

การออกแบบวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

นายสำราญ สันทาลุนัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2552

**DESIGN OF RADIO FREQUENCY CIRCUIT  
FOR INDUCTION HEATING**

**Sumran Santalunai**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2009**

## การออกแบบวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิตยสารฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภณ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สำราญ สันทาคุณย์ : การออกแบบวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน  
(DESIGN OF RADIO FREQUENCY CIRCUIT FOR INDUCTION HEATING)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ, 106 หน้า.

การเหนี่ยวนำความร้อน (induction heating) ได้รับความสนใจอย่างมาก และมีการใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ และทางการแพทย์เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและประหยัดพลังงาน ซึ่งลักษณะของการเหนี่ยวนำความร้อนจะมีทั้งแบบวงจรที่เป็นสวิตซ์ซิง (switching circuit) ที่ส่วนใหญ่จะใช้ในงานอุตสาหกรรมครัวเรือนหรืออุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น เตาอบแบบเหนี่ยวนำ หม้อต้มแบบเหนี่ยวนำ การชุบแข็งโลหะ เป็นต้น ซึ่งความถี่ที่ใช้ในการสวิตซ์จะอยู่ในย่านความถี่ต่ำไม่เกิน 200 kHz และอีกแบบหนึ่งคือการเหนี่ยวนำความร้อนด้วยความถี่สูงย่านความถี่วิทยุ (RF induction heating) โดยส่วนใหญ่จะออกแบบเป็นวงจรขยายสัญญาณ และใช้ความถี่ระดับเมกะเฮิรตซ์ในการเหนี่ยวนำความร้อน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ทางการแพทย์ เช่น การให้ความร้อนสำหรับการบำบัดรักษาโรคมะเร็ง (hyperthermia) และการให้ความร้อนกับออลูมิเนียม ซึ่งวงจรที่เป็นสวิตซ์ซิงความถี่ต่ำไม่สามารถให้ความร้อนได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบและสร้างวงจรเหนี่ยวนำความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำย่านความถี่วิทยุ ซึ่งใช้หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก โดยประกอบด้วยภาควงจรจับกำลังสัญญาณ (pre-amplifier) ส่งต่อยังภาควงจรแยกสัญญาณ (splitter) ให้เป็น 2 ทาง สำหรับเป็นอินพุตให้กับภาควงจรขยายสัญญาณกำลังสูง (power amplifier) 2 ชุดเท่า ๆ กัน ซึ่งวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงแต่ละชุดใช้มอสเฟตเบอร์ BLF177 ออกแบบเป็นคลาสเอบีแบบพุกพุลโดยแต่ละชุดใช้มอสเฟต 4 ตัว ต่อแบบขนานกันและรวมสัญญาณในภาคสุดท้ายด้วยภาควงจรรวมสัญญาณกำลังสูง (power combiner) สำหรับเป็นแหล่งจ่ายกำลังให้กับโหลดซึ่งเป็นขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนและนำไปประยุกต์ใช้ในการให้ความร้อนต่อไป

SUMRAN SANTALUNAI : DESIGN OF RADIO FREQUENCY CIRCUIT  
FOR INDUCTION HEATING. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.  
CHANCHAI THONGSOPA, Ph.D. 106 PP.

RADIO FREQUENCY CIRCUIT/POWER AMPLIFIER/INDUCTION HEATING

The induction heating has been very interesting and widespread utilization both in an industry and a medical as powerful efficiency and safe energy consuming. The nature of induction heating circuits will be both a switching circuit that is used in a primarily industrial, household or industrial oven, such as a large inductance boiler, a pot induction, solid metal plate. While the frequency which is used for switching will be lower than 200 kHz and the other one is the induction heating with high radio frequency which is mainly designed to amplify circuit and used mega hertz frequency level to induce heating. This will be useful to provide medical treatment, such as thermal heating for cancer treatment (hyperthermia) and heat the aluminum. Therefore, this research emphasizes on designing and building an integrated induction heating with radio frequency inductance that using magnetic inductance principle. The sector includes pre-amplifier which is transmitted to the splitter to separate signal into 2 ways, which will be the input of 2 power amplifiers, each power amplifier is MOSFET (BLF177) which is designed to be class AB (push-pull) by using MOSFETs 4 parallel to each other and the signal feed into the power combiner for a supply is provided with a load inductance and the heat applied in the following heat.

School of Telecommunication Engineering      Student's Signature \_\_\_\_\_

Academic Year 2009

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา พรหมมาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระจงนอก และ อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ทางวิชาการและให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด คุณมณีนรัตน์ ทุมพงษ์ ที่ช่วยดูแลในเรื่องเอกสารต่าง ๆ ระหว่างศึกษาจนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้ความรักความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด อีกทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้และท้อใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา รวมถึงญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบัน จนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

ตำราญ สันทาอุณัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญรูป .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	๗
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น .....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย .....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
1.7 ทัศนวิสัยวรรณกรรม .....	3
1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์ .....	5
<b>2 ทฤษฎีวงจรความถี่วิทยุและการเหนี่ยวนำความร้อน .....</b>	<b>6</b>
2.1 กล่าวนำ .....	6
2.2 วงจรขยายสัญญาณย่านความถี่วิทยุ .....	6
2.2.1 คุณลักษณะวงจรขยายสัญญาณ .....	7
2.2.2 เสถียรภาพของวงจรขยายสัญญาณ .....	9
2.2.3 การแมตซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรขยายสัญญาณ .....	9
2.2.4 วงจรขยายสัญญาณคลาสเอบีแบบพุชพูล .....	17
2.3 วงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณ .....	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่วิทยุ .....	22
2.4.1 หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก .....	25
2.4.2 วงจรเรโซแนนซ์ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน .....	25
2.5 ขดลวดเหนี่ยวนำ .....	27
2.6 สรุป .....	28
<b>3 การออกแบบวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน .....</b>	<b>30</b>
3.1 กล่าวนำ .....	30
3.2 วงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน .....	31
3.2.1 วงจรขับกำลังสัญญาณด้านอินพุต .....	31
3.2.2 วงจรขยายสัญญาณกำลังสูง .....	42
3.3 การออกแบบวงจรรวมสัญญาณ .....	55
3.4 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน .....	59
3.5 สรุป .....	60
<b>4 การวัดและผลการทดลอง .....</b>	<b>62</b>
4.1 กล่าวนำ .....	62
4.2 การวัดผลการทดลองวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน .....	62
4.2.1 วงจรขับกำลังสัญญาณทางด้านอินพุต .....	62
4.2.2 วงจรขยายสัญญาณกำลังสูงชุดเดียว .....	69
4.2.3 วงจรแยกสัญญาณ .....	78
4.2.4 วงจรรวมสัญญาณ .....	79
4.2.5 วงจรขยายสัญญาณกำลังสูงสองชุด .....	80
4.3 การให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ .....	85
4.4 สรุป .....	90
<b>5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>91</b>
5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ .....	91
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....	92



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต .....	92
รายการอ้างอิง .....	93
ภาคผนวก .....	95
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	95
ภาคผนวก ข. รายละเอียดดวงจรพิมพ์ .....	101
ภาคผนวก ค. รายละเอียดทางเทคนิคของวงจรความถี่วิทยุสำหรับ เครื่องเหนี่ยวนำความร้อน .....	104
ประวัติผู้เขียน .....	106

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะทั่วไปวงจรขยายสัญญาณ ..... 7
2.2	ลักษณะวงจรถยายสัญญาณ ..... 8
2.3	โครงข่ายการแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ ..... 10
2.4	โครงข่ายแมตซ์ซึ่งอินพุตอิมพีแดนซ์ ..... 11
2.5	โครงข่ายแมตซ์ซึ่งเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ ..... 11
2.6	โครงสร้างของแผนภูมิสมิท ..... 12
2.7	การกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิท ..... 14
2.8	ทิศทางเคลื่อนที่ของการแมตซ์อุปกรณ์บนแผนภูมิสมิท ..... 15
2.9	การอ่านค่าความยาวของส่วนโค้งบนแผนภูมิสมิท ..... 16
2.10	วงจรถยายสัญญาณคลาสเอบีแบบพหุพูล ..... 17
2.11	ลักษณะการทำงานวงจรถยายคลาสเอบีแบบพหุพูล ..... 18
2.12	ลักษณะของวงจรแยกสัญญาณ ..... 19
2.13	ลักษณะของวงจรรวมสัญญาณ ..... 19
2.14	ลักษณะหม้อแปลงกำลังสูง ..... 21
2.15	การแยกสัญญาณด้วยไมโครสตริป ..... 21
2.16	หลักการพื้นฐานการเหนี่ยวนำความร้อน ..... 23
2.17	วงจรมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้า ..... 24
2.18	วงจรมมูลย์ของการเกิดการเหนี่ยวนำ ..... 24
2.19	วงจรรเรโซแนนซ์แบบขนาน ..... 26
2.20	ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับความถี่ต้นกำเนิด ..... 27
2.21	การกระจายตัวของค่าความจุและความต้านทานอนุกรมขดลวดเหนี่ยวนำ ..... 27
2.22	ขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศ ..... 28
3.1	โครงสร้างวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน ..... 30
3.2	วงจรถายป้อนกลับแบบลบ Negative feedback ..... 32
3.3	วงจรถายแมตซ์ซึ่ง ..... 34

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 แสดงการกำหนดจุด $Z_S$ และ $Z_{MS}$ สำหรับบนแผนภูมิสมิท เพื่อจำกัดค่าจริงด้านอินพุต .....	35
3.5 การหาค่าความยาวบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริงด้านอินพุต .....	36
3.6 วงจรโครงข่ายแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ด้านอินพุต .....	37
3.7 การกำหนดจุด $Z_L$ และ $Z_{ML}$ สำหรับบนแผนภูมิสมิท เพื่อจำกัดค่าจริงด้านเอาต์พุต .....	38
3.8 การหาค่าความยาวบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริงด้านเอาต์พุต .....	39
3.9 วงจรโครงข่ายแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ด้านเอาต์พุต .....	40
3.10 วงจรไปแอสจวร์นซ์กำลังสัญญาณ .....	40
3.11 วงจรขับกำลังสัญญาณ .....	41
3.12 วงจรขับกำลังสัญญาณที่ลงอุปกรณ์แล้ว .....	41
3.13 ลักษณะวงจรมอบสัญญาณกำลังสูงสุดเดียว .....	42
3.14 ลักษณะการแยกสัญญาณ .....	43
3.15 วงจรหม้อแปลงด้านอินพุต .....	43
3.16 ลักษณะหม้อแปลงด้านอินพุตที่ออกแบบ .....	44
3.17 ลักษณะการแยกสัญญาณด้วยไมโครสตริป .....	45
3.18 ลักษณะหม้อแปลงแยกสัญญาณด้านอินพุต .....	46
3.19 ลักษณะหม้อแปลงแยกสัญญาณด้านอินพุตที่ออกแบบ .....	47
3.20 การกำหนดจุด $Z_S$ และ $Z_{MS}$ สำหรับบนแผนภูมิสมิท เพื่อจำกัดค่าจริงด้านอินพุต .....	48
3.21 การหาค่าความยาวบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริงด้านอินพุต .....	49
3.22 วงจรโครงข่ายแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ด้านอินพุต .....	50
3.23 การกำหนดจุด $Z_L$ และ $Z_{ML}$ สำหรับการบนแผนภูมิสมิท เพื่อจำกัดค่าจริงด้านเอาต์พุต .....	50
3.24 การหาค่าความยาวบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริงด้านเอาต์พุต .....	51
3.25 วงจรโครงข่ายแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ด้านเอาต์พุต .....	52

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.26 ลักษณะหม้อแปลงด้านเอาต์พุต .....	52
3.27 ลักษณะวงจรไปอัสวงจรถยายสัญญาณกำลังสูง .....	53
3.28 ลักษณะวงจรถยายสัญญาณกำลังสูงที่ออกแบบ 1 ชุด .....	54
3.29 วงจรถยายสัญญาณกำลังสูงที่ลงอุปกรณ์แล้ว 2 ชุด .....	54
3.30 ลักษณะวงจรรวมสัญญาณ .....	55
3.31 วงจรแมตซ์ชิงอิมพีแดนซ์วงจรรวมสัญญาณ .....	56
3.32 การกำหนดจุด $Z_S$ และ $Z_L$ สำหรับบนบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริง .....	57
3.33 การหาค่าความยาวบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริง .....	58
3.34 วงจรแมตซ์ชิงอิมพีแดนซ์วงจรรวมสัญญาณ .....	59
3.35 วงจรรวมสัญญาณที่ออกแบบและลงอุปกรณ์แล้ว .....	59
3.36 ขดลวดเหนี่ยวนำเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 มิลลิเมตร 30 มิลลิเมตร 40 มิลลิเมตรและ 50 มิลลิเมตร ที่สร้างสำหรับการทดลอง .....	60
4.1 ลักษณะการทดลองวงจรขับกำลังสัญญาณ .....	63
4.2 การวัดผลการทดลองวงจรขับกำลังสัญญาณ .....	63
4.3 สัญญาณอินพุตวงจรขับกำลังสัญญาณ .....	64
4.4 สัญญาณเอาต์พุตวงจรขับกำลังสัญญาณ .....	64
4.5 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับความถี่ย่านความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของวงจรขับกำลังสัญญาณ .....	65
4.6 เปรียบเทียบอัตราขยายกับความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของวงจรขับกำลังสัญญาณ .....	66
4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของวงจรขับกำลังสัญญาณ .....	66
4.8 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับอัตราขยายสัญญาณย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ ของวงจรขับกำลังสัญญาณ .....	67

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกำลังเอาต์พุตย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ ของวงจร ขับกำลังสัญญาณ .....	68
4.10 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับกำลังอินพุตย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ ของวงจรขับกำลังสัญญาณ .....	68
4.11 ลักษณะการทดลองวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง .....	69
4.12 การวัดผลการทดลองวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง .....	70
4.13 สัญญาณอินพุตวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง .....	71
4.14 สัญญาณเอาต์พุตจากหม้อแปลงแยกสัญญาณ (L2) .....	71
4.15 สัญญาณเอาต์พุตจากหม้อแปลง (L3) .....	72
4.16 สัญญาณอินพุตขาเททของมอสเฟต (G1) .....	72
4.17 สัญญาณอินพุตที่ขาเททของมอสเฟต (G5) .....	73
4.18 เปรียบเทียบกำลังสัญญาณเอาต์พุตกับความถี่ย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 1 ชุด .....	73
4.19 เปรียบเทียบอัตราขยายกับความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 1 ชุด .....	74
4.20 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 1 ชุด .....	75
4.21 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับอัตราขยายสัญญาณย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ กับ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 1 ชุด .....	76
4.22 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับอัตราขยายสัญญาณย่าน 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ กับ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 1 ชุด .....	76
4.23 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกำลังเอาต์พุตย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ ของวงจร ขยายสัญญาณกำลังสูง 1 ชุด .....	77

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับกำลังอินพุตย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ ของวงจรถยายสัญญาณกำลังสูง 1 ชุด .....	77
4.25 สัญญาณอินพุตวงจรแยกสัญญาณ .....	78
4.26 สัญญาณเอาต์พุตวงจรแยกสัญญาณ .....	79
4.27 สัญญาณอินพุตวงจรรวมสัญญาณ .....	79
4.28 สัญญาณเอาต์พุตวงจรรวมสัญญาณ .....	80
4.29 ลักษณะการวัดผลการทดลองวงจรถยายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุด .....	81
4.30 การทดลองวัดผลการทดลองวงจรถยายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุด .....	81
4.31 เปรียบเทียบกำลังสัญญาณเอาต์พุตกับความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของวงจรถยายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุด .....	82
4.32 เปรียบเทียบอัตราขยายกับความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของวงจรถยายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุด .....	82
4.33 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของวงจรถยายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุด .....	83
4.34 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับอัตราขยายสัญญาณย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ ของวงจรถยายสัญญาณ 2 ชุด .....	84
4.35 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกำลังเอาต์พุตย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ ของวงจรถยายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุด .....	84
4.36 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับกำลังอินพุตย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ ของวงจรถยายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุด .....	85
4.37 ลักษณะการวัดผลการให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ .....	86
4.38 การวัดผลการให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำกับแท่งอลูมิเนียม .....	86

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.39	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ 100 วัตต์ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเหนี่ยวนำ 20 30 40 และ 50 มิลลิเมตร ในการให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียม ..... 87
4.40	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ 200 วัตต์ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเหนี่ยวนำ 20 30 40 และ 50 มิลลิเมตร ในการให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียม ..... 88
4.41	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ กำลังงาน 100 วัตต์ และ 200 วัตต์ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ ขดลวดเหนี่ยวนำ 20 มิลลิเมตร ในการให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียม ..... 89
4.42	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับกำลังงานที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเหนี่ยวนำ 20 มิลลิเมตร ในการให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียมเป็นเวลา 1 นาที ..... 89
ข.1	วงจรรีบกำลังสัญญาณ..... 102
ข.2	วงจรรขยายสัญญาณกำลังสูงส่วนหน้า..... 102
ข.1	วงจรรขยายสัญญาณกำลังสูงส่วนหลัง..... 103

## สารบัญตาราง

รูปที่		หน้า
ค.1	ข้อมูลทางเทคนิคของวงจรขับกำลังสัญญาณ .....	105
ค.2	ข้อมูลทางเทคนิคของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 1 ชุด .....	105
ค.3	ข้อมูลทางเทคนิคของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุด .....	105



## 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 reflection coefficient
$\Gamma$	=	reflection coefficient
$\Gamma_{in}$	=	input reflection coefficient
$\Gamma_{out}$	=	output reflection coefficient
$\Gamma_T$	=	load reflection coefficient
$\Gamma_S$	=	source reflection coefficient
$\Delta$	=	delta factor
$Z_{in}$	=	input impedance
$Z_{out}$	=	output impedance
$Z_S$	=	source impedance
$Z_L$	=	load impedance
$\epsilon_r$	=	relative permittivity
$\epsilon_0$	=	permittivity of free space
$\mu_0$	=	permeability of free space
$f$	=	frequency
$f_c$	=	centre frequency
$\omega$	=	angular frequency
$\lambda$	=	wavelength
$\lambda_0$	=	wavelength of electromagnetic wave in free space
$\eta$	=	intrinsic impedance
$w$	=	width of the microstrip line

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

IEEE	=	the Institute of Electrical and Electronics Engineers
MESFET	=	metal semiconductor field effect transistor
MMIC	=	monolithic microwave integrated circuit
PCB	=	printed circuit board

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันแหล่งพลังงานความร้อนแบบต่าง ๆ ได้มีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น การใช้แก๊สในการหุงต้มอาหาร การใช้ขดลวดความร้อน (heater) การใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave) ทั้งในภาคอุตสาหกรรมโลหะและภาคอุตสาหกรรมครัวเรือน และแหล่งพลังงานความร้อนอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีประสิทธิภาพการเกิดความร้อนที่สูง ประหยัดพลังงานและมีประโยชน์การใช้งานอย่างแพร่หลาย คือ การเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (induction heating) ลักษณะวงจรมีทั้งแบบที่เป็นสวิทช์ซิง (switching circuit) ที่ส่วนใหญ่จะใช้ในภาคอุตสาหกรรมครัวเรือนหรืออุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น เตาอบแบบเหนี่ยวนำ หม้อต้มแบบเหนี่ยวนำ การชุบแข็งโลหะ การหลอมโลหะ เป็นต้น ซึ่งความถี่ที่ใช้ในการสวิทช์จะอยู่ในย่านความถี่ต่ำไม่เกิน 200 กิโลเฮิร์ตซ์ และอีกแบบหนึ่งคือการเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่วิทยุ (RF induction heating) โดยส่วนใหญ่จะออกแบบเป็นวงจรขยายสัญญาณและใช้ความถี่ระดับเมกะเฮิร์ตซ์ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ทางการให้ความร้อนทางการแพทย์ เช่น การให้ความร้อนสำหรับการบำบัดรักษาโรคมะเร็ง (hyperthermia) การให้ความร้อนกับอลูมิเนียม ซึ่งวงจรที่เป็นแบบสวิทช์ซิงความถี่ต่ำไม่สามารถให้ความร้อนได้

ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ผู้วิจัยจึงได้เห็นความสำคัญและมีความสนใจที่จะศึกษาการเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่วิทยุ จึงได้ศึกษาออกแบบและสร้างวงจรเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่วิทยุ ซึ่งลักษณะของวงจรประกอบด้วยวงจรขับกำลังสัญญาณ (pre-amplifier) ขนาดประมาณ 10 วัตต์ เป็นสัญญาณอินพุตให้กับวงจรแยกสัญญาณ (splitter) เพื่อแยกสัญญาณเป็นสองทางเท่า ๆ กันและส่งต่อยังภาควงจรขยายสัญญาณกำลังสูง (power amplifier) และรวมสัญญาณกำลังสูง (power combiner) ในภาคสุดท้ายมีกำลังงานขนาด 400 วัตต์ สำหรับเป็นแหล่งจ่ายกำลังให้กับโหลด ซึ่งเป็นวงจรเหนี่ยวนำความร้อนด้วยขดลวดและนำไปประยุกต์ใช้งานในการให้ความร้อนต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่วิทยุ (1-2 MHz)
- 1.2.2 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจรรขยายสัญญาณย่านความถี่วิทยุ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการการประยุกต์ใช้งานในการให้ความร้อนกับอลูมิเนียม

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 ออกแบบและสร้างวงจรขับกำลังสัญญาณความถี่วิทยุขนาด 10 วัตต์
- 1.3.2 ออกแบบและสร้างวงจรรขยายสัญญาณกำลังสูงความถี่วิทยุขนาด 200 วัตต์ 2 ชุด
- 1.3.3 ออกแบบและสร้างวงจรรวมสัญญาณใช้งานย่านความถี่วิทยุ
- 1.3.4 ออกแบบและสร้างขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่วิทยุ
- 1.3.5 ทดสอบวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจรและการประยุกต์ให้ความร้อนกับอลูมิเนียม

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาหาข้อมูลวงจรเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่วิทยุเพื่อให้ได้วงจรที่มีประสิทธิภาพสูง
- 1.4.2 ออกแบบและสร้างวงจรรขยายสัญญาณ วงจรแยกสัญญาณ วงจรรวมสัญญาณและขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่วิทยุ
- 1.4.3 ทดสอบผลการทดลองและเก็บผลการทดลอง
- 1.4.4 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจรรขยายสัญญาณและการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน
  - 1) สํารวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
  - 2) ออกแบบและสร้างวงจรเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่วิทยุ
  - 3) ทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.5.2 ระเบียบวิธีวิจัยเป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้
  - 1) สํารวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
  - 2) ออกแบบวิเคราะห์การเหนี่ยวนำความร้อน เพื่อหาคุณสมบัติที่เหมาะสม
  - 3) วิเคราะห์คุณสมบัติและปรับแต่งจนได้อุปกรณ์ที่สมบูรณ์

### 1.5.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
สุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

### 1.5.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
- 2) เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม
- 3) เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่
- 4) ออสซิลโลสโคป

