังงานสะท้อนกลับ (%)	กำลังงานส่งผ่าน (%)
1.000	0.00	$\infty$	0.00	100.00
1.020	0.01	-40.000	0.01	99.99
1.041	0.02	-33.979	0.04	99.96
1.062	0.03	-30.458	0.09	99.91
1.083	0.04	-27.957	0.16	99.84
1.105	0.05	-26.021	0.25	99.75
1.222	0.10	-20.000	1.00	99.00
1.353	0.15	-16.478	2.25	97.75
1.500	0.20	-13.979	4.00	96.00
1.667	0.25	-12.041	6.25	93.75
1.857	0.30	-10.458	9.00	91.00
2.077	0.35	-9.1190	12.25	87.75
2.333	0.40	-7.9590	16.00	84.00
2.636	0.45	-6.9360	20.25	79.75
3.000	0.50	-6.0210	25.00	75.00
3.444	0.55	-5.1930	30.25	69.75
4.000	0.60	-4.4370	36.00	64.00
4.714	0.65	-3.7420	42.25	57.75
5.667	0.70	-3.0980	49.00	51.00
7.000	0.75	-2.4990	56.25	43.75
9.000	0.80	-1.9380	64.00	36.00
12.33	0.85	-1.4120	72.25	27.75
19.00	0.90	-0.9150	81.00	19.00
39.00	0.95	-0.4460	90.25	9.75
199.0	0.99	-0.0870	98.01	1.99

ในส่วนถัดมาจะทำการทดสอบความสามารถในการเหนี่ยวนำของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณ เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าสู่ขาเข้าของวงจร และทำการทดสอบทางด้านขาเหนี่ยวนำ (coupled port) นำดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การทดสอบการเชื่อมต่อสัญญาณของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณ

ซึ่งจากการออกแบบไว้ให้มีการเหนี่ยวนำที่ -10 dB จากการทดสอบจริงพบว่าการเหนี่ยวนำที่ -12.773 dB ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบการเหนี่ยวนำสัญญาณ

ในส่วนถัดมาจะเป็นการทดสอบวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งในที่นี้จะเป็นการแสดงผลเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการวัดแรงดันไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์กับผลที่ได้จากการวัดด้วยวงจรวัดแรงดันไฟฟ้างดตารางที่ 4.10

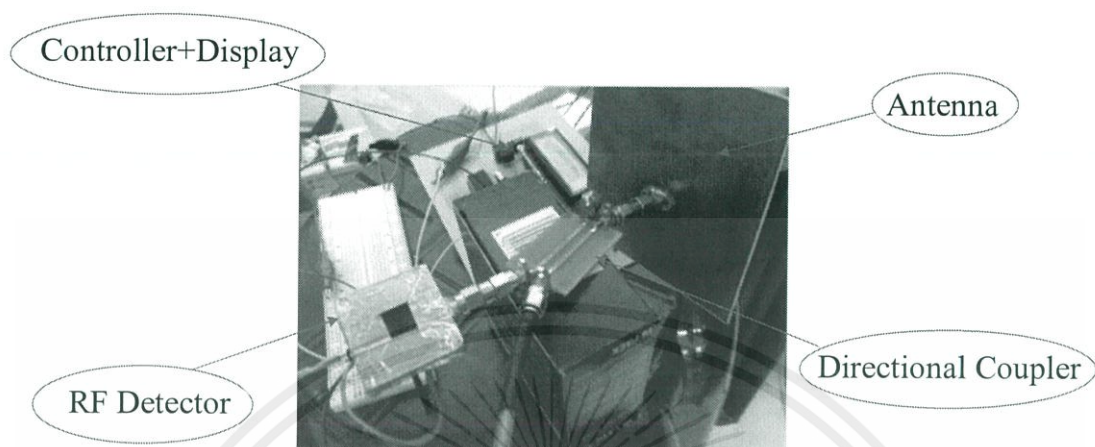
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบค่า  $|S_{11}|$  Co-polarized ของสารละลายในทางปฏิบัติโดยเปรียบเทียบแรงดันระหว่างวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า และ โวลต์มิเตอร์

ความของสารละลาย (Brix)	ค่าผลวัดจากโวลต์มิเตอร์	ค่าผลวัดจากวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
0	1.4900	1.5000	0.67%
5	1.4800	1.4900	0.67%
10	1.4980	1.4950	0.20%
15	1.4920	1.4907	0.09%
20	1.5060	1.5000	0.40%
25	1.5100	1.5100	0.00%
30	1.4860	1.4850	0.67%

ซึ่งจากการทดสอบดังกล่าวพบว่าวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าสามารถวัดสัญญาณไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับโวลต์มิเตอร์ในระดับ 99 % หรือความผิดพลาดไม่ถึง 1 %

