



การออกแบบวงจรขยายสัญญาณวิทยุความถี่ย่าน 88-108 MHz ในเครื่องส่งวิทยุ

- โดย
1. นางสาว วราธร จารุจิตต์ รหัส B5111657
  2. นางสาว กมลทิพย์ ชีกิ่ง รหัส B51116157
  3. นางสาว ปิยภรณ์ พูลเชื้อ รหัส B5116843

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษารายวิชา 427499 วิศวกรรมโทรคมนาคม  
 ประจำปีการศึกษาที่ 3 ปีการศึกษา 2554

หลักสูตรปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ.2546

# การการออกแบบวงจรรขยายสัญญาณวิทยุความถี่ย่าน 88 - 108 MHz ในเครื่องส่งวิทยุ

คณะกรรมการสอบโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยชัย ทองโสภิต)  
กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร. ประโยชน์ คำสวัสดิ์)  
กรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยาภรณ์ กระฉอดคนอก)  
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำรายงานโครงการฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม รายวิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2554

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงการงาน	เรื่อง การออกแบบวงจรขยายสัญญาณวิทยุความถี่ย่าน 88-108 MHz ในเครื่องส่งวิทยุ
จัดทำโดย	นางสาววราธร จารุจิตต์ B5111657 นางกมลทิพย์ ชีกิ่ง B5116157 นางสาวปิยภรณ์ พูลเชื้อ B5116843
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภาก
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
ภาคการศึกษาที่	3/2554

บทคัดย่อ

(Abstract)

ปัจจุบันสถานีวิทยุชุมชนถือว่าเป็นกิจกรรมด้านโทรคมนาคมที่มีการตั้งสถานีขึ้นเป็นจำนวนมากในหลายพื้นที่ทั่วประเทศ ทั้งนี้เพื่อกระจายข่าวสารเข้าสู่แต่ละชุมชนให้ได้รับรู้ข่าวสารและทันต่อเหตุการณ์ โดยในแต่ละสถานีวิทยุชุมชน ประกอบด้วยเครื่องส่งวิทยุสำหรับเป็นตัวส่งสัญญาณไปยังชุมชนโดยรอบ ซึ่งปัจจุบันเครื่องส่งวิทยุมีหลายรูปแบบ โดยมีส่วนประกอบหลักๆ คือ ภาควงจรขยายสัญญาณกำลังสูง (High Power Amplifier) ในปัจจุบันมีการนำเข้ามาจากต่างประเทศ เพื่อนำมาติดตั้งในแต่ละสถานี และเมื่อเกิดการชำรุดหรือเสียหายจะต้องซ่อม ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาและมียาค่าค่อนข้างสูง ผู้เขียนจึงได้เล็งเห็นความสำคัญของเครื่องส่งสัญญาณวิทยุ จึงได้ศึกษาและออกแบบวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงที่ประกอบไปด้วย 3 ภาคส่วน ได้แก่ ภาควงจรแยกสัญญาณ (Power Divider) แบบ Wilkinson ให้เป็น 2 ทาง สำหรับเป็นอินพุตให้กับภาควงจรขยายสัญญาณความถี่สูง (Pre Amplifier) ในย่านความถี่วิทยุ เอฟ.เอ็ม. 88.0-108.0 MHz กำลังส่ง 10 วัตต์ จำนวน 2 ชุดเท่าๆกัน ซึ่งวงจรถ่ายสัญญาณความถี่สูงแต่ละชุดใช้ทรานซิสเตอร์ เบอร์ BLF177 และรวมสัญญาณในภาคสุดท้ายด้วยวงจรรวมสัญญาณ (Power Combiner) จากสองทางให้เป็นเอาต์พุตสัญญาณเดียว เพื่อให้ได้กำลังส่ง 20 วัตต์ สำหรับเป็นแหล่งจ่ายกำลังให้กับวงจรรองความถี่และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการขยายสัญญาณต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำโครงการได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง และให้คำปรึกษาในทุกด้านแก่คณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทั้งในด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากคณาจารย์ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญชัย ทองโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้คำแนะนำ ช่วยแก้ปัญหา รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขโครงการเล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิระพงษ์ อุฑารสกุล หัวหน้าสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ วงศ์สรรค์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุตติมา พรหมมาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยาภรณ์ กระจงนอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร. ประโยชน์ คำสวัสดิ์ และอาจารย์ ดร. สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ทั้งในด้านทางวิชาการและให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบพระคุณ บุคลากร พี่ๆ บัณฑิตศึกษาสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือแก่คณะผู้จัดทำ นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือคณะผู้จัดทำโครงการในด้านต่างๆ และสุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่ท่านให้การดูแลเอาใจใส่คอยให้กำลังใจและอยู่เคียงข้างมาโดยตลอด จนกระทั่งโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คณะผู้จัดทำโครงการใคร่ขอขอบพระคุณทุกๆ ท่านที่ได้กล่าวไปแล้วไว้ ณ ที่นี้ สำหรับส่วนดีของโครงการชิ้นนี้ ขออุทิศให้แก่คณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่คณะผู้จัดทำโครงการ หากโครงการชิ้นนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ทางคณะผู้จัดทำโครงการใคร่ขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

นางสาววราธร จารุจิตต์  
นางสาวปิยภรณ์ พูลเชื้อ  
นางสาวกมลทิพย์ ชี๊กิ่ง

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ .....	ก
กิตติกรรมประกาศ .....	ข
สารบัญ .....	ค
สารบัญรูป .....	ง
สารบัญตาราง .....	จ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาของโครงการ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	1
1.3 ขอบเขตงาน .....	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีวงจรรขยายสัญญาณเครื่องส่งวิทยุ</b> .....	<b>3</b>
2.1 กล่าวนำ .....	3
2.2 วงจรรขยายสัญญาณความถี่สูง .....	3
2.2.1 คุณลักษณะวงจรรขยายสัญญาณ .....	4
2.2.2 การแมตช์อิมพีแดนซ์ของวงจรรขยายสัญญาณ .....	5
2.2.2.1 แผนภูมิสมิท .....	8
2.2.2.2 การกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิท .....	10
2.2.3 ความเสถียรภาพของวงจรรขยายสัญญาณ .....	11
2.2.4 ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า .....	12
2.2.4.1 มอสเฟสประเภทเอนฮานซ์เมนต์ (Enhancement-type MOSFET) .....	13
2.2.4.2 การไบแอสทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (FET biasing) .....	14
2.2.5 ไอซีเร็กกูเลเตอร์สามขาชนิดแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ .....	15
2.2.6 วงจรรขยายสัญญาณคลาส AB .....	16
2.3 วงจรรองความถี่วิทยุ .....	17

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.3.1 ชนิดของวงจรกรองความถี่ .....	17
2.3.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน .....	19
2.4 วงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณ .....	20
2.5 ขดลวดเหนี่ยวนำ .....	24
2.6 สรุป .....	26
<b>บทที่ 3 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณเครื่องส่งวิทยุ .....</b>	<b>27</b>
3.1 กล่าวนำ .....	27
3.2 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณ .....	27
3.3 การออกแบบวงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณ .....	38
3.4 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน .....	41
3.4 สรุป .....	44
<b>บทที่ 4 การวัดและผลการทดลอง .....</b>	<b>45</b>
4.1 กล่าวนำ .....	45
4.2 การทดลองวงจรขยายสัญญาณ .....	45
4.2.1 วงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 1 .....	46
4.2.2 วงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 2 .....	50
4.3 การทดลองวงจรแยกสัญญาณ .....	54
4.4 การทดลองวงจรรวมสัญญาณ .....	58
4.5 การทดลองวงจรรวมเครื่องขยายสัญญาณความถี่วิทยุ .....	60
4.6 สรุป .....	65
<b>บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>66</b>
5.1 กล่าวนำ .....	66
5.2 สรุปผลการทดลอง .....	66
5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....	67
5.4 แนวทางการพัฒนา .....	67

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
เอกสารอ้างอิง .....	68
ภาคผนวก ก. คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	69
ภาคผนวก ข. Data Sheet ของ BLF177 .....	72
ประวัติผู้เขียน .....	90



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ระบบวงจรขยายสัญญาณทั่วไป ..... 3
2.2	แสดงอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและค่าคอนจูเกตกับ โหลด ..... 5
2.3	รูปแบบของ โคร่งข่ายเมตซ์อิมพีแดนซ์ ..... 6
2.4	โคร่งข่ายเมตซ์ซึ่งอินพุตอิมพีแดนซ์ ..... 7
2.5	โคร่งข่ายเมตซ์ซึ่งเอาท์พุตอิมพีแดนซ์ ..... 7
2.6	โครงสร้างของแผนภูมิสมิท ..... 8
2.7	แผนภูมิสมิท ..... 9
2.8	ทิศทางการเคลื่อนที่ของเมตซ์อิมพีแดนซ์บนแผนภูมิสมิท ..... 11
2.9	วงจรการป้อนกลับ ..... 12
2.10	ชนิดของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าหรือเฟท ..... 13
2.11	กราฟคุณลักษณะถ่ายโอนของ E-MOSFET ชนิด n-Channel ..... 14
2.12	วงจรไบแอสทรานซิสเตอร์แบบ E-MOSFET ..... 15
2.13	แสดงการต่อไอซีเร็กกูเลเตอร์ใช้งานแบบง่าย ๆ ..... 15
2.14	แสดงตำแหน่งขาของ IC Regulator 1เปอร์ 78xx ..... 16
2.15	วงจรขยายสัญญาณคลาสิก ..... 17
2.16	ผลตอบแทนทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ ..... 18
2.17	วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter) ..... 19
2.18	T Type low pass filter ..... 19
2.19	Pi Type low pass filter ..... 20
2.20	ลักษณะของวงจรแยกสัญญาณแบบ 3 พอร์ต ..... 21
2.21	ลักษณะของวงจรรวมสัญญาณแบบ 3 พอร์ต ..... 22
2.22	ลักษณะของสายส่งไมโครสตริป แบบ Wilkinson ..... 22
2.23	การแยกสัญญาณในรูปของ T-junction ..... 23
2.24	แสดงปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ ..... 25
3.1	รูปแบบของ โคร่งข่ายเมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ออกแบบได้ ..... 29



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2	การกำหนดจุด $Z_{in}$ และ $Z_S$ สำหรับบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริงด้านอินพุต ..... 30
3.3	การหาค่าความยาวบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริงด้านอินพุต ..... 31
3.4	ลักษณะของวงจร โครงข่ายแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ด้านอินพุต ..... 32
3.5	การกำหนดจุด $Z_{in}$ และ $Z_S$ สำหรับบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริงด้านเอาต์พุต ..... 33
3.6	การหาค่าความยาวบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริงด้านเอาต์พุต ..... 34
3.7	ลักษณะของวงจร โครงข่ายแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ด้านเอาต์พุต ..... 35
3.8	วงจรเร็กกูเรเตอร์ด้วยไอซีสามขา ..... 35
3.9	วงจรไบแอสวงจรขยายสัญญาณ ..... 35
3.10	วงจรขยายสัญญาณ ..... 36
3.11	วงจรขยายสัญญาณที่ลงอุปกรณ์แล้ว ..... 37
3.12	แบบจำลองสายส่งสัญญาณของไมโครสตริป แบบ Wilkinson ..... 38
3.13	วงจรที่ได้จากการคำนวณค่าต่างๆ ..... 39
3.14	วงจรแยกสัญญาณที่ได้จากการออกแบบ ..... 40
3.15	วงจรรวมสัญญาณที่ได้จากการออกแบบ ..... 40
3.16	Attenuation characteristics for a Chebyshev filter with 1-dB ripple ..... 42
3.17	วงจรมูลฐานที่ได้จากการเปิดตารางที่ 3.1 Chebyshev Low-Pass Prototype Element Values for 1.0-dB Ripple ..... 42
3.18	วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ..... 43
4.1	ลักษณะการวัดผลการทดลองของวงจรขยายสัญญาณ ..... 46
4.2	สัญญาณอินพุตวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 1 ที่ความถี่ 98 เมกะเฮิร์ตซ์ ..... 47
4.3	สัญญาณเอาต์พุตวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 1 ที่ความถี่ 98 เมกะเฮิร์ตซ์ ..... 47 4.4
	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณของเอาต์พุตและความถี่ ของวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 1 ..... 48
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายสัญญาณของเอาต์พุตและความถี่ ของวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 1 ..... 49
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความถี่ ของวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 1 ..... 49

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณและความถี่ของสัญญาณอินพุต และเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 1 ..... 50
4.8	สัญญาณอินพุตของวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 2 ที่ความถี่ 98 เมกะเฮิร์ตซ์ ..... 51
4.9	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 2 ที่ความถี่ 98 เมกะเฮิร์ตซ์ ..... 51
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณของเอาต์พุตและความถี่ของวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 2 ..... 52
4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายสัญญาณของเอาต์พุตและความถี่ของวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 2 ..... 53
4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความถี่ของวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 2 ..... 53
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณและความถี่ของสัญญาณอินพุต และเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 2 ..... 54
4.14	ลักษณะการวัดผลของวงจรแยกสัญญาณ ..... 55
4.15	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรแยกสัญญาณทางพอร์ตที่ 2 ที่ความถี่กลาง 98 MHz ..... 56
4.16	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรแยกสัญญาณทางพอร์ตที่ 3 ที่ความถี่กลาง 98 MHz ..... 56
4.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณและความถี่ ของวงจรแยกสัญญาณ พอร์ตที่ 2 ..... 57
4.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณและความถี่ ของวงจรแยกสัญญาณ พอร์ตที่ 3 ..... 57
4.19	ลักษณะการวัดผลของวงจรรวมสัญญาณ ..... 58
4.20	สัญญาณเอาต์พุตของรวมสัญญาณที่ความถี่กลาง 98 เมกะเฮิร์ตซ์ ..... 59
4.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเอาต์พุตและความถี่ของวงจรรวมสัญญาณ ..... 60
4.22	โครงสร้างการออกแบบวงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุ ..... 60
4.23	ลักษณะการวัดผลของวงจรรวมขยายสัญญาณความถี่วิทยุ ..... 61
4.24	สัญญาณอินพุตของวงจรรวมขยายสัญญาณความถี่วิทยุ ที่ความถี่ 98 เมกะเฮิร์ตซ์ ..... 62
4.25	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรรวมขยายสัญญาณความถี่วิทยุ ที่ความถี่ 98 เมกะเฮิร์ตซ์ ..... 62

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณของเอาต์พุตและความถี่ ของวงจรรวมขยายสัญญาณความถี่วิทยุ .....	63
4.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายสัญญาณของเอาต์พุตและความถี่ ของวงจรรวมขยายสัญญาณความถี่วิทยุ .....	64
4.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความถี่ ของวงจรรวมขยายสัญญาณความถี่วิทยุ .....	64
4.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณและความถี่ ของวงจรรวมขยายสัญญาณความถี่วิทยุ .....	65



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1(A) Chebyshev Low-Pass Prototype Element Values for 1.0-dB Ripple .....	44
3.1(B) Chebyshev Low-Pass Prototype Element Values for 1.0-dB Ripple .....	44



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาของโครงการ

เทคโนโลยีสื่อสารไร้สายความถี่สูง (Radio Frequency,RF) สามารถรับส่งสัญญาณได้ในระยะไกลและยังมีการใช้อย่างแพร่หลาย เช่น วิทยุสื่อสาร (Radio communications) วิทยุชุมชน (Community radio) ซึ่งถือเป็นกิจการทางด้านโทรคมนาคมที่มีการก่อตั้งขึ้นเป็นจำนวนมากในหลายพื้นที่ เพื่อกระจายข่าวสารเข้าสู่ชุมชน โดยในแต่ละสถานีนั้น ประกอบด้วยเครื่องส่งวิทยุซึ่งมีหลากหลายรูปแบบ และมีส่วนประกอบหลักคือ ภาควงจรขยายสัญญาณกำลังสูง (High Power Amplifier) ในปัจจุบันมีการนำเข้ามาจากต่างประเทศ และมีราคาสูง

ด้วยเหตุผลดังกล่าวผู้เขียนจึงได้เล็งเห็นความสำคัญและมีความสนใจที่จะศึกษาการทำงานและออกแบบวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงที่ประกอบด้วย 3 ภาควงจร ได้แก่ ภาควงจรแยกสัญญาณ (Power Divider) แบบ Wilkinson ให้เป็น 2 ทาง สำหรับเป็นอินพุตให้กับภาควงจรขยายสัญญาณ (Pre Amp) ในย่านความถี่วิทยุ เอฟ.เอ็ม. 88.0 -108.0 MHz กำลังส่ง 10 วัตต์ จำนวน 2 ชุดเท่าๆกันซึ่งวงจรขยายสัญญาณความถี่สูงแต่ละชุดใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BLE177 และรวมสัญญาณในภาคสุดท้ายด้วยวงจรรวมสัญญาณ (Power Combiner) จากสองทางให้เป็นสัญญาณเอาต์พุตสัญญาณเดียว เพื่อให้ได้กำลังส่ง 20 วัตต์ สำหรับเป็นแหล่งจ่ายกำลังให้กับวงจรรองความถี่และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการขยายสัญญาณต่อไป

#### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและออกแบบวงจรขยายสัญญาณเครื่องส่งวิทยุ จรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณ
- 1.2.2 เพื่อมีความรู้ความเข้าใจองค์ประกอบต่างๆในวงจรขยายสัญญาณเครื่องส่งวิทยุ
- 1.2.3. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจรขยายสัญญาณเครื่องส่งวิทยุ

### 1.3 ขอบเขตงาน

- 1.3.1 ศึกษาหาข้อมูลวงจรขยายสัญญาณเครื่องส่งวิทยุเพื่อให้ได้วงจรที่มีประสิทธิภาพ
- 1.3.2 ออกแบบและสร้างวงจรขยายสัญญาณ วงจรแยกสัญญาณ และวงจรรวมสัญญาณของเครื่องส่งวิทยุ
- 1.3.3 ทดสอบผลการทดลองและเก็บผลการทดลอง
- 1.3.4 วิเคราะห์ประสิทธิภาพวงจรขยายสัญญาณเครื่องส่งวิทยุ

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาหาข้อมูลจากหนังสือและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ออกแบบและสร้างวงจรขยายสัญญาณวิทยุ
- 1.4.3 ทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 สามารถคำนวณและออกแบบวงจรขยายสัญญาณ วงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณ
- 1.6.2 สามารถนำความรู้ที่ได้ทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติมาประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆได้
- 1.6.3 สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษามาประกอบวิชาชีพได้
- 1.6.4 ได้รับการพัฒนาตนเองทางด้านความคิด การสังเกต การวิเคราะห์ และการแก้ไขปัญหา

## บทที่ 2

### ทฤษฎีวงจรมายสัญญาณเครื่องส่งวิทยุ

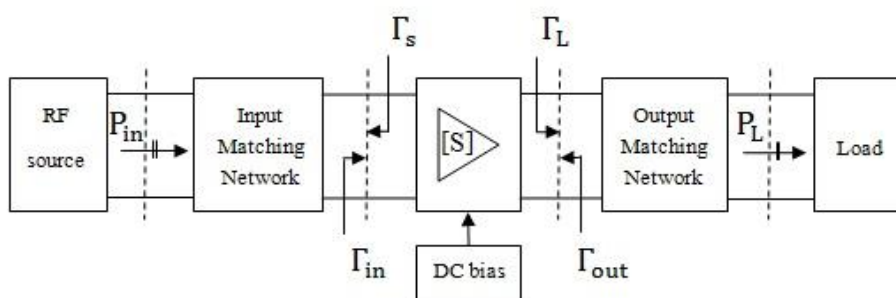
#### 2.1 กล่าวนำ

การออกแบบระบบวงจรมายสัญญาณวิทยุประกอบด้วยส่วนประกอบหลายอย่างที่สำคัญ โดยได้ศึกษาและออกแบบเป็นวงจรมายสัญญาณกำลังสูง ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงทฤษฎีของหลักการ ทำงานของวงจร การประยุกต์ใช้งานและ โครงสร้างของตัวอุปกรณ์เพื่อนำมาซึ่งการออกแบบและสร้าง ให้ได้กำลังงานและประสิทธิภาพได้ดีที่สุดโดยเนื้อหาในบทนี้ กล่าวถึงทฤษฎีของวงจรมายสัญญาณ ความถี่สูง วงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณ ซึ่งเป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการออกแบบสำหรับ วิเคราะห์ผลต่อการทำงานของวงจรและการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรมายสัญญาณกำลังสูงเพื่อให้ได้ วงจรที่มีประสิทธิภาพและอัตราขยายสัญญาณตามที่กำหนด

#### 2.2 วงจรมายสัญญาณความถี่สูง

วงจรมายสัญญาณความถี่สูง ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ต้องการในการความถี่สูง การออกแบบ ทั่วไปจะใช้พารามิเตอร์การกระจาย (S-parameter) ของทรานซิสเตอร์ที่ใช้งาน สิ่งสำคัญที่ต้อง พิจารณาในการออกแบบวงจรมายสัญญาณความถี่สูง คือ ความเสถียรภาพ อัตราขยายกำลัง แบนด์ วิดท์ และสัญญาณรบกวน การออกแบบ จะต้องเลือกคุณสมบัติ และชนิดของทรานซิสเตอร์ให้ เหมาะสม รวมทั้งการออกแบบโครงข่ายแมตซ์ซึ่งทางด้านอินพุตและเอาต์พุต เพื่อให้ได้วงจรมาย สัญญาณความถี่สูงที่มีความเสถียรภาพ มีอัตราขยายกำลังสูง และมีแบนด์วิดท์ตามที่ต้องการ

ในระบบวงจรมายสัญญาณทั่วไป จะประกอบด้วยวงจรโครงข่ายที่ทำหน้าที่เป็นแมตซ์ซึ่งด้านอินพุต และเอาต์พุต ดังรูปที่ 2.1 โดยส่วนที่ขยายสัญญาณอาจทำการขยายได้หลายตอน



รูปที่ 2.1 ระบบวงจรมายสัญญาณทั่วไป

### 2.2.1 คุณลักษณะวงจรถยายสัญญาณ

ลักษณะของวงจรถยายสัญญาณเป็นการเพิ่มขนาดสัญญาณตามความต้องการ โดยทั่วไปวงจรถยายสัญญาณจะมี 2 รูปแบบ คือวงจรที่เป็นเชิงเส้น (linear amplifier) และวงจรที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear amplifier) ซึ่งสิ่งสำคัญสำหรับวงจรถยายสัญญาณคือความเป็นเชิงเส้น อัตราขยายสัญญาณ และความสามารถในการขยายสัญญาณเอาต์พุต ค่าแรงดัน  $v_i$  เป็นสัญญาณอินพุต และจะได้ค่าแรงดัน  $v_o$  เป็นสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตมีความสัมพันธ์กับสัญญาณอินพุตตามสมการที่ 2.1

$$v_o = Av_i \quad (2.1)$$

เมื่อ A คือ อัตราขยายคงที่

รูปแบบทั่วไปของวงจรถยายสัญญาณ จะมีอัตราขยาย (gain) ที่ได้จากวงจร ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.2 โดย  $P_{in}$  เป็นกำลังงานทางด้านอินพุตของวงจร และ  $P_{out}$  เป็นกำลังงานด้านเอาต์พุต ฝั่งโหลด ซึ่งจะมีค่าความต้านทานโหลด  $R_{Load}$  โดยที่  $P_{out}$  สามารถคำนวณได้จากกระแสที่ไหล  $I_{Load}$  และแรงดันที่โหลด  $V_{Load}$  ตามสมการที่ 2.3

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.2)$$

$$P_{out} = I_{Load}V_{Load} \quad (2.3)$$

ค่าอัตราขยายในหน่วยเดซิเบล  $G_{dB}$

$$G_{dB} = 10\log_{10}G \quad (2.4)$$

โดยทั่วไปวงจรถยายสัญญาณที่ได้จะมีกำลังงานเอาต์พุตมากกว่ากำลังงานอินพุต แต่เมื่อค่าอัตราขยายทางด้านเอาต์พุตมีค่าเป็นลบ แสดงว่าการทำงานของวงจรเกิดการสูญเสีย ซึ่งสามารถคำนวณการสูญเสีย (loss factor) ตามสมการที่ 2.5

$$L = \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (2.5)$$

การออกแบบวงจรถยายสัญญาณคือการออกแบบเพื่อต้องการได้ประสิทธิภาพ (Efficiency) ดีที่สุด โดยได้จากการเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณเอาต์พุตของวงจรและค่าของกำลังเอาต์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งสามารถหาค่าประสิทธิภาพของวงจรถยายสัญญาณเป็นค่าในรูปของเปอร์เซ็นต์ได้จากสมการที่ 2.6

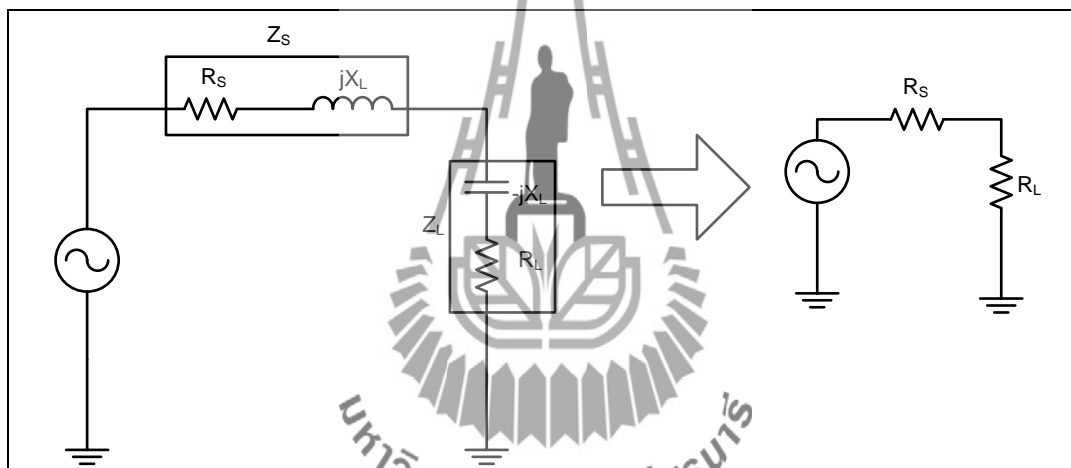
$$\text{Efficiency} = \frac{P_{out}}{P_{dc}} \times 100\% \quad (2.6)$$



### 2.2.2 การแมตซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรขยายสัญญาณ

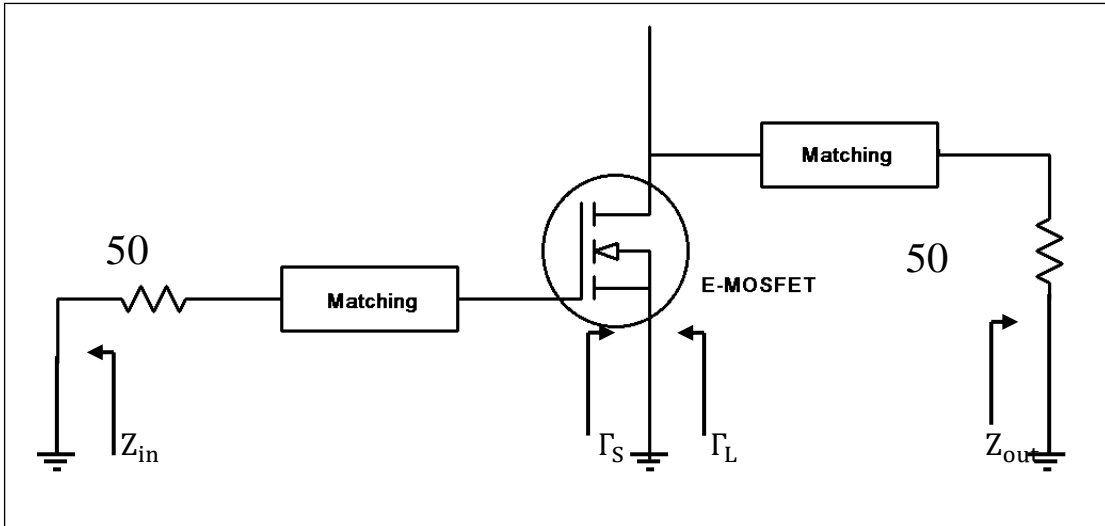
การแมตซ์อิมพีแดนซ์มีความสำคัญมากในวงจรความถี่วิทยุ เพื่อจะทำให้มีการส่งผ่านกำลังงานจากแหล่งจ่ายไปยังโหลดให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เช่น ความจำเป็นในการส่งผ่านกำลังงานไปยังด้านอินพุตของเครื่องรับ ซึ่งการสูญเสียที่ไม่จำเป็นในวงจรจะทำให้สัญญาณขนาดเล็กเกินกว่าที่จะยอมรับได้ ดังนั้น ในแต่ละอุปกรณ์ต้องมั่นใจว่าการต่อจะต้องแมตซ์ด้วยโหลดที่ถูกต้อง

เป็นที่ทราบกันดีว่าในวงจรดีซี การส่งผ่านกำลังงานสูงสุดจากแหล่งจ่ายไปยังโหลด จะเกิดเมื่อตัวต้านทานของโหลดเท่ากับตัวต้านทานของแหล่งจ่าย ส่วนในกรณีของวงจรเอซี(AC) อิมพีแดนซ์ของโหลด ( $Z_L$ ) จะต้องเท่ากับการคอนจูเกตจำนวนเชิงซ้อนของอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย ( $Z_S$ ) เพื่อให้ส่วนของจำนวนจินตภาพหักล้างกันไป เหลือแต่ส่วนของจำนวนจริง ( $R_S$  กับ  $R_L$ ) ดังรูปที่ 2.2 เมื่อ  $R_S$  กับ  $R_L$  เท่ากัน ดังนั้นการส่งผ่านกำลังสูงสุดก็จะเกิดขึ้น



รูปที่ 2.2 แสดงอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและค่าคอนจูเกตกับโหลด

โดยทั่วไปวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่มักจะอยู่ส่วนหน้าของวงจรขยายสัญญาณของระบบโดยปกติแล้วจะถูกออกแบบมาสำหรับระบบอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม คุณสมบัติของวงจรกำเนิดความถี่อาจเปลี่ยนแปลงได้ เมื่อค่าอินพุตหรือเอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าต่างออกไป ดังนั้นการแมตซ์อิมพีแดนซ์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่วงจรต่างๆ จะต้องมีการเทอร์มินเนตค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมตลอดช่วงความถี่