### 1.5.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) เก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจประสิทธิภาพที่เกี่ยวของ
- 2) เก็บรวบรวมผลจากการออกแบบ สร้าง และวัดทดสอบวงจรเหนี่ยวนำ  
ความร้อน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมและเครื่องกำเนิดความถี่

### 1.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลความรู้เกี่ยวกับการสร้างวงจรเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่วิทยุ สำหรับการ  
การเหนี่ยวนำความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิธีเฉพาะทาง  
วิศวกรรม

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ได้วงจรเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่วิทยุ อย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.6.2 ได้วงจรขยายสัญญาณกำลังสูง อย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.6.3 สามารถนำความรู้ที่ได้จากการที่ได้ศึกษาและวิจัยมาประกอบวิชาชีพได้
- 1.6.4 สามารถนำความรู้ที่ได้ทางทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ได้
- 1.6.5 สามารถนำความรู้ที่ได้ทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติมาประยุกต์ใช้งานอื่น ๆ ได้
- 1.6.6 ได้ทักษะการคิด การวิเคราะห์และการออกแบบ

## 1.7 ปรัชศน์วรรณกรรม

เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนปัญหาและ  
ข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ โดยได้มีการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา  
และอาศัยฐานข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนี้เป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียงและ  
ได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่น ฐานข้อมูล IEEE นอกจากนี้ยังได้มีการสืบค้นงานวิจัยจาก

แหล่งอื่น ๆ เช่น จากเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่าง ๆ โดยจากผลการสืบค้นที่ได้นั้นจะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้จะได้กล่าวถึง ทัศนั้วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนนั้น แบ่งออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับส่วนของวงจรความถี่วิทยุซึ่งเป็นวงจรภาคกำลัง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเหนี่ยวนำความร้อน

งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับวงจรความถี่วิทยุซึ่งเป็นวงจรภาคกำลัง โดยงานวิจัยในส่วนวงจรภาคกำลังนี้ ถือว่าเป็นส่วนสำคัญสำหรับส่วนที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังงานให้กับภาควงจรการเหนี่ยวนำความร้อน โดยงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและออกแบบวงจรภาคกำลังที่เป็นลักษณะของวงจรแบบวงจรสวิตซ์ซิง (Kwan, Vries, Ackerman, and Williams, 1993) โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้วงจรแบบสวิตซ์ซิงในการสวิตซ์ความถี่ของการเหนี่ยวนำความร้อนซึ่งใช้ความถี่ที่ประมาณ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 100 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยเป็นแหล่งจ่ายให้กับภาควงจรการเหนี่ยวนำความร้อน ซึ่งยังเห็นได้ว่ายังใช้ความถี่อยู่ในช่วงความถี่ที่ต่ำ และได้มีการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งเป็นวงจรภาคกำลังซึ่งใช้ความถี่สูง โดยในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้วงจรที่เป็นแบบวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง (Hisayuki, Sang-Pi, Tomokazu, and Mutsuo, 2008) และใช้ความถี่สูงระดับเมกะเฮิร์ตซ์ เป็นแหล่งจ่ายกำลังงานให้กับโหลด ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาและออกแบบวงจรความถี่วิทยุในส่วนของวงจรภาคกำลังเนื่องจากเป็นวงจรที่ออกแบบที่ความถี่สูงและสามารถออกแบบได้ง่าย

งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับวงจรรการเหนี่ยวนำความร้อน โดยในงานวิจัยในส่วนนี้ ที่ผ่านมามีการศึกษาและออกแบบในส่วนของวงจรภาควงจรการเหนี่ยวนำความร้อน โดยส่วนใหญ่จะมีการออกแบบวงจรในลักษณะที่เป็นวงจรแบบเรโซแนนซ์ ซึ่งลักษณะของวงจรเรโซแนนซ์ จะมีทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้วงจรเรโซแนนซ์ทั้งสองแบบสำหรับการเหนี่ยวนำความร้อน ซึ่งลักษณะของวงจรแบบอนุกรมในสภาวะที่เกิดการเรโซแนนซ์ค่ากระแสที่ไหลในวงจรจะมีค่าสูงสุด เนื่องจากมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำ ในทางตรงกันข้ามลักษณะของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะค่าอิมพีแดนซ์ที่สูง ทำให้ที่สภาวะเรโซแนนซ์ค่าของกระแสที่ไหลในวงจรมีค่าต่ำ ดังนั้นการออกแบบวงจรส่วนของภาควงจรการเหนี่ยวนำความร้อนที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจะต้องคำนึงถึงการออกแบบวงจรเรโซแนนซ์ ให้เหมาะสมกับความถี่ที่ต้องใช้งานและลักษณะของการใช้งานของวงจรในแต่ละแบบ เพื่อให้ได้วงจรที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถนำข้อมูลจากการศึกษามาออกแบบและสร้างวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนต่อไปได้

## 1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท และ ภาคผนวก

**บทที่ 1** กล่าวถึง บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และรายละเอียดในวิทยานิพนธ์

**บทที่ 2** กล่าวถึงทฤษฎีวงจรขยายสัญญาณย่านความถี่วิทยุ วงจรแยกสัญญาณและรวมสัญญาณและขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

**บทที่ 3** กล่าวถึงการออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่วิทยุ วงจรขับกำลังสัญญาณ วงจรขยายสัญญาณกำลังสูงโดยใช้มอสเฟต การออกแบบวงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณ และการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

**บทที่ 4** กล่าวถึงผลการทดลองและการวัดทดลองคุณสมบัติต่าง ๆ ของระบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่วิทยุ

**บทที่ 5** กล่าวถึงสรุปผลการวัดการทดลองและคุณสมบัติของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับการสรุปผลการวิจัยของวงจรในบทต่าง ๆ ทั้งหมด ปัญหาที่เกิดขึ้น ข้อเสนอแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

## บทที่ 2

### ทฤษฎีวงจรความถี่วิทยุและการเหนี่ยวนำความร้อน

#### 2.1 กล่าวนำ

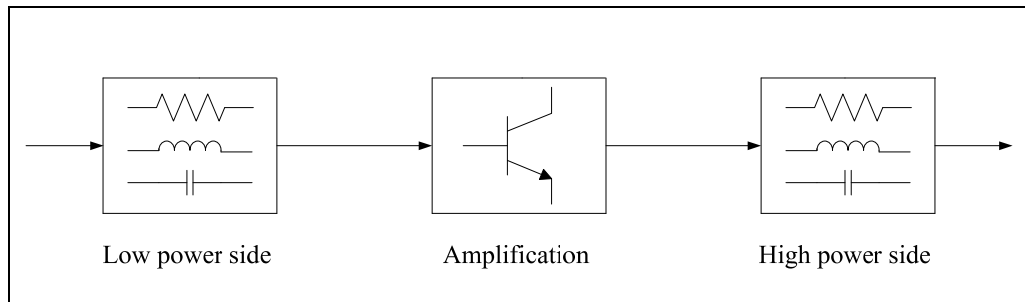
การออกแบบระบบวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนประกอบด้วยส่วนประกอบหลายอย่างที่สำคัญ ทั้งส่วนของวงจรรักษาขยายกำลังโดยได้ศึกษาและออกแบบเป็นวงจรรขยายสัญญาณกำลังสูงและภาคการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ ซึ่งส่วนต่าง ๆ เหล่านี้จำเป็นต้องมีการศึกษาถึงทฤษฎีของหลักการการทำงานของวงจร การประยุกต์ใช้งานและ โครงสร้างของตัวอุปกรณ์เพื่อนำมาซึ่งการออกแบบและสร้างให้ได้กำลังงานและประสิทธิภาพได้ดีที่สุด โดยเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีวงจรความถี่วิทยุที่นำมาออกแบบเป็นภาคกำลังของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนและหลักการเหนี่ยวนำความร้อน สำหรับวงจรความถี่วิทยุได้กล่าวถึงทฤษฎีของวงจรรขยายสัญญาณกำลังสูง วงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณ ซึ่งเป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการออกแบบสำหรับวิเคราะห์ผลต่อการทำงานของวงจรและการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรรขยายสัญญาณกำลังสูงเพื่อให้ได้วงจรที่มีประสิทธิภาพของวงจรและอัตราขยายสัญญาณของวงจรได้สูงที่สุด

#### 2.2 วงจรรขยายสัญญาณความถี่วิทยุ

วงจรรขยายสัญญาณความถี่วิทยุทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ต้องการ พารามิเตอร์การกระจาย (S-parameter) ของมอสเฟตเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ โดยต้องพิจารณาถึงเสถียรภาพของวงจร อัตราขยายกำลัง กำลังเอาต์พุตซึ่งต้องเลือกคุณสมบัติและชนิดของมอสเฟตให้เหมาะสม รวมทั้งการออกแบบ โครงข่ายแมตซ์ซึ่งทางด้านอินพุตและเอาต์พุต เพื่อให้ได้วงจรรขยายสัญญาณความถี่สูงที่มีประสิทธิภาพและอัตราขยายกำลังสูงมากที่สุด

ลักษณะโดยทั่วไปของวงจรรขยายสัญญาณความถี่วิทยุที่ออกแบบเป็นลักษณะเป็นภาคส่วน โดยประกอบด้วยภาคอินพุตของวงจรรขยายสัญญาณ ภาคขยายสัญญาณและภาคเอาต์พุตของวงจรรขยายสัญญาณ ซึ่งในภาคขยายกำลังจะต้องมีการออกแบบวงจรไบแอสให้เหมาะสมเพื่อการทำงานของวงจรอย่างมีประสิทธิภาพ และการออกแบบ โครงข่ายแมตซ์ซึ่งทั้งภาคอินพุตและเอาต์พุต โดยลักษณะของวงจร โครงข่ายแมตซ์ซึ่งประกอบด้วย ค่าความต้านทาน (R) ตัวเก็บประจุ (C) และตัวเหนี่ยวนำ (L) ซึ่งในรูปที่ 2.1 เป็นบล็อกไดอะแกรมลักษณะ โดยทั่วไปของวงจรรขยายสัญญาณ โดยด้านอินพุตเป็นวงจรกำลังงานต่ำและด้านเอาต์พุตเป็นส่วนขยายกำลังสูง





รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปวงจรขยายสัญญาณ

### 2.2.1 คุณลักษณะวงจขยายสัญญาณ

สิ่งสำคัญสำหรับคุณลักษณะวงจขยายสัญญาณคือความเป็นเชิงเส้น ประสิทธิภาพของวงจขยายสัญญาณ ความสามารถในการขยายสัญญาณเอาต์พุต และอัตราขยายสัญญาณ วงจขยายสัญญาณจะมีลักษณะที่เป็นเชิงเส้นถ้าสัญญาณอินพุตและกำลังขยายสัญญาณเอาต์พุตมีลักษณะสัญญาณที่เป็นไปในทางเดียวกันซึ่งจะมีลักษณะการแปรผันตรงตามสมการที่ 2.1

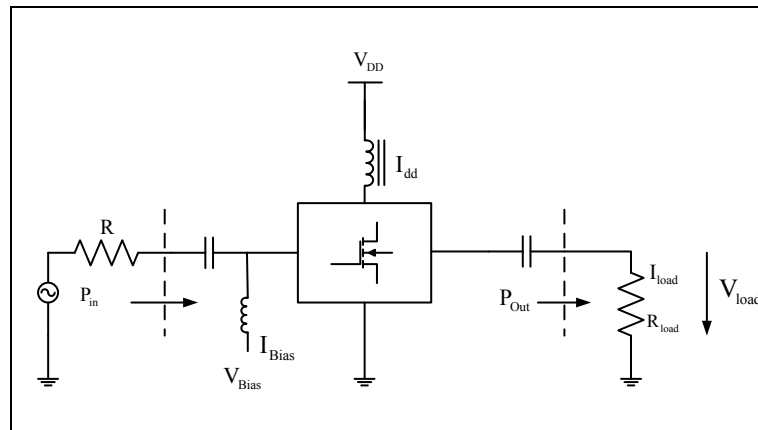
$$v_o(t) = Av_i(t) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $v_o(t)$  คือ สัญญาณเอาต์พุต

$v_i(t)$  คือ สัญญาณอินพุต

$A$  คือ อัตราขยายคงที่

โดยทั่วไปวงจขยายสัญญาณจะมีลักษณะ 2 รูปแบบคือวงจรที่เป็นเชิงเส้น (linear amplifier) และไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear amplifier) สำหรับวงจรในรูปที่ 2.2 เป็นลักษณะรูปแบบทั่วไปของวงจขยายสัญญาณ ซึ่งอัตราขยายสัญญาณ (gain) ที่ได้จากวงจรสามารถหาได้จากสมการที่ 2.2 คือส่วนที่เห็นได้ชัดเจนจากการขยายสัญญาณ โดย  $P_{in}$  เป็นกำลังสัญญาณตรงพอร์ตอินพุต ของวงจรและ  $P_{out}$  เป็นกำลังขยายสัญญาณเอาต์พุตฝั่งโหลด ซึ่งจะมีค่าความต้านทานโหลด  $R_{load}$  โดยที่  $P_{out}$  สามารถพิจารณาจากรูปที่ 2.2 และสามารถคำนวณค่าได้จากส่วนประกอบพื้นฐานจากโหลดกระแส  $I_{load}$  และ โหลดแรงดัน  $V_{load}$  ดังแสดงในสมการที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ลักษณะวงจรขยายสัญญาณ

$$\text{Gain} = 10 \log \left( \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right) \text{ dB} \quad (2.2)$$

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

การกระจายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากสองสิ่งประกอบกันจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (power-supply) ซึ่งจะประกอบด้วย  $V_{\text{dd}}$  และ  $I_{\text{dd}}$  และส่วนอื่น ๆ ที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไบอัส ( $V_{\text{Bias}}$ ) และ ( $I_{\text{Bias}}$ ) ซึ่งกำลังเอาต์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสามารถหาได้จากสมการที่ 2.4

$$P_{\text{dc}} = (V_{\text{Bias}} \times I_{\text{Bias}}) + (V_{\text{dd}} \times I_{\text{dd}}) \quad (2.4)$$

การออกแบบวงจรขยายสัญญาณคือการออกแบบเพื่อต้องการได้ประสิทธิภาพ (efficiency) ดีที่สุด โดยได้จากการเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณเอาต์พุตของวงจรและค่าของกำลังเอาต์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งสามารถหาค่าประสิทธิภาพของวงจรขยายสัญญาณเป็นค่าในรูปของเปอร์เซ็นต์ได้จากสมการที่ 2.5

$$\text{Efficiency} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{dc}}} \times 100\% \quad (2.5)$$

## 2.2.2 เสถียรภาพของวงจรถยายสัญญาณ

เสถียรภาพของวงจรถยายสัญญาณเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องการพิจารณาในการออกแบบวงจรถยายสัญญาณ โดยสามารถพิจารณาได้จากพารามิเตอร์การกระจาย (S-parameter) ซึ่งการตรวจสอบเสถียรภาพของวงจรถยายสัญญาณจะพิจารณาจากค่า K (rollett stability factor) ดังสมการที่ 2.6 โดย  $\Delta$  มีค่าดังสมการที่ 2.7

$$K = \frac{1 + |\Delta|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2 \times |S_{21}| \times |S_{12}|} \quad (2.6)$$

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} \quad (2.7)$$

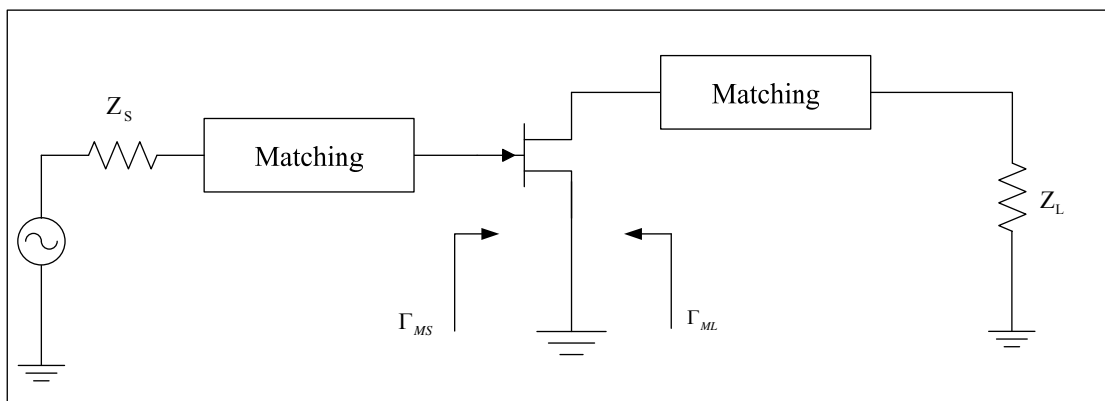
ในการตรวจสอบเสถียรภาพของวงจรถยายสัญญาณพิจารณาค่า K จากสมการที่ 2.6 ซึ่งถ้าค่า  $K > 1$  จะเป็นไปได้ตามเงื่อนไขในการออกแบบวงจรถยายสัญญาณ และถ้าค่า  $K < 1$  จะทำให้ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขต่อการออกแบบวงจรถยาย โดยจะทำให้วงจรที่ออกแบบมีการออสซิลเลตตัวเองขึ้น ซึ่งต้องใช้วิธีแก้ด้วยการออกแบบวงจรถยายป้อนกลับแบบลบ (negative feedback) เพื่อป้องกันการออสซิลเลตหรือใช้วิธีอื่น ๆ

## 2.2.3 การแมตซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรถยายสัญญาณ

โดยทั่วไปวงจรถายกำเนิดสัญญาณความถี่มักจะอยู่ส่วนหน้าของวงจรถยายสัญญาณของระบบโดยปกติแล้วจะถูกออกแบบมาสำหรับระบบอิมพีแดนซ์แบบ 50 โอห์ม คุณสมบัติของวงจรถายกำเนิดความถี่อาจเปลี่ยนแปลงได้เมื่อค่าอินพุตหรือเอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าต่างออกไป ดังนั้นการแมตซ์อิมพีแดนซ์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่วงจรต่าง ๆ จะต้องมีการเทอร์มินเนตค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมตลอดช่วงความถี่ เช่นอิมพีแดนซ์วงจรถยายสัญญาณความถี่สูงทั้งทางด้านอินพุตและเอาต์พุตจะแมตซ์เข้ากับอิมพีแดนซ์ของระบบเพื่อให้มีการส่งผ่านกำลังงานสูงสุด

วงจรถยายสัญญาณจะมีกำลังงาน อัตราขยาย และประสิทธิภาพที่สูงได้ ต้องประกอบไปด้วยปัจจัยหลายอย่างทั้งโครงสร้างของวงจรและการออกแบบวงจรที่มีเสถียรภาพ สิ่งสำคัญของการออกแบบวงจรถยายสัญญาณคือการแมตซ์อิมพีแดนซ์ทั้งด้านอินพุตและเอาต์พุตของวงจรถยายสัญญาณ (ชาญชัย ทอง โสภากา, 2549) ทั้งนี้ก็เพื่อส่งผ่านกำลังงานในวงจรให้ได้มากที่สุดโดยลักษณะรูปแบบของโครงข่ายแมตซ์อิมพีแดนซ์แสดงดังรูปที่ 2.3 ประกอบด้วย การแมตซ์อิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุต ซึ่งจะมีคู่แมตซ์คือ  $Z_S$  และ  $\Gamma_S$  และการแมตซ์อิมพีแดนซ์ทางด้านเอาต์พุตซึ่งมีคู่แมตซ์คือ  $Z_L$  และ  $\Gamma_L$  โดย  $\Gamma_S$  และ  $\Gamma_L$  จะใช้พารามิเตอร์การกระจาย

กระจาย (S-parameter) ของมอสเฟตในการวิเคราะห์และออกแบบเพื่อจำค่าที่จำเป็นต้องใช้สำหรับแมตซ์อิมพีแดนซ์ โดยสามารถเรียกค่าเหล่านี้ว่า  $\Gamma_{MS}$  และ  $\Gamma_{ML}$  ซึ่งทำให้ได้ค่าสำหรับแมตซ์อิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของวงจร โดยสามารถใช้สมการในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ดังสมการดัง 2.8 และ 2.9 เพื่อทราบค่าพารามิเตอร์  $\Gamma_{MS}$  และ  $\Gamma_{ML}$  ในการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของวงจร โดย  $\Gamma_{MS}$  เป็นค่าของสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแหล่งจ่ายทางด้านอินพุตของมอสเฟตสามารถหาได้จากสมการที่ 2.8 และ  $\Gamma_{ML}$  เป็นค่าของสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแหล่งจ่ายทางด้านเอาต์พุตของมอสเฟตสามารถหาได้จากสมการที่ 2.9



รูปที่ 2.3 โคจรข่ายแมตซ์อิมพีแดนซ์

$$\Gamma_{MS} = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4|C_1|^2}}{2C_1} \quad (2.8)$$

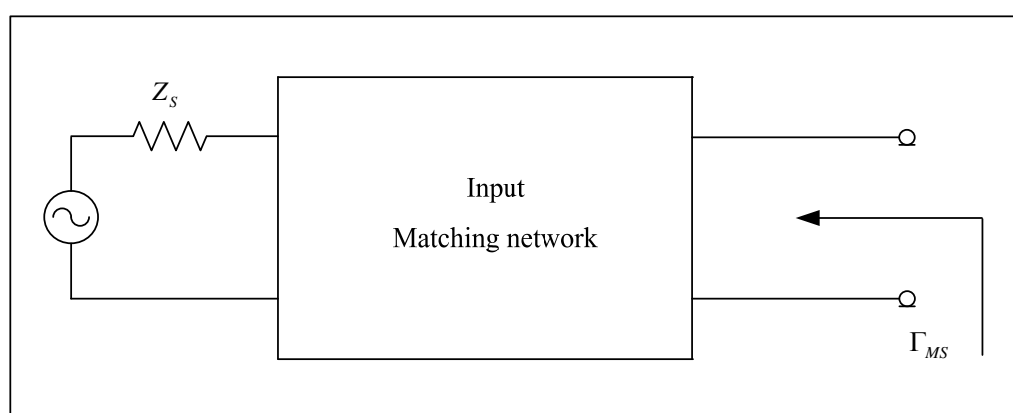
โดยที่  $B_1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2$  และ  $C_1 = S_{11} - \Delta S_{22}^*$

$$\Gamma_{ML} = \frac{B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4|C_2|^2}}{2C_2} \quad (2.9)$$

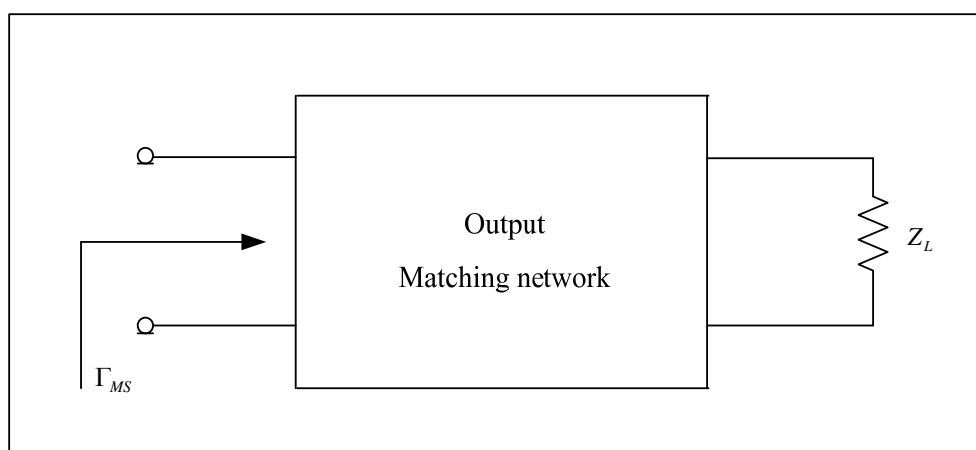
โดยที่  $B_2 = 1 + |S_{22}|^2 - |S_{11}|^2 - |\Delta|^2$  และ  $C_2 = S_{22} - \Delta S_{11}^*$