#### 4.5 ผลการทดสอบวงจรมหาผลการทดสอบคลื่นสะท้อนและส่งผ่านสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆ

ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบคลื่นสะท้อนด้วยวงจรถูกเชื่อมต่อสัญญาณ (Directional Coupler) และวงจรถูกจับสัญญาณความถี่สูง (RF Detector) พร้อมไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับรับค่าไฟแรงดันและแปลงค่าสู่ดิจิทัลแสดงผลออกทาง LCD (Controller + Display) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.17 ซึ่งการทดสอบวงจรถูกจับสัญญาณความถี่สูงนั้นไม่สามารถทดสอบแยกได้เนื่องจากต้องมีการเชื่อมต่อระหว่างวงจรถูกจับสัญญาณความถี่สูงเข้ากับสายอากาศและมิเตอร์ตรวจวัด พร้อมทั้งมีตัวกลางที่เปลี่ยนแปลงเพื่อดูสัญญาณขอออกหากมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นในส่วนนี้จึงเป็นการนำวงจรถูกจับค่าแรงดันที่ได้จากวงจรมือสารละลายเปลี่ยนความเข้มข้นดังรูปที่ 4.17 โดยใช้สารละลายที่มีความเข้มข้น 0 brix, 5 brix, 10 brix, 15 brix, 20 brix, 25 brix และ 30 brix



รูปที่ 4.17 การทดสอบพารามิเตอร์ต่างๆที่คลื่นสะท้อนและส่งผ่าน

ซึ่งจากรูปจะประกอบไปด้วยสี่ส่วน สายอากาศจะทำการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลางสูญเสียที่เป็นสารละลายความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดคลื่นนิ่งระหว่างแหล่งจ่ายและสายอากาศ โดยจะทำการเหนี่ยวนำสัญญาณคลื่นนิ่งโดยวงจรเชื่อมต่อสัญญาณเข้าสู่วงจรตรวจจับสัญญาณความถี่สูง เพื่อตรวจจับคลื่นนิ่งและส่งสัญญาณขาออกไปยังวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าเพื่อทำการแปลงข้อมูลจากอะนาล็อกเป็นดิจิตอลและแสดงผลออกทางหน้าจอ ซึ่งจากการทดสอบคลื่นนิ่งรวมไปถึงคลื่นที่ส่งผ่าน โดยคลื่นที่ส่งผ่านจะต้องมีสายอากาศฝั่งรับและมีวงจรตรวจจับสัญญาณความถี่สูงคอยตรวจระดับสัญญาณที่ผ่านเข้าสู่สายอากาศตัวรับ ดังแสดงผลการทดสอบดังกล่าวในตารางที่ 4.10 ซึ่งเป็นตารางก่อนหน้า เป็นการเปรียบเทียบวงจรวัดแรงดันไฟฟ้ากับ Voltmeter ในการทดสอบพารามิเตอร์  $|S_{11}|$  และสำหรับ  $|S_{21}|$  สำหรับโพลาริซชันตรงกันและโพลาริซชันไขว้จะแสดงดังตารางที่ 4.11 และ 4.12 อีกทั้งค่าเฉลี่ยของตารางที่ 4.11 และ 4.12 จะแสดงดังตารางที่ 4.13 และ 4.14

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบค่า  $|S_{21}|$  Co-polarized ของสารละลายในทางปฏิบัติ

โดยเปรียบเทียบแรงดันระหว่างวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าและโวลต์มิเตอร์

ความหวาน ของ สารละลาย (Brix)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	โวลต์มิเตอร์	วงจรวัด แรงดันไฟฟ้า	โวลต์มิเตอร์	วงจรวัด แรงดันไฟฟ้า	โวลต์มิเตอร์	วงจรวัด แรงดันไฟฟ้า
0	1.553	1.549	1.52	1.52	1.520	1.520
5	1.528	1.524	1.493	1.495	1.509	1.510
10	1.490	1.496	1.485	1.490	1.478	1.476
15	1.480	1.471	1.463	1.461	1.469	1.460
20	1.450	1.451	1.446	1.441	1.454	1.451
25	1.420	1.417	1.426	1.422	1.438	1.436
30	1.416	1.412	1.400	1.397	1.419	1.420

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบค่า  $|S_{21}|$  Cross-polarized ของสารละลายในทางปฏิบัติ

โดยเปรียบเทียบแรงดันระหว่างวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าและโวลต์มิเตอร์

