



การพัฒนาชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอน
ทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม

พิสิฐ สอนละ
รุ่งอรุณ พรเจริญ
อนุชา ไชยชาญ
ภาวนา ชูศิริ
วรรณภา มโนสีบ

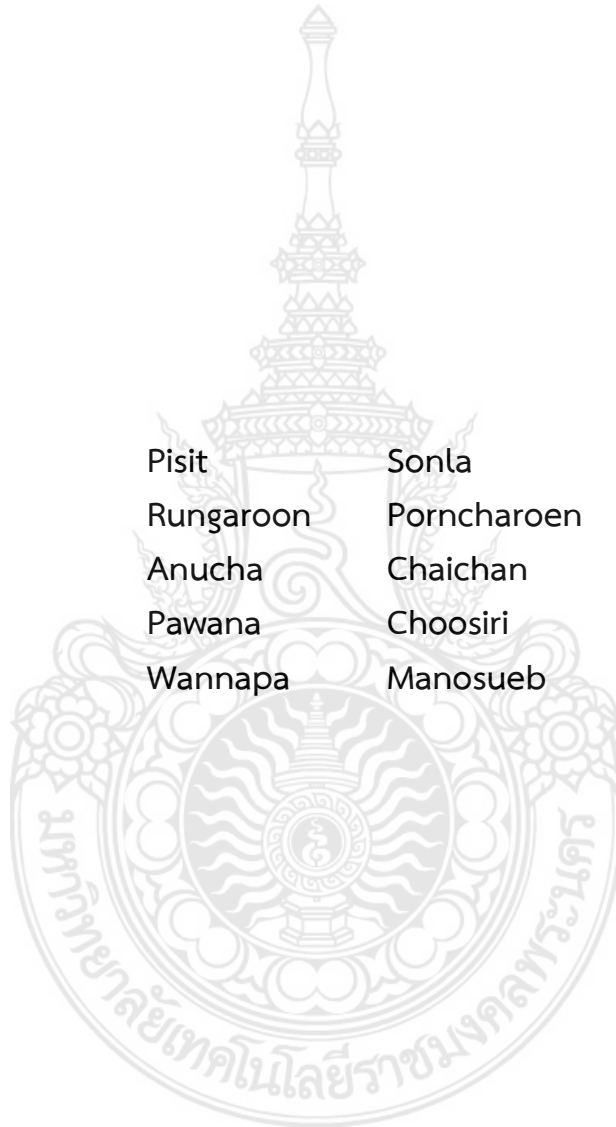


งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้คณะ
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๙
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



The Development of Multimedia Package on Microstrip Antenna for Learning in Telecommunication Engineering

Pisit	Sonla
Rungaroon	Porncharoen
Anucha	Chaichan
Pawana	Choosiri
Wannapa	Manosueb



This Report is Funded by Rajamangala University of Technology Phra Nakhon,
Fiscal Year 2016

- ชื่อเรื่อง : การพัฒนาชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอน
ทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม
- ผู้วิจัย : นายพิสิฐ สอนละ และคณะ
- พ.ศ. : 2559

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้ 1) เพื่อพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม 2) เพื่อเปรียบเทียบผลการเรียนของผู้เรียนก่อนเรียนและหลังเรียนด้วยชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น และ 3) เพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ ผู้เรียนระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์เทเวศร์ ที่ลงทะเบียนเรียนรายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ ภาคการเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2558 จำนวน 15 คน ทำการสุ่มแบบเจาะจง (Purposive Sampling) เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริป แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน และแบบสอบถามความพึงพอใจของผู้เรียน ผลการวิจัยพบว่า

1. ผลการพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม พบว่า ชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมีทั้งหมด 3 บทเรียน ประกอบด้วย วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม จำนวน 13 ข้อ ใบเนื้อหา จำนวน 91 หน้า การนำเสนอเนื้อหาด้วยเพาเวอร์พอยต์ จำนวน 178 เฟรม การนำเสนอเนื้อหาด้วยชุดสาธิต จำนวน 3 ชุด แบบทดสอบท้ายบทเรียน จำนวน 45 ข้อ และแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน จำนวน 30 ข้อ

ผลการหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสมที่พัฒนาขึ้น พบว่า ผู้เรียนสามารถทำคะแนนแบบทดสอบท้ายบทเรียนเฉลี่ย 12.07 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 80.44 ซึ่งเท่ากับเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ร้อยละ 80 และการทำคะแนนแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน 24.00 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 80.00 ซึ่งเท่ากับเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ร้อยละ 80 จึงสามารถสรุปได้ว่าชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพเท่ากับ 80.44/80.00 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ร้อยละ 80/80

2. ผลเปรียบเทียบผลการเรียนของผู้เรียนก่อนเรียนและหลังเรียนด้วยชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น พบว่า ผู้เรียนสามารถทำคะแนนเฉลี่ยจากแบบทดสอบหลังเรียนคิดเป็นร้อยละ 80.00 สูงกว่าคะแนนเฉลี่ยจากแบบทดสอบก่อนเรียนคิดเป็นร้อยละ 20.89 จึงสามารถสรุปได้ว่า ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของผู้เรียนสูงขึ้นหลังจากได้เรียนกับชุดสื่อประสมที่พัฒนาขึ้น

3. ผลศึกษาความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น พบว่า ผู้เรียนมีความคิดเห็นต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปด้านต่าง ๆ มีค่าเฉลี่ยของระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 3.93, S.D. = 0.84$)



กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความกรุณาช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายฝ่ายที่ให้การสนับสนุนช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ดังนี้

ขอขอบพระคุณ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อย่างยิ่ง ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญตรวจเครื่องมือวิจัยที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไข ปรับปรุงเครื่องมือการวิจัยให้ถูกต้องสมบูรณ์

นอกจากนี้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณ นักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครทุกท่านที่เสียสละเวลาในการทดสอบเครื่องมือวิจัยจนสามารถนำเสนอผลงานวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้ได้

ผู้วิจัย



สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
3. ขอบเขตของการวิจัย	3
4. นิยามศัพท์เฉพาะ	3
5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
1. แนวคิดเกี่ยวกับชุดสื่อประสม	5
2. นวัตกรรมที่นำมาใช้การพัฒนาชุดสื่อประสม	9
3. การเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม	11
4. ความรู้ทางด้านสายอากาศไมโครสตริป	12
5. ทฤษฎีวงจรระโซแนนท์	15
6. ทฤษฎีวงจรรองความถี่ไมโครเวฟ	35
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	53
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	55
1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง	55
2. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	56
3. การสร้างและหาคุณภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	56
4. วิธีดำเนินการทดลอง	76
5. การวิเคราะห์ข้อมูล	78
6. สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล	78
บทที่ 4 ผลการวิจัย	83
1. ผลการพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม	83

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2. ผลเปรียบเทียบผลการเรียนของผู้เรียนก่อนเรียนและหลังเรียน ด้วยชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น	87
3. ผลศึกษาความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อชุดสื่อประสมเรื่อง สายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น	87
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	90
1. สรุปผลการวิจัย	90
2. อภิปรายผล	91
3. ข้อเสนอแนะ	93
บรรณานุกรม	94
ภาคผนวก	96
ภาคผนวก ก	97
รายชื่อผู้เชี่ยวชาญในการตรวจเครื่องมือที่การวิจัย	98
ภาคผนวก ข	99
ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อสอบกับ วัตถุประสงค์	100
ผลการวิเคราะห์ค่าความยากง่าย และค่าอำนาจจำแนกของ แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน	101
ภาคผนวก ค	103
ผลการทดลองใช้กับนักศึกษา	104
ภาคผนวก ง	106
แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนพร้อมเฉลย	107
ประวัติผู้วิจัย	115

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	จำนวนใบเนื้อหา แบบร่างกระดาน และแบบทดสอบหลังเรียน	60
2	พารามิเตอร์การออกแบบไมโครสตริปของวงจรองความถี่ต่ำผ่านแบบฟังก์ชันเอลลิปติก	68
3	องค์ประกอบของชุดการสอนแบบสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริป	83
4	ผลการวิเคราะห์คะแนนแบบทดสอบท้ายบทเรียน	85
5	ผลการวิเคราะห์คะแนนแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียน	86
6	ผลการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพชุดสื่อประสม	86
7	การเปรียบเทียบผลการเรียนของผู้เรียนก่อนเรียนและหลังเรียน	87
8	ผลการวิเคราะห์แบบสอบถามความพึงพอใจของผู้เรียน	88
ข.1	ค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อสอบกับวัตถุประสงค์	100
ข.2	ผลการวิเคราะห์ค่าความยากง่าย และค่าอำนาจจำแนกของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน	101
ค.1	คะแนนการทำแบบฝึกหัดในแต่ละบทเรียน	104
ค.2	คะแนนการทำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียน	105

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ความต้องการของนักเรียนต่อการพัฒนาสื่อการเรียนการสอน	2
2	โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	12
3	ประสิทธิภาพค่าคงตัวไดอิเล็กตริก	13
4	วงจรอนุกรม RLC	16
5	ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่อินพุตเทียบกับความถี่ของวงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรม	17
6	วงจรขนาน RLC	17
7	ขนาดของอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของวงจรเรโซแนนท์แบบขนาน	18
8	สายส่งมีการสูญเสียแบบลัดวงจรและการกระจายแรงดัน(เส้นทึบ) และกระแส(เส้นประ)บนเรโซเนเตอร์สำหรับ $n = 1$ ($l = \lambda/2$) และ $n = 2$ ($l = \lambda$)	19
9	สายส่งมีการสูญเสียปลายแบบลัดวงจรวาว $\lambda/4$ และการกระจายแรงดัน (เส้นทึบ) และกระแส(เส้นประ)บนเรโซเนเตอร์	21
10	สายส่งมีการสูญเสียปลายแบบเปิดวงจรวาว $\lambda/2$ และการกระจายแรงดัน(เส้นทึบ) และกระแส(เส้นประ)บนเรโซเนเตอร์	23
11	การจำลองไมโครสตริปยาว $\lambda_g/2$ บนแผ่นวงจรพิมพ์ RT/Duroid 6006 ด้วยโปรแกรม IE3D	24
12	การจำลองไมโครสตริปยาว $\lambda_g/4$ บนแผ่นวงจรพิมพ์ RT/Duroid 6006 ด้วยโปรแกรม IE3D	26
13	เรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปชนิดต่างๆ	27
14	สนามไฟฟ้าบนเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปแบบวงปิดสี่เหลี่ยม	28
15	วงจรเทียบเคียงของวงจรเรโซเนเตอร์เชื่อมโยงไฟฟ้า	29
16	วงจรเทียบเคียงของวงจรเรโซเนเตอร์เชื่อมโยงแม่เหล็ก	30
17	วงจรเทียบเคียงของวงจรเรโซเนเตอร์เชื่อมโยงผสม	32
18	การเชื่อมโยงที่อินพุตและเอาต์พุตของเรโซเนเตอร์ของวงจรกรอง	33
19	วงจรเทียบเคียงของเรโซเนเตอร์ที่อินพุตของวงจรกรอง	34
20	ผลตอบสนองทางเฟสของ S_{11} ของวงจรในภาพที่ 19	35
21	ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ธ	37
22	ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำแบบเชบีเชฟ	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำแบบฟังก์ชันเอลลิปติก	38
24	ผลตอบสนองการลดทอนต่อความถี่ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่	39
25	วงจรข่ายบันไดของวงจรกรองต่ำต้านแบบ	40
26	วงจรกรองผ่านต่ำต้านแบบฟังก์ชันเอลลิปติก	42
27	การแปลงวงจรกรองผ่านต่ำต้านแบบ	44
28	การแปลงของรีซาร์ด	45
29	เอกลักษณ์ของคูโรตตะ	46
30	วงจรเทียบเคียงของเอกลักษณ์คูโรตตะในภาพที่ 3-29 (ก)	47
31	วงจรกรองผ่านต่ำแบบอิมพีแดนซ์ขั้น	48
32	ความไม่ต่อเนื่องของไมโครสตริป	48
33	ผลตอบสนองของวงจรกรองผ่านต่ำ	50
34	วงจรกรองผ่านต่ำฟังก์ชันเอลลิปติก	51
35	การจัดวางเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปวงเปิดในวงจรกรองผ่านแถบ	51
36	คู่ของโพลการลดทอนในผลตอบสนองผ่านแถบเกิดจากการเชื่อมโยงไขว้ในวงจร	52
37	วงจรกรองผ่านแถบแบบสามส่วน	52
38	ขั้นตอนการสร้างและการหาค่าคุณภาพเครื่องมือวิจัย	56
39	ผังความคิดผลการวิเคราะห์หลักสูตรรายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ	58
40	ขั้นตอนการสร้างสื่อการสอน	60
41	ตัวอย่างการนำเสนอเนื้อหาด้วยเพาเวอร์พอยต์ บทเรียนที่ 1 สายไมโครสตริป	61
42	ตัวอย่างการนำเสนอเนื้อหาด้วยเพาเวอร์พอยต์ บทเรียนที่ 2 วงจรโซแนนท์	61
43	ตัวอย่างการนำเสนอเนื้อหาด้วยเพาเวอร์พอยต์ บทเรียนที่ 3 วงจรกรองความถี่ไมโครเวฟ	62
44	วงจรกรองผ่านต่ำต้านแบบและวงจรกรองที่ถูกแปลงความถี่และอิมพีแดนซ์	63
45	ผลตอบสนองวงจรกรองผ่านต่ำจำลองด้วยโปรแกรม Microwave office	64
46	วงจรกรองผ่านต่ำไมโครสตริปอิมพีแดนซ์แบบขั้นจำลองด้วยโปรแกรม IE3D	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
47	วงจรรองผ่านต่ำไมโครสตริปอิมพีแดนซ์แบบชั้นสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ RT/Duroid 6006	66
48	วงจรรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบที่มีผลตอบสนองแบบฟังก์ชันเอลลิปติก อันดับ 6	67
49	ผลตอบสนองของวงจรรองผ่านต่ำโดยการจำลองด้วยโปรแกรม Microwave office	68
50	โครงสร้างไมโครสตริปของวงจรรองผ่านต่ำที่มีผลตอบสนองแบบฟังก์ชันเอลลิปติก	69
51	วงจรรองผ่านต่ำผลตอบสนองแบบฟังก์ชันเอลลิปติกอันดับ 6 จำลองด้วยโปรแกรม IE3D	70
52	วงจรรองผ่านต่ำไมโครสตริปที่มีผลตอบสนองแบบฟังก์ชันเอลลิปติก บนแผ่นวงจรพิมพ์ RT/Duroid 6006	71
53	การจำลองเรโซเนเตอร์ด้วยโปรแกรมจำลอง IE3D เพื่อหาความยาวเรโซเนเตอร์ที่ทำให้เกิดความถี่เรโซแนนท์ที่ 2.1 GHz	72
54	การจำลองหาค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกด้วยโปรแกรมจำลอง IE3D	73
55	การจำลองหาสัมประสิทธิ์การเชื่อมโยงระหว่างเรโซเนเตอร์ด้วยโปรแกรมจำลอง IE3D	74
56	วงจรรองผ่านแถบที่ใช้เรโซเนเตอร์แบบครึ่งคลื่นเชื่อมโยงแบบขนานจำลองด้วยโปรแกรมจำลอง IE3D	75
57	วงจรรองผ่านแถบที่ใช้เรโซเนเตอร์แบบครึ่งคลื่นเชื่อมโยงแบบขนานสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ RO4003C	75
58	ขั้นตอนการดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล	77
59	ตัวอย่างแผนการเรียนรู้	84
60	ตัวอย่างการนำเสนอด้วยเพาเวอร์พอยต์	84
61	ตัวอย่างเนื้อหาด้วยชุดสาธิต	85

บทที่ 1

บทนำ

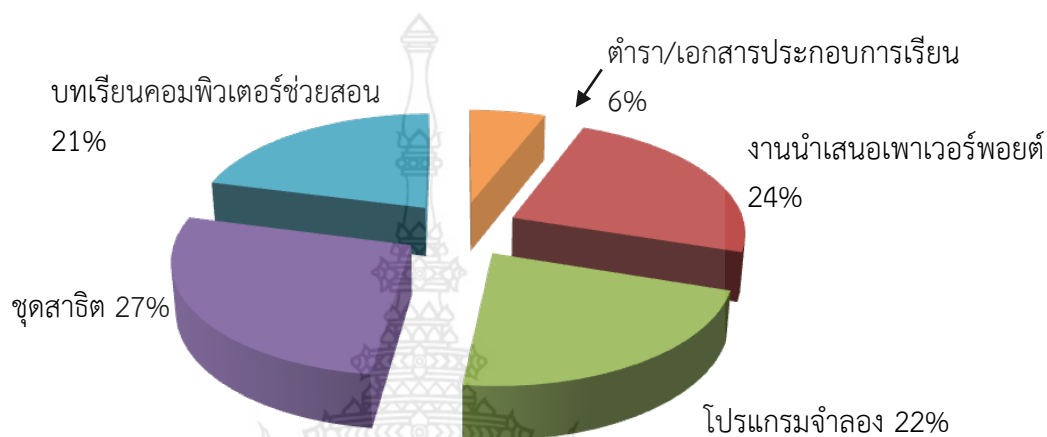
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการใช้งานความถี่ไมโครเวฟสำหรับการสื่อสารแบบไร้สายอย่างแพร่หลาย เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สาย (WLAN) ระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สาย (WMAN) เป็นต้น เนื่องจากความถี่ไมโครเวฟถูกแบ่งสเปกตรัมเพื่อประยุกต์ใช้งานกับระบบ การสื่อสารไร้สายแบบต่างๆ ทำให้ระบบการสื่อสารแบบไร้สายมีความต้องการใช้สเปกตรัมความถี่อย่างมีประสิทธิภาพ วงจรหลักในส่วนฟรอนต์เอนด์ (Front-Ends) ของระบบการสื่อสารไร้สายคือวงจรกรองความถี่ (Rui Zhang, 2009) โดยทำหน้าที่เลือกเฉพาะความถี่ที่ต้องการและขจัดความถี่ที่ไม่ต้องการ รวมทั้งจัดการมอดูเลตระหว่างกัน (Inter-Modulation) ของแถบสเปกตรัมระบบสื่อสารไร้สายด้วย (Sha Luo, 2008) ส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานสเปกตรัมความถี่ วงจรกรองความถี่ถูกใช้งานทั้งในสถานีฐาน (Base Station) ของระบบสถานีทวนสัญญาณและอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแบบพกพา ดังนั้นสายอากาศไมโครสตริปจึงเป็นสายอากาศชนิดหนึ่งที่สำคัญสำหรับระบบการสื่อสารแบบไร้สาย

การศึกษาในระดับอุดมศึกษา ในหลักสูตรสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าได้บรรจุวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ โดยที่ลักษณะรายวิชามีเนื้อหาที่มุ่งเน้นถึงการคำนวณ การวิเคราะห์และการออกแบบวงจรไมโครเวฟ เช่น วงจรเรโซแนนท์ วงจรกรองความถี่ วงจรแบ่งกำลังงาน วงจรคัปเปิลเลอร์ วงจรออสซิลเลเตอร์ วงจรขยาย เป็นต้น ซึ่งเป็นพื้นฐานของการสร้างสายอากาศไมโครสตริป พื้นฐานของวงจรกรองความถี่ไมโครเวฟคือวงจรเรโซแนนท์ที่ถูกประยุกต์ใช้ในวงจรคัปเปิลเลอร์ ออสซิลเลเตอร์ และวงจรขยาย (David M. Pozar, 2004) ดังนั้นหากนักเรียนมีความรู้เรื่องการคำนวณ การวิเคราะห์ และการออกแบบวงจรแล้ว สามารถนำความรู้ไปเชื่อมโยงกับการออกแบบและสร้างสายอากาศไมโครสตริปได้ การเรียนการสอนเนื้อหาบางส่วนของสายอากาศไมโครสตริปนักศึกษาต้องเข้าใจปรากฏการณ์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นในวงจร แต่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสิ่งที่มองไม่เห็นนักศึกษาต้องใช้จินตนาการในการรับรู้ปรากฏการณ์ สอดคล้องกับงานวิจัยของสมมาตร และสมศักดิ์ (Sommart Kamkleing, Somsak Akatimagool, 2008) ได้ทำการวิจัยโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีการวนรอบของคลื่น (Wave Iterative Method) สำหรับการศึกษาการสร้างสายอากาศไมโครสตริปที่สามารถปฏิสัมพันธ์ตอบโต้กับนักเรียนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางการเรียนวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และการสื่อสารได้รับการพัฒนาก้าวหน้ามากและถูกนำมาบูรณาการเป็นเทคโนโลยีเพื่อการศึกษา และสนับสนุนส่งเสริมให้นักเรียนมีความรู้ มีทักษะเพิ่มมากขึ้น (ดุสิต ขาวเหลือง, 2549)

จากการสอบถามกลุ่มตัวอย่างที่เป็นนักเรียนซึ่งผ่านการเรียนวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์เทเวศร์ จำนวน 24 คน โดยใช้แบบสอบถามความคิดเห็นพบว่า ความสำคัญของรายวิชานี้อยู่ในระดับมาก ปัญหาด้านเนื้อหาวิชา คือ เนื้อหาวิชาซับซ้อนเข้าใจยากและปริมาณของเนื้อหาดีมาก ปัญหาด้านสื่อประกอบการเรียนการสอน คือ สื่อการ

สอนไม่หลากหลาย มีจำนวนไม่เพียงพอต่อนักเรียน และไม่สะดวกต่อการใช้งาน โดยมีนักเรียนจำนวนมากกว่า 50% เห็นควรให้มีการพัฒนาสื่อการสอน ซึ่งเมื่อสอบถามถึงการจัดลำดับความสำคัญเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยของความต้องการให้พัฒนาสื่อประเภทต่างๆ พบว่า ควรพัฒนาสื่อแบบชุดสาธิต การนำเสนอเพาเวอร์พอยต์ โปรแกรมจำลอง บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน และตำรา/เอกสารประกอบการเรียน ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 1-1



ภาพที่ 1 ความต้องการของนักเรียนต่อการพัฒนาสื่อการเรียนการสอน

อีกทั้งยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ ศรีณัฐชุตติ และสมศักดิ์ อรรคทิมากุล (2552) ได้ทำการศึกษาสภาพการเรียนการสอนวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟในปัจจุบันโดยใช้แบบสอบถามและบทสัมภาษณ์ความคิดเห็นจากอาจารย์ผู้สอน จำนวน 10 คน และนักเรียนจำนวน 40 คน ในด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง พบว่า ความสำคัญและความจำเป็นในการเรียนวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟมีความต้องการอยู่ในระดับมากที่สุด และสิ่งที่ต้องการพัฒนาในรายวิชาคือด้านสื่อการเรียนการสอนที่มีความต้องการอยู่ในระดับมาก และจากข้อมูลวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์เทเวศร์ ปีการศึกษา 2550 นักเรียนจำนวน 18 คน มีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนโดยเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 63.4 และปีการศึกษา 2551 นักเรียนจำนวน 39 คน มีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนโดยเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 58.7 และปีการศึกษา 2552 นักเรียนจำนวน 26 คน มีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนโดยเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 61.3 ซึ่งพบว่าผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ปานกลางค่อนข้างต่ำ

จากความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญในการหาแนวทางและวิธีการแก้ปัญหา โดยการพัฒนาชุดสื่อประสม (Multimedia Package) เรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม เพื่อให้การจัดกิจกรรมการเรียนการสอนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะทำให้นักเรียนมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนที่ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม
2. เพื่อเปรียบเทียบผลการเรียนของนักเรียนก่อนเรียนและหลังเรียนด้วยชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น
3. เพื่อศึกษาความพึงพอใจของนักเรียนที่มีต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริป แบ่งออกเป็น 3 หน่วย ดังนี้
 - หน่วยที่ 1 สายไมโครสตริป
 - หน่วยที่ 2 วงจรเรโซแนนท์
 - หน่วยที่ 3 วงจรกรองความถี่ไมโครเวฟ
2. ชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริป ประกอบด้วย สื่อการสอนแบบบรรยาย สื่อการสอนด้วยโปรแกรมเพาเวอร์พอยต์ สื่อการสอนด้วยใช้ชุดสาธิต และสื่อการสอนด้วยโปรแกรมจำลอง
3. ตัวแปรในการวิจัย
 - 3.1 ตัวแปรต้น ได้แก่ การสอนโดยใช้ชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริป รายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ
 - 3.2 ตัวแปรตาม ได้แก่ ผลการเรียนของนักเรียนและความพึงพอใจของนักเรียนที่มีต่อชุดการสอนแบบสื่อประสมที่พัฒนาขึ้น
4. ประชากรและกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย
 - 4.1 ประชากร คือ นักเรียนระดับปริญญาตรี หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
 - 4.2 กลุ่มตัวอย่าง คือ นักเรียนระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์เทเวศร์ ที่ลงทะเบียนเรียนรายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ ภาคการเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2558 จำนวน 15 คน ทำการสุ่มแบบเจาะจง (Purposive Sampling)

1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ชุดสื่อประสม หมายถึง การนำสื่อหลาย ๆ ประเภทมาใช้ร่วมกัน ทั้งวัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและ ประสิทธิภาพสูงสุดในการเรียนการสอน โดยการใช้สื่อแต่ละอย่างตามลำดับขั้นตอนของเนื้อหา และในปัจจุบันมีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้ร่วมด้วย เพื่อการผลิตหรือการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการเสนอข้อมูลทั้งตัวอักษร ภาพกราฟิก

ภาพถ่าย ภาพเคลื่อนไหว และเสียง เป็นต้น ซึ่งในการพัฒนาชุดสื่อประสมครั้งนี้ ประกอบด้วย คู่มือครู สื่อการสอน คู่มือนักเรียน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 คู่มือครู เป็นชุดเอกสารที่จัดเตรียมไว้สำหรับครูผู้สอนในการดำเนินกิจกรรมการเรียนการสอน ประกอบด้วย วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม การนำเข้าสู่บทเรียน ตารางปฏิบัติการ ใบเนื้อหา แบบร่างกระดาน และแบบทดสอบ

1.2 สื่อการสอน เป็นสื่อที่ใช้ประกอบการสอนร่วมกับเนื้อหาที่ได้จัดทำขึ้น เพื่อใช้อธิบายขยายความในเนื้อหา ช่วยให้นักเรียนสามารถทำความเข้าใจได้ง่ายและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

1.3 คู่มือนักเรียน เป็นชุดเอกสารที่จัดเตรียมไว้สำหรับนักเรียนเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอน ประกอบด้วย คำแนะนำการใช้งานของคู่มือ วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม ใบเนื้อหา และแบบทดสอบ และคำแนะนำการใช้งานชุดสาธิต

2. สายอากาศไมโครสตริป หมายถึง สายไมโครสตริป ประกอบด้วยฐานรอง (Substrate) ที่เป็นวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric) มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Relative Permittivity) ϵ_r และมีความหนา h วางบนระนาบกราวด์ และมีแถบตัวนำ (Conductor Strip) ที่มีความกว้าง W วางด้านบนของฐานรอง

3. รายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ หมายถึง รายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ รหัสวิชา 05-115-310 หลักสูตรคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (หลักสูตรใหม่ พ.ศ. 2550) แขนงวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. นักศึกษาหรือผู้ที่มีความสนใจเกี่ยวกับสายอากาศไมโครสตริป สามารถเข้าใจเนื้อหาที่ซับซ้อนได้ง่าย และมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟสูงขึ้น

2. อาจารย์ผู้สอนสามารถนำชุดสื่อประสมที่พัฒนาขึ้นนี้ ไปใช้ในการจัดการเรียนการสอนที่เกี่ยวข้องกับรายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟทางด้านโทรคมนาคม

บทที่ 2

ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

- 2.1 แนวคิดเกี่ยวกับชุดสื่อประสม
- 2.2 นวัตกรรมที่นำมาใช้การพัฒนาชุดสื่อประสม
- 2.3 การเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม
- 2.4 ความรู้ทางด้านสายอากาศไมโครสตริป
- 2.5 ทฤษฎีวงจรรีโซแนนท์
- 2.6 ทฤษฎีวงจรรองความถี่ไมโครเวฟ
- 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดเกี่ยวกับชุดสื่อประสม

1. ความหมายของสื่อประสม

สื่อประสม หรือบางที่เรียกว่า มัลติมีเดีย (Multimedia) มาจากคำว่า มัลติ (Multi) ซึ่งแปลว่า ความหลากหลาย และมีเดีย (Media) ซึ่งแปลว่า สื่อ

ระบบสื่อประสม คือ เป็นการทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์สามารถแสดงผลได้หลาย ๆ รูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นข้อความ กราฟิก ภาพเคลื่อนไหว และเสียง ซึ่งจะเป็นการรวมเอาวิชาการหลาย ๆ สาขามาประยุกต์เข้าด้วยกัน ปัจจุบันเป็นที่นิยมใช้ในงานด้านการศึกษาเป็นอย่างมาก ซึ่งเราเรียกกันว่า การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยสอน (Computer Assisted Instruction: CAI) ผู้เรียนสามารถเรียนได้ตามความสามารถของแต่ละบุคคลโดยจะมีการโต้ตอบกับเครื่องคอมพิวเตอร์ แสดงผลให้ผู้เรียนเห็นผ่านทางจอภาพที่สำคัญเทคโนโลยีนี้สามารถใช้สื่อประสมหลาย ๆ ชนิดเข้าด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นข้อความ กราฟิก ภาพเคลื่อนไหว หรือเสียง สื่อการเรียนรูปแบบนี้จึงสามารถสร้างแรงจูงใจในการเรียนมากขึ้น

กิดานันท์ มลิทอง (2543 : 267) ได้กล่าวไว้ว่าสื่อประสม หมายถึง การนำสื่อหลาย ๆ ประเภทมาใช้ร่วมกันทั้งวัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงสุดในการเรียนการสอน โดยการใช้สื่อแต่ละอย่าง ตามลำดับขั้นตอนของเนื้อหา และในปัจจุบันมีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้ร่วมด้วย เพื่อการผลิตหรือการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการเสนอข้อมูลทั้งตัวอักษร ภาพกราฟิก ภาพถ่าย ภาพเคลื่อนไหว แบบวีดิทัศน์และเสียง

ชัยยงค์ พรหมวงศ์ (2545 : 82) ได้กล่าวไว้ว่า สื่อประสม หมายถึง การนำเอาสื่อการสอนหลาย ๆ อย่างมาสัมพันธ์กันซึ่งมีคุณค่าที่ส่งเสริมซึ่งกันและกัน สื่อการสอนอย่างหนึ่งอาจใช้เพื่อเร้าความสนใจในขณะที่อีกอย่างหนึ่งใช้เพื่ออธิบายข้อเท็จจริงของเนื้อหา และอีกชนิดหนึ่งอาจใช้เพื่อก่อให้เกิดความเข้าใจที่ลึกซึ้ง และป้องกันการเข้าใจความหมายผิด การใช้สื่อประสมจะช่วยให้ผู้เรียนมีประสบการณ์จากประสาทสัมผัสผสมผสานกันได้พบวิธีการที่จะเรียนในสิ่งที่ต้องการได้ด้วยตนเองมากยิ่งขึ้น

สรุปได้ว่า สื่อประสม จึงหมายถึง การนำสื่อหลาย ๆ ประเภทมาใช้ร่วมกัน ทั้งวัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและ ประสิทธิภาพสูงสุดในการเรียนการสอน โดยการใช้สื่อแต่ละอย่างตามลำดับขั้นตอนของเนื้อหา และในปัจจุบันมีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้ร่วมด้วย เพื่อการผลิตหรือการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการเสนอข้อมูลทั้งตัวอักษร ภาพกราฟิก ภาพถ่าย ภาพเคลื่อนไหว และเสียง เป็นต้น

2. ประเภทของสื่อประสม

สื่อประสมแบ่งออกตามลักษณะการประสมสื่อ และคุณลักษณะการใช้ มี 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

2.1 ประสมสื่อที่เป็นวัสดุ อุปกรณ์และกระบวนการเข้าร่วมกันมาใช้สำหรับการเรียน การสอนปกติทั่ว ๆ ไป เช่น ชุดอุปกรณ์ ชุดการเรียนการสอน บทเรียนแบบโปรแกรม โปรแกรมสไลด์ ศูนย์การเรียน เป็นต้น สื่อประสมแต่ละชนิดที่จัดอยู่ในประเภทนี้มีหลักการและลักษณะเด่นแตกต่างกันออกไป คือ

ก) สามารถ ให้ผู้เรียนได้ประสบการณ์ด้วยตนเอง คือ มีส่วนร่วมในการกระทำหรือปฏิบัติกิจกรรมเป็นการเข้าใจแก่ผู้เรียน เช่น ศูนย์การเรียน บทเรียนโปรแกรม ชุดอุปกรณ์ เป็นต้น

ข) สามารถให้ผู้เรียนได้เรียนรู้ตามความรู้ความสามารถ และความแตกต่างของแต่ละบุคคล เช่น บทเรียนโปรแกรม ชุดการเรียน เป็นต้น

ค) สามารถให้ผู้เรียนใช้เรียนด้วยตนเองหรือใช้เมื่อขาดครูได้ เช่น บทเรียนแบบโปรแกรม ชุดการเรียนรายบุคคล เป็นต้น

ง) สามารถให้ผู้เรียนได้รับผลตอบกลับทันที และได้รับความรู้สึกภาคภูมิใจ ในความสำเร็จ เช่น ศูนย์การเรียน การสอนแบบจุลภาค เป็นต้น

จ) สามารถใช้ประกอบการศึกษาทางไกลให้ดา เนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ชุดการเรียนทางไกลสำหรับการศึกษาเพื่อมวลชน เป็นต้น

ฉ) สามารถใช้ส่งเสริมสมรรถภาพของครู เช่น ชุดการเรียนประกอบคำบรรยาย เป็นต้น

ช) สามารถให้ผู้เรียนได้ฝึกความรับผิดชอบและการทำ งานเป็นกลุ่ม เช่น ศูนย์การเรียน กลุ่มสัมพันธ์ เป็นต้น

2.2 ประสมสื่อประเภทฉาย เป็นการประสมโดยมีข้อจำกัดที่ความสามารถและคุณสมบัติเฉพาะตัวของอุปกรณ์เครื่องฉายเป็นสำคัญ เช่น สไลด์ประกอบเสียงและวีดิทัศน์ประกอบเสียง สไลด์และแผ่นโปร่งใส วีดิโออิมเมจ เป็นต้น และฉายบนจอตั้งแต่ 2 จอขึ้นไป เป็นการฉายกับผู้ชมเป็นกลุ่มสื่อประสมประเภทฉายนี้ สามารถใช้ประกอบการศึกษาและการเรียนการสอนโดยเฉพาะสำหรับผู้เรียนที่ขอการเรียนรู้จากการอ่านภาพ การเสนอด้วยสื่อประเภทฉายนี้แม้ว่าในบางครั้งราคาการผลิตอาจจะสูงและการผลิตซับซ้อนกว่าการผลิตสื่อประสมบางชนิดในประเภทแรก แต่ผลที่ได้รับจากการเสนอด้วยสื่อประสมประเภทฉายให้ผลตรงที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่สื่ออื่นไม่สามารถทำได้คือ ผลในความรู้สึกอารมณ์และสุนทรียภาพแก่ผู้ชม ทั้งยังช่วยดึงดูดความสนใจให้ผู้ชมได้ติดตามอย่างตั้งใจ

ตาตื่นใจและมีประสิทธิภาพเป็นการช่วยในการเรียนการสอน สื่อประสมประเภทนี้มีคุณสมบัติเหมาะแก่การนำมาใช้ในการเรียนการสอน ได้แก่

ก) ใช้เมื่อสื่อมีการเปรียบเทียบความคล้ายคลึงกัน เป็นการง่ายสำหรับผู้เรียน ในการสังเกตและเรียนรู้สิ่งที่คล้ายคลึงกันจากสื่อต่าง ๆ เมื่อภาพของสิ่งนั้น ๆ ปรากฏบนจอพร้อมกัน

ข) ใช้สอนให้เห็นความแตกต่าง และการตัดกันเมื่อภาพหลาย ๆ ภาพ ปรากฏพร้อม ๆ กัน

ค) ใช้มองสิ่งหนึ่งสิ่งใดจากมุมที่ต่างกัน เช่น ภาพสถานที่หรืออาคารสถานที่ โดยภาพปรากฏพร้อมกันจากการมองในแง่มุมที่ต่างกัน

ง) ใช้แสดงภาพซึ่งดำเนินเป็นขั้นตอน และสามารถเลียนแบบการเคลื่อนไหวได้

จ) ใช้แสดงสิ่งที่เกิดขึ้นตามลำดับก่อนหลัง เกิดความต่อเนื่องที่ดีมีความสัมพันธ์กันระหว่างภาพและเวลา ประกอบกับการจัดภาพและจอให้มีขนาดต่างกันเป็นการง่ายต่อการจดจำ

ฉ) ใช้เน้นจุดใดจุดหนึ่งโดยตรงได้ โดยการกำหนดจุดสนใจที่ต้องการให้อยู่ในตำแหน่งและรูปแบบที่ต่างกันหรืออาจทำโดยใช้ภาพที่ซ้ำ ๆ กับปรากฏบนจอพร้อม ๆ กัน

ช) ใช้ยืดเวลาการเสนอจุดหรือส่วนที่สำคัญของเนื้อหา เช่น บางครั้งภาพที่สำคัญสามารถปรากฏอยู่บนจอต่อไปขณะที่รายละเอียดหรือส่วนที่เกี่ยวข้องได้เปลี่ยนไปในจอถัดไป

ซ) ใช้แสดงการเคลื่อนไหว โดยใช้หลักการฉายภาพนิ่งหลาย ๆ ภาพ ต่อเนื่องกันอย่างรวดเร็วหรือใช้ความสามารถของวีดิทัศน์

ฌ) ใช้รวมสื่อภาพนิ่ง สไลด์ และวีดิทัศน์ ในขณะที่แสดงภาพนิ่งอาจจะมีการฉายวีดิทัศน์ประกอบบนจอถัดไป

ญ) ใช้แสดงภาพที่เห็นได้กว้าง (Panorama) บนจอที่ติดกัน

ฎ) ลักษณะพิเศษประการสุดท้ายที่เด่นของสื่อประสมประเภทนี้ คือ สามารถแสดงเนื้อหาได้มากในระยะเวลาที่จำกัด ลักษณะพิเศษนี้ผู้สอนอาจใช้สื่อประสมนี้ในการทำเป็นบทนำหรือบทสรุปได้

2.3 สื่อประสมระบบการสื่อสารกับเทคโนโลยีสารสนเทศโดยการใช้คอมพิวเตอร์ร่วมกับอุปกรณ์อื่น เช่น เครื่องเล่นซีดี - รอม เครื่องเสียงระบบดิจิตอล เครื่องเล่นแผ่นวีดิทัศน์ เป็นต้น เพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถทำงานคำนวณค้นหาข้อมูล แสดงภาพวีดิทัศน์และมีเสียงต่าง ๆ การทำงานของสื่อหลาย ๆ อย่างในสื่อประสมประกอบด้วยการทำงานของระบบเสียง (Sound) ภาพเคลื่อนไหว (Animation) ภาพนิ่ง (Still Images) วีดิทัศน์ (Video) และไฮเปอร์เท็กซ์ (Hypertext) ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในไฮเปอร์เท็กซ์จะแสดงเนื้อหาหลักของเรื่องราวที่กำลังอ่านขณะนั้นโดยเน้นเนื้อหา ถ้าคำใดสามารถเชื่อมจากจุดหนึ่งในเนื้อหาไปยังเนื้อหาอื่นได้ก็จะทำเป็นตัวหนาหรือขีดเส้นใต้ไว้ เมื่อผู้ใช้หรือผู้อ่านต้องการจะดูเนื้อหา ก็สามารถคลิกไปยังข้อมูลหรือคำเหล่านั้นเพื่อเรียกมาดูรายละเอียดของเนื้อหาได้

สื่อประสมในลักษณะนี้นับว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่ กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เพราะเป็นเทคโนโลยีที่ทำให้เราสามารถใช้อุปกรณ์ในการแสดงข้อมูลได้หลากหลายรูปแบบ ดังนั้น สื่อประสมจะต้องมีคุณสมบัติสำคัญประการหนึ่ง คือ ความสามารถในการโต้ตอบ (Interactivity) อุปกรณ์ที่ตอบสนองความสามารถนี้ก็คือคอมพิวเตอร์นั่นเอง

3. ความจำเป็นและบทบาทของสื่อประสม

สื่อประสมมีความจำเป็นในการเสนอเนื้อหาแตกต่างกันด้วยสื่อที่ต่างกัน โดยถือหลักว่าสื่อ แต่ละประเภท “ มีดี ” เป็นอย่าง ๆ ไป ดังนั้นเพียงซอส์กับกระดานดำจึงเป็นสื่อสอนเนื้อหาทุกเรื่อง ไม่ได้สื่อประสมจึงมีบทบาทพอสรุปได้ดังนี้

1. ช่วยให้ผู้เรียนสามารถเรียนรู้เนื้อหาต่าง ๆ ได้ดีเกือบทุกเรื่องจากแหล่งหลาย ๆ แหล่ง โดยถือว่าสื่อแต่ละอย่างมีเนื้อหาต่างกัน

2. ช่วยประหยัดเวลาทั้งผู้สอนและผู้เรียน

3. ช่วยให้นักเรียนทั้งเก่งและอ่อนได้รับความรู้ตามความสามารถ และความพร้อมของแต่ละบุคคล

แนวทางการเลือกใช้สื่อการสอนชนิดต่าง ๆ สามารถจำแนกให้ผู้สอนได้เห็นและเลือกใช้ได้ ดังนี้ (กฤษมันต์ วัฒนาณรงค์, 2548 : 47)

1. หนังสือ ตำราเรียน เอกสาร หรือ สิ่งพิมพ์อื่น ๆ ใช้เพื่อให้ความรู้พื้นฐาน อ้างอิงและ แนวทางต่าง ๆ

2. กระดานดำ ใช้เพื่อเขียนหัวข้อเรื่องคำจำกัดความ ข้อสรุปต่าง ๆ ที่เหมือนจริงแต่ไม่สามารถนำของจริงมาศึกษาได้

3. แผ่นภาพ, แผ่นพลิก ใช้เมื่อต้องการเน้น การนำเสนอเนื้อหาที่เป็นภาพรวม ๆ และดึงดูดความสนใจของผู้เรียนมารวมที่รูปภาพ

4. แผ่นโปร่งใส มีเหตุผลในการเลือกใช้ คือ แสดงรูปภาพที่ซับซ้อนเป็นขั้นตอน

5. โมเดลพลาสติกมีคุณลักษณะพิเศษ จะพิจารณาเลือกใช้เมื่อต้องการแสดงหลักการทำงานของชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวได้และกระตุ้นให้ผู้เรียนมีกิจกรรมร่วม

6. ภาพสไลด์ มีเหตุผลในการเลือกใช้คือเสนอภาพนิ่งขนาดใหญ่ ให้ผู้เรียนได้เห็นพร้อมกัน ทั้ง

7. ภาพยนตร์, วีดิทัศน์ ใช้เมื่อต้องการสร้างความประทับใจ แสดงกระบวนการขั้นตอนต่อเนื่องเสริมประสบการณ์ ผู้เรียนให้กว้างขวางออกไปยิ่งขึ้น

8. หุ่นจำลอง เพื่อแสดงให้เห็นโครงสร้างและความสัมพันธ์เกี่ยวข้องต่าง ๆ ที่เหมือนจริง แต่ไม่สามารถนำของจริงมาให้ศึกษาได้