การแมตช์อิมพีแดนซ์ซึ่งจะประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ทางด้านเข้าเป็นคู่การแมตช์กับ สัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแหล่งจ่ายทางด้านอินพุตของมอสเฟตแสดงดังรูปที่ 2.4 และอิมพีแดนซ์ ทางด้านออกซึ่งเป็นคู่ของการแมตช์กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแหล่งจ่ายทางด้านเอาต์พุตของ มอสเฟตแสดงดังรูปที่ 2.5

โดยการออกแบบวงจรแมตช์อิมพีแดนซ์สามารถแมตช์อิมพีแดนซ์ได้จากแผนภูมิ สมิต (smith chart) โดยลักษณะรูปแบบของแผนภูมิสมิตได้จากการแปลงค่าโดยแผนภูมิก่า  $Z = r + jx$  ลงในระนาบของ  $\Gamma \angle \Phi = u + jv$  โดยใช้สมการที่ 2.10 และ 2.11



รูปที่ 2.4 โครงข่ายแมตช์ซึ่งอินพุตอิมพีแดนซ์



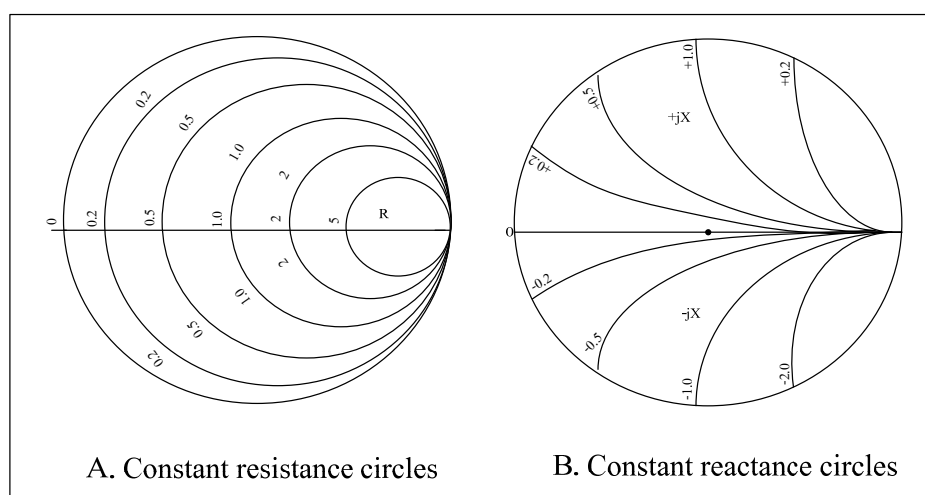
รูปที่ 2.5 โครงข่ายแมตช์ซึ่งเอาต์พุตอิมพีแดนซ์

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (2.10)$$

โดย  $z = \frac{Z}{Z_0}$  คือค่าอิมพีแดนซ์ของอิมพีแดนซ์

$$\Gamma = \frac{z - 1}{z + 1} \quad (2.11)$$

ซึ่งจะทำให้ได้ชุดวงกลม ค่าตัวต้านทานคงที่กับวงกลมค่ารีแอคแตนซ์คงที่ ดังรูปที่ 2.8 บนระนาบ  $u - v$  เมื่อนำวงกลมทั้งสองชุดมารวมกันจะเป็นดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของแผนภูมิสมิท

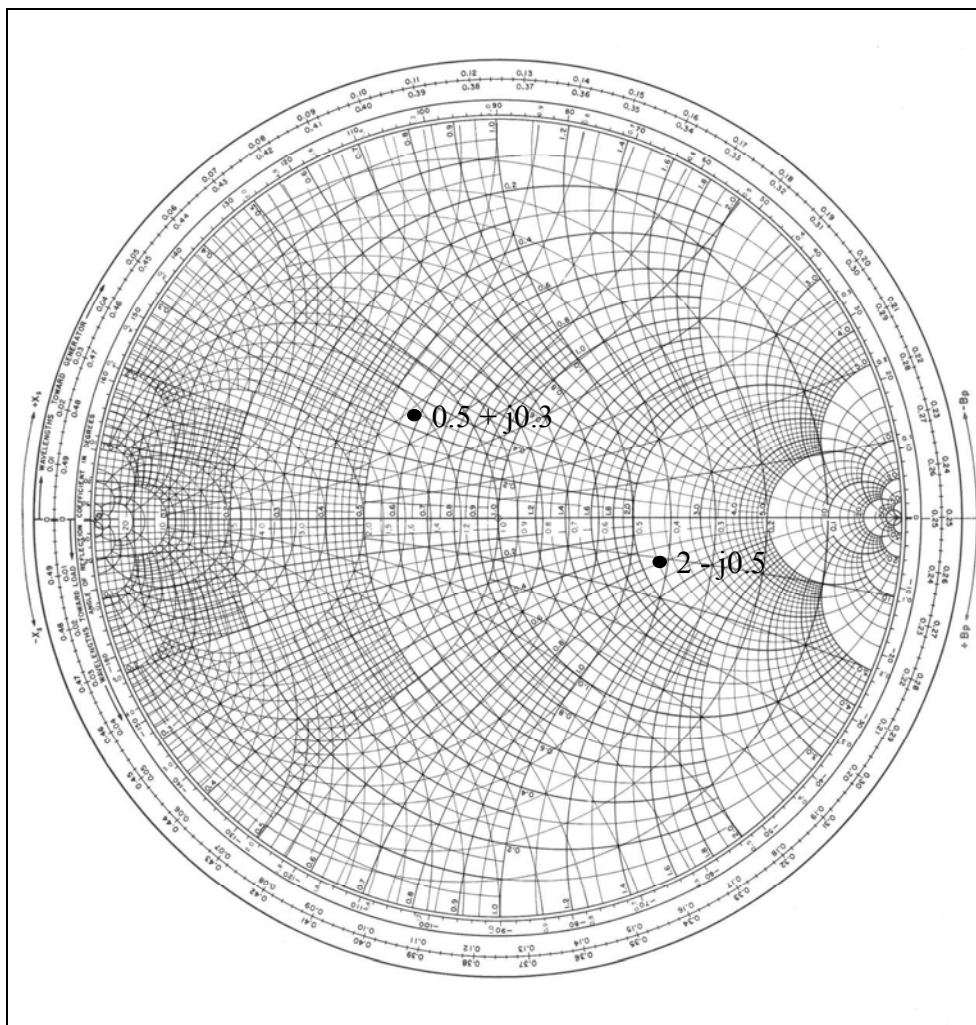
เนื่องจากระนาบ  $u$  และ  $v$  ของ  $\Gamma$  ไม่ค่อยได้ใช้ ดังนั้นรูปแบบภาพจึงมีสเกลเป็นโพลาไร โดยมุมของ  $\Gamma$  อยู่บนสเกลตามเส้นรอบวงของรูปแบบภาพ ทั้งที่เป็นองศาและเศษส่วนของความยาวคลื่นและขนาดของ  $\Gamma$  หาได้จากสเกลได้รูปแบบภาพ ทำให้แผนภูมิสมิทมีประโยชน์มากในการแก้ปัญหาหาของสายส่งและการแมตช์อิมพีแดนซ์ของวงจรต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี และง่ายต่อการออกแบบและการใช้งาน

การกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิท ในแต่ละจุดบนแผนภูมิสมิทจะแสดงค่าของอิมพีแดนซ์ ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุกรมกันในรูปของ  $Z = R + jX$  นั่นคือสามารถกำหนดจุดค่า  $Z$  ลงบนจุดที่เป็นจุดตัดระหว่างวงกลม  $R$  กับวงกลม  $X$  ได้เลยดังสมการกำหนดจุดต่าง ๆ โดยการแมตซ์อิมพีแดนซ์บนแผนภูมิสมิทเมื่อได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่จะแมตซ์บนแผนภูมิสมิทแล้วสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ โดยการใช้แผนภูมิสมิทดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการแมตซ์ได้เป็นอย่างดีเมื่อทราบค่าของโหลดอิมพีแดนซ์และอิมพีแดนซ์ที่ต้องการ นอกจากนี้ยังสามารถแมตซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรโดยใช้โครงข่ายแบบ 2 องค์ประกอบบนแผนภูมิสมิท ซึ่งการแมตซ์อิมพีแดนซ์บนแผนภูมิสมิทมีขั้นตอนดังนี้

1. สำหรับการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ได้คู่แมตซ์แล้วและถ้าค่าที่ได้อยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน อิมพีแดนซ์ที่ต้องการเมื่อมองจากแหล่งจ่ายนั้นคือ การคอนจูเกตจำนวนเชิงซ้อนของด้านแหล่งจ่ายอย่างเช่น เมื่ออิมพีแดนซ์ด้านแหล่งจ่ายเท่ากับ  $25 - j15$  โอห์ม และอิมพีแดนซ์ฝั่งโหลดเท่ากับ  $100 - j25$  โอห์ม เมื่อมองจากแหล่งจ่ายทำให้ได้คู่แมตซ์เป็น  $25 + j15$  กับ  $100 - j25$

2. ถ้าค่าที่ต้องการแมตซ์มีค่าใหญ่เกินไปจะต้องทำการนอร์แมลไลซ์ด้วยค่าใดค่าหนึ่งเพื่อให้ค่าเล็กลงทำให้ง่ายต่อการแมตซ์อิมพีแดนซ์และการกำหนดจุดลงบนแผนภูมิสมิท เช่น จากค่าในข้อที่ 1 สามารถนอร์แมลไลซ์ด้วย 50 ทำให้ได้ อิมพีแดนซ์ด้านแหล่งจ่ายเท่ากับ  $0.5 + j0.3$  โอห์ม และอิมพีแดนซ์ด้านโหลดเท่ากับ  $2 - j0.5$  เป็นคู่การแมตซ์อิมพีแดนซ์

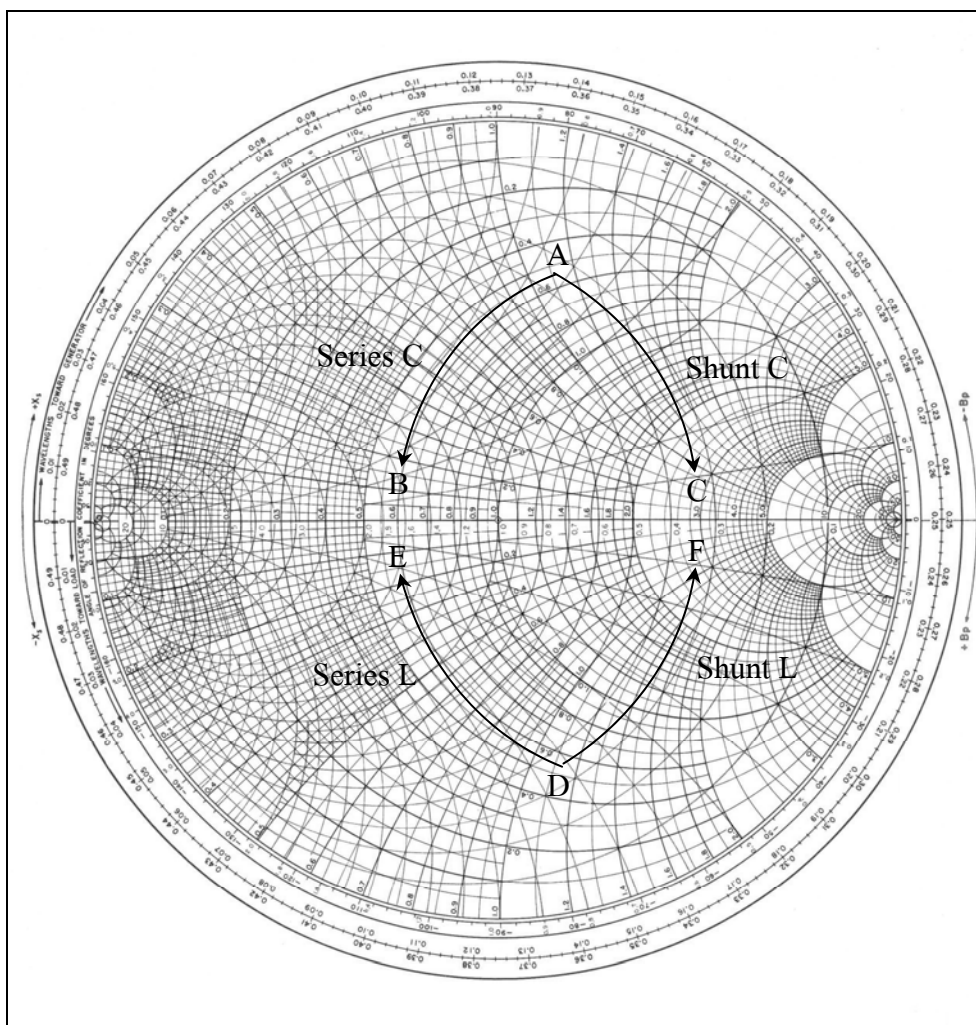
3. หลังจากได้คู่การแมตซ์อิมพีแดนซ์แล้วสามารถกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิทเพื่อทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์แสดงดังรูปที่ 2.7 แสดงการกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิทซึ่งนำค่าจากข้อที่ 2 ในการกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิท



รูปที่ 2.7 การกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิท

4. หลังจากการกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิทแล้วสามารถหาค่าองค์ประกอบต่าง ๆ จากจุดที่ต้องการแมตซ์อิมพีแดนซ์เพื่อจำกัดค่าของพารามิเตอร์โดยลักษณะของพารามิเตอร์ที่ได้จากการวนจะแสดงดังรูปที่ 2.8

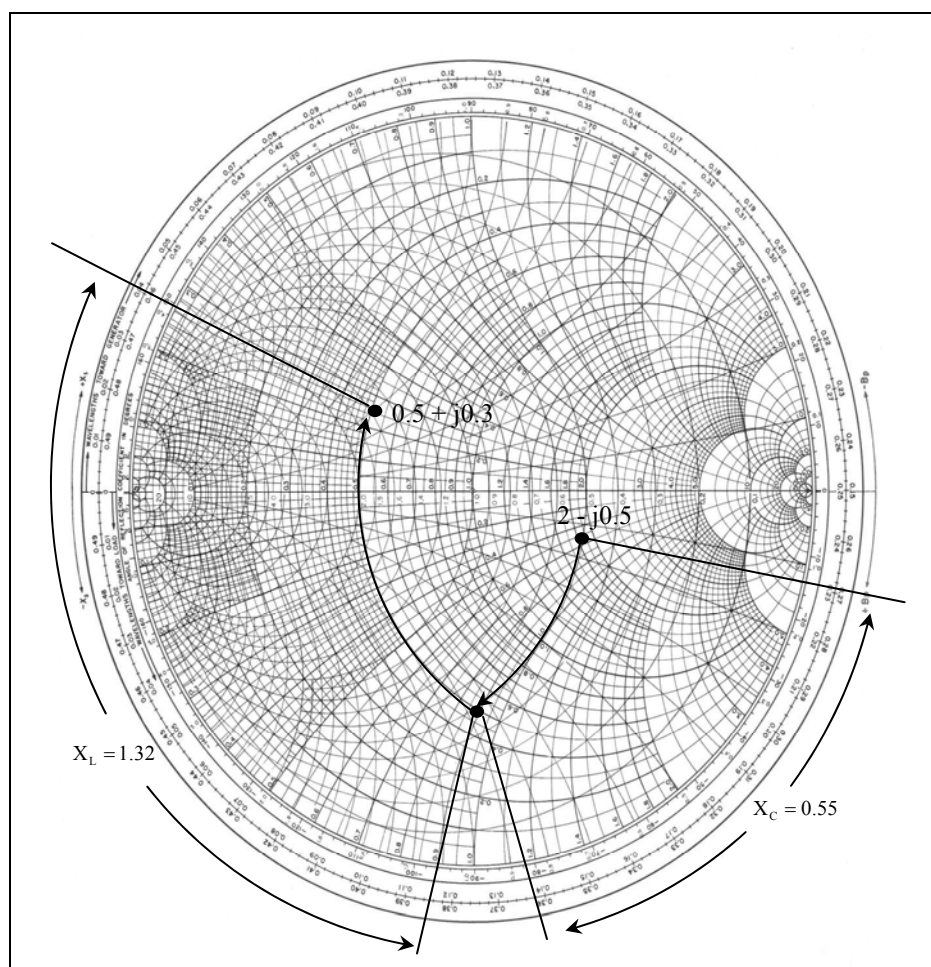




รูปที่ 2.8 ทิศทางการเคลื่อนที่ของการแมตซ์อุปกรณ์บนแผนภูมิสมิท

โดยการวนจากเส้นโค้ง AB เป็นการจำกัดค่า C อนุกรม เส้นโค้ง AC เป็นการจำกัดค่า C ขนาน เส้นโค้ง DE เป็นการจำกัดค่า L อนุกรม และเส้นโค้ง DF เป็นการจำกัดค่า L ขนาน

5. เมื่อวนหาค่าองค์ประกอบที่ได้แล้วสามารถอ่านค่าที่ขององค์ประกอบจากการวนดังแสดงในรูปที่ 2.9 และสามารถนำค่ามาคำนวณตั้งสมการที่ 2.12 และ 2.13 และแทนค่าที่ได้ลงในสมการที่ 2.14 และ 2.15 เพื่อที่จะทำให้ได้ค่าองค์ประกอบที่ทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์ในรูปของค่าตัวเก็บประจุ (C) และตัวเหนี่ยวนำ (L)



รูปที่ 2.9 การอ่านค่าความยาวของส่วนโค้งบนแผนภูมิสมิท

$$X_c = \left[ \frac{1}{+jC} \right] \text{ (Normalize)} \quad (2.12)$$

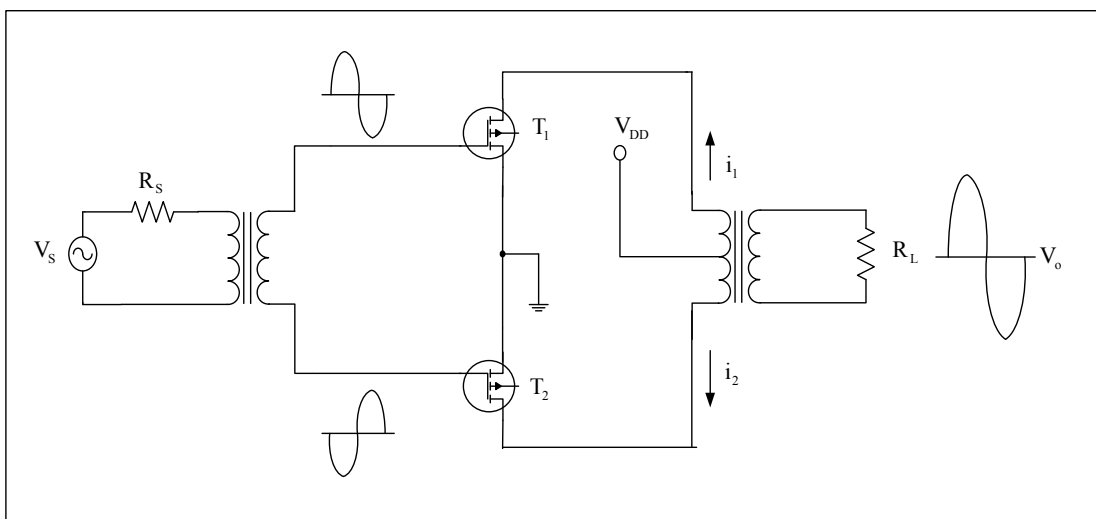
$$X_L = [+jL] \text{ (Normalize)} \quad (2.13)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (2.14)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad (2.15)$$

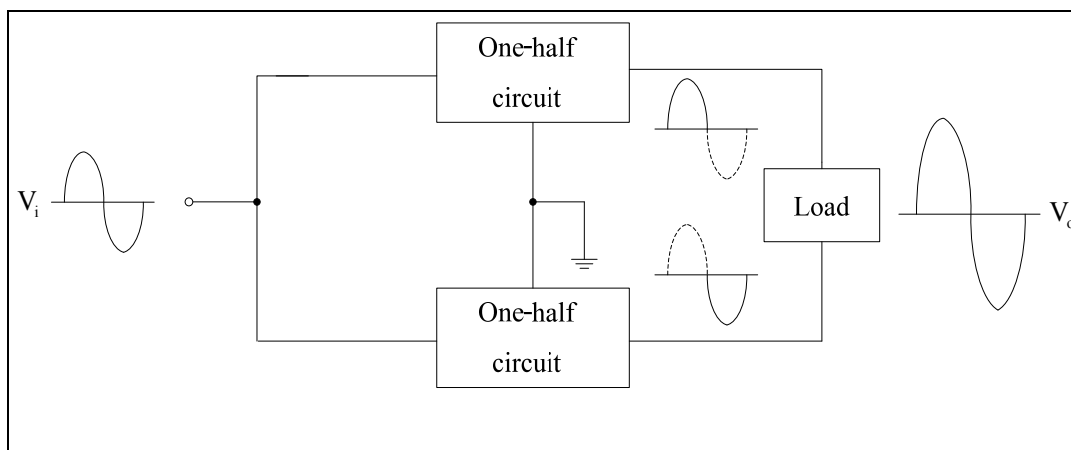
## 2.2.4 วงจรขยายสัญญาณคลาสเอบีแบบพุชพูล

ลักษณะการทำงานของวงจรขยายสัญญาณคลาสเอบี (class AB power amplifier circuit) มอสเฟตในวงจรขยายคลาสเอบีจะนำกระแสเพียงครึ่งคาบเท่านั้น ดังนั้นเพื่อที่จะให้สัญญาณออกไม่มีความเพี้ยน จึงจำเป็นต้องใช้มอสเฟต 2 ตัว ให้นำกระแสตัวละครึ่งคาบสลับกัน วงจรชนิดนี้เรียกว่า วงจรพุชพูล (push-pull circuit) ลักษณะของวงจรแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรขยายสัญญาณคลาสเอบีแบบพุชพูล

วงจรขยายแบบ Push Pull ในรูปที่ 2.10 ใช้มอสเฟตชนิดเดียวกัน 2 ตัว แต่ละตัวส่งสัญญาณออกทางคอลเลคเตอร์เข้าสู่โหลดหม้อแปลงสำหรับทางด้านอินพุตจะขับมอสเฟตแต่ละตัวสลับกันทำให้มอสเฟต  $T_1$  และ  $T_2$  สลับกันนำกระแสตัวละ  $180^\circ$  สำหรับกระแสที่ไหลในโหลด ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสของมอสเฟตทั้งสองจะไหลตลอดคาบได้ เพื่อง่ายต่อการเข้าใจพิจารณาตามรูปที่ 2.11 ดังนี้