ความหวาน ของ สารละลาย (Brix)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	โวลต์มิเตอร์	วงจรวัด แรงดันไฟฟ้า	โวลต์มิเตอร์	วงจรวัด แรงดันไฟฟ้า	โวลต์มิเตอร์	วงจรวัด แรงดันไฟฟ้า
0	0.73	0.76	0.93	0.93	0.62	0.62
5	0.61	0.62	0.87	0.87	0.96	0.96
10	0.41	0.43	0.81	0.80	0.93	0.93
15	0.56	0.57	0.72	0.73	0.72	0.71
20	0.56	0.64	0.72	0.718	0.67	0.67
25	0.54	0.59	0.64	0.64	0.65	0.65
30	0.42	0.44	0.55	0.56	0.63	0.62

ตารางที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยของค่า  $|S_{21}|$  Co-polarized ของสารละลายในทางปฏิบัติโดยเปรียบเทียบ  
แรงดันระหว่างวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าและโวลต์มิเตอร์

ความหวานของ สารละลาย (Brix)	ค่าเฉลี่ยจากโวลต์ มิเตอร์	ค่าเฉลี่ยจากวงจรวัด แรงดันไฟฟ้า	เปอร์เซ็นต์ความ ผิดพลาด
0	1.531	1.529	0.13%
5	1.510	1.509	0.06%
10	1.484	1.487	0.20%
15	1.470	1.464	0.41%
20	1.450	1.447	0.21%
25	1.428	1.425	0.21%
30	1.411	1.409	0.14%

ตารางที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยของค่า  $|S_{21}|$  Cross-polarized ของสารละลายในทางปฏิบัติโดยเปรียบเทียบ  
แรงดันระหว่างวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าและโวลต์มิเตอร์

ความหวานของ สารละลาย (Brix)	ค่าเฉลี่ยจากโวลต์ มิเตอร์	ค่าเฉลี่ยจากวงจรวัด แรงดันไฟฟ้า	เปอร์เซ็นต์ความ ผิดพลาด
0	0.760	0.77	1.31%
5	0.813	0.816	0.37%
10	0.716	0.720	0.56%
15	0.667	0.670	0.45%
20	0.650	0.676	4.00%
25	0.610	0.627	2.78%
30	0.533	0.540	1.31%

จากค่าเฉลี่ยดังกล่าวทั้งในตารางที่ 4.13 และตารางที่ 4.14 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบค่า  $|S_{21}|$  ของทั้งโพลาริซตรงกันและโพลาริซไขว้ตามลำดับ จะสังเกตพบได้ว่าในตารางที่ 4.13 ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากโพลาริซตรงกันนั้น มีความเป็นเชิงเส้นสูงซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน อีกทั้งข้อมูลก็มีระยะห่างที่เหมาะสมไม่เกาะกลุ่มกันจนเกินไป ตรงกันข้ามในส่วน of ตารางที่ 4.14 ซึ่ง

เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบจากโพลาริซตรงข้าม จะสังเกตพบว่าข้อมูลมีการเกาะกลุ่มและไม่เป็นเชิงเส้นมีลักษณะกระเพื่อม (ripple)

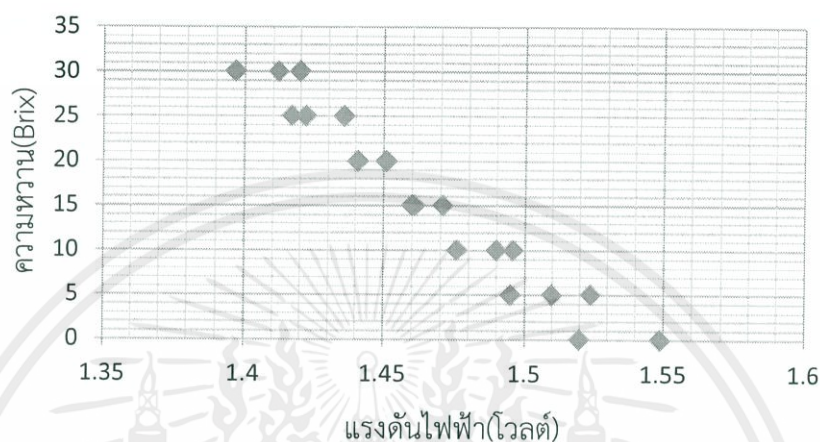
#### 4.6 การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis)