9. ชุดทดลองให้ผู้เรียน เรียนเป็นรายบุคคล หรือ เป็นกลุ่มได้ต้องการฝึกทักษะ

10. ของจริงใช้เพื่อให้ผู้เรียนได้ประสบการณ์ตรงจากของจริงนั้น ๆ

2.2 นวัตกรรมที่นำมาใช้การพัฒนาชุดสื่อประสม

สื่อประสมเป็นเครื่องมือการสื่อสารที่มีความสำคัญในการสร้างฐานความรู้ (Knowledge Base) เพื่อให้ นักศึกษาสามารถเข้าถึง สืบค้นและแลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์ได้อย่างสะดวก

กว้างขวาง และลุ่มลึกตามความสามารถ ความสนใจของนักศึกษาแต่ละคน การพัฒนาชุดสื่อประสม จำเป็นต้องมีแนวทางการดำเนินการ เพื่อให้การวางแผน การเตรียมการ การผลิตและการทดสอบ ประสิทธิภาพสื่อแต่ละประเภทที่เป็นองค์ประกอบสื่อประสมมีคุณภาพตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้

ขั้นตอนการผลิตสื่อประสมประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 10 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นที่ 1 ศึกษาธรรมชาติวิชา เป็นการพิจารณาคูณลักษณะเนื้อหาวิชา เพื่อให้ทราบขอบข่าย เนื้อหาสาระว่า มุ่งเน้นด้านความรู้ (พุทธิพิสัย) ทักษะคตินิยม (จิตพิสัย) หรือความชำนาญ (ทักษะพิสัย) เพื่อเป็นพื้นฐานในการกำหนดวิธีการถ่ายทอด กิจกรรมการเรียนการสอน และสื่อการเรียนการสอน การกำหนดสภาพแวดล้อม และเงื่อนไขอื่นที่จำเป็นสำหรับการออกแบบการเรียนการสอนที่มีประสิทธิภาพ

ขั้นที่ 2 วิเคราะห์ผู้เรียน เป็นการวิเคราะห์คุณลักษณะนักศึกษาในส่วนที่เกี่ยวกับลักษณะนิสัย พื้นความรู้เดิมที่จำเป็นในการเรียนวิชาที่กำลังผลิตชุดสื่อประสม ระดับสติปัญญา ความสามารถในการศึกษาด้วยตนเอง ความพร้อมในด้านอุปกรณ์การเรียนการสอน และทัศนคติที่มีต่อสาขาวิชาที่เรียน

ขั้นที่ 3 วิเคราะห์เนื้อหาและกำหนดหน่วยการสอน เป็นการนำรายละเอียดวิชา (Course Description) มาจำแนกเนื้อหาสาระเป็นเรื่องย่อยด้วยการเขียนแผนผังแนวคิด (Concept Mapping) กำหนดหน่วยการสอน เป็น 12 หน่วย และนำเนื้อหาแต่ละหน่วยมาจำแนกเป็น 3 - 5 โมดูลและจำแนกเนื้อหาของแต่ละโมดูลเป็น 2 - 6 หัวเรื่อง

ขั้นที่ 4 วางแผนการสอน เป็นการนำเนื้อหาแต่ละหน่วยมากำหนดรายละเอียดสำหรับการถ่ายทอด และการเขียนแผนการสอน

4.1 การกำหนดรายละเอียดการสอน ครอบคลุมการพิจารณาและกำหนดรายละเอียดในประเด็นต่อไปนี้

4.1.1 แนวคิด (Concept) หรือสารสรุป (Synopsis) โดยเขียนข้อความที่แสดงแก่นเพื่อสรุปประเด็นของเนื้อหาของแต่ละโมดูลหรือหัวเรื่อง ที่บรรจุคำหลัก (Key Words) ไว้ครบถ้วน แสดงข้อความที่เป็นแนวคิดให้สอดคล้องกับคำหลักที่ปรากฏในชื่อโมดูลและหัวเรื่องและมีจำนวนข้อเท่ากับจำนวนโมดูลหรือจำนวนหัวเรื่อง

4.1.2 วัตถุประสงค์ (Objectives) โดยกำหนดเป็นวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

4.1.3 ขั้นตอนการสอนและกิจกรรมการเรียน โดยกำหนดสิ่งที่ผู้สอนและนักศึกษาต้องทำในการสอนแต่ละครั้ง เริ่มตั้งแต่เริ่มต้นสอนจนกระทั่งการสอนสิ้นสุดลง

4.1.4 สื่อการสอนและแหล่งวิทยาการ (Instructional Media and Resources) โดยกำหนดสื่อที่ผู้สอน/ นักศึกษา ต้องใช้ และระบุแหล่งสื่อที่นักศึกษาจะค้นหาได้

4.1.5 การประเมิน (Evaluation) โดยระบุรูปแบบ ขอบข่ายพฤติกรรม วิธีการเครื่องมือ และเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษา รูปแบบการประเมิน ให้ระบุว่าประเมินอะไรบ้าง อาทิ การประเมินก่อนเรียน ระหว่างเรียน ประเมินงาน และประเมินหลังเรียน ขอบข่ายพฤติกรรม ให้ระบุว่า จะมุ่งประเมินพุทธิพิสัย (Cognitive Domain) จิตพิสัย (Affective Domain) หรือทักษะพิสัย (Psycho-Motor Skills) ในส่วนของพุทธิพิสัย ก็ต้องกำหนดว่า จะมุ่งประเมินพฤติกรรมระดับใดจากระดับความรู้ ความจำ การประยุกต์ การวิเคราะห์ สังเคราะห์

หรือการประเมิน ในด้านจิตพิสัยต้องระบุว่า จะประเมินการยอมรับ ทักษะคิด ค่านิยม หรือสภาวะจิต ภาพอื่นๆ ส่วนด้านทักษะพิสัยก็ต้องระบุว่า จะประเมินทักษะทางกาย ทักษะทางสติปัญญา หรือ ทักษะด้านอื่น ๆ วิธีการให้ระบุวิธีการที่ใช้ในการประเมินว่า จะเป็นการประเมินด้วยการสอบ หรือ การพิจารณาผลงาน หรือทั้งสองอย่าง หรือการประเมินจากกิจกรรมกลุ่ม ในกรณีที่เป็นการสอบ ต้อง ระบุวิธีการสอบ ว่ามีการสอบกลางภาค และการสอบไล่ เป็นการสอบข้อเขียนแบบปรนัย หรืออัตนัย หรือเป็นการเปิดตำราสอบ (Open Book Examination)

การประเมินจากผลงาน ต้องระบุประเภทงาน (Assignments) องค์กรประกอบ การกิจ และกำหนดเวลาส่ง ในกรณีที่เป็นการประเมินจากกิจกรรมกลุ่มต้องระบุว่า จะประเมินจาก การมีส่วนร่วม (Participation-P) การเสนอความเห็นที่เป็นประโยชน์ (Contribution-C) และผลงาน ที่ได้ (Results-R) เครื่องมือ ให้ระบุประเภท และคุณลักษณะที่พึงประสงค์ของเครื่องมือที่จะใช้ใน การประเมิน อาทิ ข้อสอบ แบบสังเกตแบบประเมินความคิดเห็น และเครื่องมือทางสถิติที่จะนำมาใช้ ในการวิเคราะห์ และตัดสินผลเกณฑ์ ให้ระบุระดับผ่านต่ำสุดที่พึงพอใจในการประเมินแต่ละ ประเภท โดยกำหนดคะแนนที่ให้แต่ละงาน สัดส่วนระหว่างคะแนนการทำงาน กับคะแนนสอบ เป็น ต้น

4.2 เขียนแผนการสอน เมื่อกำหนดรายละเอียดตามข้อ 4.1 แล้ว ก็เขียนแผนการ สอน 2 ระดับ คือแผนการสอนประจำหน่วย และแผนการสอนประจำโมดูล โดยแผนการสอนแต่ละ ประเภท มีองค์ประกอบตามหัวข้อที่ได้อธิบายไว้ใน 4.1

ขั้นที่ 5 กำหนดแนวทางพัฒนาสื่อประสม เป็นการพิจารณาประเภท รูปแบบ และทัศน ลักษณะของสื่อสำหรับทั้งวิชา

ขั้นที่ 6 ทำการผลิตชุดสื่อประสม เป็นการกำหนดรายละเอียดที่ให้พร้อมสำหรับการผลิตสื่อ แต่ละประเภท โดยดำเนินการตาม 4 ขั้นตอน คือ การวางแผนการผลิต การเตรียมการผลิต ดำเนินการผลิต และประเมินประสิทธิภาพสื่อเฉพาะ การวางแผนผลิตสื่อ ต้องกำหนดประเภทและ รูปแบบสื่อวัตถุประสงค์ เป้าหมายผู้รับ ประเด็น สารสรุป ขั้นตอน การผลิต ทรัพยากรที่จำเป็น และ แนวทางการประเมิน การเตรียมการผลิต เป็นการนำวัตถุดิบมากระทำให้อยู่ในสภาพที่จะผลิตได้ ได้แก่ การเตรียมเนื้อหาตามประเด็น การเขียนแผนผังรายการ บท (Script) หรือโครงร่างสังเขป เตรียมบุคลากร ฉาก สิ่งอำนวยความสะดวก และสื่อโสตทัศน เช่น การผลิตภาพประกอบ เป็นต้น การ ดำเนินการผลิต เป็นขั้นนำแผนการผลิตสื่อและสิ่งที่ได้เตรียมการไว้แล้วมาผลิตเป็นสื่อสำเร็จรูปตาม แผนที่กำหนดไว้ การประเมินประสิทธิภาพสื่อ เป็นการนำสื่อแต่ละประเภทมาทดสอบประสิทธิภาพ เพื่อให้แน่ใจว่า สื่อนั้นมีคุณภาพและทำให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ได้จริง ในการประเมินประสิทธิภาพสื่อ จำเป็นจะต้องกำหนดวิธีการ สร้างเครื่องมือ และเกณฑ์ การประเมิน เพื่อให้การประเมินได้ผลที่เที่ยงตรงและนำไปใช้ได้

ขั้นที่ 7 ทดสอบประสิทธิภาพชุดสื่อประสม เป็นการนำสื่อประสมแต่ละชิ้นมารวมเป็นชุดสื่อ ประสม และจัดไว้ในรูปชุดการสอน เพื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพ (Developmental Testing) ที่ ครอบคลุมการทดลองใช้เบื้องต้น (Try Out) และ การทดลองใช้จริง (Trial Run) ทั้งนี้ต้องมี การ กำหนดเกณฑ์และสร้างเครื่องมือที่มีคุณภาพ

ขั้นที่ 8 ปรับปรุงชุดสื่อประสม เป็นการนำสื่อแต่ละขั้นที่รวมเป็นชุดการสอนไร้พรมแดน มาปรับปรุงโดยคำนึงถึงความสัมพันธ์กับสื่ออื่นในภาพรวม

ขั้นที่ 9 นำเสนอชุดสื่อประสม เป็นการนำชุดการสอนที่ประกอบด้วยชุดสื่อประสมและส่วนควบ (คู่มือ เอกสารประกอบ แบบฝึกปฏิบัติ แบบทดสอบ ฯลฯ) ไปใช้ในการสอนจริงในแต่ละภาคการศึกษา

ขั้นที่ 10 ประเมินชุดสื่อประสม เป็นการประเมินผลการใช้ชุดการสอนไร้พรมแดนในภาพรวม หลังจากใช้ชุดไปได้ระยะหนึ่ง หรือช่วงเวลาหนึ่ง ผลที่ได้จากการประเมินสามารถนำไปปรับปรุงชุดการสอนประจำวิชา และการปรับปรุงระบบการผลิตสื่อในภาพรวมด้วย

สรุปได้ว่า สื่อประสม จึงหมายถึง การนำสื่อหลาย ๆ ประเภทมาใช้ร่วมกัน ทั้งวัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและ ประสิทธิผลสูงสุดในการเรียนการสอน โดยการใช้สื่อแต่ละอย่างตามลำดับขั้นตอนของเนื้อหา และในปัจจุบันมีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้ร่วมด้วย เพื่อการผลิตหรือการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการเสนอข้อมูลทั้งตัวอักษร ภาพกราฟิก ภาพถ่าย ภาพเคลื่อนไหว และเสียง เป็นต้น

2.3 การเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม

เป็นวิชาการด้านวิศวกรรมที่เกิดจากการรวบรวมองค์ความรู้ทางวิศวกรรมไฟฟ้า และวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์เพื่อเสริมสร้างระบบการสื่อสารโทรคมนาคมที่เป็นองค์ความรู้เฉพาะทาง วิศวกรรมโทรคมนาคม ทำให้เกิดมีทรัพยากรคลื่นวิทยุ (Radio Wave) กลายเป็นทรัพยากรของมนุษย์โลกที่มีค่าประเมินไม่ได้เกิดขึ้นจากงานวิศวกรรมโทรคมนาคม และเปลี่ยนแปลงสังคมมนุษย์อย่างกว้างขวาง กลายเป็นคลื่นลูกที่สามของการเปลี่ยนแปลงสังคมมนุษย์โลก (Third Wave Concept) และการขับเคลื่อนของระบบเศรษฐกิจของประเทศใด ๆ ล้วนขึ้นอยู่กับ เครือข่ายโทรคมนาคม (Network) รายวิชาเกี่ยวกับวิศวกรรมไมโครเวฟ เป็นรายวิชาหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการจัดการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม ซึ่งเป็นพื้นฐานในการต่อยอดงานโทรคมนาคมในปัจจุบัน

คำอธิบายรายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ รหัสวิชา 05-115-310 หลักสูตรคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (หลักสูตรใหม่ พ.ศ. 2550) แขนงวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร โดยมีลักษณะรายวิชาดังนี้

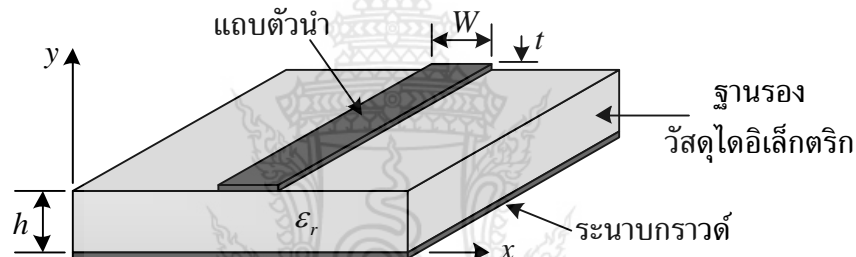
1. รหัสและชื่อวิชา รหัส 05-115-310 วิศวกรรมไมโครเวฟ (Microwave Engineering)
2. สภาพรายวิชา วิชาซีพีเลือก กลุ่มวิชาซีพีหมวดวิชาเฉพาะสาขา
3. พื้นฐาน 05-115-309 คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
4. เวลาศึกษา 64 คาบเรียน ตลอด 15 สัปดาห์ ทฤษฎี 2 คาบ ปฏิบัติ 2 คาบ ต่อสัปดาห์ และผู้เรียนนักศึกษาต้องใช้เวลาศึกษาค้นคว้านอกเวลา 5 ชั่วโมงต่อสัปดาห์
5. จำนวนหน่วยกิต 3(2-2-5) หน่วยกิต
6. คำอธิบายรายวิชา

ศึกษาและปฏิบัติการเกี่ยวกับ ทบทวนสมการแมกซ์เวลล์และเงื่อนไขขอบเขตสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทฤษฎีสายส่ง สายส่งไมโครเวฟและท่อนำคลื่น การวิเคราะห์วงจรโครงข่ายไมโครเวฟ การใช้ งานสมิทชาร์ท การแมตซ์อิมพีแดนซ์ เรโซเนเตอร์ไมโครเวฟ ตัวแบ่งกำลังและไดเรกชันนัลคัปเปอร์ วงจรกรองไมโครเวฟ วงจรขยายและวงจรถอดสวิตเลเตอร์ไมโครเวฟ ระบบการสื่อสารไมโครเวฟ

2.4 ความรู้ทางด้านสายอากาศไมโครสตริป

2.4.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของสายไมโครสตริป

สายไมโครสตริปมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2 (ก) ประกอบด้วยฐานรอง (Substrate) ที่เป็นวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric) มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Relative Permittivity) ϵ_r และมีความหนา h วางบนระนาบกราวด์ และมีแถบตัวนำ (Conductor Strip) ที่มีความกว้าง W วางด้านบนของฐานรอง โดยทั่วไปแล้วความหนา t ของแถบตัวนำมีค่าน้อยมากจึงถูกประมาณว่าไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของไมโครสตริป



(ก) โครงสร้างไมโครสตริป



(ข) การเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในภาคตัดขวางของสายไมโครสตริป

ภาพที่ 2 โครงสร้างสายไมโครสตริปและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เนื่องจากโครงสร้างของสายไมโครสตริปประกอบด้วยสองตัวกลางคือ ตัวกลางไดอิเล็กตริกในบริเวณ $0 < y \leq h$ และตัวกลางอากาศในบริเวณด้านบนบนฐานรองไดอิเล็กตริก $y > h$ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบางส่วนในไมโครสตริปอยู่ในอากาศ ในขณะที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่อยู่ในชั้นฐานรอง ไดอิเล็กตริก ดังแสดงในภาพที่ 2 (ข) ดังนั้นคลื่นในไมโครสตริปจึงไม่ใช่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electromagnetic Wave) ที่แท้จริง เนื่องจากเกิดสนามในส่วนประกอบตามยาว (Longitudinal Component) ของสาย อย่างไรก็ตาม ส่วนสนามในประกอบตามยาวมีขนาดน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับสนามในส่วนประกอบตามขวาง (Transverse Component) จึงประมาณได้ว่าคลื่นในไมโครสตริปเป็นคลื่นกึ่งตามขวาง (Quasi-TEM) และใช้วิธีวิเคราะห์หาค่า

ความเร็วเฟส (Phase Velocity) ค่าคงตัวการแพร่กระจาย (Propagation Constant) และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) ด้วยกระบวนการแบบสนามสถิต

การรวมผลของสนามในอากาศและในไดอิเล็กทริกจึงกำหนดค่าคงตัวไดอิเล็กทริกประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant) ϵ_e เพื่อให้ตัวกลางในไมโครสตริปมีเพียงตัวกลางเดียวหรือมีตัวกลางเป็นเนื้อเดียวตลอด ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยค่าคงตัวไดอิเล็กทริกประสิทธิผลมีนิยามดังนี้

$$\epsilon_e = \frac{C_d}{C_a}$$

เมื่อ C_d คือความจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของตัวกลางทั้งหมดในไมโครสตริปเป็นไดอิเล็กทริกและ C_a คือความจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของตัวกลางทั้งหมดในไมโครสตริปเป็นอากาศ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกประสิทธิผลประมาณค่าได้จากสมการ (2-1)

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \left[\left(\frac{\epsilon_r - 1}{2} \right) \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} \right] \quad (2-1)$$

เมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กทริกประสิทธิผลจะมีค่าอยู่ระหว่างค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของอากาศและค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของฐานรองไดอิเล็กทริก

$$1 < \epsilon_e < \epsilon_r$$

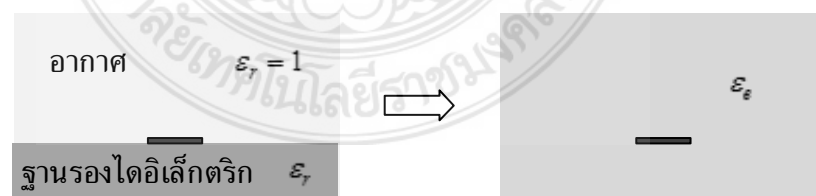
ความเร็วเฟสของคลื่นในไมโครสตริป คำนวณได้จากสมการ (2-2)

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (\text{m/sec}) \quad (2-2)$$

ความยาวคลื่นในไมโครสตริปคำนวณได้จากสมการ (2-3)

$$\lambda_g = \frac{v_p}{f} = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_e}} \quad (\text{m}) \quad (2-3)$$

เมื่อ c เป็นความเร็วของแสงในอวกาศว่างมีค่า 3×10^8 เมตรต่อวินาที และ f เป็นความถี่ใช้งาน



ภาพที่ 3 ประสิทธิภาพค่าคงตัวไดอิเล็กทริก

สำหรับค่าคงตัวการแพร่กระจายของคลื่นในไมโครสตริปคำนวณได้จากสมการ (2-4)

$$\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_e} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (2-4)$$

เมื่อ k_0 คือ ค่าคงตัวการแพร่กระจายของคลื่นในอวกาศว่าง คำนวณได้จากสมการ (2-5)

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = \frac{2\pi f}{c} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (2-5)$$

กรณีที่ความหนา t ของตัวนำมีขนาดน้อยมาก ($t \ll h$) แล้วถ้ากำหนดขนาดโครงสร้างของไมโครสตริปแล้วอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Z_0) คำนวณได้จากสมการ (2-6)

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln\left(\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h}\right) & \text{สำหรับ } W/h \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e} [W/h + 1.393 + 0.667 \ln(W/h + 1.444)]} & \text{สำหรับ } W/h \geq 1 \end{cases} \quad (2-6)$$

แต่ในทางปฏิบัติผู้ใช้จำเป็นต้องออกแบบไมโครสตริปให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ต้องการตามข้อมูลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ผู้ผลิตกำหนด เช่น ความหนา h ของฐานรอง ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ_r และค่าแทนเจนต์การสูญเสีย เป็นต้น การคำนวณความกว้างแถบตัวนำ W เพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_0 ตามที่ต้องการ คำนวณได้จากสมการ (2-7)

$$\frac{W}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \text{สำหรับ } W/h < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & \text{สำหรับ } W/h > 2 \end{cases} \quad (2-7)$$

เมื่อ

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (2-8ก)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2-8ข)$$

การเลือกใช้สมการ (2-7) อันดับแรกต้องสมมติก่อนว่า อัตราส่วนความกว้างแถบต่อความหนาของฐานรอง (W/h) น้อยกว่าหรือมากกว่า 2 ถ้าสมมติว่าอัตราส่วน W/h น้อยกว่า 2 ให้คำนวณหาค่า A จากสมการ (2-8ก) แล้วนำไปแทนในสมการ (2-7) เพื่อคำนวณหาอัตราส่วน W/h หากพบว่าอัตราส่วน W/h น้อยกว่า 2 ตามที่สมมติไว้ให้คำนวณหาความกว้างแถบ W ถ้าอัตราส่วน W/h มากกว่า 2 ซึ่งไม่ตรงกับที่สมมติไว้ ต้องคำนวณหาค่า B จากสมการ (2-8ข) หลังจากนั้นคำนวณหาความกว้างแถบ W ได้จากสมการ (2-7) ที่มีตัวประกอบ B

2.4.2 การลดทอนในไมโครสตริป

การลดทอนกำลังในไมโครสตริปเกิดจากการสูญเสียกำลังของสัญญาณในวัสดุโครงสร้างของไมโครสตริป นั่นคือ การสูญเสียกำลังในฐานรองไดอิเล็กตริก และการสูญเสียกำลังในตัวนำ

$$\alpha = \alpha_d + \alpha_c$$

เมื่อ α คือ การลดทอนโดยรวมในไมโครสตริป

α_d คือ การลดทอนเนื่องจากการสูญเสียกำลังในฐานรองไดอิเล็กตริก

α_c คือ การลดทอนเนื่องจากการสูญเสียกำลังในตัวนำ

การลดทอนในฐานรองไดอิเล็กตริกคำนวณได้จากสมการ (2-9)

$$\alpha_d = \frac{k_0 \epsilon_r (\epsilon_e - 1) \tan \delta}{2\sqrt{\epsilon_e} (\epsilon_r - 1)} \quad (\text{Np/m}) \quad (2-9)$$

เมื่อ $\tan \delta$ คือ แทนเจนต์การสูญเสีย (Loss tangent) ของวัสดุไดอิเล็กตริกที่ผู้ผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ทำการทดสอบและระบุในแผ่นข้อมูลมาให้ และการลดทอนในตัวนำคำนวณได้จากสมการ (2-10)

$$\alpha_c = \frac{R_s}{Z_0 W} \quad (\text{Np/m}) \quad (2-10)$$

เมื่อ R_s เป็นความต้านทานผิวของตัวนำและคำนวณได้จากสมการ (2-11)

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} = \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\sigma}} \quad (\Omega) \quad (2-11)$$

เมื่อ σ เป็นค่าสภาพนำทางไฟฟ้า (Conductivity) ของตัวนำ การลดทอนสามารถแสดงในหน่วยเดซิเบล(dB/m)ได้โดยการใช้สูตรการแปลงจากหน่วยเนเปอร์ (Np/m) ดังนี้

$$\alpha(\text{dB}) = -20 \log e^{-\alpha} \quad (\text{dB/m}) \quad (2-12)$$

2.5 ทฤษฎีวงจรเรโซแนนท์ (Resonant Circuits)

วงจรเรโซแนนท์ถูกนำไปใช้ในวงจร และงานด้านต่างๆ เช่น วงจรกรองความถี่ วงจรออสซิลเลเตอร์ เครื่องวัดค่าความถี่ วงจรขยายสัญญาณ เป็นต้น หลักการทำงานของวงจรเรโซแนนท์ในงานความถี่ไมโครเวฟ มีความคล้ายกันกับวงจรเรโซแนนท์อุปกรณ์แบบลัมป์ (Lumped-element) ดังนั้น อันดับแรกจะอธิบายวงจรเรโซแนนท์ที่ใช้อุปกรณ์ RLC ถัดไปจะอธิบายการสร้างวงจรเรโซแนนท์ในงานความถี่ไมโครเวฟโดยใช้อุปกรณ์แบบกระจาย (Distributed-element)

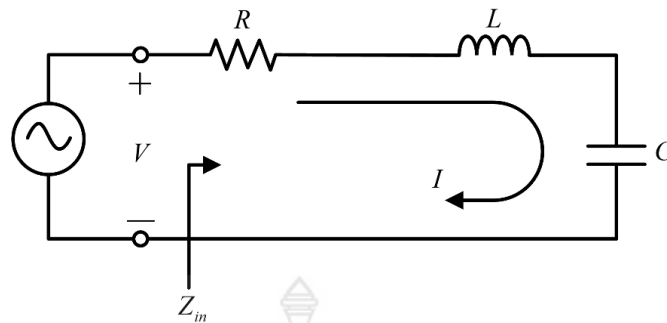
2.5.1 คุณสมบัติของวงจรเรโซแนนท์ (Properties of Resonant Circuits)

บริเวณใกล้กับความถี่เรโซแนนท์ของวงจรเรโซแนนท์ที่ใช้งานย่านความถี่ไมโครเวฟจะถูกแทนด้วยวงจรเทียบเคียง ในรูปแบบวงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรม RLC หรือ วงจรเรโซแนนท์แบบขนาน RLC ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงคุณสมบัติพื้นฐานของวงจรเรโซแนนท์ทั้งสอง

2.5.1.1 วงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรม (Series Resonant Circuit)

วงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรม RLC ดังแสดงดังภาพที่ 4 โดยมีอิมพีแดนซ์ที่อินพุตของวงจร คือ

$$Z_{in} = R + j\omega L - j \frac{1}{\omega C} \quad (2-13)$$



ภาพที่ 4 วงจรอนุกรม RLC

และกำลังงานเชิงซ้อนที่ป้อนให้กับวงจรเรโซแนนซ์เป็นดังนี้

$$P_{in} = P_{loss} + 2j\omega(W_m - W_e) \quad (2-14)$$

และอิมพีแดนซ์ที่อินพุตในสมการ (2-1) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$Z_{in} = \frac{2P_{in}}{|I|^2} = \frac{P_{loss} + 2j\omega(W_m - W_e)}{|I|^2 / 2} \quad (2-15)$$

สภาวะเรโซแนนซ์เกิดขึ้นเมื่อพลังงานแม่เหล็กเฉลี่ยสะสมเท่ากับพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยสะสมหรือ $W_m = W_e$ สามารถเขียนอิมพีแดนซ์ที่อินพุตที่สภาวะเรโซแนนซ์ ได้ดังนี้

$$Z_{in} = \frac{P_{loss}}{|I|^2 / 2} = R \quad (2-16)$$

แสดงให้เห็นว่าที่สภาวะเรโซแนนซ์ อิมพีแดนซ์ที่อินพุตมีเฉพาะส่วนจริง ความถี่เรโซแนนซ์ ω_0 สามารถนิยามได้ดังนี้

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2-17)$$

ค่า Q ของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม คำนวณได้ดังนี้

$$Q = \omega_0 \frac{2W_m}{P_{loss}} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} \quad (2-18)$$

แสดงให้เห็นว่า ค่า Q เพิ่มขึ้นเมื่อค่า R ลดลง อิมพีแดนซ์ที่อินพุตของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ตามสมการ (2-13) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$Z_{in} = R + j\omega L \left(1 - \frac{1}{\omega^2 LC} \right) \quad (2-19)$$

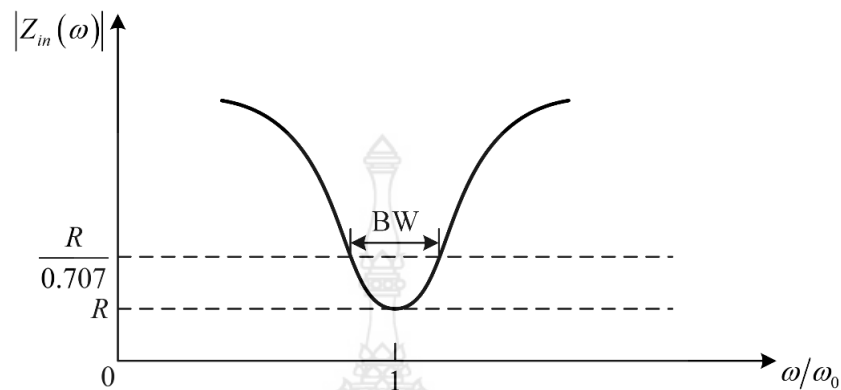
จากสมการ(2-17) $\omega_0^2 = 1/LC$ แทนในสมการ (2-19) จะได้

$$Z_{in} = R + j\omega L \left(\frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega^2} \right) \quad (2-20)$$

ที่บริเวณความถี่ใกล้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ เมื่อ $\Delta\omega$ มีค่าน้อยมาก

$$\begin{aligned} Z_{in} &\approx R + j2L\Delta\omega \\ &\approx R + j \frac{2RQ\Delta\omega}{\omega_0} \end{aligned} \quad (2-21)$$

รูปแบบของสมการ (2-21) จะถูกใช้เป็นวงจรถียบเคียงให้กับเรโซเนเตอร์ที่ใช้อุปกรณ์แบบกระจาย



ภาพที่ 5 ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่อินพุตเทียบกับความถี่ของวงจรถียบเคียงแบบอนุกรม

โดยการหาขนาดกำลังสองของสมการ (2-20) แล้วจัดให้ $|Z_{in}|^2 = 2R^2$ จะได้

$$|R + jRQ(BW)|^2 = 2R^2$$

หรือ

$$BW = \frac{1}{Q} \quad (2-22)$$

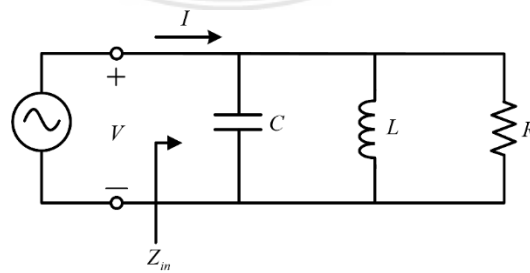
2.6.1.2 วงจรถียบเคียงแบบขนาน (Parallel Resonant Circuit)

วงจรถียบเคียงแบบขนานอุปกรณ์ลิมป์ RLC แสดงดังภาพที่ 2-6 โดยมีอิมพีแดนซ์ที่อินพุตของวงจรเป็นดังนี้

$$Z_{in} = \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \right)^{-1} \quad (2-23)$$

และกำลังงานเชิงซ้อนที่จ่ายให้กับวงจรถียบเคียงเป็นดังนี้

$$P_{in} = P_{loss} + 2j\omega(W_m - W_e) \quad (2-24)$$



ภาพที่ 6 วงจรขนาน RLC

เขียนอิมพีแดนซ์ที่อินพุตของวงจรได้ดังนี้

$$Z_{in} = \frac{2P_{in}}{|I|^2} = \frac{P_{loss} + 2j\omega(W_m + W_e)}{|I|^2/2} \quad (2-25)$$

สภาวะเรโซแนนซ์เกิดเมื่อ $W_m = W_e$ จะได้ อิมพีแดนซ์ที่อินพุต ณ ความถี่เรโซแนนซ์เป็นดังนี้

$$Z_{in} = \frac{P_{loss}}{|I|^2/2} = R$$

ความถี่เรโซแนนซ์ ω_0 จะนิยามได้ดังนี้

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2-26)$$

ค่า Q ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานเป็นดังนี้

$$Q = \omega_0 \frac{2W_m}{P_{loss}} = \frac{R}{\omega_0 L} = \omega_0 RC \quad (2-27)$$

แสดงให้เห็นว่า ค่า Q ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่า R เพิ่มขึ้น อิมพีแดนซ์ที่อินพุตที่บริเวณใกล้กับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน คือ

$$Z_{in} = \frac{R}{1 + 2jQ\Delta\omega/\omega_0} \quad (2-28)$$

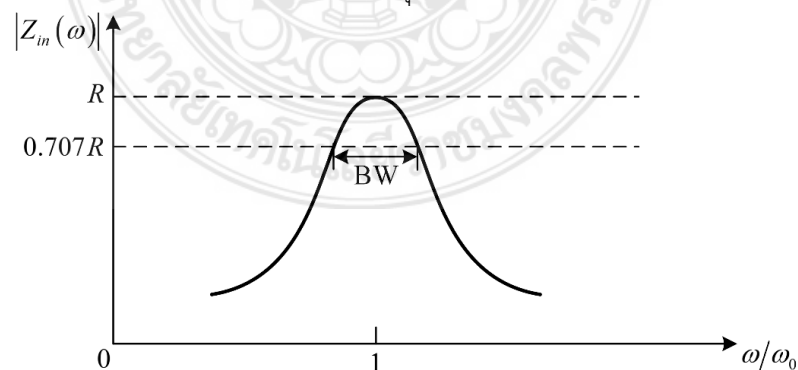
ภาพที่ 7 แสดงขนาดของอิมพีแดนซ์ที่อินพุตเปรียบเทียบกับความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน ขอบของแบนด์วิดท์ครึ่งกำลังเกิดขึ้นที่ความถี่ $(\Delta\omega/\omega_0 = BW/2)$ ที่ทำให้กำลังสองของอิมพีแดนซ์ที่อินพุตมีค่าดังนี้

$$|Z_{in}|^2 = \frac{R^2}{2} \quad (2-29)$$

อัตราส่วนแบนด์วิดท์และค่า Q มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$BW = \frac{1}{Q} \quad (2-30)$$

ซึ่งเหมือนกับกรณีของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม



ภาพที่ 7 ขนาดของอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

2.5.2 เรโซเนเตอร์แบบสายส่ง (Transmission Line Resonators)

อุปกรณ์แบบลัมปีไม่นิยมนำมาใช้งานที่ความถี่ไมโครเวฟ เนื่องจากมีค่าตัวประกอบคุณภาพ(ค่า Q)ต่ำหรือมีการสูญเสียกำลังงานในตัวอุปกรณ์สูง ดังนั้น อุปกรณ์แบบกระจายจึงถูกนำมาใช้งานแทน ในหัวข้อนี้จะอธิบายการใช้สายส่งที่มีความยาวต่างๆ และถูกต่อปลายด้วยการเปิดวงจรและการลัดวงจรเพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ และเพื่อให้อธิบายถึงค่า Q ของเรโซเนเตอร์ได้ด้วย ดังนั้นสายส่งที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้จึงเป็นสายส่งที่มีการสูญเสีย (Lossy transmission lines)

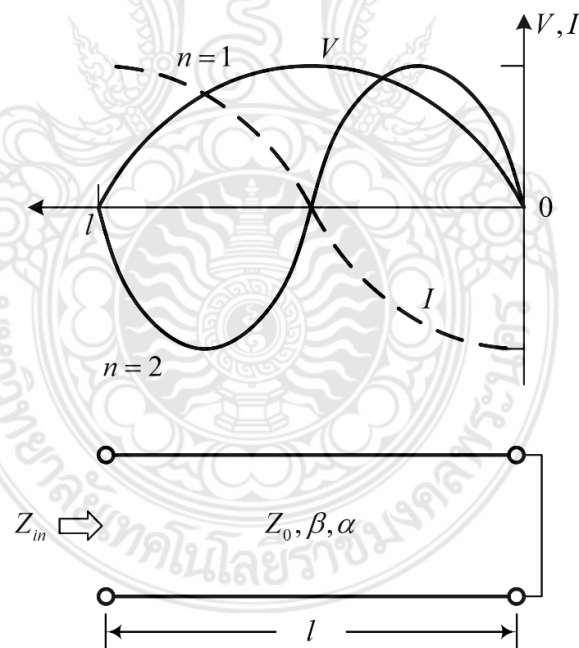
2.5.2.1 สายส่งยาว $\lambda/2$ แบบลัดวงจร (Short-Circuited $\lambda/2$ line)

สายส่งที่มีการสูญเสียความยาวจำกัดที่ปลายด้านหนึ่งถูกลัดวงจรแสดงดังภาพที่ 5 กำหนดให้สายมีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ Z_0 มีค่าคงตัวการแพร่กระจายคือ β และมีค่าคงตัวการลดทอนคือ α โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์ $\omega = \omega_0$ ความยาวของสายคือ $l = \lambda/2$ เมื่อ $\lambda = 2\pi/\beta$ จากสมการอิมพีแดนซ์ที่อินพุตของสายส่งที่มีการสูญเสียใดๆ

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh \gamma l}{Z_0 + Z_L \tanh \gamma l} \quad (2-31)$$

สายส่งที่ปลายลัดวงจร จะได้อิมพีแดนซ์ที่อินพุต ดังนี้

$$Z_{in} = Z_0 \tanh(\alpha + j\beta)l$$



ภาพที่ 8 สายส่งที่มีการสูญเสียแบบลัดวงจร และการกระจายแรงดัน(เส้นทึบ)และกระแส (เส้นประ) บนเรโซเนเตอร์สำหรับ $n=1$ ($l = \lambda/2$) และ $n=2$ ($l = \lambda$)

หรือ

$$Z_{in} = Z_0 \frac{\tanh(\alpha l) + j \tan(\beta l)}{1 + j \tan(\beta l) \tanh(\alpha l)} \quad (2-32)$$

ถ้าสายส่งไม่มีการสูญเสีย ($\alpha = 0$) แล้วสมการ (2-32) จะลดรูปเหลือ $Z_{in} = jZ_0 \tan \beta l$ แต่ในทางปฏิบัติสายส่งมีการสูญเสียค่าต่ำอยู่ค่าหนึ่งเสมอ จึงกำหนดได้ว่า $\alpha \ll 1$ ดังนั้น $\tanh(\alpha l) \approx \alpha l$ และที่ตำแหน่งความถี่ใกล้กับความถี่เรโซแนนท์ $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ เมื่อ $\Delta\omega$ มีค่าน้อยจะได้

$$\beta l = \frac{\omega l}{v_p} = \frac{\omega_0 l}{v_p} + \frac{\Delta\omega l}{v_p} \quad (2-33)$$

เมื่อ v_p เป็นความเร็วเฟส (Phase Velocity) ของคลื่นในสายส่ง ที่ความถี่เรโซแนนท์ $\omega = \omega_0$ จะได้ $l = \frac{\lambda}{2} = \frac{\pi v_p}{\omega_0}$ และเขียนสมการ (2-34) ใหม่ได้ดังนี้

$$\beta l = \frac{\omega_0}{v_p} \frac{\pi v_p}{\omega_0} + \frac{\Delta\omega}{v_p} \frac{\pi v_p}{\omega_0} = \pi + \frac{\Delta\omega \pi}{\omega_0} \quad (2-34)$$

ดังนั้น สมการอิมพีแดนซ์ที่อินพุตในสมการ (2-32) สามารถประมาณค่าได้ดังนี้

$$Z_{in} \approx Z_0 \frac{\alpha l + j(\Delta\omega \pi / \omega_0)}{1 + j(\Delta\omega \pi / \omega_0) \alpha l}$$

เนื่องจาก $\Delta\omega \pi / \omega_0 \ll 1$ ดังนั้น

$$Z_{in} \approx Z_0 \left(\alpha l + j \frac{\Delta\omega \pi}{\omega_0} \right) \quad (2-35)$$

เปรียบเทียบสมการ (2-35) กับรูปแบบของสมการ (2-21)

$$Z_{in} = R + 2jL\Delta\omega$$

ซึ่งเป็นอิมพีแดนซ์ที่อินพุตของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม RLC จะได้ค่าความต้านทานในวงจรเทียบเคียงเป็นดังนี้

$$R = Z_0 \alpha l \quad (2-36ก)$$

ค่าความเหนี่ยวนำในวงจรเทียบเคียงมีค่าดังนี้

$$L = \frac{Z_0 \pi}{2\omega_0} \quad (2-36ข)$$

และค่าความจุในวงจรเทียบเคียงหาได้จากสมการ (2-17)

$$C = \frac{1}{\omega_0^2 L} \quad (2-36ค)$$

การกระจายแรงดันบนเรโซเนเตอร์สำหรับโหมดเรโซแนนท์ $n=1$ และ $n=2$ แสดงดังภาพที่

5

ค่า Q ของเรโซเนเตอร์หาได้จากสมการ (2-18) และ (2-36) เป็นดังนี้

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{\pi}{2\alpha l}$$

และที่สภาวะเกิดเรโซแนนซ์ครั้งแรก $\beta l = \pi$ หรือ $\frac{\pi}{l} = \beta$ ดังนั้น

$$Q = \frac{\beta}{2\alpha}$$

2.5.2.2 สายส่งยาว $\lambda/4$ แบบลัดวงจร (Short-Circuited $\lambda/4$ line)

เรโซเนเตอร์ยาว l และปลายสายด้านหนึ่งถูกลัดวงจรแสดงดังภาพที่ 2-9 อิมพีแดนซ์ที่อินพุตหาได้จากสมการ (2-31) โดยการแทน $Z_L \rightarrow 0$ จะได้

$$\begin{aligned} Z_{in} &= Z_0 \tanh(\alpha + j\beta)l \\ &= Z_0 \frac{\tanh(\alpha l) + j \tan(\beta l)}{1 + j \tan(\beta l) \tanh(\alpha l)} \end{aligned}$$

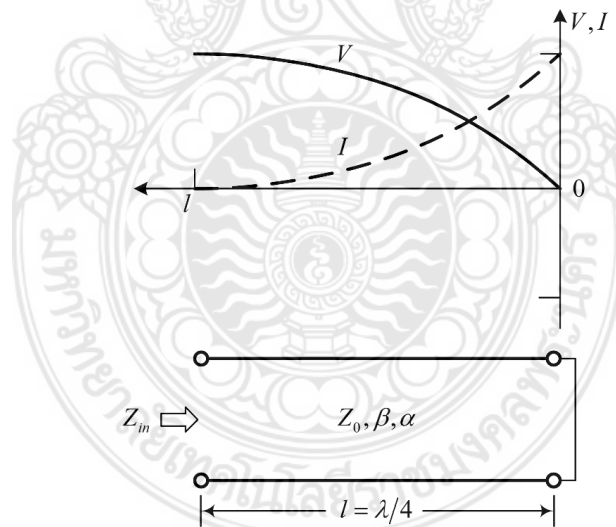
โดยการคูณทั้งเศษและส่วนด้วย $-j \cot \beta l$ จะได้