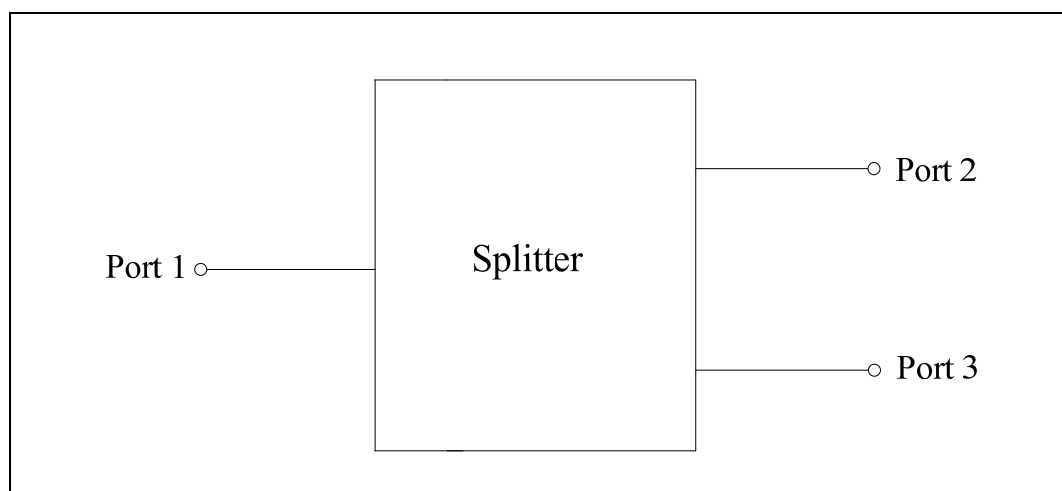
รูปที่ 2.11 ลักษณะการทำงานของวงจรขยายคลาสเอบีแบบพุชพูล

จากรูปวงจขยายสัญญาณคลาสเอบีแบบพุชพูล กำลังเอาต์พุตซึ่งเป็นผลรวมกำลังขยายสัญญาณจากมอสเฟตทั้งสองรวมกันที่โหลดสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2.3 และสำหรับกำลังทางด้านแหล่งจ่ายอินพุตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับมอสเฟตทั้งสองตัวสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2.4 สำหรับประสิทธิภาพของวงจรขยายคลาสเอบีเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาเพื่อการวิเคราะห์และปรับปรุงวงจรให้ดีที่สุดโดยสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2.5 และสำหรับอัตราขยายสัญญาณซึ่งบอกถึงการขยายกำลังของสัญญาณของวงจรซึ่งสามารถวิเคราะห์และพิจารณาได้จากสมการที่ 2.2

### 2.3 วงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณ

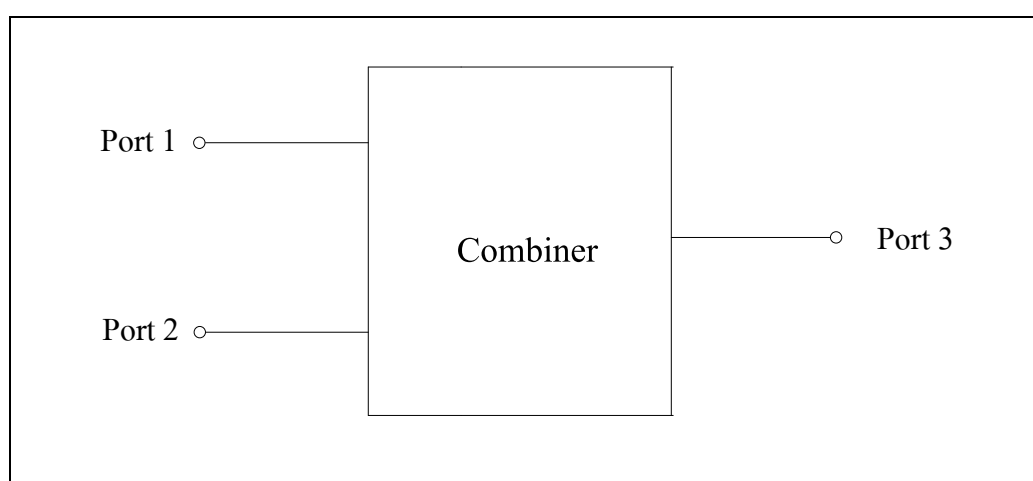
ลักษณะของวงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณมีหลายรูปแบบ ทั้งแบบ wilkinson และแบบอื่น ๆ ซึ่งการออกแบบและการสร้างอาจจะมีหลายแบบ เช่น แบบใช้หม้อแปลง ลักษณะของรูปแบบนี้จะใช้ระบบของความถี่ต่ำไม่สูงมากกำลังงานสูง แบบใช้สายโคแอกเซียลซึ่งใช้ได้ที่มีความถี่กลางระดับเมกะเฮิรตซ์และการออกแบบโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ เป็นวงจรแบบไมโครสตริป เหมาะกับงานที่ใช้กับความถี่สูงหรือช่วงกำลังงานไม่สูงมากนัก

ลักษณะวงจรแยกสัญญาณ (splitter) เป็นการแยกสัญญาณออกเป็นสองทางหรือหลายทางก็ได้แล้วแต่ความต้องการที่ออกแบบ แต่ต้องพิจารณาถึงอิมพีแดนซ์ของวงจรซึ่งคือการแมตซ์ซิ่งของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตทั้งนี้ขนาดของสัญญาณจะลดลงตามจำนวนการแยกสัญญาณด้วย ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.12 เป็นบล็อกไดอะแกรมของวงจรรวมสัญญาณจาก 1 เป็น 2 ทาง สำหรับเป็นสัญญาณอินพุตให้กับภาควงจรอื่น



รูปที่ 2.12 ลักษณะวงจรแยกสัญญาณ

ลักษณะวงจรรวมสัญญาณ (combiner) เป็นการรวมสัญญาณจากสองทิศทางหรือหลายทิศทางให้เป็นสัญญาณรวมเพียงสัญญาณเดียว ซึ่งต้องพิจารณาถึงอิมพีแดนซ์ของวงจรของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตเช่นเดียวกับวงจรแยกสัญญาณดังรูปที่ 2.13 จะเป็นบล็อกไดอะแกรมวงจรรวมสัญญาณของการรวมสัญญาณจาก 2 สัญญาณเป็นทิศทางเดียวเพื่อให้ได้ค่ากำลังรวมทั้งหมดของวงจร ซึ่งทางเอาต์พุตอิมพีแดนซ์จะต้องมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ที่จะแมตช์เพื่อให้ได้กำลังงานสูงสุดและมีการสูญเสียที่น้อยที่สุด



รูปที่ 2.13 ลักษณะวงจรรวมสัญญาณ

สำหรับการออกแบบวงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณ โดยใช้หม้อแปลงแกนเทอร์ลอยด์ ซึ่งสามารถสร้างด้วยการใช้เส้นลวดทองแดงพันรอบแกนในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อให้ได้อิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมซึ่งสามารถวิเคราะห์และออกแบบโดยใช้สมการการหาค่าความสัมพันธ์ของความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงเพื่อการตอบสนองต่อความถี่ดังสมการที่ 2.16

$$L = \frac{4R}{2\pi f} \quad (2.16)$$

โดยที่  $L$  คือ ค่าความนำไฟฟ้า ( $\mu\text{H}$ )

$R$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ (Ohms)

$f$  คือ ค่าความถี่ (MHz)

สำหรับสมการหาจำนวนรอบของการพันหม้อแปลงรอบแกนเทอร์ลอยด์สามารถวิเคราะห์และพิจารณาจากสมการที่ 2.17

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l} \quad (2.17)$$

โดยที่  $N$  คือ จำนวนรอบ

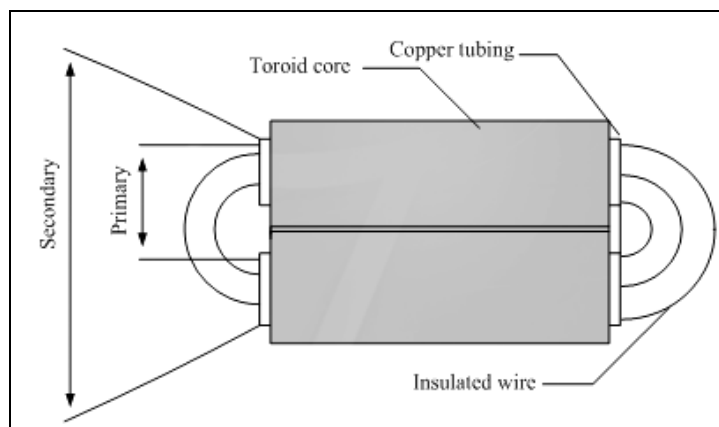
$\mu_0$  คือ สภาพความซึมซาบในอากาศ ( $4\pi \times 10^{-7} \text{ H / m}$ )

$\mu_r$  คือ สภาพความซึมซาบสัมพัทธ์ของตัวกลาง

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเทอร์ลอยด์

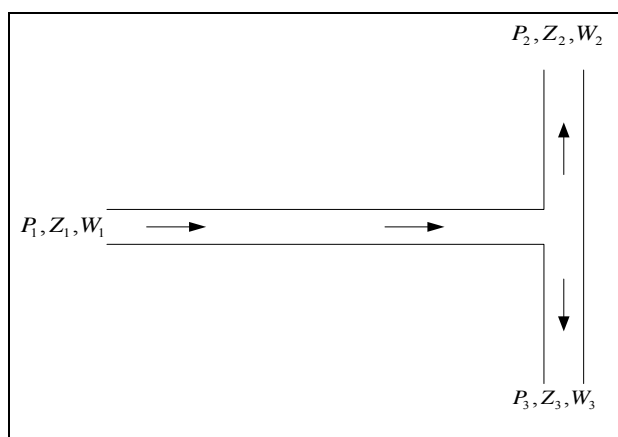
$l$  คือ ความเหนี่ยวนำ

สำหรับวงจรที่มีกำลังงานสูงจะมีการออกแบบและสร้างหม้อแปลงกำลังสูงซึ่งในระบบคลื่นความถี่วิทยุหรือระบบความถี่สูง จะมีลักษณะของการทนกระแสสูงและค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงที่ต่ำ สำหรับลักษณะของการออกแบบและสร้างจะใช้เส้นลวดหรือวัสดุที่นำไฟฟ้า ในการพันในลักษณะที่เป็นรอบไปมา เพื่อให้ได้ค่าของความนำไฟฟ้าตามที่ต้องการโดยสามารถหาได้จากสมการที่ 2.16 และ 2.17 ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ทางด้านของค่าความนำไฟฟ้า ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าของความถี่ ลักษณะของการพันจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.14 เป็นการออกแบบโดยใช้แกนเทอร์ลอยด์ที่ขนาดเท่ากันมาประกบติดกันและใช้เส้นลวดทองแดงหรือวัสดุที่นำไฟฟ้าพันรอบแกน



รูปที่ 2.14 ลักษณะหม้อแปลงกำลังสูง

ลักษณะการแยกสัญญาณและรวมสัญญาณอีกรูปแบบคือการใช้ไมโครสตริปหรือการออกแบบวงจรบนแผ่นวงจรพิมพ์ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งเป็นลักษณะการแยกสัญญาณด้วยไมโครสตริป



รูปที่ 2.15 การแยกสัญญาณด้วยไมโครสตริป

จากรูปที่ 2.15  $P_1$  ซึ่งเป็นกำลังทางด้านอินพุต  $Z_1$  เป็นอินพุตอิมพีแดนซ์และ  $W_1$  เป็นความหนาของไมโครสตริป เมื่อแยกสัญญาณทำให้ได้เอาต์พุตออกเป็นสองทางซึ่งเป็นกำลังงาน ( $P_n$ ) อิมพีแดนซ์ ( $Z_n$ ) และความหนา ( $W_n$ ) โดยสามารถออกแบบวงจรแยกสัญญาณและคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ กำลังงานและความกว้างของไมโครสตริปได้โดยพิจารณาสมการดังนี้

$$Z_1 = \frac{Z_2 \times Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (2.18)$$

$$P_2 = \left( \frac{Z_1}{Z_2} \right) P_1 \quad (2.19)$$

$$P_3 = \left( \frac{Z_1}{Z_3} \right) P_1 \quad (2.20)$$

การหาความกว้างของไมโครสตริป  $W$  สามารถหาได้จากสมการที่ 2.21 โดยที่  $W$  คือความกว้างของไมโครสตริปและ  $h$  คือความสูงของแผ่นวงจรพิมพ์และ  $B$  สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.22

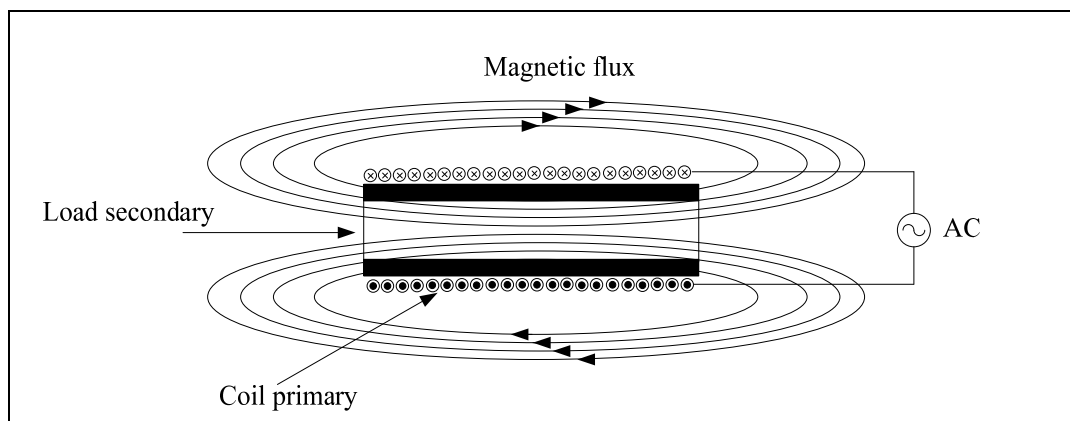
$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad (2.21)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.22)$$

## 2.4 การการเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่วิทยุ

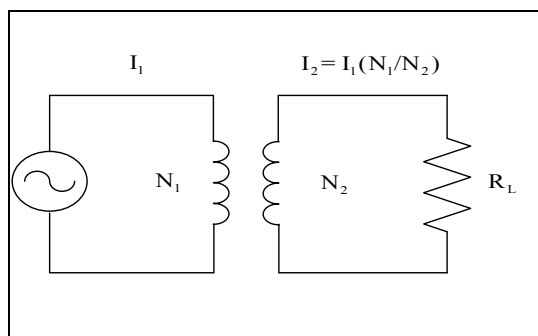
การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเกิดจากทฤษฎีทางไฟฟ้าและความร้อนร่วมกัน โดยมีสาเหตุมาจากการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electro – magnetic induction) ปรากฏการณ์ที่ผิว (skin effect) และ การถ่ายเทความร้อน (heat transfer) จากปรากฏการณ์ทั้งสาม ทำให้สามารถอธิบายการให้ความร้อนหลักการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 2.16 เมื่อให้ไฟฟ้ากระแสสลับผ่านเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานที่เป็นโลหะอยู่ภายในกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำ จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในขดลวดคล้องผ่านชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานเป็นโลหะ สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านชิ้นงานจะเหนี่ยวนำให้มีกระแสไฟฟ้าไหล โดยกระแสส่วนมากจะไหลผ่านชิ้นงานในบริเวณความลึกระดับผิว (skin depth) ของชิ้นงาน กระแสที่ไหลวนรอบชิ้นงาน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่บริเวณผิวของชิ้นงานความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่เหนี่ยวนำและความต้านทานสมมูลของเส้นทางที่กระแสไหลผ่าน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิด



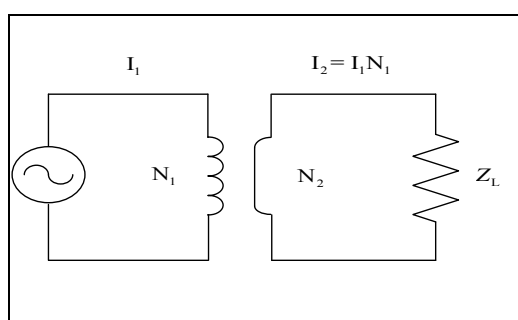


รูปที่ 2.16 หลักการพื้นฐานการเหนี่ยวนำความร้อน

การถ่ายเทไปสู่บริเวณอื่น ๆ โดยการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีที่บริเวณผิวของโลหะที่เกิดความร้อนจากรูปที่ 2.16 เป็นการแสดงถึงหลักการให้ความร้อนด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กล่าวคือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดซึ่งพันอยู่รอบชิ้นงานจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ขดลวดนั้น ชิ้นงานนั้นจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนภายในและเกิดความร้อนขึ้น ถ้าพิจารณาทั้งระบบ จะพบว่าคล้ายกับเป็นหม้อแปลงชุดหนึ่ง โดยที่ขดลวดเหนี่ยวนำจะเป็นเสมือนขดลวดปฐมภูมิ (coil primary) ของหม้อแปลงที่มีจำนวนรอบเท่ากับจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ ส่วนชิ้นงานที่เป็นโลหะที่ถูกให้ความร้อน จะถูกเปรียบเสมือนขดลวดทุติยภูมิ (secondary coil) ของหม้อแปลงที่มีจำนวนรอบเป็น 1 รอบเท่านั้น เมื่อไฟฟ้ากระแสสลับที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในชิ้นงาน จะไหลอยู่ภายในเนื้อโลหะเอง ซึ่งสามารถเปรียบได้เป็นภาระทางไฟฟ้าที่มีสภาพเกือบจะลัดวงจร เพราะว่าความต้านทานสมมูลของชิ้นงานโลหะค่อนข้างต่ำมาก จากการอธิบายข้างต้นหากจะเขียนเป็นวงจรสมมูลเปรียบเทียบกันระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้ากับการให้ความร้อนหลักการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นถึงวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าและรูปที่ 2.18 แสดงถึงวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงานโลหะ



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลของการเกิดการเหนี่ยวนำ

รูปที่ 2.18 ถ้า  $I_1$  เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นสาเหตุให้เกิดการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้า  $I_2$  ไหลวนอยู่ในชิ้นงาน จากกฎความสัมพันธ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำให้กระแสทั้งสองมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 2.23 และกำลังสูญเสียเป็นความร้อนในชิ้นงานจะมีค่าเท่ากับสมการที่ 2.24

$$I_2 = N_1 I_1 \quad (2.23)$$

โดยที่  $N_1$  คือจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ

$$P_w = (N_1 I_1)^2 R_w \quad (2.24)$$

โดยที่  $R_w$  คือความต้านทานสมมูลของชิ้นงาน

### 2.4.1 หลักการการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 2.16 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดขึ้นรอบ ๆ ขดลวดซึ่งสอดคล้องกับกฎของแอมแปร์ (ampere's law) ซึ่งวัตถุที่ใส่เข้าไปในพื้นที่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการเคลื่อนไหวเกี่ยวกับสนามแม่เหล็ก ความหนาแน่นต่อพื้นที่ การเกิดสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นที่บริเวณตรงกลางจากพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งคล้ายกับกฎของฟาราเดย์ (faraday's law) เมื่อจ่ายกระแสเข้ากับพื้นที่ผิวของวัตถุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ จะมีความสัมพันธ์กลับกันกับกระแสบนวงจรการเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ 2.25 เกิดกระแสวนบนพื้นที่ผิวของวัตถุ

$$E = \frac{d\lambda}{d\lambda} = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.25)$$

ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้เกิดพลังงานทางไฟฟ้าจากกระแสวนแปลงเป็นพลังงานในรูปของความร้อน ดังสมการที่ 2.26

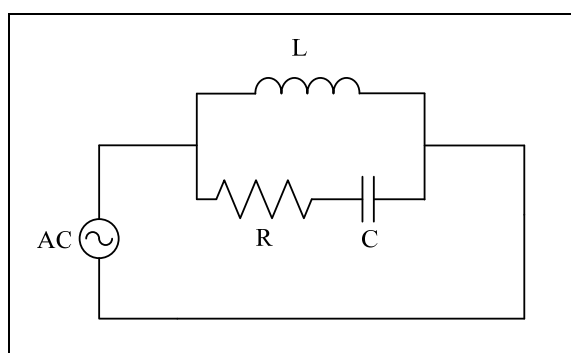
$$P = \frac{E^2}{R} = i^2 R \quad (2.26)$$

ซึ่งค่าของตัวต้านทานได้จากค่าของความหนาแน่นและค่าความซาบซึมได้ของวัตถุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ส่วนกระแสได้จากค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานความร้อนจะเกิดขึ้นได้โดยมีความสัมพันธ์กับค่าของความลึกผิว ถ้าวัตถุที่สามารถนำไฟฟ้าได้เช่น เหล็ก พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจำนวนของพลังงานความร้อนที่ได้จะมากขึ้นขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุด้วย พลังงานจะเพิกเฉยถ้าวัตถุมีขนาดเล็กมาก ๆ เนื่องจากพลังงานมีการสูญเสียมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์

### 2.4.2 วงจรเรโซแนนซ์ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน

วงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ (resonance) หมายถึงวงจรที่มีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของวงจรเท่ากับหนึ่ง นั่นคือกระแสที่ไหลในวงจรจะมีเฟสตรงกันกับแรงดันที่จ่ายให้กับวงจรและค่าอิมพีแดนซ์เทียบเท่าภายในวงจรจะเหลือแต่ค่าความต้านทานเพียงอย่างเดียวเท่านั้น เพราะค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (inductive reactance) และค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (capacitive Reactance) จะหักล้างกันหมด โดยการพิจารณาวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.19 โดยกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานจะมีมูมินเฟสกับแรงดันของแหล่งจ่าย

กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีมุมเฟสล่าช้าไป 90 องศา ส่วนกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะนำหน้าแรงดันอยู่ 90 องศา นั่นคือ มีการส่งพลังงานกลับไปมาระหว่างตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเนื่องจากความเป็นจริงในตัวเหนี่ยวนำจะมีความต้านทานรวมอยู่ด้วย ส่วนที่ตัวเก็บประจุจะมีค่าความต้านทานภายในตัวอยู่น้อยมาก จุดเรโซแนนซ์ของวงจรที่ต่อแบบขนานจะมีค่าดังสมการที่ 2.27 และจากการพิจารณาสมการที่ 2.27 เพื่อหาค่าของสมการของความถี่เรโซแนนซ์จะได้ดังสมการที่ 2.28



รูปที่ 2.19 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

$$X_C = \frac{R_L^2 + X_L^2}{X_L} \quad (2.27)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.28)$$