จากผลการทดสอบจริงของพารามิเตอร์ทั้งสามซึ่งได้แก่ส่วนของคลื่นสะท้อนทางด้านฝั่งส่งของสายอากาศส่ง และคลื่นส่งผ่านทั้งโพลาริซตรงและตรงข้ามของฝั่งสายอากาศรับ นั้นพบว่าในส่วนแรกของคลื่นสะท้อน  $|S_{11}|$  ข้อมูลมีการเกาะกลุ่มซึ่งมีความแตกต่างกันไม่มาก ส่วนใหญ่ตัวเลขจะมีจำนวนใกล้เคียงกัน ซึ่งทำให้ต้องทำการตัดพารามิเตอร์นี้ออกเป็นอันดับแรก ในส่วนต่อมาคลื่นส่งผ่านแบบโพลาริซตรงกันนั้น ข้อมูลสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ได้เนื่องจากมีความแตกต่างกันของข้อมูลจากผลการทดสอบ และอันดับสุดท้ายส่วนของคลื่นส่งผ่านแบบโพลาริซตรงข้าม ข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงแต่ไม่มากและไม่ถึงกับเกาะกลุ่มหากแต่จะอยู่ในลักษณะกระเพื่อม (ripple) ซึ่งทำให้ตัดสินใจตัดข้อมูลในส่วนนี้ออกไปเพื่อทำให้สามารถวิเคราะห์ได้แม่นยำกว่า โดยจะวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นที่หาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์หลักตัวเดียวที่ส่งผลต่อความเข้มข้นซึ่งในการศึกษาในครั้งนี้ ค่าอินพุต คือ แรงดันไฟฟ้าของการวัดในรูปแบบของ  $|S_{21}|$  Co-polarized และเอาท์พุต คือ ระดับความหวานของสารละลาย โดยข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์จากการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ผลจากการทดสอบค่า  $|S_{21}|$  Co-polarized ของสารละลายในทางปฏิบัติ  
ของวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า

ความหวานสารละลาย	ทดสอบครั้งที่1	ทดสอบครั้งที่2	ทดสอบครั้งที่3
0	1.549	1.52	1.520
5	1.524	1.495	1.510
10	1.496	1.490	1.476
15	1.471	1.461	1.460
20	1.451	1.441	1.451
25	1.417	1.422	1.436
30	1.412	1.397	1.420

จากตารางที่ 4.15 จะทำการนำค่าที่อยู่ในตารางดังกล่าวมาทำการวาดกราฟเพื่อตรวจสอบในเบื้องต้นว่าความหวานของสารละลายและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากพารามิเตอร์  $|S_{21}|$  Co-polarized มีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความหวานของสารละลายกับแรงดันไฟฟ้า  
ในรูปแบบการวัดแบบ  $|S_{21}|$  Co-polarized

จากนั้นนำค่าจากการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความหวานของสารละลายว่ามีค่าเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ในรูปแบบของสมการเชิงเส้นหรือไม่ พบว่า ค่า Multiple R ซึ่งใช้บอกถึงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับระดับความหวานของสารละลาย = 0.973843 หรือกล่าวได้ว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากพารามิเตอร์  $|S_{21}|$  Co-polarized กับความเข้มข้นหรือความหวานของสารละลายถึง 97% ซึ่งบ่งบอกถึงความสัมพันธ์กันสูง และค่า  $R^2$  ซึ่งใช้บอกเปอร์เซ็นต์ของความเหมาะสมในการแก้ไขปัญหาด้วยสมการถดถอย = 0.9483 ซึ่งแสดงว่าความเหมาะสมที่จะใช้พยากรณ์ในรูปแบบเชิงเส้นบนข้อมูลแรงดันไฟฟ้ามีความเหมาะสมถึง 94% ซึ่งในการคำนวณของสมการถดถอยเราจะใช้หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance หรือ ANOVA) โดยใช้สองตัวแปรหลักในการพิสูจน์ความถูกต้องของสมการถดถอยและความสามารถในการหาคำตอบจากสมการซึ่งสองตัวแปรนั้นได้แก่ T-statistic และ F-statistic ซึ่งสมการถดถอยนั้นสามารถหาได้จากค่า Intercept

$(\beta_0)$  และ X Variable ( $\beta_1$ ) และความน่าเชื่อถือทางอุตสาหกรรมที่จะบ่งชี้ว่ามีประสิทธิภาพไม่ต่ำกว่า 95% นั้นสามารถดูได้จากค่า Significance F ซึ่งต้องมีค่าต่ำกว่า 0.05 โดยค่าของตัวแปรต่างๆ ได้แสดงดังในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 การพยากรณ์สมการเชิงเส้น

Significance F	$1 \times 10^{-13}$
Intercept ( $\beta_0$ )	357.4467
X Variable ( $\beta_1$ )	-233.3420
T-statistic ( $\beta_0$ )	19.4921
T-statistic ( $\beta_1$ )	-18.6817
F-statistic	349.0057