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 - j \tanh(\alpha l) \cot(\beta l)}{\tanh(\alpha l) - j \cot(\beta l)} \quad (2-37)$$

สมมติว่า $l = \lambda/4$ ที่ความถี่เรโซแนนท์ $\omega = \omega_0$ และกำหนดให้ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนท์ $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ จะได้

$$\beta l = \frac{\omega_0 l}{v_p} + \frac{\Delta\omega l}{v_p} = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi\Delta\omega}{2\omega_0} \quad (2-38)$$

ดังนั้น



ภาพที่ 9 สายส่งมีการสูญเสียปลายแบบลัดวงจรยาว $\lambda/4$ และการกระจายแรงดัน(เส้นทึบ) และกระแส(เส้นประ)บนเรโซเนเตอร์

$$\cot \beta l = \cot\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi\Delta\omega}{2\omega_0}\right) = -\tan \frac{\pi\Delta\omega}{2\omega_0} \approx \frac{-\pi\Delta\omega}{2\omega_0} \quad (2-39)$$

ถ้าสายส่งมีการสูญเสียเล็กน้อยมากจะได้ $\tanh \alpha l \approx \alpha l$ สมการ (2-37) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + j\alpha l \pi \Delta \omega / 2\omega_0}{\alpha l + j\pi \Delta \omega / 2\omega_0}$$

เนื่องจาก $\alpha l \pi \Delta \omega / 2\omega_0 \ll 1$ สมการอิมพีแดนซ์ที่อินพุตจึงลดรูปเป็น

$$Z_{in} \approx \frac{Z_0}{\alpha l + j\pi \Delta \omega / 2\omega_0} \quad (2-40)$$

โดยการเปรียบเทียบสมการ (2-40) กับสมการ(2-28) ที่แสดงอิมพีแดนซ์ที่อินพุตของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน RLC

$$Z_{in} = \frac{1}{(1/R) + 2j\Delta\omega C}$$

โดยการเปรียบเทียบทั้งสองสมการ ค่าความต้านทานในวงจรเทียบเคียง คือ

$$R = \frac{Z_0}{\alpha l} \quad (2-41)$$

ค่าความจุในวงจรเทียบเคียงมีค่าดังนี้

$$C = \frac{\pi}{4\omega_0 Z_0} \quad (2-42)$$

และค่าความเหนี่ยวนำในวงจรเทียบเคียงมีค่าดังนี้

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C} \quad (2-43)$$

ดังนั้นสายส่งยาว $\lambda/4$ ปลายสายถูกัดวงจรจึงแสดงคุณสมบัติเป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานที่มีอิมพีแดนซ์ที่อินพุต ๓ ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ $Z_{in} = R = Z_0 / \alpha l$ โดยการแทนสมการ (2-41) และ (2-42) ในสมการ (2-27) จะได้ค่า Q ของเรโซเนเตอร์ดังนี้

$$Q = \omega_0 RC = \frac{\pi}{4\alpha l} = \frac{\beta}{2\alpha} \quad (2-44)$$

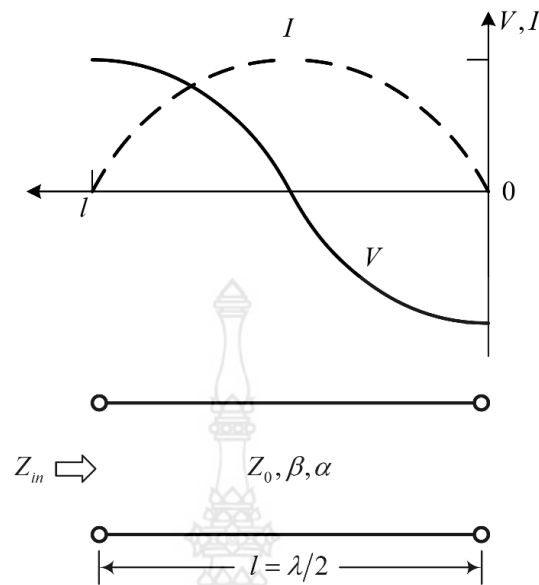
2.5.3 สายส่งยาว $\lambda/2$ แบบเปิดวงจร (Open-Circuited $\lambda/2$ Line)

เรโซเนเตอร์ในทางปฏิบัติที่นิยมใช้ในวงจรไมโครสตริปจะเป็นสายส่งแบบปลายด้านหนึ่งถูกเปิดวงจร ดังแสดงในภาพที่ 2-10 อิมพีแดนซ์ที่อินพุตของสายส่งยาว l แบบเปิดวงจรหาได้จาก

$$Z_{in} = Z_0 \coth(\alpha + j\beta)l = Z_0 \frac{1 + j \tan(\beta l) \tanh(\alpha l)}{\tanh(\alpha l) + j \tan(\beta l)} \quad (2-45)$$

สมมติว่าสายส่งยาว $l = \lambda/2$ ที่ความถี่เรโซแนนซ์ $\omega = \omega_0$ และโดยการกำหนดความถี่ใกล้เคียงค่าความถี่เรโซแนนซ์ คือ $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ จะได้

$$\beta l = \pi + \frac{\pi \Delta \omega}{\omega_0}$$



ภาพที่ 10 สายส่งมีการสูญเสียปลายแบบเปิดวงจรยาว $\lambda/2$ และการกระจายแรงดัน(เส้นทึบ) และกระแส(เส้นประ)บนเรโซเนเตอร์

และ

$$\tan \beta l = \tan \frac{\Delta\omega\pi}{\omega} \approx \frac{\Delta\omega\pi}{\omega_0}$$

และ $\tanh(\alpha l) \approx \alpha l$

สมการ (2-45) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$Z_{in} = \frac{Z_0}{\alpha l + j(\Delta\omega\pi/\omega_0)} \quad (2-46)$$

อิมพีแดนซ์ที่อินพุตในสมการ (2-46) มีรูปแบบเหมือนกับอิมพีแดนซ์ที่อินพุตของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานในสมการ (2-28) โดยการเปรียบเทียบทั้งสองสมการจะได้ค่าความต้านทานของวงจรเทียบเคียงมีค่าดังนี้

$$R = \frac{Z_0}{\alpha l} \quad (2-47ก)$$

ค่าความจุของวงจรเทียบเคียงมีค่าดังนี้

$$C = \frac{\pi}{2\omega_0 Z_0} \quad (2-47ข)$$

และค่าความเหนี่ยวนำของวงจรเทียบเคียงมีค่าดังนี้

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C} \quad (2-47ค)$$

ค่า Q ของเรโซเนเตอร์หาได้โดยการแทนสมการ (2-47) ลงในสมการ (2-27)

$$Q = \omega_0 RC = \frac{\pi}{2\alpha l} \quad (2-48)$$

และเนื่องจากที่ความถี่เรโซแนนท์ $l = \pi/\beta$ ดังนั้น

$$Q = \frac{\beta}{2\alpha} \quad (2-49)$$

2.5.3 เรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริป

การออกแบบวงจรความถี่ที่ภายในวงจรประกอบด้วยวงจรเรโซแนนท์ทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน โดยจำนวนวงจรเรโซแนนท์จะเท่ากับจำนวนอันดับของวงจรกรอง ในทางปฏิบัติวงจรเรโซแนนท์ในวงจรของวงจรกรองจะถูกแปลงให้เหลือเพียงแบบเดียว กล่าวคือ แปลงให้วงจรกรองประกอบด้วยเฉพาะวงจรเรโซแนนท์แบบขนานเพียงแบบเดียว หรือ แปลงให้วงจรกรองประกอบด้วยเฉพาะวงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรมเพียงแบบเดียวเพื่อลดขั้นตอนในการออกแบบวงจรกรอง สำหรับวงจรกรองที่สร้างบนโครงสร้างแบบไมโครสตริปแล้ว วงจรเรโซแนนท์ทั้งหมดจะถูกแทนด้วยเรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปที่มีความถี่เรโซแนนท์ที่ความถี่ใช้งาน

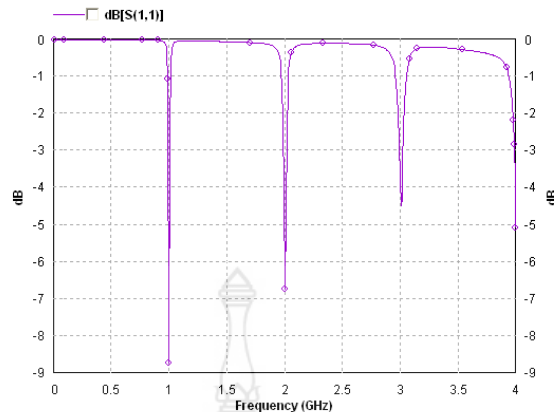
2.5.3.1 เรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปปลายเปิดวงจรมิยาว $\lambda_g/2$

เรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปที่ยาว $\lambda_g/2$ มีคุณสมบัติเหมือนกับวงจรเรโซแนนท์แบบขนาน LC การกระจายแรงดันบนเรโซเนเตอร์จะเกิดขนาดแรงดันสูงสุดที่ปลายเปิดวงจรทั้งสองด้านและมีขนาดแรงดันต่ำสุดที่กึ่งกลางความยาวของเรโซเนเตอร์ สอดคล้องกับการกระจายกระแสบนเรโซเนเตอร์ที่เกิดขนาดสูงสุดที่ปลายทั้งสองด้านและขนาดกระแสต่ำสุดที่กึ่งกลางเรโซเนเตอร์ ภาพที่ 11 (ก) แสดงเรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปปลายเปิดวงจรมิยาว $\lambda_g/2 = 70 \text{ mm}$ ที่ความถี่เรโซแนนท์ 1 GHz บนแผ่นวงจรพิมพ์ RT/Duroid 6006 มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 6.15 และมีฐานรองหนา 1.27 mm โดยค่าความถี่เรโซแนนท์สังเกตได้จากผลตอบสนองการลดทอนเนื่องจากการย้อนกลับ กล่าวคือ การลดทอนเนื่องจากการย้อนกลับจะมีค่าต่ำที่ความถี่เรโซแนนท์ 1 GHz ดังแสดงในภาพที่ 11 (ข) เรโซเนเตอร์ยาว $\lambda_g/2$ จะเกิดความถี่ปลอมเทียมที่ 1 (first spurious resonant frequency) ที่ความถี่ $2f_0$ เมื่อ f_0 เป็นความถี่เรโซแนนท์มูลฐาน (fundamental resonant frequency) ในที่นี้ $f_0 = 1 \text{ GHz}$ สำหรับผลการจำลองการกระจายกระแสที่ความถี่เรโซแนนท์ด้วยโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้า IE3D แสดงดังภาพที่ 11 (ค)



(ก) เรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปปลายเปิดวงจรมิยาว $\lambda_g/2 = 70 \text{ mm}$ มิลลิเมตร

ภาพที่ 11 การจำลองไมโครสตริปยาว $\lambda_g/2$ บนแผ่นวงจรพิมพ์ RT/Duroid 6006 ด้วยโปรแกรม IE3D



(ข) การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ความถี่เรโซแนนท์

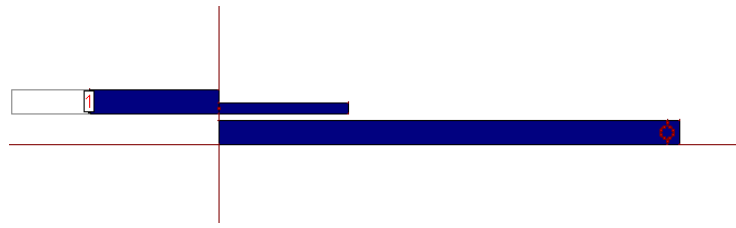


(ค) การกระจายกระแสไฟฟ้าบนเรโซเนเตอร์

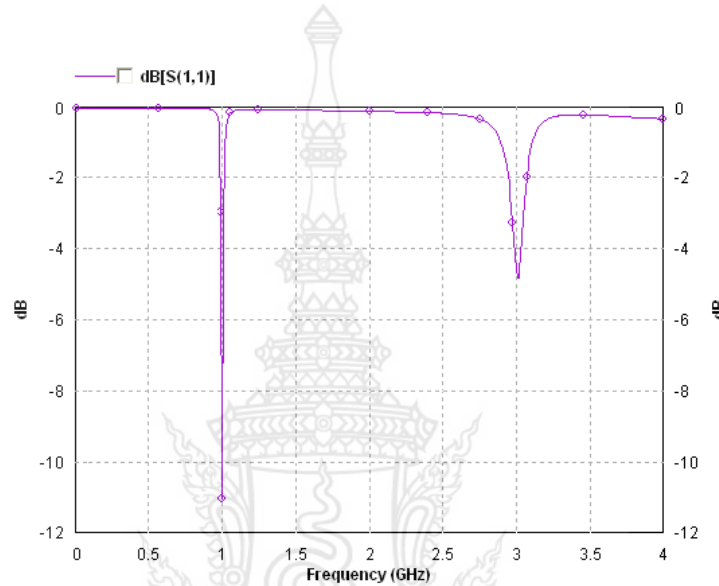
ภาพที่ 11 (ต่อ)

2.5.3.2 เรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปปลายลัดวงจรที่ยาว $\lambda_g/4$

เรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปปลายลัดวงจรที่ยาว $\lambda_g/4$ มีวงจรเทียบเคียงเป็นวงจรเรโซแนนท์แบบขนาน LC เหมือนกับไมโครสตริปปลายเปิดวงจรยาว $\lambda_g/2$ หากเปรียบเทียบเรโซเนเตอร์ทั้งสองแบบจะพบว่า เรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปปลายเปิดวงจรยาว $\lambda_g/2$ มีความยาวเป็นสองเท่า หรือมีขนาดวงจรมากกว่า 2 เท่า แต่หากพิจารณาในด้านการสร้างแล้ว เรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปปลายลัดวงจรที่ยาว $\lambda_g/4$ สร้างได้ยากกว่า เนื่องจากต้องมีการเวียโฮล (Via hole) เพื่อลัดวงจรปลายเรโซเนเตอร์ลงระนาบกราวด์ ภาพที่ 12 (ก) แสดงเรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปปลายลัดวงจรที่ยาว $\lambda_g/4 = 35 \text{ mm}$ ที่ความถี่เรโซแนนท์ 1 GHz บนแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดเดียวกับหัวข้อ 2.3.1 ภาพที่ 12 (ข) แสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของเรโซเนเตอร์ ซึ่งเกิดเรโซแนนท์ที่ความถี่ $f_0 = 1 \text{ GHz}$ และเกิดความถี่เรโซแนนท์ปลอมที่ 1 ที่ความถี่ $3f_0$ ภาพที่ 12 (ค) แสดงการกระจายกระแสบนเรโซเนเตอร์ โดยมีขนาดกระแสสูงสุดที่ปลายด้านลัดวงจร และมีขนาดกระแสต่ำสุดที่ปลายอีกด้าน



(ก) เรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปปลายเปิดวงจรรยาว $\lambda_g/4 = 35$ mm มิลลิเมตร



(ข) การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ความถี่เรโซแนนท์

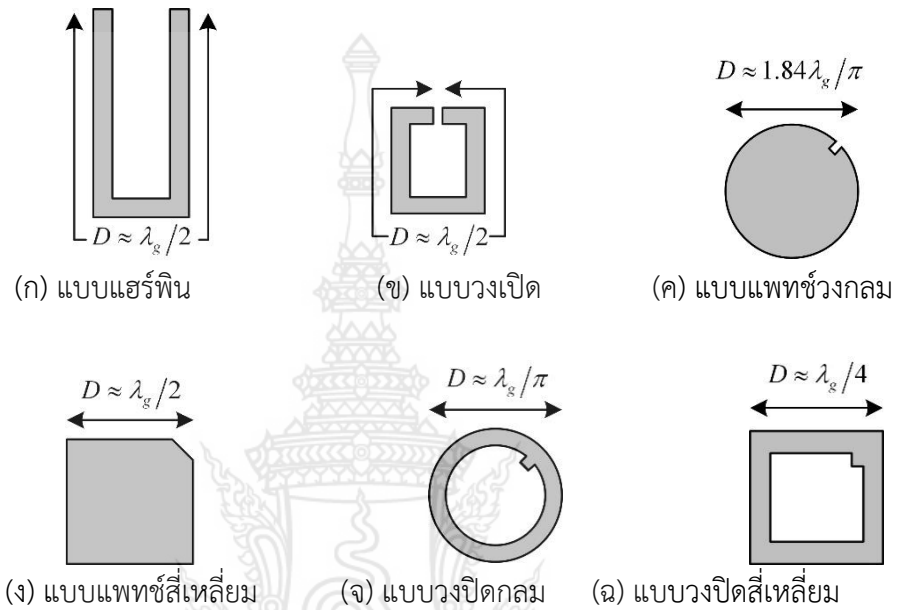


(ค) การกระจายกระแสไฟฟ้าบนเรโซเนเตอร์

ภาพที่ 12 การจำลองไมโครสตริปปยาว $\lambda_g/4$ บนแผ่นวงจรพิมพ์ RT/Duroid 6006 ด้วยโปรแกรม IE3D

นอกจากเรโซเนเตอร์ 2 แบบที่กล่าวมาข้างต้นมีรูปแบบเป็นแถบยาวตรง ในทางปฏิบัติยังมีเรโซเนเตอร์แบบอื่นที่นำมาสร้างวงจรกรอง ภาพที่ 13 แสดงเรโซเนเตอร์แบบต่างๆ โดยภาพที่ 13 (ก) เป็นเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปปแบบแฮร์พิน (microstrip hairpin resonator) เกิดจากการพับเรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปปลายเปิดวงจรรยาว $\lambda_g/2$ ภาพที่ 13 (ข) เป็นเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปปแบบวงเปิด (Microstrip Open-loop Resonator) ที่ได้จากการพับปลายทั้งสองด้านเข้าหากันของเรโซเนเตอร์แบบแฮร์พิน โดยให้เกิดช่องแคบระหว่างปลายทั้งสองด้าน บริเวณช่องแคบถูกเทียบเคียงได้ด้วยค่าความจุ หรือการเกิดฟลักซ์ไฟฟ้าระหว่างปลายทั้งสอง ส่งผลให้ความยาวของเร

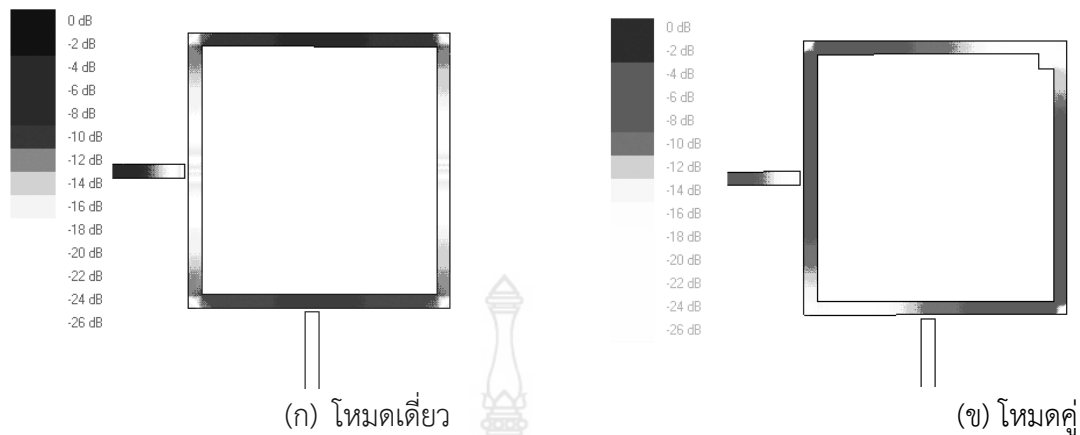
โชนเตอร์สั้นลงกว่า $\lambda_g/2$ และเป็นการจัดเตรียมสำหรับการเชื่อมโยงแบบไฟฟ้า (Electric coupling) ภาพที่ 13 (ค), (ง), (จ) และ (ฉ) เป็นเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปแบบโหมดคู่ (Dual-mode microstrip resonator) และมีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้ ภาพที่ 13 (ค) เป็นเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปแบบแพทช์วงกลม (circular patch) ภาพที่ 13 (ง) เป็นเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปแบบแพทช์สี่เหลี่ยม



ภาพที่ 13 เรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปชนิดต่างๆ

ภาพที่ 13 (จ) เป็นเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปแบบวงปิดกลม และภาพที่ 2-13 (ฉ) เป็นเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปแบบวงปิดสี่เหลี่ยม เมื่อเรโซเนเตอร์แบบโหมดคู่จะใส่ตัวรบกวน (perturbation) ไว้ที่มุม 45° จากโหมดทั้งสองที่ตั้งฉากกัน เมื่อ D เป็นขนาดของเรโซเนเตอร์

ภาพที่ 14 แสดงสนามไฟฟ้าบนเรโซเนเตอร์แบบวงปิดสี่เหลี่ยม ภาพที่ 14 (ก) แสดงสนามไฟฟ้าบนเรโซเนเตอร์แบบวงปิดสี่เหลี่ยมขณะไม่มีตัวรบกวนที่มุมบนด้านขวามือ ที่ความถี่เรโซแนนท์สนามไฟฟ้ามีขนาดสูงสุด (โพลของสนามไฟฟ้า) ที่บริเวณตรงกลางของด้านซ้ายมือและขวามือ และมีขนาดต่ำสุด (ซีโร่ของสนามไฟฟ้า) ที่บริเวณตรงกลางด้านบนและด้านล่างของเรโซเนเตอร์ ในสภาวะนี้เรโซเนเตอร์ถูกกระตุ้นเกิดเพียงโหมดเดียว (Single Mode) ภาพที่ 14 (ข) เรโซเนเตอร์ถูกใส่ตัวรบกวนที่บริเวณมุมบนด้านขวามือ ที่ความถี่เรโซแนนท์สนามไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดจะเลื่อนไป 90° จากตำแหน่งเดิม โดยทั้งสองโพลของสนามไฟฟ้า และสองซีโร่ของสนามไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ไปเกิดที่ทั้งสี่มุมของเรโซเนเตอร์ (โพลและซีโร่ปรากฏทั้งสี่ด้านของเรโซเนเตอร์) เกิดโหมดคู่เรโซแนนท์ที่ความถี่เดียวกัน (Degenerate Mode) โดยโหมดทั้งสองจะเชื่อมโยงระหว่างกัน ขนาดของการเชื่อมโยงขึ้นอยู่กับขนาดของตัวรบกวนที่มุมบนด้านขวามือ



ภาพที่ 14 สนามไฟฟ้าบนเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปแบบวงปิดสี่เหลี่ยม

2.5.4 วงจรเรโซเนเตอร์แบบเชื่อมโยง (Coupled Resonator Circuit)

วงจรเรโซเนเตอร์แบบเชื่อมโยงมีความสำคัญต่อการออกแบบวงจรกรองย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยเฉพาะการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบนด์แคบ (Narrow-Band Bandpass Filter) หลักการของวงจรเรโซเนเตอร์แบบเชื่อมโยงใช้ได้กับการออกแบบวงจรกรองที่ใช้เรโซเนเตอร์แบบต่างๆ เช่น วงจรกรองแบบไมโครสตริป วงจรกรองแบบสายแกนร่วม (Coaxial Filter) วงจรกรองแบบเวฟไกด์ (Waveguide Filter) วงจรกรองแบบไดอิเล็กทริกเรโซเนเตอร์ (Dielectric Resonator Filter) เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะอธิบายหลักการและการจำลองหาค่าการเชื่อมโยงของวงจรเรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปเชื่อมโยง โดยสมมติว่าเรโซเนเตอร์มีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากัน

2.5.4.1 การเชื่อมโยงไฟฟ้า (Electric Coupling)

วงจรอุปกรณ์ลัมป์เทียบเคียงของเรโซเนเตอร์ที่มีการเชื่อมโยงไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 15 (ก) เมื่อ L เป็นความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self-Inductance) และ C เป็นความจุตัวเอง (Self-Capacitance) และความถี่เรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์ขณะไม่เกิดการเชื่อมโยง คือ $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ ในขณะที่ C_m เป็นค่าความจุร่วม (Mutual Capacitance) วงจรอุปกรณ์ลัมป์เทียบเคียงในภาพที่ 15 (ก) ใช้เทียบเคียงได้กับเรโซเนเตอร์แบบกระจายที่เกิดการเชื่อมโยงบริเวณแบนด์แคบ (Narrow-Band) ใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์เท่านั้น เมื่อมองเข้าที่ระนาบ $T_1 - T_1'$ และ $T_2 - T_2'$ เขียนสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I_1 &= j\omega C V_1 - j\omega C_m V_2 \\ I_2 &= j\omega C V_2 - j\omega C_m V_1 \end{aligned} \quad (2-50)$$

จากสมการ (2-50) เขียนพารามิเตอร์แอดมิตแตนซ์ Y ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Y_{11} &= Y_{22} = j\omega C \\ Y_{12} &= Y_{21} = -j\omega C_m \end{aligned} \quad (2-51)$$

วงจร่ายเทียบเคียงของวงจรเรโซเนเตอร์ที่เชื่อมโยงไฟฟ้าในภาพที่ 15 (ก) สามารถเขียนได้อีกรูปแบบเพื่อให้สะดวกในการอธิบาย ดังภาพที่ 15 (ข) การเชื่อมโยงไฟฟ้าระหว่างสองวงจรมิตแดนซ์ถูกแทนด้วยวงจรผกผันแอดมิตแตนซ์ (Admittance Inverter) $J = \omega C_m$ ถ้าระนาบ

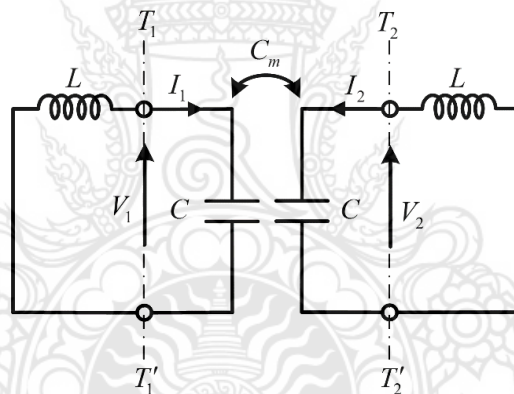
สมมาตร $T - T'$ ในภาพที่ 15 (ข) ถูกแทนด้วยผนังไฟฟ้า (ลัดวงจร) แล้วความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรมีค่าดังนี้

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C + C_m)}} \tag{2-52}$$

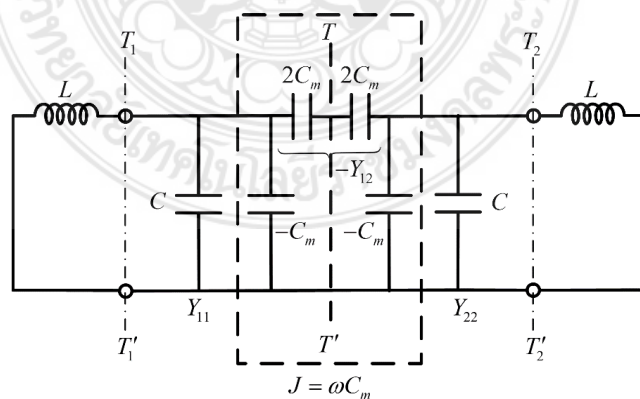
ความถี่เรโซแนนซ์ในสมการ (2-52) มีค่าต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ขณะที่เรโซเนเตอร์ไม่เกิดการเชื่อมโยง อธิบายได้ว่า การเชื่อมโยงส่งผลให้เพิ่มความจุในการสะสมประจุไฟฟ้าของเรโซเนเตอร์เดี่ยว เมื่อใส่ผนังไฟฟ้าในระนาบสมมาตรของโครงสร้างแบบเชื่อมโยง ในทำนองเดียวกัน ถ้าระนาบสมมาตรในภาพที่ 15 (ข) ถูกแทนด้วยผนังแม่เหล็ก (เปิดวงจร) แล้ววงจรเรโซแนนซ์เดี่ยวจะมีความถี่เรโซแนนซ์มีค่าดังนี้

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C - C_m)}} \tag{2-53}$$

สมการ (2-41) อธิบายได้ว่า การเชื่อมโยงส่งผลให้ลดความจุในการสะสมประจุไฟฟ้า และทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เพิ่มขึ้น



(ก) สองวงปิดเรโซแนนซ์ที่เชื่อมโยงไฟฟ้า



(ข) วงจรเทียบเคียงที่ใช้วงจรผกผันแอดมิตแตนซ์ $J = \omega C_m$ แทนการเชื่อมโยงไฟฟ้า

ภาพที่ 15 วงจรเทียบเคียงของวงจรเรโซเนเตอร์เชื่อมโยงไฟฟ้า

สมการ (2-52) และ (2-53) จะถูกใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การเชื่อมโยงไฟฟ้า (Electric Coupling Coefficient) k_E

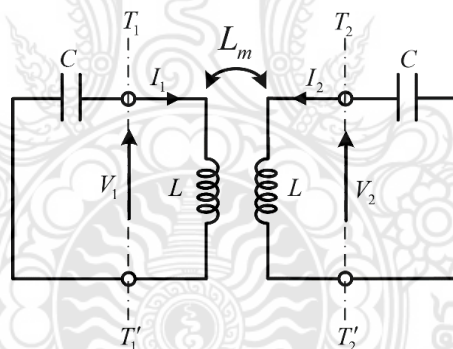
$$k_E = \frac{f_m^2 - f_e^2}{f_m^2 + f_e^2} = \frac{C_m}{C} \quad (2-54)$$

สัมประสิทธิ์การเชื่อมโยงไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนของพลังงานไฟฟ้าเชื่อมโยงต่อพลังงานไฟฟ้าสะสมของเรโซเนเตอร์เดี่ยวขณะไม่เกิดการเชื่อมโยง

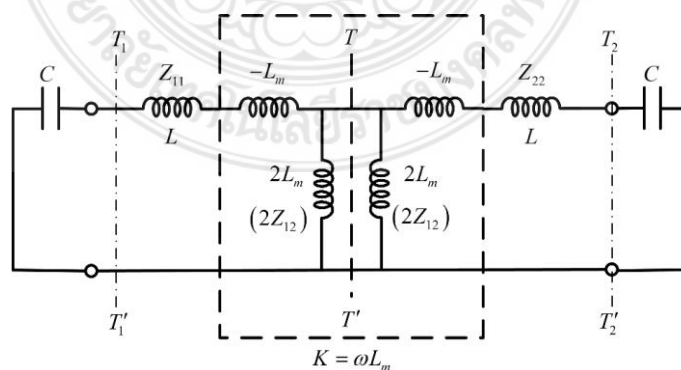
2.5.4.2 การเชื่อมโยงแม่เหล็ก (Magnetic Coupling)

ภาพที่ 2-16 (ก) เป็นวงจรอุปกรณณ์ลัมปีเทียบเคียงของโครงสร้างเรโซเนเตอร์ที่เกิดการเชื่อมโยงแม่เหล็ก เมื่อ L เป็นความเหนี่ยวนำตัวเอง และ C เป็นความจุตัวเอง และความถี่เรโซแนนท์ของเรโซเนเตอร์ขณะไม่เกิดการเชื่อมโยง คือ $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ ในขณะที่ L_m เป็นค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) สมการการเชื่อมโยงอธิบายได้ด้วยวงจรข่าย 2 พอร์ต ที่ระนาบ $T_1 - T_1'$ และ $T_2 - T_2'$

$$\begin{aligned} V_1 &= j\omega LI_1 + j\omega L_m I_2 \\ V_2 &= j\omega LI_2 + j\omega L_m I_1 \end{aligned} \quad (2-55)$$



(ก) สองวงปิดเรโซแนนท์ที่เชื่อมโยงแม่เหล็ก



(ข) วงจรเทียบเคียงที่ใช้วงจรผกผันอิมพีแดนซ์ $K = \omega L_m$ แทนการเชื่อมโยงแม่เหล็ก

ภาพที่ 16 วงจรเทียบเคียงของวงจรเรโซเนเตอร์เชื่อมโยงแม่เหล็ก

จากสมการ (2-55) เขียนพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ Z ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_{22} = j\omega L \\ Z_{12} &= Z_{21} = j\omega L_m \end{aligned} \quad (2-56)$$

ภาพที่ 16 (ข) เป็นอีควิวจรเทียบเคียงหนึ่งที่มีพารามิเตอร์ในวงจรเหมือนกับวงจรเทียบเคียงในภาพที่ 15 (ก) แต่จะแสดงการเชื่อมโยงแม่เหล็กระหว่างสองเรโซเนเตอร์ด้วยตัวผกผันอิมพีแดนซ์ (Impedance Inverter) $K = \omega L_m$ ถ้าระนาบสมมาตร $T-T'$ ในภาพที่ 16 (ข) ถูกแทนด้วยผนังไฟฟ้า (ลัดวงจร) แล้ว วงจรเรโซแนนท์เดี่ยวจะมีความถี่เรโซแนนท์มีค่าดังนี้

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L-L_m)C}} \quad (2-57)$$

พบว่าความถี่เรโซแนนท์เพิ่มขึ้นเนื่องจาก ผลการเชื่อมโยงแม่เหล็กได้ลดฟลักซ์แม่เหล็กสะสมในเรโซเนเตอร์เมื่อผนังไฟฟ้าถูกใส่ในระนาบสมมาตร ถ้าใส่ผนังแม่เหล็ก (เปิดวงจร) ในระนาบสมมาตรในภาพที่ 16 (ข) วงจรเรโซแนนท์เดี่ยวจะมีความถี่เรโซแนนท์

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L+L_m)C}} \quad (2-58)$$

สมการ (2-58) อธิบายได้ว่าการเชื่อมโยงแม่เหล็กเมื่อใส่ผนังแม่เหล็กในระนาบสมมาตรเป็นการเพิ่มฟลักซ์แม่เหล็กสะสมในเรโซเนเตอร์ ส่งผลให้ความถี่เรโซแนนท์ลดลง

สมการ (2-57) และ (2-58) ใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การเชื่อมโยงแม่เหล็ก (Magnetic Coupling Coefficient) k_M

$$k_M = \frac{f_e^2 - f_m^2}{f_e^2 + f_m^2} = \frac{L_m}{L} \quad (2-59)$$

สัมประสิทธิ์การเชื่อมโยงแม่เหล็กเป็นอัตราส่วนของพลังงานแม่เหล็กเชื่อมโยงต่อพลังงานแม่เหล็กสะสมของเรโซเนเตอร์เดี่ยวขณะไม่เกิดการเชื่อมโยง

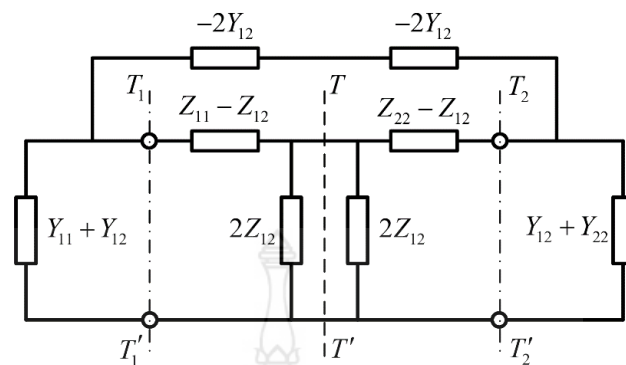
2.5.4.3 การเชื่อมโยงผสม (Mixed Coupling)

โครงสร้างเรโซเนเตอร์แบบเชื่อมโยงผสมแสดงวงจรเทียบเคียงได้ดังภาพที่ 17 (ก) เมื่อพารามิเตอร์แอดมิตแตนซ์ Y เป็นพารามิเตอร์ของสองวงจรขั้วที่อยู่ทางด้านซ้ายของระนาบ T_1-T_1' และทางด้านขวาของระนาบ T_2-T_2' ในขณะที่พารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ Z เป็นพารามิเตอร์ของสองวงจรขั้วที่เหลืออยู่ด้านขวาของระนาบ T_1-T_1' และทางซ้ายของระนาบ T_2-T_2'

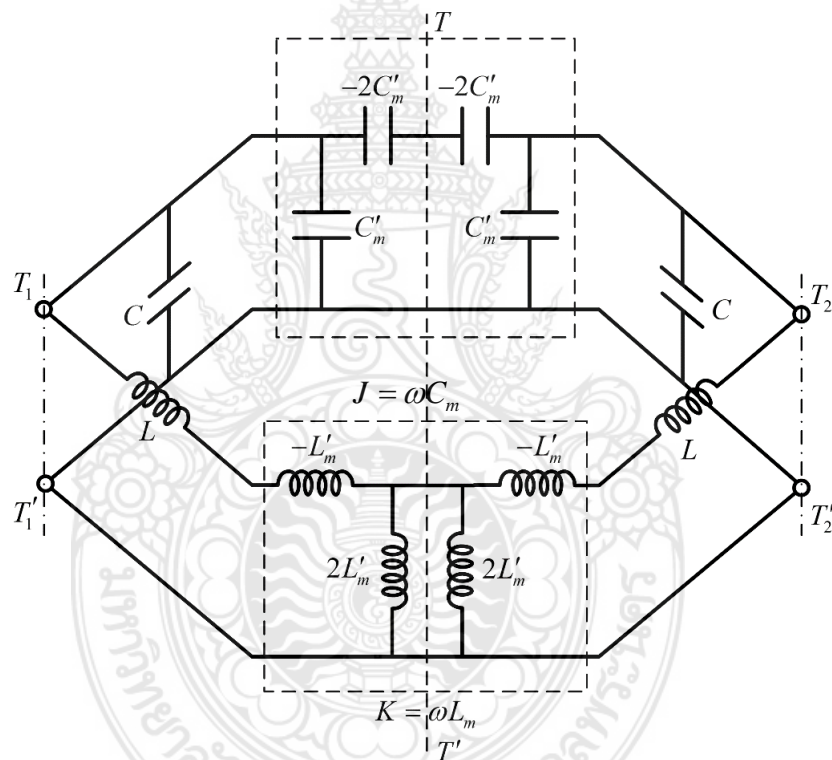
$$\begin{aligned} Y_{11} &= Y_{22} = j\omega C \\ Y_{12} &= Y_{21} = j\omega C'_m \end{aligned} \quad (2-60)$$

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_{22} = j\omega L \\ Z_{12} &= Z_{21} = j\omega L'_m \end{aligned} \quad (2-61)$$

เมื่อ C เป็น ความจุตัวเอง L เป็น ความเหนี่ยวนำตัวเอง C'_m เป็น ความจุร่วม และ C เป็น ความเหนี่ยวนำร่วม ของวงจรอุปกรณ์ลัมป์เทียบเคียงในภาพที่ 17 (ข)



(ก) วงจรข่ายแทนการเชื่อมโยงผสม

(ข) วงจรเทียบเคียงที่ใช้วงจรผกผันแอดมิตแตนซ์ $J = \omega C_m$
และวงจรผกผันอิมพีแดนซ์ $K = \omega L_m$

ภาพที่ 17 วงจรเทียบเคียงของวงจรเรโซเนเตอร์เชื่อมโยงผสม

เมื่อวงจรผกผันแอดมิตแตนซ์ $J = \omega C_m$ แทนการเชื่อมโยงไฟฟ้า และวงจรผกผันอิมพีแดนซ์ $K = \omega L_m$ แทนการเชื่อมโยงแม่เหล็ก โดยการใส่ผนังไฟฟ้าและผนังแม่เหล็กในระนาบสมมาตรของวงจรเทียบเคียงในภาพที่ 17 (ข) จะได้ความถี่เรโซแนนท์

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L-L'_m)(C-C'_m)}} \quad (2-62)$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L+L'_m)(C+C'_m)}} \quad (2-63)$$

จากสมการแสดงให้เห็นว่า ทั้งการเชื่อมโยงไฟฟ้าและแม่เหล็กมีผลให้เกิดการเลื่อนความถี่เรโซแนนท์

จากสมการ (2-62) และ (2-63) สัมประสิทธิ์การเชื่อมโยงผสม (mixed coupling coefficient) k_x คำนวณได้ดังนี้

$$k_x = \frac{f_e^2 - f_m^2}{f_e^2 + f_m^2} = \frac{CL'_m + LC'_m}{LC + L'_m C'_m} \quad (2-64)$$

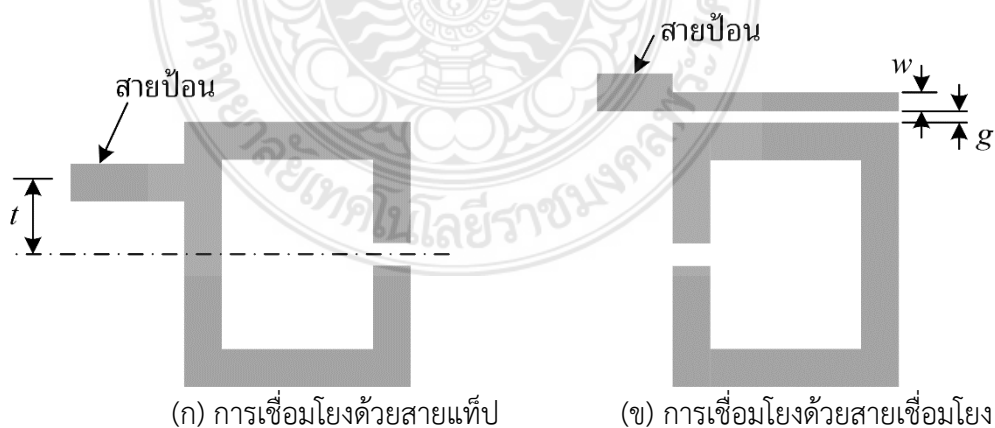
ถ้าสมมติว่า $L'_m C'_m \ll LC$ แล้ว สมการ (2-63) จะประมาณค่าได้ดังนี้

$$k_x \approx \frac{L'_m}{L} + \frac{C'_m}{C} = k'_M + k'_E \quad (2-65)$$

แสดงให้เห็นว่า การเชื่อมโยงผสมเป็นผลจากการทับซ้อน (superposition) ของการเชื่อมโยงแม่เหล็กและการเชื่อมโยงไฟฟ้า

2.5.4.4 โครงสร้างการเชื่อมโยงที่อินพุตและเอาต์พุต (Input and Output Coupling Structure)

การเชื่อมโยงที่เรโซเนเตอร์อินพุตและเอาต์พุตของวงจรกรองมี 2 แบบ คือ การใช้สายแท็ป (tapped line) และการใช้สายเชื่อมโยง (coupled line) โดยเรโซเนเตอร์เป็นเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปแบบวงเปิด แต่หลักการที่จะอธิบายในหัวข้อนี้สามารถใช้ได้กับเรโซเนเตอร์แบบอื่น ภาพที่ 18 แสดงการเชื่อมโยงกับเรโซเนเตอร์โดยใช้สายแท็ป และสายเชื่อมโยง สังเกตว่าในการหาสัมประสิทธิ์การเชื่อมโยงในหัวข้อที่แล้วได้ใช้สายเชื่อมโยง



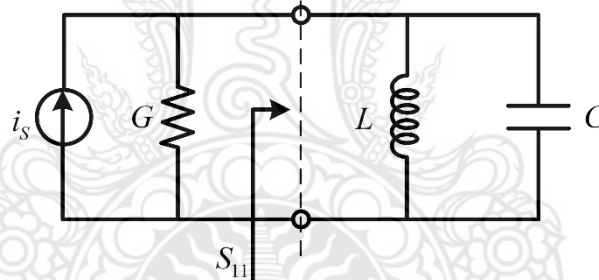
ภาพที่ 18 การเชื่อมโยงที่อินพุตและเอาต์พุตของเรโซเนเตอร์ของวงจรกรอง