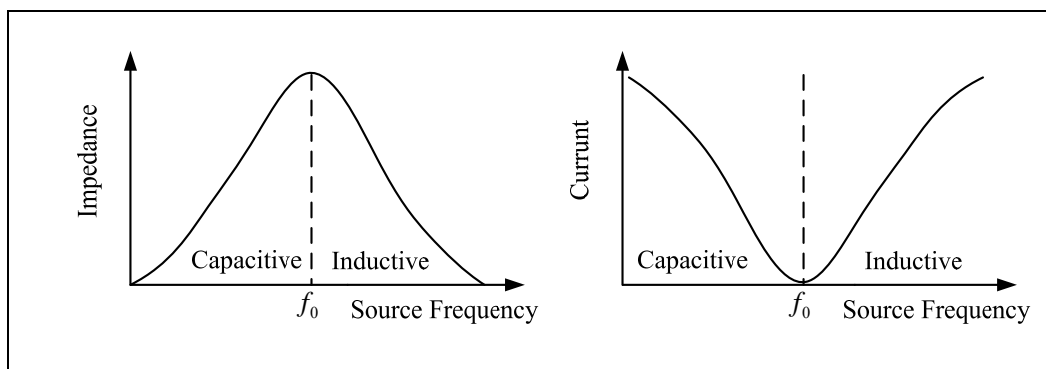
โดยที่  $f$  คือ ความถี่ (MHz)

$L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำ

$C$  คือ ค่าตัวเก็บประจุ

จากสมการทั้งหมดจะเห็นได้ว่าความต้านทานมีผลน้อยมากต่อวงจรส่วนมากจะเป็นค่าความเหนี่ยวนำ ค่าตัวเก็บประจุมากกว่าที่ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ รูปพลังงานที่ได้จะมีลักษณะที่เป็นครีฟดังรูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับความถี่ต้นกำเนิด จะเห็นว่าเมื่อความถี่ที่น้อยไปหรือมากไปทำให้เกิดการไม่แมตช์กันค่าของกำลังงานที่ได้ก็จะมีค่าน้อย

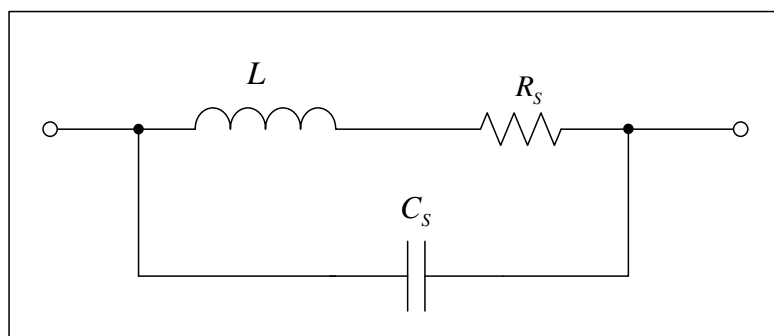
แต่เมื่อค่าของค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุเกิดการแมตช์กันก็จะทำให้อิมพีแดนซ์ที่ได้มีค่าสูงสุดและค่าของกระแสจะมีค่าต่ำทำให้ได้กำลังงานสูงสุดในการเกิดช่วงความถี่เรโซแนนซ์ด้วย จะเห็นได้ว่าในพื้นที่ของการปรับเปลี่ยนความถี่ให้มากหรือน้อยกว่าช่วงความถี่เรโซแนนซ์ ค่าของความเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นส่วนที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการปรับเปลี่ยนความถี่



รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับความถี่ต้นกำเนิด

## 2.5 ขดลวดเหนี่ยวนำ

รูปแบบโดยทั่วไปของขดลวดเหนี่ยวนำจะได้อมาจากการนำเอาเส้นลวดเส้นตรงทรงกระบอกมาทำลักษณะที่เป็นขด ซึ่งการนำเอาเส้นลวดมาทำเป็นขดจะเกิดค่าความต้านทานขึ้น นอกเหนือจากการเกิดค่าความเหนี่ยวนำและยังขึ้นอยู่กับความถี่ด้วย นอกจากนั้นขดลวดที่อยู่เคียงข้างกันยังสามารถเกิดค่าความจุแฝงและจะเพิ่มขึ้นถ้าจำนวนรอบเพิ่มขึ้นสามารถแสดงผลที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 2.21

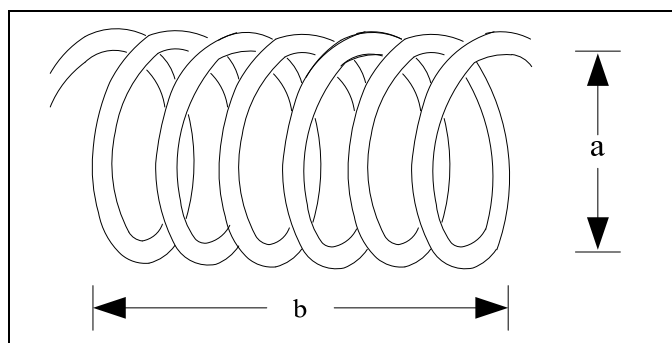


รูปที่ 2.21 การกระจายตัวของค่าความจุและความต้านทานอนุกรมขดลวดเหนี่ยวนำ

สำหรับวงจรสมมูลของขดลวดแสดงได้ดังรูปที่ 2.21 ซึ่งจะมีค่าความจุแฝงขนานอยู่คือ  $C_s$  และค่าความต้านทานอนุกรม คือ  $R_s$  ตามลำดับ ซึ่งการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศเมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังรูปที่ 2.22 ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ได้จากสมการที่ 2.29

$$L = \frac{a^2 N^2}{9a + 10b} \quad (2.29)$$

- เมื่อ  $L$  คือ ความเหนี่ยวนำ  
 $a$  คือ รัศมีของขดลวดเหนี่ยวนำ  
 $b$  คือ ความยาวของขดลวดเหนี่ยวนำ  
 $N$  คือ จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.22 ขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศ

## 2.6 สรุป

การออกแบบวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสิ่งสำคัญคือต้องเข้าใจถึงหลักการทำงานของวงจร ระบบ และโครงสร้างของอุปกรณ์ที่นำมาออกแบบและสร้าง ซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีของที่เกี่ยวข้องกับวงจรทั้งหมด โดยประกอบไปด้วยทฤษฎีของวงจรภาคกำลังซึ่งได้กล่าวถึงวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง โดยในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงให้มีประสิทธิภาพและอัตราขยายสัญญาณที่สูงต้องคำนึงถึงการออกแบบในส่วนของภาควงจรแมตซ์อิมพีแดนซ์ทั้งทางด้านอินพุตและเอาต์พุตและการจัดไบอัสให้กับมอสเฟตแต่ละตัวเพื่อให้ได้องค์ประกอบตัวอุปกรณ์ที่เหมาะสมของวงจรและสำหรับการออกแบบวงจรด้วยคลาสเอบีแบบพหุพลาได้กล่าวถึงหลักการทำงานของวงจร โดยลักษณะของวงจรต้องการขนานตัวมอสเฟตเพื่อให้

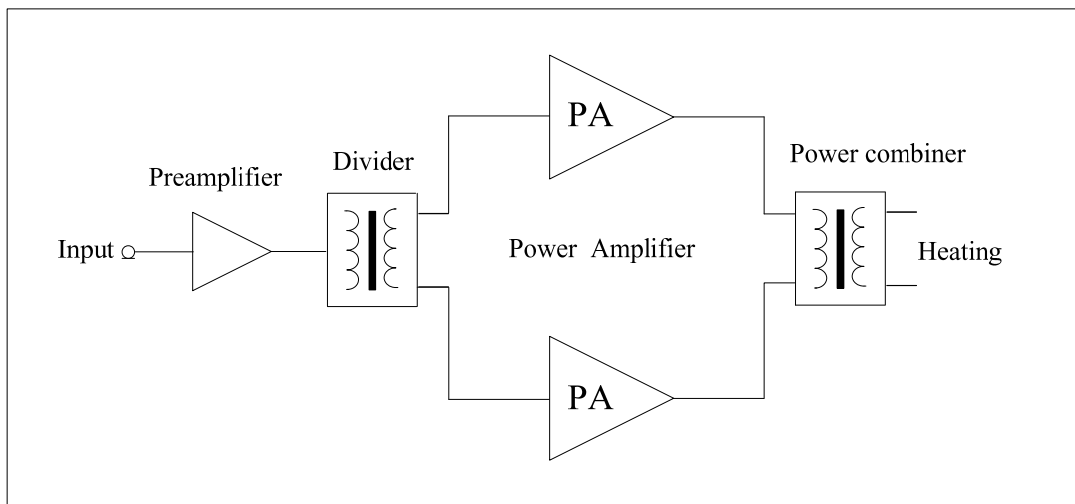
วงจรมีความสามารถในการทำงานจึงมีการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีของวงจรแยกสัญญาณเพื่อเป็นสัญญาณอินพุตของมอสเฟตแต่ละตัวที่นี้ต้องคำนึงถึงอิมพีแดนซ์ของวงจรด้วยและวงจรรวมสัญญาณสำหรับรวมกำลังงานที่ได้ทั้งหมด และสำหรับในส่วนของภาควงจรการเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการให้ความร้อนกับโหลดได้ดีที่สุดจึงได้มีการศึกษาถึงทฤษฎีพื้นฐานของการเหนี่ยวนำความร้อน หลักการให้ความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กและวงจรเรโซแนนซ์และสิ่งสำคัญสำหรับการเหนี่ยวนำคือการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมต่อการใช้งานและประยุกต์ใช้ในงานต่อไป

### บทที่ 3

## การออกแบบวงจรความถี่วิทยุและการเหนี่ยวนำความร้อน

### 3.1 กล่าวนำ

งานวิจัยนี้แสดงการออกแบบวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน ซึ่งประกอบด้วยวงจรขับกำลังสัญญาณ (pre-Amplifier) วงจรแยกสัญญาณ (splitter) วงจรขยายสัญญาณกำลังสูง (high power amplifier) วงจรรวมสัญญาณกำลังสูง (high power combiner) และภาควงจรเหนี่ยวนำความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ (induction heating) โดยบล็อกไดอะแกรมของระบบแสดงดังรูปที่ 3.1 สำหรับการออกแบบวงจรขับกำลังสัญญาณและวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง ใช้มอสเฟตและอุปกรณ์ร่วมต่าง ๆ ในการออกแบบ ภาควงจรรวมสัญญาณใช้หม้อแปลงแกนเทอร์ลอคซ์และภาควงจรการเหนี่ยวนำความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำใช้ลวดทองแดง ซึ่งแต่ละส่วนใช้การคำนวณจากสมการที่แสดงในบทที่ 2 ออกแบบให้เหมาะสมที่สุด (optimization) ซึ่งรายละเอียดของการออกแบบได้อธิบายในบทนี้



รูปที่ 3.1 โครงสร้างวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน



### 3.2 การออกแบบวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

วงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้คือภาควงจรขับกำลังสัญญาณด้านอินพุต ภาควงจรแยกสัญญาณ ภาควงจรขยายสัญญาณกำลังสูง ภาควงจรรวมสัญญาณและภาควงจรเหนี่ยวนำความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยภาควงจรขับกำลังสัญญาณ ขนาดประมาณ 10 วัตต์ เป็นสัญญาณอินพุตให้กับวงจรแยกสัญญาณ (splitter) เพื่อแยกสัญญาณเป็นสองทางเท่า ๆ กันและส่งต่อยังภาควงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุด ชุดละ 200 วัตต์และรวมสัญญาณกำลังสูงในภาคสุดท้ายมีกำลังงานขนาด 400 วัตต์สำหรับเป็นแหล่งจ่ายกำลังให้กับโหลดซึ่งเป็นวงจรเหนี่ยวนำความร้อนด้วยขดลวดและนำไปประยุกต์ใช้งานในการให้ความร้อนต่อไป

#### 3.2.1 วงจรขับกำลังสัญญาณด้านอินพุต

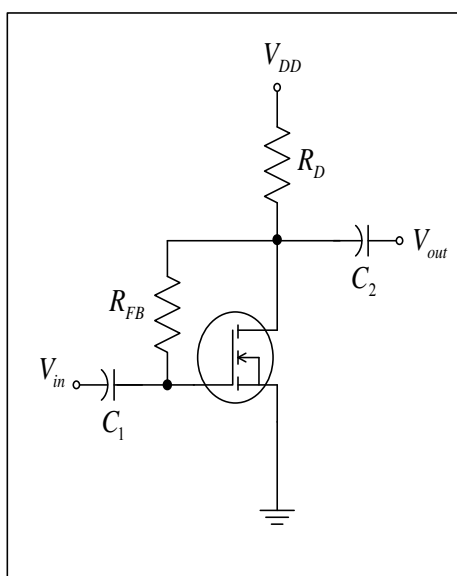
การออกแบบวงจรขับกำลังสัญญาณใช้มอสเฟตเบอร์ BLF177 ที่ย่านความถี่กลาง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ขนาดกำลังงานที่ต้องการประมาณ 10 วัตต์ โดยรับสัญญาณอินพุต 10 มิลลิวัตต์จากวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่ และกำหนดไบอัส แรงดันที่ขาเกรนเท่ากับ 20 โวลต์ แรงดันที่ขาเกตเท่ากับ 8 โวลต์ ออกแบบเป็นคลาสเอบีและออกแบบวงจรแมตซ์อิมพีแดนซ์เพื่อให้กำลังงานและมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยออกแบบวงจรเป็นแบบวงจรรองความถี่ต่ำผ่านโดยกำหนดอิมพีแดนซ์ด้านเข้าและด้านออกเท่ากับ 50 โอห์ม โดยลักษณะวงจรที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.11 เมื่อลงอุปกรณ์เรียบร้อยแล้วแสดงดังรูปที่ 3.12 โดยแผ่นวงจรมีขนาดความยาวเท่ากับ 15 เซนติเมตรและความกว้างเท่ากับ 9 เซนติเมตร เชื่อมต่อด้วยสายโคแอกเซียลทั้งด้านอินพุตและเอาต์พุตโดยการออกแบบได้จากการคำนวณจากทฤษฎีในบทที่ 2 ดังต่อไปนี้

ต้องการออกแบบวงจรขับกำลังสัญญาณย่านความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้มอสเฟตเบอร์ BLF177 มีค่าพารามิเตอร์การจัดกระจายที่จุดไบอัสเชิงเส้น  $Z_0$  เท่ากับ 50 โอห์ม  $V_{DD}$  เท่ากับ 50 โวลต์ และ  $I_c$  เท่ากับ 16 แอมป์แปร์ ดังนี้  $S_{11} = 0.86 \angle -110.20^\circ$   $S_{21} = 36.90 \angle 114.20^\circ$   $S_{12} = 0.02 \angle 25.20^\circ$  และ  $S_{22} = 0.64 \angle -84.90^\circ$  จากนั้นตรวจสอบเสถียรภาพของวงจรขับกำลังสัญญาณย่านความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ จะอยู่ในเงื่อนไขใด ซึ่งการหาค่าเสถียรภาพของวงจรจากค่าพารามิเตอร์การจัดกระจายสามารถพิจารณาจากสมการที่ 3.1

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

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } \Delta &= S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} \\
 &= (0.86\angle -110.20^\circ)(0.64\angle -84.90^\circ) - (0.02\angle 25.20^\circ)(36.90\angle 114.20^\circ) \\
 &= (0.34\angle -84.95^\circ) \\
 \text{ดังนั้น } K &= \frac{1 + (0.34)^2 - (0.86)^2 - (0.64)^2}{2(36.90)(0.02)} = -0.022
 \end{aligned}$$

จากค่า K-Factor ที่ได้จะเห็นได้ว่ามีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ซึ่งทำให้วงจรที่ออกแบบเกิดการออสซิลเลตตัวเอง ดังนั้นแก้ปัญหาโดยการออกแบบวงจรการป้อนกลับแบบลบ หรือ Negative feedback เพื่อป้องกันการออสซิลเลตของวงจรซึ่งลักษณะของวงจรจะเป็นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรการป้อนกลับแบบลบ Negative feedback

โดยสามารถออกแบบได้จากสมการที่ 3.2

$$V_{out} = -i_{in} R_{FB} \quad (3.2)$$

โดยที่  $V_{out}$  คือ กำลังเอาต์พุต (V)  
 $i_{in}$  คือ กระแสอินพุต (A)  
 $R_{FB}$  คือ ความต้านทานป้อนกลับ

ดังนั้นสามารถออกแบบได้โดยกำหนดให้  $V_{out}$  เท่ากับ 350 โวลต์ และ  $i_{in}$  เท่ากับ 1 แอมป์แปร์ และคำนวณจากสมการที่ 3.2 ได้ค่าความต้านทานป้อนกลับเท่ากับ 350 โอห์ม จากนั้นหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสำหรับ conjugate match โดยคำนวณหาจากสมการของ  $\Gamma_{MS}$  และ  $\Gamma_{ML}$  ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$\Gamma_{MS} = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4|C_1|^2}}{2C_1} \quad (3.3)$$

$$\Gamma_{ML} = \frac{B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4|C_2|^2}}{2C_2} \quad (3.4)$$

สามารถคำนวณค่า  $B_1$  ได้จากสมการที่ 3.5

$$\begin{aligned} B_1 &= 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2 \\ &= 1.2144 \end{aligned} \quad (3.5)$$

คำนวณค่า  $C_1$  ได้จากสมการที่ 3.6

$$\begin{aligned} C_1 &= S_{11} - \Delta S_{22}^* \\ &= 1.204 \angle -64.79^\circ \end{aligned} \quad (3.6)$$

นำค่า  $B_1$  และ  $C_1$  แทนในสมการ 3.3 จะได้  $\Gamma_{MS} = 1.36 \angle 64.79^\circ$  และสามารถคำนวณหาค่า  $B_2$  ได้จากสมการที่ 3.7

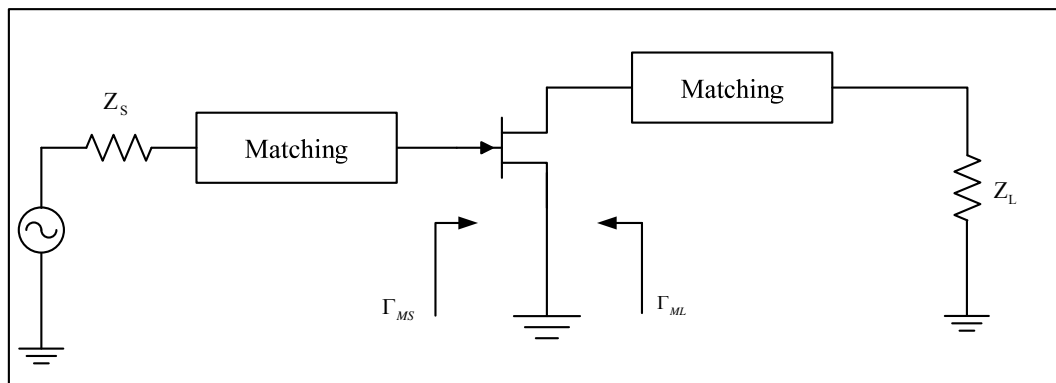
$$\begin{aligned} B_2 &= 1 + |S_{22}|^2 - |S_{11}|^2 - |\Delta|^2 \\ &= 0.5544 \end{aligned} \quad (3.7)$$

คำนวณค่า  $C_2$  ได้จากสมการที่ 3.8

$$C_2 = S_{22} - \Delta S_{11}^* \quad (3.8)$$

$$= 0.786 \angle 74.97^\circ$$

นำค่า  $B_2$  และ  $C_2$  แทนในสมการที่ 3.4 จะได้  $\Gamma_{ML} = 1.287 \angle -74.97^\circ$  จากค่า  $\Gamma_{MS}$  และ  $\Gamma_{ML}$  ที่คำนวณได้มาออกแบบวงจรแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ทั้งด้านอินพุตและด้านเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 3.3



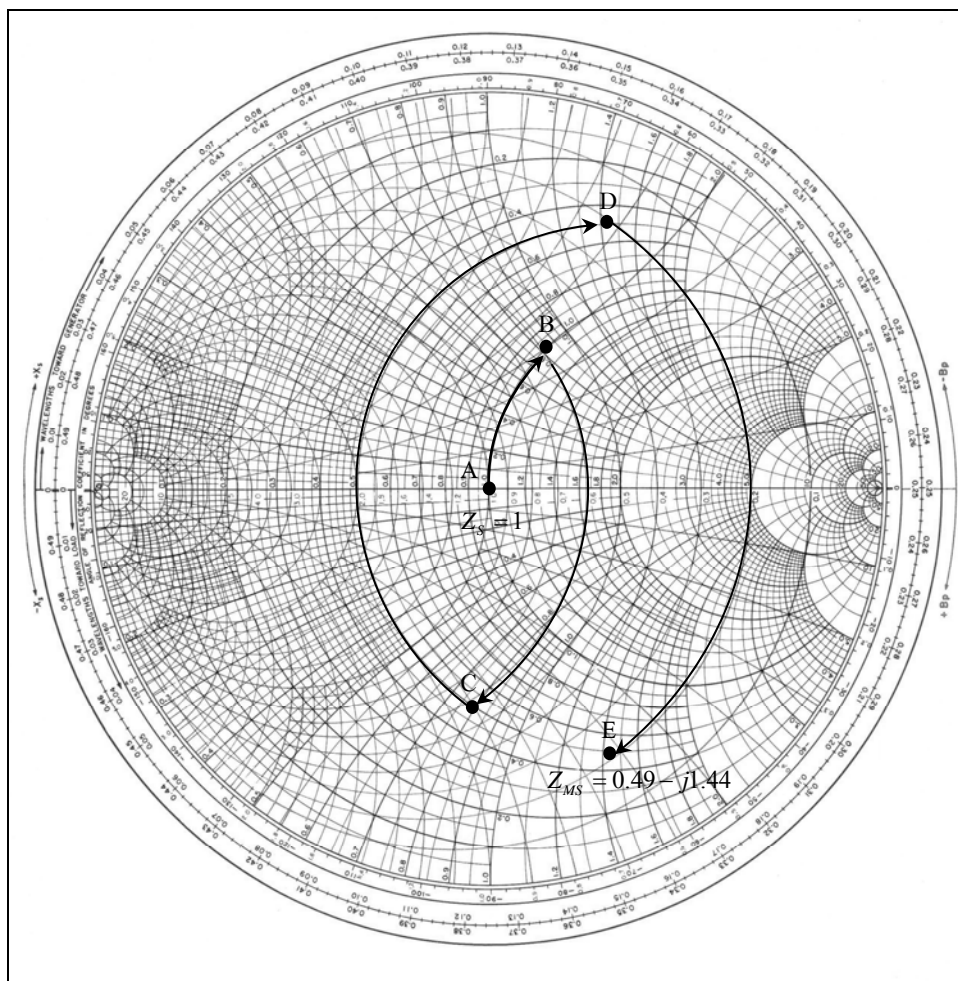
รูปที่ 3.3 วงจรโครงข่ายแมตซ์ซึ่ง

การคำนวณโครงข่ายแมตซ์ซึ่ง พิจารณาด้านเข้า ออกแบบโดยแปลง  $\Gamma_{MS}$  ให้อยู่ในรูปของ  $Z_{MS}$  ดังนี้

$$Z_{MS} = \left( \frac{1 + \Gamma_{MS}}{1 - \Gamma_{MS}} \right) (50) \quad (3.9)$$