จากตารางที่ 4.16 จะสามารถพยากรณ์สมการเชิงเส้นของความหวานของสารละลายกับแรงดันไฟฟ้าในการวัดรูปแบบ  $|S_{21}|$  Co-polarized ได้ดังนี้

$$y = 357.44 - 234.33x \quad (4.1)$$

โดยที่

$x$  = แรงดันไฟฟ้าในรูปแบบการวัดแบบ  $|S_{21}|$  Co-polarized

$y$  = ความหวานของสารละลาย

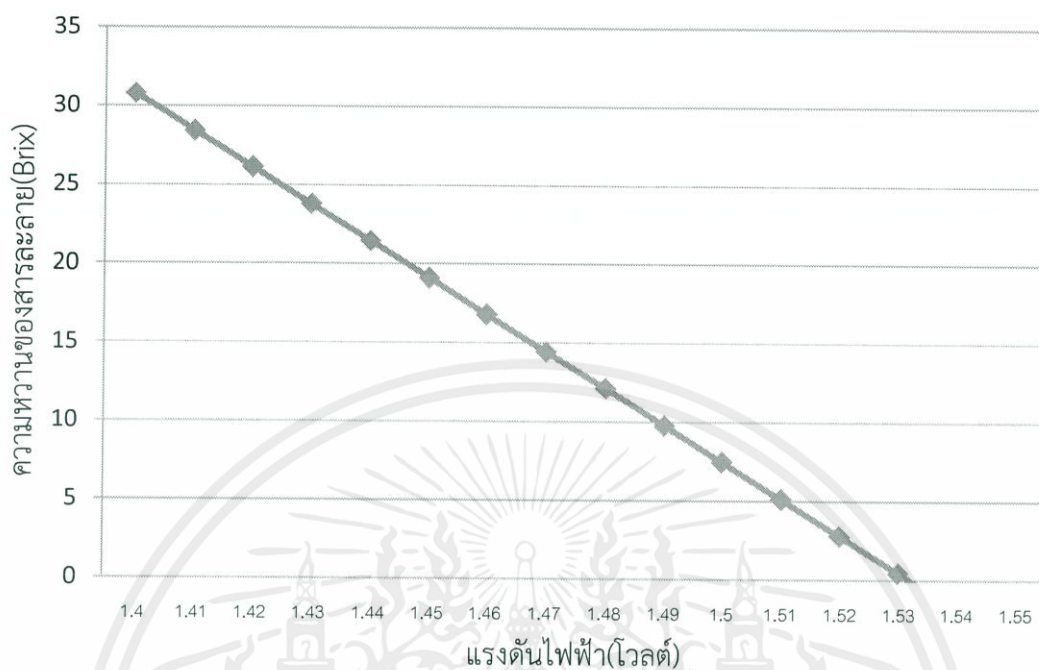
จุดตัดแกน  $y$  (Intercept) = 357.44

ความชัน (X Variable) = -233.3420

จากสมการที่ (4.1) เมื่อทำการแทนค่าด้วยแรงดันไฟฟ้าต่างๆ และเปรียบเทียบช่วงความเข้มข้นของสารละลายจะได้ผลดังที่แสดงในตารางที่ 4.17 และรูปที่ 4.19

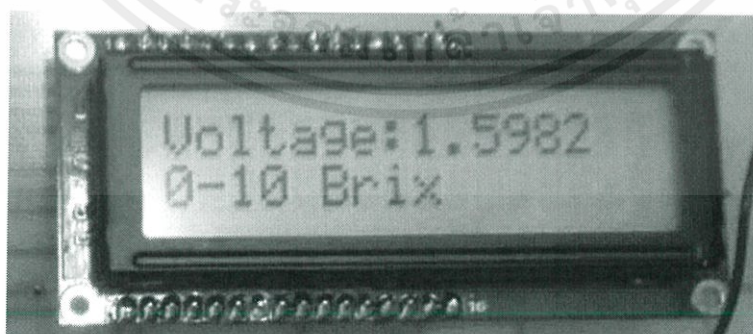
ตารางที่ 4.17 การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นในการจำแนกความเข้มข้นของ  
สารละลาย (Linear Regression Analysis)

ค่าแรงดันไฟฟ้า	ค่าความหวาน (Brix) จาก Linear regression	ช่วงความหวาน
1.40	30.764	มากกว่า 30 Brix
1.41	28.430	20-30 Brix
1.42	26.0972	20-30 Brix
1.43	23.7638	20-30 Brix
1.44	21.4300	20-30 Brix
1.45	19.0970	10-20 Brix
1.46	16.7636	10-20 Brix
1.47	14.4302	10-20 Brix
1.48	12.0968	10-20 Brix
1.49	9.7634	0-10 Brix
1.50	7.4299	0-10 Brix
1.51	5.0966	0-10 Brix
1.52	2.7632	0-10 Brix
1.53	0.4298	0-10 Brix
1.54	0	0