ภาพที่ 18 (ก) เป็นการเชื่อมโยงด้วยสายแท้ปโดยปกติเป็นสายป้อน (Feed Line) มีอิมพีแดนซ์ 50Ω ต่อโดยตรงกับเรโซเนเตอร์ที่อินพุตและเอาต์พุตของวงจรรอง การเชื่อมโยงหรือตัวประกอบคุณภาพภายนอก (External Quality Factor) ต่อไปนี้จะแทนด้วยสัญลักษณ์ Q_e จะถูกควบคุมขนาดด้วยตำแหน่งเชื่อมต่อ t กล่าวคือ ถ้า t มีค่าน้อยหรือสายแท้ปเข้าใกล้เส้นกราวด์เสมือน (Virtual Ground) ของเรโซเนเตอร์แล้ว จะส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงอ่อนลง (Weaker Coupling) หรือส่งผลให้ตัวประกอบคุณภาพภายนอกสูงขึ้น สำหรับภาพที่ 18 (ข) แสดง การเชื่อมโยงด้วยสายเชื่อมโยง โดยขนาดการเชื่อมโยงจะถูกควบคุมด้วยช่องแคบ g และความกว้างสาย w กล่าวคือ ช่องแคบที่น้อยและความกว้างสายที่น้อยส่งผลให้การเชื่อมโยงแรงขึ้น (Stronger Coupling) หรือส่งผลให้ตัวประกอบคุณภาพภายนอกลดลง

การเชื่อมโยงที่อินพุตและเอาต์พุต หรือตัวประกอบคุณภาพภายนอกจากผลตอบสนองต่อความถี่ของเรโซเนเตอร์ที่อินพุตและเอาต์พุต สามารถหาได้จากวงจรถียบเคียงในภาพที่ 19 เมื่อ G เป็นความนำภายนอกที่ต่อกับเรโซเนเตอร์ LC ที่ไม่มีการสูญเสีย

สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ หรือ S_{11} ที่พอร์ทเรโซเนเตอร์มีค่าดังนี้

$$S_{11} = \frac{G - Y_{in}}{G + Y_{in}} = \frac{1 - Y_{in}/G}{1 + Y_{in}/G} \quad (2-66)$$



ภาพที่ 19 วงจรถียบเคียงของเรโซเนเตอร์ที่อินพุตของวงจรรอง

เมื่อ Y_{in} เป็นแอดมิตแตนซ์ที่อินพุตของเรโซเนเตอร์ และเนื่องจาก $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ จะได้

$$Y_{in} = j\omega C + \frac{1}{j\omega L} = j\omega_0 C \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)$$

ที่บริเวณความถี่ใกล้กับความถี่เรโซแนนท์ $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ จะประมาณแอดมิตแตนซ์ที่อินพุตได้ดังนี้

$$Y_{in} = j\omega C \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \quad (2-67)$$

แทนสมการ (2-67) ในสมการ (2-61) และใช้ความสัมพันธ์ $Q_e = \omega_0 C/G$ จะได้

$$S_{11} = \frac{1 - jQ_e (2\Delta\omega/\omega_0)}{1 + jQ_e (2\Delta\omega/\omega_0)} \quad (2-68)$$

เนื่องจากสมมติว่าเรโซเนเตอร์ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้น ขนาดของ S_{11} เท่ากับ 1 เสมอ อธิบายได้ว่าที่บริเวณรอบความถี่เรโซแนนท์ วงจรเรโซแนนท์แบบขนานในภาพที่ 20 จะมีคุณสมบัติเหมือน

การเปิดวงจร แต่อย่างไรก็ตาม ผลตอบสนองทางเฟสของ S_{11} จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ภาพที่ 2-19 แสดงผลตอบสนองทางเฟสของ S_{11} ที่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงความถี่ $\Delta\omega/\omega_0$ เมื่อเฟส $\pm 90^\circ$ จะสอดคล้องกับค่าความถี่ $\Delta\omega$ ที่ทำให้

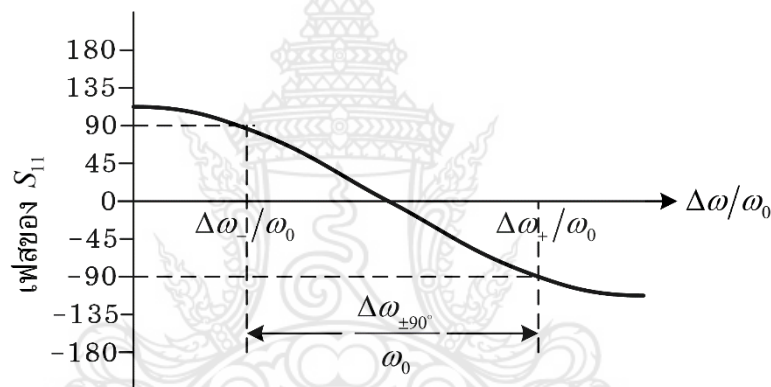
$$2Q_e \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \pm 1$$

นั่นคือ ขนาดของแบนด์วิดธ์อยู่ระหว่างจุด $\pm 90^\circ$

$$\Delta\omega_{\pm 90^\circ} = \Delta\omega_+ - \Delta\omega_- = \frac{\omega_0}{Q_e}$$

ดังนั้น ตัวประกอบคุณภาพภายนอกคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$Q_e = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_{\pm 90^\circ}} \quad (2-69)$$



ภาพที่ 20 ผลตอบสนองทางเฟสของ S_{11} ของวงจรถูกในภาพที่ 19

2.6 ทฤษฎีวงจรรองความถี่ไมโครเวฟ (Microwave Filters)

ความถี่ย่านความถี่วิทยุและความถี่ย่านไมโครเวฟถูกนำมาใช้งานด้านการสื่อสารเป็นหลักและมีการใช้งานความถี่ที่หนาแน่น เพื่อให้เกิดการแยกจากกันของช่องสัญญาณการสื่อสารหรือเพื่อการป้องกันการรบกวนระหว่างช่องสัญญาณจำเป็นต้องมีวงจรรองความถี่ที่ทำหน้าที่ดังกล่าว วงจรรองความถี่ยอมให้เฉพาะสัญญาณที่มีความถี่ในย่านที่กำหนดผ่านวงจรรองความถี่ออกเอาต์พุต ดังนั้นวงจรรองความถี่จึงมีความสำคัญในระบบสื่อสาร อธิบายผลตอบสนองของวงจรรองความถี่ การแปลงความถี่และอิมพีแดนซ์ รวมถึงทฤษฎีและการดำเนินการที่เกี่ยวข้องในการออกแบบวงจรรองความถี่

2.6.1 ผลตอบสนองของวงจรรองความถี่

การออกแบบวงจรรองความถี่โดยวิธีการการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion Loss Method) ผลตอบสนองของวงจรรองความถี่จะถูกกำหนดด้วยการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกหรือ อัตราส่วนการสูญเสียกำลังงาน (Power Loss Ratio)

$$P_{LR} = \frac{\text{กำลังงานที่ได้รับจากแหล่งจ่าย}}{\text{กำลังงานที่โหลดได้รับ}} = \frac{P_{inc}}{P_{load}} = \frac{1}{1 - |\Gamma(\omega)|^2} \quad (2-70)$$

การลดทอนเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion Loss) ในหน่วยเดซิเบล (dB) เป็นดังนี้

$$IL = 10 \log P_{LR} \quad (2-71)$$

เนื่องจากขนาดฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ $|\Gamma(\omega)|^2$ เป็นฟังก์ชันคู่ของตัวแปร ω ดังนั้นจึงเขียน $|\Gamma(\omega)|^2$ ในรูปแบบโพลิโนเมียลของ ω^2 ได้ดังนี้

$$|\Gamma(\omega)|^2 = \frac{M(\omega^2)}{M(\omega^2) + N(\omega^2)} \quad (2-72)$$

เมื่อ M และ N เป็นโพลิโนเมียลค่าจริงของ ω^2 โดยการแทนสมการ (2-72) ลงในสมการ (2-70) จะได้ดังนี้

$$P_{LR} = 1 + \frac{M(\omega^2)}{N(\omega^2)} \quad (2-73)$$

การสร้างวงจรกรองต้องสอดคล้องกับอัตราส่วนการสูญเสียกำลังงานตามสมการ (2-73) ดังนั้นถ้ากำหนดอัตราส่วนส่วนกำลังงานให้เป็นไปตามข้อกำหนดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ $\Gamma(\omega)$ แล้วจะสามารถแยกอธิบายผลตอบสนองของวงจรกรองในทางปฏิบัติบางแบบได้ดังนี้

2.6.1.1 ผลตอบสนองแบบบัตเตอร์เวิร์ธ (Butterworth Response)

ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ธ กำหนดได้ดังนี้

$$P_{LR} = 1 + k^2 (\Omega)^{2N} \quad (2-74)$$

เมื่อ N เป็นอันดับ (order) ของวงจรกรอง $\Omega = \omega/\omega_c$ และ ω_c เป็นความถี่คัทออฟ (Cutoff Frequency) โดยแถบผ่าน (Passband) เริ่มจาก $\omega = 0$ ถึง $\omega = \omega_c$ ที่ตำแหน่งปลายแบนด์ อัตราส่วนการสูญเสียกำลังงาน คือ $1 + k^2$ ถ้าเลือกให้ตำแหน่งดังกล่าวมีอัตราส่วนการสูญเสียกำลังงานเท่ากับ -3 dB จะได้ดังนี้

$$1 + k^2 = 10^{-0.3} = 2$$

$$k = 1$$

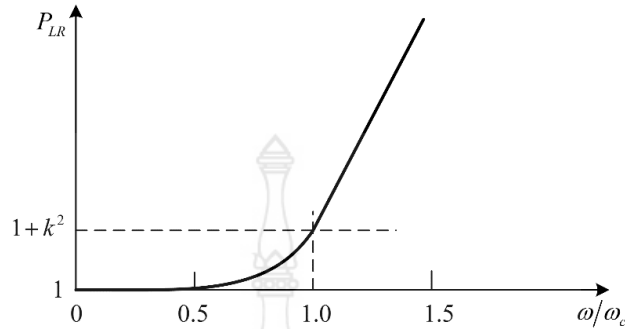
เมื่อ $\omega > \omega_c$ การลดทอนจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความถี่ ดังแสดงในภาพที่ 21 เมื่อ $\omega \gg \omega_c$ แล้วจะประมาณค่าอัตราส่วนการสูญเสียกำลังงานได้ดังนี้

$$P_{LR} \approx k^2 \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^{2N}$$

การสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกมีค่าดังนี้

$$IL = 10 \log \left[k^2 \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^{2N} \right] = 10 \log k^2 + 20N \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right) \text{ dB} \quad (2-75)$$

แสดงให้เห็นว่าภายนอกแถบผ่าน การสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา $20N$ dB/decade



ภาพที่ 21 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ธ

2.6.1.2 ผลตอบสนองแบบเชบีเชฟ (Chebyshev Response)

โดยการกำหนดโพลีโนเมียลของเชบีเชฟเป็นการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกของวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ ที่มีอันดับ N จะได้ดังนี้

$$P_{LR} = 1 + k^2 T_N^2(\Omega) \quad (2-76)$$

เมื่อ $\Omega = \omega/\omega_c$ และ $T_N(\Omega)$ เป็นฟังก์ชันเชบีเชฟชนิดที่ 1 อันดับ N มีนิยามดังนี้

$$T_N(\Omega) = \begin{cases} \cos[N \cos^{-1}(\Omega)] & \text{สำหรับ } \Omega \leq 1 \\ \cosh[N \cosh^{-1}(\Omega)] & \text{สำหรับ } \Omega \geq 1 \end{cases} \quad (2-77)$$

โพลีโนเมียลเชบีเชฟ (Chebyshev polynomial) แสดงได้ด้วยอนุกรมในกำลังของ Ω จากสูตร

$$T_{N+1}(\Omega) + T_{N-1}(\Omega) = 2\Omega T_N(\Omega) \quad (2-78)$$

สำหรับ Ω มีค่าสูงมาก ($\omega \gg \omega_c$) ฟังก์ชันเชบีเชฟจะประมาณค่าได้ดังนี้

$$T_N(\Omega) \approx \frac{1}{2} (2\Omega)^N \quad (2-79)$$

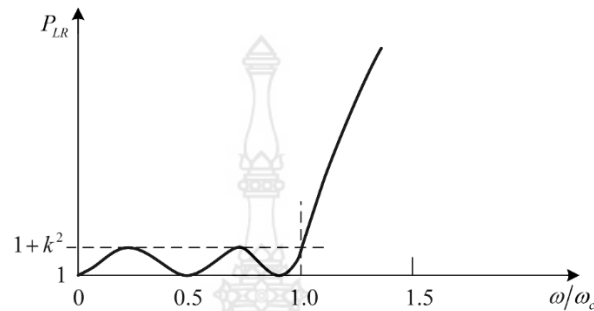
โดยการแทนสมการ(2-79) ลงในสมการ(2-76) จะได้สมการประมาณค่าอัตราส่วนการสูญเสีย ที่ความถี่ $\omega \gg \omega_c$ ดังนี้

$$P_{LR} \approx \frac{k^2}{4} (2\Omega)^{2N} = \frac{k^2}{4} \left(\frac{2\omega}{\omega_c} \right)^{2N} \quad (2-80)$$

การสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} IL &= 10 \log \left[\frac{k^2}{4} \left(\frac{2\omega}{\omega_c} \right)^{2N} \right] \\ &= 10 \log k^2 + 20N \log \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right) + 10 \log \left[\frac{(2)^{2N}}{4} \right] \end{aligned} \quad (2-81)$$

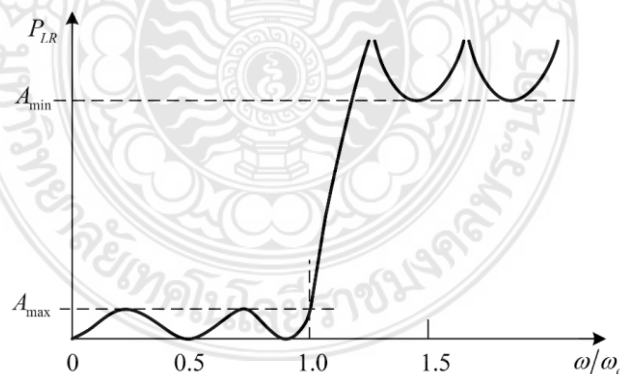
โดยการเปรียบสมการ (2-81) กับสมการ (2-75) พบว่าที่ความถี่นอกแถบผ่าน $\omega \neq \omega_c$ ผลตอบสนองแบบเซบีเซฟจะมีการลดทอนเพิ่มขึ้นมากกว่าผลตอบสนองแบบบัตเตอร์เวิร์ธด้วยขนาดเท่ากับพจน์สุดท้ายด้านขวามือของสมการ (2-81) กราฟผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรรองความถี่ผ่านต่ำแบบเซบีเซฟ แสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรรองความถี่ผ่านต่ำแบบเซบีเซฟ

2.6.1.3 ผลตอบสนองแบบฟังก์ชันเอลลิปติก (Elliptic Function Response)

ผลตอบสนองแบบบัตเตอร์เวิร์ธและแบบเซบีเซฟมีการลดทอนเพิ่มอย่างต่อเนื่องในแถบหยุด (Stopband) ในการใช้งานบางประเภทมีความต้องการการลดทอนในแถบหยุดอย่างต่ำอยู่ค่าหนึ่ง แต่ต้องการอัตราการลดทอน หรือความชันของผลตอบสนองที่สูงขึ้นวงจรรองที่มีคุณสมบัติดังกล่าว เรียกว่าวงจรรองแบบฟังก์ชันเอลลิปติกโดยผลตอบสนองของวงจรรองนี้จะเกิดรีปเปิลทั้งในแถบผ่านและในแถบหยุด ดังแสดงในภาพที่ 23 การลดทอนสูงสุดในแถบผ่านกำหนดได้ด้วยขนาด A_{\max} ในขณะที่การลดทอนต่ำสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในแถบหยุดกำหนดได้ด้วยขนาด A_{\min}

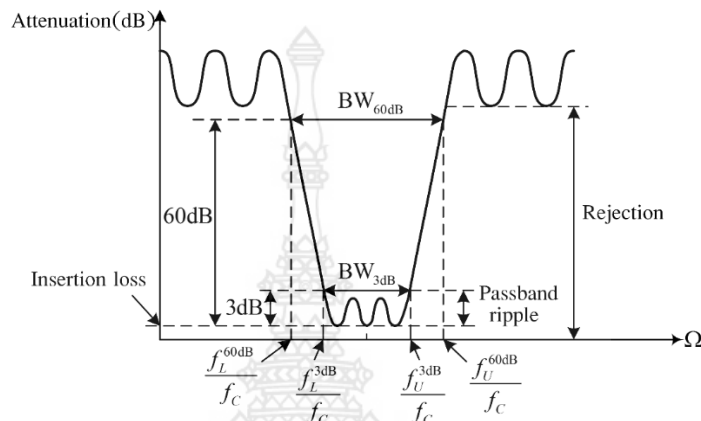


ภาพที่ 23 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรรองความถี่ผ่านต่ำแบบฟังก์ชันเอลลิปติก

2.6.2 พารามิเตอร์คุณสมบัติของผลตอบสนอง

ภาพที่ 2-24 แสดงกราฟผลตอบสนองการลดทอนต่อความถี่ของวงจรรองผ่านแถบความถี่ เมื่อความถี่ $\Omega = \omega/\omega_c$ ที่ความถี่กลางแถบผ่านมี $\Omega = 1.0$ พารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติของวงจรรองความถี่มีดังต่อไปนี้

- การสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion Loss) ในทางอุดมคติการเพิ่มวงจรกรองความถี่ลงในวงจรความถี่ไมโครเวฟจะไม่มี การสูญเสียกำลังงานในแถบผ่าน หรือมีการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกเท่ากับศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติจะเกิดการสูญเสียกำลังงานอยู่ค่าหนึ่งในวงจรกรองความถี่ แสดงขนาดของปริมาณด้วยเส้นแอมพลิจูดของผลตอบสนองภายในแถบผ่านที่ต่ำกว่าระดับ 0 dB



ภาพที่ 24 ผลตอบสนองการลดทอนต่อความถี่ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่

- ริปเปิล (Ripple) ความเรียบของสัญญาณในแถบผ่านแสดงได้ด้วยปริมาณริปเปิล หรือความต่างระหว่างขนาดแอมพลิจูดสูงสุดและแอมพลิจูดต่ำสุดของผลตอบสนอง

- แบนด์วิดท์ (Bandwidth) แบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านแถบเป็นความต่างระหว่างความถี่ด้านบนและความถี่ด้านล่างของแถบผ่านโดยวัดที่ระดับการลดทอนลดลงเหลือ 3 dB

$$BW^{3dB} = f_U^{3dB} - f_L^{3dB}$$

- ตัวประกอบรูปทรง (Shape factor) ตัวประกอบรูปทรงใช้บ่งบอกความคม หรือความชันของผลตอบสนอง มีนิยามคือ เป็นอัตราส่วนของขนาดแบนด์วิดท์ 60 dB ต่อ ขนาดแบนด์วิดท์ 3 dB

$$SF = \frac{f_U^{60dB} - f_L^{60dB}}{f_U^{3dB} - f_L^{3dB}}$$

วงจรกรองผ่านแถบความถี่ในทางอุดมคติจะมีค่าตัวประกอบรูปทรงเท่ากับ 1 แต่ในทางปฏิบัติค่าตัวประกอบรูปทรงจะมีค่ามากกว่า 1 ถ้าตัวประกอบยังมีค่าน้อยแสดงว่าความคม หรือความชันของผลตอบสนองยิ่งมาก

- การก้ำกั (Rejection) ในทางอุดมคติที่ความถี่ไม่ต้องการมีการลดทอนเป็นอนันต์แต่ในทางปฏิบัติค่าการลดทอนจะมีค่าจำกัดอยู่ค่าหนึ่ง เนื่องจากมีจำนวนอุปกรณ์ในวงจรกรองจำกัด ระดับการก้ำกัจะถูกวัดที่ระดับ 60 dB เนื่องจากมีความสะดวกในการวัดเพื่อคำนวณตัวประกอบรูปทรงด้วย

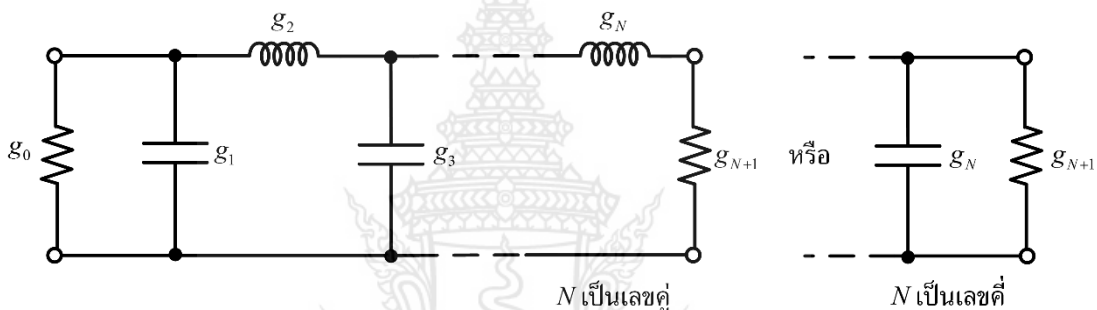
2.6.3 วงจรกรองผ่านต่ำต้นแบบ (Low-Pass Filter Prototypes)

วงจรกรองผ่านต่ำต้นแบบเป็นวงจรที่ถูกสังเคราะห์บนเงื่อนไขความถี่คัทออฟนอร์มอลไลซ์ (Normalized cutoff frequency) เท่ากับ 1 เรเดียนต่อวินาที ($\Omega_c = 1 \text{ rad/sec}$) และอิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายนอร์มอลไลซ์ (Normalized source impedance) เท่ากับ 1 โอห์ม ($R_s = 1\Omega$) วงจรกรองผ่านต่ำต้นแบบของผลตอบสนองแบบบัตเตอร์เวิร์ทและแบบเชพปีเชพมีโครงสร้างเป็นวงจร

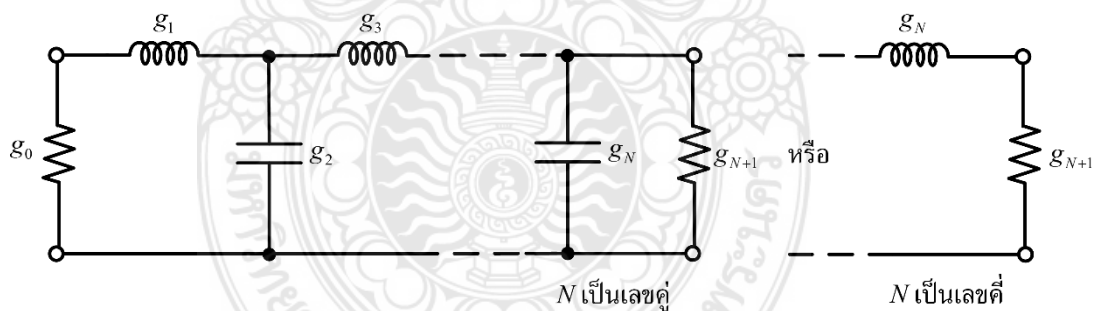
ข่ายบันได ดังแสดงในภาพที่ 25 โดยวงจรข่ายบันไดทั้งสองวงจรเป็นคู่เหมือนกัน หรือวงจรข่ายทั้งสองให้ผลตอบสนองเหมือนกัน สำหรับวงจรกรองที่มีอันดับเท่ากับ N แล้วองค์ประกอบในวงจรข่ายบันไดเริ่มจาก g_0 ที่ตำแหน่งอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย ถึงองค์ประกอบอันดับที่ g_{N+1} ที่ตำแหน่งอิมพีแดนซ์ของโหลด องค์ประกอบแบบรีแอกแตนซ์ g_i ใดๆ ภายในวงจรจะสลับไปมาระหว่างองค์ประกอบที่ต่อแบบอนุกรมและองค์ประกอบที่ต่อแบบขนาน และมีนิยามดังต่อไปนี้

$$g_0 = \begin{cases} \text{ค่าความนำของแหล่งจ่าย สำหรับวงจรข่ายในภาพที่ 2-25 (ข)} \end{cases}$$

$$g_i \quad (i=1 \text{ to } N) = \begin{cases} \text{ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำต่อแบบอนุกรม ในหน่วยเฮนรี (Henry)} \\ \text{ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุต่อแบบขนาน ในหน่วยฟารัด (Farad)} \end{cases}$$



(ก) วงจรข่ายบันไดที่เริ่มต้นด้วยอุปกรณ์ต่อแบบขนาน



(ข) วงจรข่ายบันไดที่เริ่มต้นด้วยอุปกรณ์ต่อแบบอนุกรม

ภาพที่ 25 วงจรข่ายบันไดของวงจรกรองผ่านต่ำต้นแบบ

$$g_{N+1} = \begin{cases} \text{ค่าความต้านทานของโหลด ถ้า } g_N \text{ เป็นตัวเก็บประจุต่อแบบขนาน} \\ \text{ค่าความนำของโหลด ถ้า } g_N \text{ เป็นตัวเหนี่ยวนำต่อแบบอนุกรม} \end{cases}$$

สำหรับค่าองค์ประกอบภายในวงจรกรองผ่านต่ำต้นแบบของวงจรกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ธและแบบเชบีเชฟ จะแยกอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.6.3.1 วงจรกรองผ่านต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ธ

สำหรับวงจรกรองผ่านต่ำที่มีผลตอบสนองแบบบัตเตอร์เวิร์ธ มีฟังก์ชันการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกโดยมีความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก $IL = 3.01\text{dB}$ ที่ความถี่คัทออฟ $\Omega = 1$ ค่าองค์ประกอบอ้างอิงตามภาพที่ 2-26 คำนวณได้ดังนี้ $g_0 = 1.0$

$$g_i = 2 \sin\left(\frac{(2i-1)\pi}{2N}\right) \text{ สำหรับ } i=1 \text{ ถึง } N \quad (2-82)$$

$$g_{N+1} = 1.0$$

การคำนวณอันดับของวงจรกรองต่ำแบบผ่านต่ำบัตเตอร์เวิร์ธ คำนวณได้ดังนี้

$$N \geq \frac{\log(10^{0.1L_{AS}} - 1)}{2 \log \Omega_s} \quad (2-83)$$

เมื่อ L_{AS} เป็นค่าการลดทอนต่ำสุดในหน่วยเดซิเบล (dB) ที่ต้องการที่ความถี่ $\Omega_s = \omega_s / \omega_c$ ในแถบหยุด

2.7.3.2 วงจรกรองผ่านต่ำแบบเชบีเชฟ

วงจรกรองผ่านต่ำผลตอบสนองแบบเชบีเชฟ มีฟังก์ชันการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกขนาดของระดับริปเปิลในหน่วยเดซิเบลในแถบผ่านแสดงแทนด้วย L_{Ar} และที่ความถี่คัทออฟ ค่าองค์ประกอบในวงจรขยับขึ้นได้ในภาพที่ 2-26 คำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$g_0 = 1.0$$

$$g_1 = \frac{2}{\gamma} \sin\left(\frac{\pi}{2N}\right)$$

$$g_i = \frac{1}{g_{i+1}} \frac{4 \sin\left[\frac{(2i-1)\pi}{2N}\right] \sin\left[\frac{(2i-3)\pi}{2N}\right]}{\gamma^2 + \sin^2\left[\frac{(i-1)\pi}{N}\right]} \text{ สำหรับ } i = 2, 3, \dots, N \quad (2-84)$$

$$g_{N+1} = \begin{cases} 1.0 & \text{สำหรับ } N \text{ เป็นเลขคี่} \\ \coth^2\left(\frac{\beta}{4}\right) & \text{สำหรับ } N \text{ เป็นเลขคู่} \end{cases}$$

เมื่อ

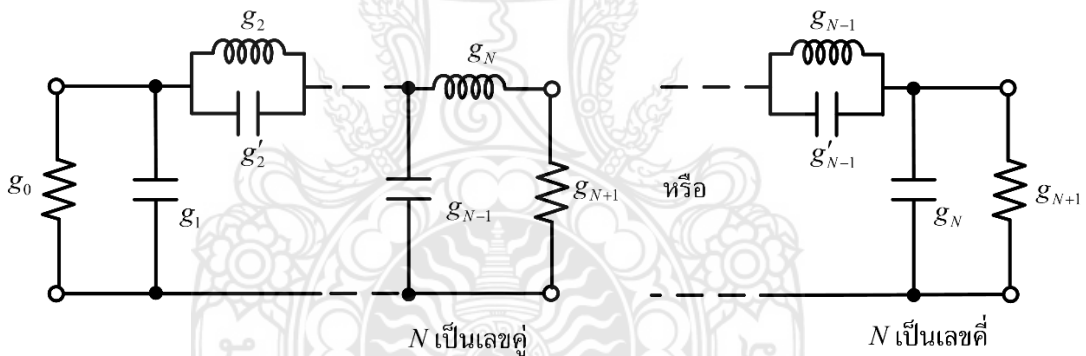
$$\beta = \ln \left[\coth \left(\frac{L_{Ar}}{17.37} \right) \right] \quad \text{และ} \quad \gamma = \sinh \left(\frac{\beta}{2N} \right)$$

สำหรับความต้องการขนาดรีปเปิล L_{Ar} ค่าหนึ่งที่ต้องการ และการลดทอนต่ำสุด L_{As} ในแถบหยุดที่ความถี่ $\Omega = \Omega_s$ แล้ว สามารถคำนวณอันดับของวงจรกรองผ่านต่ำเซบีเซฟได้ดังนี้

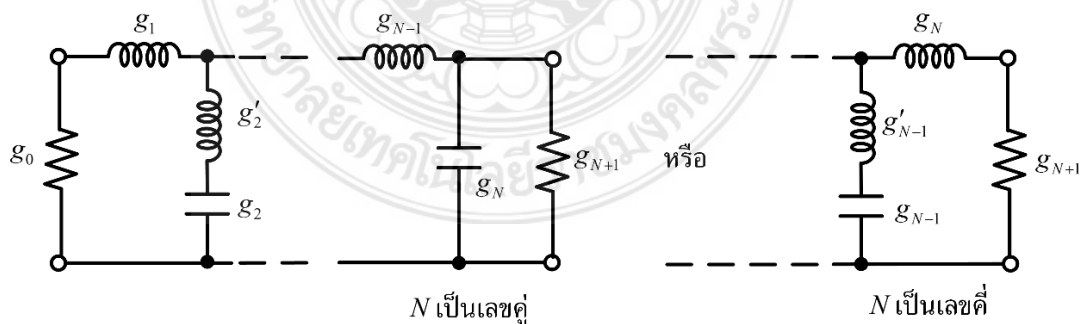
$$N \geq \frac{\cosh^{-1} \sqrt{\frac{10^{0.1L_{As}} - 1}{10^{0.1L_{Ar}} - 1}}}{\cosh^{-1} \Omega_s} \quad (2-85)$$

2.6.3.3 วงจรกรองผ่านต่ำตันแบบฟังก์ชันเอลลิปติก

ภาพที่ 26 แสดงวงจรข่ายของวงจรกรองผ่านต่ำตันแบบฟังก์ชันเอลลิปติก ภาพที่ 26 (ก) ส่วนอนุกรมของวงจรเรโซแนนท์แบบขนานถูกใช้ในวงจรเพื่อให้เกิดการส่งผ่านศูนย์ (Transmission Zeros) ที่ความถี่ค่าหนึ่ง เนื่องจากส่งผ่านจะถูกปิดกั้นด้วยการที่อิมพีแดนซ์ส่วนอนุกรมของวงจรเรโซแนนท์แบบขนานมีค่าเป็นอนันต์ (เปิดวงจร) ที่ความถี่เรโซแนนท์



(ก) วงจรที่มีส่วนอนุกรมของวงจรเรโซแนนท์แบบขนาน



(ข) วงจรที่มีส่วนขนานของวงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรม

ภาพที่ 26 วงจรกรองผ่านต่ำตันแบบฟังก์ชันเอลลิปติก

รูปแบบของวงจรกรองผ่านต่ำแบบฟังก์ชันเอลลิปติกของภาพที่ 26 (ก) จะทำให้ g_i เมื่อ i เป็นเลขคี่ (1,3,...) แสดงเป็นค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบขนาน และ g_i เมื่อ i เป็นเลขคู่ (2,4,...) แสดงเป็นค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ ในขณะที่ g'_i เมื่อ i เป็นเลขคู่ (2,4,...) แสดงแทนค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่อยู่ในส่วนอนุกรมของวงจรเรโซแนนท์แบบขนาน

สำหรับวงจรข่ายคู่เหมือนของวงจรกรองผ่านต่ำแบบฟังก์ชันเอลลิปติกแสดงดังภาพที่ 26 (ข) ส่วนขนานของวงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรมถูกใช้เพื่อให้เกิดการส่งผ่านศูนย์ที่ความถี่ค่าหนึ่ง เนื่องจากส่งผ่านจะถูกตัดวงจรด้วยการที่อิมพีแดนซ์ส่วนขนานของวงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรมมีค่าเข้าสู่ศูนย์ (ลัดวงจร) ที่ความถี่เรโซแนนท์ องค์ประกอบในวงจรข่ายอธิบายได้ดังนี้ g_i เมื่อ i เป็นเลขคี่ (1,3,...) เป็นค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำอนุกรม และ g_i เมื่อ i เป็นเลขคู่ (2,4,...) เป็นค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ในขณะที่ g'_i เมื่อ i เป็นเลขคู่ (2,4,...) เป็นค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำในส่วนขนานของวงจรเรโซแนนท์แบบอนุกรม

ค่าขององค์ประกอบในวงจรข่ายที่มีการลัดทอนนอกแถบผ่าน L_{As} ที่ค่า Ω_s ต่างๆ และมีขนาดรีปเปิล $L_{Ar} = 0.1$ dB ความถี่คัทออฟ $\Omega_c = 1$ แสดงในตารางที่ 3-3

2.6.4 การแปลงวงจรกรอง (Filter Transformations)

วงจรกรองผ่านต่ำต้นแบบที่ได้ทำการนอร์มอไลซ์ให้ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย $R_s = 1\Omega$ และความถี่คัทออฟ $\omega_c = 1$ เป็นการเพิ่มอิมพีแดนซ์และความถี่ ตลอดจนการแปลงวงจรผ่านต่ำต้นแบบไปสู่วงจรกรองผ่านต่ำวงจรกรองผ่านสูง วงจรกรองผ่านแถบ และวงจรหยุดแถบ

2.6.4.1 การสเกลอิมพีแดนซ์ (Impedance Scaling)

วงจรกรองผ่านต่ำต้นแบบถูกออกแบบโดยการกำหนดให้ความต้านทานของแหล่งจ่ายและโหลดมีค่าเท่ากับหนึ่ง (ยกเว้นวงจรกรองผ่านต่ำเซบีเชฟที่มีอันดับ N เป็นเลขคู่ ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดไม่เท่ากับหนึ่ง) สำหรับการใช้งานจริงแล้วค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายที่มีค่า Z_0 ใดๆ สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์แท้จริงค่าใหม่ได้โดยการคูณค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรกรองผ่านต่ำต้นแบบด้วย Z_0 จะได้ค่าอุปกรณ์ใหม่ของวงจรกรองดังนี้

$$L_i = Z_0 g_i \quad (2-86ก)$$

$$C_i = \frac{g_i}{Z_0} \quad (2-86ข)$$

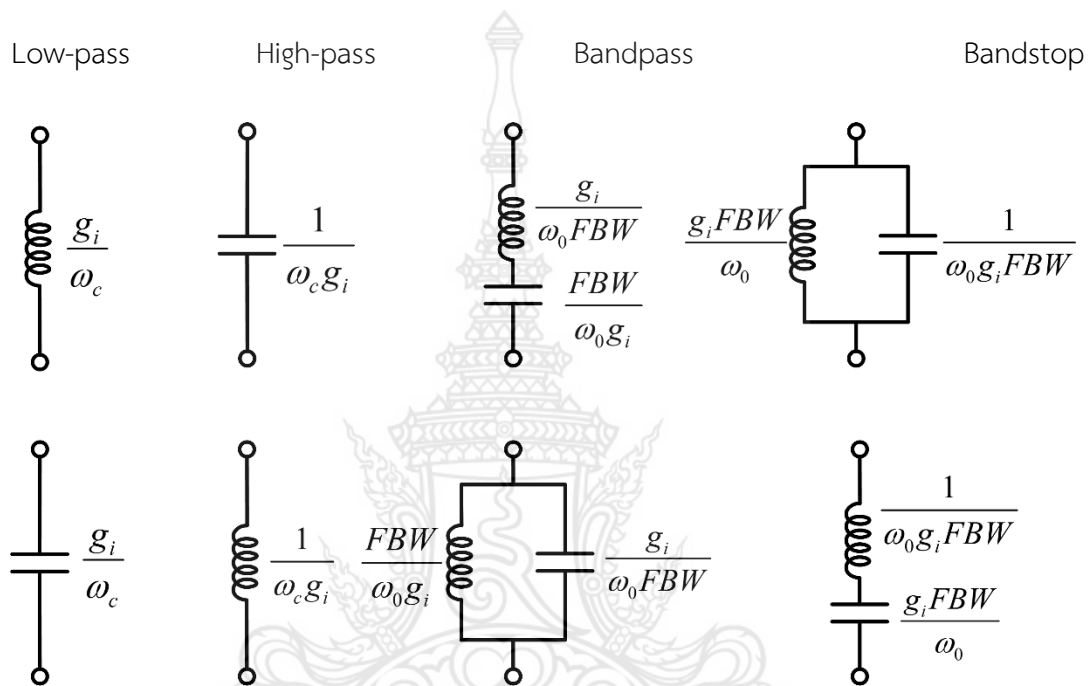
$$R_s = Z_0 \quad (2-86ค)$$

$$R_L = Z_0 g_{N+1} \quad (2-86ง)$$

เมื่อ g_i ในสมการ (2-85) มีอันดับ i ที่สอดคล้องกับค่าองค์ประกอบความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ และค่าองค์ประกอบความจุของตัวเก็บประจุในวงจรกรองผ่านต่ำต้นแบบที่เลือกตามวงจรข่าย ดังภาพที่ 25 และ ภาพที่ 26

2.6.4.2 การแปลงความถี่ (Frequency Transformation)

การแปลงความถี่จากวงจรกรองต่ำผ่านต้นแบบไปสู่วงจรกรองผ่านต่ำ วงจรกรองผ่านสูง วงจรกรองผ่านแถบ และวงจรกรองหยุดแถบ เป็นการแปลงผลตอบสนองผ่านต่ำต้นแบบไปสู่ผลตอบสนองที่มีความถี่ที่ต้องการ โดยการแปลงความถี่นี้จะมีผลทำให้ค่าองค์ประกอบในวงจรเปลี่ยนแปลง ดังภาพที่ 27



เมื่อ $FBW = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} = \frac{BW}{f_0}$

ภาพที่ 27 การแปลงวงจรกรองผ่านต่ำต้นแบบ

2.6.5 การดำเนินการกับวงจรกรองความถี่ (Filter Implementation)

วงจรกรองที่ใช้อุปกรณ์แบบลัมป์สามารถใช้งานได้กับความถี่ต่ำ แต่ถ้านำไปใช้กับความถี่ไมโครเวฟ จะพบปัญหา 2 ประการ คือ ประการแรกอุปกรณ์แบบลัมป์ที่เป็นตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมีค่าอุปกรณ์อยู่ในช่วงที่จำกัด ส่งผลให้เกิดความซับซ้อนในการนำมาสร้างวงจรกรอง ดังนั้น ต้องแปลงไปเป็นอุปกรณ์แบบกระจาย ประการที่สอง ที่ความถี่ไมโครเวฟระยะทางระหว่างอุปกรณ์ต้องนำมาวิเคราะห์ประกอบในขั้นตอนออกแบบวงจรกรอง

สำหรับการออกแบบวงจรกรองที่ใช้งานย่านไมโครเวฟจากวงจรที่ใช้อุปกรณ์แบบลัมป์แล้ว การแปลงค่าอุปกรณ์แบบลัมป์ไปเป็นค่าอุปกรณ์แบบกระจายสามารถใช้การแปลงของริชาร์ด ในขณะที่ปัญหาระยะทางระหว่างอุปกรณ์จะใช้เอกลักษณ์ของคูโรดะ

2.6.5.1 การแปลงของริชาร์ด (Richard's Transformation)

ตัวแปรการแปลงของริชาร์ด กำหนดดังนี้

$$\Omega = \tan \beta l = \tan \left(\frac{\omega l}{v_p} \right) \quad (2-87)$$

โดยการแทนตัวแปรความถี่ ω ด้วย Ω แล้ว จะเขียนสมการรีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ได้ดังนี้

$$jX_L = j\Omega L = jL \tan \beta l \quad (2-88ก)$$

และสมการซัสเซปแตนซ์ของตัวเก็บประจุเป็นดังนี้

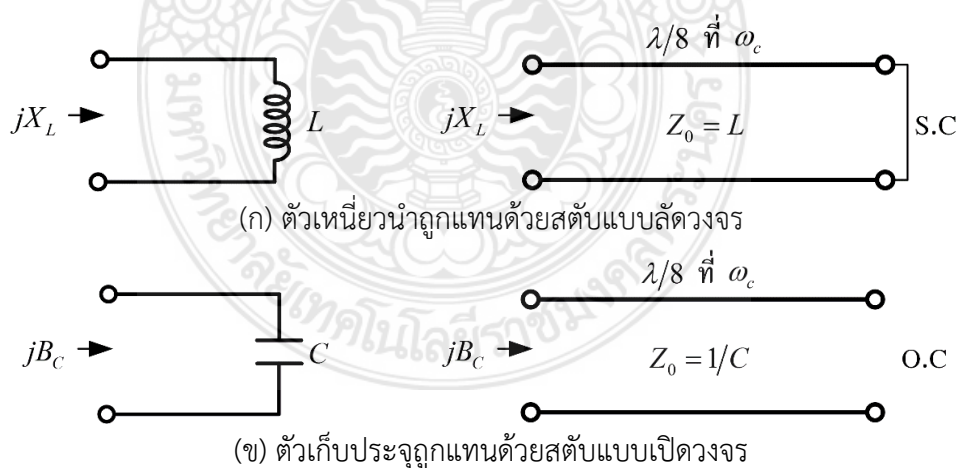
$$jB_C = j\Omega C = jC \tan \beta l \quad (2-88ข)$$

สมการ (2-87) แสดงให้เห็นว่า ตัวเหนี่ยวนำสามารถแทนได้ด้วยสตับแบบลัดวงจร (Short-Circuited Stub) ที่มีความยาวเท่ากับ βl และมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ L ในขณะที่ตัวเก็บประจุสามารถแทนได้ด้วยสตับแบบเปิดวงจร (Open-Circuited Stub) ที่มีความยาวเท่ากับ βl และมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ $1/C$ โดยสมมติว่าอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองเท่ากับ 1

ความถี่คัทออฟ $\omega = \omega_c = 1$ สำหรับวงจรกรองผ่านต่ำต้นแบบ ดังนั้นความถี่คัทออฟสำหรับการแปลงของริชาร์ดมีค่าดังนี้

$$\Omega = 1 = \tan \beta l$$

จากสมการด้านบนจะได้สตับที่มีความยาว $\lambda/8$ เมื่อ λ เป็นค่าความยาวคลื่นที่ความถี่คัทออฟ $\omega_c = 1$ ในทางปฏิบัติแล้ว ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุแบบลัมป์ในวงจรกรองจะถูกแทนด้วย สตับแบบลัดวงจรและสตับแบบเปิดวงจร โดยสตับมีความยาวเท่ากันคือ $l = \lambda/8$ ดังภาพที่ 28