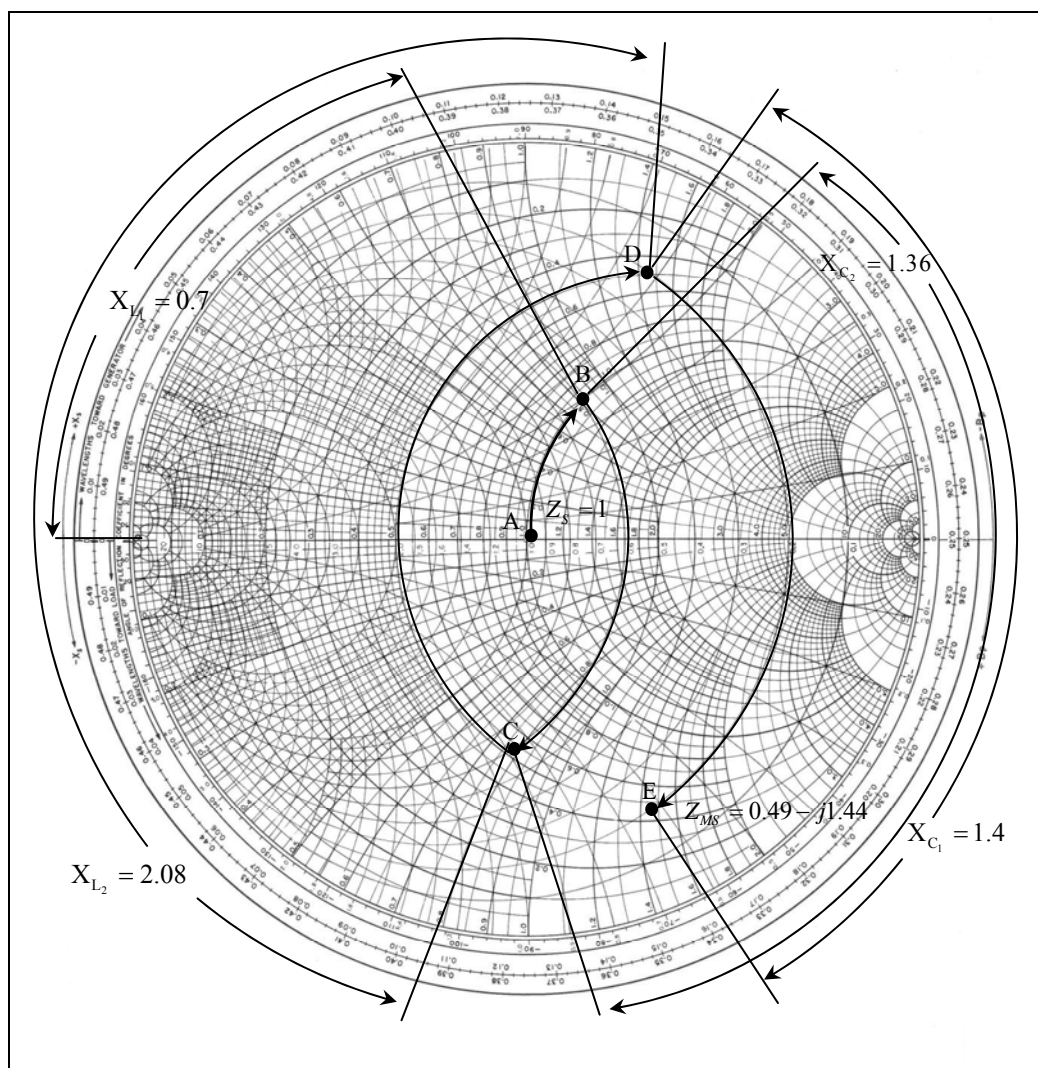
$$= 24.5 - j72$$

จากการกำหนดและคำนวณจะได้อิมพีแดนซ์ด้านเข้า  $Z_S$  เท่ากับ 50 โอห์ม และอิมพีแดนซ์ด้านออก  $Z_{MS}$  เท่ากับ  $24.5 - j72$  นอร์มัลไลซ์  $Z_S$  และ  $Z_{MS}$  ด้วย 50 จะได้  $Z_S$  เท่ากับ 1 และ  $Z_{MS}$  เท่ากับ  $0.49 - j1.44$  แล้วนำค่า  $Z_S$  และ  $Z_{MS}$  ที่ได้จากการนอร์มัลไลซ์พล็อตลงบนแผนภูมิสมิท โดยกำหนดจุด  $Z_{MS}$  และ  $Z_S$  และลากเส้นจาก  $Z_S$  ไปยังจุด  $Z_{MS}$  เพื่อจำกัดค่าจริงแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การกำหนดจุด  $Z_S$  และ  $Z_{MS}$  สำหรับบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริงด้านอินพุต

เมื่อจำกัดค่าจริงดังรูปที่ 3.14 แล้ว จากนั้นหาค่าความยาวของแต่ละเส้นที่ลากจากอิมพีแดนซ์อินพุต  $Z_S$  ถึง อิมพีแดนซ์เอาต์พุต  $Z_{MS}$  ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.5 โดยเส้นโค้ง AB คือการจำกัดค่าเพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำ  $L$  แบบอนุกรมซึ่งมีค่า  $X_{L_1} = 0.7$  เส้นโค้ง BC คือการจำกัดค่าตัวเก็บประจุ  $C$  แบบขนาน  $X_{C_1} = 1.4$  เส้นโค้ง CD คือการจำกัดค่า  $L$  อนุกรม คือ  $X_{L_2} = 2.08$  และเส้นโค้ง DE คือการจำกัดค่า  $C$  ขนาน  $X_{C_2} = 1.36$  และจากการหาความยาวของส่วนโค้งเพื่อจำกัดค่าจริงแล้วค่าที่ได้สามารถนำค่าที่ได้คำนวณหาค่าจริงจากสมการที่ 3.10 และ 3.11 ดังนี้



รูปที่ 3.5 การหาค่าความยาวบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริงด้านอินพุต

$$X_C = \left[ \frac{1}{+jC} \right] \text{ (Normalize)} \quad (3.10)$$

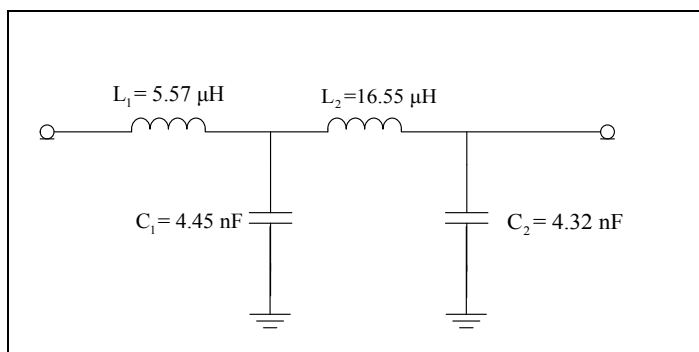
$$X_L = [+jL] \text{ (Normalize)} \quad (3.11)$$

ดังนั้นจากการแทนค่าลงในสมการที่ 3.10 และ 3.11 จะได้ค่าดังนี้  $X_{C_1} = 35.71 \Omega$   $X_{L_1} = 35 \Omega$   $X_{C_2} = 36.76 \Omega$  และ  $X_{L_2} = 104 \Omega$  การออกแบบที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ จะได้ค่าองค์ประกอบของวงจรจากการคำนวณโดยสมการที่ 3.12 และ 3.13

$$L = \frac{X_L}{\omega} \quad (3.12)$$

$$C = \frac{1}{\omega X_C} \quad (3.13)$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 3.12 และ 3.13 จะได้ค่าองค์ประกอบของวงจรดังนี้  $C_1 = 4.45 \text{ nF}$   $C_2 = 4.32 \text{ nF}$   $L_1 = 5.57 \text{ } \mu\text{H}$  และ  $L_2 = 16.55 \text{ } \mu\text{H}$  ดังนั้นจึงได้ลักษณะของวงจรโครงข่ายเมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์อินพุตดังรูปที่ 3.6

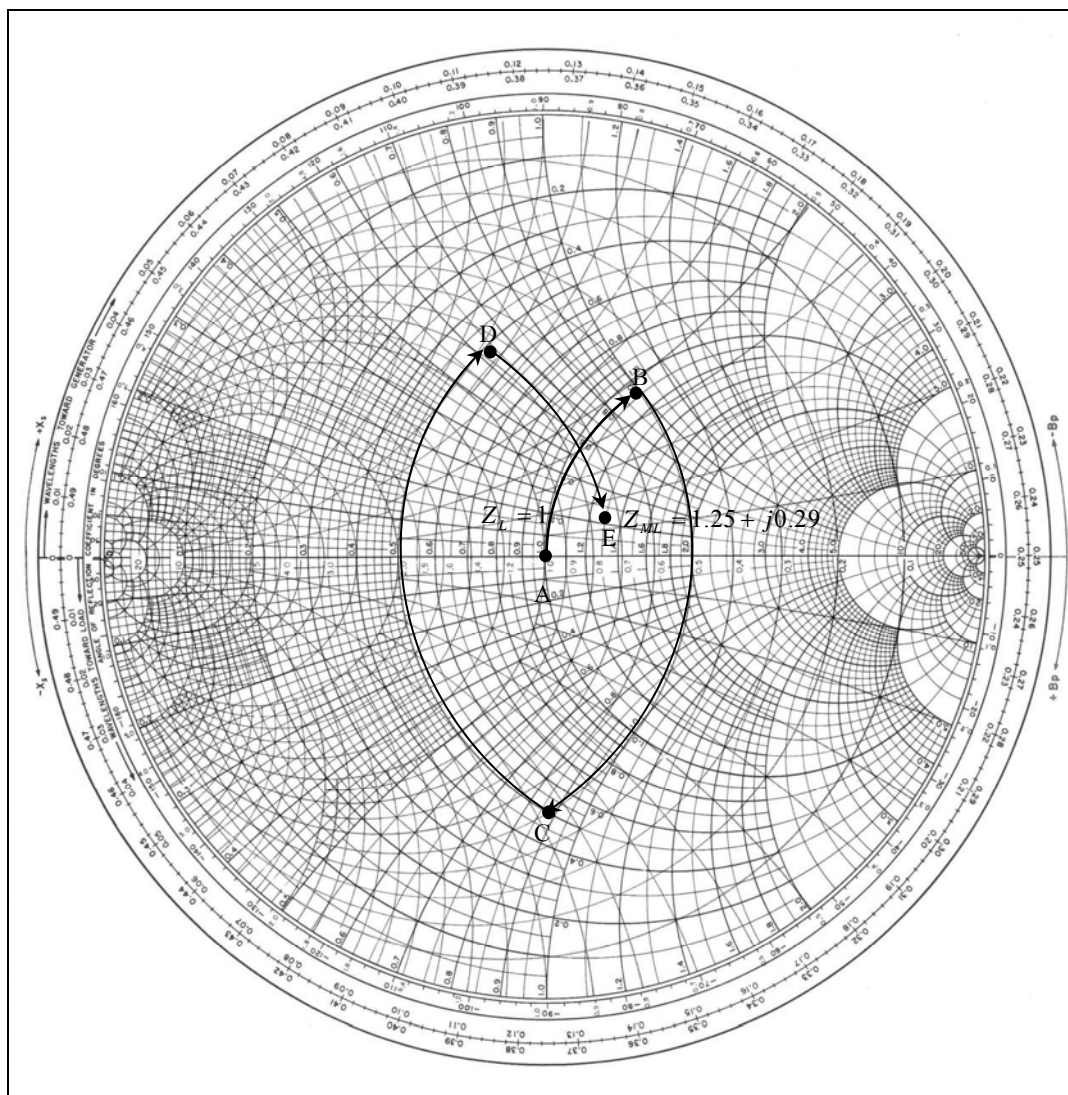


รูปที่ 3.6 วงจรโครงข่ายเมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ด้านอินพุต

พิจารณาด้านเอาต์พุตออกแบบโดยแปลง  $\Gamma_{ML}$  ให้อยู่ในรูปของ  $Z_{ML}$  ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} Z_{ML} &= \left( \frac{1 + \Gamma_{ML}}{1 - \Gamma_{ML}} \right) (50) \\ &= 62.80 + j14.67 \end{aligned} \quad (3.14)$$

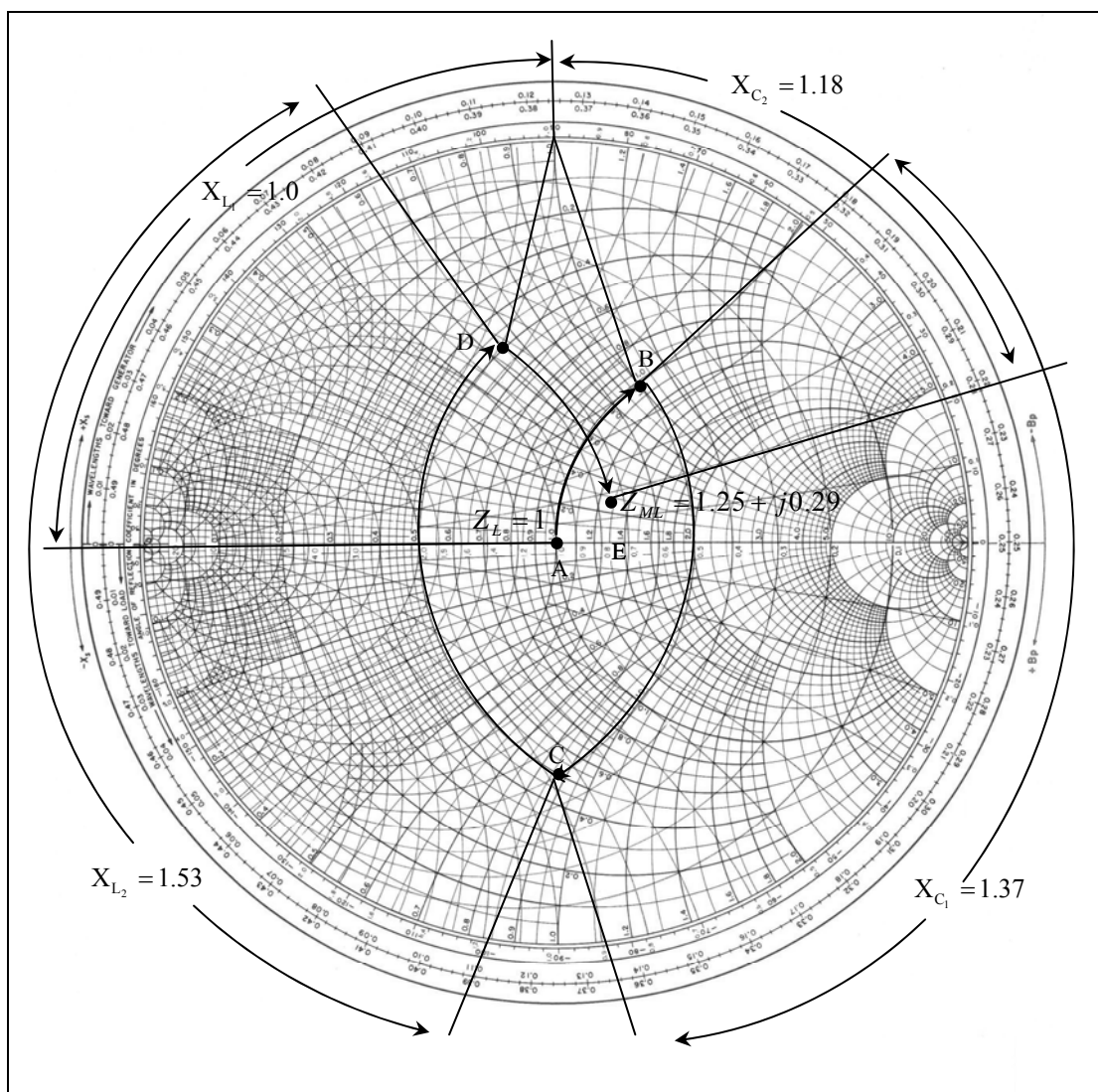
จากการกำหนดและคำนวณจะได้อิมพีแดนซ์ด้านเข้า  $Z_L$  เท่ากับ 50 โอห์มและอิมพีแดนซ์ด้านออก  $Z_{ML} = 60.80 + j14.67$  นอร์มัลไลซ์  $Z_L$  และ  $Z_{ML}$  ด้วย 50 จะได้  $Z_L = 1$  และ  $Z_{ML} = 1.25 + j0.29$  แล้วนำค่า  $Z_L$  และ  $Z_{ML}$  ที่ได้จากการนอร์มัลไลซ์พล็อตลงบนแผนภูมิสมิท โดยกำหนดจุด  $Z_{ML}$  และ  $Z_L$  และลากเส้นจาก  $Z_L$  ไปยังจุด  $Z_{ML}$  เพื่อจำกัดค่าจริงแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การกำหนดจุด  $Z_L$  และ  $Z_{ML}$  สำหรับบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริงด้านเอาต์พุต

จากนั้นหาค่าความยาวของแต่ละเส้นที่ลากจาก  $Z_L$  ถึง  $Z_{ML}$  ดังรูปที่ 3.8 โดยเส้นโค้ง AB คือการจำกัดค่าเพื่อหาค่า  $L$  อนุกรม มีค่า  $X_{L_1} = 1.0$  เส้นโค้ง BC คือการจำกัดค่า  $C$  ขนาน  $X_{C_1} = 1.37$  เส้นโค้ง CD คือการจำกัดค่า  $L$  อนุกรม คือ  $X_{L_2} = 1.53$  และเส้นโค้ง DE คือการจำกัดค่า  $C$  ขนาน  $X_{C_2} = 1.18$  และสามารถนำค่าที่ได้จากการวนหาค่าบนแผนภูมิสมิทคำนวณหาค่าจริงจากสมการที่ 3.10 และ 3.11 ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้  $X_{C_1} = 36.49 \Omega$   $X_{C_2} = 42.37 \Omega$   $X_{L_1} = 50 \Omega$  และ  $X_{L_2} = 76.5 \Omega$  และการออกแบบที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ จะได้ค่าองค์ประกอบโดยการคำนวณจากสมการที่ 3.12 และสมการที่ 3.13 จะได้ค่าองค์ประกอบคือ  $C_1 = 4.36 \text{ nF}$   $C_2 = 3.75 \text{ nF}$   $L_1 = 7.95 \mu\text{H}$  และ  $L_2 = 12.17 \mu\text{H}$

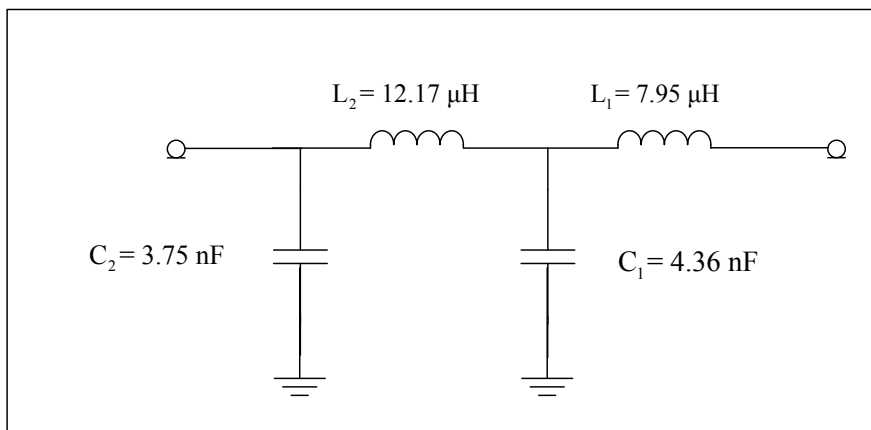




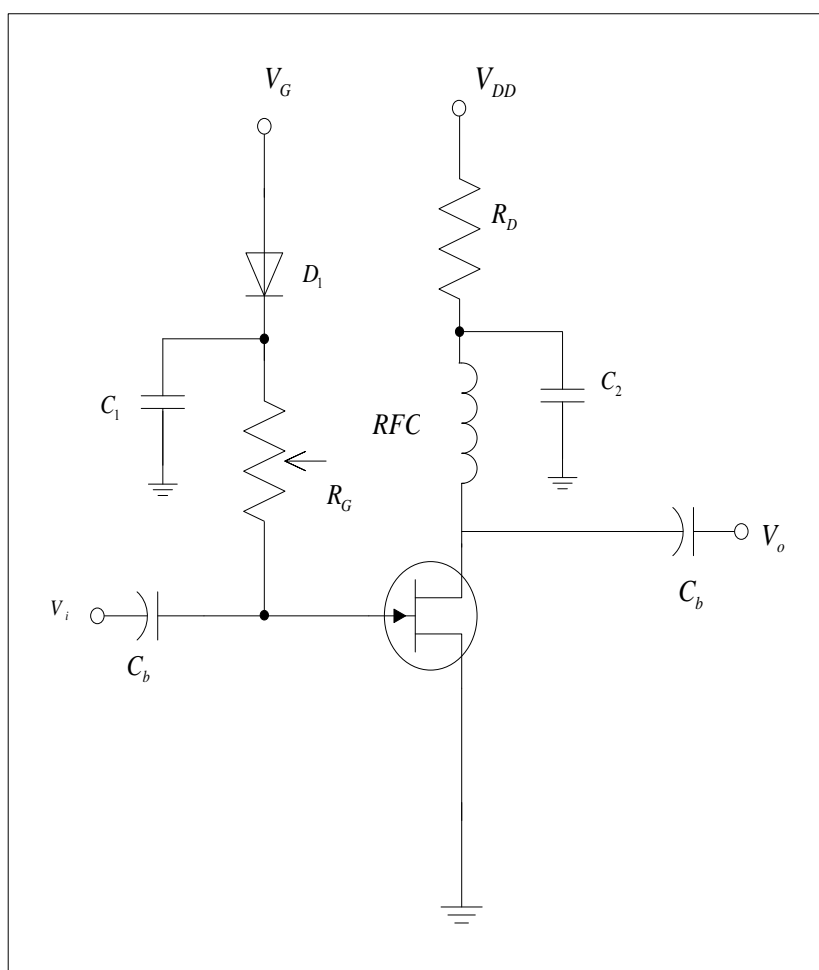
รูปที่ 3.8 การหาค่าความยาวบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริงด้านเอาต์พุต

ดังนั้นจากการวนหาและคำนวณหาค่าขององค์ประกอบของวงจรทางด้านเอาต์พุต ซึ่งลักษณะของวงจรจะแสดงดังรูปที่ 3.9 โดยลักษณะของวงจรจะเป็นแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และการออกแบบวงจรไบอัสเฟตเตอร์ BLF177 พิจารณาจากรูปที่ 3.10 โดยใช้  $V_{GS}$  เท่ากับ 5 โวลต์  $V_{DS}$  เท่ากับ 20 โวลต์ และ  $I_{DS}$  เท่ากับ 5 แอมป์เปร์ หาค่า  $R_D$  จากสมการที่ 3.15 จะได้  $R_D$  เท่ากับ 6 โอห์ม ดังนั้นได้รูปวงจรขับกำลังสัญญาณดังรูปที่ 3.11 และเมื่อลงอุปกรณ์แล้วจะแสดงดังรูปที่ 3.12