รูปที่ 2.3 รูปแบบของโครงข่ายแมตซ์อิมพีแดนซ์

การออกแบบวงจรขยายสัญญาณคือการแมตซ์อิมพีแดนซ์ทั้งด้านอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณ ทั้งนี้เพื่อส่งผ่านกำลังงานในวงจรให้ได้มากที่สุด โดยลักษณะรูปแบบของโครงข่ายแมตซ์อิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งจะประกอบไปด้วยคู่แมตซ์ทางด้านอินพุตคือ  $Z_{in}$  และ  $Z_S$  และคู่แมตซ์ทางด้านเอาต์พุตคือ  $Z_L$  และ  $Z_{out}$  โดยค่า  $\Gamma_S$  และ  $\Gamma_L$  จะสามารถหาได้จากค่าพารามิเตอร์การกระจาย (S-parameter) ของมอสเฟตที่นำมาวิเคราะห์และออกแบบ เพื่อหาค่าที่จำเป็นต้องใช้สำหรับแมตซ์อิมพีแดนซ์ ซึ่งก็คือค่าของสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแหล่งจ่าย  $\Gamma_S$  และค่าของสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากโหลด  $\Gamma_L$  โดยสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ดังสมการที่ 2.7 และสมการที่ 2.8

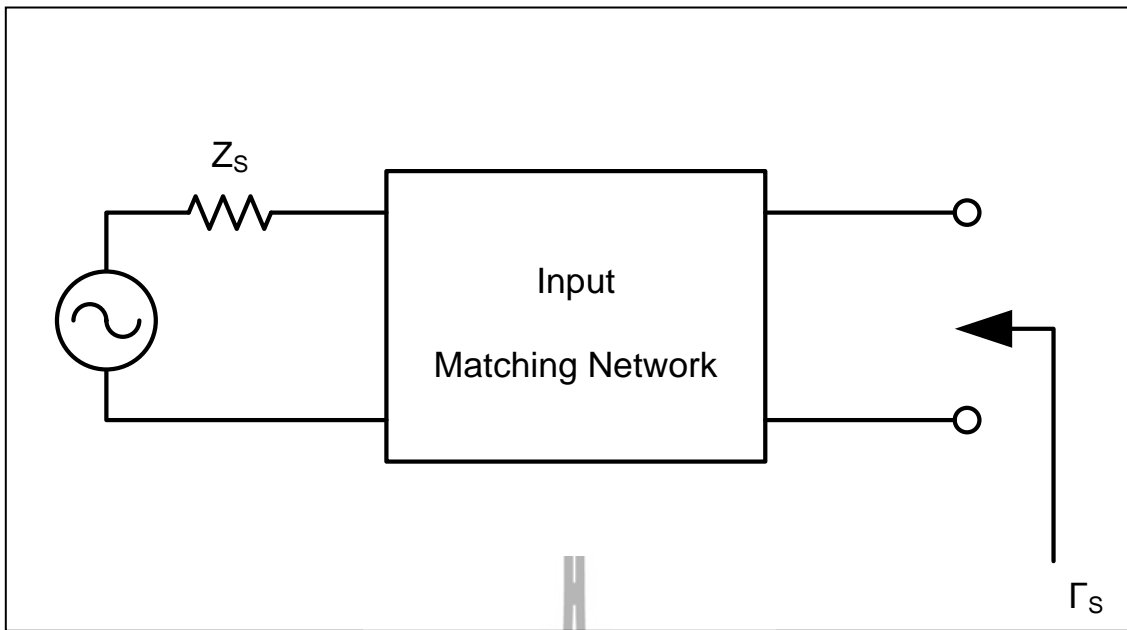
$$|\Gamma_L| = \frac{B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4|C_2|^2}}{2|C_2|} \tag{2.7}$$

$$\Gamma_S = \left[ S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 + \Gamma_L S_{22}} \right]^* \tag{2.8}$$

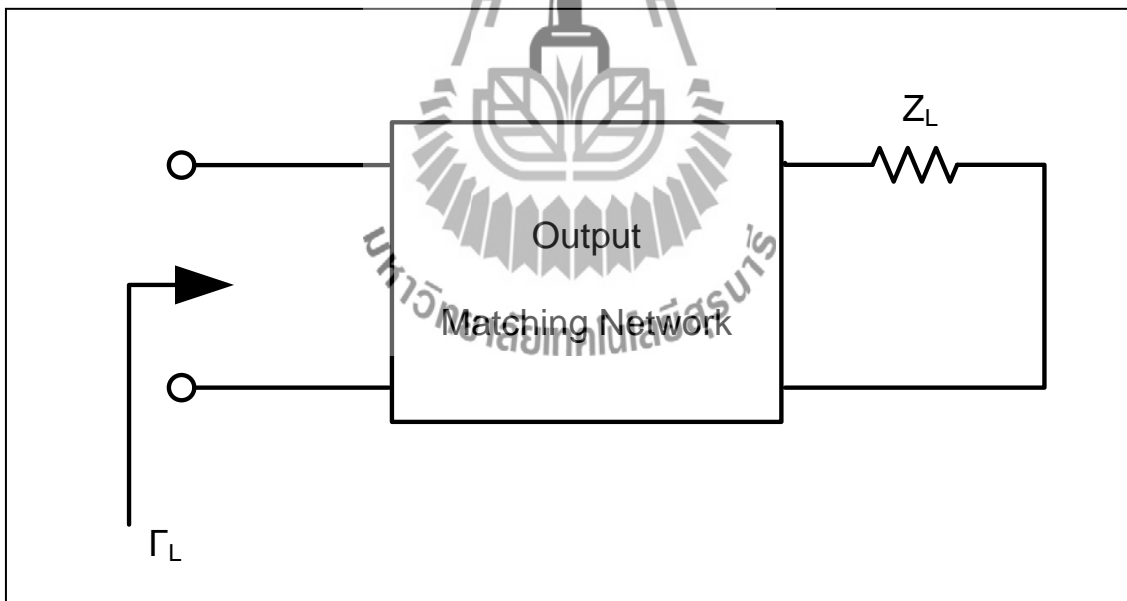
โดยที่  $B_2 = 1 + |S_{22}|^2 - |S_{11}|^2 - |\Delta|^2$  (2.9)

$$C_2 = S_{22} - (\Delta \cdot S_{11}^*) \tag{2.10}$$

การแมตซ์อิมพีแดนซ์ซึ่งจะประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ทางด้านเข้าเป็นคู่การแมตซ์กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแหล่งจ่ายทางด้านอินพุตของมอสเฟตแสดงดังรูปที่ และอิมพีแดนซ์ทางด้านออกซึ่งเป็นคู่ของการแมตซ์กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแหล่งจ่ายทางด้านเอาต์พุตของมอสเฟตแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 โคร่งข่ายแมตซ์ซิ่งอินพุตอิมพีแดนซ์



รูปที่ 2.5 โคร่งข่ายแมตซ์ซิ่งเอาต์พุตอิมพีแดนซ์

**2.2.2.1 แผนภูมิสมิท**

การออกแบบวงจรแมตซ์อิมพีแดนซ์สามารถแมตซ์อิมพีแดนซ์ได้จากแผนภูมิสมิท (smith chart) โดยการกำหนดจุดลงแผนภูมิสมิทต้องแปลงค่าให้อยู่ในรูป  $Z = R + jX$  ลงในระนาบ  $\Gamma \angle \theta = u + jv$  โดยใช้สมการที่ 2.11 หรือ 2.12

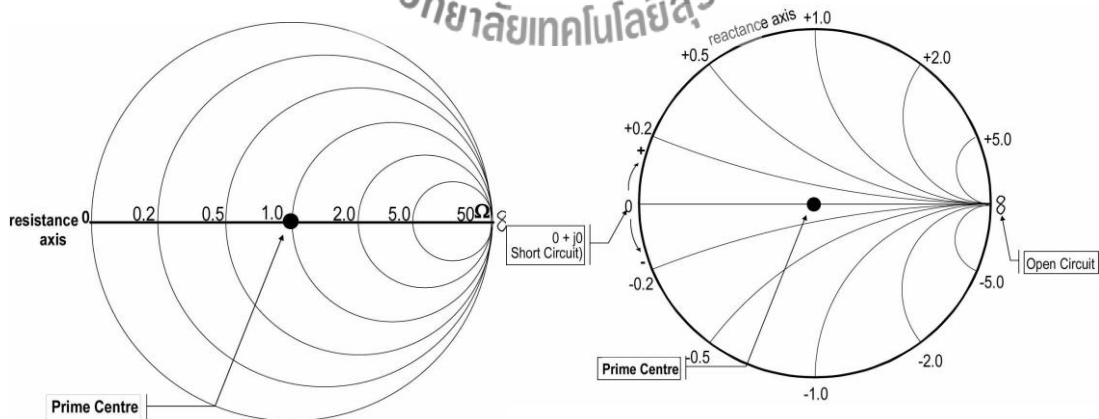
$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \tag{2.11}$$

$$\Gamma = \frac{z - 1}{z + 1} \tag{2.12}$$

โดย  $\Gamma = \frac{Z}{Z_0}$  คือค่า นอร์มัลไลซ์ ของอิมพีแดนซ์

ซึ่งจะทำให้ได้ชุดของวงกลมทั้งสองชุด เป็นวงกลมค่าตัวต้านทานคงที่ วงกลมค่ารีแอคแตนซ์คงที่ ดังรูปที่ 2.6 บนระนาบ u-v เมื่อนำทั้งสองชุดมารวมกันก็จะได้เป็นแผนสมิท ดังรูปที่ 2.7

เนื่องจากระนาบ (u,v) ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนไม่ค่อยได้ใช้งาน ทำให้รูปแบบภาพจึงมีสเกลเป็นโพลาไร โดยมุมของสัมประสิทธิ์การสะท้อน จะอยู่บนสเกลตามเส้นรอบวงของรูปแบบภาพ ทั้งที่เป็นองศาและเศษส่วนของความยาวคลื่นและขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อน หาได้จากสเกลได้รูปแบบภาพ นอกจากนี้ได้ภาพยังมีสเกลสำหรับอ่านค่า VSWR และค่าการสูญเสียด้วย ทำให้แผนภูมิสมิทมีประโยชน์มากในการแก้ปัญหาในการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรต่างๆ ได้เป็นอย่างดี และง่ายต่อการออกแบบและใช้งาน

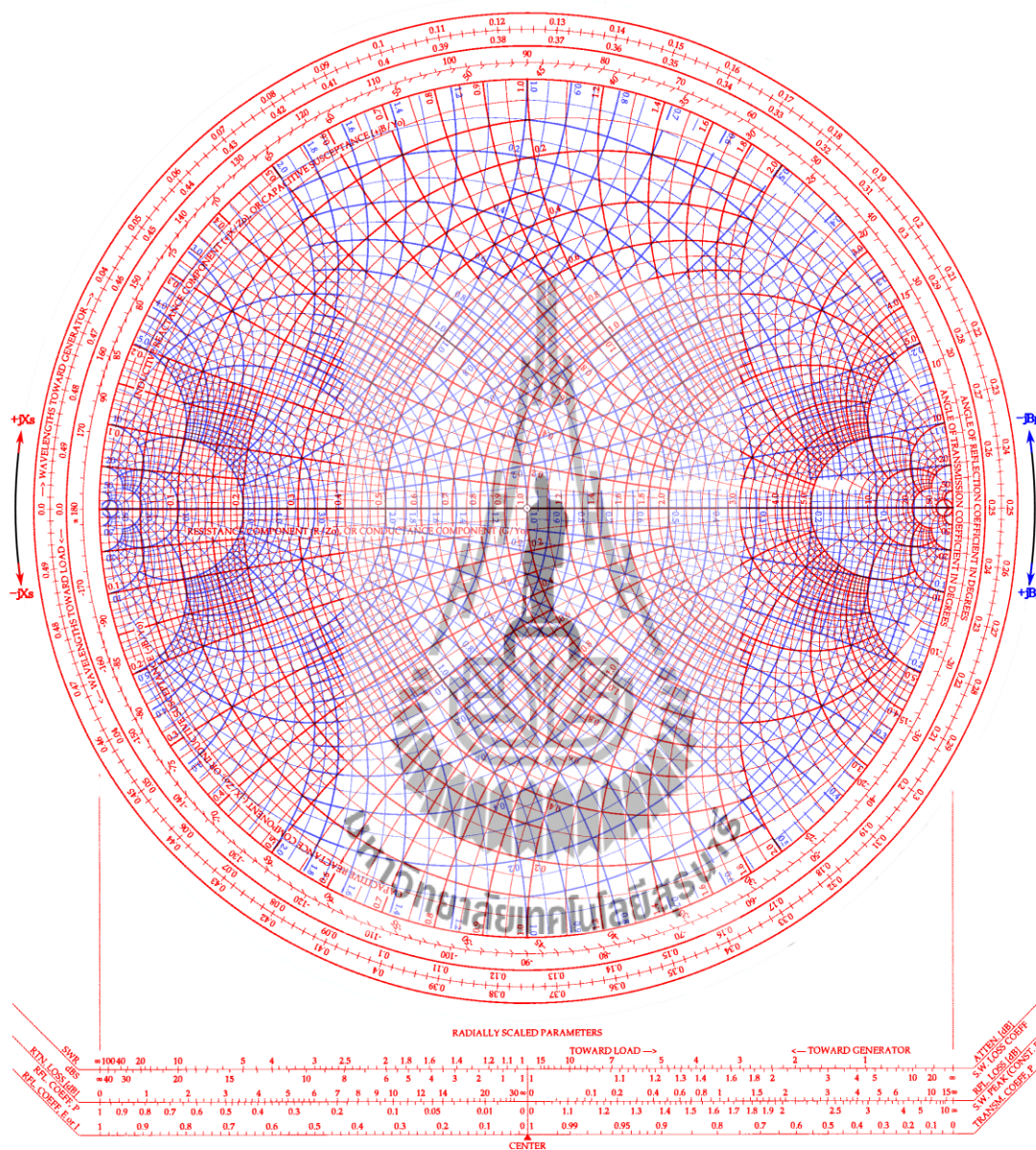


(ก) Constant resistance circle

(ข) Constant reactance circle

รูปที่ 2.6 โครงสร้างของแผนภูมิสมิท

## Normalized Impedance and Admittance Coordinates



Imittance Chart    SMITH CHART form ZY-1    RF Techno

รูปที่ 2.7 แผนภูมิสมิท

### 2.2.2.2 การกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิท

การกำหนดจุดลงบนแผนภูมิสมิท ในแต่ละจุดจะแสดงค่าของอิมพีแดนซ์ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุกรมกันในรูปของ  $Z=R+jX$  นั่นคือสามารถกำหนดจุดค่า  $Z$  ลงบนจุดที่เป็นจุดตัดระหว่างวงกลม  $R$  กับวงกลม  $X$  โดยการแมตซ์อิมพีแดนซ์บนแผนภูมิสมิทจะสามารถทราบค่าของอิมพีแดนซ์จากแหล่งจ่ายและอิมพีแดนซ์ที่ต้องการ ซึ่งการแมตซ์อิมพีแดนซ์บนแผนภูมิสมิทมีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกคู่อิมพีแดนซ์ที่ต้องการ และนำค่าที่ได้ให้อยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน  $Z=R+jX$  จากนั้นอิมพีแดนซ์ที่ต้องการต้องไปในทิศทางเดียวกัน โดยการคอนจูเกตจำนวนเชิงซ้อนอีกด้านหนึ่ง เช่น เมื่อต้องการมองจากแหล่งจ่าย นั่นคือต้องคอนจูเกตจำนวนเชิงซ้อนทางฝั่ง โหลด

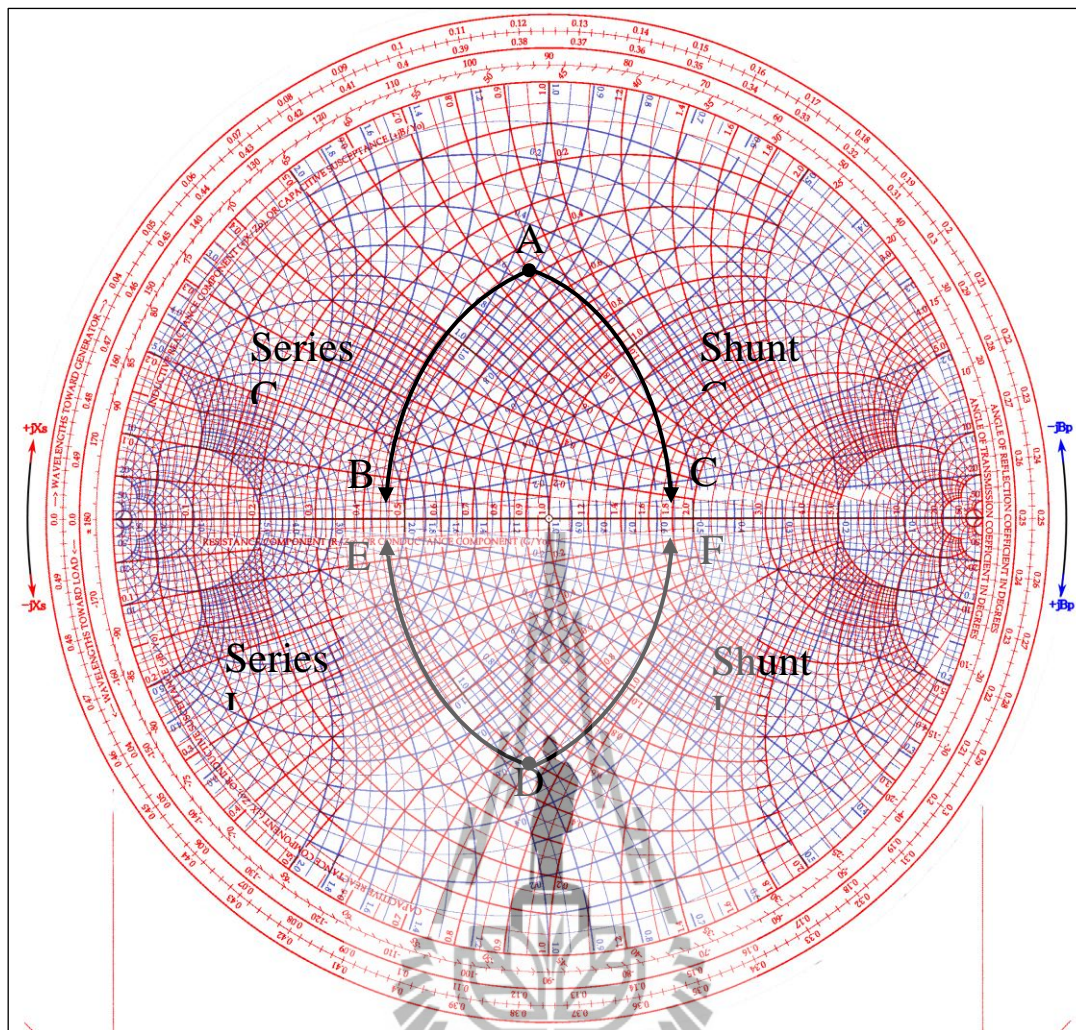
2. ถ้าค่าที่ต้องการแมตซ์มีค่ามากกว่าค่าในแผนภูมิสมิท จะต้องทำการนอร์มอลไลซ์ก่อน ด้วยค่าใดค่าหนึ่งเพื่อให้ค่ามีน้อยลง ทำให้ง่ายต่อการแมตซ์อิมพีแดนซ์และการกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิท

3. จากการกำหนดจุดบนแผนภูมิแล้ว สามารถวนหาค่าองค์ประกอบต่างๆจากจุดที่ต้องการแมตซ์อิมพีแดนซ์เพื่อจำกัดค่าของพารามิเตอร์โดยลักษณะของพารามิเตอร์ที่ได้จากการวน ดังรูปที่ 2.8 ลักษณะการวนจากเส้นโค้ง  $AB$  เป็นการจำกัดค่า  $C$  อนุกรม เส้นโค้ง  $AC$  เป็นการจำกัดค่า  $C$  ขนาน เส้นโค้ง  $DE$  เป็นการจำกัดค่า  $L$  อนุกรม และเส้นโค้ง  $DF$  เป็นการจำกัดค่า  $L$  ขนาน

4. เมื่อวนหาค่าองค์ประกอบที่ได้แล้ว สามารถอ่านค่าขององค์ประกอบที่ได้จากความยาวของเส้นโค้งในแต่ละเส้น เพื่อที่จะทำให้ได้ค่าองค์ประกอบที่ทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์ในรูปของค่าตัวเก็บประจุ  $C$  และตัวเหนี่ยวนำ  $L$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.13 และสมการที่ 2.14

$$C = \frac{X_C}{\omega(\text{Normalize})} \quad (2.13)$$

$$L = \frac{X_L(\text{Normalize})}{\omega} \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.8 ทิศทางการเคลื่อนที่ของแมตซ์อิมพีแดนซ์บนแผนภูมิสมิท

### 2.2.3 ความเสถียรภาพของวงจรถ่ายสัญญาณ

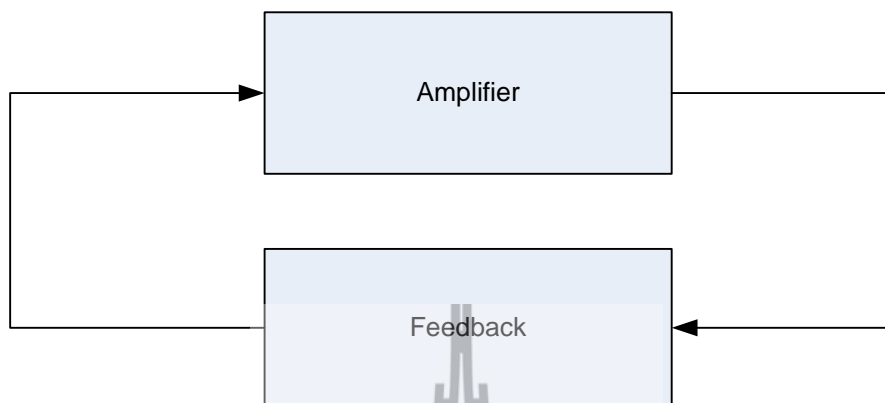
สำหรับวงจรถ่ายสัญญาณ ทางด้านความเสถียรภาพ ในช่วงความถี่ที่สนใจ ซึ่งถือเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องพิจารณา เมื่อมีการใช้งานวงจรด้านคลื่นความถี่วิทยุ โดยจะมีแนวโน้มการเกิดออสซิลเลต ซึ่งจะขึ้นกับความถี่ที่ใช้งาน และการเชื่อมต่อ ความเสถียรภาพของวงจรถ่ายสัญญาณ จะต้องพิจารณา S-parameter ซึ่งคำนวณได้จากค่า K และ  $\Delta$  - parameter จากสมการที่ 2.15 และสมการที่ 2.16

$$K = \frac{1 + |\Delta|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{21}||S_{12}|} \quad (2.15)$$

$$|\Delta|^2 = |S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}|^2 \quad (2.16)$$

เรียกสมการข้างนี้ว่า Rollett criteria และค่า K คือ Stability factor หรือเรียกอีกอย่างว่า K-factor สำหรับในการคำนวณออกแบบวงจรถ่ายสัญญาณนี้จะต้องมีค่า  $K \geq 1$  และ  $|\Delta|^2 \leq 1$  แต่ถ้าค่า

$K \leq 1$  จะทำให้วงจรที่ออกแบบมีการออสซิลเลทเกิดขึ้น ซึ่งต้องแก้ไขโดยการออกแบบวงจรการป้อนกลับแบบลบเพื่อป้องกันการออสซิลเลทหรือใช้วิธีอื่นๆ จากรูปที่ 2.9 เป็นวงจรการป้อนกลับ (feedback)



รูปที่ 2.9 วงจรการป้อนกลับ

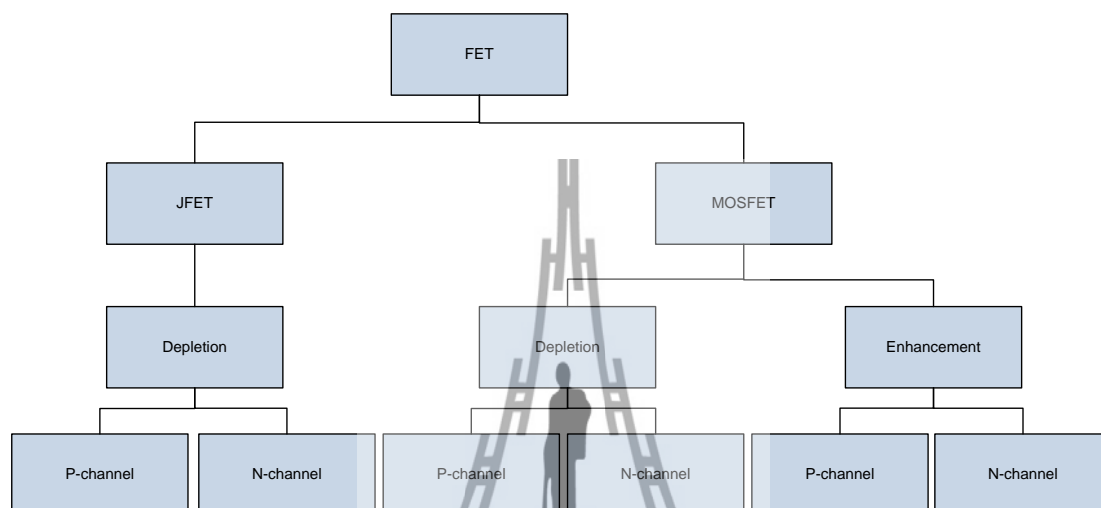
#### 2.2.4 ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า

ในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณโดยการเลือกใช้ทรานซิสเตอร์ BLF177 ที่เป็นทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟสประเภทเอนฮานซ์เมนต์ (E-MOSFET) จึงต้องศึกษาการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ด้วย ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (Field-Effect Transistors, FET) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขั้วต่อแบบ 3 ขั้วทำงานได้โดยใช้หลักการของสนามไฟฟ้ากล่าวคือ ใช้สนามไฟฟ้าในการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารกึ่งตัวนำเพื่อให้เกิดการนำกระแสไฟฟ้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยทั่วไปจะเรียกทรานซิสเตอร์ในลักษณะการทำงานเช่นนี้ว่า เฟต (FET) ความแตกต่างระหว่างทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ (BJT) และ FET โดยทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์จะใช้กระแสเป็นตัวควบคุม (Current-control device) ส่วนเฟต (FET) จะใช้แรงดันเป็นตัวควบคุม จะเห็นว่าเฟต (FET) จะถูกควบคุมโดยแรงดันอินพุตหรือแรงดัน  $V_{GS}$  นอกจากนี้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้ามียุทโธมพีแดนซ์ที่สูงกว่าทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์มาก แต่ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ก็มีอัตราขยายที่สูงกว่าทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้ามากเช่นกัน

ข้อดีของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าเมื่อเทียบกับทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์คือ มีขนาดเล็กกว่า มีสัญญาณรบกวนต่ำกว่าและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีผลต่อการทำงานน้อยกว่า ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าเหมาะกับการขยายสัญญาณที่มีขนาดเล็กมากๆ จนถึงสัญญาณขนาดเล็ก เพราะมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่สูงทำให้สัญญาณขนาดเล็กเหล่านั้นจะไม่หายลงกราวด์



ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าหรือเฟต (FET) แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบรอยต่อ (Junction Field Effect Transistor) หรือเจเฟต (JFET) และ ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบโลหะ-ออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) หรือมอสเฟต (MOSFET) แต่ละประเภทยังแบ่งออกเป็นหลายชนิดตามลักษณะของโครงสร้างการทำงาน ดังแผนภาพในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ชนิดของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าหรือเฟต

#### 2.2.4.1 มอสเฟตประเภทอนฮานซ์เมนต์ (Enhancement-type MOSFET)

ในการทำงานของ E-MOSFET เมื่อแรงดัน  $V_{GS}$  มากกว่า  $V_T$  ปริมาณของกระแส  $I_D$  ที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับแรงดัน  $V_{GS}$  ในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ดังสมการต่อไปนี้

$$I_D = k(V_{GS} - V_T)^2 \quad (2.17)$$

เมื่อ  $k$  เป็นค่าคงที่ของโครงสร้าง E-MOSFET โดยคำนวณได้จากสมการ

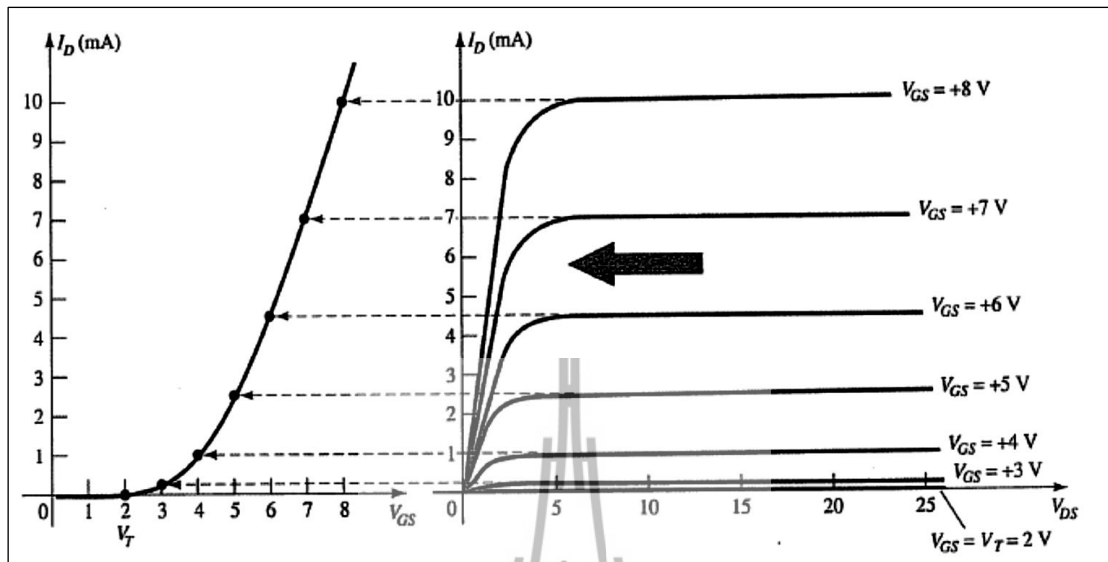
$$k = \frac{I_{D(on)}}{(V_{GS(on)} - V_T)^2} \quad (2.18)$$

ส่วนแรงดัน  $V_{DS}$  อิมิตัวหรือ  $V_{GS(sat)}$  สามารถคำนวณได้จาก

$$V_{DS(sat)} = V_{GS} - V_T \quad (2.19)$$

สมการดังกล่าวข้างต้นใช้ในการวิเคราะห์ไฟฟ้ากระแสตรง และใช้ในการสร้างกราฟคุณลักษณะการถ่ายโอนของ E-MOSFET โดยทั่วไปแล้วค่าของแรงดันไฟฟ้า  $V_T$ ,  $V_{GS(on)}$  และ  $I_{D(on)}$  จะกำหนดไว้