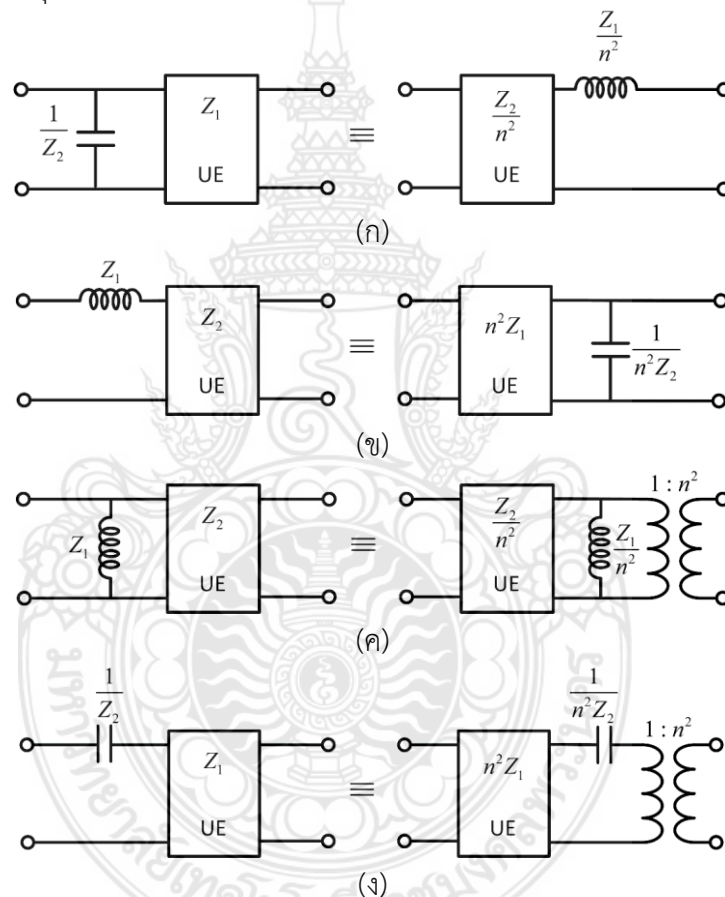
ภาพที่ 28 การแปลงของริชาร์ด

2.6.6 เอกลักษณ์ของคุโรดะ (Kuroda's Identities)

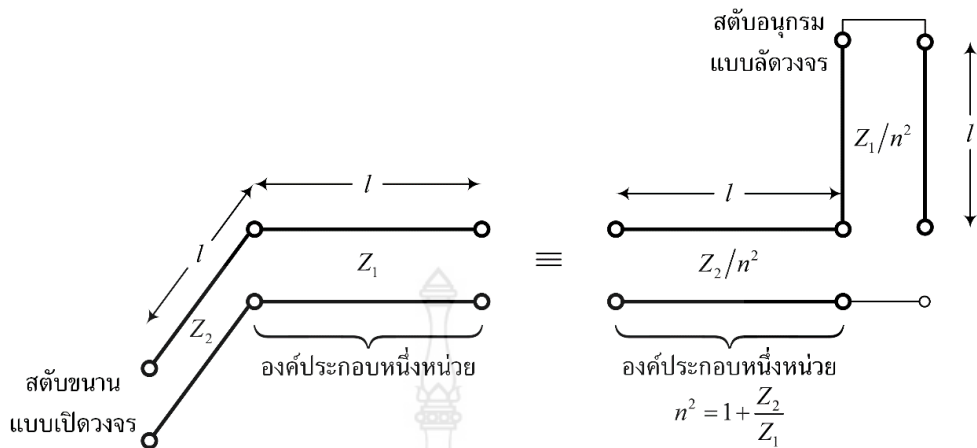
เอกลักษณ์ของคุโรดะเป็นการใช้สายส่วนของสายส่งที่ไม่มีผลต่อผลตอบแทนของวงจรกรอง เพื่อสร้างวงจรกรองย่านไมโครเวฟในทางปฏิบัติ โดยมีการดำเนินการดังนี้

- แยกอุปกรณ์ในวงจรกรองผ่านตัวต้นแบบออกเป็นส่วนๆ โดยการใช้สตับ
- แปลงสตับแบบอนุกรมไปเป็นสตับแบบขนาน (หรือแปลงในทางกลับกัน)
- เปลี่ยนอิมพีแดนซ์คุณลักษณะให้เป็นค่าใช้งานจริง

ส่วนของสายส่งยาว $\lambda/8$ ที่เพิ่มเข้าในวงจรเรียกว่า องค์ประกอบหนึ่งหน่วย (Unit Element : UE) เอกลักษณ์ของคุโรดะแสดงดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 เอกลักษณ์ของคุโรดะ



ภาพที่ 30 วงจรเทียบเคียงของเอกลักษณ์คูลิตซ์ในภาพที่ 29 (ก)

เอกลักษณ์ของคูลิตซ์ในภาพที่ 29 (ก) เขียนในรูปแบบสแต็บและองค์ประกอบหนึ่งหน่วย ได้ดังภาพที่ 30 เมื่อ

$$n^2 = 1 + \frac{Z_2}{Z_1} \tag{2-89}$$

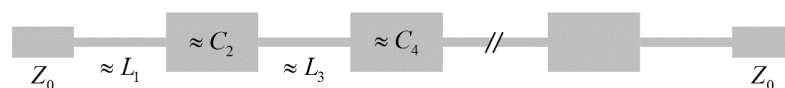
2.6.7 วงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริบ (Microstrip Filters)

การออกแบบวงจรกรองความถี่บนโครงสร้างไมโครสตริบ โดยในการออกแบบจะรวมผลความไม่ต่อเนื่องแบบต่างๆ เพื่อชดเชยผลกระทบที่เกิดขึ้นด้วย วงจรกรองผ่านต่ำแบบอิมพีแดนซ์ขั้น (Stepped-Impedance Low-pass Filter) ภาพที่ 31 (ก) แสดงโครงสร้างไมโครสตริบของวงจรกรองผ่านต่ำแบบอิมพีแดนซ์ขั้นโดยเป็นการคาสเคดของสายที่มีอิมพีแดนซ์สูงและอิมพีแดนซ์ต่ำสลับกันไปไมโครสตริบของวงจรกรองจึงเป็นการสร้างได้โดยตรงจากวงจรกรองผ่านต่ำในภาพที่ 31 (ข) ในการออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำไมโครสตริบแบบอิมพีแดนซ์ขั้น อันดับต้องกำหนดค่าอิมพีแดนซ์สูง และค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ในการกำหนดแนวทางดังนี้

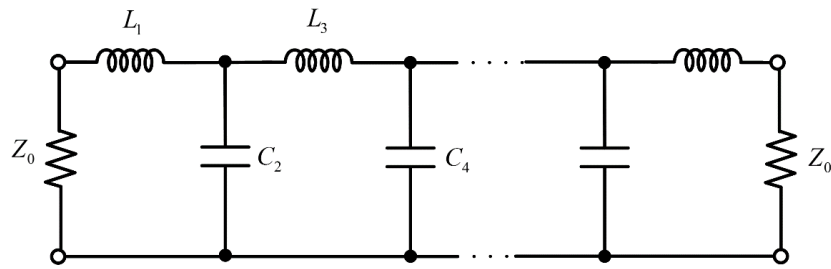
- $Z_{0C} < Z_0 < Z_{0L}$ เมื่อ Z_{0C} เป็นอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ ในขณะที่ Z_{0L} เป็นอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายที่มีอิมพีแดนซ์สูง และ Z_0 เป็นอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายสำหรับวงจรกรองแบบไมโครสตริบแล้ว $Z_0 = 50\Omega$

- ค่า Z_{0C} ที่ต่ำกว่าส่งผลให้การประมาณค่าอุปกรณ์กึ่งลัมป์ของตัวเก็บประจุดีกว่า แต่ความกว้าง W_C ต้องไม่กว้างจนทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นที่ความถี่ใช้งาน

- ค่า Z_{0L} ที่สูงกว่าส่งผลให้การประมาณค่าอุปกรณ์กึ่งลัมป์ของตัวเหนี่ยวนำดีกว่า แต่ต้องไม่สูงมากกระทั่งความกว้าง W_L แคบเกินไป ซึ่งเกิดความยากในการกัดลายวงจร หรือแคบกระทั่งเป็นข้อจำกัดในการไหลของกระแสไฟฟ้า



(ก) โครงสร้างไมโครสตริบของวงจรกรองแบบอิมพีแดนซ์ขั้น



(ข) วงจรข่ายบันไดที่ถูกประมาณค่าด้วยอิมพีแดนซ์ชั้น

ภาพที่ 31 วงจรกรองผ่านต่ำแบบอิมพีแดนซ์ชั้น

เนื่องจากวงจรกรองไมโครสตริปแบบอิมพีแดนซ์ชั้นเกิดความไม่ต่อเนื่องจากความกว้างแถบของไมโครสตริปไม่คงที่ตลอดความยาวสาย ดังแสดงในภาพที่ 32 (ก)

กำหนดให้ไมโครสตริปที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำกว่า (\$Z_{0C}\$) มีความกว้างแถบเท่ากับ \$W_C\$ มีความยาว \$l_C\$ และไมโครสตริปที่มีอิมพีแดนซ์สูงกว่า (\$Z_{0L}\$) มีความกว้างแถบเท่ากับ \$W_L\$ มีความยาว \$l_L\$ ที่บริเวณรอยต่อของความไม่ต่อเนื่องมีวงจรเทียบเคียงดังแสดงในภาพที่ 2-32 (ข) โดยค่าความยาวที่ทำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำ คำนวณได้จากสมการ

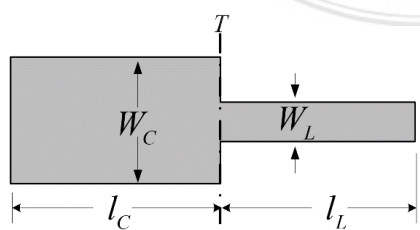
$$\omega L = Z_{0L} \sin\left(\frac{2\pi l_L}{\lambda_{gL}}\right) \tag{2-90}$$

หรือ

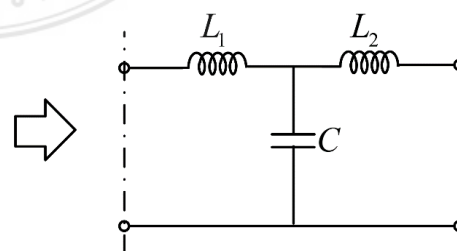
$$l_L = \frac{\lambda_{gL}}{2\pi} \sin^{-1}\left(\frac{\omega L}{Z_{0L}}\right) \tag{2-91}$$

เมื่อ \$\lambda_{gL}\$ เป็นความยาวคลื่นไกตในสายที่มีอิมพีแดนซ์ค่าสูง และ \$\omega\$ เป็นความถี่ที่ต้องการให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความยาวที่ทำให้ได้ค่าความจุไฟฟ้า คำนวณได้จากสมการ

$$\omega C = \frac{1}{Z_{0C}} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_{gC}} l_C\right) \tag{2-92}$$



(ก) ไมโครสตริปที่มีความกว้างแถบไม่คงที่



(ข) วงจรเทียบเคียง

รูปที่ 32 ความไม่ต่อเนื่องของไมโครสตริป

หรือ

$$l_C = \frac{\lambda_{gC}}{2\pi} \sin^{-1}(\omega C Z_{0C}) \quad (2-93)$$

ในทางปฏิบัติค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ (Inductive reactance) ของความกว้างแถบ W_L ต้องรวมผลที่เกิดจากความกว้างแถบ W_C

$$\omega L = Z_{0L} \sin\left(\frac{2\pi l_L}{\lambda_{gL}}\right) + Z_{0C} \tan\left(\frac{\pi l_C}{\lambda_{gC}}\right) \quad (2-94)$$

ความยาวไมโครสตริปที่ทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ คำนวณได้จากสมการ (2-95)

$$l_L = \frac{\lambda_{gL}}{2\pi} \sin^{-1}\left\{\frac{1}{Z_{0L}}\left[\omega L - Z_{0C} \tan\left(\frac{\pi l_C}{\lambda_{gC}}\right)\right]\right\} \quad (2-95)$$

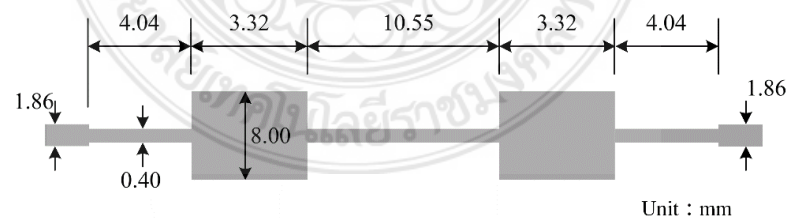
ค่าคาปาซิทีฟซีเซปแตนซ์ (Capacitive Susceptance) ของความกว้างแถบ W_C ต้องรวมผลที่เกิดจากความกว้างแถบ W_L

$$\omega C = \frac{1}{Z_{0C}} \sin\left(\frac{2\pi l_C}{\lambda_{gC}}\right) + \frac{1}{Z_{0L}} \tan\left(\frac{\pi l_L}{\lambda_{gL}}\right) \quad (2-96)$$

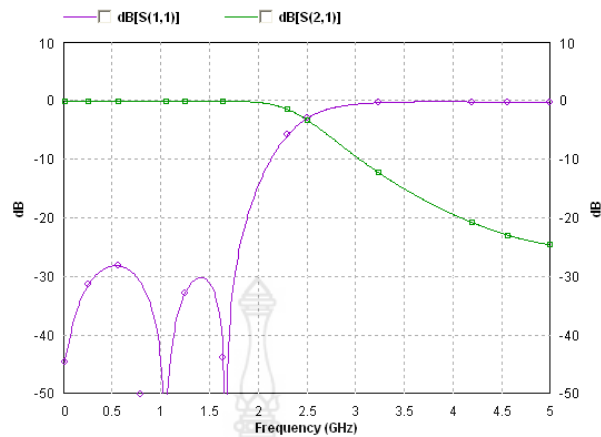
ความยาวไมโครสตริปที่ทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าที่ต้องการ คำนวณได้จากสมการ (2-97)

$$l_C = \frac{\lambda_{gC}}{2\pi} \sin^{-1}\left\{Z_{0C}\left[\omega C - \frac{1}{Z_{0L}} \tan\left(\frac{\pi l_L}{\lambda_{gL}}\right)\right]\right\} \quad (2-97)$$

วงจรกรองผ่านต่ำแบบไมโครสตริปอิมพีแดนซ์ชั้นที่มีผลตอบสนองแบบเชบีเชฟ ระดับรีปเปิล 0.01 dB มีความถี่คัทออฟ 2.2 GHz และต้องการการลดทอนอย่างน้อย 20 dB ที่ความถี่ 3-5 GHz สร้างวงจรบนแผ่นวงจรพิมพ์ RT/Duroid 6006 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 6.15 มีความหนาฐานรองไดอิเล็กตริก 1.27 mm แทนเจนต์การสูญเสีย 0.0027 จำลองด้วยโปรแกรม IE3D แสดงในภาพที่ 26



(ก) วงจรกรองผ่านต่ำแบบไมโครสตริปอิมพีแดนซ์ชั้น



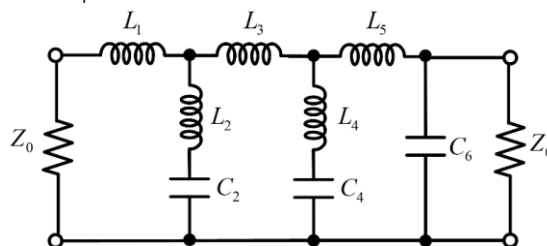
(ข) ผลตอบสนองที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D

ภาพที่ 33 ผลตอบสนองของวงจรรองผ่านต่ำ

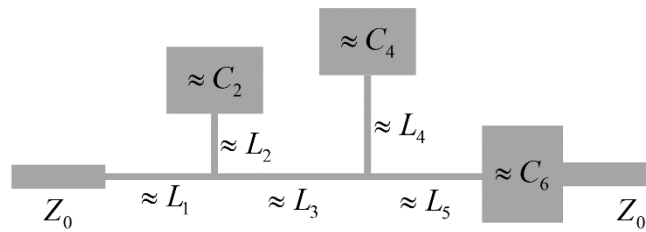
2.6.8 วงจรรองผ่านต่ำอุปกรณ์กึ่งลัมป์แบบมีโพลการลดทอนที่ความถี่ค่าจำกัด (Quasi-lumped Lowpass Filter Having Finite-Frequency Attenuation Poles)

ผลตอบสนองผ่านต่ำบัตเตอร์เวิร์ธและเชบีเซฟเกิดโพลการลดทอนที่ค่าความถี่อนันต์ $f = \infty$ แต่หากต้องการอัตราการลดทอนมาก หรือต้องการผลตอบสนองที่มีความชันสูงขึ้นจำเป็นต้องเพิ่มอุปกรณ์แบบรีแอคแตนซ์ในวงจรรองผ่านต่ำ เพื่อให้การลดทอนมีค่าเป็นอนันต์เกิดที่ความถี่จำกัดค่าหนึ่ง วงจรรองผ่านต่ำแบบดังกล่าวจะมีผลตอบสนองแบบฟังก์ชันเอลลิปติกตามที่ภาพที่ 34 (ก) แสดงวงจรรองผ่านต่ำแบบฟังก์ชันเอลลิปติกที่มีส่วนวงจรรวมโซ่แบบอนุกรม 2 วงจรต่อแบบขนานในวงจรรอง โดยทั้งสองวงจรจะทำหน้าที่ให้เกิดการส่งผ่านเป็นศูนย์ (โพลการลดทอน) ที่ความถี่เรโซแนนท์ ดังนั้นวงจรรองผ่านต่ำในภาพที่ 34 (ก) จึงเกิดโพลการลดทอนขึ้นที่ 2 ความถี่ และที่ความถี่ $f = \infty$ สังเกตว่าวงจรรวมโซ่แบบอนุกรมทั้งสองไม่มีผลต่อผลตอบสนองของวงจรรอง และที่ความถี่ $f = \infty$ ความเหนี่ยวนำ L_1 , L_3 และ L_5 จะไม่ให้สัญญาณผ่านด้วยการที่มีค่ารีแอคแตนซ์อนุกรมเป็นอนันต์ ในขณะที่ความจุ C_6 จะส่งสัญญาณลงกราวด์เนื่องจากมีค่าซัสเซปแตนซ์ขนานเป็นอนันต์ที่ความถี่ $f = \infty$

โครงสร้างแบบไมโครสตริปของวงจรรองผ่านต่ำฟังก์ชันเอลลิปติกแสดงดังภาพที่ 34 (ข) ในทำนองเดียวกันกับวงจรรองผ่านต่ำแบบอิมพีแดนซ์ขึ้น ส่วนสายส่งสั้นๆ ที่มีอิมพีแดนซ์สูงและอิมพีแดนซ์ต่ำจะถูกประมาณค่าอุปกรณ์ลัมป์ในวงจร



(ก) วงจรรองผ่านต่ำฟังก์ชันเอลลิปติกแบบอุปกรณ์ลัมป์



(ข) วงจรกรองผ่านต่ำฟังก์ชันเอลลิปติกแบบไมโครสตริป

ภาพที่ 34 วงจรกรองผ่านต่ำฟังก์ชันเอลลิปติก

2.6.7 วงจรกรองผ่านแถบไมโครสตริปแบบวงเปิด (Open-loop Microstrip Bandpass Filter)

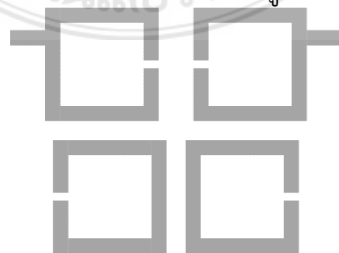
เรโซเนเตอร์ไมโครสตริปแบบวงเปิดจัดเป็นเรโซเนเตอร์แบบสายส่งยาว $\lambda_g/2$ ที่มีสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ปลายทั้งสองด้านของสายส่ง โดยสายส่งดังกล่าวถูกเลือกใช้สายส่งแบบไมโครสตริป การพับสายไมโครสตริปให้เป็นวงสี่เหลี่ยมโดยให้ปลายไมโครสตริปทั้งสองด้านพับเข้าหากันให้เกิดช่องแคบส่งผลให้เรโซเนเตอร์ใช้พื้นที่ลดลงและเกิดความยืดหยุ่นในการจัดวางเรโซเนเตอร์ในวงจรกรองเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงแบบต่างๆ ภาพที่ 35 แสดงตัวอย่างการจัดวางตำแหน่งของเรโซเนเตอร์ภายในวงจรกรองผ่านแถบ วงจรกรองผ่านแถบในภาพที่ 35 (ค) ที่เรโซเนเตอร์ที่ 1 และ 4 ถูกวางให้ช่องแคบที่เกิดสนามไฟฟ้าสูงสุดหันเข้าหากันเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงไขว้ (Cross Coupling) การเชื่อมโยงไขว้จะสร้างคู่ของโพลการลตทอนที่ความถี่จำกัดค่าหนึ่งส่งผลให้เกิดผลตอบสนองแบบเอลลิปติก ดังแสดงในภาพที่ 36 การเกิดคู่ของโพลการลตทอนจะเกิดตามจำนวนการเชื่อมโยงไขว้ กล่าวคือ ถ้าวางจรมีการเชื่อมโยงไขว้ n ตำแหน่งจะเกิดโพลการลตทอน n คู่



(ก) วางแบบสลับด้านที่เกิดช่องแคบ

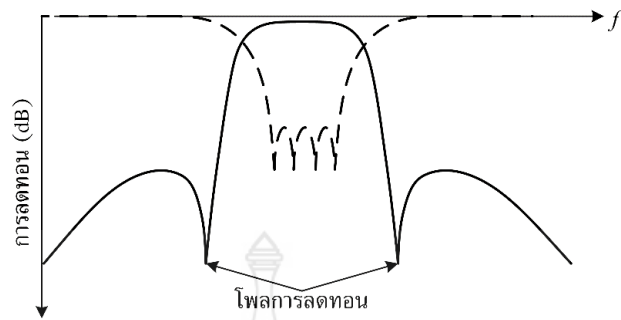


(ข) วางแบบให้ด้านช่องแคบอยู่แนวเดียวกัน

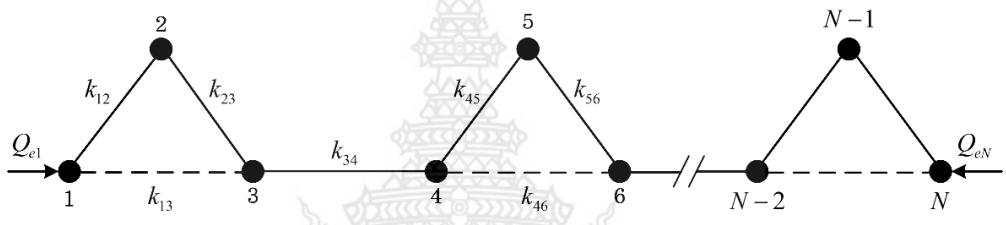


(ค) วางแบบให้เรโซเนเตอร์อินพุตและเอาต์พุตเกิดการเชื่อมโยงกัน

ภาพที่ 35 การจัดวางเรโซเนเตอร์ไมโครสตริปวงเปิดในวงจรกรองผ่านแถบ



ภาพที่ 36 คู่ของโพลการลดทอนในผลตอบสนองผ่านแถบเกิดจากการเชื่อมโยงไขว้ในวงจร



(ก) โดอะแกรมหน่วยสามส่วนที่ต่อแบบคาสเคด



ภาพที่ 37 วงจรกรองผ่านแถบแบบสามส่วน

2.6.8 วงจรกรองผ่านแถบไมโครสตริปแบบสามส่วน (Trisection Microstrip Bandpass Filter)

วงจรกรองผ่านแถบแบบสามส่วนเป็นวงจรหนึ่งที่ใช้การเชื่อมโยงไขว้เพื่อสร้างโพล การลดทอนในผลตอบสนองต่อความถี่ หน่วยสามส่วน (Trisection Unit) ประกอบด้วยสามเรโซเนเตอร์ไดอะแกรมหน่วยสามส่วนแสดงดังภาพที่ 37 (ก) เมื่อจุดแสดงเรโซเนเตอร์ เส้นทึบแสดงการเชื่อมโยงหลักหรือการเชื่อมโยงตรง (Main or Direct Coupling) และเส้นประแสดงการเชื่อมโยงไขว้ หลักการของวงจรกรองผ่านแถบแบบสามส่วนคือ ถ้าการเชื่อมโยงตรงมีค่าเป็นบวก และการเชื่อมโยงไขว้มีค่าเป็นบวกด้วยแล้ว ผลตอบสนองผ่านแถบจะเกิดโพลการลดทอนที่ความถี่ด้านต่ำกว่าของแถบผ่าน ดังแสดงในภาพที่ 37 (ข) ในขณะที่ถ้าการเชื่อมโยงตรงมีค่าเป็นบวกแต่การเชื่อมโยงไขว้มีค่าเป็นลบแล้ว ผลตอบสนองผ่านแถบจะเกิดโพลการลดทอนที่ความถี่ด้านสูงกว่าของแถบผ่าน ดังแสดงในภาพที่ 37 (ค) โดยการเชื่อมโยงไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบ ในขณะที่การเชื่อมโยงแม่เหล็กมีค่าเป็นบวก

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุริยาจตุ เสาวคนธ์ (2554 : บทคัดย่อ) ได้พัฒนาชุดสื่อประสมสำหรับการสอนทฤษฎีวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ผลการวิจัยพบว่า สื่อประสมสำหรับการสอนทฤษฎีวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ประกอบด้วย เอกสารประกอบการสอน โปรแกรมนำเสนอเพาเวอร์พอยต์ ชุดสาธิตเพื่อทดสอบทฤษฎีและโปรแกรมการวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งผลการทดสอบชุดสาธิตเพื่อทดสอบทฤษฎีและโปรแกรมการวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ พบว่า มีผลการวิเคราะห์ห้วงจรถูกต้องตามทฤษฎี มีผลการประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน พบว่า ชุดสื่อประสมมีคุณภาพโดยรวมทุกด้านอยู่ในระดับมากที่สุด มีผลการทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของผู้เรียน พบว่า มีผลสัมฤทธิ์โดยเฉลี่ย 5 บทเรียนเท่ากับร้อยละ 72.71 และผลประเมินความพึงพอใจของผู้เรียนที่ผ่านการเรียนการสอนด้วยสื่อประสมที่พัฒนาขึ้น พบว่า ผู้เรียนมีความพึงพอใจต่อบทเรียนที่ใช้สื่อประสมที่พัฒนาขึ้นอยู่ในระดับมาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า สื่อประสมที่พัฒนาขึ้นคุณภาพสามารถนำไปประกอบการสอนทฤษฎีวงจรไฟฟ้ากระแสสลับได้เป็นอย่างดี

ศุขาทจุ ชุมขวัญ (2552 : บทคัดย่อ) ได้ทำการสร้างและทดสอบประสิทธิภาพชุดการสอนโดยใช้สื่อประสม และทำการเปรียบเทียบความก้าวหน้าทางการเรียนของนักเรียนก่อนเรียนและหลังเรียน ซึ่งชุดการสอนประกอบด้วย คู่มือครู สื่อการสอน แบบทดสอบท้ายหน่วยเรียนและแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ผลการวิจัยพบว่า ชุดการสอนที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพร้อยละ 76.80/72.30 ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ร้อยละ 80/80 และจากการเปรียบเทียบคะแนนเฉลี่ยจากแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน พบว่านักเรียนมีความก้าวหน้าทางการเรียนเพิ่มขึ้นโดยที่นักเรียนกลุ่มสูงและกลุ่มต่ำมีคะแนนเฉลี่ยความก้าวหน้าทางการเรียนต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 จากการเรียนด้วยชุดการสอนแบบสื่อประสมที่สร้างขึ้น

อำนาจ ปาละหงษา (2551 : บทคัดย่อ) ได้ทำการพัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพชุดการสอนแบบสื่อประสม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพชุดการสอนแบบสื่อประสม เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วย คู่มือครู สื่อการสอน ผลการวิจัยพบว่า ชุดการสอนแบบสื่อประสมที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพเท่ากับ 78.30/82.11 ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ 80/80 ที่กำหนดไว้ จากการสำรวจ

ความพึงพอใจของนักศึกษาที่ได้รับการสอนนี้มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก และเมื่อทำการวิเคราะห์ความก้าวหน้าทางการเรียนพบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 โดยคะแนนเฉลี่ยหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียน แสดงว่านักศึกษามีความรู้เพิ่มขึ้นหลังจากเรียนด้วยชุดการสอนนี้

สรุปได้ว่า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างและหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสม มีการกำหนดเกณฑ์ประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับ 80/80 และมีการเปรียบเทียบคะแนนเฉลี่ยจากแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน อีกทั้งสามารถทำให้ผู้เรียนมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนที่สูงขึ้นหลังจากเรียนด้วยชุดสื่อประสม จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าผลการหาประสิทธิภาพของชุดสื่อประสมมีค่าต่ำกว่า 80/80 ที่ได้กำหนด ดังนั้นผู้วิจัยจะพิจารณาและหาแนวทางในการดำเนินการให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

จากแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม โดยชุดสื่อประสม ประกอบไปด้วย คู่มือครู สื่อการสอน คู่มือผู้เรียน แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน และแบบสอบถามความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริป



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริป สำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะผู้วิจัยได้กำหนดวิธีการดำเนินการเป็นขั้นตอนดังนี้

- 3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง
- 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
- 3.3 การสร้างและหาคุณภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
- 3.4 วิธีดำเนินการทดลอง
- 3.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล
- 3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล
- 3.7 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

1. ประชากร คือ นักเรียนระดับปริญญาตรี หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2. กลุ่มตัวอย่าง คือ นักเรียนระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ลงทะเบียนเรียนรายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ ภาคการเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2558 จำนวน 15 คน ทำการสุ่มแบบเจาะจง (Purposive Sampling)

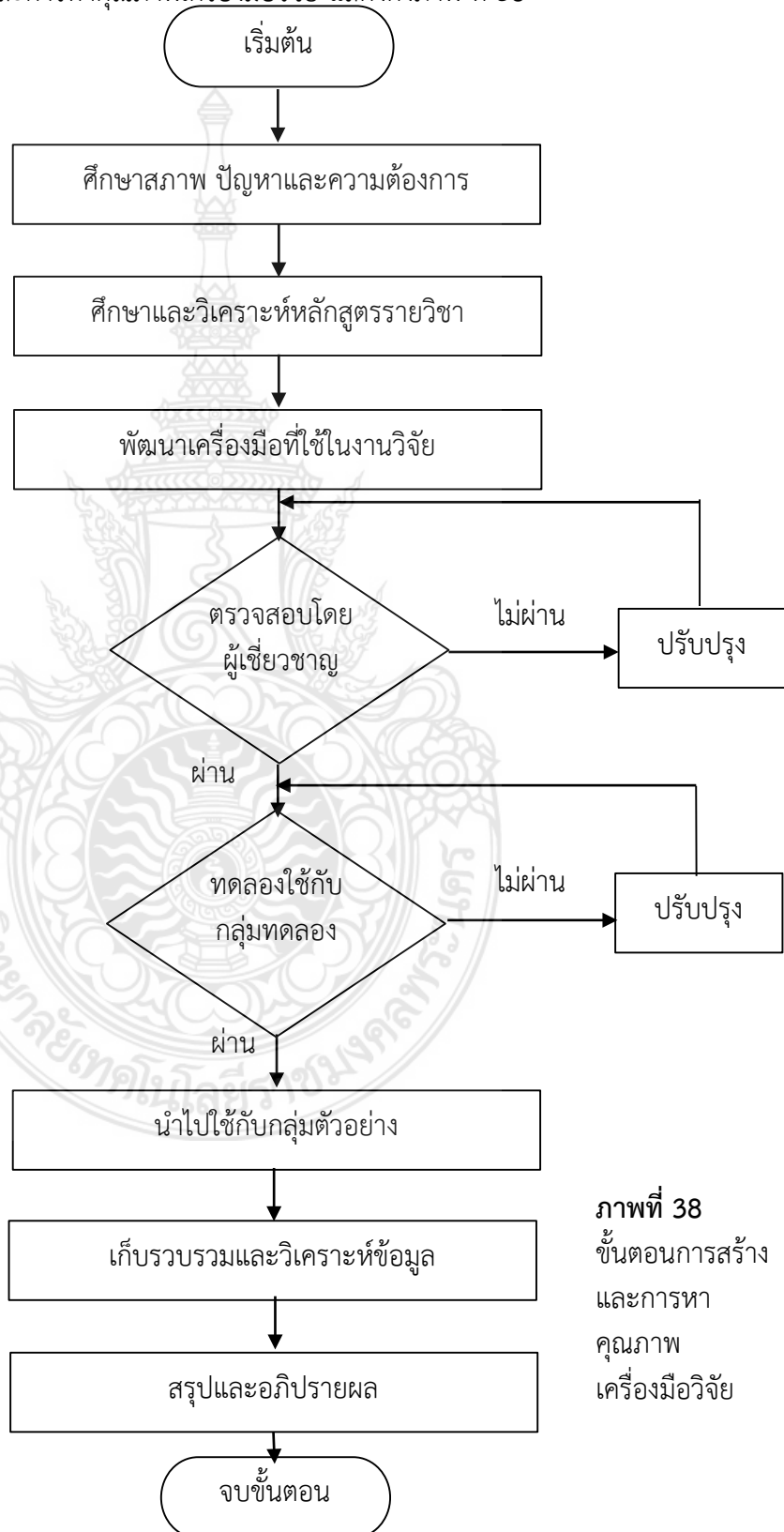
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยเป็นเครื่องมือที่ผู้วิจัยออกแบบและสร้างขึ้น ประกอบด้วย

1. ชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริป แบ่งออกเป็น 3 หน่วย ดังนี้
 - หน่วยที่ 1 สายไมโครสตริป
 - หน่วยที่ 2 วงจรเรโซแนนท์
 - หน่วยที่ 3 วงจรรองความถี่ไมโครเวฟ
2. แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน เรื่องสายอากาศไมโครสตริป รายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ เป็นข้อสอบแบบปรนัย ชนิดเลือกตอบ 4 ตัวเลือก จำนวน 30 ข้อ
3. แบบสอบถามความพึงพอใจของนักเรียนที่มีต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น เป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า (Rating Scale) 5 ระดับ

3.3 การสร้างและหาคุณภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย ชุดสื่อประสมแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชาไมโครเวฟ และแบบสอบถามความพึงพอใจของนักเรียน ดังนี้ มีขั้นตอนการสร้างและการหาคุณภาพเครื่องมือวิจัย แสดงดังภาพ ที่ 38



ภาพที่ 38
ขั้นตอนการสร้าง
และการหา
คุณภาพ
เครื่องมือวิจัย

จากภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการสร้างและการหาคุณภาพเครื่องมือวิจัยเริ่มจากการศึกษาสภาพปัญหาและความต้องการเกี่ยวกับรายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ เพื่อหาประเด็นปัญหา รวมทั้งแนวทางและวิธีการแก้ปัญหา ศึกษาและวิเคราะห์หลักสูตรรายวิชา เพื่อทราบจุดมุ่งหมายของหลักสูตร โครงสร้างของหลักสูตร เนื้อหาสาระของรายวิชา แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปกำหนดวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาเครื่องมือที่ต้องใช้ในการวิจัยครั้งนี้ แล้วนำเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นไปประเมินความเหมาะสมโดยอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้เชี่ยวชาญ ถ้าไม่ผ่านทำการปรับปรุงแก้ไข เมื่อผ่านการประเมินความเหมาะสมจึงนำเครื่องมือไปทดลองใช้กับกลุ่มทดลองเพื่อหาคุณภาพของชุดการสอนแบบสื่อประสม ถ้าผลการทดลองไม่ผ่านทำการปรับปรุงแก้ไข หลังจากนั้นนำไปใช้กับกลุ่มตัวอย่างเพื่อทดสอบสมมติฐาน รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการนำไปใช้เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย สามารถอธิบายรายละเอียดขั้นตอนได้ดังนี้

3.3.1 การศึกษาสภาพ ปัญหาและความต้องการ

ผู้วิจัยได้ศึกษาสภาพ ปัญหาและความต้องการการจัดการเรียนการสอนรายวิชาไมโครเวฟ โดยการศึกษาเอกสาร ตำราและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งจากการสอบถามกลุ่มตัวอย่างที่เป็นนักศึกษาซึ่งผ่านการเรียนวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์เทเวศร์ จำนวน 18 คน โดยใช้แบบสอบถามความคิดเห็นพบว่า ความสำคัญของรายวิชานี้อยู่ในระดับมาก ปัญหาด้านเนื้อหาวิชา คือ เนื้อหาวิชาซับซ้อนเข้าใจยากและปริมาณของเนื้อหาดีมาก ปัญหาด้านสื่อประกอบการเรียนการสอน คือ สื่อการสอนไม่หลากหลาย มีจำนวนไม่เพียงพอต่อผู้เรียน และไม่สะดวกต่อการใช้งาน โดยมีนักศึกษาจำนวนมากกว่า 50% เห็นควรให้มีการพัฒนาสื่อการสอน ซึ่งเมื่อสอบถามถึงการจัดลำดับความสำคัญเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยของความต้องการให้พัฒนาสื่อประเภทต่างๆ พบว่า ควรพัฒนาสื่อแบบชุดสไลด์ การนำเสนอเพาเวอร์พอยต์ โปรแกรมจำลอง บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน และตำรา/เอกสารประกอบการเรียน ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของศรีณีย์ และสมศักดิ์ (2552) ได้ทำการศึกษาสภาพการเรียนการสอนวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟในปัจจุบันโดยใช้แบบสอบถามและบทสัมภาษณ์ความคิดเห็นจากอาจารย์ผู้สอน จำนวน 10 คน และผู้เรียนจำนวน 40 คน ในด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง พบว่า ความสำคัญและความจำเป็นในการเรียนวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟมีความต้องการอยู่ในระดับมากที่สุด และสิ่งที่ต้องการพัฒนาในรายวิชาคือด้านสื่อการเรียนการสอนที่มีความต้องการอยู่ในระดับมาก และจากข้อมูลวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์เทเวศร์ ปีการศึกษา 2550 นักศึกษาจำนวน 18 คน มีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนโดยเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 63.4 และปีการศึกษา 2551 นักศึกษาจำนวน 39 คน มีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนโดยเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 58.7 และปีการศึกษา 2552 นักศึกษาจำนวน 26 คน มีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนโดยเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 61.3 ซึ่งพบว่าผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ปานกลางค่อนข้างต่ำ

3.3.2 ศึกษาและวิเคราะห์หลักสูตรรายวิชา

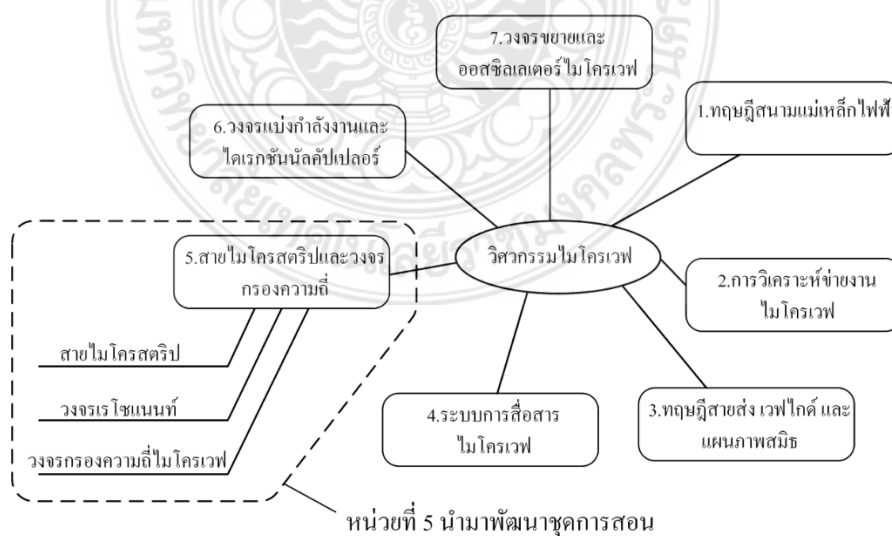
คณะผู้วิจัยได้ศึกษาและวิเคราะห์หลักสูตรรายวิชาไมโครเวฟ (05-115-310) หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (หลักสูตรใหม่ พ.ศ. 2550) เพื่อกำหนดหัวข้อ

เรื่องรายละเอียดของเนื้อหาและวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม โดยจะพิจารณาจากคำอธิบายรายวิชา ขั้นตอนการวิเคราะห์หลักสูตรรายวิชา ดังนี้

3.3.2.1 ศึกษาหลักสูตรรายวิชาไมโครเวฟ ผู้วิจัยได้ศึกษาหลักสูตรครุศาสตร์ อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (หลักสูตรใหม่ พ.ศ. 2550) รายวิชาไมโครเวฟ รหัสวิชา 05-115-310 จำนวน 3 หน่วยกิต เวลาเรียน 4 คาบ/สัปดาห์ แบ่งเป็นทฤษฎี 2 คาบ และปฏิบัติ 2 คาบ พบว่า หลักสูตรรายวิชาไมโครเวฟมุ่งเน้นถึงการคำนวณ การวิเคราะห์และการออกแบบวงจร ไมโครเวฟเพื่อเป็นพื้นฐานในการนำความรู้ไปเชื่อมโยงกับการวิเคราะห์และการออกแบบวงจร ไมโครเวฟอื่นได้ ซึ่งการวิเคราะห์และออกแบบวงจรรองความถี่ไมโครเวฟเกี่ยวข้องกับผลตอบสนอง ทางความถี่ การแก้ปัญหาในโดเมนความถี่ซับซ้อนกว่าการแก้ปัญหาในโดเมนเวลาที่พบในชีวิตประจำวัน และจากคำอธิบายรายวิชาไมโครเวฟต้องการให้ผู้เรียนศึกษาและปฏิบัติเกี่ยวกับ สมการของแมกซ์เวลล์ เงื่อนไขขอบเขตสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทฤษฎีสายส่ง สายส่งไมโครเวฟ ท่อนำคลื่น การวิเคราะห์ข่ายงานไมโครเวฟ การใช้งานแผนภาพสมิท การแมทซ์อิมพีแดนซ์ เรโซเนเตอร์ ไมโครเวฟ วงจรแบ่งกำลังงานและไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์ วงจรกรองไมโครเวฟ วงจรขยายไมโครเวฟ วงจรออสซิลเลเตอร์ ระบบสื่อสารไมโครเวฟ และการประยุกต์ใช้งานไมโครเวฟ

ผลการวิเคราะห์หลักสูตรรายวิชาโดยให้แผนผังความคิด (Mind Map) ประกอบไปด้วย 7 หน่วย ดังภาพที่ 3-3 ซึ่งหน่วยที่นำมาสร้างชุดการสอนแบบสื่อประสม คือ หน่วยที่ 5 สายไมโครสตริปและ วงจรรองความถี่ เนื่องจากหน่วยนี้เป็นพื้นฐานในการนำการคำนวณ การวิเคราะห์และการออกแบบ วงจรไมโครเวฟอื่น ๆ ได้ หน่วยเรียนนี้มีเนื้อหาที่ต้องมีการเชื่อมโยงจากวงจรไฟฟ้าไปสู่สายส่ง คุณสมบัติของวงจรจะถูกอธิบายด้วยผลตอบสนองต่อความถี่ ดังนั้นต้องใช้สื่อการสอนหลายอย่าง ประกอบการอธิบาย