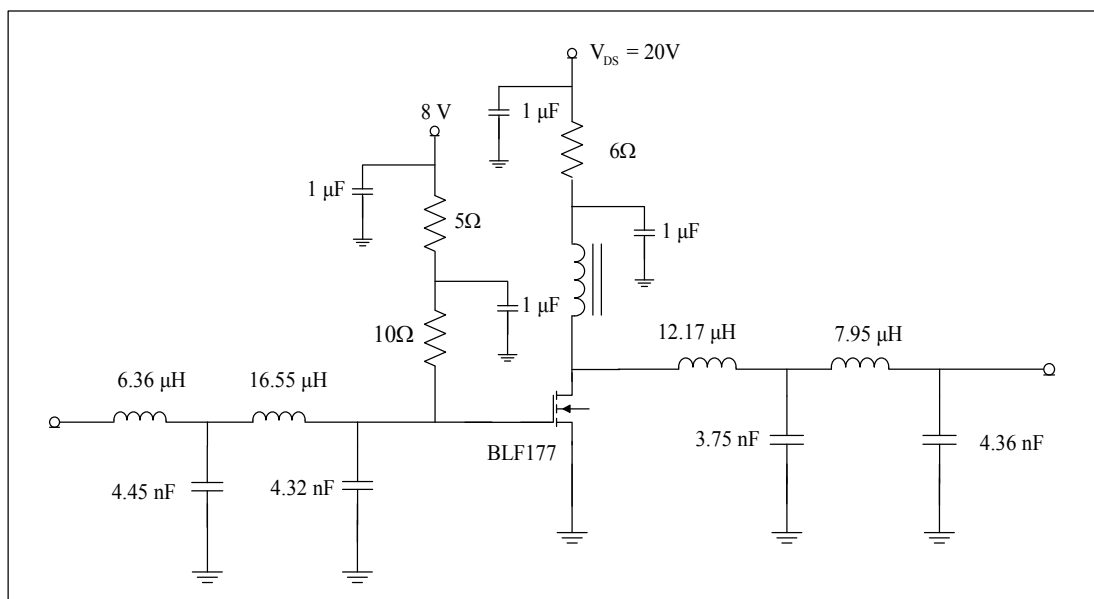
$$V_D - I_D R_D - V_{DS} = 0 \quad (3.15)$$



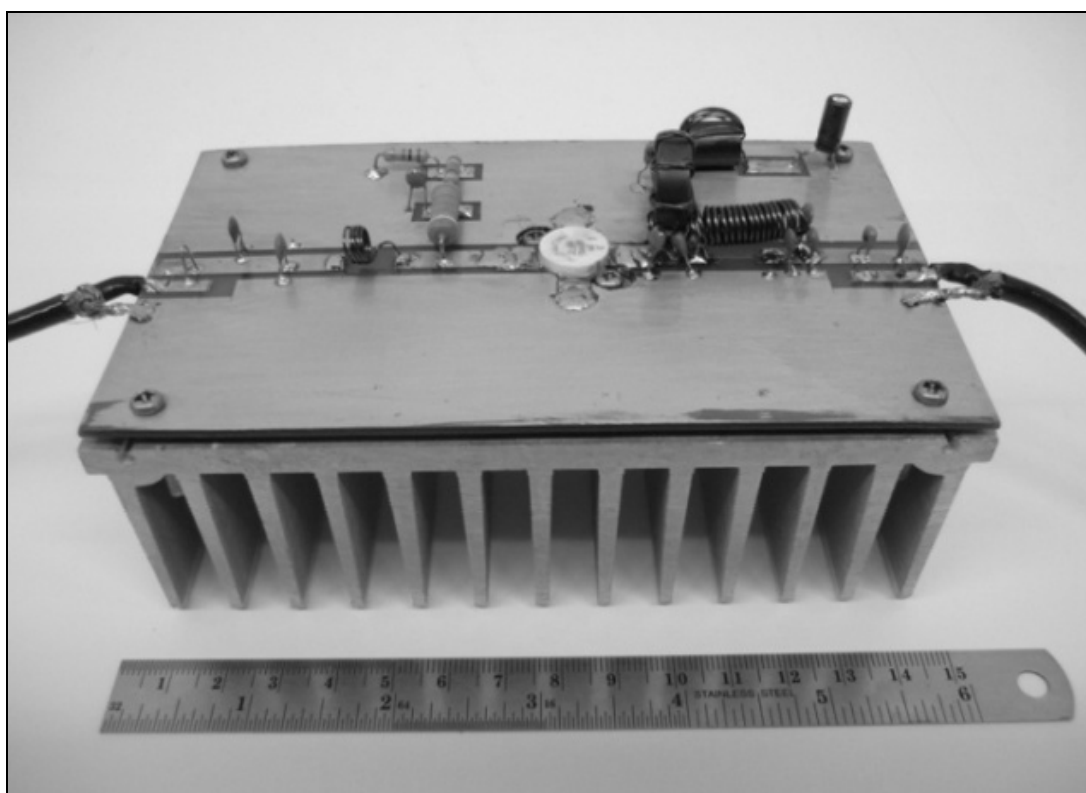
รูปที่ 3.9 วงจรโครงข่ายแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ด้านเอาต์พุต



รูปที่ 3.10 วงจรไบแอสวงจรถับกำลังสัญญาณ



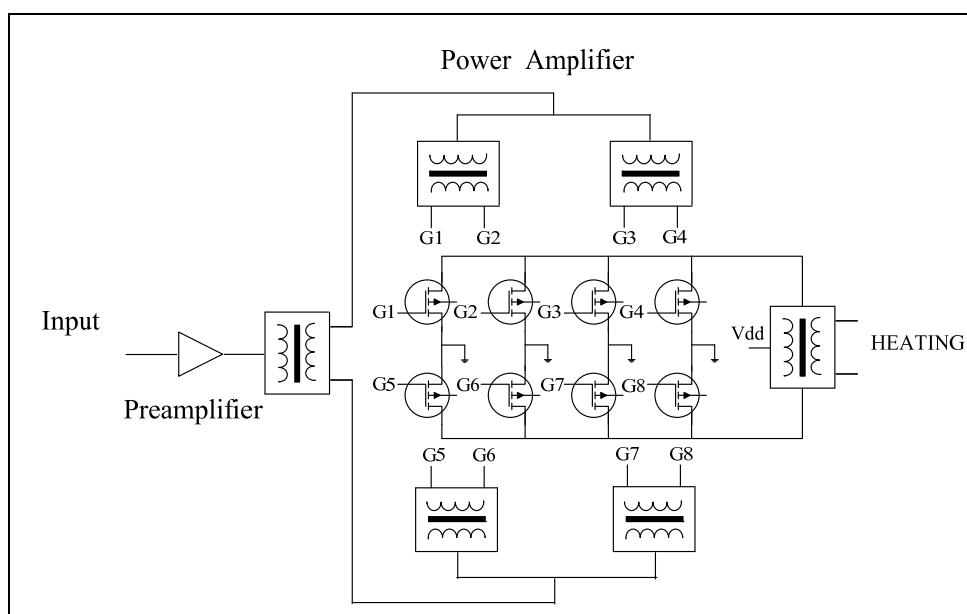
รูปที่ 3.11 วงจรขับกำลังสัญญาณ



รูปที่ 3.12 วงจรขับกำลังสัญญาณที่ลงอุปกรณ์แล้ว

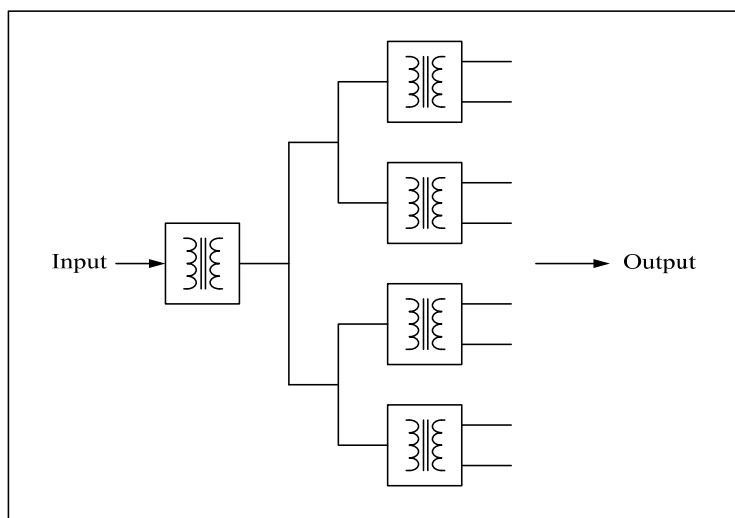
### 3.2.2 วงจรขยายสัญญาณกำลังสูง

จากบล็อกไดอะแกรมของวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน ภาค วงจรขยายสัญญาณกำลังสูง (Power Amplifier) มีสองชุดแต่ละชุดจะประกอบด้วยวงจรแยกสัญญาณและภาคขยายสัญญาณ ซึ่งออกแบบโดยใช้มอสเฟตทั้งหมด 8 ตัว เบอร์ BLF177 ต่อเป็นแบบพหุขลุขนาน 4 ตัว รวมใช้มอสเฟตทั้งหมด 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.13 แต่ละฝั่งจะมีความถี่ของสัญญาณที่ 180 องศา ดังที่จะได้อธิบายถึงการออกแบบในหัวข้อต่อไป



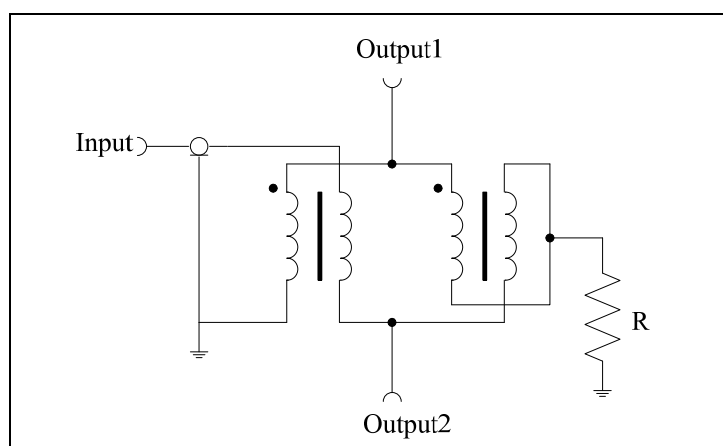
รูปที่ 3.13 ลักษณะวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงชุดเดียว

จากวงจรในรูปที่ 3.13 เป็นลักษณะของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงชุดเดียว โดยลักษณะของวงจรเป็นแบบพหุขลุ ซึ่งใช้มอสเฟตทั้งหมด 8 ตัว ขนานชุดละ 4 ตัว ดังนั้นในส่วนของวงจรจึงได้ออกแบบในส่วนของวงจรแยกสัญญาณเป็น 8 สัญญาณสำหรับเป็นอินพุตให้กับมอสเฟตแต่ละตัว โดยภาควงจรนี้รับสัญญาณอินพุตเข้ามาส่วนแรกแยกสัญญาณให้เป็น 2 ทางที่มีความถี่ 180 องศา โดยใช้หม้อแปลงและแยกสัญญาณในแต่ละชุดให้ได้สัญญาณทั้งหมดเป็น 8 สัญญาณ โดยใช้หม้อแปลงและการออกแบบด้วยไมโครสตริปของในแต่ละชุด ลักษณะของการแยกสัญญาณแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งในการออกแบบหม้อแปลงใช้แกนเทอร์ลอยด์และเส้นลวดทองแดง โดยใช้ความสัมพันธ์สมการต่าง ๆ ในบทที่ 2 ในการพิจารณาและออกแบบเพื่อได้ค่าที่ต้องการดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.14 ลักษณะการแยกสัญญาณ

สำหรับการแยกสัญญาณส่วนแรกรับสัญญาณอินพุตจากภาควงจรแยกสัญญาณที่แยกสัญญาณจากวงจรขับกำลังสัญญาณ โดยใช้หม้อแปลงในการแยกสัญญาณซึ่งลักษณะของวงจรเป็นดังรูปที่ 3.15 ซึ่งแยกสัญญาณเป็น 2 สัญญาณและให้มีความต่างเฟสกัน 180 องศา ใช้หม้อแปลง 2 ลูก และใช้สมการที่ 3.16 และ 3.17 เพื่อหาค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงและจำนวนรอบของการพัน ตามลำดับ เพื่อให้ตอบสนองกับความถี่ที่ต้องการโดยอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม พันในอัตราส่วน 1 : 1 ทำให้อิมพีแดนซ์เอาต์พุตเท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งหม้อแปลงแยกสัญญาณที่สร้างจะเป็นดังรูปที่ 3.16



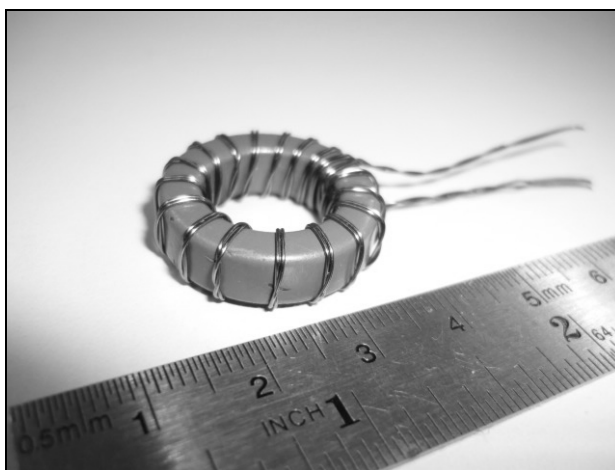
รูปที่ 3.15 วงจรหม้อแปลงด้านอินพุต

$$L = \frac{4R}{2\pi f} \quad (3.16)$$

โดยที่  $R$  เท่ากับ 50 โอห์ม และ  $f$  เท่ากับ 1 เมกะเฮิรตซ์ ดังนั้นจะได้  $L$  เท่ากับ 31.83  $\mu\text{H}$  จากนั้น ออกแบบหาจำนวนรอบจากสมการที่ 3.16

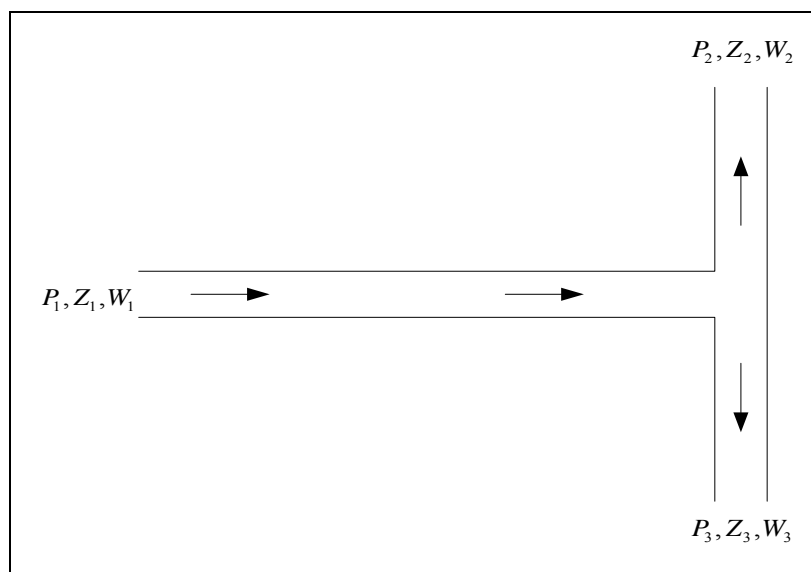
$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l} \quad (3.17)$$

การออกแบบหม้อแปลงแยกสัญญาณจะพิจารณาหาจำนวนรอบของการพันของ หม้อแปลงแกนเทอร์ลอยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกเท่ากับ 23.9 มิลลิเมตร รอบใน 14.2 มิลลิเมตร และความสูงเท่ากับ 7.92 มิลลิเมตร จะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์จากตารางคุณสมบัติ ของแกนเทอร์ลอยด์คือ  $l$  เท่ากับ 5.97 เซนติเมตร  $A$  เท่ากับ  $36.2 \times 10^{-6}$  และ  $\mu_r$  เท่ากับ 120 จาก สมการที่ 3.17 จะได้จำนวนรอบเท่ากับ 18.75 รอบ



รูปที่ 3.16 ลักษณะหม้อแปลงด้านอินพุตที่ออกแบบ

จากสัญญาณที่ได้เป็น 2 สัญญาณแล้วสามารถออกแบบวงจรแยกสัญญาณด้วย ไมโครสตริปต่อเพื่อให้ได้สัญญาณเป็น 4 เส้นทาง ดังที่แสดงในรูปที่ 3.14 โดยลักษณะการออกแบบ จะเป็นดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ลักษณะการแยกสัญญาณด้วยไมโครสตริป

จากรูปที่ 3.17 กำลังทางด้านอินพุต  $P_1$  อินพุตอิมพีแดนซ์  $Z_1$  และความหนาของไมโครสตริป  $W_1$  เมื่อแยกสัญญาณทำให้ได้เอาต์พุตออกเป็นสองทางซึ่งเป็นกำลังงานอิมพีแดนซ์และความหนาโดยสามารถออกแบบวงจรแยกสัญญาณและคำนวณหาอิมพีแดนซ์ กำลังงานและความกว้างของไมโครสตริปได้โดยพิจารณาสมการที่ 2.18 สมการที่ 2.19 และสมการที่ 2.20 โดยจากสัญญาณอินพุตที่มาจากหม้อแปลงแยกสัญญาณค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์มซึ่งเท่ากับ  $Z_1$  เท่ากับ 50 โอห์ม จากความสัมพันธ์ตั้งสมการที่ 2.18 สมการที่ 2.19 และสมการที่ 2.20 จะได้  $Z_2$  และ  $Z_3$  เท่ากับ 100 โอห์ม และกำลังงานของ  $P_2$  และ  $P_3$  จะลดลงครึ่งหนึ่งของสัญญาณอินพุต

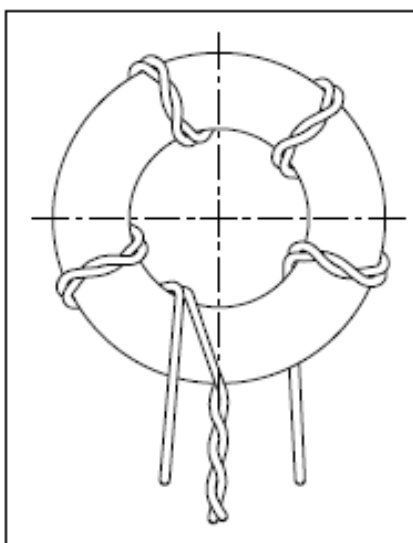
การพิจารณาความกว้างของไมโครสตริป จากการออกแบบเลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์มีค่าคงตัวทางไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.8 ความหนาแผ่นวงจรพิมพ์ ( $h$ ) เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตรที่ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์ม

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad (3.18)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.19)$$

พิจารณาด้านอินพุตคำนวณหาค่า  $B$  จากสมการที่ 3.19 จะได้  $B = 5.40$  และแทนค่าในสมการที่ 3.8 จะได้  $w = 0.922h$  และ  $h = 1.6$  มิลลิเมตร ดังนั้น  $w = 1.47$  มิลลิเมตร และเมื่อพิจารณาด้านเอาต์พุตที่ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 100 โอห์ม คำนวณหาค่า  $B$  จะได้  $B = 2.702$  และเมื่อแทนค่าในสมการที่ 3.8 จะได้  $w = 0.33h$  ซึ่ง  $h = 1.6$  มิลลิเมตร ดังนั้น  $w = 0.52$  มิลลิเมตร

จากสัญญาณที่ได้ทั้งหมด 4 สัญญาณ ออกแบบวงจรแยกสัญญาณต่อ เพื่อให้ได้สัญญาณทั้งหมด 8 สัญญาณ โดยลักษณะการออกแบบใช้หม้อแปลงพันในอัตราส่วน 4 : 1 ดังวงจรในรูปที่ 3.18 ซึ่งใช้หม้อแปลงเพื่อปรับค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรจาก 100 โอห์ม ให้เท่ากับ 25 โอห์ม ซึ่งการออกแบบใช้เส้นลวดทองแดงสองเส้นพันรอบหม้อแปลงแกนเทอร์ลอยด์ มีการแมตซ์ซึ่งโดยใช้สมการที่ 3.16 และ 3.17 และแยกสัญญาณด้วยวิธีไมโครสตริปให้ได้สัญญาณ 8 สัญญาณอินพุต ซึ่งสัญญาณที่ได้จากหม้อแปลงทำให้อินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ 25 โอห์ม เมื่อแยกสัญญาณด้วยไมโครสตริปจะได้อิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม



รูปที่ 3.18 ลักษณะหม้อแปลงแยกสัญญาณด้านอินพุต

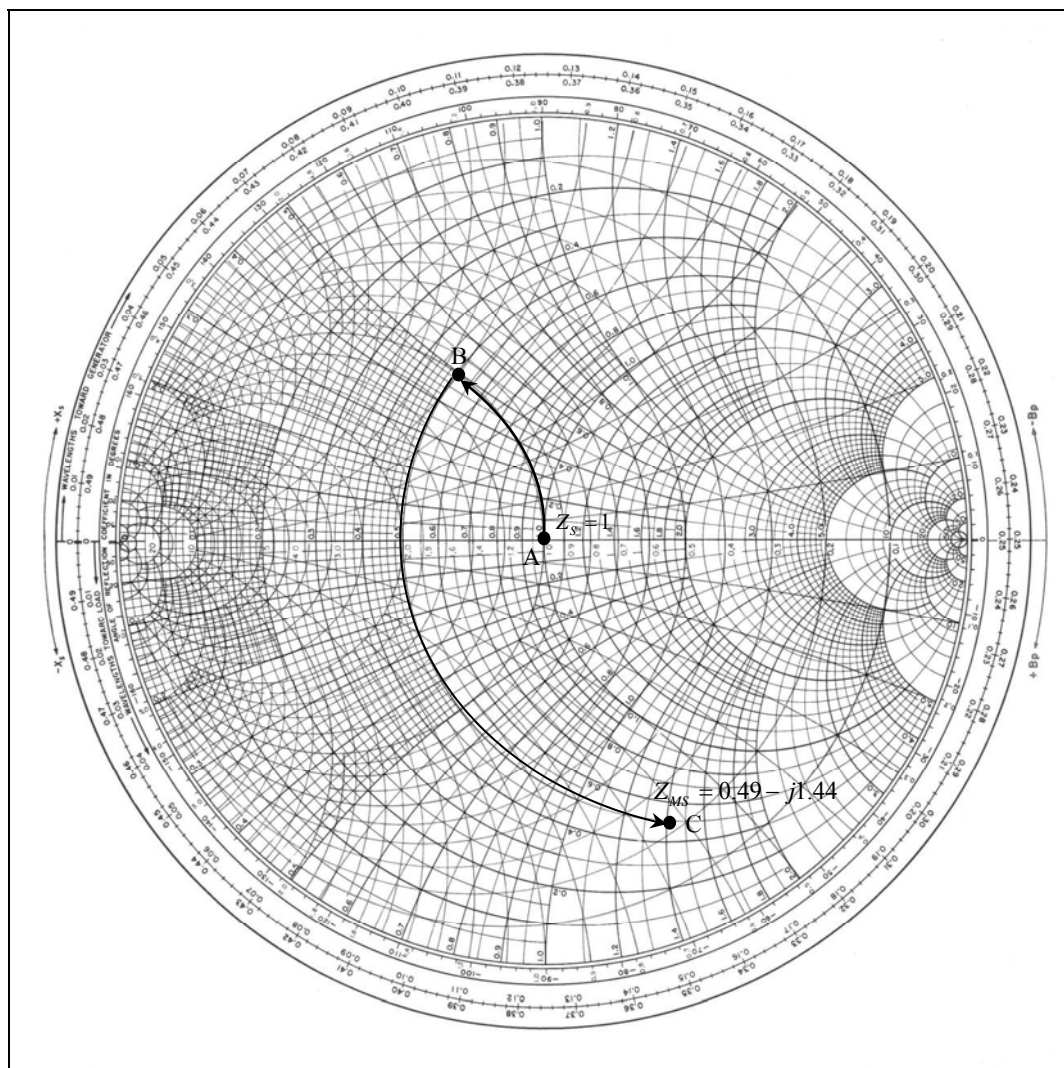
พิจารณหาจำนวนรอบการพันของหม้อแปลงแกนเทอร์ลอยด์ ซึ่งใช้แกนเทอร์ลอยด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกเท่ากับ 18 มิลลิเมตร รอบใน 7 มิลลิเมตร และความสูงเท่ากับ 6 มิลลิเมตร จะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์จากตารางคุณสมบัติคือ  $\mu_0$  เท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7} H/m$  เท่ากับ 4.01 เซนติเมตร  $A$  เท่ากับ  $34.9 \times 10^{-6}$  และ  $\mu_r$  เท่ากับ 120 และจากการคำนวณด้วยสมการที่ 3.17 จึงได้จำนวนรอบเท่ากับ 15.53 รอบ โดยลักษณะหม้อแปลงที่ได้ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.19