ในสเปค (Specification Sheets si หรือ Data sheets) ของ E-MOSFET โดยที่  $V_T$  จะแทนด้วยตัวแปร  $V_{GS(Th)}$  กราฟคุณลักษณะการถ่ายโอนของ E-MOSFET ชนิด n-Channel แสดงดังรูปที่ 2.11



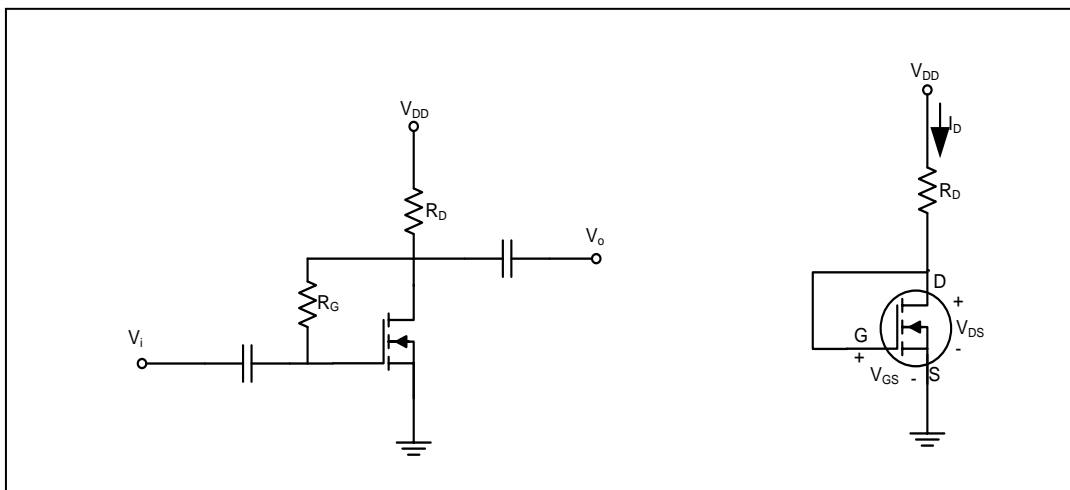
รูปที่ 2.11 กราฟคุณลักษณะการถ่ายโอนของ E-MOSFET ชนิด n-Channel

#### 2.2.4.2 การไบแอสทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (FET biasing)

หลักการงานที่สำคัญของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าคือ ใช้สนามไฟฟ้าในการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารกึ่งตัวนำเพื่อให้เกิดการนำกระแสไฟฟ้าเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยกระแสเดรน ( $I_D$ ) ของทรานซิสเตอร์จะถูกควบคุมโดยแรงดันระหว่างขั้วเกตและซอร์ส ( $V_{GS}$ ) สมการพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟฟ้ากระแสตรง หรือการวิเคราะห์ห้วงจรไบแอสทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า มีดังนี้

$$I_G \cong 0 \text{ A}$$

$$I_D = I_S$$



รูปที่ 2.12 วงจรไบแอสทรานซิสเตอร์แบบ E-MOSFET

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางอินพุตและเอาต์พุตของ E-MOSFET คือ

$$I_D = k(V_{GS} - V_T)^2 \quad (2.20)$$

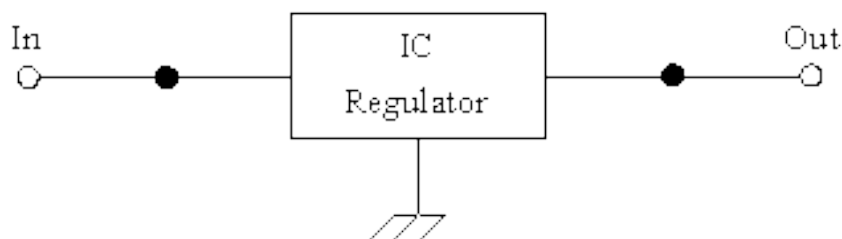
ส่วนแรงดัน  $V_{DS}$  หาได้จากการใช้กฎ KVL ในการพิจารณาวงจรในด้านเอาต์พุตดังนี้

$$-V_{DD} + I_D R_D + V_{DS} = 0 \quad (2.21)$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D \quad (2.22)$$

### 2.2.5 ไอซีเร็กกูเลเตอร์สามขาชนิดจ่ายแรงดันคงที่

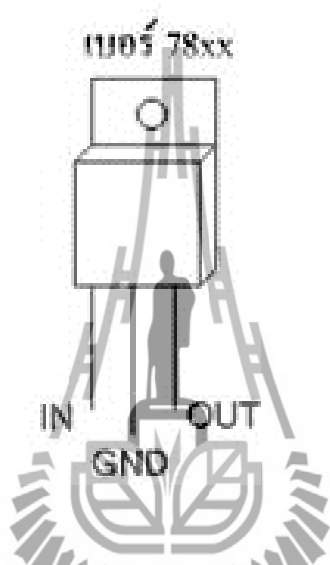
ไอซีเร็กกูเลเตอร์ภายในประกอบด้วยวงจรเร็กกูเลเตอร์แบบอนุกรม มีขาต่อใช้งาน 3 ขา ประกอบด้วยขา อินพุต เอาต์พุต และกราวด์ ซึ่งจะจ่ายแรงดันค่าใดค่าหนึ่งโดยเฉพาะ โดยรวมเอาส่วนของวงจรป้อนกลับที่ประกอบด้วย  $R_1$  และ  $R_2$  ดังรูปที่ 4 เข้าไว้เป็นส่วนหนึ่งของไอซี ซึ่งจุดนี้เองที่แตกต่างไปจากไอซีเร็กกูเลเตอร์ที่ปรับค่าได้



รูปที่ 2.13 แสดงการต่อไอซีเร็กกูเลเตอร์ใช้งานแบบง่ายๆ

จุดเด่นของไอซีเร็กกูเลเตอร์ค่าคงที่นี้คือ สามารถต่อวงจรได้ง่ายไม่ต้องต่ออุปกรณ์ภายนอกเพิ่มเติมมากนัก ตัวอย่างวงจรการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4 ในการต่อวงจรบางครั้งจำเป็นต้องต่อไอซี

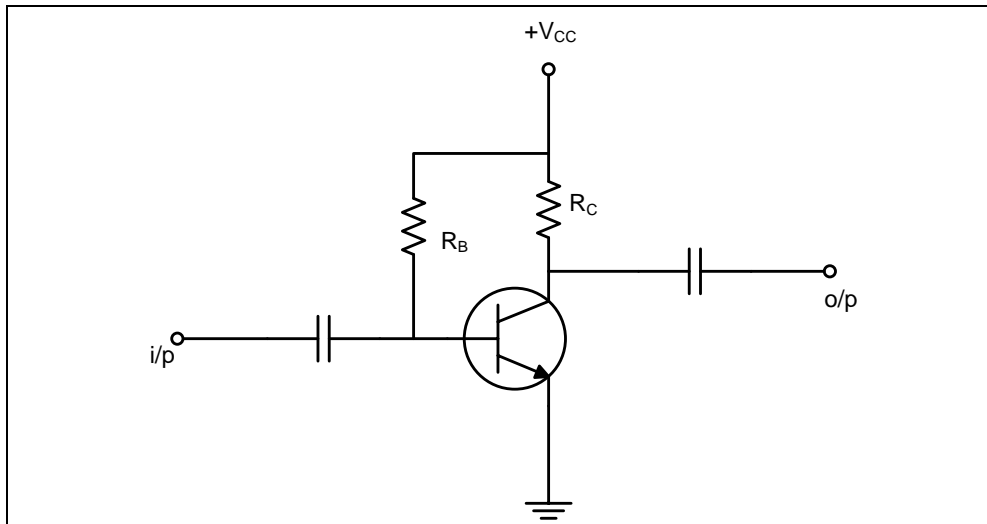
รีกกูเลเตอร์ห่างจากแหล่งจ่ายไฟอินพุทเกิน 5 เซนติเมตร จึงควรใส่ตัวเก็บประจุอิเล็กโทรไลต์ ขนาดประมาณ 10 ไมโครฟารัด สักตัวไว้ด้านอินพุท เพื่อป้องกันการเกิดออสซิลเลตที่ความถี่สูง ซึ่งจะทำให้วงจรขาดเสถียรภาพ เอาท์พุทที่ออกจากไอซีรีกกูเลเตอร์ จะได้แรงดันเอาท์พุทที่เรียบพอสมควรอยู่แล้ว แต่อาจจะใส่ตัวเก็บประจุที่มีค่าประมาณ 100 ไมโครฟารัด เพื่อช่วยปรับปรุรงแรงดันให้เรียบขึ้น ถึงแม้ว่าแรงดันไอซีรีกกูเลเตอร์ชนิดนี้จะให้แรงดันเอาท์พุททงที่มีเบอร์ให้เลือกแรงดันเอาท์พุทได้คงที่หลายเบอร์เช่น 5 V, 5.2 V, 6V, 8V, 10V, 12V, 15V, 18V และ 24V กระแสเอาท์พุทตั้งแต่ 10 มิลลิแอมป์ถึง 3 แอมป์ และมีให้เลือกทั้งชนิดรีกกูเลเตอร์ไฟบวกและรีกกูเลเตอร์ไฟลบ



รูปที่ 2.14 แสดงตำแหน่งขาของ IC Regulator เบอร์ 78xx

## 2.2.6 วงจรขยายสัญญาณคลาส AB (Class AB Amplifier)

วงจขยายสัญญาณคลาส AB คือการรวมเอาระหว่างจุดหรือข้อดีและข้อด้อย ของทั้ง CLASS A และ CLASS B เข้าด้วยกัน นั่นคือ ในช่วงเวลาที่มีสัญญาณขาเข้าเบา ๆ วงจรภาคขาออกจะทำงาน ในแบบ CLASS A แต่เมื่อสัญญาณขาเข้าแรงขึ้น วงจรภาคขาออกจะทำงานในแบบ CLASS B จึงทำให้มีประสิทธิภาพสูงจึงเป็นที่นิยมมากที่สุดในวงการเครื่องเสียงทั้งหมด



รูปที่ 2.15 วงจรขยายสัญญาณคลาส AB

### 2.3 วงจรกรองความถี่วิทยุ

วงจรกรองความถี่หรือฟิลเตอร์ (Filter) คือวงจรไฟฟ้าที่ยอมให้สัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่ใด ๆ ความถี่หนึ่งหรือช่วงความถี่ใดความถี่หนึ่งเท่านั้นผ่านไป ได้ ส่วนความถี่อื่นหรือช่วงความถี่อื่น ๆ นอกเหนือจากที่กำหนดจะถูกกลตทอนไปซึ่งจะเป็นช่วงความถี่ใดนั้นจะขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจร วงจรกรองความถี่มีด้วยกัน 2 แบบ คือ

1. แบบ Passive คือวงจรที่ประกอบขึ้นด้วยอุปกรณ์แบบพาสซีฟ ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องมีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าเพื่อให้ทำงาน ซึ่งได้แก่อุปกรณ์ประเภท ตัวต้านทาน (R) ตัวเก็บประจุ (C) และ ขดลวดเหนี่ยวนำ (L)

2. แบบ Active คือ วงจรที่ประกอบขึ้นด้วยอุปกรณ์ที่ต้องการไฟฟ้า เพื่อกระตุ้นการทำงาน ของตัวอุปกรณ์ ซึ่งได้แก่อุปกรณ์ประเภท ทรานซิสเตอร์ หรือ ไอซี

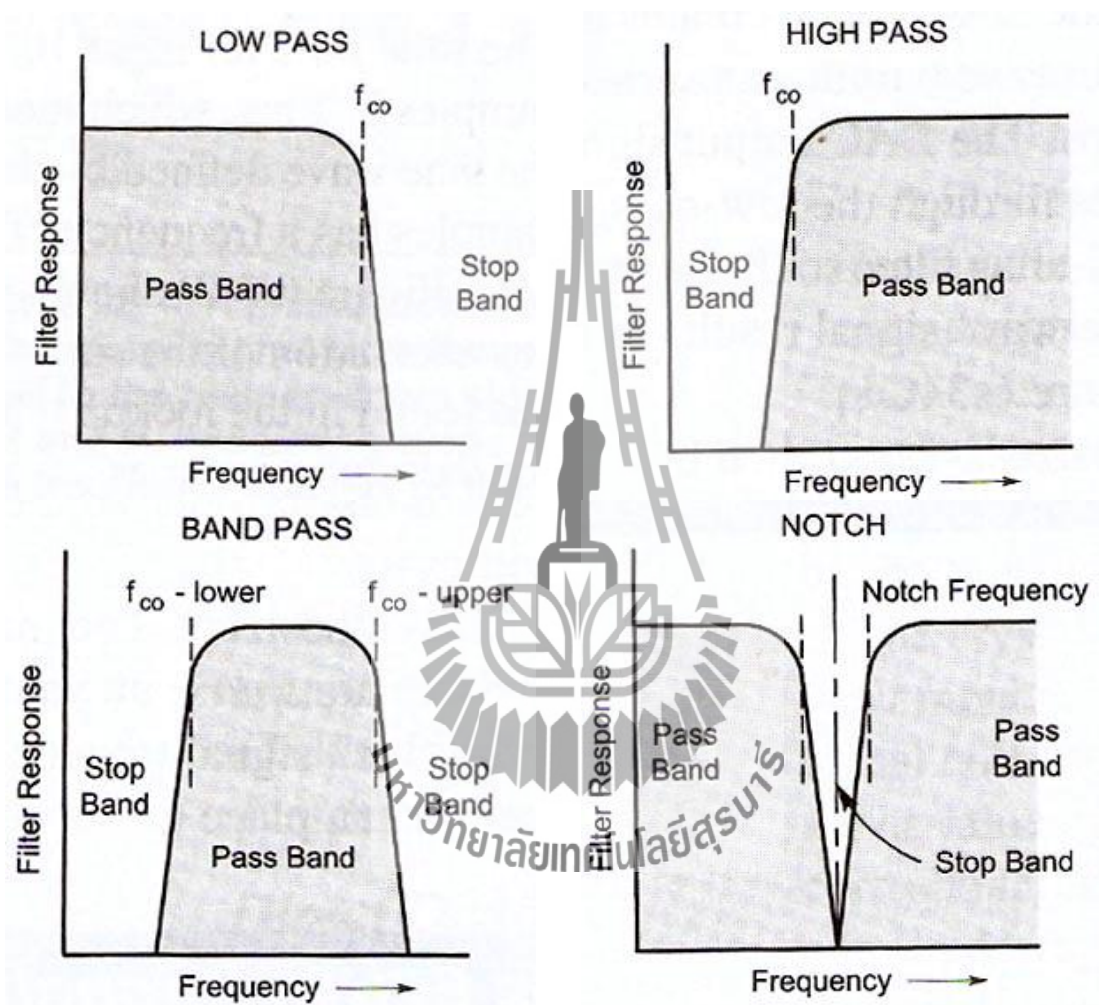
#### 2.3.1 ชนิดของวงจรกรองความถี่

1. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter) : LPF เป็นวงจรกรองที่ให้สัญญาณเข้ามีความถี่ตั้งแต่ศูนย์เฮิรตซ์ (Hertz) ขึ้นไปจนถึงความถี่ค่าๆหนึ่งที่เรียกว่า ความถี่คัทออฟ (cut-off frequency) หรือ  $\omega_c$  ผ่านไปได้ และทำหน้าที่ลตทอนสัญญาณที่มีความถี่เกินกว่านั้น

2. วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High-pass filter) : HPF เป็นวงจรกรองที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าความถี่คัทออฟ ให้ผ่านไปได้และลตทอนสัญญาณที่มีความถี่ความต่ำกว่า

3. วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band-pass filter) : BPF เป็นวงจรกรองที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้เฉพาะในช่วงความถี่ที่ต้องการผ่านเท่านั้น

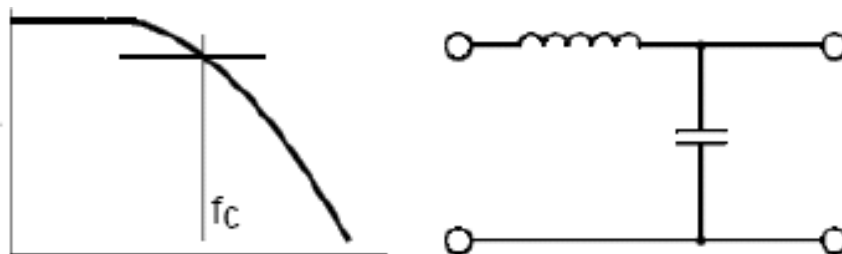
4. วงจรกรองทิ้งแถบความถี่ (Stop-pass filter) : SBF เป็นวงจรกรองที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการ



รูปที่ 2.16 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่

### 2.3.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter)

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน บางครั้งอาจจะเรียกว่าวงจร high-cut filter สำหรับ ความถี่ วิทยุ และ treble cut filter สำหรับวงจรขยายเสียง

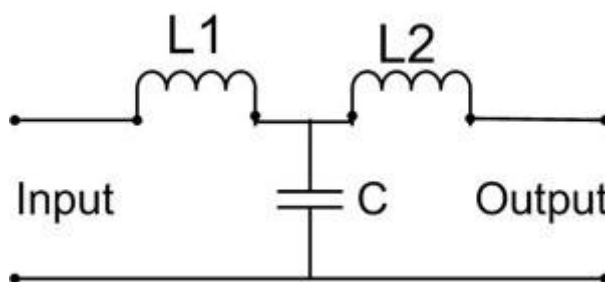


รูปที่ 2.17 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter)

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน มีลักษณะการต่อคือ ใช้ L อนุกรมกับวงจร และ C ขนานกับวงจร คุณสมบัติของวงจรก็คือ เมื่อเราป้อนความถี่ต่ำเข้าวงจร L จะมีค่า  $X_L$  ต่ำ C จะมีค่า  $X_C$  สูง ทำให้ความถี่ต่ำผ่าน L ได้สะดวก ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้มาก แต่เมื่อความถี่สูงกว่าจุดที่กำหนดค่า  $X_L$  จะมากขึ้น ค่า  $X_C$  จะลดลง ทำให้ความถี่ผ่านขดลวดได้ลดลง บางส่วนที่ผ่านไปได้อีกจะถูก C ดึงลงกราวด์ ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้น้อยมาก

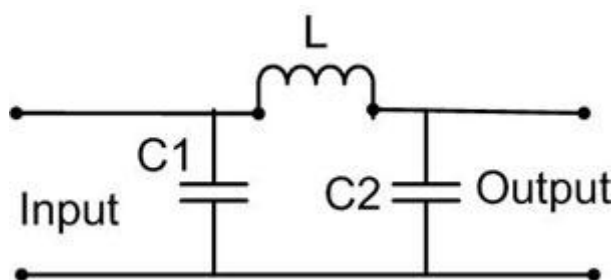
วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1. T Type low pass filter การใช้ L หรือ C เพียงตัวเดียว ไม่สามารถกำจัดสัญญาณความถี่สูงได้หมด ตรงจุด Cut Off ทำให้ความถี่สูงผ่านไปได้ เราจึงแก้ปัญหาโดยการเพิ่ม L เข้าไปในวงจรอีกชุด เมื่อต่อแล้ว ลักษณะวงจรคล้าย ตัว T เราจึงเรียกว่า วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แบบที การกรองความถี่ ถ้าต้องการประสิทธิภาพ เราอาจจะใช้วงจรนี้หลายชุด



รูปที่ 2.18 T Type low pass filter

2. Pi Type low pass filter วงจรนี้จะใช้ C 2 ตัวและ L 1 ตัว ต่อกันดังรูป รูปร่างคล้ายตัว Pi ( $\pi$ ) หรือเรียกกันว่า วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาย วงจรแบบนี้จะนิยมใช้ในภาคจ่ายไฟ และ วงจร Regulator



รูปที่ 2.19 Pi Type low pass filter

ซึ่งการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน สิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นพิเศษก็คือค่า ความถี่คัทออฟ  $f_c$  ที่ต้องการใช้งาน ที่ค่าความถี่นี้อัตราขยายจะมีค่าเป็น 0.707 ของอัตราขยายที่ความถี่ต่ำ ซึ่งความถี่คัทออฟหาได้จากสมการที่ 2.23

$$\omega_c = \frac{1}{RC} = 2\pi f_c \quad (2.23)$$

โดยที่  $\omega_c$  มีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที (rad/s)

$f_c$  มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

R มีหน่วยเป็น โอห์ม ( $\Omega$ )

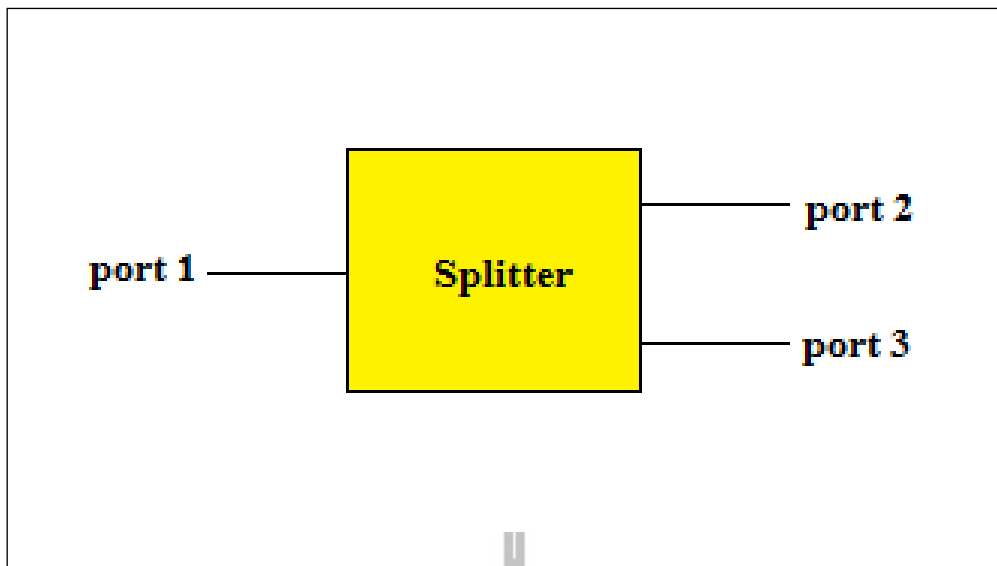
C มีหน่วยเป็น ฟาร์ด (F)

#### 2.4 วงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณ

ลักษณะของวงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณมีหลายรูปแบบ มีทั้งแบบไมโครสตริป และแบบอื่นๆ ขึ้นอยู่กับความต้องการในการนำไปใช้และการออกแบบจะมีหลายรูปแบบ เช่น การใช้หม้อแปลง ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานความถี่ต่ำแต่กำลังงานสูง และลักษณะของการออกแบบโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ เป็นการออกแบบด้วยโครสตริป ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานในวงจรความถี่สูงแต่กำลังงานไม่สูงมากนัก ซึ่งสำหรับการออกแบบนี้จะเป็นการออกแบบด้วยไมโครสตริป แบบ Wilkinson

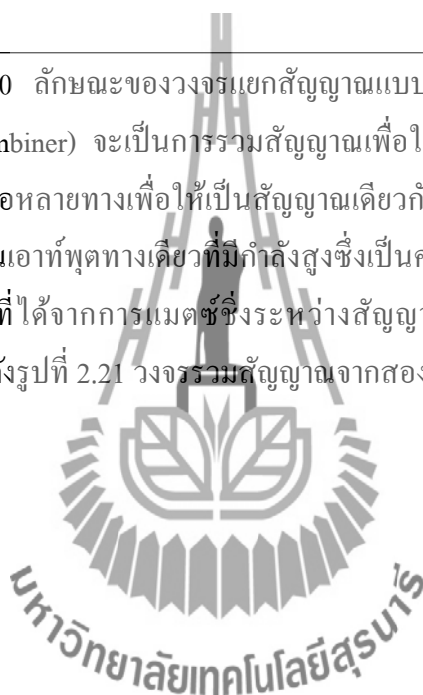
วงจรแยกสัญญาณ (splitter) จะเป็นการแยกสัญญาณออกเป็นสองทางหรือหลายทาง โดยขึ้นอยู่กับ การออกแบบ ขนาดสัญญาณอินพุตที่เข้าจะถูกลดลงตามจำนวนการแยกสัญญาณเอาต์พุตที่ออกแบบไว้ แต่ต้องพิจารณาถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรที่ได้จากการแมตซ์ซึ่งระหว่างสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตเพื่อให้ได้กำลังงานสูงสุดและมีการสูญเสียน้อย ดังรูปที่ 2.20 วงจรการแยกสัญญาณจากหนึ่งทางเป็นสองทาง ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของสัญญาณอินพุตที่เข้ามา

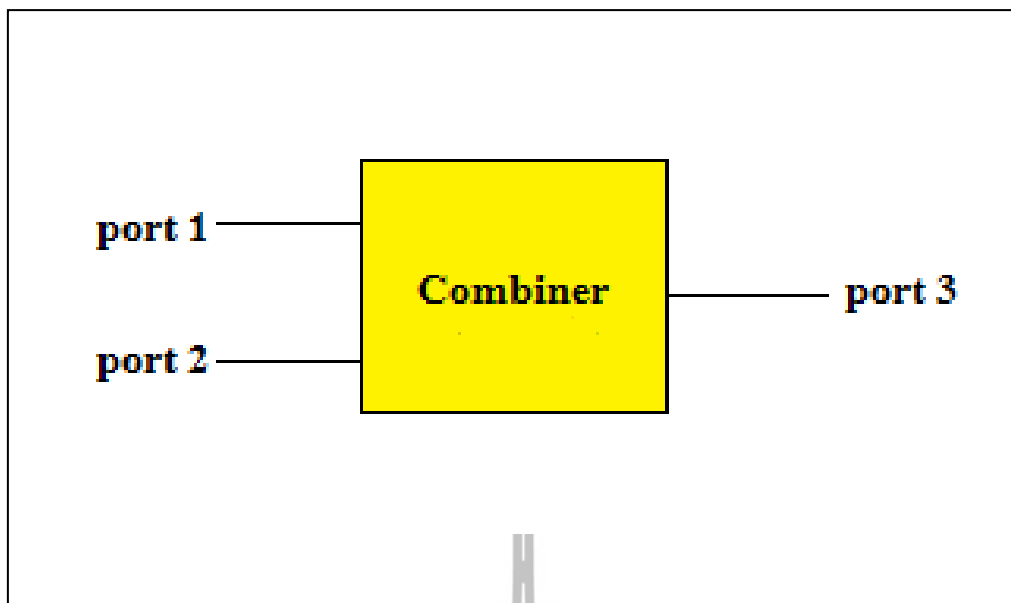




รูปที่ 2.20 ลักษณะของวงจรแยกสัญญาณแบบ 3 พอร์ต

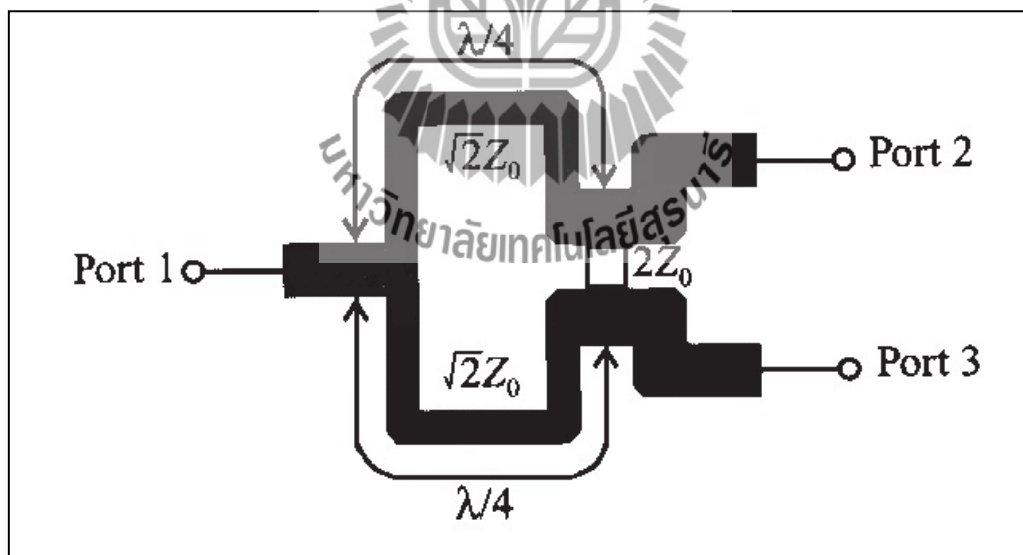
วงจรรวมสัญญาณ (combiner) จะเป็นการรวมสัญญาณเพื่อให้มีกำลังงานมากขึ้น ซึ่งสามารถรวมสัญญาณได้จากสองทางหรือหลายทางเพื่อให้เป็นสัญญาณเดียวกัน ขนาดสัญญาณอินพุตที่เข้ามาจากทุกทางจะถูกรวมเป็นสัญญาณเอาต์พุตทางเดียวที่มีกำลังสูงซึ่งเป็นค่ากำลังรวมทั้งหมดของวงจร แต่ต้องพิจารณาถึงค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการแมตซ์ซึ่งระหว่างสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต เช่นเดียวกันวงจรถูกแยกสัญญาณ ดังรูปที่ 2.21 วงจรรวมสัญญาณจากสองทางเป็นหนึ่งทาง





รูปที่ 2.21 ลักษณะของวงจรรวมสัญญาณแบบ 3 พอร์ต

การออกแบบวงจร Wilkinson divider เป็นวงจรที่สามารถแยกสัญญาณอินพุตและแบ่งออกเป็นสัญญาณเอาต์พุตที่เท่ากันตามจำนวนพอร์ตทั้งหมด การออกแบบ Wilkinson ยังสามารถนำมาใช้เป็น power combiner ได้เพราะมันถูกสร้างขึ้นจากอุปกรณ์ที่เหมือนกัน ดังรูปที่ 2.22 รูปร่างของสายส่งไมโครสตริป



รูปที่ 2.22 ลักษณะของสายส่งไมโครสตริป แบบ Wilkinson

ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วย พารามิเตอร์การจัดกระจาย (S-parameter) สำหรับกรณีทั่วไปของ 2 ทาง โดยเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์

$$[S] = \frac{-1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & j & j \\ j & 0 & 0 \\ j & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