3.3.2.2 วิเคราะห์เนื้อหาและแบ่งบทเรียน ผู้วิจัยได้วิเคราะห์เนื้อหาที่สำคัญของบทเรียน ประกอบด้วย สายไมโครสตริป วงจรเรโซแนนท์ และวงจรรองความถี่ไมโครเวฟ



ภาพที่ 39 แผนผังความคิดผลการวิเคราะห์หลักสูตรรายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ

3.3.2.3 ประเมินความสำคัญของบทเรียน ผู้วิจัยทำการพิจารณาตัดหัวเรื่องที่มีความสำคัญน้อยออกไปหากเวลาจำนวนหรือไม่เน้นมากแล้วรวบรวมหัวเรื่องที่ได้แล้วมาประเมินความสำคัญของแต่ละบทเรียนอีกครั้งว่าแต่ละหัวเรื่องมีประโยชน์หรือสนับสนุนให้เกิดการเรียนรู้ด้านใดบ้าง

3.3.2.4 กำหนดรายละเอียดเนื้อหาและประเมินความสำคัญ เพื่อกำหนดรายละเอียดของเนื้อหาในแต่ละบทเรียนแล้วทำการประเมินความสำคัญรายละเอียดของเนื้อหา

3.3.2.5 กำหนดวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม เพื่อระบุพฤติกรรมที่ต้องการให้ผู้เรียนมีการเปลี่ยนแปลง หลังผ่านกระบวนการเรียนการสอนในบทเรียนนั้น ๆ แล้ว

3.3.2.6 ตรวจสอบโดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 ท่าน โดยนำผลการวิเคราะห์หลักสูตรรายวิชาที่ผู้วิจัยได้ปรับปรุงเรียบร้อยแล้วไปให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินความเหมาะสมของหน่วยเรียนบทเรียน หัวข้อย่อย และวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม จากนั้นนำข้อเสนอแนะต่าง ๆ ไปปรับปรุงแก้ไข

3.3.2.7 หลักสูตรรายวิชาไมโครเวฟที่ผ่านการวิเคราะห์จากผู้เชี่ยวชาญ สามารถนำไปพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยได้

3.3.3 การพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย ชุดสื่อประสม และแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชาไมโครเวฟ มีขั้นตอนดังนี้

3.3.3.1 ออกแบบชุดการสอน ผู้วิจัยได้นำวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมที่ได้จากการวิเคราะห์หลักสูตรในหัวข้อที่ 3.2 มาเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างชุดสื่อประสม แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน และแบบสอบถามความพึงพอใจของผู้เรียน

3.3.3.2 สร้างชุดสื่อประสม ประกอบด้วย คู่มือครู สื่อการสอน คู่มือผู้เรียน โดยมีรายละเอียดดังนี้

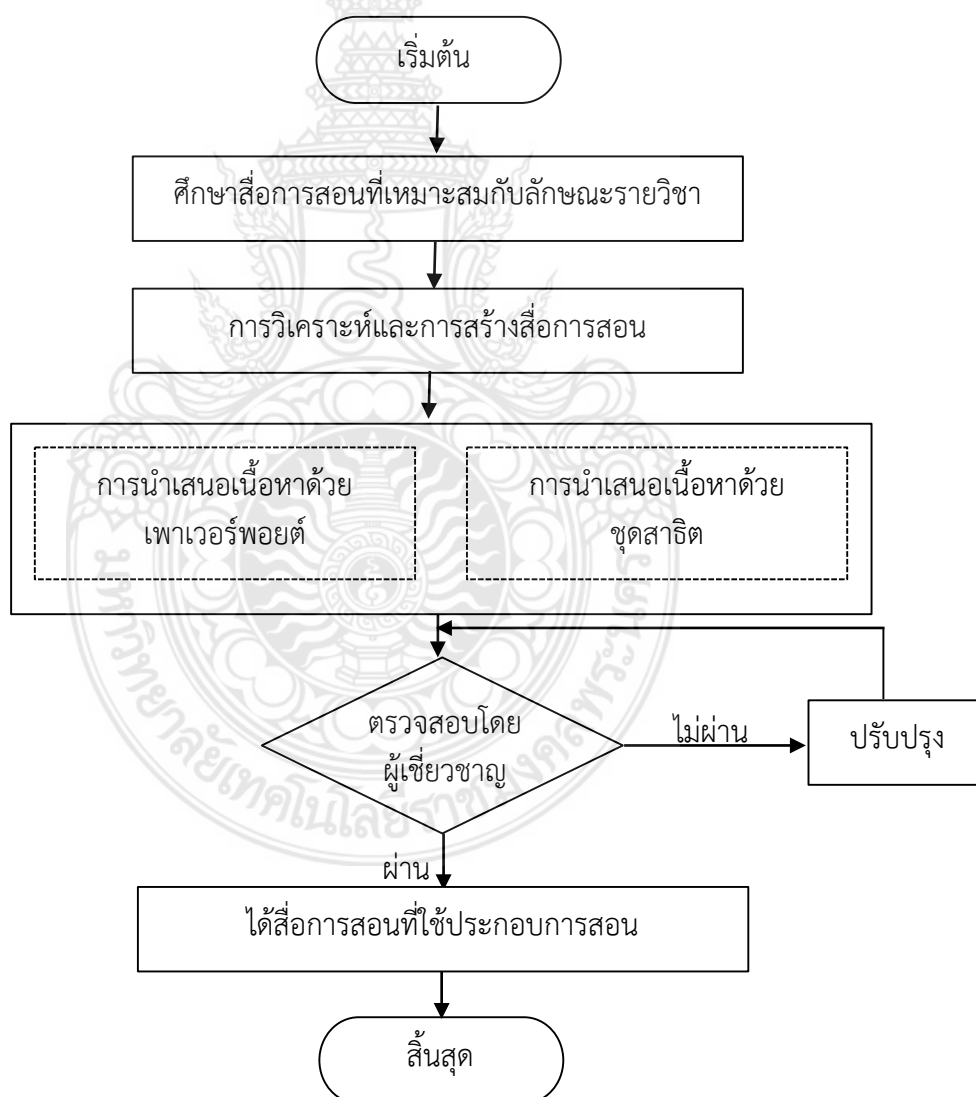
ก. คู่มือครู เป็นชุดเอกสารที่จัดเตรียมไว้สำหรับครูผู้สอนในการดำเนินกิจกรรมการเรียนการสอน ประกอบด้วย วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม การนำเข้าสู่บทเรียน ตารางปฏิบัติการใบเนื้อหา แบบร่างกระดาน และแบบทดสอบ

คณะผู้วิจัยเริ่มจากศึกษาเอกสาร ตำรา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรเรโซแนนท์และวงจรรองความถี่ไมโครเวฟ เพื่อกำหนดรายละเอียดเนื้อหาให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม จากนั้นวิเคราะห์ความรู้พื้นฐานที่จำเป็นแต่ละบทเรียน เพื่อกำหนดความรู้เดิมที่ผู้เรียนจำเป็นต้องมีความรู้มาก่อนที่จะเรียนในบทเรียน และทำการออกแบบการนำเข้าสู่บทเรียนเพื่อเป็นการกระตุ้นความสนใจ และสร้างปัญหาในแต่ละบทเรียนเพื่อให้ผู้เรียนเกิดความสนใจและอยากรู้ในเรื่องที่จะเรียนมากขึ้น ซึ่งกระบวนการทั้งหมดได้กำหนดไว้ในตารางปฏิบัติการสอน โดยเป็นทำหน้าที่กำหนดกรอบเวลาให้สอดคล้องกับเนื้อหาบทเรียนและรูปแบบการสอนในแต่ละขั้นตอน ต่อมาสร้างใบเนื้อหาและแบบร่างกระดานที่ใช้ประกอบการเรียนการสอนและสร้างแบบทดสอบที่ใช้ในการวัดความรู้หลังเรียนในแต่ละบทเรียน ดังตารางที่ 1 เมื่อสร้างคู่มือครูเรียบร้อยแล้วได้ตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาและนำข้อเสนอแนะไปปรับปรุงแก้ไขจนได้คู่มือครูที่สมบูรณ์

ตารางที่ 1 จำนวนใบเนื้อหา แบบร่างกระดาน และแบบทดสอบหลังเรียน

บทเรียนที่	จำนวน		
	ใบเนื้อหา	แบบร่างกระดาน	แบบทดสอบหลังเรียน
1. สายไมโครสตริป	19 หน้า	29 เฟรม	15 ข้อ
2. วงจรเรโซแนนท์	36 หน้า	64 เฟรม	15 ข้อ
3. วงจรกรองความถี่ไมโครเวฟ	36 หน้า	85 เฟรม	15 ข้อ
รวม	91 หน้า	178 เฟรม	45 ข้อ

ข. สื่อการสอน เป็นสื่อที่ใช้ประกอบการสอนร่วมกับเนื้อหาที่ได้จัดทำขึ้น เพื่อใช้อธิบายขยายความในเนื้อหา ช่วยให้ผู้เรียนสามารถทำความเข้าใจได้ง่ายและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น มีขั้นตอนการสร้างสื่อการสอน ดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 ขั้นตอนการสร้างสื่อการสอน

จากภาพที่ 40 การสร้างสื่อการสอน ผู้วิจัยเริ่มจากการศึกษาสื่อการสอนที่เหมาะสมกับลักษณะรายวิชา เนื้อหาบทเรียนและวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมของแต่ละบทเรียน ซึ่งได้จากการสัมภาษณ์อาจารย์ผู้สอน ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 ท่าน จากนั้นนำมาเป็นแนวทางในการเลือกและสร้างสื่อการสอนให้สามารถใช้งานได้สะดวกและเหมาะสมกับเนื้อหาบทเรียน โดยผู้วิจัยได้เลือกสื่อที่ใช้ประกอบด้วย การนำเสนอเนื้อหาด้วยเพาเวอร์พอยต์ และการนำเสนอเนื้อหาด้วยชุดสาธิต ดังนี้

- การนำเสนอเนื้อหาด้วยเพาเวอร์พอยต์ เป็นการนำแบบร่างกระดานมาปรับปรุงให้อยู่ในรูปแบบซีดีสร้างจากโปรแกรมสำเร็จรูปไมโครซอฟต์ออฟฟิต (Microsoft Office) ด้วยเพาเวอร์พอยต์ ซึ่งการนำเสนอเนื้อหาจะใช้ประกอบการสอนทุกบทเรียน ซึ่งการสร้างจะสอดคล้องกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมทั้งหมด ดังตัวอย่างภาพที่ 41 – ภาพที่ 42



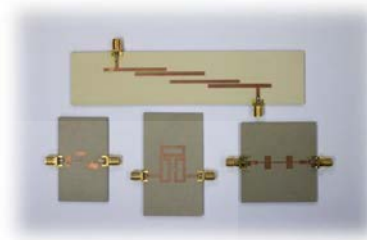
ภาพที่ 41 ตัวอย่างการนำเสนอเนื้อหาด้วยเพาเวอร์พอยต์ บทเรียนที่ 1 สายไมโครสตริป



ภาพที่ 42 ตัวอย่างการนำเสนอเนื้อหาด้วยเพาเวอร์พอยต์ บทเรียนที่ 2 วงจรเรโซแนนท์

หน่วยการเรียนรู้ที่ 3

วงจรกรองความถี่ไมโครเวฟ (Microwave Filters)



ภาพที่ 43 ตัวอย่างการนำเสนอเนื้อหาด้วยเพาเวอร์พอยต์ บทเรียนที่ 3 วงจรกรองความถี่ไมโครเวฟ

- การนำเสนอเนื้อหาด้วยชุดสไลด์ เป็นการจำลองการทำงานจากทฤษฎีมาใช้ประกอบการสอนจำนวน 3 บทเรียน ประกอบด้วย สายไมโครสตริป วงจรเรโซแนนท์ และวงจรกรองความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งการออกแบบชุดสไลด์แบ่งออกเป็น 4 วงจร ดังนี้

1. การออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำแบบไมโครสตริปอิมพีแดนซ์ขึ้น

กำหนดคุณสมบัติของวงจรกรองผ่านต่ำให้มีผลตอบสนองแบบเชบีเชฟ อันดับ 5 และต้องการริปเปิลไม่เกิน 0.01 dB และมีความถี่คัทออฟ $f_c = 2.2\text{GHz}$ วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำต้นแบบมีค่าองค์ประกอบภายในวงจรดังนี้ (Hong and Lancaster, 2001)

$$g_0 = g_6 = 1.0$$

$$g_1 = g_5 = 0.7563$$

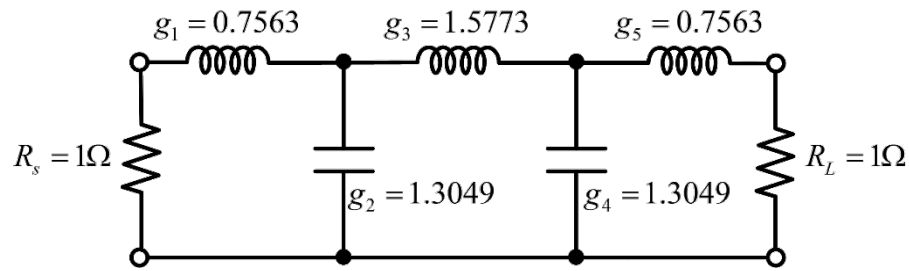
$$g_2 = g_4 = 1.3049$$

$$g_3 = 1.5773$$

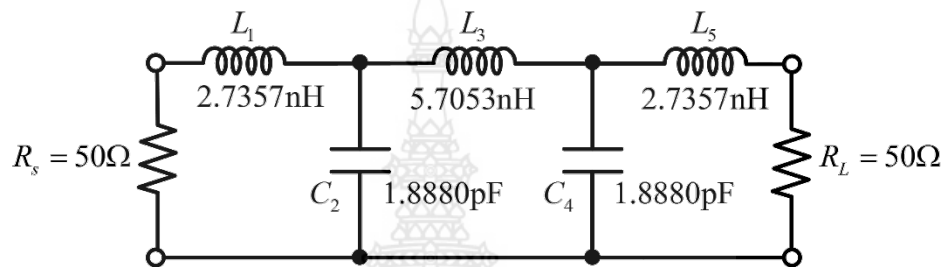
$$\Omega_c = 1$$

วงจรขายันไดของวงจรกรองผ่านต่ำต้นแบบ แสดงดังภาพที่ 44 วงจรนี้จะถูกแปลงความถี่คัทออฟจาก $\Omega_c = 1$ ไปสู่ความถี่คัทออฟใหม่ที่ต้องการคือ $\omega_c = 2\pi f_c$ และสเกลอิมพีแดนซ์ไปสู่ค่า $Z_0 = 50\Omega$ ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุในวงจรที่เกิดจากการแปลงความถี่และการสเกลอิมพีแดนซ์คำนวณได้จากสมการ (2-86) และสูตรในภาพที่ 2-27

$$L_1 = L_5 = \frac{Z_0 g_1}{\omega_c} = \frac{(50)(0.7563)}{(2\pi \times 2.2 \times 10^9)} = 2.7357 \text{ nH}$$



(ก) วงจรกรองผ่านต่ำอันดับ 5 แบบผลตอบสนองแบบเชบีเชฟ อันดับ 5

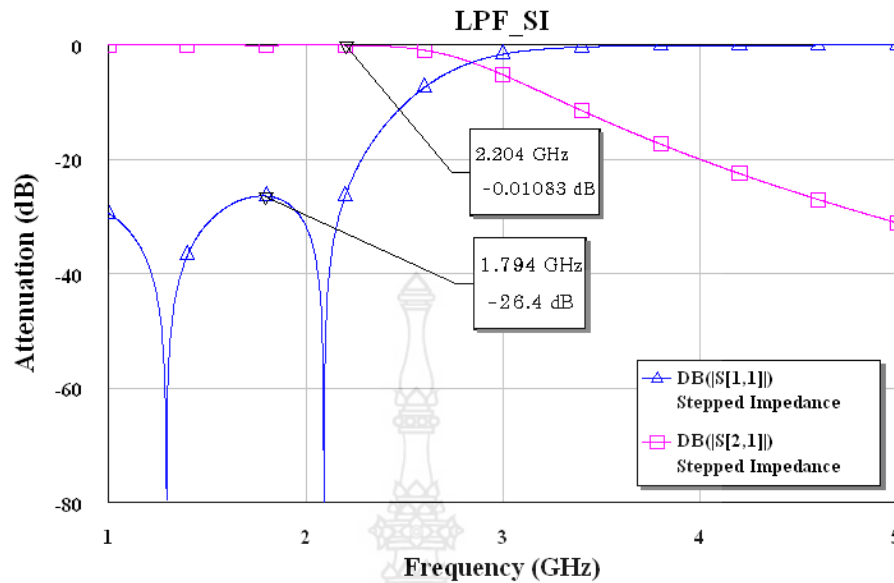
(ข) วงจรกรองผ่านต่ำที่มีความถี่คัทออฟ $f_c = 2.2\text{GHz}$ และมีอิมพีแดนซ์ $Z_0 = 50\Omega$

ภาพที่ 44 วงจรกรองผ่านต่ำอันดับและวงจรกรองที่ถูกแปลงความถี่และอิมพีแดนซ์

$$L_3 = \frac{Z_0 g_3}{\omega_c} = \frac{(50)(1.5773)}{(2\pi \times 2.2 \times 10^9)} = 5.7053 \text{ nH}$$

$$C_2 = C_4 = \frac{g_2}{Z_0 \omega_c} = \frac{1.3049}{(50)(2\pi \times 2.2 \times 10^9)} = 1.8880 \text{ pF}$$

วงจรกรองผ่านต่ำที่มีความถี่คัทออฟ $f_c = 2.2\text{GHz}$ แสดงภาพที่ 44 ตรวจสอบผลตอบสนองของวงจรกรองกับคุณสมบัติที่กำหนดไว้ได้โดยการจำลองวงจรในภาพที่ 44 ด้วยโปรแกรม Microwave office และผลตอบสนองของวงจรกรองแสดงดังภาพที่ 45 ผลตอบสนองเป็นแบบเชบีเชฟ มีความถี่คัทออฟ 2.2 GHz และมีการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับภายในแถบผ่านสูงสุดมากกว่า 26 dB ซึ่งสอดคล้องกับระดับรีปเปิลน้อยกว่า 0.01 dB



ภาพที่ 45 ผลตอบสนองวงจรรองผ่านต่ำจำลองด้วยโปรแกรม Microwave office

จากค่าความเหนี่ยวนำและความจุที่คำนวณได้จะถูกแปลงไปสู่ความยาวของสายไมโครสตริป อันดับแรกเลือกอิมพีแดนซ์ของสายไมโครสตริป $Z_{0L} = 20\Omega$ และ $Z_{0C} = 95\Omega$ ที่จะสร้างให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุ ความกว้างแถบตัวนำ W_L และ W_C ที่ทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ Z_{0L} และ Z_{0C} ที่กำหนดคำนวณได้จากสมการ (2-7) จะได้ $W_L = 0.43 \text{ mm}$ และ $W_C = 8.62 \text{ mm}$ แต่เพื่อให้ง่ายในขั้นตอนในการสร้างลายวงจรจะกำหนดค่าความกว้างแถบที่ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ใหม่ ดังนี้

$$W_L = 0.4 \text{ mm} \text{ และ } W_C = 8.0 \text{ mm}$$

ค่าความกว้างแถบใหม่ที่กำหนดจะส่งผลให้อิมพีแดนซ์เดิมของสายไมโครสตริป โดยอิมพีแดนซ์ค่าใหม่คำนวณได้จากสมการ (2-6) จะได้

$$Z_{0L} = 97.30\Omega \text{ และ } Z_{0C} = 18.46\Omega$$

ความยาวคลื่นในสายไมโครสตริปสำหรับความกว้างแถบของ W_L และ W_C ได้จากสมการ (2-1) และ (2-3) จะได้

$$\lambda_{gL} = 68.30\text{mm} \text{ และ } \lambda_{gC} = 60.47\text{mm}$$

ความยาวสายไมโครสตริปที่ทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำ L_1, L_3 และ L_5 คำนวณได้จากสมการ (2-91) ในขณะที่ความยาวสายไมโครสตริปที่ทำให้เกิดค่าความจุ C_2 และ C_4 คำนวณได้จากสมการ (2-93) ได้ค่าความยาวสายไมโครสตริป ดังนี้

$$l_{L1} = l_{L5} = 4.33\text{mm}, \quad l_{L3} = 10.27\text{mm} \text{ และ } l_{C2} = l_{C4} = 4.84\text{mm}$$

ค่าความยาวสายไมโครสตริปที่คำนวณได้ยังไม่รวมผลความไม่ต่อเนื่องแบบขั้นความกว้างแบบ (step in width) การชดเชยผลของความไม่ต่อเนื่องคำนวณได้จากสมการ (2-94) และ (2-96)

$$l_{L1new} = l_{L5new} = \frac{\lambda_{gL}}{2\pi} \sin^{-1} \left\{ \frac{1}{Z_{0L}} \left[\omega L_1 - Z_{0C} \tan \left(\frac{\pi l_{C2}}{\lambda_{gC}} \right) \right] \right\}$$

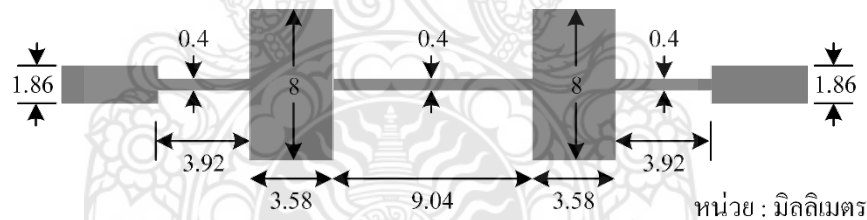
$$l_{L3new} = \frac{\lambda_{gL}}{2\pi} \sin^{-1} \left\{ \frac{1}{Z_{0L}} \left[\omega L_3 - 2Z_{0C} \tan \left(\frac{\pi l_{C2}}{\lambda_{gC}} \right) \right] \right\}$$

$$l_{C2new} = l_{C4new} = \frac{\lambda_{gC}}{2\pi} \sin^{-1} \left\{ Z_{0C} \left[\omega C_2 - \frac{1}{Z_{0L}} \left\{ \tan \left(\frac{\pi l_{L1}}{\lambda_{gL}} \right) + \tan \left(\frac{\pi l_{L3}}{\lambda_{gL}} \right) \right\} \right] \right\}$$

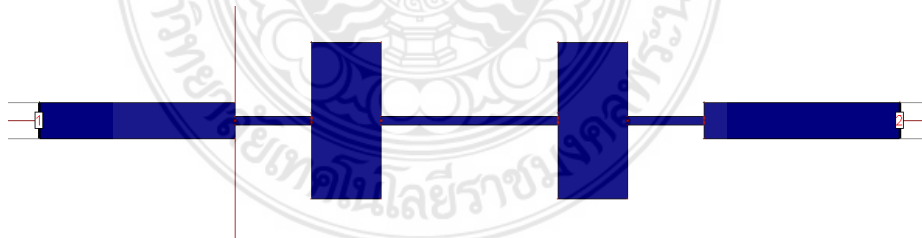
โดยการแทนค่าความยาวสายเดิมลงในสมการทั้งสาม แล้วคำนวณแบบวนรอบจะได้ค่าคู่เข้าสู่ค่าความยาวสายใหม่ ดังนี้

$$l_{L1new} = l_{L5new} = 3.92\text{mm}, \quad l_{L3new} = 9.04\text{mm} \quad \text{และ} \quad l_{C2} = l_{C4} = 3.58\text{mm}$$

วงจรกรองผ่านต่ำไมโครสตริปิมพีแดนซ์แบบขั้นที่ได้จากการคำนวณแสดงดังภาพที่ 3-12 เมื่อสายป้อนมีอิมพีแดนซ์ $Z_0 = 50\Omega$ ซึ่งมีความกว้างแถบ $W_0 = 1.86\text{mm}$ โดยการสร้างลายวงจรที่คำนวณได้ในโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้า IE3D เพื่อจำลองหาผลตอบสนองต่อความถี่ดังแสดงภาพที่ 46 จากผลการจำลองพบว่าผลตอบสนองมีคุณสมบัติตามที่กำหนด จึงนำขนาดที่คำนวณไว้ไปสร้างลายวงจรบนแผ่นวงจรพิมพ์ RT/Duroid 6006 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก $\epsilon_r = 6.15$ และมีความหนาของฐานรองเท่ากับ 1.27 มิลลิเมตร ภาพที่ 3-14 แสดงวงจรกรองผ่านต่ำไมโครสตริปิมพีแดนซ์แบบขั้นที่สร้างได้จริง

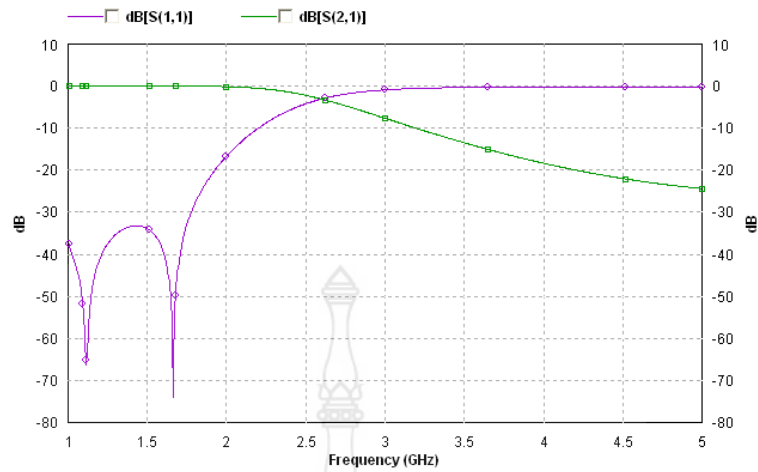


ภาพที่ 45 วงจรกรองผ่านต่ำไมโครสตริปิมพีแดนซ์แบบขั้นที่ได้จากการคำนวณ



(ก) วงจรกรองผ่านต่ำไมโครสตริปิมพีแดนซ์แบบขั้นในโปรแกรมจำลอง IE3D

ภาพที่ 46 วงจรกรองผ่านต่ำไมโครสตริปิมพีแดนซ์แบบขั้นจำลองด้วยโปรแกรม IE3D



(ข) ผลตอบสนองของวงจรกรองผ่านต่ำได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D

ภาพที่ 46 (ต่อ)

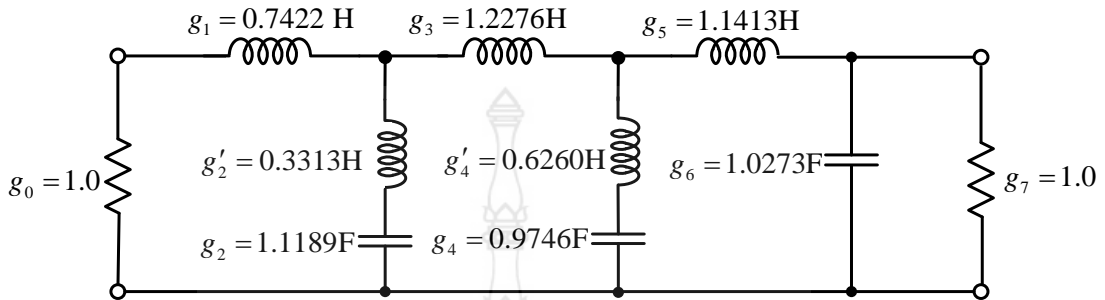


ภาพที่ 47 วงจรกรองผ่านต่ำไมโครสตริปิมพีแดนซ์แบบชั้นสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ RT/Duroid 6006

2. การออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำอุปกรณ์กึ่งลัมป์แบบมีโพลการลตทอนที่ความถี่ค่าจำกัด กำหนดคุณสมบัติของวงจรให้ผลตอบสนองแบบฟังก์ชันเอลลิปติก ระดับริปเปิลไม่เกิน 0.1dB การลตทอนอย่างน้อย 35 dB ที่ความถี่ $\Omega_s = 1.25$ และต้องการให้เกิดทรานสมิซชันซีโรที่ 2 ค่าความถี่ ดังนั้นวงจรกรองผ่านต่ำต้องมีอันดับเท่ากับ 6 จะได้ค่าอุปกรณ์ภายในวงจรกรองผ่านต่ำ ต้นแบบดังนี้ (Hong and Lancaster, 2001)

$$g_0 = g_7 = 1.0, \quad g_1 = 0.7422, \quad g_2 = 1.1189, \quad g_2' = 0.3313, \quad g_3 = 1.2276, \quad g_4 = 0.9746, \\ g_4' = 0.6260, \quad g_5 = 1.1413, \quad g_6 = 1.0273 \text{ และ } \Omega_c = 1.0$$

วงจรรองผ่านต่ำตันแบบที่มีผลตอบสนองแบบฟังก์ชันเอลลิปติกแสดงภาพที่ 48



ภาพที่ 48 วงจรรองความถี่ต่ำผ่านตันแบบที่มีผลตอบสนองแบบฟังก์ชันเอลลิปติก อันดับ 6

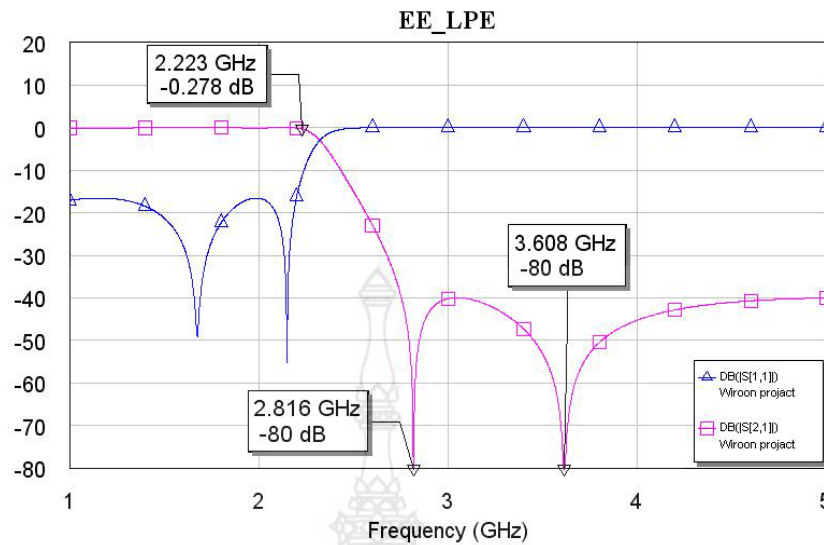
จากภาพที่ 48 วงจรรองผ่านต่ำตันแบบจะถูกแปลงไปเป็นวงจรรองผ่านต่ำที่มีความถี่ คัทออฟ $f_c = 2.2\text{GHz}$ และแปลงไปสู่ระบบอิมพีแดนซ์ 50Ω โดยอุปกรณ์ความเหนี่ยวนำสามารถคำนวณค่าใหม่ได้จากสมการ (2-86) และสูตรในภาพที่ 48

$$\begin{aligned} L_1 &= 2.6846 \text{ nH} & L_2 &= 1.1984 \text{ nH} \\ L_3 &= 4.4404 \text{ nH} & L_4 &= 2.2643 \text{ nH} \\ L_5 &= 4.1282 \text{ nH} & C_2 &= 1.6189 \text{ pF} \\ C_4 &= 1.4101 \text{ pF} & C_6 &= 1.4864 \text{ pF} \end{aligned}$$

ความถี่ที่เกิดทรานสมิซชันซีโรซึ่งเป็นผลมาจากวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมที่ต่อแบบขนานในวงจร โดยวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม L_4, C_4 จะสร้างทรานสมิซชันซีโรที่ความถี่แรก และวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม L_2, C_2 จะสร้างทรานสมิซชันซีโรที่ความถี่ที่สอง ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_4 C_4}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(2.2643 \times 10^{-9})(1.4101 \times 10^{-12})}} = 2.82 \text{ GHz} \\ f_{p2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(1.1984 \times 10^{-9})(1.6189 \times 10^{-12})}} = 3.61 \text{ GHz}$$

ตรวจสอบผลตอบสนองของวงจรรองความถี่ต่ำโดยใช้โปรแกรม Microwave office ดังแสดงภาพที่ 49



รูปที่ 49 ผลตอบสนองของวงจรกรองผ่านต่ำโดยการจำลองด้วยโปรแกรม Microwave office

ผลการจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้ผลตอบสนองต่อความถี่แสดงในภาพที่ 49 จากกราฟผลตอบสนองมีความถี่คutoff ประมาณ 2.2 GHz ความถี่ของทรานสมิสชันซีโรที่ 1 เกิดที่ความถี่ประมาณ 2.81 GHz ความถี่ของทรานสมิสชันซีโรที่ 2 เกิดที่ความถี่ประมาณ 3.60 GHz และที่ความถี่ $f_s = 2.75\text{GHz}$ มีการลดทอนประมาณ 39dB ซึ่งมากกว่า 35dB ที่กำหนดไว้ จากผลการแปลงความถี่และอิมพีแดนซ์ได้ค่าคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านใกล้เคียงกับคุณสมบัติที่กำหนดไว้ ขั้นตอนต่อไปในการออกแบบคือการแปลงค่าความเหนี่ยวนำและความจุ ไปเป็นขนาดทางกายภาพของสายไมโครสตริป

กำหนดอิมพีแดนซ์ของสายไมโครสตริปที่ทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำและความจุ ดังนี้ $Z_{0L} = 20\Omega$ และ $Z_{0C} = 100\Omega$ ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าความกว้างแถบตัวนำและความยาวคลื่นดังแสดงในตารางที่ 3-2 เมื่ออิมพีแดนซ์ $Z_{0L} = 19.98\Omega$ และ $Z_{0C} = 100.09\Omega$ เกิดจากการคำนวณโดยใช้ค่าความกว้างแถบหลังจากการกำหนดจุดทัศนียม 2 ตำแหน่ง แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์การออกแบบไมโครสตริปของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบฟังก์ชันเอลลิปติก

รายละเอียดการออกแบบ			
อิมพีแดนซ์ (โอห์ม)	$Z_{0C} = 19.98$	$Z_0 = 50$	$Z_{0C} = 100.09$
ความกว้างแถบไมโครสตริป (มิลลิเมตร)	$W_C = 7.22$	$W_0 = 1.86$	$W_L = 0.36$
ความยาวคลื่นไกด์ที่ความถี่ f_c (มิลลิเมตร)	$\lambda_{gC} = 57.19$		$\lambda_{gL} = 68.02$
ความยาวคลื่นไกด์ที่ความถี่ f_{p1} (มิลลิเมตร)	$\lambda_{gC} = 44.62$		$\lambda_{gL} = 53.07$
ความยาวคลื่นไกด์ที่ความถี่ f_{p2} (มิลลิเมตร)	$\lambda_{gC} = 34.85$		$\lambda_{gL} = 41.45$

จากตารางที่ 2 ความยาวสายไมโครสตริปที่ทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำ L_1, L_3 และ L_5 คำนวณได้จากสมการ(2-91) โดยคำนวณที่ความถี่คัทออฟ $f_c = 2.2\text{GHz}$ ส่วน L_2 คำนวณที่ความถี่ $f_{p2} = 3.61\text{GHz}$ และ L_4 คำนวณที่ความถี่ $f_{p1} = 2.82\text{GHz}$ ในขณะที่ความยาวสายไมโครสตริปที่ทำให้เกิดค่าความจุคำนวณได้จากสมการ (2-93) เมื่อ C_2 คำนวณที่ความถี่ $f_{p2} = 3.61\text{GHz}$ ส่วน C_4 คำนวณที่ความถี่ $f_{p1} = 2.82\text{GHz}$ และ C_6 คำนวณที่ความถี่คัทออฟ $f_c = 2.2\text{GHz}$ ได้ค่าความยาวสาย ไมโครสตริป ดังนี้

$$l_{L1} = 4.11 \text{ mm}, l_{L2} = 1.81 \text{ mm}, l_{L3} = 7.14 \text{ mm}, l_{L4} = 3.48\text{mm}, l_{L5} = 6.56 \text{ mm},$$

$$l_{C2} = 3.10 \text{ mm}, l_{C4} = 3.71 \text{ mm} \text{ และ } l_{C6} = 3.85 \text{ mm}$$

ความยาวที่คำนวณได้ยังไม่รวมผลความไม่ต่อเนื่องแบบขั้นความกว้างแถบ ในการชดเชยความไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นกับส่วนอนุกรม L_2 และ C_2 สามารถคำนวณความยาวสายไมโครสตริปใหม่ได้จาก (Hong and Lancaster,2001 : 120)

$$\frac{1}{(2\pi fL_2) - 1/(2\pi fC_2)} = B_2(f) + \Delta B_{123}(f) \quad \text{เมื่อ } f = f_c \text{ และ } f_{p2}$$

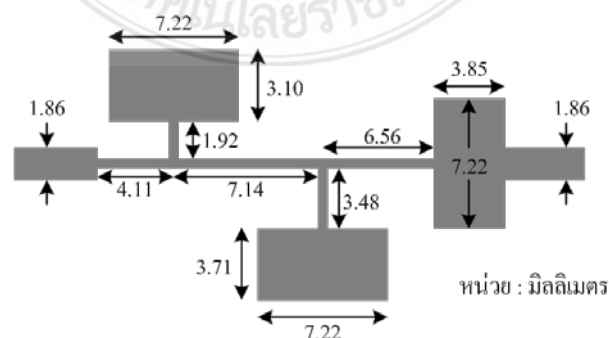
$$B_2(f) = \frac{1}{Z_{0L} \sin\left(\frac{2\pi l_{L2}}{\lambda_{gL}(f)}\right) + Z_{0C} \tan\left(\frac{\pi l_{C2}}{\lambda_{gC}(f)}\right) - \frac{1}{\frac{1}{Z_{0C} \sin\left(\frac{2\pi l_{C2}}{\lambda_{gC}(f)}\right) + \frac{1}{Z_{0L} \tan\left(\frac{\pi l_{L2}}{\lambda_{gL}(f)}\right)}}}$$

$$\Delta B_{123}(f) = \frac{1}{Z_{0L}} \tan\left(\frac{\pi l_{L1}}{\lambda_{gL}(f)}\right) + \frac{1}{Z_{0L}} \tan\left(\frac{\pi l_{L2}}{\lambda_{gL}(f)}\right) + \frac{1}{Z_{0L}} \tan\left(\frac{\pi l_{L3}}{\lambda_{gL}(f)}\right)$$

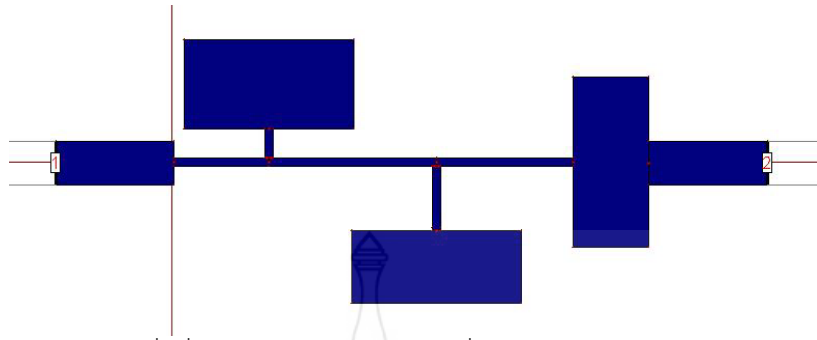
โดยการแทนค่าความยาวไมโครสตริปเดิม จะได้ความยาวสายไมโครสตริปใหม่สำหรับส่วนอนุกรม L_2C_2 และ L_4C_4 ดังนี้

$$l_{L2} = 1.92\text{mm}, l_{L4} = 3.48\text{mm}, l_{C2} = 3.10\text{mm} \text{ และ } l_{C4} = 3.71\text{mm}$$

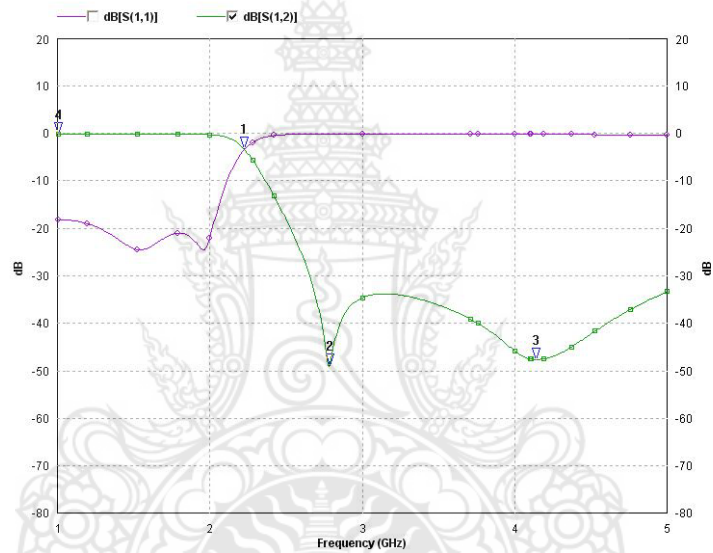
จากภาพที่ 50 แสดงโครงสร้างไมโครสตริปของวงจรกรองผ่านต่ำที่มีผลตอบสนองแบบฟังก์ชันเอลลิปติก อันดับ 6



ภาพที่ 50 โครงสร้างไมโครสตริปของวงจรกรองผ่านต่ำที่มีผลตอบสนองแบบฟังก์ชันเอลลิปติก



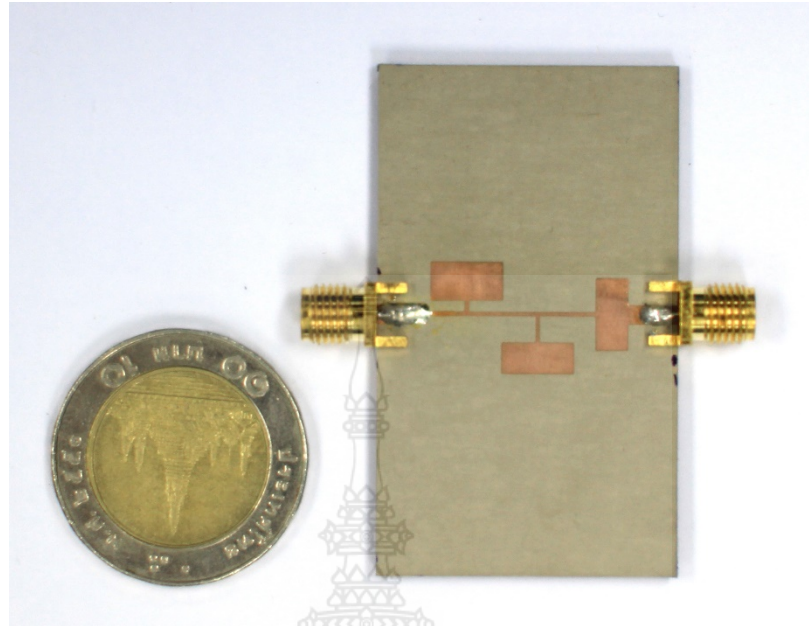
(ก) วงจรกรองผ่านต่ำที่มีผลตอบสนองแบบฟังก์ชันเอลลิปติกอันดับ 6 ในโปรแกรม IE3D



(ข) ผลตอบสนองของวงจรกรองผ่านต่ำที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D

ภาพที่ 51 วงจรกรองผ่านต่ำผลตอบสนองแบบฟังก์ชันเอลลิปติกอันดับ 6 จำลองด้วยโปรแกรม IE3D