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าในรูปแบบการวัดแบบ  $|S_{21}|$  Co-polarized กับความหวานของสารละลายของสมการการวิเคราะห์แบบถดถอย

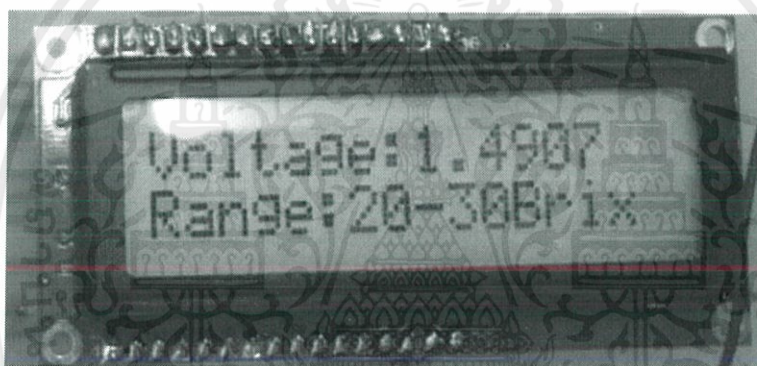
โดยที่สมการที่พล็อตในกราฟดังรูปที่ 4.19 นี้จะถูกนำไปเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งเป็นหน่วยประมวลผลสำหรับการประมวลผลด้วยวิธีการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอย โดยที่เมื่อวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์รับข้อมูลที่เป็นแรงดันไฟฟ้าเข้ามาจะทำการเปรียบเทียบกับสมการดังกล่าวเพื่อหาค่าความหวานซึ่งทำการโปรแกรมให้แสดงผลค่าความหวานออกมาเป็นช่วงได้แก่ช่วง 0-10 Brix, ช่วง 10-20 Brix, ช่วง 20-30 Brix ดังแสดงในรูปที่ 4.20-4.22



รูปที่ 4.20 หน้าจอแสดงผลช่วงความหวาน 0-10 Brix



รูปที่ 4.21 หน้าจอแสดงผลช่วงความหวาน 10-20 Brix



รูปที่ 4.22 หน้าจอแสดงผลช่วงความหวาน 20-30 Brix

จากผลการทดสอบจริงของพารามิเตอร์ทั้งสามซึ่งได้แก่ส่วนของคลื่นสะท้อนทางด้านฝั่งส่งของสายอากาศส่ง และคลื่นส่งผ่านทั้งโพลาริซตรงและตรงข้ามของฝั่งสายอากาศรับ นั้นพบว่าในส่วนแรกของคลื่นสะท้อน  $|S_{11}|$  ข้อมูลมีการเกาะกลุ่มซึ่งมีความแตกต่างกันไม่มาก ส่วนใหญ่ตัวเลขจะมีจำนวนใกล้เคียงกัน ซึ่งทำให้ต้องทำการตัดพารามิเตอร์นี้ออกเป็นอันดับแรก ในส่วนต่อมาคลื่นส่งผ่านแบบโพลาริซตรงกันนั้น ข้อมูลสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ได้เนื่องจากมีความแตกต่างกันของข้อมูลจากผลการทดสอบ และอันดับสุดท้ายส่วนของคลื่นส่งผ่านแบบโพลาริซตรงข้าม ข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงแต่ไม่มากและไม่ถึงกับเกาะกลุ่มหากแต่จะอยู่ในลักษณะกระเพื่อม (ripple) ซึ่งทำให้ตัดสินใจคัดข้อมูลในส่วนนี้ออกไปเพื่อทำให้สามารถวิเคราะห์ได้แม่นยำกว่าโดยจะส่งผลให้พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ซึ่งในตอนต้นนั้นใช้ทั้งหมด 3 พารามิเตอร์เหลือเพียง 1 พารามิเตอร์

ทำให้ตัดสินใจใช้การวิเคราะห์แบบสมการถดถอยเนื่องจากไม่มีความจำเป็นต้องใช้โครงข่ายประสาทเทียมเนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมนั้นเหมาะกับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มากกว่าหนึ่งเพื่อหาความสัมพันธ์และสมการถดถอยเหมาะสมกับการใช้พารามิเตอร์จำนวนไม่มาก ซึ่งจากการทดสอบก็แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์เดียวกันก็เป็นที่ยังพอต่อการวิเคราะห์อีกทั้งการใช้สมการถดถอยมาแทนยังช่วงลดความซับซ้อนของระบบได้อีกมากในขณะที่สามารถให้คำตอบเป็นช่วงได้ 100%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