จากสมการเมตริกซ์สามารถหาค่าการสูญเสียย้อนกลับที่พอร์ต 1 และ 2 ได้ดังนี้

$$RL_1 = -20\log|S_{11}| \text{ และ } RL_2 = -20\log|S_{22}| \quad (2.25)$$

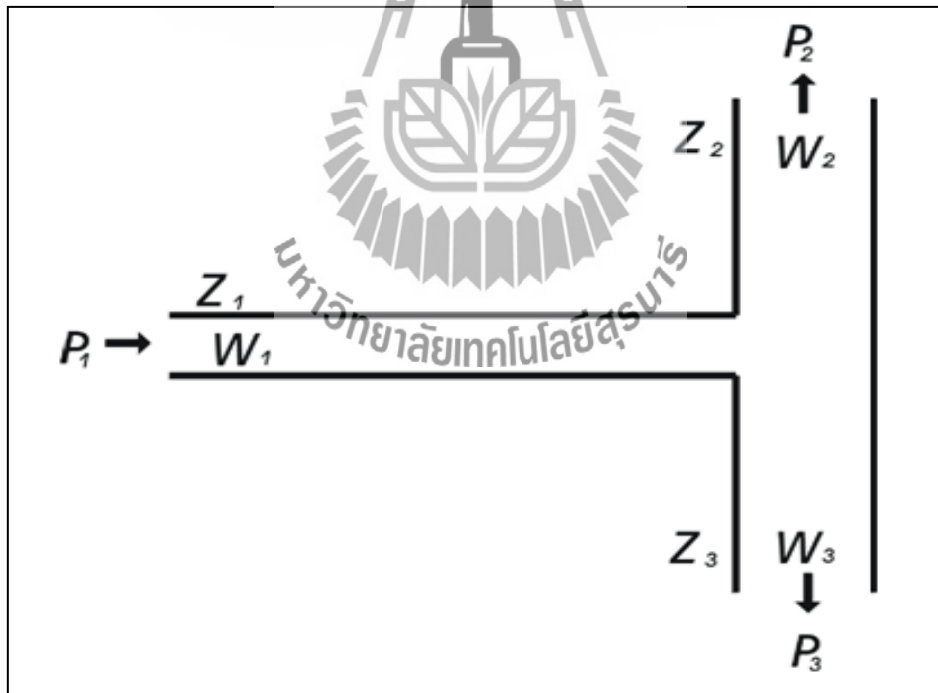
ค่าการเชื่อมต่อรวม (coupling) ระหว่างพอร์ต 1 และ 2

$$CP_{12} = -20\log|S_{21}| \quad (2.26)$$

และค่าของการแยก (isolation) ระหว่างพอร์ต 2 และ 3

$$IL_{23} = -20\log|S_{23}| \quad (2.27)$$

ลักษณะการแยกสัญญาณและรวมสัญญาณโดยการใช้ไมโครสตริปหรือการออกแบบโดยแผ่นวงจรพิมพ์ ดังรูปที่ 2.23 เป็นการแยกสัญญาณในรูปของ T-junction



รูปที่ 2.23 การแยกสัญญาณในรูปของ T-junction

จากรูปที่ 2.23 ค่ากำลังงานทางด้านอินพุต  $P_1$  บนความหนาของแผ่นไมโครสตริป  $W_1$  และค่าอินพุตอิมพีแดนซ์  $Z_1$  จะแยกสัญญาณออกเป็นสองทางเท่าๆกันซึ่งเป็นค่า  $Z_2, P_2, W_2$  และ  $Z_3, P_3, W_3$  ตามลำดับ โดยสามารถออกแบบวงจรแยกสัญญาณ ตามสมการดังนี้

$$Z_1 = \frac{Z_2 \times Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (2.28)$$

$$P_2 = \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right) P_1 \quad (2.29)$$

$$P_3 = \left(\frac{Z_1}{Z_3}\right) P_1 \quad (2.30)$$

การหาความกว้างของไมโครสตริป  $w$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.31 หรือ 2.32 เมื่อ  $W$  คือความกว้างของไมโครสตริป และ  $h$  คือความสูงของแผ่นวงจรพิมพ์ สำหรับ  $A > 1.52$

$$\frac{w}{h} = \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2} \quad (2.31)$$

สำหรับ  $A < 1.52$

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (2.32)$$

หาค่า  $A$  และค่า  $B$

$$A = \frac{Z_0}{60} \left( \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{1/2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (2.33)$$

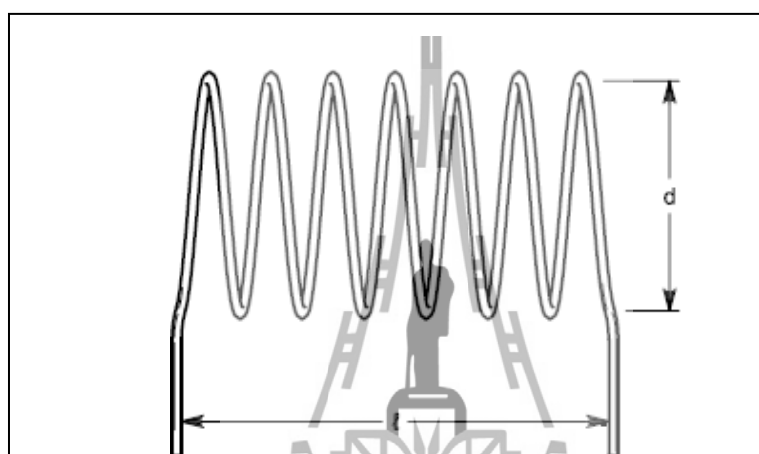
$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.34)$$

## 2.5 ขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductor)

ขดลวดเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้น การคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำ จะเป็นการนำเอาขดลวดตัวนำมาพันเรียงกันเป็นขดลวด โดยขึ้นอยู่กับจำนวนรอบที่พันแล้วแต่ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการใช้งาน การพันขดลวดของตัวเหนี่ยวนำอาจพันบนแกนชนิดต่างๆ หรือเป็นแบบไม่มีแกน (แกนอากาศ) ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีคุณสมบัติที่แตกต่าง ซึ่งสามารถหาสัมพันธของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดที่เป็นอากาศได้ ดังนี้

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (2.35)$$

- เมื่อ  $L$  = ค่าความเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็นเฮนรี่  
 $N$  = จำนวนรอบของขดลวดมีหน่วยเป็นรอบ  
 $\mu$  = วัสดุที่นำมาทำเป็นแกน  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของแกนมีหน่วยเป็นตารางเมตร  
 $l$  = ความยาวของแกนมีหน่วยเป็นเมตร

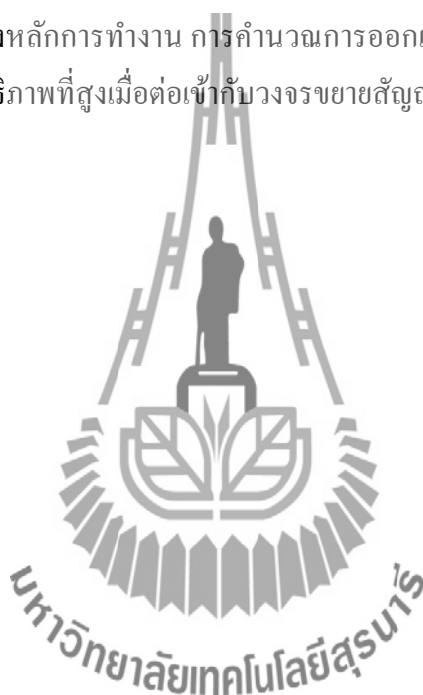


รูปที่ 2.24 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ

จากเงื่อนไข  $r \gg 1$  และจำนวนรอบ  $N$  มีจำนวนมาก และขนาดของความยาวของขดลวด คือการเปรียบเทียบระหว่างรัศมีและจำนวนรอบ จะได้ค่าความสัมพันธ์ที่ไม่มาก ดังนั้น สมการที่ 2.35 จะไม่ใช่ความเหนี่ยวนำที่แท้จริงแต่ก็เป็นการประมาณที่ได้ค่าใกล้เคียง สามารถนำไปใช้ได้

## 2.6 สรุป

การออกแบบวงจรรขยายสัญญาณเครื่องส่งวิทยุ สิ่งสำคัญคือต้องเข้าใจถึงหลักการทำงานของระบบต่างๆในวงจร และโครงสร้างของอุปกรณ์ที่นำมาออกแบบและสร้าง ซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีของวงจรรขยายสัญญาณเครื่องส่งวิทยุ โดยประกอบไปด้วยภาคแรกทฤษฎีของวงจรรขยายสัญญาณ การออกแบบวงจรรขยายสัญญาณในมีประสิทธิภาพและอัตราขยายที่สูง ซึ่งต้องคำนึงถึงการออกแบบในส่วนของภาควงจรแมตซ์อิมพีแดนซ์ทั้งทางด้านอินพุตและเอาต์พุต ที่เป็นวงจรกรองความถี่ (filter) การจับไบอัสให้กับมอสเฟตที่ใช้งานเพื่อให้ได้อัปเดตประกอบตัวอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับวงจร และความเสถียรภาพของวงจร ภาคที่สองทฤษฎีของวงจรรแยกสัญญาณเพื่อเป็นสัญญาณอินพุตให้กับวงจรรขยายสัญญาณ และวงจรรวมสัญญาณสำหรับรวมกำลังงานที่ได้ทั้งหมดจากวงจรรขยายสัญญาณทั้งสองชุด โดยกล่าวถึงหลักการทำงาน การคำนวณการออกแบบวงจรรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่สูงเมื่อต่อกับวงจรรขยายสัญญาณ



### บทที่ 3

## การออกแบบวงจรขยายสัญญาณเครื่องส่งวิทยุ

### 3.1 กล่าวนำ

บทนี้แสดงการออกแบบวงจรความถี่วิทยุ ซึ่งประกอบด้วย วงจรขยายสัญญาณ (Pre Amplifier) วงจรแยกสัญญาณ (divider) วงจรรวมสัญญาณ (combiner) ระบบแสดงดังรูปที่ 3.1 สำหรับการออกแบบวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงใช้มอสเฟตและอุปกรณ์ร่วมต่างๆ ในการออกแบบ ส่วนใช้การคำนวณจากสมการที่แสดงในบทที่ 2 ออกแบบให้เหมาะสมที่สุด (optimization) ซึ่งรายละเอียดของการออกแบบได้อธิบายในบทนี้

### 3.2 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณ

การออกแบบวงจรขยายสัญญาณย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ เลือกใช้มอสเฟตเบอร์ BLF177 เนื่องจากมีกำลังงานสูง สามารถทนต่อการเกิดมิสแมตช์ และอยู่ในย่านความถี่ที่ต้องการจะออกแบบ ซึ่งค่าพารามิเตอร์การจัดกระจาย (S-parameter) ของมอสเฟตเบอร์ BLF177 ที่จุดไบอัสเชิงเส้น  $Z_0$  เท่ากับ 50 โอห์ม  $V_{DD}$  เท่ากับ 20 โวลต์ และ  $I_D$  เท่ากับ 1.5 แอมแปร์ ดังนี้

$$S_{11} = 0.97\angle -174.30^\circ$$

$$S_{21} = 0.86\angle 21.70^\circ$$

$$S_{12} = 0.001\angle 42.50^\circ$$

$$S_{22} = 0.94\angle -164.50^\circ$$

จากนั้นตรวจสอบเสถียรภาพของวงจร หาค่า K (Stability factor)ว่าจะอยู่ในเงื่อนไขใด โดยคำนวณจากค่าพารามิเตอร์การจัดกระจาย ตามสมการที่ 3.1

$$K = \frac{1 + |\Delta|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{21}||S_{12}|} \quad (3.1)$$

$$= \frac{1 + (0.9108)^2 - (0.97)^2 - (0.94)^2}{2(0.86)(0.001)}$$

$$= 2.94$$

ค่า K มากกว่าหนึ่ง ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไข

$$\text{เมื่อ } \Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} \quad (3.2)$$

$$= (0.97\angle -174.30^\circ)(0.94\angle -164.50^\circ) - (0.001\angle 42.50^\circ)(0.86\angle 21.70^\circ)$$

$$= (0.9108\angle 21.1224^\circ)$$

จากนั้นคำนวณหาค่า Maximum Available Gain (MAG) จากสมการที่ 3.3

$$\begin{aligned} \text{MAG} &= 10\log \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} + 10\log |K \pm \sqrt{K^2 - 1}| \\ &= 10\log \frac{|0.86|}{|0.001|} + 10\log |2.94 - \sqrt{2.94^2 - 1}| \\ &= 21.7826 \end{aligned} \quad (3.3)$$

คำนวณค่า  $B_1$  จากสมการที่ 3.4

$$\begin{aligned} B_1 &= 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2 \\ &= 1 + (0.97)^2 - (0.94)^2 - (0.9108)^2 \\ &= 0.2277 \end{aligned} \quad (3.4)$$

คำนวณค่า  $C_2$  จากสมการที่ 3.5

$$\begin{aligned} C_2 &= S_{22} - (\Delta \cdot S_{11}^*) \\ &= (0.94 \angle -164.50^\circ) - (0.9108 \angle 21.1224^\circ)(0.97 \angle 174.30^\circ) \\ &= 0.056 \angle -163.26^\circ \end{aligned} \quad (3.5)$$

คำนวณค่า  $B_2$  จากสมการที่ 3.6

$$\begin{aligned} B_2 &= 1 + |S_{22}|^2 - |S_{11}|^2 - |\Delta|^2 \\ &= 1 + (0.94)^2 - (0.97)^2 - (0.9108)^2 \\ &= 0.1131 \end{aligned} \quad (3.6)$$

ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนทางด้านโหลด (load-reflection coefficient)  $\Gamma_L$  และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนทางด้านแหล่งจ่าย (source-reflection coefficient)  $\Gamma_S$  ตามสมการดังนี้

$$|\Gamma_L| = \frac{B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4|C_2|^2}}{2|C_2|} \quad (3.7)$$

$$\Gamma_S = \left[ S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 + (\Gamma_L S_{22})} \right]^* \quad (3.8)$$



โดย สมการที่ 3.7 เครื่องหมายมีค่าตรงข้ามกับค่า  $B_2$  และค่ามุมของ  $\Gamma_L$  มีค่าเท่ากับค่าตรงข้ามมุมของ  $C_2$

นำค่า  $B_2$  และ  $C_2$  แทนค่าในสมการที่ 3.7 จะได้

$$|\Gamma_L| = \frac{0.1131 - \sqrt{0.1131^2 - 4(0.056)^2}}{2(0.056)}$$

$$|\Gamma_L| = 0.87$$

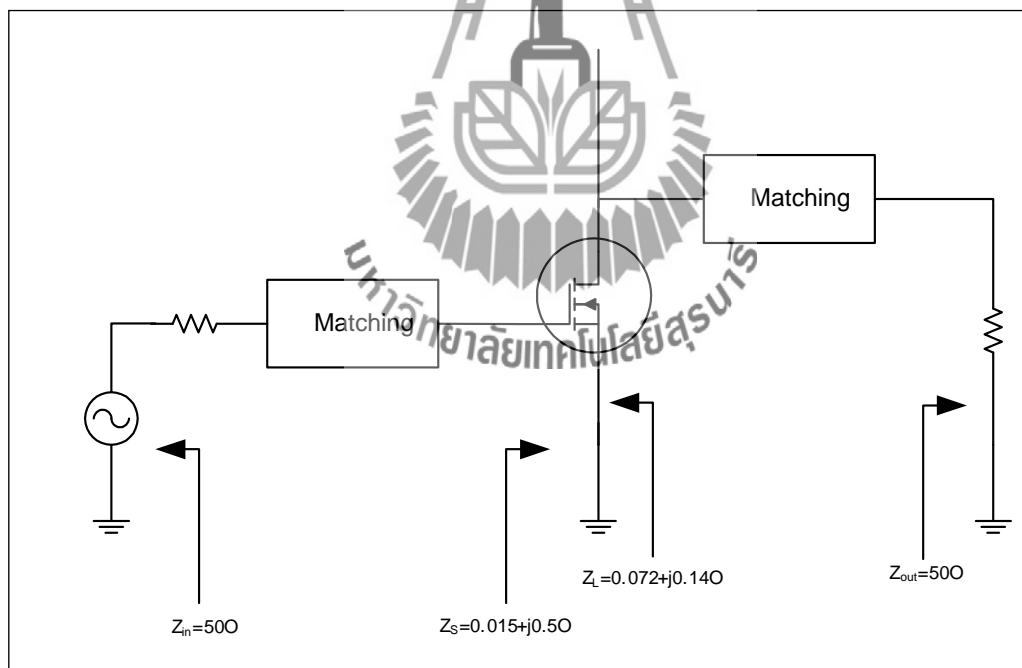
ดังนั้น  $\Gamma_L = 0.87 \angle 163.26^\circ = -0.83 + j0.25$

นำค่า  $\Gamma_L$  แทนค่าในสมการที่ 3.8 จะได้

$$\Gamma_S = \left[ (0.97 \angle -174.3^\circ) + \frac{(0.0001 \angle 42.5^\circ)(0.86 \angle 21.7^\circ)(0.87 \angle 163.26^\circ)^*}{1 - (0.87 \angle 163.26^\circ)(0.94 \angle -164.49^\circ)} \right]^*$$

$$\Gamma_S = -0.96 - j0.096$$

จากนั้นนำค่า  $\Gamma_L$  และ  $\Gamma_S$  ที่ได้มาคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์  $Z_L$  และ  $Z_S$  จากสมการที่ 3.9 เพื่อมาออกแบบวงจรแมตซ์ซิ่งอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตและด้านเอาต์พุตดังรูปที่ 3.1

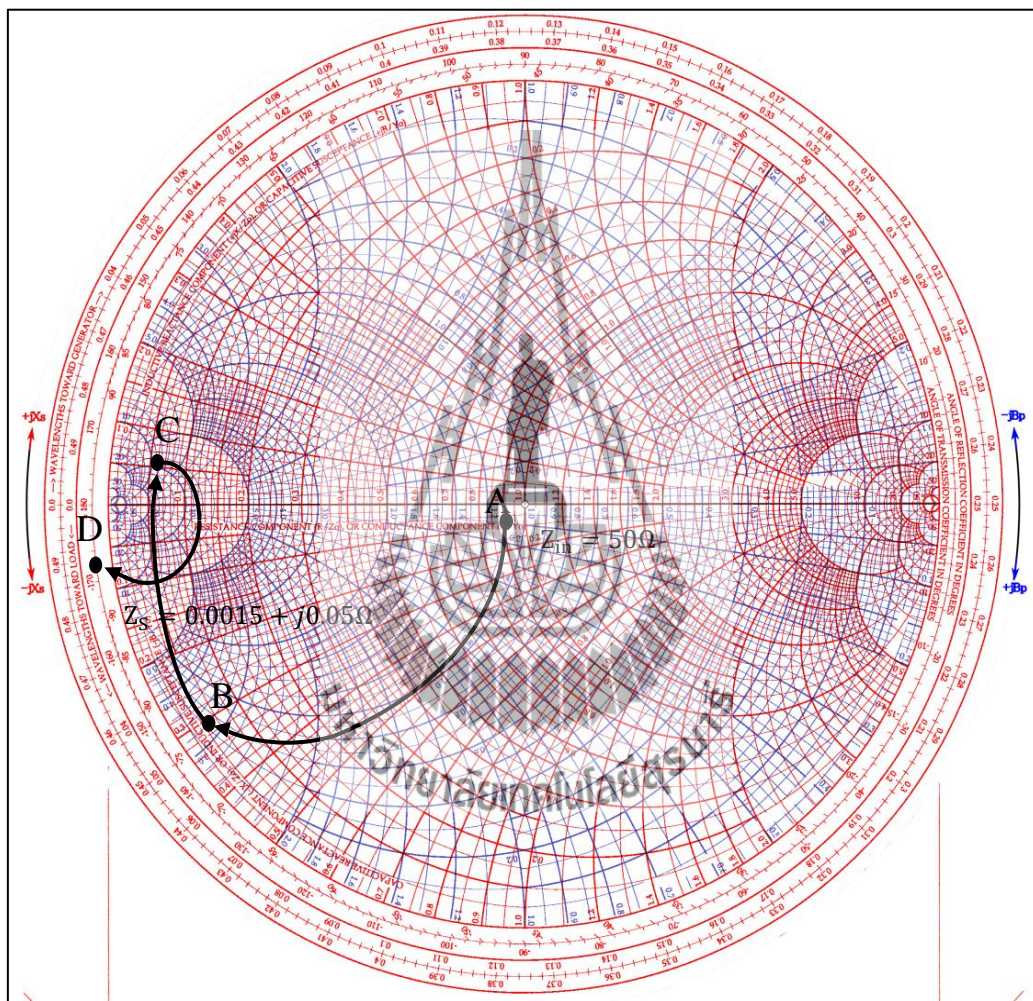


รูปที่ 3.1 รูปแบบของโครงข่ายแมตซ์ซิ่งอิมพีแดนซ์ที่ออกแบบได้

$$Z = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (3.9)$$

จะได้  $Z_S$  เท่ากับ  $0.015+j0.05$  และ  $Z_L$  เท่ากับ  $0.072+j0.14$  ซึ่งเป็นค่าที่นอร์มัลไลซ์แล้ว จากนั้นกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ด้านอินพุต  $Z_{in}$  และอิมพีแดนซ์ด้านเอาต์พุต  $Z_{out}$  เท่ากับ 50 โอห์ม โดยทำการนอร์มัลไลซ์  $Z_{in}$  และ  $Z_{out}$  ด้วย 50 จะได้  $Z_{in}$  และ  $Z_{out}$  เท่ากับ 1

การคำนวณโครงข่ายแมตซ์ซึ่งพิจารณาอินพุต ออกแบบโดยนำค่า  $Z_{in}$  และ  $Z_S$  ที่ได้จากการนอร์มัลไลซ์มาพล็อตลงบนแผนภูมิสมิท โดยกำหนดจุด  $Z_{in}$  และ  $Z_S$  และลากเส้นจาก  $Z_{in}$  ไปยังจุด  $Z_S$  เพื่อจำกัดค่าจริง ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การกำหนดจุด  $Z_{in}$  และ  $Z_S$  สำหรับบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริงด้านอินพุต

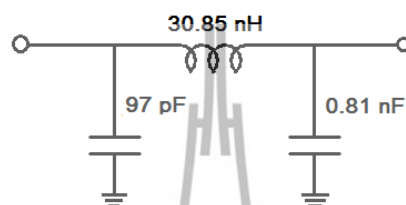
เมื่อจำกัดค่าจริงดังรูปที่ 3.2 แล้ว จากนั้นหาค่าความยาวของแต่ละเส้นที่ลากจากอิมพีแดนซ์อินพุต  $Z_{in}$  จนถึง อิมพีแดนซ์เอาต์พุต  $Z_S$  ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.3 โดยเส้นโค้ง AB คือการจำกัดค่าตัวเก็บประจุ C แบบขนานซึ่งมีค่า  $X_{C1}$  เท่ากับ 3 เส้นโค้ง BC คือการจำกัดค่าตัวเหนี่ยวนำ L แบบอนุกรมซึ่งมีค่า  $X_L$  เท่ากับ 0.38 และเส้นโค้ง CD คือการจำกัดค่าตัวเก็บประจุ C แบบขนานซึ่งมีค่า  $X_{C2}$  เท่ากับ 25



$$C_1 = \frac{3}{2\pi(98 \times 10^6)(50)} = 97 \text{ pF}$$

$$C_2 = \frac{25}{2\pi(98 \times 10^6)(50)} = 0.81 \text{ nF}$$

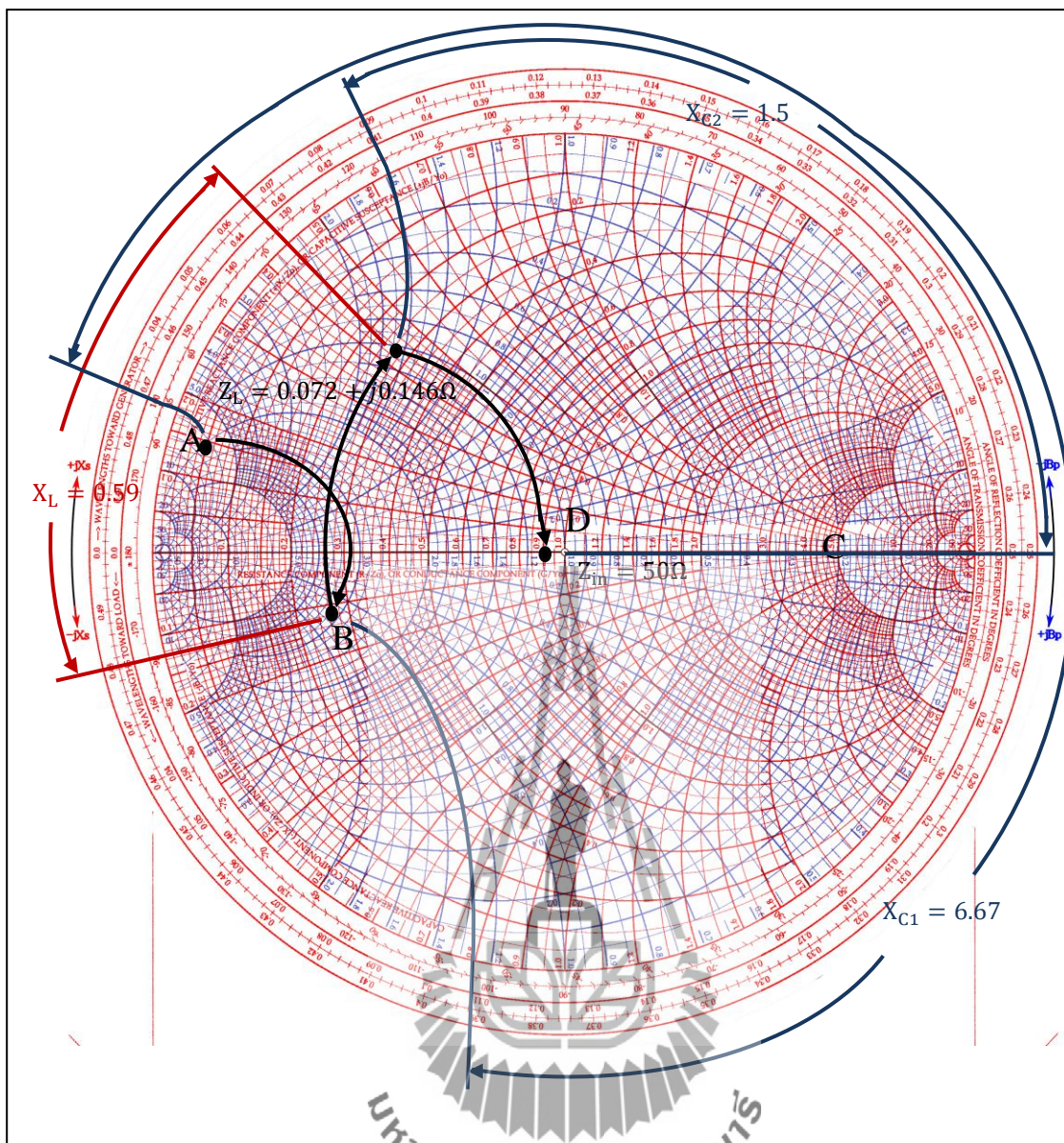
$$L = \frac{0.38(50)}{2\pi(98 \times 10^6)} = 30.85 \text{ nH}$$



รูปที่ 3.4 ลักษณะของวงจรโครงข่ายแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ด้านอินพุต

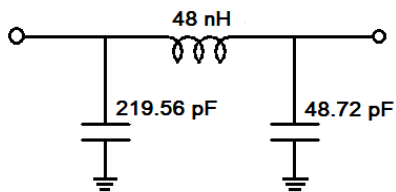
การคำนวณโครงข่ายแมตซ์ซึ่งพิจารณาด้านเอาต์พุต ออกแบบโดยนำค่า  $Z_{out}$  และ  $Z_L$  ที่ได้จากการนอร์มัลไลซ์มาพล็อตลงบนแผนภูมิสมิท โดยกำหนดจุด  $Z_{out}$  และ  $Z_L$  และลากเส้นจาก  $Z_L$  ไปยังจุด  $Z_{out}$  เพื่อจำกัดค่าจริง ดังรูปที่ 3.5





รูปที่ 3.6 การหาค่าความยาวบนเส้นอนุกรมที่หาค่าจริงด้านเอาต์พุต

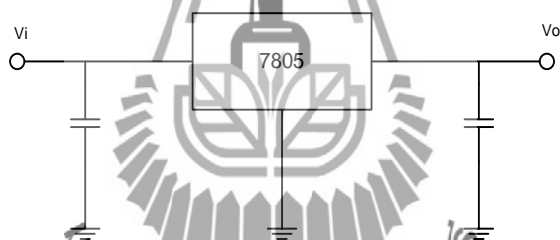
$$\begin{aligned}
 C_1 &= \frac{6.76}{2\pi(98 \times 10^6)(50)} = 219.56 \text{ pF} \\
 C_2 &= \frac{1.5}{2\pi(98 \times 10^6)(50)} = 48.72 \text{ pF} \\
 L &= \frac{0.59(50)}{2\pi(98 \times 10^6)} = 48 \text{ nH}
 \end{aligned}$$



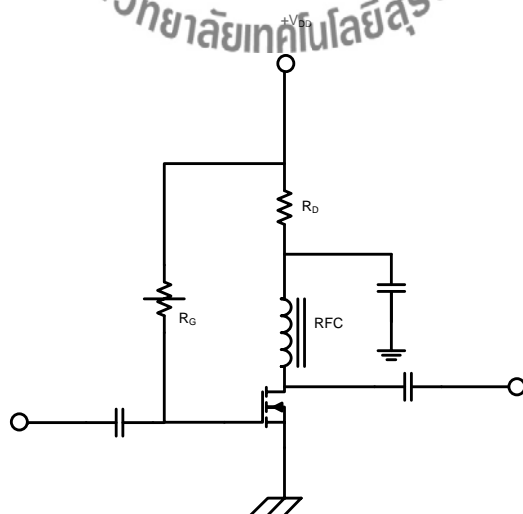
รูปที่ 3.7 ลักษณะของวงจรโครงข่ายแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ด้านเอาต์พุต

การออกแบบวงจรขยายสัญญาณส่วนที่เป็นดีซี จากการคำนวณหาค่าขององค์ประกอบของวงจรทางด้านอินพุตและด้านเอาต์พุต จะเห็นว่าลักษณะของวงจรที่ได้จะเป็นแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter) และการออกแบบวงจรไบอัสมอสเฟตเบอร์ BLF177 พิจารณาจากรูปที่ โดยใช้  $V_{GS}$  เท่ากับ 20 โวลต์  $V_{DS}$  เท่ากับ 5 โวลต์ และ  $I_D$  เท่ากับ 2.4 มิลลิแอมป์ ที่จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงมาจากเครื่อง DC POWER สามารถดูค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของ BLF177 ได้จากภาคผนวก ข.