โดยการสร้างวงจรและปรับแต่งวงจรในโปรแกรมจำลองแม่เหล็กไฟฟ้า IE3D เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติที่กำหนดไว้ แสดงดังภาพที่ 51 แสดงผลตอบสนองที่ได้จากการจำลองที่มีความถี่คutoff 2.2 GHz มีการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแถบผ่านสูงสุดเท่ากับ 18 dB และ ทรานสมิชชันซีโร เกิดที่ความถี่ 2.8 GHz และ 4.2 GHz แสดงดังภาพที่ 52 แสดงวงจรจริงที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ RT/Duroid 6006 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก $\epsilon_r = 6.15$ และมีความหนาของฐานรองเท่ากับ 1.27 มิลลิเมตร



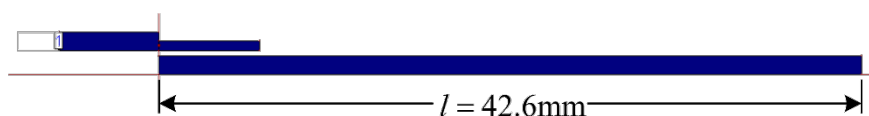
ภาพที่ 52 วงจรกรองผ่านต่ำไมโครสตริบที่มีผลตอบสนองแบบฟังก์ชันเอลลิปติก บนแผ่นวงจรพิมพ์ RT/Duroid 6006

3. วงจรกรองผ่านแถบที่ใช้เรโซเนเตอร์แบบครึ่งคลื่นเชื่อมโยงแบบขนาน

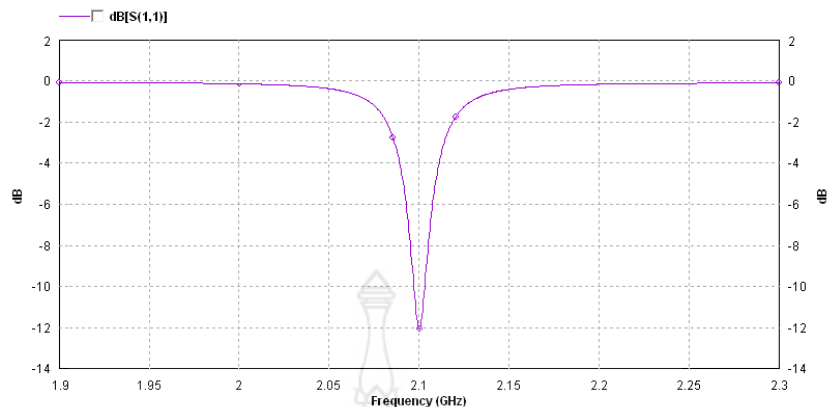
วงจรกรองที่ออกแบบกำหนดคุณสมบัติดังนี้ ความถี่กลาง $f_0 = 2.1\text{GHz}$ แบนด์วิดธ์ 60MHz มีผลตอบสนองแบบเชบีเชฟอันดับ 4 และมีระดับริปเปิลไม่เกิน 0.01 dB ค่าอุปกรณ์ในวงจรต้นแบบแสดงได้ดังนี้ (Hong and Lancaster, 2001)

$$g_0 = 1 \quad g_1 = 0.7129 \quad g_2 = 1.2004 \quad g_3 = 1.3213 \quad g_4 = 0.6476 \quad g_5 = 1.1008$$

เรโซเนเตอร์ที่ใช้ในวงจรเป็นแบบแถบตัวนำตรงยาวประมาณ $\lambda_g/2$ ปลายเปิดวงจรและมีจำนวนเท่ากับอันดับของวงจรกรองและมีความถี่เรโซแนนท์เท่ากับความถี่กลางของวงจรกรองผ่านแถบ โดยจะออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ RO4003C ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก $\epsilon_r = 3.38$ และมีความหนาของฐานรองเท่ากับ 0.831 มิลลิเมตร อิมพีแดนซ์ของเรโซเนเตอร์กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 50Ω จากสมการ (2-7) จะได้ความกว้างแถบตัวนำ $W = 1.9$ มิลลิเมตร โดยการจำลองหาความถี่เรโซแนนท์ด้วยโปรแกรมจำลอง IE3D ดังแสดงในภาพที่ 3-20 ความยาวเรโซเนเตอร์ที่ทำให้เกิดความถี่เรโซแนนท์ 2.14 GHz คือ $l \approx \lambda_g/2 = 42.6$ มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 53



(ก) เรโซเนเตอร์ที่เกิดความถี่เรโซแนนท์ 2.1 GHz



(ข) ความถี่เรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์สังเกตจากการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ
ภาพที่ 53 การจำลองเรโซเนเตอร์ด้วยโปรแกรมจำลอง IE3D เพื่อหาความยาวเรโซเนเตอร์
 ที่ทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.1 GHz

การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบใช้หลักการเชื่อมโยงระหว่างเรโซเนเตอร์และการเชื่อมโยงที่
 อินพุตและเอาต์พุตของวงจรกรอง ค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอก(การเชื่อมโยงที่อินพุตและเอาต์พุต
 ของวงจรคำนวณได้จาก

$$Q_{e1} = \frac{g_0 g_1}{FBW} \quad \text{และ} \quad Q_{e4} = \frac{g_4 g_5}{FBW}$$

เมื่อ อัตราส่วนแบนด์วิดท์หาได้จาก $FBW = BW/f_0 = (60 \times 10^6)/(2.1 \times 10^9) = 0.0286$
 ดังนั้น

$$Q_{e1} = \frac{(1.0)(0.7129)}{0.0286} = 24.9266$$

$$Q_{e1} = \frac{(0.6476)(1.1008)}{0.0286} = 24.9258$$

สัมประสิทธิ์การเชื่อมโยงระหว่างเรโซเนเตอร์ลำดับที่ i และ $i+1$ คำนวณได้จาก

$$k_{i,i+1} = \frac{FBW}{\sqrt{g_i g_{i+1}}}$$

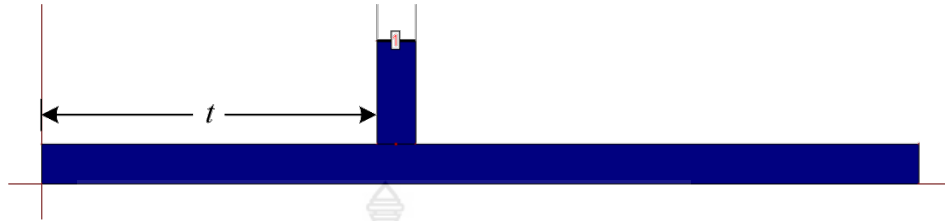
จากค่าอุปกรณ์ในวงจรกรองผ่านต่ำต้นแบบจะได้สัมประสิทธิ์การเชื่อมโยงระหว่างเรโซเนเตอร์
 ดังนี้

$$k_{12} = \frac{0.0286}{\sqrt{(0.7129)(1.2004)}} = 0.0309$$

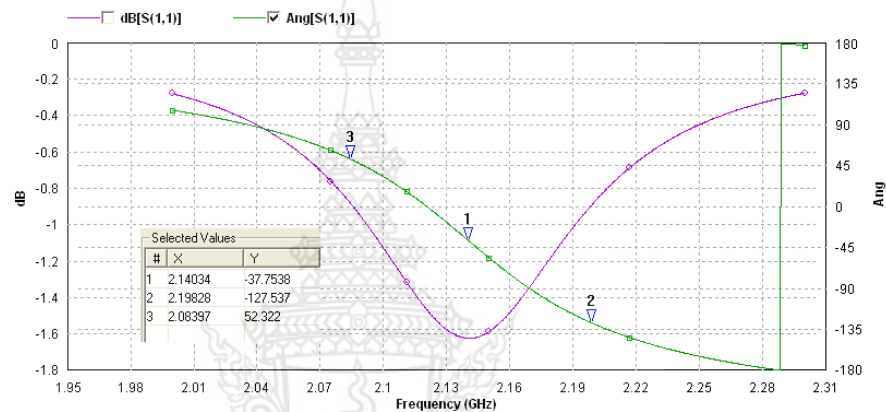
$$k_{23} = \frac{0.0286}{\sqrt{(1.2004)(1.3213)}} = 0.0227$$

$$k_{34} = \frac{0.0286}{\sqrt{(1.3213)(0.6476)}} = 0.0309$$

ค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกที่อินพุตและเอาต์พุตของวงจรสัมพันธ์กับระยะแท้ปสายป้อน การสืบค้นหาค่าโดยการจำลองด้วยโปรแกรมจำลอง IE3D แสดงดังภาพที่ 54



(ก) สายป้อนแท้ปบนเรโซเนเตอร์เพื่อจำลองหาค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอก



(ข) ผลตอบสนองทางแอมพลิจูดและทางเฟสของการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ภาพที่ 54 การจำลองหาค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกด้วยโปรแกรมจำลอง IE3D

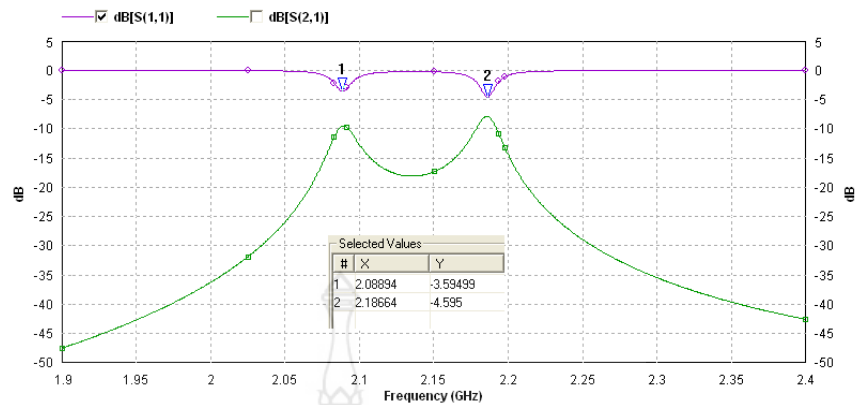
การสืบหาค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกทำได้โดยการเลื่อนระยะแท้ป t ของสายป้อน แล้วคำนวณจากกราฟผลตอบสนองทางขนาดและทางเฟสของการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยใช้สมการ (2-69) จากกราฟผลตอบสนองแสดงดังภาพที่ 54 (ข) ระยะ t ของสายป้อนเท่ากับ 16.2 มิลลิเมตร และคำนวณค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกได้ดังนี้

$$Q_e = \frac{f_0}{f_{-90^\circ} - f_{+90^\circ}} = \frac{2.1403}{(2.1983 - 2.0840)} = 18.72$$

สัมประสิทธิ์การเชื่อมโยงระหว่างเรโซเนเตอร์สืบค่าด้วยการจำลองแบบด้วยโปรแกรมจำลอง IE3D ดังแสดงภาพที่ 55 (ก) เรโซเนเตอร์ถูกจัดวางให้ขนานกัน และมีระยะห่างกันครึ่งความยาวระยะห่าง s ระหว่างเรโซเนเตอร์ควบคุมขนาดสัมประสิทธิ์การเชื่อมโยง



(ก) การจัดวางเรโซเนเตอร์เพื่อหาขนาดสัมประสิทธิ์การเชื่อมโยง

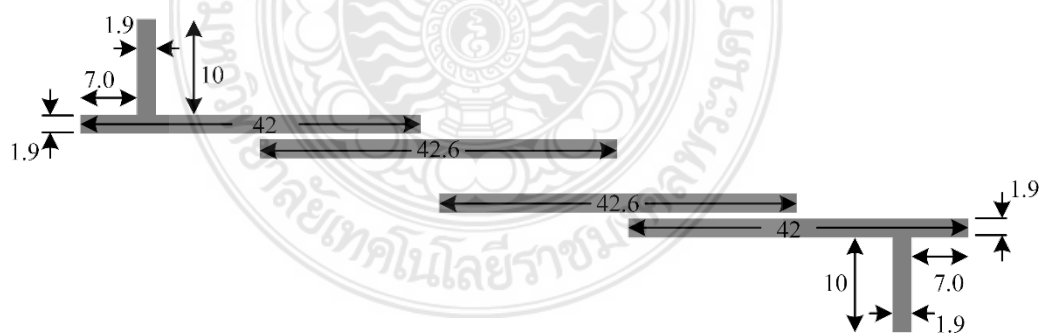


(ข) ผลตอบสนองระหว่างเรโซเนเตอร์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม IE3D
 ภาพที่ 55 การจำลองหาสัมประสิทธิ์การเชื่อมโยงระหว่างเรโซเนเตอร์
 ด้วยโปรแกรมจำลอง IE3D

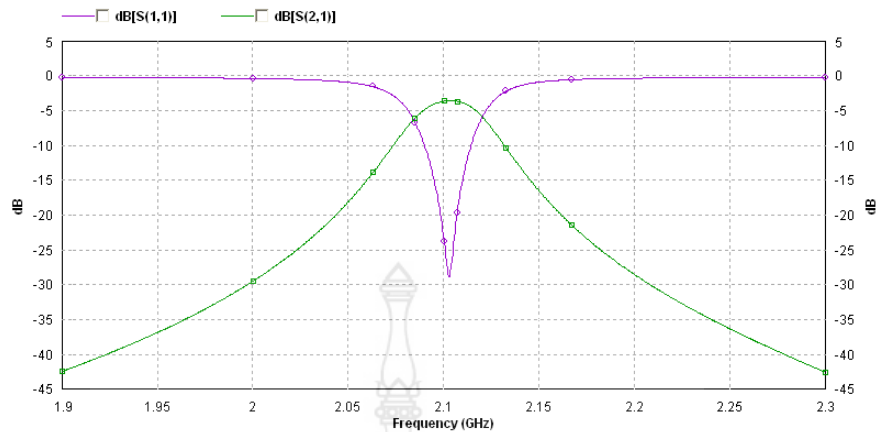
จากภาพที่ 55 (ข) ผลตอบสนองการจัดวางเรโซเนเตอร์ที่มีระยะห่าง $s = 1.3$ มิลลิเมตร สามารถหาสัมประสิทธิ์การเชื่อมโยงได้จากสมการ(2-49)

$$k_{12} = k_{34} = \frac{f_{p2}^2 - f_{p1}^2}{f_{p2}^2 + f_{p1}^2} = \frac{(2.1866)^2 - (2.0900)^2}{(2.1866)^2 + (2.0900)^2} = 0.0451$$

ภาพที่ 56 (ก) แสดงวงจรไมโครสตริปของวงจรกรองผ่านแถบที่ใช้เรโซเนเตอร์แบบครึ่งคลื่นเชื่อมโยงแบบขนาน หลังจากการปรับแต่งเพื่อให้ได้คุณสมบัติของผลตอบสนองที่กำหนด ภาพที่ 57 แสดงวงจรกรองผ่านแถบที่ใช้เรโซเนเตอร์แบบครึ่งคลื่นเชื่อมโยงแบบขนานที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ RO4003C



(ก) วงจรกรองผ่านแถบที่ใช้เรโซเนเตอร์แบบครึ่งคลื่นเชื่อมโยงแบบขนาน



(ข) ผลตอบสนองวงจกรองผ่านแถบที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมจำลอง IE3D
ภาพที่ 56 วงจกรองผ่านแถบที่ใช้เรโซเนเตอร์แบบครึ่งคลื่นเชื่อมโยงแบบขนานจำลองด้วย
 โปรแกรมจำลอง IE3D



ภาพที่ 57 วงจกรองผ่านแถบที่ใช้เรโซเนเตอร์แบบครึ่งคลื่นเชื่อมโยงแบบขนานสร้างบน
 แผ่นวงจรพิมพ์ RO4003C

ค. คู่มือผู้เรียน เป็นชุดเอกสารที่จัดเตรียมไว้สำหรับผู้เรียนเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอน ประกอบด้วย คำแนะนำการใช้งานของคู่มือ วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม ใบเนื้อหาแบบทดสอบท้ายบทเรียน และคำแนะนำการใช้งานชุดสาธิต โดยผู้วิจัยได้นำเอาวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม ใบเนื้อหา และแบบทดสอบที่ได้จากการสร้างคู่มือครุมาใช้ในการจัดทำคู่มือผู้เรียน จากนั้นนำไปให้อาจารย์ที่ปรึกษาตรวจสอบ และขอข้อเสนอแนะเพื่อนำมาปรับปรุงจนได้คู่มือผู้เรียนที่สมบูรณ์

3.3.3.3 สร้างแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ผู้วิจัยได้สร้างแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเรื่องสายอากาศไมโครสตริป เป็นแบบปรนัย 4 ตัวเลือก ก ข ค ง

คณะผู้วิจัยเริ่มจากการวิเคราะห์การสร้างแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ซึ่งได้จากการตารางวิเคราะห์หลักสูตรในการให้น้ำหนักคะแนนความสำคัญของเนื้อหาและพฤติกรรมจากผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน เพื่อให้ได้จำนวนข้อสอบที่ครอบคลุมเนื้อหาและตรงตามวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม และทำการออกข้อสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน จำนวน 40 ข้อ จากนั้นให้ผู้เชี่ยวชาญ

ทำการประเมินความตรงเชิงเนื้อหาเพื่อหาดัชนีความสอดคล้องของข้อสอบกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

ผลการประเมินพบว่า ดัชนีความสอดคล้องของข้อสอบกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมมีค่าอยู่ระหว่าง 0.60 – 1.00 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.82 แสดงว่าข้อสอบแต่ละข้อเป็นตัวแทนของวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม นำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนที่มีคุณภาพเชิงเนื้อหาไปทดลองใช้กับกลุ่มที่ไม่มีใช้กลุ่มตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาคุณภาพของข้อสอบ โดยทำการหาค่าความยากง่าย อำนาจจำแนก และความเชื่อมั่นของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนกับผู้เรียนระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์เทเวศร์ที่ลงทะเบียนเรียนรายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ ภาคการเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2557 จำนวน 13 คน จากการทดลองใช้พบว่าสามารถเลือกแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเหลือ 30 ข้อ จาก 40 ข้อ ซึ่งมีค่าความยากง่ายอยู่ระหว่าง 0.50 – 0.66 ค่าอำนาจจำแนกอยู่ระหว่าง 0.20-1.00 และมีค่าความเชื่อมั่นของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ร้อยละ 85 จึงสรุปได้ว่าแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน จำนวน 30 ข้อ มีคุณภาพทั้งเชิงคุณภาพและเชิงเนื้อหาสามารถนำไปใช้ในการประเมินความก้าวหน้าทางการเรียนรายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ

3.3.3.4 สร้างแบบสอบถามความพึงพอใจของผู้เรียน คณะผู้วิจัยได้สร้างแบบสอบถามความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริป เป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า (Rating Scale) 5 ระดับ ตามรูปแบบของลิเคิร์ต (Likert's Scale) (ชวลิต, 2549) แบบสอบถามความพึงพอใจแบ่งออกเป็น 3 ด้าน ดังนี้

- ก. ด้านการเรียนการสอน
- ข. ด้านสื่อการสอน (การนำเสนอเนื้อหาด้วยเพาเวอร์พอยต์และการนำเสนอเนื้อหาด้วยชุดสาธิต)
- ค. ด้านการวัดและประเมินผล

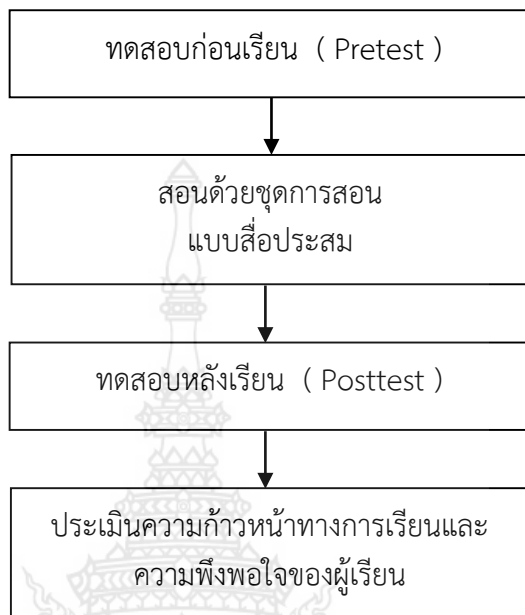
การสร้างแบบสอบถามความพึงพอใจของผู้เรียน ผู้วิจัยเริ่มจากการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับแบบสอบถาม เพื่อนำมากำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของแบบสอบถามให้ครอบคลุมเนื้อหาสาระที่เหมาะสม จากนั้นทำการร่างแบบสอบถามขึ้นและนำไปให้อาจารย์ที่ปรึกษาตรวจสอบความถูกต้อง เมื่อได้แบบสอบถามฉบับร่างแล้วนำไปให้ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 ท่าน ประเมินความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ของแบบสอบถาม ผลการประเมินพบว่า ดัชนีความสอดคล้องของข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ของแบบสอบถามมีค่าอยู่ระหว่าง 0.60 – 1.00 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.82 แสดงว่าข้อคำถามแต่ละข้อเป็นตัวแทนของวัตถุประสงค์ของแบบสอบถาม สามารถนำแบบสอบถามไปใช้ได้

3.3.3.3 ตรวจสอบโดยผู้เชี่ยวชาญและนำข้อเสนอแนะไปปรับปรุงแก้ไข

3.4 การดำเนินการทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการทดลองกับกลุ่มตัวอย่างกลุ่มเดียวแบบ One –Group Pretest-Posttest Design ลักษณะการทดลองแบบนี้คือโดยการทำการทดสอบก่อนทำการทดลอง แล้วจึงเอากลุ่มตัวอย่างมาทำการทดลองกับการกระทำที่ต้องการศึกษา เมื่อทำการทดลองแล้วจึงทำการ

ทดสอบอีกครั้ง แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลการทดลองซึ่งสามารถทำได้รวดเร็ว ควบคุมเวลาของกลุ่มได้แน่นอนและประหยัด มีขั้นตอนวิธีการดำเนินการทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล ดังภาพที่ 58



ภาพที่ 58 ขั้นตอนการดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

จากภาพที่ 58 สามารถอธิบายได้ดังนี้

3.4.1 ทดสอบพื้นฐานความรู้ (Pre-test) ใช้แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเป็นเครื่องมือในการทดสอบ

3.4.2 สอนด้วยชุดการสอนแบบสื่อประสมที่พัฒนาขึ้น ซึ่งชุดการสอนแบบสื่อประสมนี้ได้ผ่านการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญและปรับปรุงแก้ไขแล้วนำไปใช้กับกลุ่มตัวอย่างซึ่งเป็นนักศึกษาสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จำนวน 15 คน ในภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2558 ตามขั้นตอนและวิธีการที่คู่มือครูกำหนดไว้



ภาพที่ 58 การนำชุดการสอนแบบสื่อประสมไปใช้กับกลุ่มตัวอย่าง

3.4.3 ทดสอบหลังเรียน (Post-test) เมื่อผู้เรียนผ่านการเรียนครบบทเรียนแล้ว ทำการทดสอบผลการเรียนอีกครั้งด้วยแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ซึ่งเป็นแบบทดสอบฉบับเดียวกับแบบทดสอบก่อนเรียน

3.4.4 ประเมินความก้าวหน้าทางการเรียนของผู้เรียน โดยนำผลของคะแนนที่ได้จากการทำแบบทดสอบก่อนเรียนและแบบทดสอบหลังเรียนมาวิเคราะห์

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

การพัฒนาแบบจำลองคอมพิวเตอร์ช่วยสอนแบบอัจฉริยะสำหรับปรับพื้นฐานความรู้ทางด้านคณิตศาสตร์ในระดับอุดมศึกษาโดยใช้การวิจัยเชิงปฏิบัติการ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ ดังนี้

1. วิเคราะห์ความสอดคล้องระหว่างวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมกับข้อสอบ
2. วิเคราะห์หาความยากง่ายและอำนาจจำแนกของข้อสอบ
3. วิเคราะห์หาคะแนนเฉลี่ย
4. วิเคราะห์หาค่าความเชื่อมั่นของข้อสอบ
5. วิเคราะห์หาประสิทธิภาพของชุดสื่อประสม
6. ทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของคะแนนทดสอบระหว่างก่อนเรียนและหลังเรียนด้วยชุดสื่อประสมที่พัฒนาขึ้น

3.7 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

1. สูตรการหาดัชนีความสอดคล้องระหว่างวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมกับข้อสอบ (Index of Consistency)

$$IOC = \frac{\sum R}{N}$$

เมื่อ IOC = ดัชนีความสอดคล้อง

$\sum R$ = ผลรวมของการพิจารณาของผู้เชี่ยวชาญ

N = จำนวนผู้เชี่ยวชาญ

2. สูตรหาค่าความยากง่าย (Difficulty) ของแบบทดสอบ

$$P = \frac{R}{N}$$

เมื่อ P แทน ค่าความยากง่ายของข้อสอบ

R แทน จำนวนนักเรียนที่ตอบถูก

N แทน จำนวนผู้ตอบข้อสอบทั้งหมด

3. สูตรการหาค่าอำนาจจำแนก (Discrimination) ของแบบทดสอบโดยใช้สูตรการหาค่าดัชนีอำนาจจำแนกของแบบทดสอบ

$$B = \frac{R_u - R_l}{N}$$

เมื่อ B แทน ค่าอำนาจจำแนก

R_u แทน จำนวนคนที่ทำข้อสอบข้อนี้ถูกของกลุ่มสูง

R_l แทน จำนวนคนที่ทำข้อสอบข้อนี้ถูกของกลุ่มต่ำ

N แทน จำนวนคนทั้งหมด

4. การหาค่าเฉลี่ย

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{N}$$

เมื่อ \bar{x} แทน ค่าเฉลี่ย

$\sum x$ แทน ผลรวมคะแนนทั้งหมดในกลุ่ม

N แทน จำนวนคะแนนในกลุ่ม

5. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$S.D. = \sqrt{\frac{N \sum x^2 - (\sum x)^2}{N(N-1)}}$$

เมื่อ	$S.D.$	แทน	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	x	แทน	คะแนนแต่ละตัว
	\bar{x}	แทน	ค่าเฉลี่ย
	N	แทน	จำนวนคะแนนในกลุ่ม
	Σ	แทน	ผลรวม

6. การหาค่าความเชื่อมั่น (Reliability) ของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนใช้สูตรของโลเวท (Lovett) (บุญชม ศรีสะอาด, 2535: 96)

$$r_{\alpha} = 1 - \frac{k \sum x_1 - \sum x_1^2}{(k-1)(x_1 - C)^2}$$

เมื่อ	r_{α}	แทน	ความเชื่อมั่นของแบบทดสอบ
	k	แทน	จำนวนข้อสอบ
	x_1	แทน	คะแนนของแต่ละคน
	C	แทน	คะแนนเกณฑ์หรือจุดตัดของแบบทดสอบ

7. สถิติ t-test สำหรับทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของคะแนนทดสอบก่อนเรียนและคะแนนทดสอบหลังเรียน

$$t = \frac{\sum D}{\sqrt{\frac{N \sum D^2 - (\sum D)^2}{N-1}}}; df = N - 1$$

เมื่อ

t	แทน	ค่าสถิติที่ใช้
D	แทน	ค่าผลต่างระหว่างคู่คะแนน
N	แทน	จำนวนกลุ่มตัวอย่างหรือจำนวนคู่คะแนน

8. หาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนแบบอัจฉริยะ (บุญชม ศรีสะอาด, 2535)

$$E_1 = \frac{\sum x}{\frac{N}{A}} \times 100$$

เมื่อ	E_1	แทน	ประสิทธิภาพของกระบวนการ
	$\sum x$	แทน	คะแนนรวมของนักศึกษาทุกคนที่ตอบกิจกรรมในแต่ละหน่วยการเรียนรู้
	A	แทน	คะแนนเต็มของกิจกรรมในแต่ละหน่วยการเรียนรู้
	N	แทน	จำนวนผู้เรียนทั้งหมด

$$E_2 = \frac{\sum f}{\frac{N}{B}} \times 100$$

เมื่อ	E_2	แทน	ประสิทธิภาพของผลลัพธ์
	$\sum f$	แทน	คะแนนรวมของนักศึกษาทุกคนที่ตอบแบบทดสอบท้ายหน่วยการเรียนรู้
	B	แทน	คะแนนเต็มของแบบทดสอบท้ายหน่วยการเรียนรู้
	N	แทน	จำนวนผู้เรียนทั้งหมด

9. การแปลความหมายของแบบประเมินตามแนวทางของเบทส์ (Best, 1970 : 179-187 อ้างถึงในสุนทร, 2543: 44)

ค่าเฉลี่ยตั้งแต่	4.50 - 5.00	หมายถึง	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยตั้งแต่	3.50 - 4.49	หมายถึง	มาก
ค่าเฉลี่ยตั้งแต่	2.50 - 3.49	หมายถึง	ปานกลาง
ค่าเฉลี่ยตั้งแต่	1.50 - 2.49	หมายถึง	น้อย
ค่าเฉลี่ยตั้งแต่	1.00 - 1.49	หมายถึง	น้อยที่สุด

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม 2) เพื่อเปรียบเทียบผลการเรียนของผู้เรียนก่อนเรียนและหลังเรียนด้วยชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น และ 3) เพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโคร สตริปที่พัฒนาขึ้น ผลการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม

4.2 ผลเปรียบเทียบผลการเรียนของผู้เรียนก่อนเรียนและหลังเรียนด้วยชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น

4.3 ผลศึกษาความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น

4.1 ผลการพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริป ประกอบด้วย 3 บทเรียนได้แก่ บทที่ 1 สายส่งไมโครสตริป บทที่ 2 วงจร เรโซแนนท์ และบทที่ 3 วงจรกรองความถี่ไมโครเวฟ ผลการพัฒนาชุดสื่อประสมดังนี้

1. ผลการพัฒนาชุดสื่อประสม

ชุดสื่อประสมที่พัฒนาขึ้นเรื่องสายอากาศไมโครสตริป หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (หลักสูตรใหม่ พ.ศ. 2550) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร มีองค์ประกอบของชุดการสอนแบบสื่อประสม แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของชุดการสอนแบบสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริป

บทเรียนที่	วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม (ข้อ)	ใบเนื้อหา (หน้า)	การนำเสนอเนื้อหาด้วยเพาเวอร์พอยต์ (เฟรม)	การนำเสนอเนื้อหาด้วยชุดสาธิต (ชุด)	แบบทดสอบท้ายบทเรียน (ข้อ)	แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน (ข้อ)
1	4	19	29	1	15	10
2	4	36	64	1	15	10
3	5	36	84	1	15	10
รวม	13	91	177	3	45	30

จากตารางที่ 3 องค์ประกอบของชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น มีทั้งหมด 3 บทเรียน ประกอบด้วย วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม จำนวน 13 ข้อ ใบเนื้อหา จำนวน 91 หน้า การนำเสนอเนื้อหาด้วยเพาเวอร์พอยต์ จำนวน 178 เฟรม การนำเสนอเนื้อหาด้วยชุดสไลด์ จำนวน 3 ชุด แบบทดสอบท้ายบทเรียน จำนวน 45 ข้อ และแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน จำนวน 30 ข้อ แสดงดังภาพที่ 59-61

แผนการสอนสัปดาห์ที่ 1
หน่วยเรียนที่ 1 สายไมโครสตริป (Microstrip Lines)

รายละเอียดของเนื้อหา

บรรยายโครงสร้างและคุณสมบัติของสายรวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางกายภาพและผลทางไฟฟ้า การลดทอนกำลังงานในสาย ผลของความไม่ต่อเนื่องในสายไมโครสตริป เช่น ชั้นของความกว้างแถบ การเกิดมุมฉาก การเกิดช่องแคบ สายปลายเปิด เป็นต้น และอุปกรณ์กึ่งสัมปโนไมโครสตริปที่เกิดจากสลับแบบปลายลัดวงจร และสลับแบบปลายเปิดวงจร

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม


1. อธิบายโครงสร้างและคุณสมบัติของไมโครสตริป
2. อธิบายการลดทอนในไมโครสตริป
3. อธิบายความไม่ต่อเนื่องในไมโครสตริป
4. อธิบายอุปกรณ์กึ่งสัมปโนไมโครสตริป

แผนภูมิการจัดกระบวนการเรียนการสอน

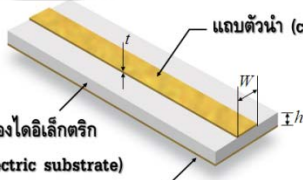
เวลา(นาที)	30	30	30	30	30	30
วัตถุประสงค์	1	1-2	2	3	4	1-4
ขั้นสอนโดยผู้ทำ						
ขั้นบอกกล่าว	ถาม-ตอบ	บรรยาย	สรุป	แบบสอบถาม	แบบฝึกหัด	แบบแก้ปัญหา
ขั้นพิจารณา	สูง	ปานกลาง	ต่ำ	กระดานไวท์บอร์ด	ภาพ, แผนที่	เพาเวอร์พอยต์
ขั้นสรุป	ใบเนื้อหา	ใบงาน	ชุดสไลด์	โปรแกรมสำเร็จรูป		

ภาพที่ 59 ตัวอย่างแผนการเรียน

หน่วยการเรียนที่ 1
สายไมโครสตริป
(Microstrip Lines)




คุณสมบัติของไมโครสตริป



แถบตัวนำ (conductor strip)

ฐานรองไดอิเล็กตริก (dielectric substrate)

ระนาบกราวนด์ (ground plane)

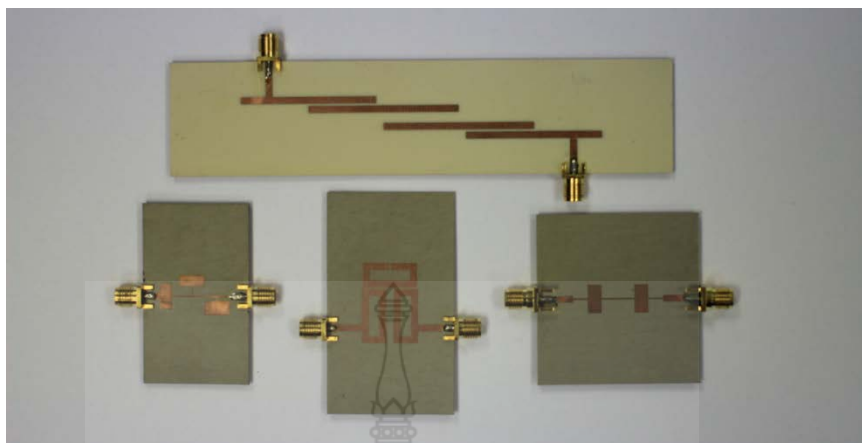


— เส้นแรงไฟฟ้า

— เส้นแรงแม่เหล็ก

สายไมโครสตริปเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (TEM)

ภาพที่ 60 ตัวอย่างการนำเสนอด้วยเพาเวอร์พอยต์



ภาพที่ 61 ตัวอย่างเนื้อหาด้วยชุดสาธิต

2. ผลการหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสม นำเสนอได้ดังนี้

2.1 ผลการวิเคราะห์คะแนนแบบทดสอบท้ายบทเรียน

เป็นการนำคะแนนแบบทดสอบท้ายบทเรียนมาหาค่าเฉลี่ยแล้วคิดออกมาเป็นค่าร้อยละ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์คะแนนแบบทดสอบท้ายบทเรียน

แบบทดสอบ	จำนวน (คน)	คะแนนเต็ม	\bar{X}	<i>S. D.</i>	ร้อยละ
บทเรียนที่ 1	15	15	12.07	0.10	80.44
บทเรียนที่ 2	15	15	12.13	0.10	80.89
บทเรียนที่ 3	15	15	12.00	0.09	80.00
รวม	-	-	12.07	0.10	80.44

จากตารางที่ 4 คะแนนแบบทดสอบท้ายบทเรียนของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 คน พบว่า คะแนนเฉลี่ยแบบทดสอบหน่วยที่ 1 คิดเป็นร้อยละ 80.44 คะแนนเฉลี่ยแบบทดสอบหน่วยที่ 2 คิดเป็นร้อยละ 80.89 และคะแนนเฉลี่ยแบบทดสอบหน่วยที่ 3 คิดเป็นร้อยละ 80.00 ตามลำดับ ซึ่งมีคะแนนเฉลี่ยรวมของแบบทดสอบท้ายบทเรียนทุกบท คิดเป็นร้อยละ 80.44 ซึ่งสูงกว่าสมมติฐานที่ตั้งไว้ แสดงว่า ชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น มีประสิทธิภาพ 80.44 สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ร้อยละ 80

2.2 ผลการวิเคราะห์คะแนนแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียน

จากการนำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนสายอากาศไมโครสตริปไปทดสอบผู้เรียนก่อนเรียนด้วยชุดสื่อประสม และทำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียนครบทุกบทเรียนแล้วสามารถสรุปผลคะแนนและค่าร้อยละแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์คะแนนแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียน

ลำดับที่	คะแนนก่อนเรียน (เต็ม 30 คะแนน)	ร้อยละ	คะแนนหลังเรียน (เต็ม 30 คะแนน)	ร้อยละ
1	5	16.67	24	80.00
2	4	13.33	23	76.67
3	8	26.67	24	80.00
4	3	10.00	28	93.33
5	7	23.33	25	83.33
6	5	16.67	24	80.00
7	5	16.67	23	76.67
8	3	10.00	20	66.67
9	8	26.67	21	70.00
10	6	20.00	23	76.67
11	6	20.00	29	96.67
12	7	23.33	22	73.33
13	8	26.67	21	70.00
14	9	30.00	27	90.00
15	10	33.33	26	86.67
รวม	6.27	-	24.00	-

จากตารางที่ 5 กลุ่มตัวอย่างทำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเรื่องสายอากาศไมโครสตริปก่อนเรียนมีคะแนนเฉลี่ย 6.27 คะแนนเฉลี่ยมีค่าต่ำเนื่องจากเป็นเนื้อหาที่มีการคำนวณซับซ้อนและหลังเรียนครบทุกบทเรียนมีคะแนนเฉลี่ย 24.00 แสดงว่าผู้เรียนมีความเข้าใจในเนื้อหาวิชาสามารถคำนวณค่าการออกแบบไมโครสตริปได้มากขึ้น

2.3 ผลการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพชุดสื่อประสม

จากการดำเนินการทดลองโดยใช้ชุดสื่อประสม เพื่อหาประสิทธิภาพชุดการสอนแบบสื่อประสมที่ได้จากการทำแบบทดสอบท้ายบทเรียนระหว่างทุกบทเรียนรวมกันโดยคิดเป็นร้อยละ 80 และจากการทำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียนครบทุกบทเรียนโดยคิดเป็นร้อยละ 80 ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพชุดสื่อประสม

คะแนน	<i>N</i>	\bar{X}	<i>S. D.</i>	ร้อยละ
แบบทดสอบท้ายบทเรียน	15	12.07	0.10	80.44
แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน	15	24.00	0.17	80.00

จากตารางที่ 6 เมื่อทำการสอนด้วยชุดสื่อประสมจบทุกบทเรียนแล้ว พบว่า ผู้เรียนสามารถทำคะแนนแบบทดสอบท้ายบทเรียนเฉลี่ย 12.07 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 80.44 ซึ่งเท่ากับเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ร้อยละ 80 และการทำคะแนนแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน 24.00 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 80.00 ซึ่งเท่ากับเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ร้อยละ 80 จึงสามารถสรุปได้ว่าชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพเท่ากับ 80.44/80.00 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ร้อยละ 80/80

4.2 ผลเปรียบเทียบผลการเรียนของผู้เรียนก่อนเรียนและหลังเรียนด้วยชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น

4.3.1 ผลการเปรียบเทียบผลการเรียนของผู้เรียนก่อนเรียนและหลังเรียน

ผู้วิจัยได้นำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเรื่องสายอากาศไมโครสตริปไปทดสอบกับผู้เรียนก่อนเรียนและเมื่อเรียนชุดสื่อประสมครบทุกบทเรียนแล้วได้นำแบบทดสอบชุดเดิมมาวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนมาให้ผู้เรียนทำการทดสอบอีกครั้ง สามารถเปรียบเทียบผลการเรียนของผู้เรียนก่อนเรียนและหลังเรียน แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบผลการเรียนของผู้เรียนก่อนเรียนและหลังเรียน

คะแนน	<i>N</i>	\bar{X}	<i>S. D.</i>	ร้อยละ
ก่อนเรียน	15	6.27	0.14	20.89
หลังเรียน	5	24.00	0.17	80.00

จากตารางที่ 7 พบว่า ผู้เรียนสามารถทำคะแนนเฉลี่ยจากแบบทดสอบหลังเรียน คิดเป็นร้อยละ 80.00 สูงกว่าคะแนนเฉลี่ยจากแบบทดสอบก่อนเรียนคิดเป็นร้อยละ 20.89 จึงสามารถสรุปได้ว่าผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของผู้เรียนสูงขึ้นหลังจากได้เรียนกับชุดสื่อประสมที่พัฒนาขึ้น

4.3 ผลศึกษาความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น

คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น หลังจากที่ได้รับจบทุกบทเรียนด้วย โดยใช้แบบสอบถามแสดงความคิดเห็นในด้านการเรียนการสอน ด้านสื่อการสอน (การนำเสนอเนื้อหาด้วยเพาเวอร์พอยต์ และการนำเสนอเนื้อหาด้วยชุดสาธิต) และการวัดและประเมินผล แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์แบบสอบถามความพึงพอใจของผู้เรียน

รายการ	\bar{X}	S. D.	ระดับความพึงพอใจ
1. ด้านการเรียนการสอน			
1.1 ปริมาณเนื้อหาที่ใช้ในการเรียนการสอนมีจำนวนเหมาะสม	3.78	0.85	มาก
1.2 การจัดลำดับเนื้อหามีความต่อเนื่องและสัมพันธ์กัน	3.87	0.87	มาก
1.3 เนื้อหาที่ใช้สอนมีความน่าสนใจ	4.00	0.81	มาก
1.4 ใบเนื้อหาที่ได้รับอ่านเข้าใจง่ายไม่สับสน	3.82	0.85	มาก
1.5 ได้รับความรู้และนำไปใช้งานได้มาก	3.79	0.89	มาก
ค่าเฉลี่ยรวม	3.85	0.86	มาก
2. ด้านสื่อการเรียนการสอน (การนำเสนอเนื้อหาด้วยเพาเวอร์พอยต์)			
2.1 ส่งเสริมให้เข้าใจเนื้อหาได้ง่ายและรวดเร็ว	4.00	0.89	มาก
2.2 การเรียงลำดับของกรอบภาพมีความสัมพันธ์กับเนื้อหาที่ได้รับ	3.96	0.89	มาก
2.3 ภาพมีความสัมพันธ์กับการบรรยาย	3.91	0.85	มาก
2.4 ตัวอักษร มีขนาดและสีสังเกตเห็นได้ชัดเจน	4.05	0.80	มาก
2.5 สีสันทึที่ใช้มีความเด่นชัดและเหมาะสมน่าสนใจ	3.79	0.86	มาก
ค่าเฉลี่ยรวม	3.94	0.86	มาก
(การนำเสนอเนื้อหาด้วยชุดสาธิต)			
2.6 มองเห็นการสาธิตในระหว่างเรียนได้ชัดเจน	4.01	0.84	มาก
2.7 ชุดสาธิตส่งเสริมให้เข้าใจเนื้อหาได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น	4.07	0.77	มาก
2.8 ตัวอักษรและรูปแบบมีความถูกต้องชัดเจน	4.00	0.81	มาก
2.9 ขนาดการใช้สีสันทึเหมาะสม	4.01	0.80	มาก
ค่าเฉลี่ยรวม	3.98	0.83	มาก
โดยรวมค่าเฉลี่ย	3.97	0.80	มาก
3. ด้านการวัดและประเมินผล			
3.1 ความชัดเจนของคำสั่งหรือคำอธิบายขั้นตอนการทำแบบทดสอบ	3.96	0.88	มาก
3.2 ความสอดคล้องกันระหว่างแบบทดสอบกับเนื้อหา	3.91	0.81	มาก
3.3 ความเหมาะสมของจำนวนแบบทดสอบแต่ละบทเรียน	4.00	0.81	มาก
ค่าเฉลี่ยรวม	3.96	0.83	มาก
ค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมด	3.93	0.84	มาก