การศึกษาและวิเคราะห์วิธีการหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสารละลาย ทำให้พบว่าความเข้มข้นของสารละลาย ซึ่งในกรณีนี้ใช้เป็นความหวานของสารละลายนั้น มีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและปัจจัยสูญเสีย โดยที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกและปัจจัยสูญเสียจะมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม เปรียบเทียบกับความเข้มข้นแล้ว ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกจะมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน ในทางตรงกันข้ามปัจจัยสูญเสียจะมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามกับความเข้มข้น ซึ่งหลังจากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าคงตัวไดอิเล็กตริก รวมถึงปัจจัยสูญเสียแล้ว อันดับต่อไปเป็นการใช้การคำนวณด้วยโปรแกรมเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและตัวกลางที่มีความเข้มข้นต่างๆ เพื่อนำข้อมูลเข้าสู่ส่วนการประมวลผลเพื่อที่จะจำแนกสารละลาย โดยในส่วนของ การทดสอบสารละลายหรือไม่โครเวฟเซ็นเซอร์ที่ประกอบไปด้วยสารละลายที่อยู่ในกล่องโพลีเมอร์กับสายอากาศไมโครสตริปทั้งสองฝั่งซึ่งได้แกฝั่งส่งและฝั่งรับ โดยการออกแบบสายอากาศได้ออกแบบให้สามารถทำงานได้ที่ประสิทธิภาพมากกว่า 90% และจากผลการทดสอบแล้วแสดงให้เห็นว่าในส่วนของ การออกแบบสายอากาศสามารถทำงานได้ดีดังที่ได้ออกแบบไว้ ส่วนต่อมาซึ่งก็คือวงจรความถี่สูงซึ่งได้แก่วงจรเชื่อมต่อสัญญาณและวงจรตรวจจับสัญญาณความถี่สูง ซึ่งหลังจากทำการทดสอบแล้วพบว่าวงจรทั้งสองสามารถทำงานได้ดีดังที่ได้ออกแบบไว้ รวมไปถึงส่วนสุดท้ายซึ่งก็คือส่วนของวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าและวงจรประมวลผลที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกัน ซึ่งจากการทดสอบวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแล้วพบว่าสามารถทำงานได้เทียบเท่ากับโวลต์มิเตอร์กล่าวคือสามารถแบ่งระดับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรตรวจจับสัญญาณความถี่สูงได้อย่างมีประสิทธิภาพและข้อมูลดังกล่าวก็จะถูกนำไปเข้าสู่ส่วนของการประมวลผล

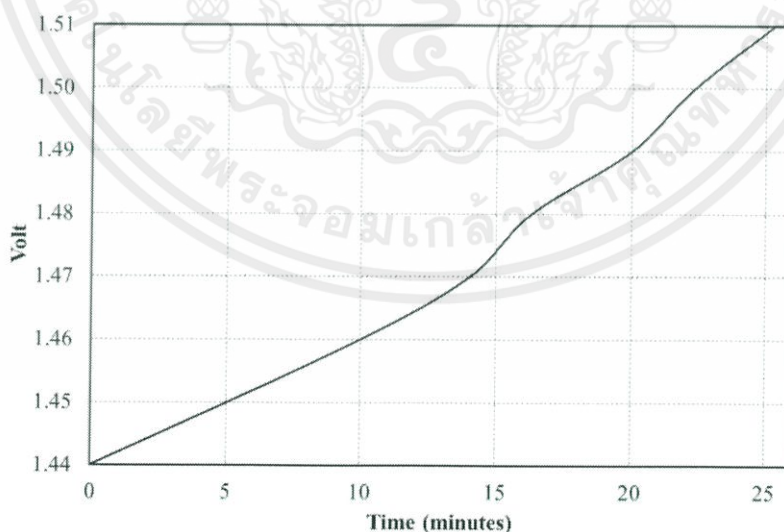
สำหรับในส่วนของ การทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตั้งแต่  $|S_{11}|$ ,  $|S_{21}|$  แบบ Co-polarized และ  $|S_{21}|$  แบบ Cross-polarized แล้ว จะพบว่าค่าของ  $|S_{11}|$  ที่ได้จากการทดสอบจริงนั้นค่อนข้างไม่เสถียรและตัวเลขที่ได้มีลักษณะเกาะกลุ่ม ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์ดังที่คาดไว้ตามสมมุติฐาน ทำให้ต้องเลือกตัดพารามิเตอร์ในส่วนนี้ทิ้งไป แต่ในกรณีของ  $|S_{21}|$  ทั้งแบบโพลาไรซ์ตรงและโพลาไรซ์ไขว้ นั้นแปรเปลี่ยนไปตามความเข้มข้น ซึ่งตัวเลขของโพลาไรซ์แบบตรงกันนั้นค่อนข้างแม่นยำ ส่วนของโพลาไรซ์ไขว้ นั้นเป็นไปตามแนวโน้มที่คาดไว้ หากแต่ตัวเลขที่ได้จากโพลาไรซ์ไขว้ นั้นมีการแกว่งมากกว่าส่วนของโพลาไรซ์ตรงกัน จากผลการทดสอบจริงที่ได้ซึ่งแตกต่างจาก