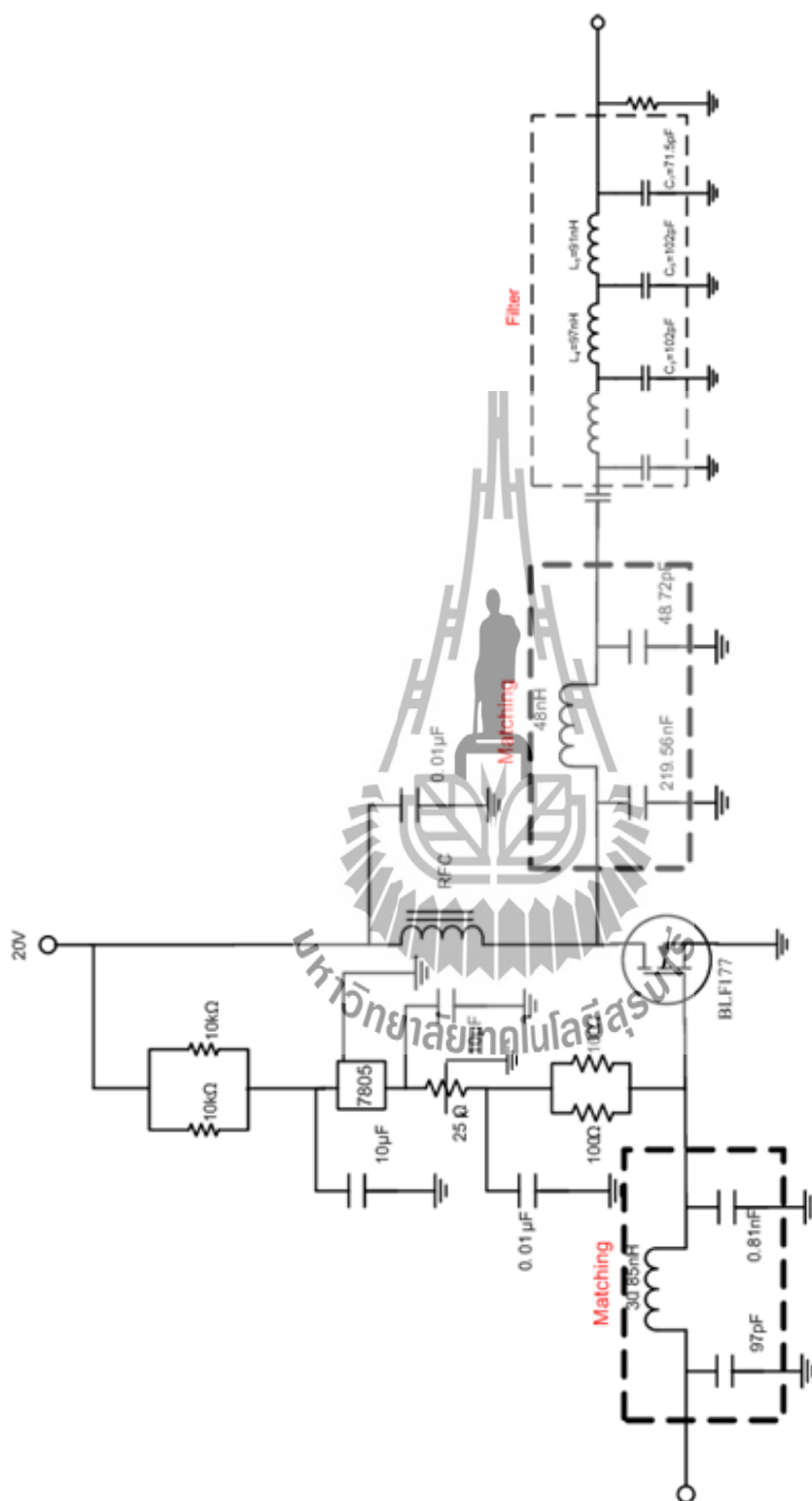
แรงดัน  $V_G$  เป็นแรงดันที่ได้จากวงจรรีกูเรเตอร์แรงดันโดยไอซีสามขา KIA7805 ที่ได้แรงดันขาเกรทเท่ากับ 10 โวลต์ สามารถดูค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้จาก data sheet



รูปที่ 3.8 วงจรเร็กูเรเตอร์ด้วยไอซีสามขา

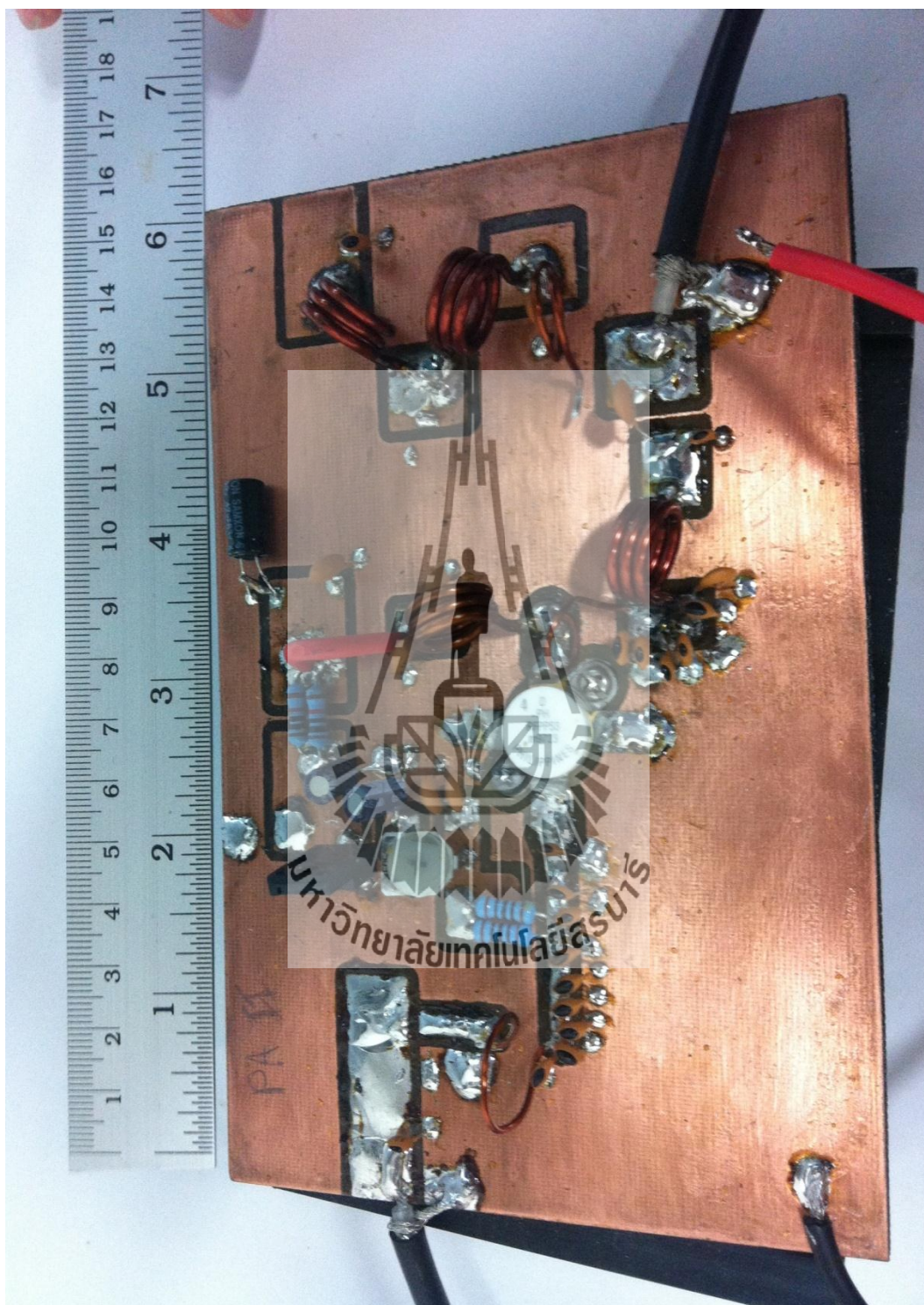


รูปที่ 3.9 วงจรไบแอสวงจขยายสัญญาณ



รูปที่ 3.10 วงจรขยายสัญญาณ

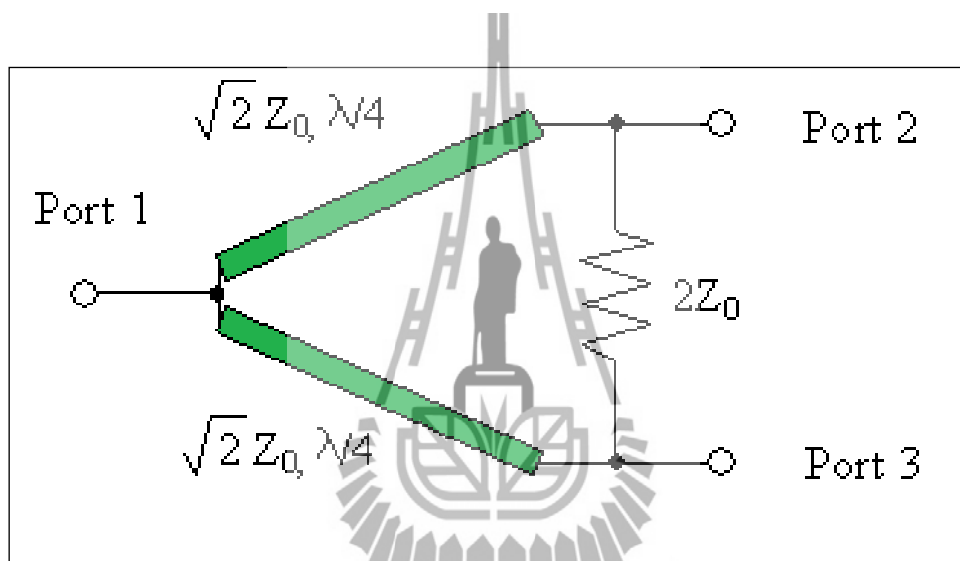




รูปที่ 3.11 วงจรขยายสัญญาณที่ลงอุปกรณ์แล้ว

### 3.3 การออกแบบวงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณ

วงจรแยกสัญญาณนั้นเป็นส่วนที่แยกกำลังสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณออกเป็นหลายทางขึ้นอยู่กับความต้องการที่จะออกแบบ และวงจรรวมสัญญาณจะเป็นส่วนที่รวมสัญญาณเพื่อให้ได้กำลังส่งที่มากขึ้น ซึ่งลักษณะของลายวงจรของวงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณจะเหมือนกันแต่ขึ้นอยู่กับความต้องการในนำไปใช้ ทำให้ในการออกแบบวงจรแยกสัญญาณสามารถนำไปใช้กับวงจรรวมสัญญาณได้เช่นกัน ซึ่งในการออกแบบจะต้องคำนึงลักษณะของการทำงานของวงจร โดยจะเลือกออกการออกแบบด้วยไมโครสตริป ซึ่งเหมาะสมกับวงจรที่ใช้ความถี่สูงแต่กำลังงานไม่สูงมาก ลักษณะของวงจรแยกสัญญาณจะเป็นดังรูปที่ 3.12 ซึ่งในการออกแบบด้วยไมโครสตริป แบบ Wilkinson ในลักษณะเป็น 2 ทาง โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการต่างๆ ในการพิจารณาและออกแบบต่อไป



รูปที่ 3.12 แบบจำลองสายส่งสัญญาณของไมโครสตริป แบบ Wilkinson

การออกแบบจะพิจารณาหาความหนาของไมโครสตริป ( $w$ ) เมื่อแยกสัญญาณทำให้เอาต์พุตแบ่งออกเป็นสองทางซึ่งเป็นกำลังงานอิมพีแดนซ์ ซึ่งกำหนดอิมพีแดนซ์อินพุตเท่ากับ 50 โอห์ม และอิมพีแดนซ์เอาต์พุตเท่ากับ 50 โอห์ม โดยสามารถคำนวณความหนาและความยาวของไมโครสตริปได้จากสมการที่ 3.12 และ 3.13 จะได้กำลังงานของพอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 3 จะลดลงครึ่งหนึ่งของสัญญาณอินพุต จากการออกแบบเลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์มีค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.8 ความหนาแผ่นวงจรพิมพ์ ( $h$ ) เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร

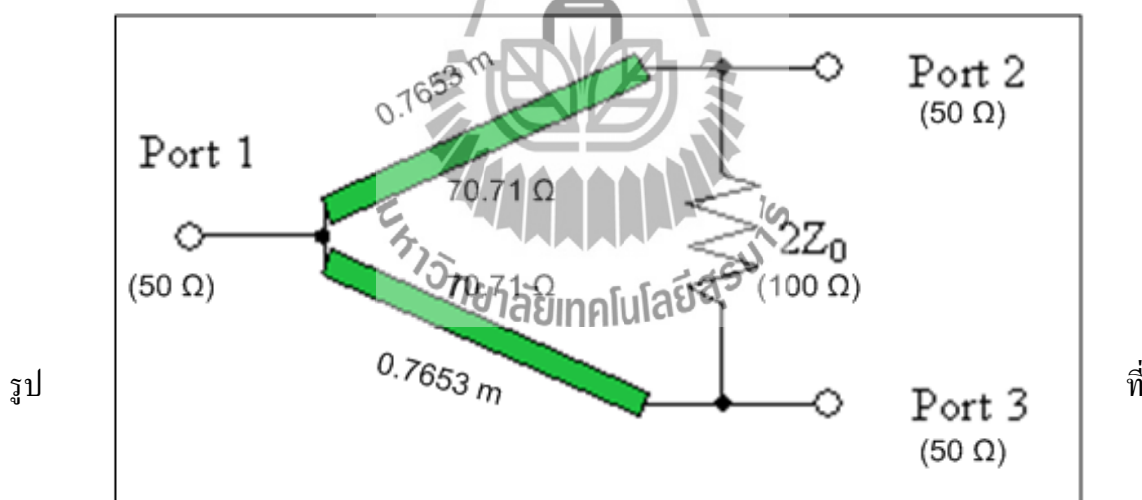
$$\frac{w}{h} = \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2} \quad (3.12)$$

$$A = \frac{Z_0}{60} \left( \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{1/2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (3.13)$$

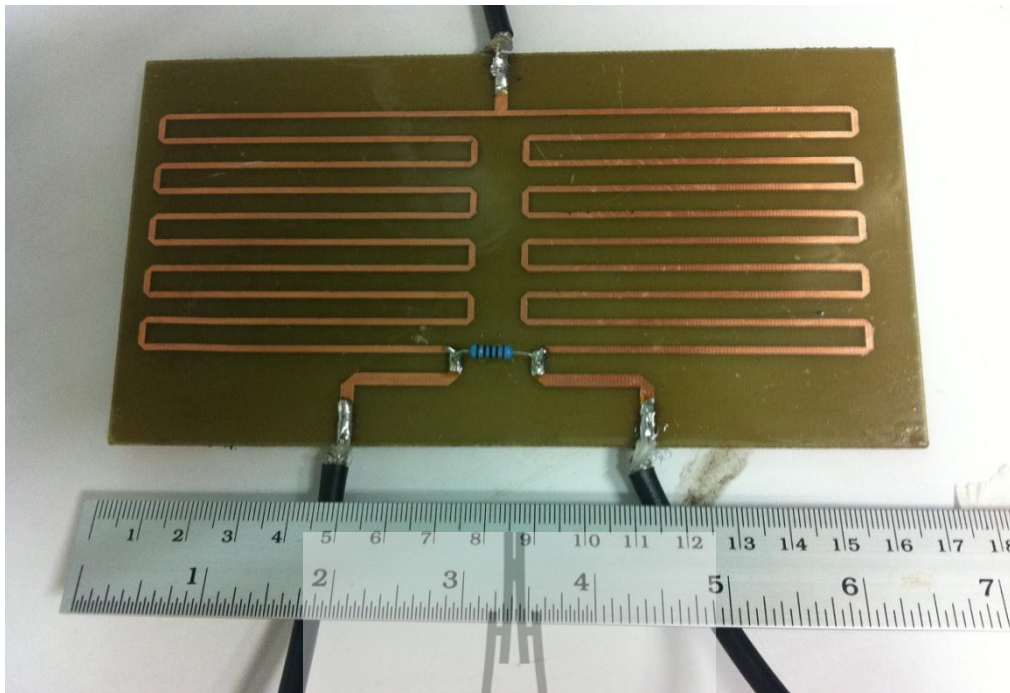
$$\lambda_d = \frac{\lambda}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (3.14)$$

พิจารณาความหนาของไมโครสตริป ( $w$ ) ทางด้านอินพุตและเอาต์พุตที่ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ  $Z_0 = 50$  โอห์ม คำนวณหาค่า  $A$  จากสมการที่ 3.13 จะได้  $A = 1.5848$  และแทนค่าในสมการที่ 3.12 จะได้  $w = 1.7903h$  ซึ่ง  $h = 1.6$  มิลลิเมตร ดังนั้น  $w = 2.864$  มิลลิเมตร และเมื่อพิจารณาที่ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ  $\sqrt{2}Z_0 = 70.71$  โอห์ม คำนวณหาค่า  $A$  จากสมการที่ 3.13 จะได้  $A = 2.172$  และแทนค่าในสมการที่ 3.12 จะได้  $w = 0.9359h$  ซึ่ง  $h = 1.6$  มิลลิเมตร ดังนั้น  $w = 1.4974$  มิลลิเมตร

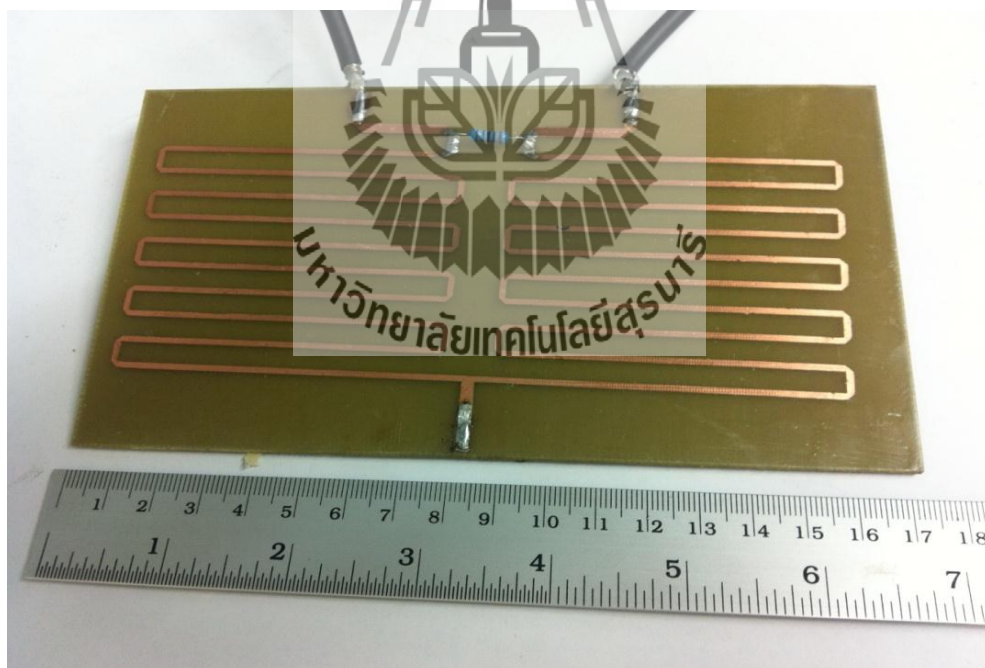
พิจารณาความยาวของไมโครสตริป ( $\frac{\lambda_d}{4}$ ) คำนวณหาค่า  $\lambda_d$  จากสมการที่ 3.14 ซึ่งมีความถี่กลาง ( $f$ ) เท่ากับ 98 เมกะเฮิร์ตซ์ และค่าสัมประสิทธิ์ ( $\mu_r$ ) เท่ากับ 1 จะได้  $\lambda_d = 3.06122$  เมตร ดังนั้น  $\frac{\lambda_d}{4} = 0.7653$  เมตร ค่าที่ได้จากการคำนวณ ดังรูปที่ 3.13 และวงจรที่ได้จากการคำนวณออกแบบ ดังรูปที่ 3.14 และรูปที่ 3.15



รูป 3.13 วงจรที่ได้จากการคำนวณค่าต่างๆ



รูปที่ 3.14 วงจรแยกสัญญาณที่ได้จากการออกแบบ



รูปที่ 3.15 วงจรรวมสัญญาณที่ได้จากการออกแบบ

### 3.4 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter)

เมื่อเลือกชนิดของวงจรกรองความถี่ ต้องเลือกค่าตอบสนองการลดทอนที่เหมาะสม โดยดูจาก Low-pass Filter มूलฐาน ขั้นตอนต่อไปคือการแปลงวงจรมूलฐาน ให้อยู่ในรูปฟิลเตอร์ที่นำมาใช้ประโยชน์ได้ เลือกใช้วิธีการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยใช้หลักการเปิดตารางทำการหาค่าอิลิเมนต์ในวงจรกรองความถี่แบบ Chebyshev ในการหาตัวเลขอันดับ (Order) การแปลงค่าโดยใช้สูตร

$$C = \frac{C_n}{2\pi f_c R_L} \quad (3.15)$$

$$L = \frac{R_L n}{2\pi f_c} \quad (3.16)$$

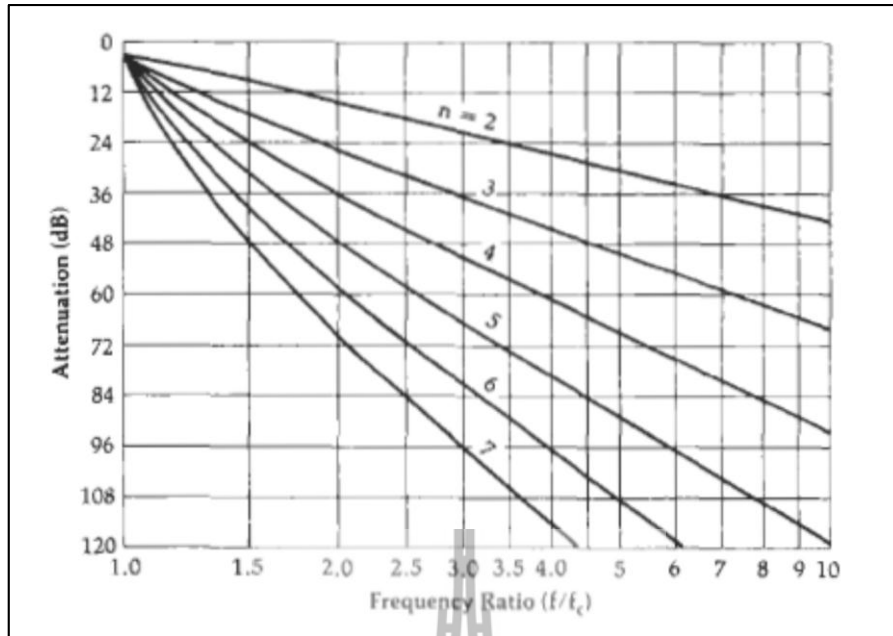
โดยที่	C	คือ	ค่าสุดท้ายของตัวเก็บประจุ
	L	คือ	ค่าสุดท้ายของตัวเหนี่ยวนำ
	$C_n$	คือ	ค่ามูลฐาน ของ Low-pass Filter
	$L_n$	คือ	ค่ามูลฐาน ของ Low-pass Filter
	$R_L$	คือ	ค่าสุดท้ายของความต้านทานของโหลด
	$f_c$	คือ	ค่าความถี่คัทออฟ (cut-off frequency)

กระบวนการการออกแบบ low-pass filter ทำได้ด้วยกระบวนการดังนี้

1. เาะจงค่าการตอบสนองการลดทอน ณ. ความถี่ที่เลือก ความถี่คัทออฟ = 110 MHz และค่า  $R_L = 50$  โอห์ม  $R_s = 50$  โอห์ม 1.0 dB Ripple Chebyshev ค่าลดทอน 30 dB ที่ความถี่ 160 เมกะเฮิรตซ์
2. ทำการ normalize ความถี่ที่สนใจหารด้วยค่าความถี่ cut-off ของ filter ขั้นตอนที่กำลังกล่าวมา จะให้ข้อมูลที่เหมือนกับเส้น โคงการลดทอน ที่จุด 3 dB ของเส้น โคง

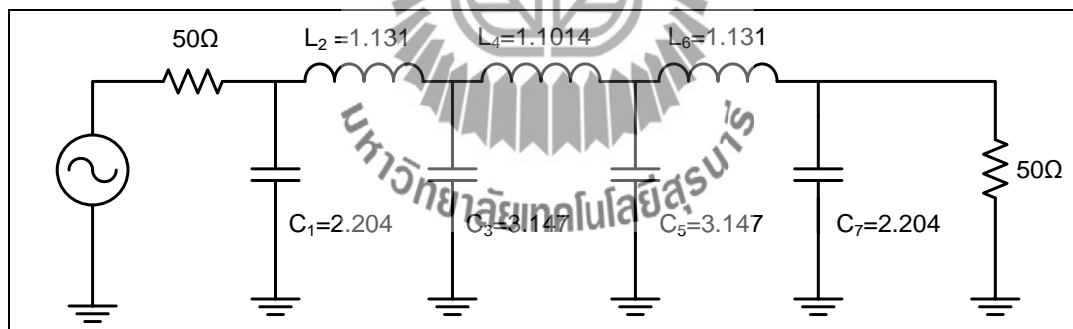
$$\frac{f_{30\text{ dB}}}{f_c} = \frac{150\text{ MHz}}{98\text{ MHz}} = 1.45$$

3. หาจำนวนที่มากที่สุดของ ripple ที่ยอมรับได้ใน pass band จำนวน ripple ที่ดีกว่า จะมีค่ามากกว่า ค่าที่เลือกใน filter นี้ ค่า ripple ที่สูงกว่าจะต้องผ่านการแยกองค์ประกอบออกมาแล้ว โดยนำค่าที่ได้จากการ normalize ความถี่ ไปหาค่าเลขลำดับ (order) จากรูปที่ 3.17 จะได้เลขลำดับหรือจำนวนอิลิเมนต์เท่ากับ 7 ที่ค่าลดทอน 30 dB  $n=7$



รูปที่ 3.17 Attenuation characteristics for a Chebyshev filter with 1-dB ripple

4. หาค่า  $R_S/R_L$  เพื่อเปิดตาราง 3.1
5. หาค่า low-pass มูลฐาน จากตาราง 3.1 โดย  $n=7$ ,  $R_S/R_L = 1$



รูปที่ 3.18 วงจรมูลฐานที่ได้จากการเปิดตารางที่ 3.1 Chebyshev Low-Pass Prototype Element Values for 1.0-dB Ripple

6. นำค่าทั้งหมดที่ได้ จากความถี่ และอิมพีแดนซ์ สุดท้าย มาออกแบบ จะได้ Lowpass filter ดังรูป 3.18
7. คำนวนหาค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำจากสมการ 3.15 และ 3.16

$$C_1 = \frac{2.204}{2\pi(110 \times 10^6)50} = 64.7 \text{ pF}$$

$$C_3 = \frac{3.143}{2\pi(110 \times 10^6)50} = 91 \text{ pF}$$

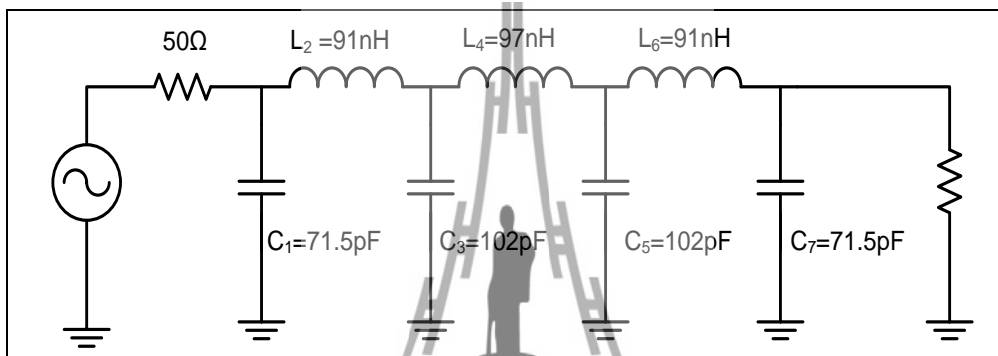
$$C_5 = \frac{3.147}{2\pi(110 \times 10^6)50} = 91 \text{ pF}$$

$$C_7 = \frac{2.204}{2\pi(110 \times 10^6)50} = 64.7 \text{ pF}$$

$$L_2 = \frac{50 \times 1.131}{2\pi(110 \times 10^6)} = 81.8 \text{ nH}$$

$$L_4 = \frac{50 \times 1.194}{2\pi(110 \times 10^6)} = 86.4 \text{ nH}$$

$$L_6 = \frac{50 \times 1.131}{2\pi(110 \times 10^6)} = 81.8 \text{ nH}$$



รูปที่ 3.19 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

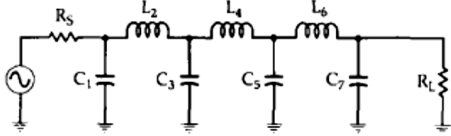
n	$R_S/R_L$	$C_1$	$C_3$	$L_4$	
2	3.000	0.572	3.132		
	4.000	0.365	4.600		
	8.000	0.157	9.658		
	$\infty$	1.213	1.109		
3	1.000	2.216	1.088	2.216	
	0.500	4.431	0.817	2.216	
	0.333	6.647	0.726	2.216	
	0.250	8.862	0.680	2.216	
	0.125	17.725	0.612	2.216	
4	$\infty$	1.652	1.460	1.108	
4	3.000	0.653	4.411	0.814	2.535
	4.000	0.452	7.083	0.612	2.848
	8.000	0.209	17.164	0.428	3.281
	$\infty$	1.350	2.010	1.488	1.106

n	$R_L/R_S$	$L_1$	$C_2$	$L_3$	$C_4$
2	3.000	0.572	3.132		
2	4.000	0.365	4.600		
2	8.000	0.157	9.658		
2	$\infty$	1.213	1.109		
3	1.000	2.216	1.088	2.216	
3	0.500	4.431	0.817	2.216	
3	0.333	6.647	0.726	2.216	
3	0.250	8.862	0.680	2.216	
3	0.125	17.725	0.612	2.216	
3	$\infty$	1.652	1.460	1.108	
4	3.000	0.653	4.411	0.814	2.535
4	4.000	0.452	7.083	0.612	2.848
4	8.000	0.209	17.164	0.428	3.281
4	$\infty$	1.350	2.010	1.488	1.106