จากตารางที่ 8 ผู้เรียนมีความคิดเห็นต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปด้านต่าง ๆ มีค่าเฉลี่ยของระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 3.93, S. D. = 0.84$) เมื่อพิจารณาแต่ละ

รายด้านพบว่า ด้านการเรียนการสอน ผู้เรียนมีความพึงพอใจโดยเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 3.85, S.D. = 0.86$) ด้านสื่อการเรียนการสอน ผู้เรียนมีความพึงพอใจโดยเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 3.97, S.D. = 0.80$) ในการนำเสนอเนื้อหาด้วยเพาเวอร์พอยต์ ผู้เรียนมีความพึงพอใจโดยเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 3.94, S.D. = 0.86$) และการนำเสนอเนื้อหาด้วยชุดสาธิต ผู้เรียนมีความพึงพอใจโดยเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 3.98, S.D. = 0.83$) และด้านการวัดและประเมินผล ผู้เรียนมีความพึงพอใจโดยเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 3.96, S.D. = 0.83$)



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การพัฒนาชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม มีวัตถุประสงค์ดังนี้ 1) เพื่อพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม 2) เพื่อเปรียบเทียบผลการเรียนของผู้เรียนก่อนเรียนและหลังเรียนด้วยชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น และ 3) เพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ ผู้เรียนระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์เทเวศร์ ที่ลงทะเบียนเรียนรายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ ภาคการเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2558 จำนวน 15 คน ทำการสุ่มแบบเจาะจง (Purposive Sampling)

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยเป็นเครื่องมือที่ผู้วิจัยออกแบบและสร้างขึ้น ประกอบด้วย

1. ชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริป แบ่งออกเป็น 3 หน่วย ดังนี้

หน่วยที่ 1 สายไมโครสตริป

หน่วยที่ 2 วงจรเรโซแนนท์

หน่วยที่ 3 วงจรรองความถี่ไมโครเวฟ

2. แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน เรื่องสายอากาศไมโครสตริป รายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ เป็นข้อสอบแบบปรนัย ชนิดเลือกตอบ 4 ตัวเลือก จำนวน 30 ข้อ

3. แบบสอบถามความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น เป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า (Rating Scale) 5 ระดับ

สถิติที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ การแจกแจงความถี่ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการหาค่าที (t-test)

5.1 สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม สามารถสรุปผลการวิจัย ได้ดังนี้

1. ผลการพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม พบว่า ชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมีทั้งหมด 3 บทเรียน ประกอบด้วย วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม จำนวน 13 ข้อ ใบเนื้อหา จำนวน 91 หน้า การนำเสนอเนื้อหาด้วยเพาเวอร์พอยต์ จำนวน 178 เฟรม การนำเสนอเนื้อหาด้วยชุดสาธิต จำนวน 3 ชุด แบบทดสอบท้ายบทเรียน จำนวน 45 ข้อ และแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน จำนวน 30 ข้อ

ผลการหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสมที่พัฒนาขึ้น พบว่า ผู้เรียนสามารถทำคะแนนแบบทดสอบท้ายบทเรียนเฉลี่ย 12.07 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 80.44 ซึ่งเท่ากับเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ร้อยละ 80 และการทำคะแนนแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน 24.00 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 80.00 ซึ่งเท่ากับเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ร้อยละ 80 จึงสามารถสรุปได้ว่าชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพเท่ากับ 80.44/80.00 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ร้อยละ 80/80

2. ผลเปรียบเทียบผลการเรียนของผู้เรียนก่อนเรียนและหลังเรียนด้วยชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น พบว่า ผู้เรียนสามารถทำคะแนนเฉลี่ยจากแบบทดสอบหลังเรียนคิดเป็นร้อยละ 80.00 สูงกว่าคะแนนเฉลี่ยจากแบบทดสอบก่อนเรียนคิดเป็นร้อยละ 20.89 จึงสามารถสรุปได้ว่า ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของผู้เรียนสูงขึ้นหลังจากได้เรียนกับชุดสื่อประสมที่พัฒนาขึ้น

3. ผลศึกษาความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น พบว่า ผู้เรียนมีความคิดเห็นต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปด้านต่าง ๆ มีค่าเฉลี่ยของระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 3.93, S.D. = 0.84$) เมื่อพิจารณาแต่ละรายด้านพบว่า ด้านการเรียนการสอน ผู้เรียนมีความพึงพอใจโดยเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 3.85, S.D. = 0.86$) ด้านสื่อการเรียนการสอน ผู้เรียนมีความพึงพอใจโดยเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 3.97, S.D. = 0.80$) ในการนำเสนอเนื้อหาด้วยเพาเวอร์พอยต์ ผู้เรียนมีความพึงพอใจโดยเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 3.94, S.D. = 0.86$) และการนำเสนอเนื้อหาด้วยชุดสาธิต ผู้เรียนมีความพึงพอใจโดยเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 3.98, S.D. = 0.83$) และด้านการวัดและประเมินผล ผู้เรียนมีความพึงพอใจโดยเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 3.96, S.D. = 0.83$)

5.2 อภิปรายผล

การพัฒนาชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม สามารถสรุปประเด็นสำคัญ ได้ดังนี้

1. ผลการพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม พบว่า ผู้เรียนสามารถทำคะแนนแบบทดสอบท้ายบทเรียนเฉลี่ย 12.07 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 80.44 ซึ่งเท่ากับเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ร้อยละ 80 และการทำคะแนนแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน 24.00 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 80.00 ซึ่งเท่ากับเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ร้อยละ 80 จึงสามารถสรุปได้ว่าชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพเท่ากับ 80.44/80.00 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ร้อยละ 80/80 เนื่องจากชุดสื่อประสมที่พัฒนาขึ้น มีขั้นตอนในการพัฒนาอย่างมีเป็นระบบ โดยใช้หลักการตามเอกสาร ทฤษฎีของนักการศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทุกขั้นตอนได้รับคำแนะนำและผ่านการตรวจสอบความถูกต้องและความเหมาะสมจากผู้เชี่ยวชาญที่มีความชำนาญและมีประสบการณ์ในด้านสื่อการสอนและด้านเนื้อหา จากนั้นจึงนำไปทำการทดลองเพื่อหาข้อผิดพลาดและนำผลที่ได้มาปรับปรุงแก้ไขให้สมบูรณ์ก่อนนำไปทดลองกับกลุ่มตัวอย่าง อีกทั้งการนำเอาสื่อการสอนหลาย ๆ อย่างมาสัมพันธ์กันซึ่งมีคุณค่าที่ส่งเสริมซึ่งกันและกัน สื่อการสอนอย่างหนึ่งอาจใช้เพื่อสร้างความ

สนใจในขณะที่อีกอย่างหนึ่งใช้เพื่ออธิบายข้อเท็จจริงของเนื้อหา และอีกชนิดหนึ่งอาจใช้เพื่อก่อให้เกิดความเข้าใจที่ลึกซึ้ง และป้องกันการเข้าใจความหมายผิด การใช้สื่อประสมจะช่วยให้ผู้เรียนมีประสบการณ์จากประสาทสัมผัสผสมผสานกันได้พบวิธีการที่จะเรียนในสิ่งที่ต้องการได้ด้วยตนเองมากยิ่งขึ้น (ชัยยงค์ พรหมวงศ์, 2545) สอดคล้องกับงานวิจัยของอำนาจ ปาละหงษา (2551 : บทคัดย่อ) ได้ทำการพัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพชุดการสอนแบบสื่อประสม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพชุดการสอนแบบสื่อประสม เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วย คู่มือครู สื่อการสอน ผลการวิจัยพบว่า ชุดการสอนแบบสื่อประสมที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพเท่ากับ 78.30/82.11 ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ 80/80 ที่กำหนดไว้

2. ผลเปรียบเทียบผลการเรียนของผู้เรียนก่อนเรียนและหลังเรียนด้วยชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น พบว่า ผู้เรียนสามารถทำคะแนนเฉลี่ยจากแบบทดสอบหลังเรียนคิดเป็นร้อยละ 80.00 สูงกว่าคะแนนเฉลี่ยจากแบบทดสอบก่อนเรียนคิดเป็นร้อยละ 20.89 จึงสามารถสรุปได้ว่า ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของผู้เรียนสูงขึ้นหลังจากได้เรียนกับชุดสื่อประสมที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากชุดการสอนแบบสื่อประสมที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น มีเนื้อหาที่เหมาะสม มีความยากง่ายในกิจกรรมการเรียนการสอน มีการทดสอบระหว่างกระบวนการและท้ายกระบวนการ ซึ่งเป็นการกระตุ้นให้ผู้เรียนเกิดความสนใจ และเมื่อขณะดำเนินกิจกรรมการเรียนการสอนยังสามารถเห็นผลการทดลองได้อย่างชัดเจน เป็นการเสริมแรงให้ผู้เรียนมีความกระตือรือร้นในการออกแบบวงจรไมโครเวฟ มีความเข้าใจและสามารถนำไปประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ต่อการเรียนการสอนได้ในอนาคต ส่งเสริมให้ผู้เรียนมีความรับผิดชอบและมีส่วนร่วมต่อการเรียนรู้ของตนเอง ผลักดันผู้เรียนไปสู่การบรรลุศักยภาพของตน มีการส่งเสริมความคิดของผู้เรียนและอำนวยความสะดวกให้เขาได้พัฒนาศักยภาพของตนเองอย่างเต็มที่ (กฤษมันต์ วัฒนาณรงค์, 2548) และการเรียนด้วยชุดการสอนแบบสื่อประสมสามารถทำให้ผู้เรียนเชื่อมโยงความรู้จากภาคทฤษฎีสู่ภาคปฏิบัติ ผู้เรียนจึงเกิดทักษะในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ โดยอัตโนมัติโดยที่ผู้สอนไม่จำเป็นต้องสอนเนื่องจากผู้เรียนจะต้องวัดและตรวจสอบวงจรที่ตนเองทดลองและแก้ปัญหาที่เกิดจากการทดลองเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องเป็นไปตามทฤษฎี

3. ผลการศึกษาความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น พบว่า ผู้เรียนมีความคิดเห็นต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปด้านต่าง ๆ มีค่าเฉลี่ยของระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก เนื่องจากผู้เรียนมีความสามารถมองเห็นของจริง เข้าใจวิธีการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปได้โดยการผ่านสื่อโปรแกรมจำลอง ทำให้ไม่เกิดความเบื่อหน่ายในการเรียน อีกทั้งสื่อประสมในลักษณะนี้นับว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง สามารถนำเสนอให้ผลตรงที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่สื่ออื่นไม่สามารถทำได้คือผลในความรู้สึกอารมณ์และสุนทรียภาพแก่ผู้ชม ทั้งยังช่วยดึงดูดความสนใจให้ผู้ชมได้ติดตามอย่างตื่นตาตื่นใจและมีประสิทธิภาพเป็นการช่วยในการเรียนการสอน สอดคล้องกับงานวิจัยของสุริยาวัธ เสาวคนธ์ (2554 : บทคัดย่อ) ได้พัฒนาชุดสื่อประสมสำหรับการสอนทฤษฎีวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ผลการวิจัยพบว่า สื่อประสมสำหรับการสอนทฤษฎีวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ประกอบด้วย เอกสารประกอบการสอน โปรแกรมนำเสนอเพาเวอร์พอยต์ ชุดสาธิตเพื่อทดสอบทฤษฎี และโปรแกรมการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งผลการทดสอบชุดสาธิตเพื่อทดสอบทฤษฎีและโปรแกรมการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ พบว่า ผู้เรียนมีความพึงพอใจต่อบทเรียนที่ใช้สื่อประสมที่พัฒนาขึ้นอยู่ในระดับมาก

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า สื่อประสมที่พัฒนาขึ้นคุณภาพสามารถนำไปประกอบการสอนทฤษฎีวงจรไฟฟ้ากระแสสลับได้เป็นอย่างดี

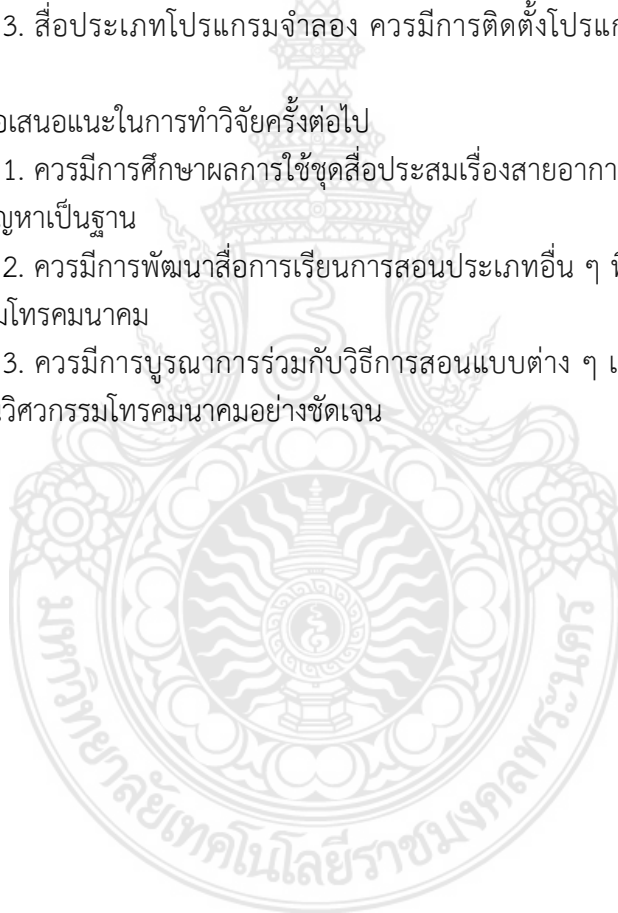
5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งนี้

1. การนำชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปไปใช้งานนั้น ผู้ใช้งานต้องคำนึงถึงสภาพแวดล้อมอื่น ๆ ด้วย เช่น ภายในห้องเรียนมีทรัพยากรที่เหมาะสมกับการนำสื่อไปใช้หรือไม่ มีคอมพิวเตอร์เพียงพอต่อการใช้ของผู้เรียนหรือไม่
2. ผู้สอนสามารถนำชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปไปใช้ในการจัดการเรียนการสอนได้หลายวิชา เพื่อให้ผู้เรียนมองเห็นสื่อของจริง
3. สื่อประเภทโปรแกรมจำลอง ควรมีการติดตั้งโปรแกรมจำลองก่อนเข้าสอนในเนื้อหานั้น ๆ

5.3.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรมีการศึกษาผลการใช้ชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปกับการบูรณาการการสอนโดยใช้ปัญหาเป็นฐาน
2. ควรมีการพัฒนาสื่อการเรียนการสอนประเภทอื่น ๆ ที่เกี่ยวกับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม
3. ควรมีการบูรณาการร่วมกับวิธีการสอนแบบต่าง ๆ เพื่อให้ผู้เรียนเกิดแนวคิดในการเรียนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมอย่างชัดเจน



บรรณานุกรม

- กิตานันท์ มลิทอง. เทคโนโลยีการศึกษาและนวัตกรรม. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- กฤษมันต์ วัฒนารงค์. เทคโนโลยีเทคนิคศึกษา. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548.
- คทาวัช ชุมขวัญ. การสร้างและทดสอบประสิทธิภาพชุดการสอนโดยใช้สื่อประสม เรื่องเครื่องส่งวิทยุ วิชาเครื่องส่งวิทยุและสายอากาศ หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ พุทธศักราช 2545 (ปรับปรุง พ.ศ. 2546) สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา. วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2552.
- ศรัณย์ ชูคดี และสมศักดิ์ อรรถทิมากุล. “การพัฒนาโปรแกรมจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในท่อนำคลื่นสำหรับการเรียนการสอนในรายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ.” การประชุมวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรมระดับชาติ ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร, 2552.
- ดุสิต ขาวเหลือง. “การบูรณาการใช้สื่อประสมและสื่อหลายมิติเพื่อการสอนและการเรียนรู้.” วารสารศึกษาศาสตร์ ฉบับที่ 1 ปีที่ 18 (ม.ย. 49 – ต.ค. 2549).
- ชัยยงค์ พรหมวงศ์. เอกสารการสอนชุดวิชา การออกแบบระบบการเรียนการสอน หน่วยที่ 12. นนทบุรี : มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, 2545.
- สุริยาวัช เสาวคนธ์. “การพัฒนาชุดสื่อประสมสำหรับการสอนทฤษฎีวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ”. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 (ม.ค. – มิ.ย. 2554).
- อำนาจ ปาละหงษา. การพัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพชุดการสอนแบบสื่อประสม เรื่องการมอดูเลตแบบเข้ารหัสพัลส์และการมัลติเพล็กซ์ วิชาการระบบสื่อสาร 2 หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2544). วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2551.
- David M. Pozar. *Microwave Engineering, 3rd Edition*. New York: John Wiley & Sons Inc., 2004.
- Rui Zhang, Raafat R. Mansour. “Dual-Band Dielectric-Resonator Filters.” *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*. Vol. 57 No. 7 : (1760 – 1766), 2009.
- Sha Luo, Lei Zhu, and Sheng Sun. “Stopband-Expanded Low-Pass Filters Using Microstrip Coupled-Line Hairpin Units.” *IEEE Microwave and Wireless Components Letter*, Vol. 18 No. 8 : (506 – 508), 2008.

บรรณานุกรม (ต่อ)

Sommart Kamkleing and Somsak Akatimagool. "Microwave Filter Education Supported by Wave Iterative Simulation Program." **Proceedings of ECTI-CON** : (277 – 280), 2008.



ภาคผนวก




ภาคผนวก ก
รายนามชื่อผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบเครื่องมือการวิจัย



รายนามชื่อผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบเครื่องมือการวิจัย

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัฒนา พลทวี
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรณ ชลวาสิน
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภารธ ขำเกลี้ยง





ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อสอบกับวัตถุประสงค์
ผลการวิเคราะห์ค่าความยากง่าย และค่าอำนาจจำแนกของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

ตารางที่ ข.1 ค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อสอบกับวัตถุประสงค์

ข้อ	คนที่			รวม	IOC	แปลผล
	1	2	3			
1	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
2	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
3	1	1	0	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
4	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
5	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
6	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
7	-1	1	1	1	0.33	ปรับปรุง**
8	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
9	-1	1	1	1	0.33	ปรับปรุง**
10	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
11	-1	1	1	1	0.33	ปรับปรุง**
12	1	1	0	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
13	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
14	1	0	1	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
15	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
16	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
17	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
18	1	1	0	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
19	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
20	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
21	1	1	0	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
22	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
23	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
24	-1	1	1	1	0.33	ปรับปรุง**
25	1	1	0	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
26	-1	1	1	1	0.33	ปรับปรุง**
27	-1	1	1	1	0.33	ปรับปรุง**
28	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
29	-1	1	1	1	0.33	ปรับปรุง**
30	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้

หมายเหตุ

ใช้ได้/ปรับปรุง* หมายถึง ข้อคำถามนั้นใช้ได้และมีการปรับปรุงตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ เพื่อให้ข้อคำถามมีความสมบูรณ์มากขึ้น

ปรับปรุง** หมายถึง ข้อคำถามนั้นมีการปรับปรุงให้มีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์และทำการตรวจสอบอีกครั้งจากผู้เชี่ยวชาญ

ตารางที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความยากง่าย และค่าอำนาจจำแนกของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

ข้อที่	ค่าความยากง่าย	ค่าอำนาจจำแนก
1	0.66	0.40
2	0.70	0.46
3	0.66	0.40
4	0.56	0.33
5	0.66	0.40
6	0.66	0.40
7	0.56	0.33
8	0.70	0.46
9	0.66	0.40
10	0.56	0.40
11	0.66	0.40
12	0.56	0.33
13	0.66	0.46
14	0.66	0.40
15	0.66	0.33
16	0.56	0.33
17	0.66	0.46
18	0.66	0.40
19	0.66	0.46
20	0.56	0.40
21	0.66	0.33
22	0.66	0.46
23	0.66	0.40
24	0.56	0.33
25	0.66	0.46
26	0.56	0.33

ข้อที่	ค่าความยากง่าย	ค่าอำนาจจำแนก
27	0.66	0.33
28	0.66	0.40
29	0.56	0.46
30	0.66	0.33
ค่าความเชื่อมั่นทั้งฉบับเท่ากับ 85.00%		



ภาคผนวก ค
ผลการทดลองใช้กับนักศึกษา



ตารางที่ ค.1 คะแนนการทำแบบฝึกหัดในแต่ละบทเรียน

คนที่	คะแนนการทำแบบฝึกหัดในแต่ละบทเรียน		
	บทเรียนที่ 1 (เต็ม 15 คะแนน)	บทเรียนที่ 2 (เต็ม 15 คะแนน)	บทเรียนที่ 3 (เต็ม 15 คะแนน)
1	10	10	10
2	12	10	11
3	11	12	10
4	10	11	10
5	10	10	11
6	10	11	12
7	11	11	11
8	11	12	13
9	11	14	11
10	10	13	11
11	14	14	11
12	12	14	13
13	13	13	13
14	10	13	10
15	10	15	10
ร้อยละ	80.44	80.89	80.00
ค่าเฉลี่ยของร้อยละ	80.44		

ตารางที่ ค.2 คะแนนการทำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียน

คนที่	แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน	
	ก่อนเรียน (30 คะแนน)	หลังเรียน (30 คะแนน)
1	5	24
2	4	23
3	8	24
4	3	28
5	7	25
6	5	24
7	5	23
8	3	20
9	8	21
10	6	23
11	6	29
12	7	22
13	8	21
14	9	27
15	10	26
ร้อยละ	6.27	24.00
S.D.	0.10	0.17

ภาคผนวก ง
แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน



แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

- คำชี้แจง** 1. แบบทดสอบมีทั้งหมด 30 ข้อ
 2. จงเลือกคำตอบที่ถูกต้องที่สุดเพียงข้อเดียวโดยทำเครื่องหมาย X ลงในกระดาษคำตอบ
 3. อนุญาตให้เปิดเอกสารและใช้เครื่องคำนวณได้
1. โครงสร้างสายไมโครสตริปมีลักษณะตามข้อใด
 - ก. แถบตัวนำวางด้านบนฐานรองและด้านล่างฐานรองเป็นระนาบกราวนด์
 - ข. แถบตัวนำและระนาบกราวนด์วางขนานบนฐานรอง
 - ค. แถบตัวนำวางภายในฐานรองและมีระนาบกราวนด์วางด้านล่างฐานรอง
 - ง. ระนาบกราวนด์วางด้านบนขนานแถบตัวนำและด้านล่างฐานรองเป็นระนาบกราวนด์
 2. โหมดคลื่นในสายไมโครสตริปถูกประมาณว่าเป็นโหมดคลื่นแบบใด
 - ก. โหมด TE
 - ข. โหมด TM
 - ค. โหมด TEM
 - ง. โหมด HE
 3. ข้อใดถูกต้องเกี่ยวกับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (ϵ_e)
 - ก. $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$
 - ข. $\epsilon_e < \epsilon_r$
 - ค. $\epsilon_e = \sqrt{\epsilon_r}$
 - ง. $\epsilon_e < 1$
 4. ความหนาฐานรองและความกว้างแถบตัวนำเท่าเดิม แล้วเพิ่มค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสายไมโครสตริป ข้อใดถูกต้อง
 - ก. อิมพีแดนซ์ของสายเปลี่ยนแปลงขึ้นกับความถี่ใช้งาน
 - ข. อิมพีแดนซ์ของสายไม่เปลี่ยนแปลง
 - ค. อิมพีแดนซ์ของสายลดลง
 - ง. อิมพีแดนซ์ของสายเพิ่มขึ้น

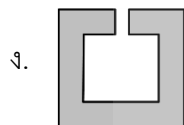
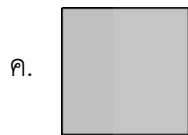
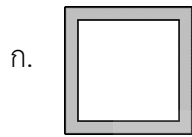
5. ถ้าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผลเท่ากับ 4 ความยาวคลื่นในสายไมโครสตริปที่ความถี่ใช้งาน 3 GHz มีค่าเท่าไร
- 40 cm
 - 30 cm
 - 15 cm
 - 7.5 cm
6. บนแผ่นวงจรพิมพ์ชนิดเดียวกัน ถ้าต้องการอิมพีแดนซ์สูงขึ้นแถบตัวนำต้องมีลักษณะอย่างไร
- ความยาวแถบตัวนำลดลง
 - ความยาวแถบตัวนำเพิ่มขึ้น
 - ความกว้างแถบตัวนำลดลง
 - ความกว้างแถบตัวนำเพิ่มขึ้น
7. ข้อใดไม่ใช่สาเหตุของการลดทอนในสายไมโครสตริป
- การสูญเสียเนื่องจากความไม่แมทซ์กับโหลด
 - การสูญเสียเนื่องจากความร้อนในตัวนำ
 - การสูญเสียในฐานรองไดอิเล็กตริก
 - การสูญเสียในตัวนำ
8. สายไมโครสตริปมีการลดทอนรวมเท่ากับ 0.8 Np/m ถ้าสายยาว 20 cm มีการลดทอนกี่เดซิเบล
- 0.69 dB
 - 1.39 dB
 - 8.69 dB
 - 9.49 dB
9. สายไมโครสตริปมีการลดทอนรวม 2 dB/m ถ้าป้อนกำลังงาน 1 W ที่ปลายสายยาว 10 cm จะมีกำลังงานออกที่ปลายสายอีกด้านกี่วัตต์
- 0.2 W
 - 0.95 W
 - 1.87 W
 - 2.14 W
10. ข้อใดกล่าวได้ถูกต้องเกี่ยวกับความไม่ต่อเนื่องความกว้างแบบขั้น
- ผลต่างของความกว้างขั้นลดลง ค่าคาปาซิแตนซ์ขนานลดลง
 - ผลต่างของความกว้างขั้นลดลง ค่าคาปาซิแตนซ์ขนานเพิ่มขึ้น
 - ผลต่างของความกว้างขั้นลดลง ค่าอินดักแตนซ์อนุกรมเพิ่มขึ้น
 - ผลต่างของความกว้างขั้นลดลง ค่าอินดักแตนซ์ไม่เปลี่ยนแปลง

11. ข้อใดแสดงแทนช่องแคบที่เกิดในสายไมโครสตริป
- ก. อินดัสแตนท์ช้อนุกรม
 - ข. อินดัสแตนท์ขนาน
 - ค. คาปาซิแตนซ์ช้อนุกรม
 - ง. คาปาซิแตนซ์ขนาน
12. สายไมโครสตริปที่เป็นปลายเปิดถูกแทนด้วยค่าใด
- ก. อินดัสแตนท์ช้อนุกรม
 - ข. อินดัสแตนท์ขนาน
 - ค. คาปาซิแตนซ์ช้อนุกรม
 - ง. คาปาซิแตนซ์ขนาน
13. ข้อใดเป็นอุปกรณ์กึ่งลัมป์ของไมโครสตริปส่วนสั้นที่มีอิมพีแดนซ์สูง
- ก. ตัวเก็บประจุช้อนุกรม
 - ข. ตัวเก็บประจุขนาน
 - ค. ตัวเหนี่ยวนำช้อนุกรม
 - ง. ตัวเหนี่ยวนำขนาน
14. สตັบแบบลัดวงจรมีคุณสมบัติเหมือนอุปกรณ์ใด
- ก. ตัวเก็บประจุช้อนุกรม
 - ข. ตัวเก็บประจุขนาน
 - ค. ตัวเหนี่ยวนำช้อนุกรม
 - ง. ตัวเหนี่ยวนำขนาน
15. สตັบแบบเปิดวงจรมีคุณสมบัติเหมือนอุปกรณ์ใด
- ก. ตัวเก็บประจุช้อนุกรม
 - ข. ตัวเก็บประจุขนาน
 - ค. ตัวเหนี่ยวนำช้อนุกรม
 - ง. ตัวเหนี่ยวนำขนาน
16. ข้อใดเป็นปปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ความถี่เรโซแนนท์
- ก. ค่าความต้านทานเท่ากับค่ารีแอ็กแตนซ์รวม
 - ข. พลังงานสะสมเท่ากับกำลังงานสูญเสีย
 - ค. ขนาดอิมพีแดนซ์เท่ากับขนาดรีแอ็กแตนซ์รวม
 - ง. พลังงานไฟฟ้าสะสมเท่ากับพลังงานแม่เหล็กสะสม

17. ข้อใดกล่าวได้ถูกต้องเกี่ยวกับค่าอัตราส่วนแบนด์วิดธ์ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน
- ก. มีขนาดลดลง เมื่อค่าความเหนี่ยวนำลดลง
 - ข. มีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น
 - ค. มีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อค่า Q เพิ่มขึ้น
 - ง. มีขนาดลดลง เมื่อค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น
18. ข้อใดกล่าวได้ถูกต้องเกี่ยวกับเรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปยาว $\lambda/2$ ปลายลัดวงจร
- ก. ขนาดกระแสสูงสุดที่กึ่งกลางสาย
 - ข. ขนาดแรงดันสูงสุดที่ปลายสาย
 - ค. วงจรเทียบเคียงคือวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม
 - ง. วงจรเทียบเคียงคือวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน
19. ที่ความถี่เรโซแนนซ์ขนาดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งใดบนเรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปยาว $\lambda/2$ ปลายลัดวงจร
- ก. กึ่งกลางสายเรโซเนเตอร์
 - ข. ปลายเรโซเนเตอร์ด้านลัดวงจร
 - ค. ปลายทั้งสองด้านของเรโซเนเตอร์
 - ง. ปลายเรโซเนเตอร์ด้านตรงข้ามกับด้านลัดวงจร
20. ที่ความถี่เรโซแนนซ์ขนาดสนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งใดบนเรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปยาว $\lambda/2$ ปลายลัดวงจร
- ก. กึ่งกลางสายเรโซเนเตอร์
 - ข. ปลายเรโซเนเตอร์ด้านลัดวงจร
 - ค. ปลายทั้งสองด้านของเรโซเนเตอร์
 - ง. ปลายเรโซเนเตอร์ด้านตรงข้ามกับด้านลัดวงจร
21. ที่ความถี่เรโซแนนซ์ขนาดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งใดบนเรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปยาว $\lambda/4$ ปลายลัดวงจร
- ก. กึ่งกลางสายเรโซเนเตอร์
 - ข. ปลายเรโซเนเตอร์ด้านลัดวงจร
 - ค. ปลายทั้งสองด้านของเรโซเนเตอร์
 - ง. ปลายเรโซเนเตอร์ด้านตรงข้ามกับด้านลัดวงจร

22. ที่ความถี่เรโซแนนซ์ขนาดสนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งใดบนเรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริป ยาว $\lambda/4$ ปลายลัดวงจร
- ก. กึ่งกลางสายเรโซเนเตอร์
 - ข. ปลายเรโซเนเตอร์ด้านลัดวงจร
 - ค. ปลายทั้งสองด้านของเรโซเนเตอร์
 - ง. ปลายเรโซเนเตอร์ด้านตรงข้ามกับด้านลัดวงจร
23. ที่ความถี่เรโซแนนซ์ขนาดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งใดบนเรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริป ยาว $\lambda/2$ ปลายเปิดวงจร
- ก. กึ่งกลางสายเรโซเนเตอร์
 - ข. ปลายเรโซเนเตอร์ด้านใดด้านหนึ่ง
 - ค. ปลายทั้งสองด้านของเรโซเนเตอร์
 - ง. ปลายเรโซเนเตอร์ถึงตำแหน่งกึ่งกลาง
24. ที่ความถี่เรโซแนนซ์ขนาดสนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งใดบนเรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริป ยาว $\lambda/2$ ปลายเปิดวงจร
- ก. กึ่งกลางสายเรโซเนเตอร์
 - ข. ปลายเรโซเนเตอร์ด้านใดด้านหนึ่ง
 - ค. ปลายทั้งสองด้านของเรโซเนเตอร์
 - ง. ปลายเรโซเนเตอร์ถึงตำแหน่งกึ่งกลาง
25. เรโซเนเตอร์แบบไมโครสตริปยาว $\lambda_g/2$ ปลายเปิดวงจร มีความถี่เรโซแนนซ์มูลฐาน 1.8 GHz จะเกิดความถี่ปลอมเทียมครั้งแรกที่ความถี่ใด
- ก. 2.8 GHz
 - ข. 3.6 GHz
 - ค. 5.4 GHz
 - ง. 9.6 GHz

26. ข้อใดเป็นเรโซเนเตอร์ที่เกิดโหมดคู่



27. ข้อใดถูกต้องเกี่ยวกับการเชื่อมโยงไฟฟ้า(electric coupling)ระหว่างเรโซเนเตอร์

- ก. ความถี่เรโซแนนท์เป็นผลมาจากการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำ
- ข. ความถี่เรโซแนนท์เป็นผลมาจากการเพิ่มและลดค่าความเหนี่ยวนำ
- ค. ความถี่เรโซแนนท์เป็นผลมาจากการเพิ่มค่าความจุ
- ง. ความถี่เรโซแนนท์เป็นผลมาจากการเพิ่มและลดค่าความจุ

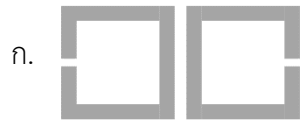
28. ข้อใดถูกต้องเกี่ยวกับการเชื่อมโยงแม่เหล็ก(magnetic coupling)ระหว่างเรโซเนเตอร์

- ก. ความถี่เรโซแนนท์เป็นผลมาจากการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำ
- ข. ความถี่เรโซแนนท์เป็นผลมาจากการเพิ่มและลดค่าความเหนี่ยวนำ
- ค. ความถี่เรโซแนนท์เป็นผลมาจากการเพิ่มค่าความจุ
- ง. ความถี่เรโซแนนท์เป็นผลมาจากการเพิ่มและลดค่าความจุ

29. ข้อใดถูกต้องเกี่ยวกับการใช้สายป้อนแบบสายแท่งที่เรโซเนเตอร์

- ก. ระยะแท่งปัดตรงกับเส้นกราวด์เสมือนทำให้ค่าการเชื่อมโยงสูงสุด
- ข. ระยะแท่งปัดเข้าใกล้เส้นกราวด์เสมือนทำให้ค่าการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น
- ค. ระยะแท่งปัดเข้าใกล้เส้นกราวด์เสมือนทำให้ค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกเพิ่มขึ้น
- ง. ระยะแท่งปัดเข้าใกล้เส้นกราวด์เสมือนทำให้ค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกลดลง

30. ข้อใดเกิดการเชื่อมโยงผสม(mixed coupling)



เฉลยแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

ข้อ	ก	ข	ค	ง	ข้อ	ก	ข	ค	ง
1	X				16				X
2			X		17		X		
3	X				18			X	
4				X	19	X			
5				X	20			X	
6			X		21				X
7	X				22		X		
8		X			23			X	
9		X			24	X			
10	X				25		X		
11			X		26		X		
12				X	27				X
13			X		28		X		
14				X	29			X	
15		X			30		X		



ประวัติผู้วิจัย



ประวัติผู้วิจัย

ประวัติ (หัวหน้าโครงการวิจัย)

ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) พิสิฐ สอนละ
(ภาษาอังกฤษ) Pisit Sonla

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
399 ถนนสามเสน แขวงวชิรพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300
โทร. 084-7192088 e-mail : pisit.s@mutp.ac.th

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญา	คุณวุฒิ/สาขาวิชา	สถาบันอุดมศึกษา	ปีที่สำเร็จ
ปริญญาโท	คอ.ม. สาขาวิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	2556
ปริญญาตรี	คอ.บ. สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์-โทรคมนาคม	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ขอนแก่น	-

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

-

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

ผลงานวิจัย

ชื่อผลงานวิจัย	สถานภาพ	แหล่งทุน/ปี
-	-	-

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัย

วารสารระดับนานาชาติ

-

วารสารระดับชาติ

-

การประชุมวิชาการระดับชาติ

-

การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

-

ประวัติ (ผู้ร่วมวิจัย)

ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) รุ่งอรุณ พรเจริญ
(ภาษาอังกฤษ) Rungaroon Pornchanroen

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
399 ถนนสามเสน แขวงวชิรพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300
โทร. 084 680 7894
E-mail : rung_koys@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญา	คุณวุฒิ/สาขาวิชา	สถาบันอุดมศึกษา	ปีที่สำเร็จ
ปริญญาเอก	ปร.ด. สาขาวิชาวิจัยและ พัฒนาการสอนเทคนิคศึกษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม เกล้าพระนครเหนือ	2555
ปริญญาโท	คอ.ม. สาขาไฟฟ้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ	2548
ปริญญาตรี	คอ.บ. สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์-โทรคมนาคม	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยา เขตเทเวศร์	2544

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

คอมพิวเตอร์ การวิจัยทางการศึกษา เทคนิคและวิธีการสอน การสร้างหลักสูตร และการจัด
ฝึกอบรม

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย**ผลงานวิจัย**

ชื่อผลงานวิจัย	สถานภาพ	แหล่งทุน/ปี
ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงจูงใจในการประกอบวิชาชีพครูภายใต้ ภาวะวิกฤตทางเศรษฐกิจ	หัวหน้า โครงการวิจัย	งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2551
ศึกษาความพร้อมและความต้องการพัฒนาด้านวิชาการของ บุคลากร (สายสอน) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระ นคร	หัวหน้า โครงการวิจัย	งบประมาณ ผลประโยชน์ของสถาบัน ประจำปี 2551
แนวทางการพัฒนาวิสัยทัศน์นักศึกษาตามความคิดเห็นของ บุคลากรสายวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระ นคร งบประมาณผลประโยชน์ของสถาบัน	หัวหน้า โครงการวิจัย	งบประมาณ ผลประโยชน์ของสถาบัน ประจำปี 2556

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัย

วารสารระดับนานาชาติ

Rungaroon Sripan and Bandit Suksawat. Factors Affecting Teaching and Learning of Computer Disciplines at Rajamangala University of Technology. *US-China Education Review (Journal)*. Vol. 7, No. 12, pp. 33-38, 2010.

วารสารระดับชาติ

รุ่งอรุณ ศรีปาน และ เขาวนวัฒน์ อูมานนท์. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงจูงใจในการประกอบวิชาชีพครูภายใต้ภาวะวิกฤตทางเศรษฐกิจ. วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ฉบับที่ 7 เล่มที่ 1 หน้า 70-79 (มกราคม – มิถุนายน, 2551)

นุชนาฏ ผ่องพุฒิ และรุ่งอรุณ ศรีปาน. ศึกษาคุณสมบัติของผู้เรียนที่เข้าสู่กระบวนการผลิตบัณฑิตในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยรามคำแหง ฉบับที่ 11 เล่มที่ 2 หน้า 65 – 70 (กรกฎาคม – ธันวาคม 2551)

Rungaroon Sripan, Uri Apichatbanlue and Bandit Suksawat. Design of Practical Learning System for Computer Disciplines by Using Quality Function Deployment Technique. *The Journal of KITNB*. Vol. 22 , No. 2, pp. 405-415, 2012.

Rungaroon Sripan, Uri Apichatbanlue and Bandit Suksawat. Comparison of Ability in Classifying Content by Students' Knowledge Level between Teachers Who Learn Through CAI Media and Teachers Who Attend Computer Training Courses. *RMUTP Research Journal*. Vol. 7 , No. 1, pp. 67-78, 2013.

การประชุมวิชาการระดับชาติ

รุ่งอรุณ ศรีปาน. ศึกษาความพร้อมและความต้องการพัฒนาด้านวิชาการของบุคลากร (สายสอน) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. การประชุมวิชาการ ประจำปี 2551 มหาวิทยาลัยรามคำแหง หน้า 431 – 439 (3-4 กรกฎาคม 2551)

นุชนาฏ ผ่องพุฒิ, รุ่งอรุณ ศรีปาน และเริงศักดิ์ มานะสุนทร. การพัฒนารูปแบบการเสริมสร้างภาพลักษณ์ของครูช่างอุตสาหกรรมที่สำเร็จการศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. การประชุมทางวิชาการครูศาสตร์อุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 3. (18 – 19 ธันวาคม 2551)

รุ่งอรุณ ศรีปาน และบัณฑิต สุขสวัสดิ์. สภาพและปัญหาการเรียนการสอนกลุ่มวิชาคอมพิวเตอร์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. การประชุมวิชาการ ประจำปี 2552 มหาวิทยาลัยรามคำแหง หน้า 389 – 398 (3-4 พฤศจิกายน 2552)

Rungaroon Sripan. Factor Analysis that Applied E-Learning in Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, **Proceeding of The 5th Rajamangala University of Technology Conference (5th RMUTCON) and The 4th Rajamangala University of Technology International Conference (4th RMUTIC)**, 15-16 July 2013 in Bangkok, Thailand, 2013.

Rungaroon Sripan and Nudchanard Pongput. A Developing Learning Package to Increase a Competency Learning Management and Professional Teacher for Teacher License, **Proceeding of The 5th Rajamangala University of Technology Conference (5th RMUTCON) and The 4th Rajamangala University of Technology International Conference (4th RMUTIC)**, 15-16 July 2013 in Bangkok, Thailand, 2013.

การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Rungaroon Sripan and Bandit Suksawat. Propose of Fuzzy Logic-Based Students' Learning Assessment. **International Conference on Control, Automation and Systems 2010 (ICCAS 2010)**, 27 – 30 October 2010 in KINTEX, Gyeonggi-do, Korea, 2010.

ประวัติ (ผู้ร่วมวิจัย)

ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) อนุชา ไชยชาญ
(ภาษาอังกฤษ) Anucha Chaichan

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
399 ถนนสามเสน แขวงจวิทรพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300
โทรศัพท์ 085-0470927 e-mail : anucha.c@mutp.ac.th

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญา	คุณวุฒิ/สาขาวิชา	สถาบันอุดมศึกษา	ปีที่สำเร็จ
ปริญญาโท	วศม. วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2556
ปริญญาตรี	คอ.บ. สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์-โทรคมนาคม	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลขอนแก่น	-

ประวัติ (ผู้ร่วมวิจัย)

ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) ภาวนา ชูศิริ
(ภาษาอังกฤษ) Pawana Choosiri

รหัสประจำตัวประชาชน 3230100176952

ตำแหน่งปัจจุบัน หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม

หน่วยงานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
399 ถนนสามเสน แขวงวชิรพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300
โทรศัพท์ 086-6005319 e-mail : p_choosiri@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญา	คุณวุฒิ/สาขาวิชา	สถาบันอุดมศึกษา	ปีที่สำเร็จ
ปริญญาโท	คอม. วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง	2547
ปริญญาตรี	คอบ. วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และโทรคมนาคม	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล	2540

ประวัติ (ผู้ร่วมวิจัย)

ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) วรรณภา มโนสีบ

รหัสประจำตัวประชาชน 3529900208790

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

หน่วยงานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
399 ถนนสามเสน แขวงวชิรพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300
โทรศัพท์ 094-8989498 e-mail : mmannapa2@gmail.com

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญา	คุณวุฒิ/สาขาวิชา	สถาบันอุดมศึกษา	ปีที่สำเร็จ
ปริญญาโท	คอม. ไฟฟ้าสื่อสาร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง	2555
ปริญญาตรี	วทบ. ไฟฟ้าอุตสาหกรรม	มหาวิทยาลัยราชภัฏฉะเชิงเทรา	2537