สมมุติฐานในตอนต้น ทำให้สามารถเปรียบเทียบความเหมาะสมในการเลือกวิธีวิเคราะห์ข้อมูลระหว่าง วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโครงข่ายประสาทเทียมและวิธีการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอย ซึ่งหลังจากพบว่าพารามิเตอร์ที่ใช้งานจริงหลังจากที่ได้ทำการทดสอบแล้ว เหลือเพียงพารามิเตอร์เดียว จึงพบว่าวิธีการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยนั้นเหมาะสมกว่าเนื่องจากสามารถลดความซับซ้อนของระบบไปมาก ในขณะที่สามารถประเมินข้อมูลอย่างถูกต้อง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการคำนวณความสัมพันธ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อตัวกลางความเข้มข้นต่างๆ ในระยะสนามใกล้ นั้น สามารถเลี่ยงปัญหาการวิเคราะห์ที่ได้โดยการเปลี่ยนชนิดสายอากาศเป็นสายอากาศแบบท่อนำคลื่น เนื่องจากสนามที่ออกจากช่องเปิดของสายอากาศชนิดท่อนำคลื่นจะเป็นสนามที่มีลักษณะแบบคลื่นระนาบ ซึ่งสามารถใช้ความสัมพันธ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อตัวกลางแบบคลื่นระนาบได้ ซึ่งในกรณีคลื่นระนาบจะมีความซับซ้อนน้อยกว่าแบบคลื่นทรงกลมที่เป็นสนามระยะใกล้

ในส่วนของแหล่งจ่ายสำหรับวงจรแสดงผลนั้น ในตอนแรกผู้ทดลองได้ใช้ถ่านไฟฉายชนิด 9 โวลต์จากนั้นทำการแปลงลงเหลือ 5 โวลต์เพื่อจ่ายให้กับวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์รวมถึงหน้าจอแสดงผล ผลที่ตามมาคือเมื่อระยะเวลาผ่านไปวงจรจะมีการแสดงค่าผิดออกจากความเป็นจริง อันเนื่องมาจากค่าแรงดันที่จ่ายโดยถ่านไฟฉายนั้นจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แรงดันที่เปลี่ยนไปจากวงจรแสดงผลอันเนื่องมาจากแหล่งจ่ายไม่คงที่

ซึ่งผลที่ตามมาคือวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการแปลงค่าออกสู่หน้าจอแสดงผลผลิตไปจากกระบวนการควันทะลุที่มีเพดานระดับต่ำลง ทำให้ค่าที่เกิดจากการควันทะลุและแสดงผลออกสู่หน้าจอมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ตามความสัมพันธ์ของค่าแรงดันจากถ่านไฟฉายที่ลดลง ซึ่งหากทำการเปลี่ยนแหล่งจ่ายจากการใช้ถ่านไฟฉาย เป็นแหล่งจ่ายที่สามารถให้ค่าแรงดันอย่างสม่ำเสมอได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] A. von Hippel, "Dielectric Materials and Applications," The Technology Press of MIT and John Wiley and Sons, New York, 1954
- [2] Constantine A., Balanis, "Antenna Theory. 3<sup>rd</sup> ed.," John Wiley&Son, Hoboken:NJ, 2005
- [3] Constantine A., Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics 2<sup>nd</sup> ed.," John Wiley&Son, Hoboken:NJ, 2012
- [4] David M., Pozar, "Microwave Engineering. 3<sup>rd</sup> ed.," John Wiley&Son, 2005
- [5] J.B. Hasted, "Aqueous Dielectrics," William Clowes&Sons Ltd, London, 1973
- [6] Mark Hudson Beale, Martin T. Hagan, Howard B. Demuth, "Neural Network Toolbox User's Guide," 3 Apple Hill Drive Natick, MA : The Math Works, Inc.
- [7] ชนิษฐา แซ่ตั้ง, สุริภณ สมควรพาณิชย์, สนามแม่เหล็กไฟฟ้า. กรุงเทพฯ, 2555
- [8] โมไนย ไกรฤกษ์, วิศวกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า. กรุงเทพฯ, 2544.