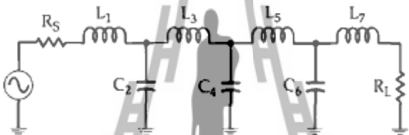
ตารางที่ 3.1(A) Chebyshev Low-Pass Prototype Element Values for 1.0-dB Ripple



$n$	$R_S/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$	$C_5$	$L_6$	$C_7$
5	1.000	2.207	1.128	3.103	1.128	2.207		
	0.500	4.414	0.565	4.653	1.128	2.207		
	0.333	6.622	0.376	6.205	1.128	2.207		
	0.250	8.829	0.282	7.756	1.128	2.207		
	0.125	17.657	0.141	13.961	1.128	2.207		
$\infty$	1.721	1.645	2.061	1.493	1.103			
6	3.000	0.679	3.873	0.771	4.711	0.969	2.406	
	4.000	0.481	5.644	0.476	7.351	0.849	2.582	
	8.000	0.227	12.310	0.198	16.740	0.726	2.800	
	$\infty$	1.378	2.097	1.690	2.074	1.494	1.102	
7	1.000	2.204	1.131	3.147	1.194	3.147	1.131	2.204
	0.500	4.408	0.566	6.293	0.895	3.147	1.131	2.204
	0.333	6.612	0.377	9.441	0.796	3.147	1.131	2.204
	0.250	8.815	0.283	12.588	0.747	3.147	1.131	2.204
	0.125	17.631	0.141	25.175	0.671	3.147	1.131	2.204
$\infty$	1.741	1.677	2.155	1.703	2.079	1.494	1.102	

$n$	$R_L/R_S$	$L_1$	$C_2$	$L_3$	$C_4$	$L_5$	$C_6$	$L_7$
5	1.000	1.128	2.207	1.128	2.207	1.128	2.207	1.128
	0.500	0.565	4.414	0.565	4.414	0.565	4.414	0.565
	0.333	0.376	6.622	0.376	6.622	0.376	6.622	0.376
	0.250	0.282	8.829	0.282	8.829	0.282	8.829	0.282
	0.125	0.141	17.657	0.141	17.657	0.141	17.657	0.141
$\infty$	2.061	1.645	2.061	1.645	2.061	1.645	2.061	
6	3.000	0.771	3.873	0.771	3.873	0.771	3.873	0.771
	4.000	0.476	5.644	0.476	5.644	0.476	5.644	0.476
	8.000	0.198	12.310	0.198	12.310	0.198	12.310	0.198
	$\infty$	1.690	2.097	1.690	2.097	1.690	2.097	1.690
7	1.000	1.131	3.147	1.131	3.147	1.131	3.147	1.131
	0.500	0.566	6.293	0.566	6.293	0.566	6.293	0.566
	0.333	0.377	9.441	0.377	9.441	0.377	9.441	0.377
	0.250	0.283	12.588	0.283	12.588	0.283	12.588	0.283
	0.125	0.141	25.175	0.141	25.175	0.141	25.175	0.141
$\infty$	2.155	1.703	2.155	1.703	2.155	1.703	2.155	



ตารางที่ 3.1(B) Chebyshev Low-Pass Prototype Element Values for 1.0-dB Ripple

### 3.5 สรุป

การออกแบบวงจรความถี่วิทยุ ซึ่งประกอบไปด้วยภาคส่วนต่างๆ คือ ภาควงจรขยายสัญญาณ ออกแบบด้วยมอสเฟตเบอร์ BLF177 ซึ่งออกแบบโดยการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ เสถียรภาพของวงจร อัตราการขยาย การมอดูเลชันซึ่งอิมพีแดนซ์ แรงดันและกระแสที่ใช้บังคับทิศทาง การไหลของกระแส ภาควงจรแยกสัญญาณและภาควงจรรวมสัญญาณ ซึ่งวิเคราะห์และออกแบบด้วยไมโครสตริปแบบ Wilkinson โดยพิจารณาคำนวณหาความกว้างและความยาวของไมโครสตริป



## บทที่ 4

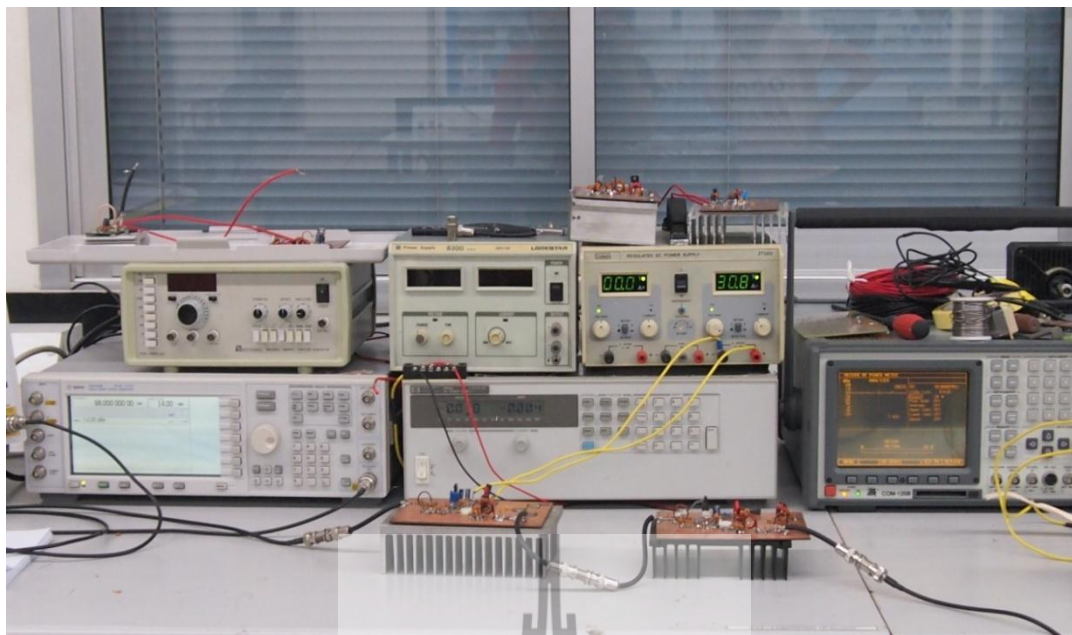
### การวัดและผลการทดลอง

#### 4.1 กล่าวนำ

จากการกล่าวถึงการออกแบบวงจรความถี่วิทยุในบทที่ผ่านมาโดยการใช้ทฤษฎีของแต่ละวงจรในการวิเคราะห์และออกแบบ สำหรับในบทนี้จึงกล่าวถึงการทดลองและผลการทดสอบวงจรความถี่วิทยุที่ได้ออกแบบ เพื่อยืนยันการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้ ซึ่งการวัดผลจะแบ่งเป็นสามส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนวงจรขยายสัญญาณ โดยจะการวัดสัญญาณอินพุต กำลังอินพุต สัญญาณเอาต์พุต กำลังเอาต์พุต อัตราขยายสัญญาณ และประสิทธิภาพของวงจร ส่วนวงจรแยกสัญญาณและส่วนวงจรรวมสัญญาณ โดยจะวัดสัญญาณเอาต์พุต อัตราขยายสัญญาณ และกำลังเอาต์พุต โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (spectrum analyzer IFR AN930A) และเครื่อง Service Monitor ในการวัดทดสอบมาวิเคราะห์และสรุปผลต่อไป

#### 4.2 การทดลองวงจรขยายสัญญาณ

วงจรขยายสัญญาณออกแบบเพื่อใช้ทดสอบ 2 ชุด ที่มีลักษณะเหมือนกัน โดยแต่ละชุดรับสัญญาณอินพุตจากแหล่งจ่ายกำลังสัญญาณขนาดเท่ากับ 0.5 วัตต์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าขาเดรน เท่ากับ 20 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าขาเกต เท่ากับ 3 โวลต์ ทดลองวัดสัญญาณอินพุต สัญญาณเอาต์พุตที่ความถี่ 98 เมกะเฮิร์ตซ์ และกำลังสัญญาณตลอดย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งสามารถนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และคำนวณหาค่าอัตราขยายสัญญาณเอาต์พุต และประสิทธิภาพของวงจร ลักษณะการเตรียมเครื่องมือสำหรับการวัดผลแสดงดังรูปที่ 4.1 เป็นการทดลองวงจรขยายสัญญาณที่ละชุด ซึ่งประกอบด้วยวงจรขยายสัญญาณที่มีกำลังสัญญาณขนาดเท่ากับ 0.5 วัตต์ ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังสัญญาณอินพุตให้กับวงจรขยายสัญญาณที่ต้องการทดลองและเชื่อมต่อเอาต์พุตกับเครื่อง Service Monitor



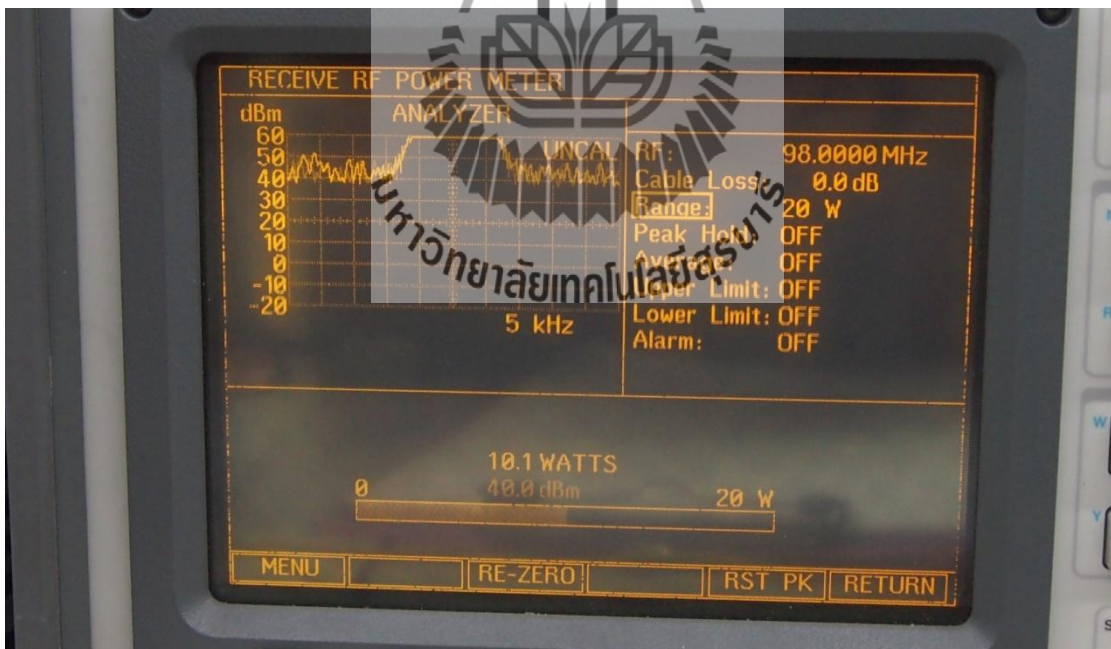
รูปที่ 4.1 ลักษณะการวัดผลการทดลองของวงจรขยายสัญญาณ

#### 4.2.1 วงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 1

สำหรับผลการทดลองการวัดสัญญาณของวงจรขยายสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นผลการวัดสัญญาณอินพุตวัด โดยใช้เครื่อง Service Monitor เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรแรงดันขาเดรน เท่ากับ 20 โวลต์ และ แรงดันขาเกต เท่ากับ 3 โวลต์ โดยกำลังอินพุตที่วัดได้มีขนาด เท่ากับ 0.5 วัตต์และเมื่อวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรในลักษณะเดียวกันแสดงดังรูปที่ 4.3 จะได้กำลังสัญญาณเอาต์พุตมีค่า ประมาณ 10 วัตต์ ที่ความถี่ 98 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งลักษณะของสัญญาณเป็นการวัดเพื่อทดสอบถึงสัญญาณความถี่ของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต เพื่อวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพการทำงานของวงจร

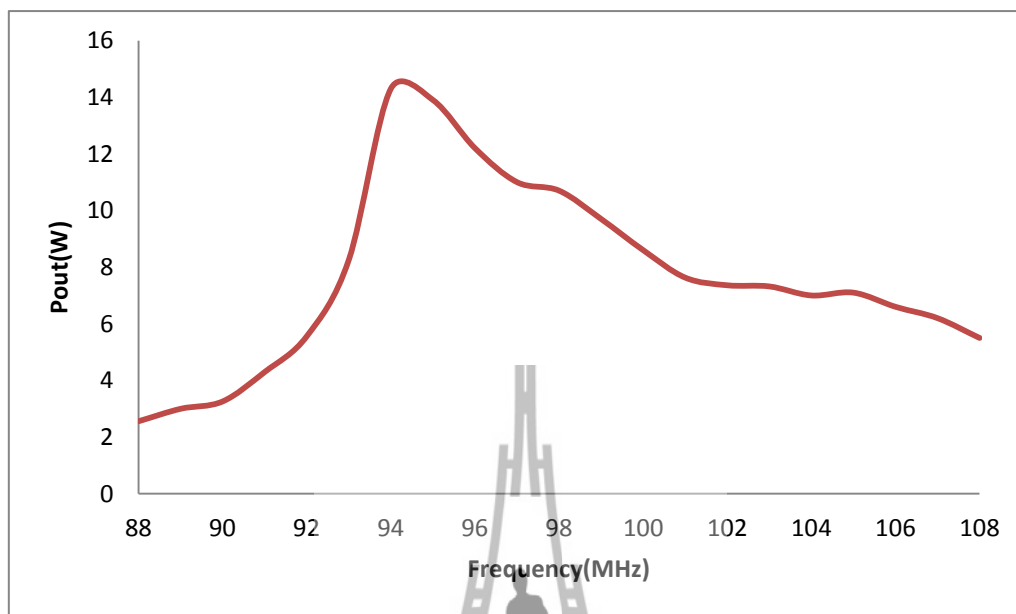


รูปที่ 4.2 สัญญาณอินพุตวงจรถบายสัญญาณชุดที่ 1 ที่ความถี่ 98 เมกะเฮิรตซ์



รูปที่ 4.3 สัญญาณเอาต์พุตวงจรถบายสัญญาณ ชุดที่ 1 ที่ความถี่ 98 เมกะเฮิรตซ์

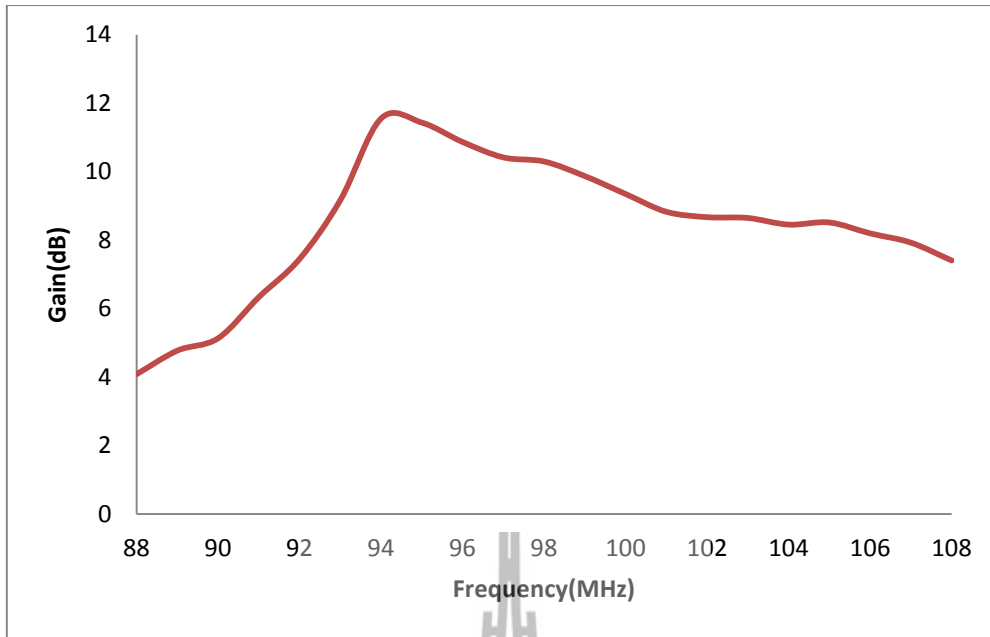
สำหรับการวัดกำลังสัญญาณของเอาต์พุต สามารถนำพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ และคำนวณหาค่าอัตราขยาย และประสิทธิภาพ ได้จากสมการในบทที่ 2 ได้ดังนี้



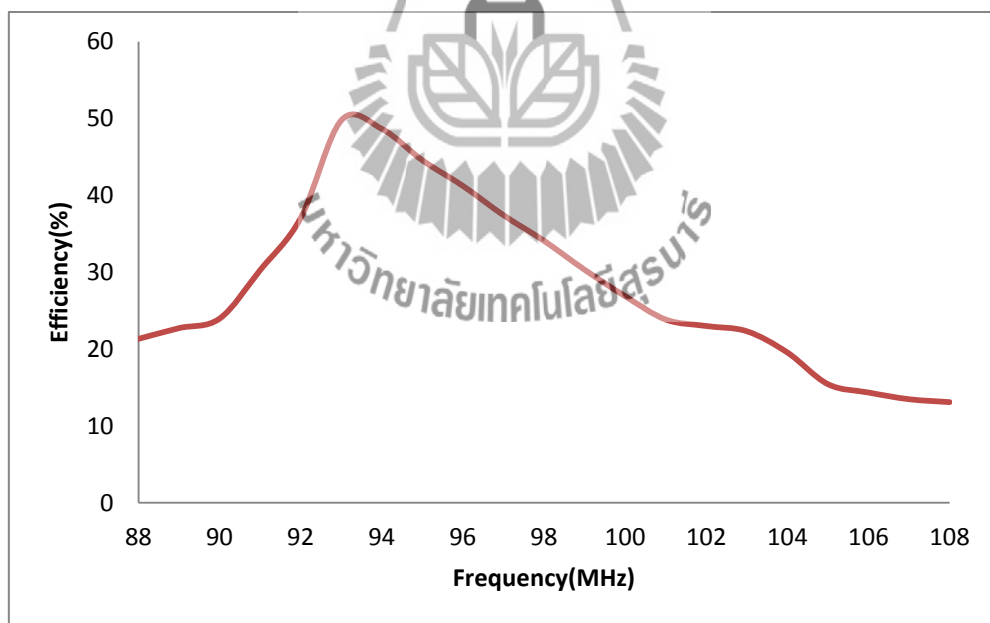
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณของเอาต์พุตและความถี่ของวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 1

จากการวัดกำลังสัญญาณเอาต์พุตของวงจร โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณเอาต์พุตในย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ ของวงจรขยายสัญญาณชุดที่ 1 เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตที่มีขนาดเท่ากับ 0.5 วัตต์ จากกราฟจะเห็นกำลังสัญญาณของเอาต์พุตโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 7.71 วัตต์ โดยมีกำลังสัญญาณสูงสุดที่ 14.3 วัตต์ ความถี่ 94 เมกะเฮิร์ตซ์ และกำลังต่ำสุดอยู่ที่ 3 วัตต์ ความถี่ 88 เมกะเฮิร์ตซ์

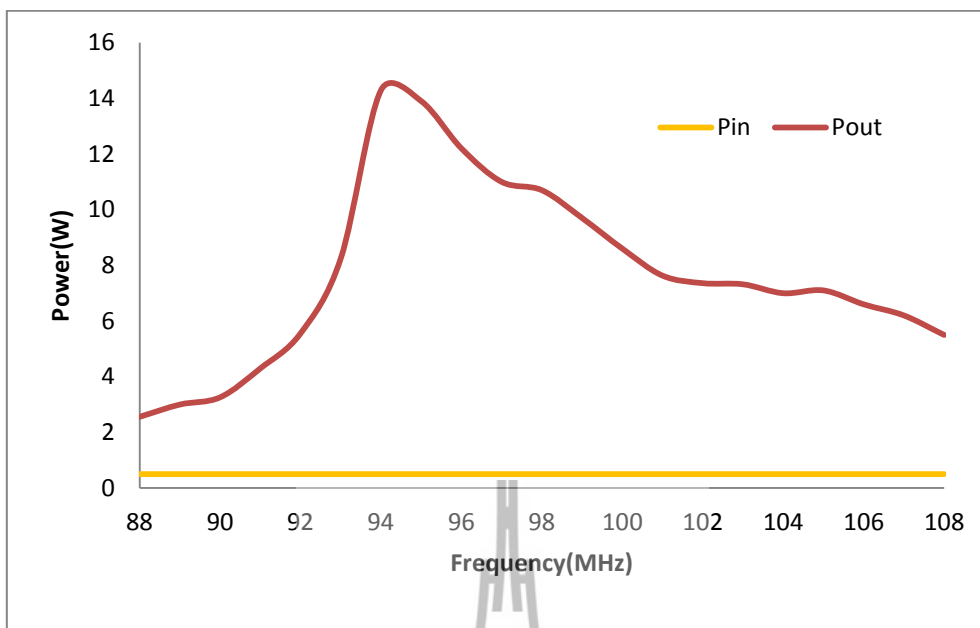
จากผลการทดลองสามารถนำค่ากำลังสัญญาณของอินพุตและเอาต์พุตที่ได้มาคำนวณหาอัตราขยายสัญญาณได้จากสมการที่ 2.4 ทำให้ได้อัตราขยายสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.5 แสดงอัตราขยายเอาต์พุตตลอดย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยผลที่ได้อัตราขยายของวงจรโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 8.44 dB อัตราขยายของวงจรสูงสุดที่ประมาณ 11.55 dB ที่ความถี่ 94 เมกะเฮิร์ตซ์ และอัตราขยายของวงจรต่ำสุดที่ประมาณ 4.08 dB ที่ความถี่ 88 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อแวนอนเป็นย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ และแนวตั้งเป็นอัตราขยายเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณและสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรขยายสัญญาณได้จากสมการที่ 2.6 ผลที่ได้จากการคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรแสดงดังรูปที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพตลอดย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยพบว่า ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยประมาณ 28.25% ประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรที่ประมาณ 48.64% ที่ความถี่ 94 เมกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายสัญญาณของเอาต์พุตและความถี่ของวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 1



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความถี่ของวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 1

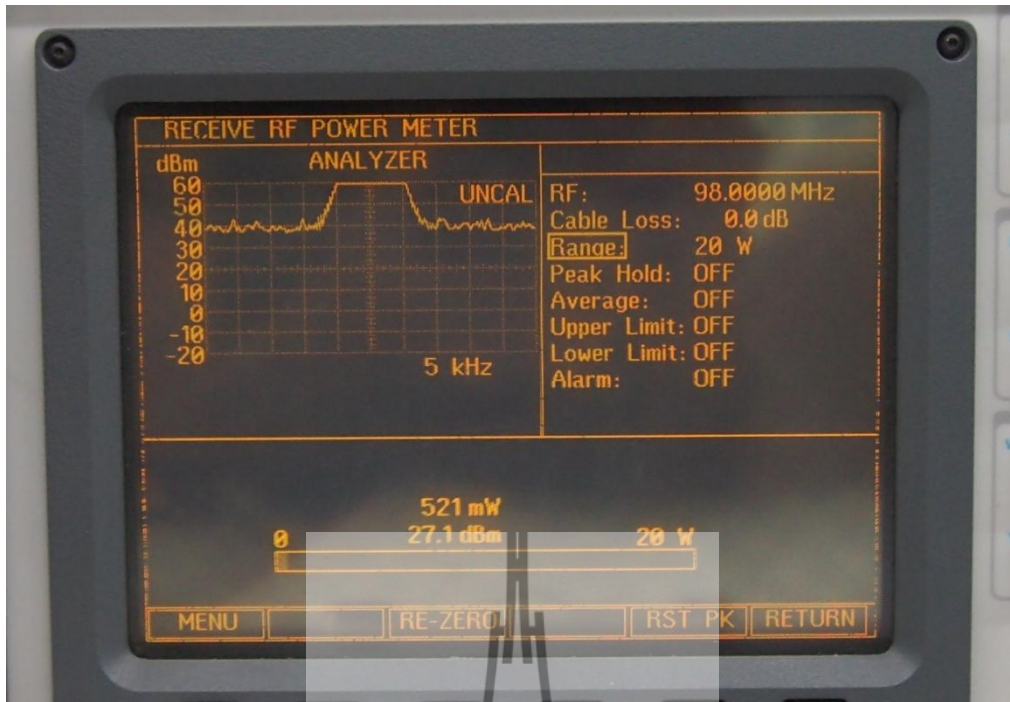


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณและความถี่ของสัญญาณอินพุต และเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 1

จากกราฟเป็นการเปรียบเทียบกำลังสัญญาณของอินพุตและเอาต์พุต ตลอดย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยการป้อนกำลังสัญญาณอินพุตที่มีขนาดเท่ากับ 0.5 วัตต์ ตลอดย่านความถี่ จะเห็นว่า ที่ความถี่ 94 เมกะเฮิร์ตซ์ พบว่ากำลังสัญญาณเอาต์พุตมีค่าสูงสุด ประมาณ 14 วัตต์

#### 4.2.2 วงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 2

สำหรับผลการทดลองการวัดสัญญาณของวงจรขยายสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นผลการวัดสัญญาณอินพุตวัดโดยใช้เครื่อง Service Monitor เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรแรงดันขาเดรน เท่ากับ 20 โวลต์ และ แรงดันขาเกน เท่ากับ 3 โวลต์ โดยกำลังอินพุตที่วัดได้มีขนาด เท่ากับ 0.5 วัตต์และเมื่อวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรในลักษณะเดียวกันแสดงดังรูปที่ 4.9 จะได้กำลังสัญญาณเอาต์พุตมีค่า ประมาณ 10 วัตต์ ซึ่งลักษณะของสัญญาณเป็นการวัดเพื่อทดสอบถึงสัญญาณความถี่ของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจร

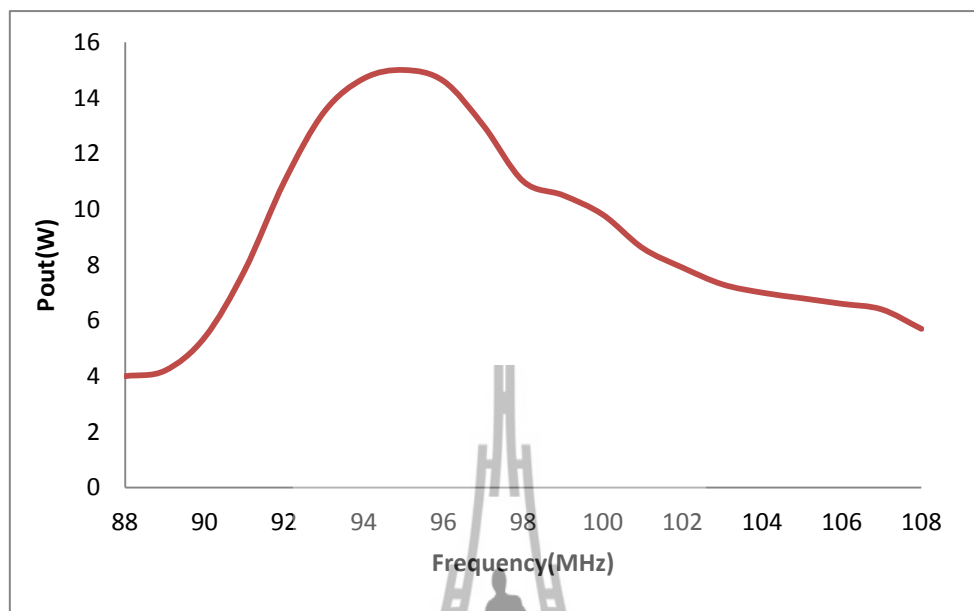


รูปที่ 4.8 สัญญาณอินพุตวางจรรยาขยายสัญญาณ ชุดที่ 2 ที่ความถี่ 98 เมกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.9 สัญญาณเอาต์พุตวางจรรยาขยายสัญญาณ ชุดที่ 2 ที่ความถี่ 98 เมกะเฮิร์ตซ์

สำหรับการวัดกำลังเอาต์พุต สามารถนำพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์และ  
คำนวณหาค่าอัตราขยาย และประสิทธิภาพ ได้จากสมการในบทที่ 2 ได้ดังนี้

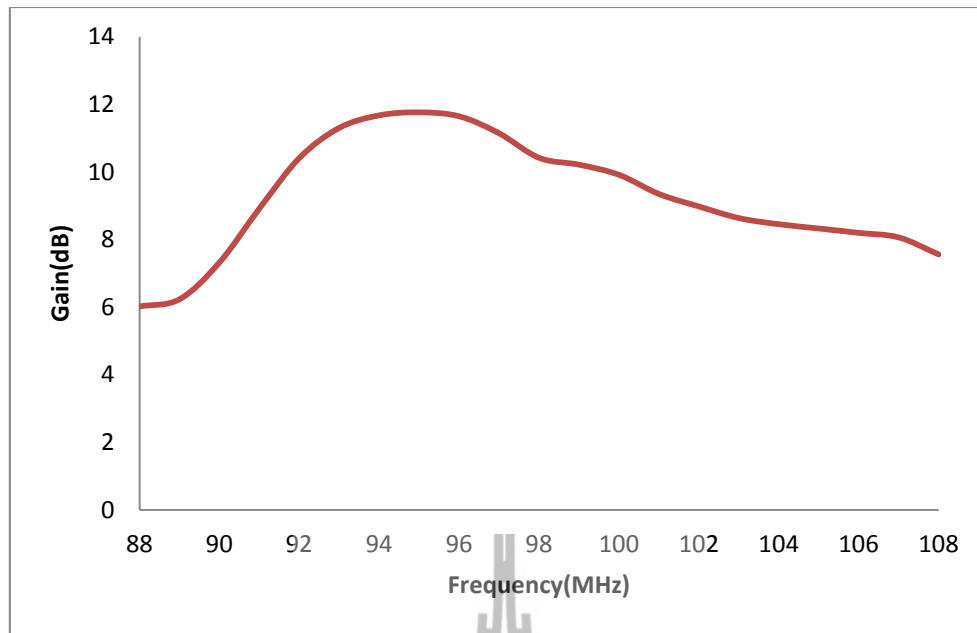


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณของเอาต์พุตและความถี่  
ของวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 2

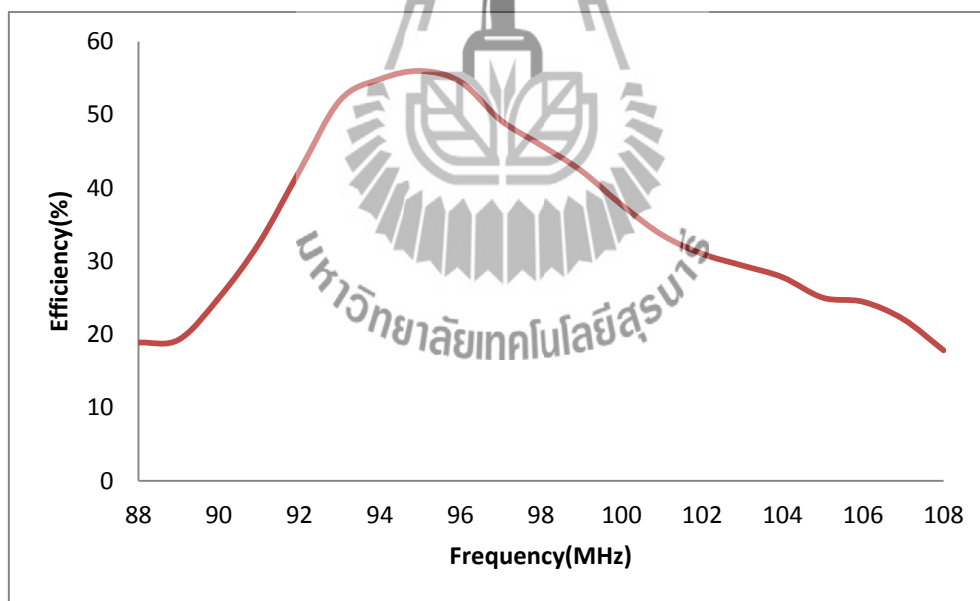
จากการวัดกำลังเอาต์พุตของวงจร โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.10 เป็นกราฟแสดง  
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณเอาต์พุตในย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ ของวงจรขยายสัญญาณ  
ชุดที่ 2 เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตที่มีขนาดเท่ากับ 0.5 วัตต์ จากกราฟจะเห็นกำลังสัญญาณของเอาต์พุต  
โดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 9.08 วัตต์ โดยมีกำลังสัญญาณสูงสุดที่ 14.7 วัตต์ ความถี่ 94 เมกะเฮิร์ตซ์ และ  
กำลังต่ำสุดอยู่ที่ 4 วัตต์ ความถี่ 88 เมกะเฮิร์ตซ์

จากผลการทดลองสามารถนำค่ากำลังสัญญาณของอินพุตและเอาต์พุตที่ได้มา  
คำนวณหาอัตราขยายสัญญาณได้จากสมการที่ 2.4 ทำให้ได้อัตราขยายสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.11  
แสดงอัตราขยายเอาต์พุตตลอดย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยผลที่ได้อัตราขยายของวงจรโดย  
เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 9.26 dB อัตราขยายของวงจรสูงสุดที่ประมาณ 11.76 dB ที่ความถี่ 94 เมกะเฮิร์ตซ์  
และอัตราขยายของวงจรต่ำสุดที่ประมาณ 6.02 dB ที่ความถี่ 88 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อแวนอนเป็นย่าน  
ความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ และแนวตั้งเป็นอัตราขยายเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณและสามารถ  
คำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรขยายสัญญาณได้จากสมการที่ 2.6 ผลที่ได้จากการคำนวณหา  
ประสิทธิภาพของวงจรแสดงดังรูปที่ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพตลอดย่านความถี่ 88-  
108 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยพบว่า ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยประมาณ 35.30% ประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรที่  
ประมาณ 55% ที่ความถี่ 94

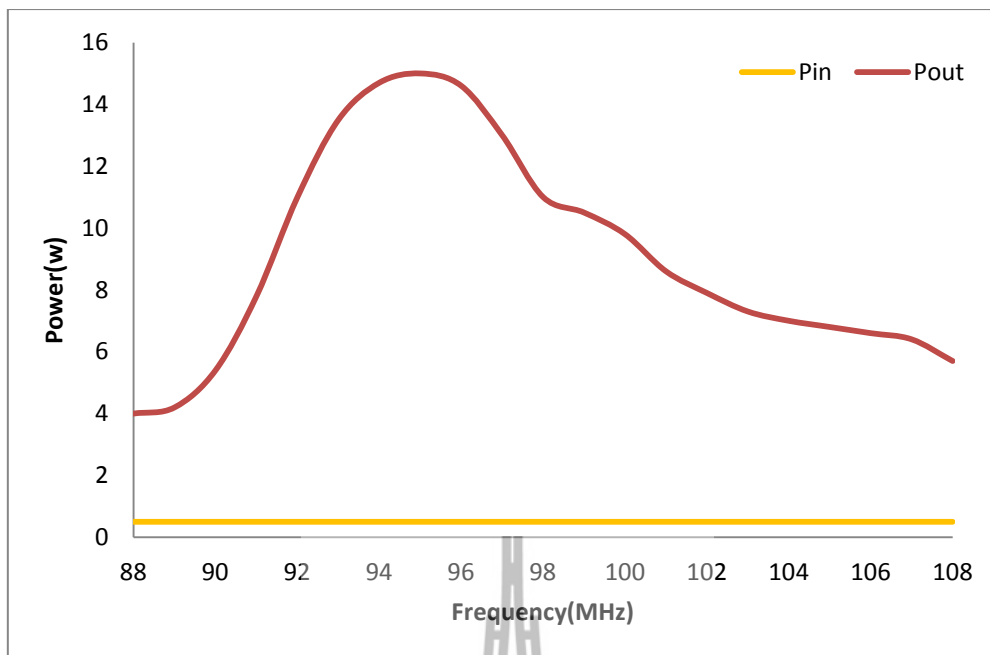




รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายสัญญาณของเอาต์พุตและความถี่ของวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 2



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความถี่ ของวงจรขยายสัญญาณ ชุดที่ 2



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณและความถี่ของสัญญาณอินพุต และเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณชุดที่ 2

จากกราฟเป็นการเปรียบเทียบกำลังสัญญาณของอินพุตและเอาต์พุต ตลอดย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยการป้อนกำลังสัญญาณอินพุต 0.5 วัตต์ ตลอดย่านความถี่ จะเห็นว่า ที่ความถี่ 94 เมกะเฮิร์ตซ์ พบว่ากำลังสัญญาณเอาต์พุตมีค่าสูงสุดประมาณ 14 วัตต์

#### 4.3 การทดลองวงจรแยกสัญญาณ

การวัดผลวงจรแยกสัญญาณวัดสัญญาณอินพุตเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาต์พุต ที่ความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ เพื่อดูกำลังงานที่แยกสัญญาณออกไป สำหรับภาควงจรนี้ได้ทำการทดลองวัดค่ากำลังสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งในรูปที่ 4.14 แสดงลักษณะการวัดผลของวงจรแยกสัญญาณ ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องกำเนิดสัญญาณ จ่ายสัญญาณอินพุตที่มีขนาดเท่ากับ 0 dBm ให้กับวงจรแยกสัญญาณจากนั้น เชื่อมต่อเอาต์พุตของวงจรแยกสัญญาณกับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมที่มีค่าการลดทอนเท่ากับ -30 dBm สำหรับแสดงผลการทดลอง

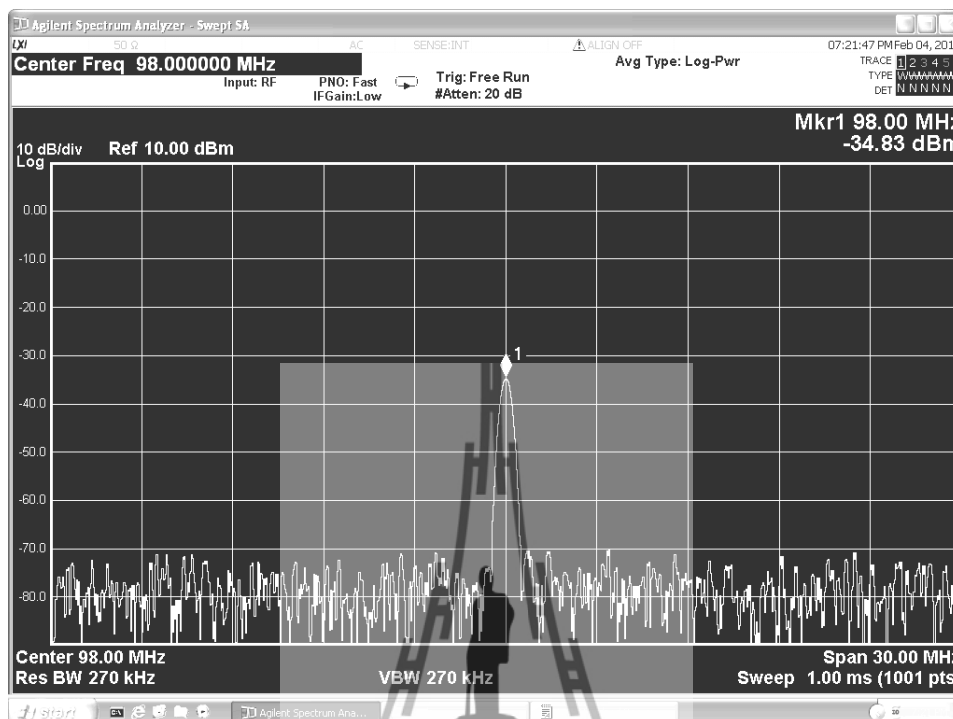


รูปที่ 4.14 ลักษณะการวัดผลของวงจรแยกสัญญาณ

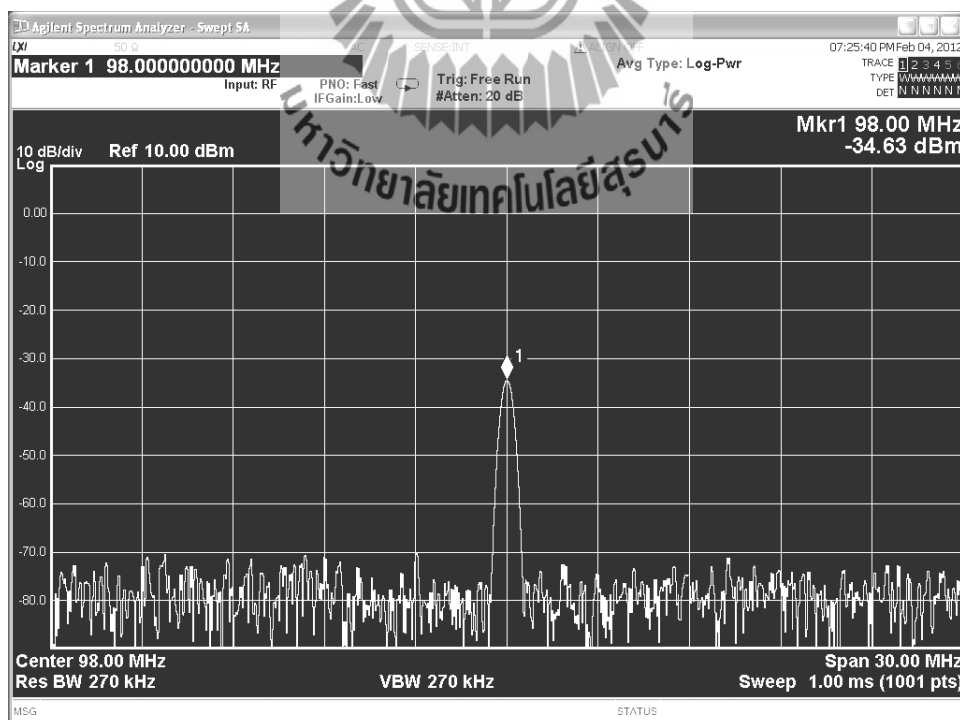
ซึ่งในรูปที่ 4.15 เป็นสัญญาณเอาต์พุตทางพอร์ตที่ 2 ที่ความถี่กลาง 98 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยสัญญาณเอาต์พุตของวงจรแยกสัญญาณมีค่าอยู่ที่ประมาณ  $-34.83$  dBm และเมื่อวัดสัญญาณอินพุตของวงจรแยกสัญญาณจะมีขนาดเท่ากับ  $-30$  dBm (ค่าการลดทอน  $30$  dBm และสัญญาณอินพุต  $0$  dBm) จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต ในรูปที่ 4.16 เป็นสัญญาณเอาต์พุตทางพอร์ตที่ 3 ที่ความถี่กลาง 98 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยสัญญาณเอาต์พุตของวงจรแยกสัญญาณมีค่าอยู่ที่ประมาณ  $-34.63$  dBm

จากการวัดผลกำลังสัญญาณอินพุตเปรียบเทียบกับกำลังสัญญาณเอาต์พุตของวงจรแยกสัญญาณตลอดย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยป้อนสัญญาณอินพุตที่มีขนาดเท่ากับ 1 มิลลิวัตต์ จากนั้นทำการวัดกำลังสัญญาณเอาต์พุตของวงจรแยกสัญญาณทั้ง 2 พอร์ต ซึ่งรูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณและความถี่ ของพอร์ตที่ 2 จะเห็นว่ากำลังสัญญาณเอาต์พุตเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.35 มิลลิวัตต์ มีกำลังสัญญาณเอาต์พุตสูงสุดที่ประมาณ 0.4 มิลลิวัตต์ ที่ความถี่ 88 เมกะเฮิร์ตซ์ และกำลังสัญญาณเอาต์พุตต่ำสุดที่ประมาณ 0.31 มิลลิวัตต์ ที่ความถี่ 100.50 เมกะเฮิร์ตซ์ และรูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณและความถี่ ของพอร์ตที่ 3 จะเห็นว่ากำลังสัญญาณเอาต์พุตเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.34 มิลลิวัตต์ มีกำลังสัญญาณเอาต์พุตสูงสุดที่ประมาณ 0.4 มิลลิวัตต์ ที่ความถี่ 88 เมกะเฮิร์ตซ์ และกำลังสัญญาณเอาต์พุตต่ำสุดที่ประมาณ 0.31 มิลลิวัตต์ ที่ความถี่ 99.50 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งจากการวัดกำลังสัญญาณเอาต์พุตของทั้ง 2 พอร์ต จะเห็นว่า กำลังสัญญาณ

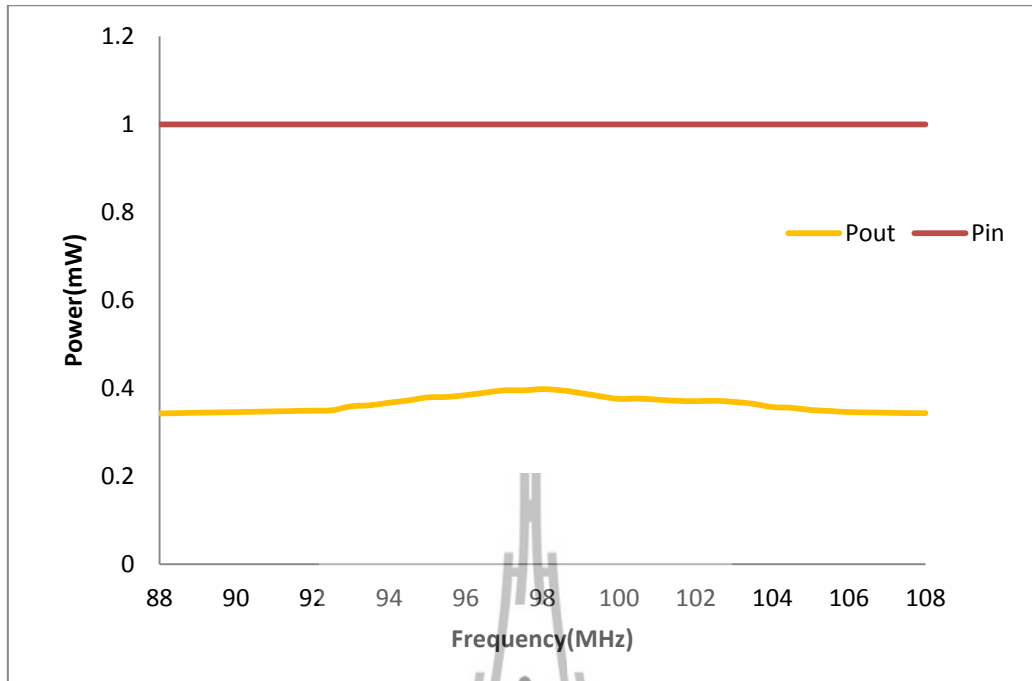
เอาที่พูดในแต่ละพอร์ตของวงจรแยกสัญญาณจะมีค่าลดคลกรึ่งหนึ่งจากกำลังสัญญาณอินพุตที่เข้ามา โดยอาจจะมีการสูญเสียในสายส่งบ้างเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตาม ก็ยังเป็นไปตามทฤษฎีการแยกสัญญาณ



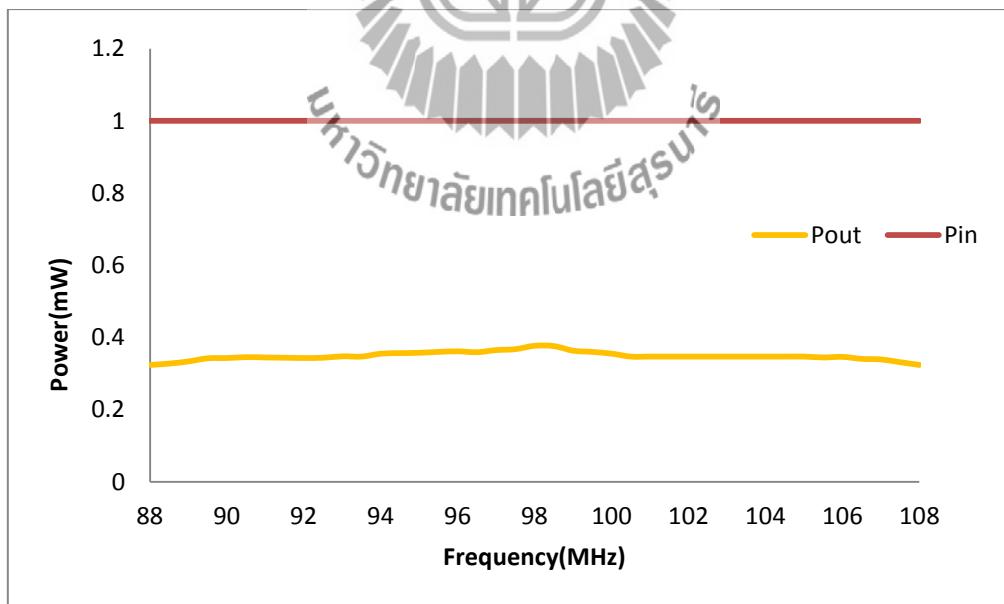
รูปที่ 4.15 สัญญาณเอาที่พูดของวงจรแยกสัญญาณทางพอร์ตที่ 2 ที่ความถี่กลาง 98 เมกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.16 สัญญาณเอาที่พูดของวงจรแยกสัญญาณทางพอร์ตที่ 3 ที่ความถี่กลาง 98 เมกะเฮิร์ตซ์



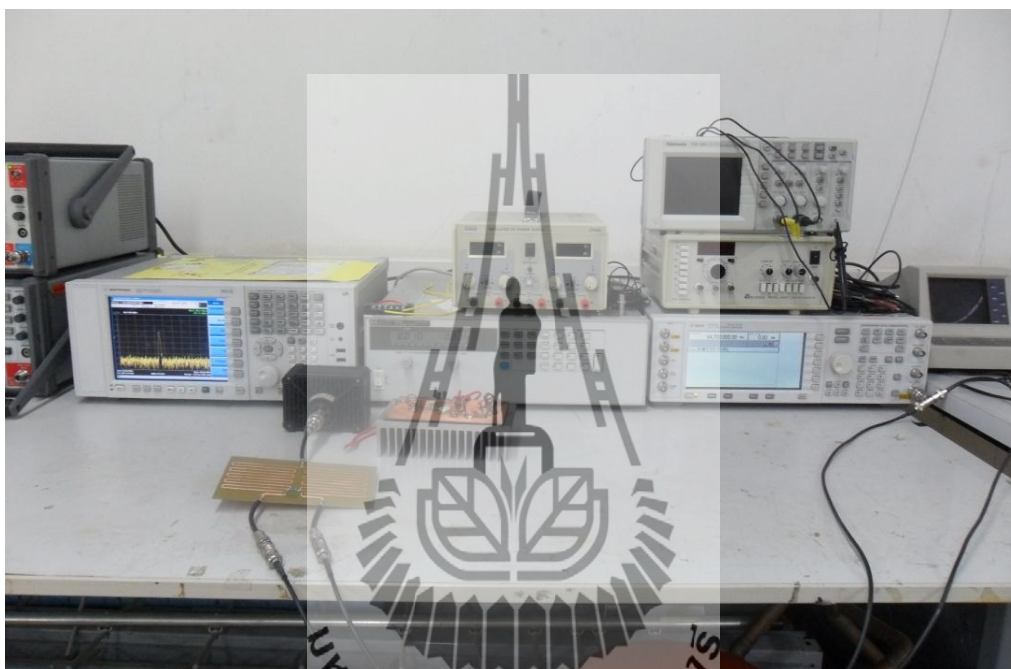
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณและความถี่ ของวงจรแยกสัญญาณพอร์ตที่ 2



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณและความถี่ ของวงจรแยกสัญญาณพอร์ตที่ 3

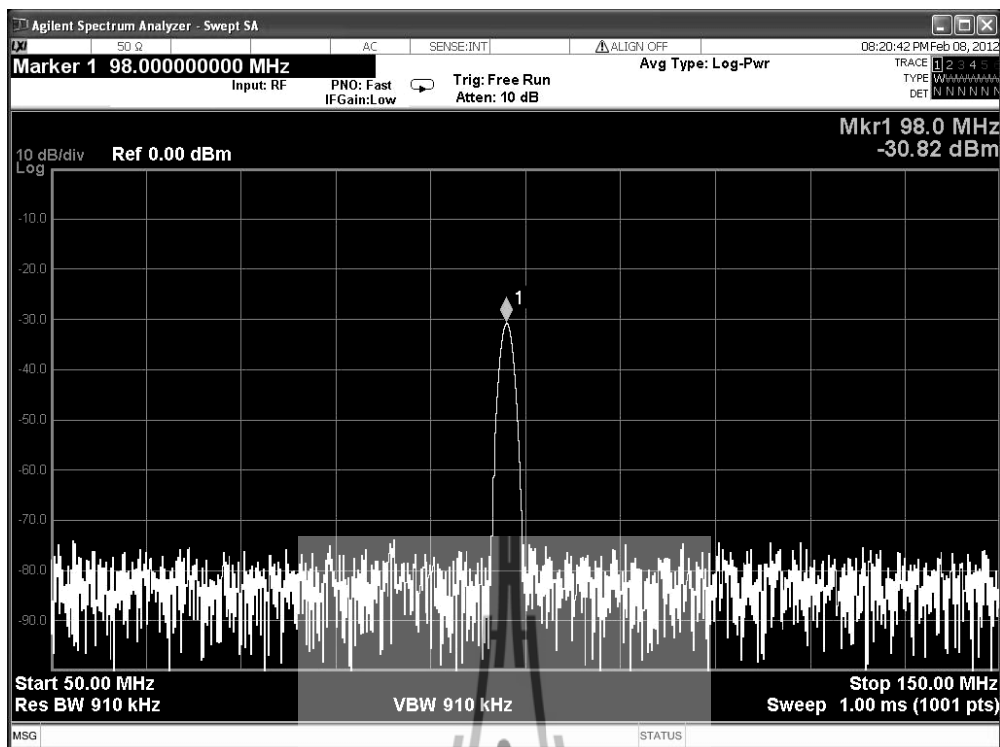
#### 4.4 การทดลองวงจรรวมสัญญาณ

การวัดผลวงจรรวมสัญญาณวัดสัญญาณอินพุตเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาต์พุต ที่ความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ เพื่อดูกำลังงานที่ได้จากการรวมสัญญาณ สำหรับภาควงจรนี้ได้ทำการทดลองวัดค่าสัญญาณอินพุต สัญญาณเอาต์พุต และกำลังสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งในรูปที่ 4.19 แสดงลักษณะการวัดผลของวงจรรวมสัญญาณ ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ จ่ายสัญญาณอินพุตให้กับทั้ง 2 พอร์ตที่มีขนาดเท่ากับ 0 dBm จากนั้นเชื่อมต่อเอาต์พุตของวงจรรวมสัญญาณกับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมที่มีค่าการลดทอนเท่ากับ 30 dBm สำหรับแสดงผลการทดลอง



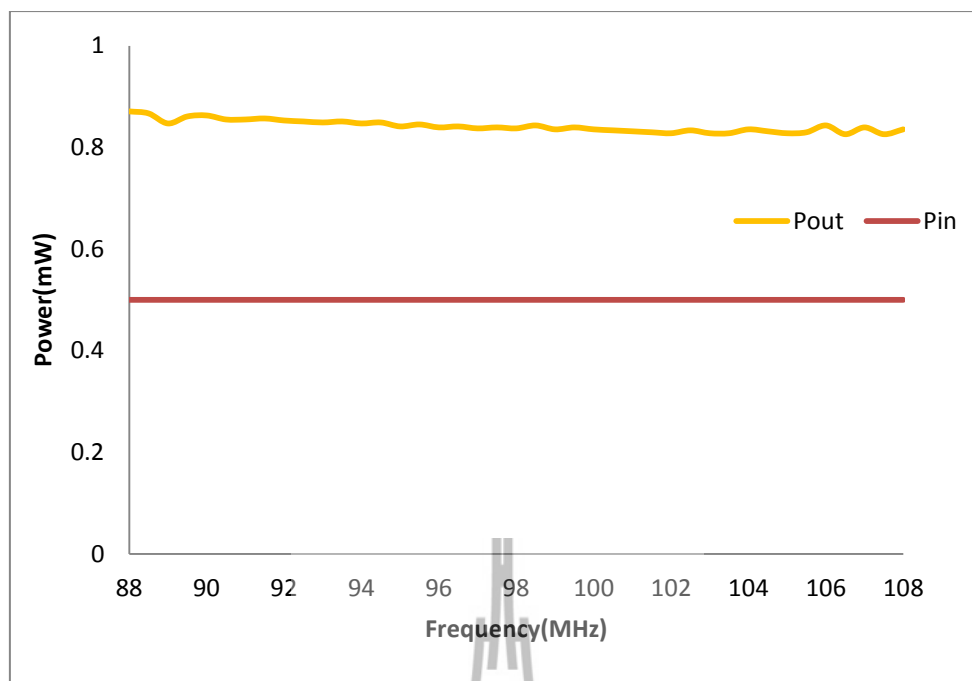
รูปที่ 4.19 ลักษณะการวัดผลของวงจรรวมสัญญาณ

ซึ่งในรูปที่ 4.20 เป็นสัญญาณเอาต์พุต ที่ความถี่กลาง 98 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรวมสัญญาณมีค่าอยู่ที่ประมาณ -30.82 dBm และเมื่อวัดสัญญาณอินพุตของวงจรรวมสัญญาณจะมีขนาดเท่ากับ -30 dBm (ค่าการลดทอน 30 dBm และสัญญาณอินพุต 0 dBm) จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต เนื่องจากอาจเกิดการสูญเสียในสายส่ง



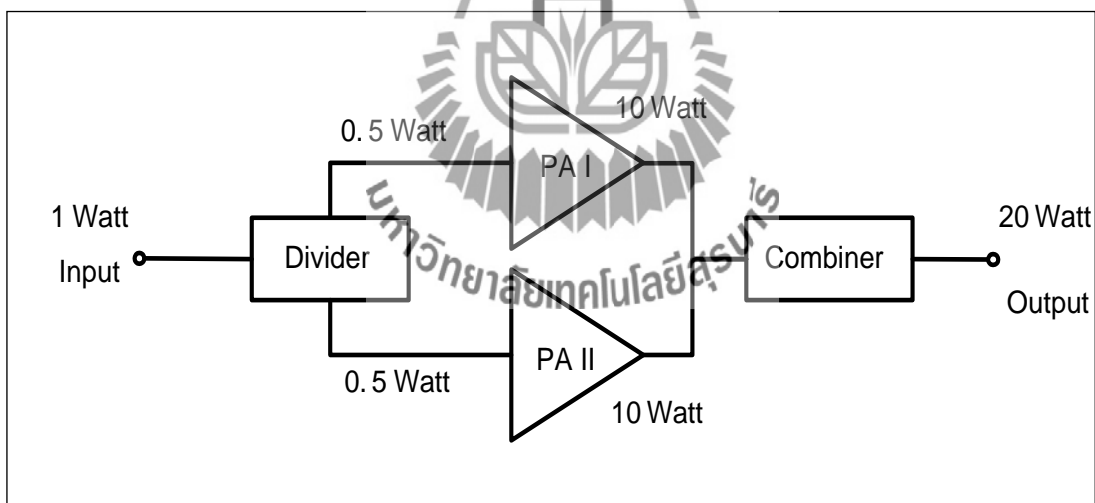
รูปที่ 4.20 สัญญาณเอาต์พุตของรวมสัญญาณที่ความถี่กลาง 98 เมกะเฮิร์ตซ์

จากการวัดผลกำลังสัญญาณอินพุตเปรียบเทียบกับกำลังสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรวมสัญญาณตลอดย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยป้อนสัญญาณอินพุตให้แต่ละพอร์ตที่มีขนาดเท่ากับ 0.5 มิลลิวัตต์ จากนั้นทำการวัดกำลังสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรวมสัญญาณ ซึ่งรูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณและความถี่ จะเห็นว่ากำลังสัญญาณเอาต์พุตเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.84 มิลลิวัตต์ มีกำลังสัญญาณเอาต์พุตสูงสุดที่ประมาณ 0.87 มิลลิวัตต์ ที่ความถี่ 88 เมกะเฮิร์ตซ์ และกำลังสัญญาณเอาต์พุตต่ำสุดที่ประมาณ 0.82 มิลลิวัตต์ ที่ความถี่ 102 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งจากการวัดกำลังสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นหนึ่งเท่าตัวของสัญญาณอินพุตที่เข้ามาเป็นไปตามทฤษฎีการรวมสัญญาณ



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเอาต์พุตและความถี่ของวงจรรวมสัญญาณ

#### 4.5 การทดลองวงจรรวมเครื่องขยายสัญญาณความถี่วิทยุ



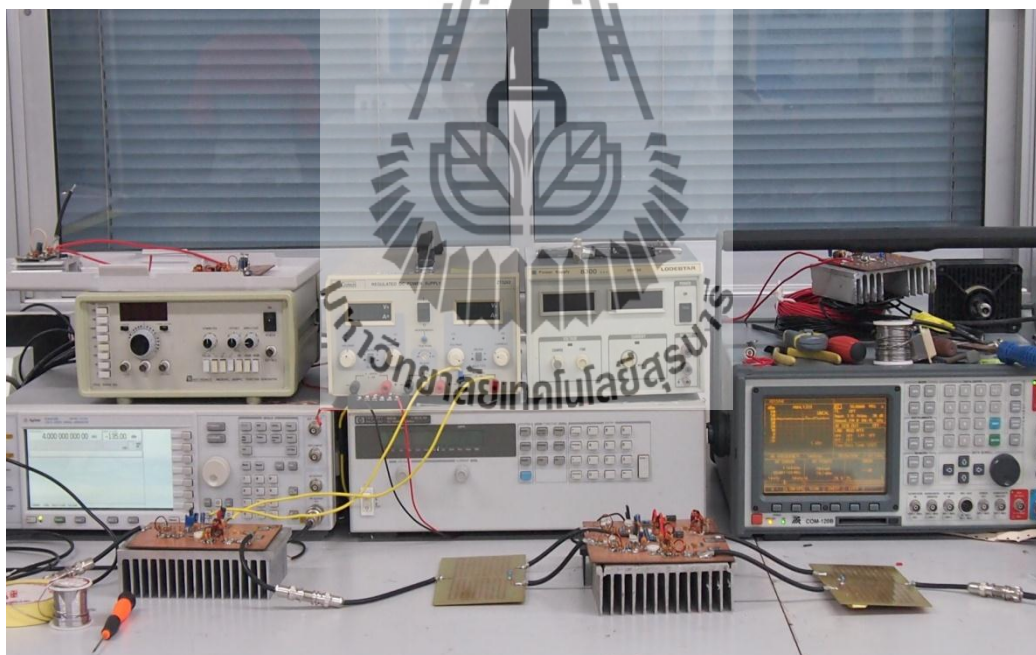
รูปที่ 4.22 โครงสร้างการออกแบบวงจรขยายสัญญาณความถี่วิทยุ

การวัดผลวงจรเครื่องขยายสัญญาณความถี่วิทยุ วัดกำลังงานทั้งหมดของวงจรซึ่งประกอบด้วย ภาควงจรแยกสัญญาณ ภาควงจรขยายสัญญาณ 2 ชุดและภาควงจรรวมสัญญาณ ซึ่งลักษณะการวัดผลของวงจรรวมเครื่องขยายสัญญาณความถี่วิทยุแสดงดังรูป 4.23 โดยหลักการทำงานจะเป็นดังนี้ ในส่วนแรกเป็นวงจรแยกสัญญาณเพื่อแยกเป็น 2 สัญญาณ โดยรับสัญญาณมาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ จากนั้นเอาต์พุตที่ได้จากวงจรแยกสัญญาณจะเป็นอินพุตของวงจรขยายสัญญาณทั้ง 2 ชุด หลังจาก

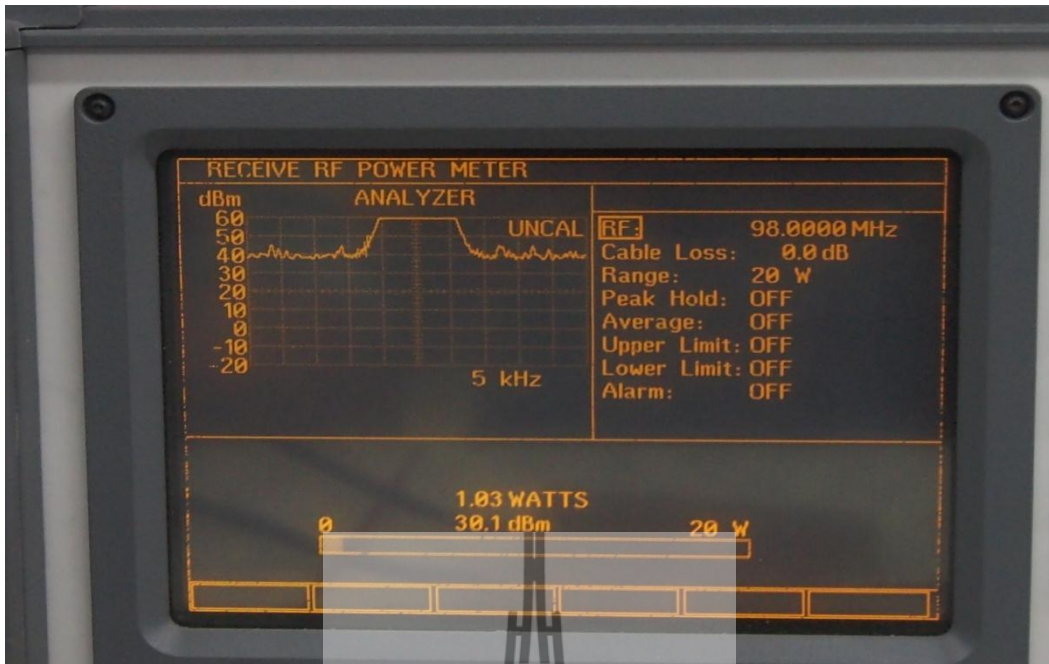


วงจรรขยายสัญญาณแล้วกำลังงานทั้งหมดจะรวมสัญญาณที่ภาควงจรรวมสัญญาณ และเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม สำหรับแสดงผลการทดลอง โดยวงจรรขยายสัญญาณ จะกำหนดไบอัสแรงดันไฟฟ้าขาเดรน เท่ากับ 20 โวลต์ และแรงดันไฟฟ้าขาเกตเท่ากับ 3 โวลต์ ซึ่งได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 ซึ่งได้ทำการทดลองวัดผลกำลังสัญญาณด้านอินพุตและกำลังสัญญาณด้านเอาต์พุต ตลอดย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ถึงอัตราขยายและประสิทธิภาพของวงจรรวมขยายสัญญาณความถี่วิทยุต่อไป

สำหรับผลการทดลองการวัดสัญญาณของวงจรรวมเครื่องขยายสัญญาณความถี่วิทยุแสดงดังรูปที่ 4.24 ซึ่งเป็นผลการวัดสัญญาณอินพุตวัดโดยใช้เครื่อง Service Monitor เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรรวมแรงดันขาเดรน เท่ากับ 20 โวลต์ และ แรงดันขาเกต เท่ากับ 3 โวลต์ โดยกำลังอินพุตที่วัดได้มีขนาด เท่ากับ 1 วัตต์และเมื่อวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรวมในลักษณะเดียวกันแสดงดังรูปที่ 4.25 จะได้กำลังสัญญาณเอาต์พุตมีค่า เท่ากับ 18 วัตต์ ซึ่งลักษณะของสัญญาณเป็นการวัดเพื่อทดสอบถึงสัญญาณความถี่ของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต ในการทดลองนี้ใช้ความถี่ เท่ากับ 98 เมกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.23 ลักษณะการวัดผลของวงจรรวมขยายสัญญาณความถี่วิทยุ

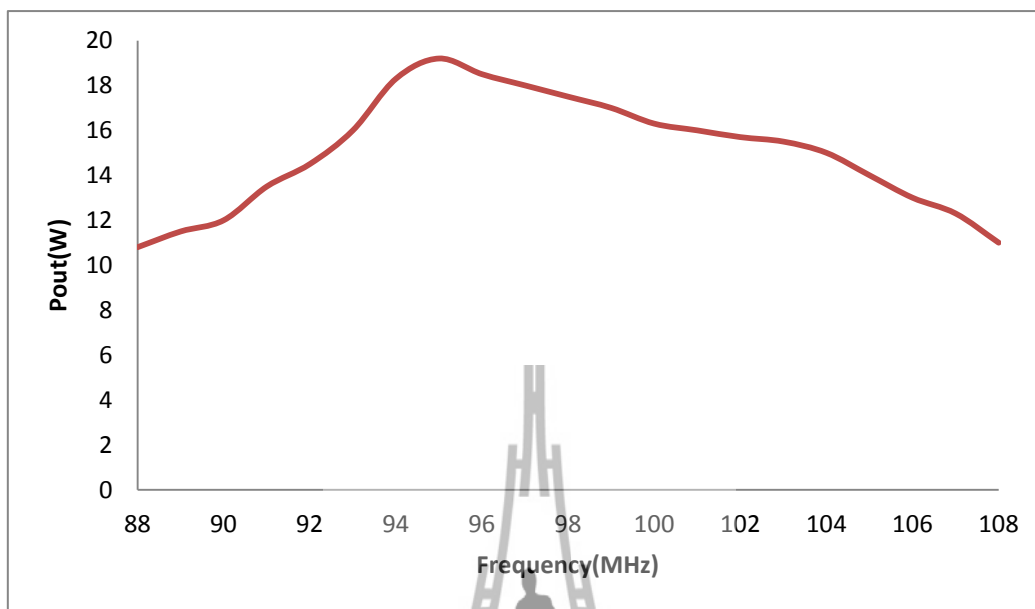


รูปที่ 4.24 สัญญาณอินพุตวางจรรวมขยายสัญญาณความถี่วิทยุ ที่ความถี่ 98 เมกะเฮิรตซ์



รูปที่ 4.25 สัญญาณเอาต์พุตวางจรรวมขยายสัญญาณความถี่วิทยุ ที่ความถี่ 98 เมกะเฮิรตซ์

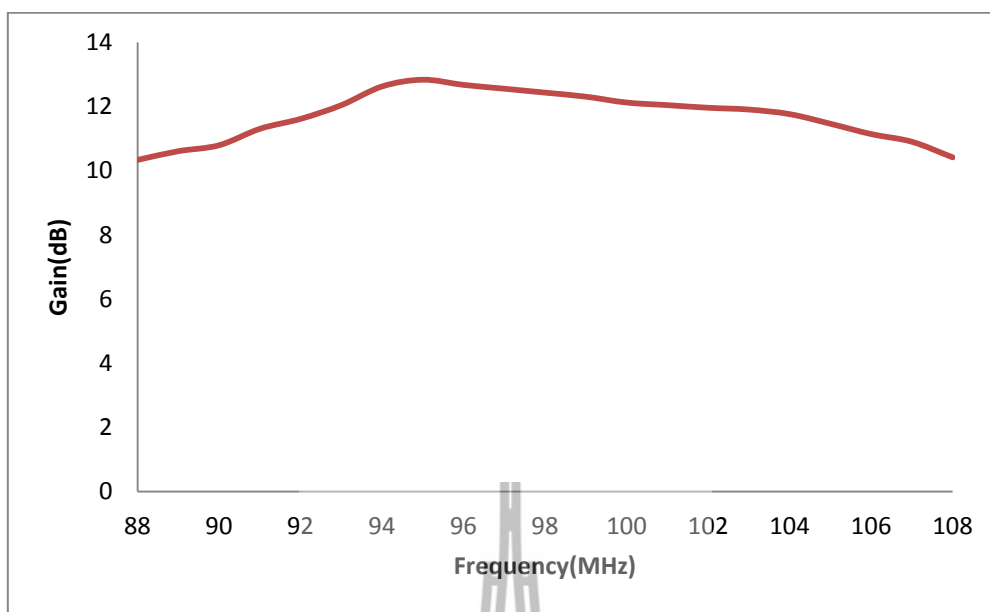
สำหรับการวัดกำลังเอาต์พุต สามารถนำพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์และคำนวณหาค่าอัตราขยาย และประสิทธิภาพ ได้จากสมการในบทที่ 2 ได้ดังนี้



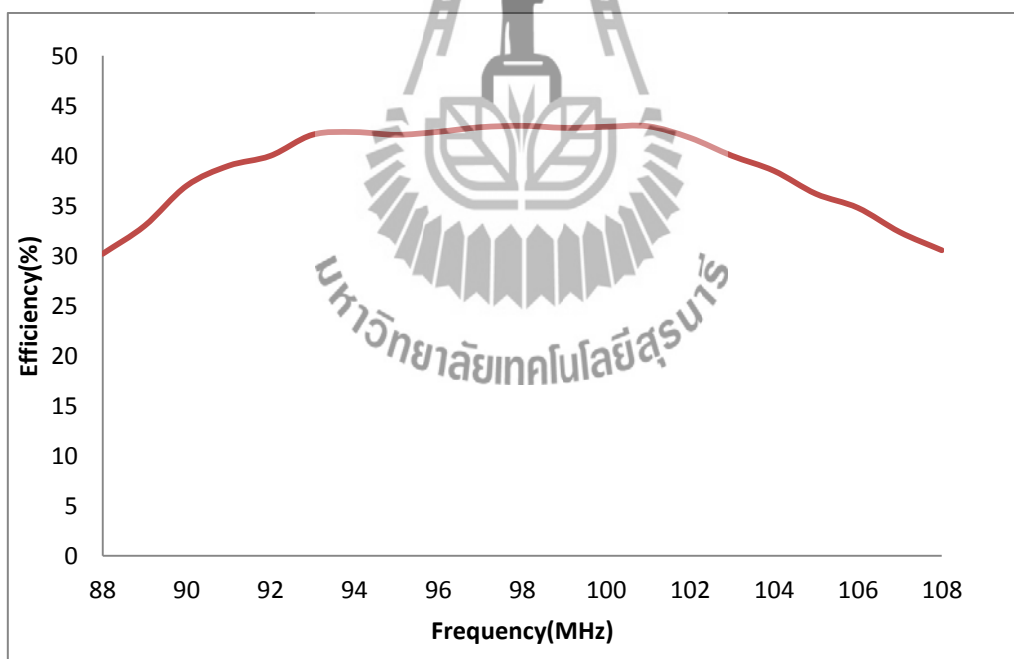
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณของเอาต์พุตและความถี่ของวงจรรวมขยายสัญญาณความถี่วิทยุ

จากการวัดกำลังสัญญาณเอาต์พุตของวงจรโดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.26 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณเอาต์พุตตลอดย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ ของวงจรรวมขยายสัญญาณความถี่วิทยุ เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตที่มีขนาดเท่ากับ 1 วัตต์ จากกราฟจะเห็นกำลังสัญญาณเอาต์พุตโดยเฉลี่ยที่ประมาณ 15 วัตต์ โดยมีกำลังสัญญาณเอาต์พุตสูงสุดของวงจรที่ประมาณ 19 วัตต์ ที่ความถี่ 95 เมกะเฮิร์ตซ์ และกำลังสัญญาณเอาต์พุตต่ำสุดของวงจรที่ประมาณ 10 วัตต์ ที่ความถี่ 88 เมกะเฮิร์ตซ์

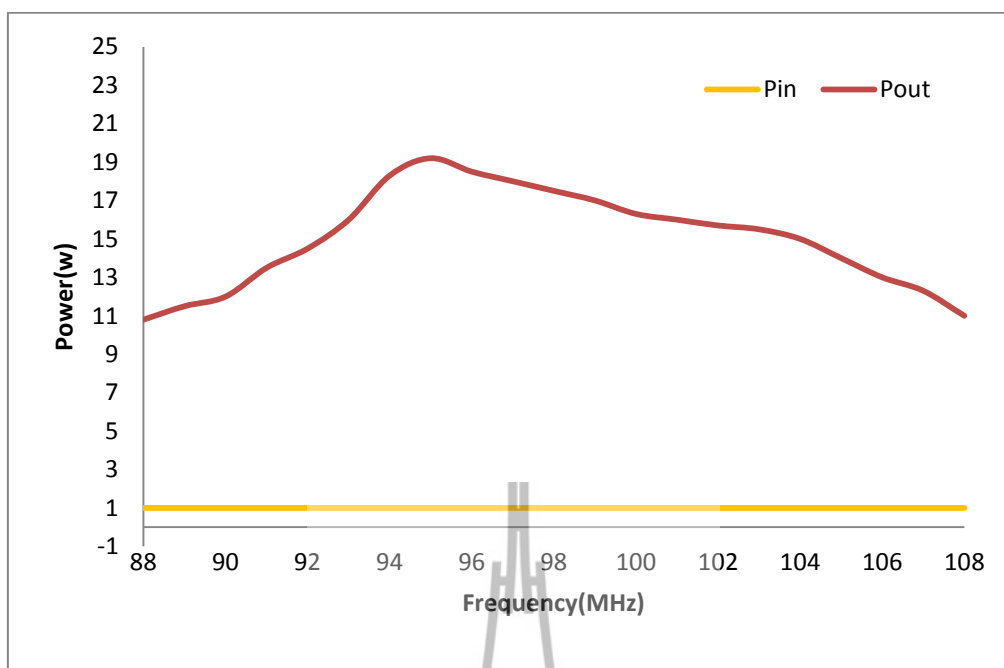
จากผลการทดลองสามารถนำค่ากำลังสัญญาณของอินพุตและเอาต์พุตที่ได้มาคำนวณหาอัตราขยายสัญญาณได้จากสมการที่ 2.4 ทำให้ได้อัตราขยายสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.27 แสดงอัตราขยายตลอดย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยผลที่ได้อัตราขยายของวงจรโดยเฉลี่ยที่ประมาณ 11.70 dB อัตราขยายสูงสุดของวงจรที่ประมาณ 12.83 dB ที่ความถี่ 95 เมกะเฮิร์ตซ์ และอัตราขยายต่ำสุดของวงจรที่ประมาณ 10.33 dB ที่ความถี่ 88 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อแวนอนเป็นย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ และแนวตั้งเป็นอัตราขยายของวงจรรวมขยายสัญญาณความถี่วิทยุและสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรรวมขยายสัญญาณได้จากสมการที่ 2.6 ผลที่ได้จากการคำนวณหาประสิทธิภาพสัญญาณเอาต์พุตของวงจรแสดงดังรูปที่ 4.28 ซึ่งเป็นผลตลอดย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยพบว่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยที่ประมาณ 37.27% ประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรที่ประมาณ 44.65% ที่ความถี่ 95 เมกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายสัญญาณของเอาต์พุตและความถี่ของวงจรรวมขยายสัญญาณความถี่วิทยุ



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความถี่ของวงจรรวมขยายสัญญาณความถี่วิทยุ



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสัญญาณและความถี่ของวงจรรวมขยายสัญญาณความถี่วิทยุ

จากกราฟรูปที่ 4.29 เป็นการเปรียบเทียบกำลังสัญญาณของอินพุตและเอาต์พุต ตลอดย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยการป้อนกำลังสัญญาณอินพุตที่มีขนาดเท่ากับ 1 วัตต์ โดยที่วงจรรวมขยายสัญญาณกำลังสูงชุดที่ 1 และวงจรรวมขยายสัญญาณกำลังสูงชุดที่ 2 มีสัญญาณอินพุตชุดละ 1 วัตต์ ซึ่งตลอดย่านความถี่จะพบว่ากำลังสัญญาณเอาต์พุตมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 19 วัตต์ ความถี่ 95 เมกะเฮิร์ตซ์

#### 4.6 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอการวัดและผลของการทดลองของวงจรรวมขยายสัญญาณย่านความถี่วิทยุ โดยได้วัดสัญญาณและกำลังงานของภาควจรต่างๆ ซึ่งผลการวัดภาควจรขยายสัญญาณชุดที่ 1 จะมีกำลังงานสูงสุดประมาณ 14.3 วัตต์ อัตราขยายสัญญาณสูงสุดประมาณ 11.55 dB และประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรถ่ายเท่ากับ 48.64% ผลการวัดภาควจรขยายสัญญาณชุดที่ 2 จะมีกำลังงานสูงสุดประมาณ 14.7 วัตต์ อัตราขยายสัญญาณสูงสุดประมาณ 11.67 dB ประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรถ่ายเท่ากับ 54.85% ภาควจรรวมเครื่องขยายสัญญาณความถี่วิทยุ จะมีกำลังงานสูงสุดประมาณ 19 วัตต์ มีอัตราขยายสัญญาณสูงสุดประมาณ 12.83 dB ประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรถ่ายเท่ากับ 44.65% จากผลการวัดวงจรรวมพบว่าการสูญเสียที่อาจเกิดจากสัญญาณอินพุตที่เข้ามา การสูญเสียจากสายส่งเพียงเล็กน้อย ซึ่งโดยรวมแล้วค่าของกำลังงานสัญญาณเอาต์พุตมีค่าใกล้เคียงตามที่ได้ออกแบบไว้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 กล่าวนำ

ในเนื้อหาของบทนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการทำวงจรขยายสัญญาณเครื่องส่งวิทยุ ทั้งในการวิเคราะห์ การออกแบบ ตลอดจนการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผลของการวัดผลวงจรต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วย วงจรขยายสัญญาณ วงจรแยกสัญญาณ และวงจรรวมสัญญาณ ซึ่งทำให้ได้เรียนรู้และมีประสบการณ์ในการทำงานเป็นอย่างดี

#### 5.2 สรุปผลการทดลอง

การวิจัยเริ่มจากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับวงจรขยายสัญญาณเครื่องส่งวิทยุ ที่ย่านความถี่ 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ ปรับจูนที่ความถี่กลาง 98 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยการศึกษาทั้งในทางทฤษฎี การวิเคราะห์ลักษณะของวงจร และการออกแบบ เพื่อสร้างวงจรขยายสัญญาณเครื่องส่ง จากการศึกษาลักษณะของวงจรขยายสัญญาณเครื่องส่งวิทยุจะประกอบไปด้วย วงจรแยกสัญญาณเป็นสองทาง วงจรขยายสัญญาณที่มีกำลังงานเอาต์พุตขนาดประมาณ 10 วัตต์ ทั้งสองชุด และวงจรรวมสัญญาณ

วงจรขยายสัญญาณความถี่ย่าน 88-108 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็นวงจรที่ออกแบบมาเพื่อสามารถปรับจูนในช่วงความถี่ที่ต้องการ จากการทดลองจะเห็นว่าสามารถปรับจูนวงจรขยายสัญญาณที่ความถี่กลาง 98 เมกะเฮิร์ตซ์ เพื่อให้ได้กำลังเอาต์พุต 10 วัตต์ ตามที่กำหนด วงจรขยายสัญญาณนี้สร้างขึ้นเพื่อเป็นวงจรปรีแอมป์ให้กับวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงในเครื่องส่งวิทยุ แต่เลือกใช้ไอซีเบอร์ BLF177 ที่ทนกำลังได้ถึง 150 วัตต์ เพราะการใช้งาน BLF177 ที่กำลังต่ำทำให้สามารถได้เป็นระยะเวลาานาน ไม่ต้องกังวลถึงอุณหภูมิของไอซีและเสื่อมประสิทธิภาพช้าลง

การทดสอบวงจรรวมสัญญาณและวงจรแยกสัญญาณ โดยการนำวงจรแยกสัญญาณเป็นสองทางต่อเข้าด้านอินพุตของวงจรขยายสัญญาณทั้งสองชุด และใช้วงจรรวมสัญญาณเพื่อรวมสัญญาณที่ได้จากวงจรขยายสัญญาณรวมเป็นสัญญาณเดียว ผลการทดลองพบว่าวงจรขยายสามารถทำงานได้ปกติ และการทำงานของวงจรแยกสัญญาณและวงจรขยายสัญญาณก็เป็นไปตามทฤษฎี

จากการวัดผลการทดลองวงจรขยายสัญญาณชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ซึ่งจะพิจารณาที่ความถี่กลาง 98 เมกะเฮิร์ตซ์ พบว่ากำลังงานเอาต์พุตแต่ละชุดมีค่าประมาณ 10 วัตต์ วงจรขยายชุดที่ 1 และ 2 โดยเฉลี่ยประมาณ 48.64% และ 54.85% ตามลำดับ เมื่อวัดผลการทดลองของวงจรรวมเครื่องขยายสัญญาณ ความถี่วิทยุที่ประกอบด้วย วงจรแยกสัญญาณ วงจรขยายสัญญาณ 2 ชุด และวงจรรวมสัญญาณ พบว่ามี

กำลังงานสูงสุดประมาณ 19 วัตต์ อัตราการขยายสัญญาณของวงจรรวมสูงสุดประมาณ 12.83 dB และ ประสิทธิภาพสูงสุดวงจรรวมประมาณ 44.65%

สรุปผลที่ได้จากการทดสอบวงจรขยายสัญญาณเครื่องส่งวิทยุที่ได้จากการออกแบบ มีกำลังงาน อัตราการขยาย และประสิทธิภาพตามที่กำหนด เมื่อนำไปทดสอบสามารถนำไปขยายสัญญาณ มากๆ ได้ เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้และพัฒนาต่อไป

### 5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ภาคแรกการออกแบบวงจรขยายสัญญาณ ควรพิจารณาถึงมอสเฟตที่นำมาใช้งาน ควรใช้ มอสเฟตที่มีการทนแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สูง จากนั้นพิจารณาความเสถียรภาพของวงจร และ เพื่อป้องกันการออสซิลเลตเกิดขึ้น ควรมีวงจรการป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback) ส่วนของตัวต้านทานควรเลือกที่เป็นตัวต้านทานที่มีกำลังวัตต์สูงๆ เนื่องจากจะมีความร้อนเกิดขึ้น ถ้าใช้กำลังวัตต์ที่ต่ำอาจจะเกิดความเสียหายแก่วงจรได้ และภาคที่สองการออกแบบวงจรแยกสัญญาณและวงจรรวม สัญญาณ เป็นการออกแบบด้วยไมโครสตริป ควรพิจารณาถึงลายของไมโครสตริปนั้นควรคำนึงถึงการ กำหนดความยาวของไมโครสตริปและการกัดลายวงจรบนแผ่นพิมพ์ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

### 5.4 แนวทางการพัฒนา

ในการพัฒนาต่อไปของวงจรขยายสัญญาณเครื่องส่งวิทยุ สามารถออกแบบโดยการเพิ่มอัตราการขยายของวงจรขยายสัญญาณให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มกำลังงานของวงจร ออกแบบวงจรขยายและวงจร แมตซ์อิมพีแดนซ์เพื่อให้ได้กำลังงานที่สูงขึ้นอีกได้ หรือสามารถเลือกใช้มอสเฟตที่มีอัตราการขยาย สัญญาณที่สูงขึ้นในการออกแบบ เพื่อทนต่อการใช้งาน สามารถศึกษาวงจรแยกสัญญาณหรือวงจรรวม สัญญาณแบบหลายได้และสามารถนำไปออกแบบให้กับวงจรที่มีกำลังงานสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ งานต่อไปได้

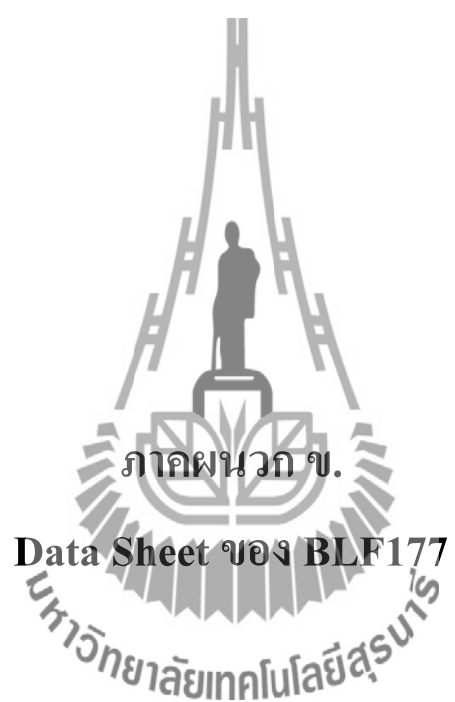
ภาคผนวก ก.  
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ





## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	amplitude
K	=	stability factor
S – parameter	=	scattering parameter
$S_{11}$	=	input reflection coefficient
$S_{12}$	=	reverse transmission coefficient
$S_{21}$	=	forward transmission coefficient
$S_{22}$	=	output transmission coefficient
$\Gamma_L$	=	load – reflection coefficient
$\Gamma_S$	=	source – reflection coefficient
$\Delta$	=	delta factor
MAG	=	maximum available gain
B	=	intermediate quantity
$C_2$	=	load reflection coefficient
$Z_{in}$	=	input impedance
$Z_{out}$	=	output impedance
$Z_S$	=	source impedance
$Z_L$	=	load impedance
$\epsilon_r$	=	relative permittivity
G	=	gain
L	=	loss factor
f	=	frequency
$f_C$	=	center frequency
$\omega$	=	angular frequency
$f_c$	=	cut – off frequency
$\lambda$	=	wavelength
w	=	width of the microstrip line
h	=	high of the microstrip line
PCB	=	printed circuit board



## รายการอ้างอิง

- ดร.ชาญชัย ทองโสภณ. (2549). การออกแบบวงจรคลื่นความถี่วิทยุ.เอกสารประกอบการสอน.  
สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ผศ. เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์. **อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มูลฐาน** เอกสารประกอบการสอน.  
สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- Power Integrity for I/O Interfaces: With Signal Integrity/Power Integrity Co-Design**  
By Vishram S.Pandit;Woong Hwan Ryu;Myoung Joon Choi
- Ludwig, R. Bretchko, P. (2000). **RF Circuit Design Theory and Application**. New Jersey:  
Prentice-Hall.
- Mona M. Hella, Mohammed Ismail. **RF CMOS Power Amplifiers Theory, Design and  
Implementation.**
- C.Bowick. **RF Circuit Design**, Howard W.sams & company,1990
- M. Tse. (2003). **POWER AMPLIFIER DESIGN. High-frequency circuit Deign Elective.**
- Wu, L. Sun, Z. Yilmaz, H. Berroth, M (2006) A **Dual-Frequency Wilkinson Power Divider.**  
IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS,Vol.54 : pp. 278-  
284
- Grebennikov, A. (2004). **RF and Microwave Power Amplifier Design**. New York: McGraw-  
Hill.
- Vishram S. Pandit; Woong Hwan Ryu; Myoung Joon Choi. **Power Integrity For I/O Interface:  
With Signal Integrity/Powe Integrity Co-Design**
- [http://www.hs8jyx.com/html/filter\\_circuit.html](http://www.hs8jyx.com/html/filter_circuit.html)
- <http://kpp.ac.th/elearning/elearning3/book-04.html>
- [http://www.tmworld.com/article/323044-How\\_does\\_a\\_Smith\\_chart\\_work\\_.php](http://www.tmworld.com/article/323044-How_does_a_Smith_chart_work_.php)
- [http://www.kmitl.ac.th/~kpteeraw/data\\_com/datacom\\_52/Filter.htm](http://www.kmitl.ac.th/~kpteeraw/data_com/datacom_52/Filter.htm)
- <http://www.allowtech.info/electronics/electknow/28-amplifier-class.html?showall=1>

## ประวัติผู้เขียน

นางสาววราธร จารุจิตต์ เกิดวันที่ 6 พฤศจิกายน พ.ศ.2533 ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 15/42 หมู่ 1 แขวงแสมดำ เขตบางขุนเทียน จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนบางมดวิทยา "สีสุกหวาดจวนอุปลัมภ์" ปีการศึกษา 2551 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

นางสาวกมลทิพย์ ชี้กิ่ง เกิดวันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ.2532 ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 25 หมู่ 8 ตำบลอุดมทรัพย์ อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนมารีย์วิทยา ปีการศึกษา 2551 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

นางสาวปิยภรณ์ พลุเชื้อ เกิดวันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2532 ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 39/8 ซอยแจ้งสนิท 1 ถนนแจ้งสนิท ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนนารีอนุกุล ปีการศึกษา 2551 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา