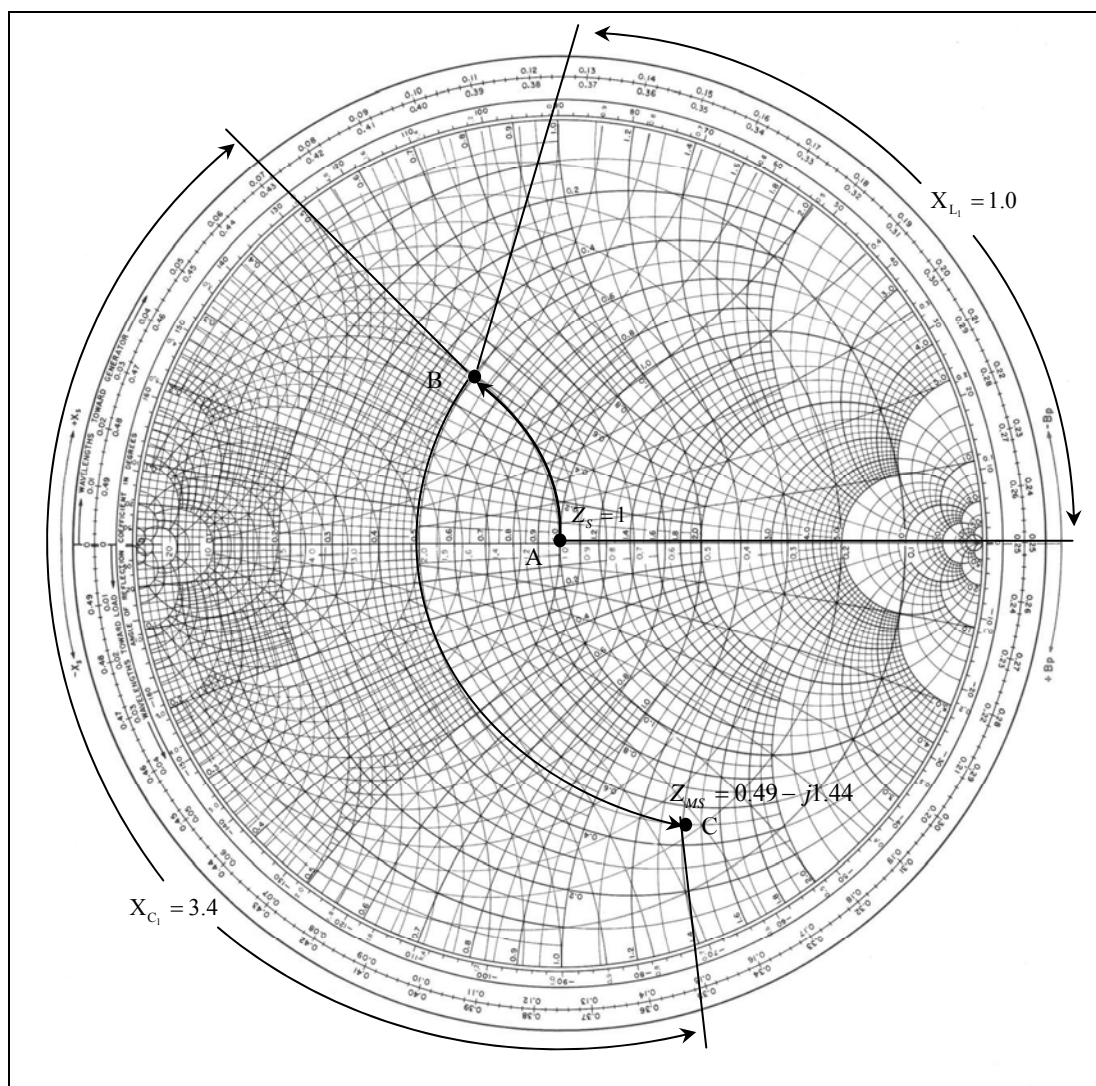
รูปที่ 3.19 ลักษณะหม้อแปลงแยกสัญญาณด้านอินพุตที่ออกแบบ

การออกแบบวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงจะออกแบบจำนวน 2 ชุด โดยในแต่ละชุดใช้มอสเฟตทั้งหมด 8 ตัว เป็นตัวขยายกำลังซึ่งใช้เบอร์ BLF177 สำหรับการออกแบบและยังต้องการขยายกำลังสัญญาณเอาต์พุตประมาณชุดละ 200 วัตต์ โดยลักษณะของวงจรจะรับกำลังสัญญาณอินพุตจากภาควงจรแยกสัญญาณซึ่งรับสัญญาณมาจากวงจรขับกำลังสัญญาณ ซึ่งแยกสัญญาณทั้งหมดเป็น 8 เส้นทางสำหรับเป็นอินพุตให้กับมอสเฟตแต่ละตัวโดยอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแยกสัญญาณเท่ากับ 50 โอห์มและเพื่อให้ได้กำลังงานและประสิทธิภาพสูงสุดในส่วนของวงจรนี้มีการออกแบบวงจรแมตซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างเอาต์พุตของวงจรแยกสัญญาณกับส่วนของมอสเฟตทั้ง 8 ตัวและการออกแบบวงจรไบอัสโดยกำหนดอิมพีแดนซ์ด้านออกและด้านเข้าเท่ากับ 50 โอห์ม การออกแบบได้จากการคำนวณจากทฤษฎีในบทที่ 2 โดยจากค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบวงจรขับกำลังสัญญาณซึ่งใช้มอสเฟตเบอร์เดียวกัน ซึ่ง  $Z_S$  เท่ากับ 50 โอห์ม  $Z_L$  เท่ากับ 50 โอห์ม  $Z_{MS}$  เท่ากับ  $24.5 - j72$  และ  $Z_{ML}$  เท่ากับ  $62.80 - j14.67$  จากค่าข้างต้นสามารถนำมา นอร์มัลไลซ์  $Z_S$  และ  $Z_{MS}$  ด้วย 50 จะได้  $Z_S$  เท่ากับ 1 และ  $Z_{MS}$  เท่ากับ  $0.49 - j1.44$  แล้วนำค่า  $Z_S$  และ  $Z_{MS}$  ที่ได้จากการนอร์มัลไลซ์พล็อตลงบนแผนภูมิสมิท โดยกำหนดจุด  $Z_{MS}$  และ  $Z_S$  และลากเส้นจาก  $Z_S$  ไปยังจุด  $Z_{MS}$  เพื่อจำกัดค่าจริงแสดงดังรูปที่ 3.20



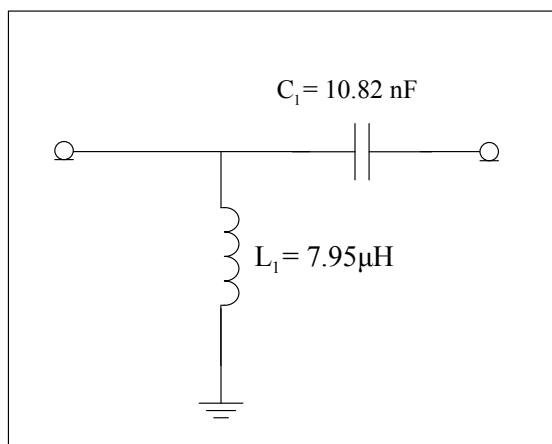
รูปที่ 3.20 การกำหนดจุด  $Z_S$  และ  $Z_{MS}$  สำหรับบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริงด้านอินพุต

จากนั้นหาค่าความยาวของแต่ละเส้นที่ลากจาก  $Z_{MS}$  ถึง  $Z_S$  ดังแสดงในรูปที่ 3.21 โดยเส้นโค้ง AB คือการจำกัดค่าเพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำ  $L$  ขนาน มีค่า  $X_{L_1}$  เท่ากับ 1 เส้นโค้ง BC คือการจำกัดค่าตัวเก็บประจุ  $C$  อนุกรม  $X_{C_1} = 3.4$  และสามารถหาค่าที่ได้คำนวณหาค่าจริงดังสมการที่ 3.10 และ 3.11 จะได้  $L_1 = 7.95 \mu\text{H}$  และ  $C_1 = 10.82 \text{ nF}$  ดังนั้นจะได้ค่าขององค์ประกอบด้านอินพุตดังรูปที่ 3.22

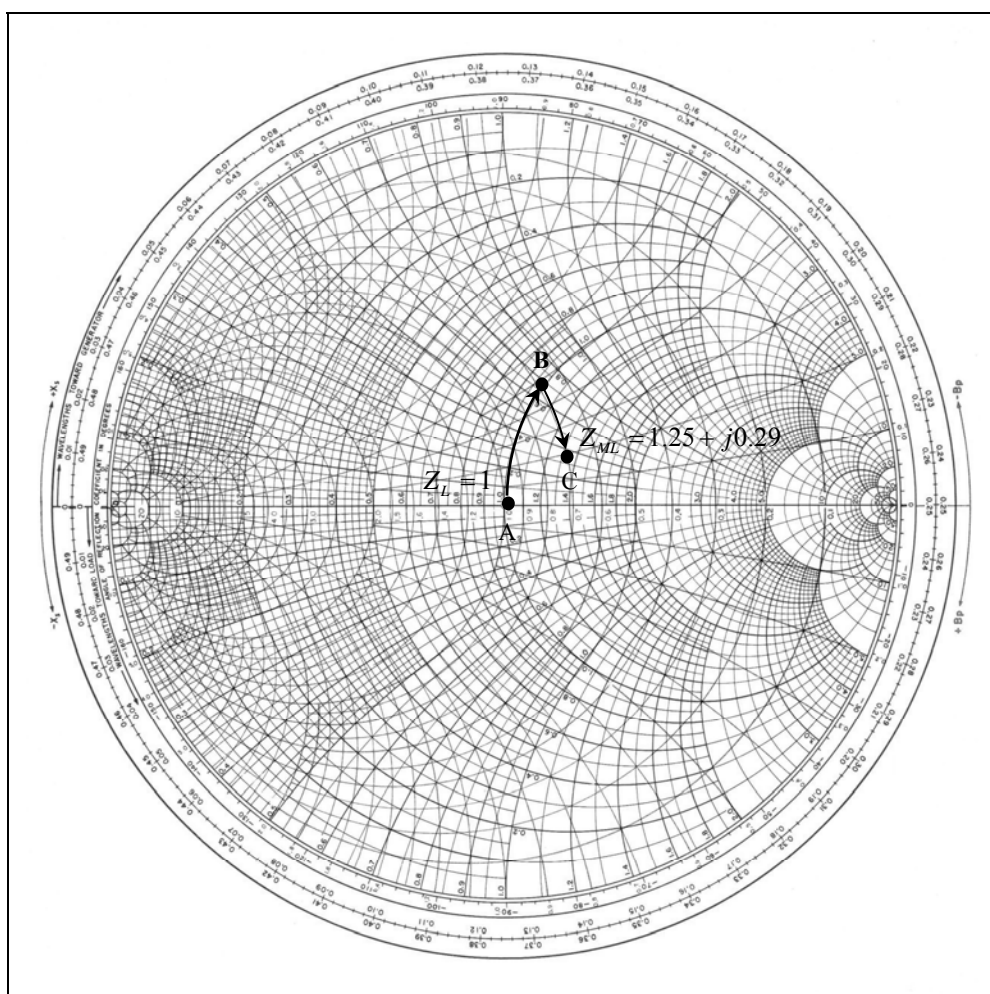


รูปที่ 3.21 การหาค่าความยาวบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริงด้านอินพุต

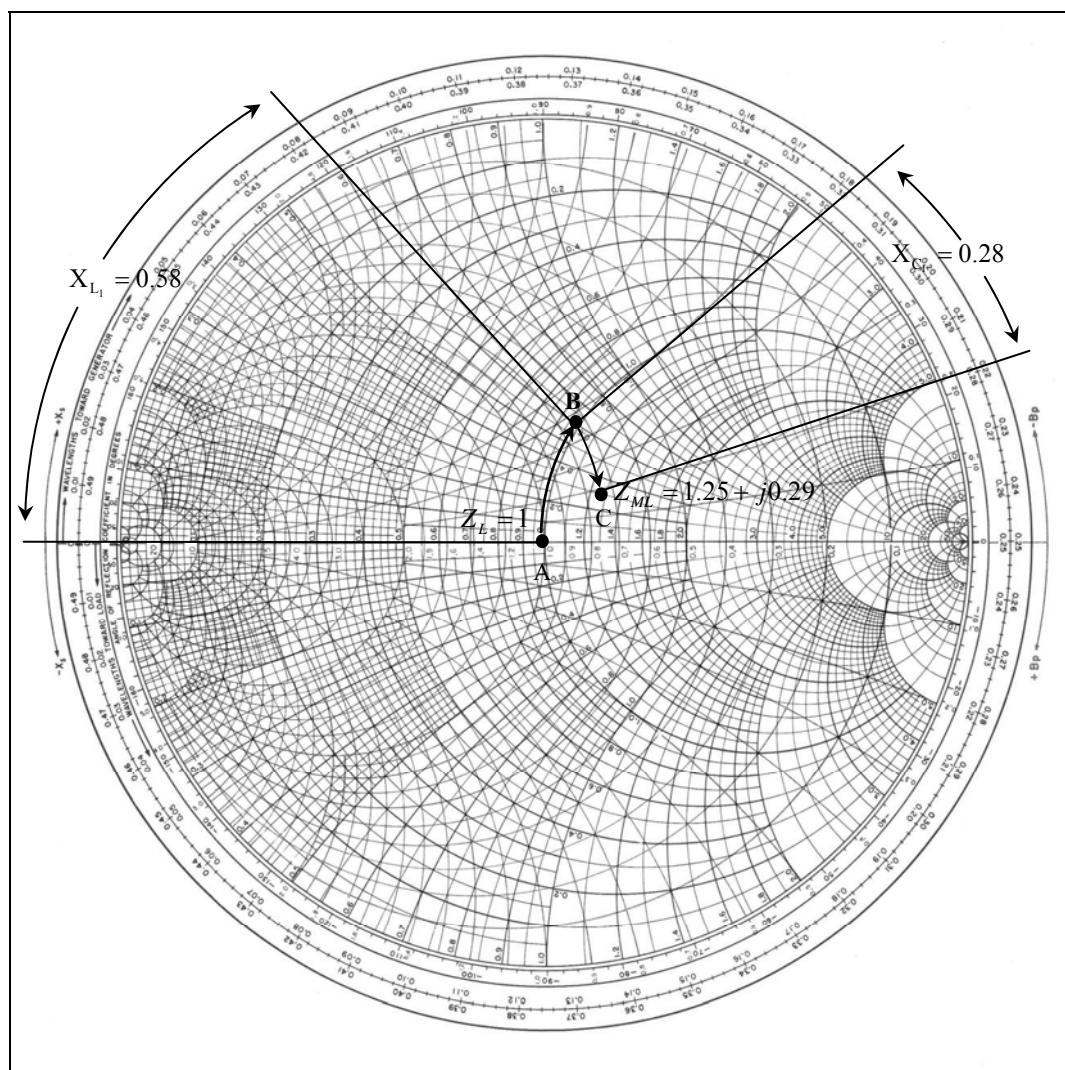
พิจารณาด้านเอาต์พุตดังรูปที่ 3.23 จากการกำหนดและคำนวณจะได้อิมพีแดนซ์ด้านเข้า  $Z_{ML} = 60.80 + j14.67$  และอิมพีแดนซ์ด้านออก  $Z_L$  เท่ากับ 50 โอห์ม นอร์มัลไลซ์  $Z_L$  และ  $Z_{ML}$  ด้วย 50 จะได้  $Z_L = 1$  และ  $Z_{ML} = 1.25 + j0.29$  แล้วนำค่า  $Z_s$  และ  $Z_{MS}$  ที่ได้จากการนอร์มัลไลซ์พล็อตลงบนแผนภูมิสมิท โดยกำหนดจุด  $Z_{ML}$  และ  $Z_L$  และลากเส้นจาก  $Z_L$  ไปยังจุด  $Z_{ML}$  เพื่อจำกัดค่าจริงแสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.22 วงจรโครงข่ายแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ด้านอินพุต

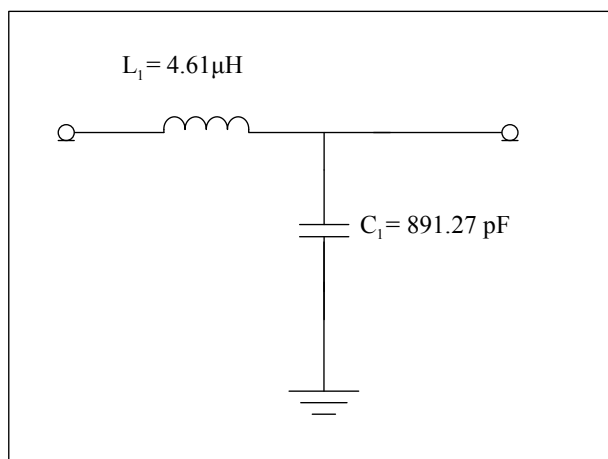


รูปที่ 3.23 การกำหนดจุด  $Z_L$  และ  $Z_{ML}$  สำหรับการวนบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริง



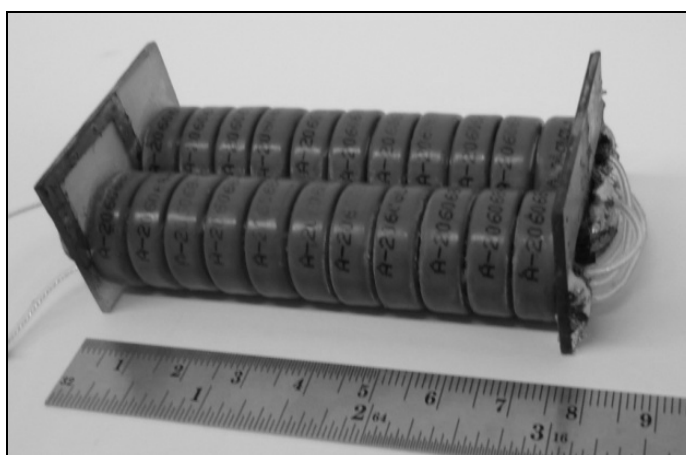
รูปที่ 3.24 การหาค่าความยาวบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริงด้านเอาต์พุต

จากนั้นหาค่าความยาวของแต่ละเส้นที่ลากจาก  $Z_L$  ถึง  $Z_{ML}$  แสดงดังรูปที่ 3.24 โดยเส้นโค้ง AB คือการจำกัดค่าเพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำ L อนุกรม มีค่า  $X_{L_1} = 0.58$  เส้นโค้ง BC คือการจำกัดค่าตัวเก็บประจุ C ขนาน  $X_{C_1} = 0.28$  และสามารถหาค่าที่ได้คำนวณหาค่าจริงดังสมการที่ 3.10 และ 3.11 จากค่าที่ได้คำนวณจากสมการที่ 3.10 และ 3.11 ดังนั้น  $X_{C_1} = 178.57 \Omega$  และ  $X_{L_1} = 29 \Omega$  ซึ่งการออกแบบที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ จะได้ค่าองค์ประกอบจากการคำนวณจากสมการที่ 3.12 ซึ่งจะได้  $C_1 = 891.27 \text{ pF}$  และ  $L_1 = 4.61 \mu\text{H}$  ดังนั้นจะได้ค่าขององค์ประกอบด้านเอาต์พุตดังรูปที่ 3.25

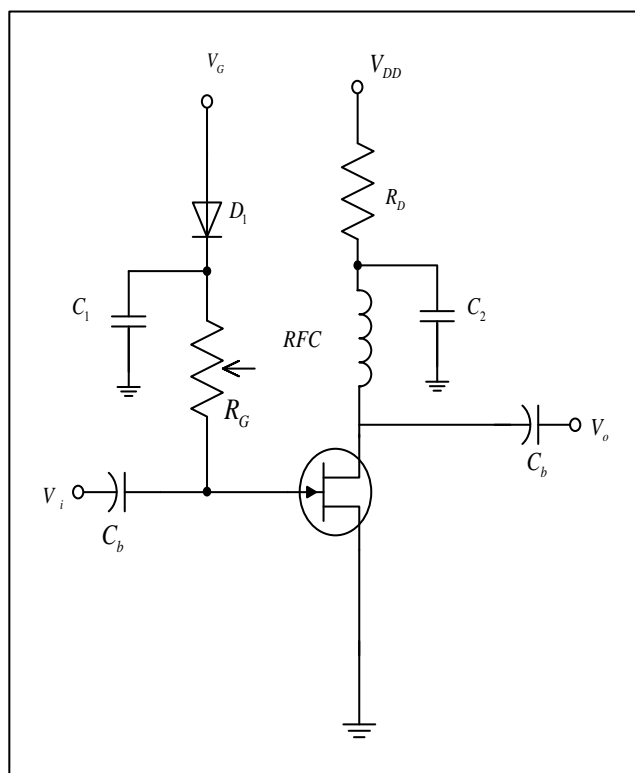


รูปที่ 3.25 วงจร โคร่งข่ายแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ด้านเอาต์พุต

ซึ่งด้านเอาต์พุตจะเป็นส่วนการรวมสัญญาณทั้งหมด เพื่อให้หม้อแปลงเอาต์พุตสามารถทนกำลังงานที่สูง ๆ ได้ จึงได้ออกแบบโดยใช้แกนเทอร์ลอยด์มาต่อจำนวนมาก ๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรอบนอก 15 มิลลิเมตร รอบใน 12 มิลลิเมตรและความสูง 4 มิลลิเมตร นำมาต่อติดกันทั้งหมด 11 ตัวทั้งหมดรวมกัน 2 ชุดและนำมาต่อติดกันและใช้สายโคแอกเซียลขนาด 2 มิลลิเมตร พันรอบแกนเทอร์ลอยด์ที่ประกบติดกันไว้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 31.83 ไมโครเฮนรี โดยการนำแกนเทอร์ลอยด์มาต่อจำนวนมาก ๆ เพื่อทำให้หม้อแปลงสามารถทนกำลังงานที่สูง ๆ ได้ โดยในส่วนของหม้อแปลงส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ทำการรวมสัญญาณของกำลังสัญญาณทั้งหมดจะทำให้ได้กำลังงานเอาต์พุตเพื่อนำไปใช้งานต่อไปดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ลักษณะหม้อแปลงกำลังสูงด้านเอาต์พุต

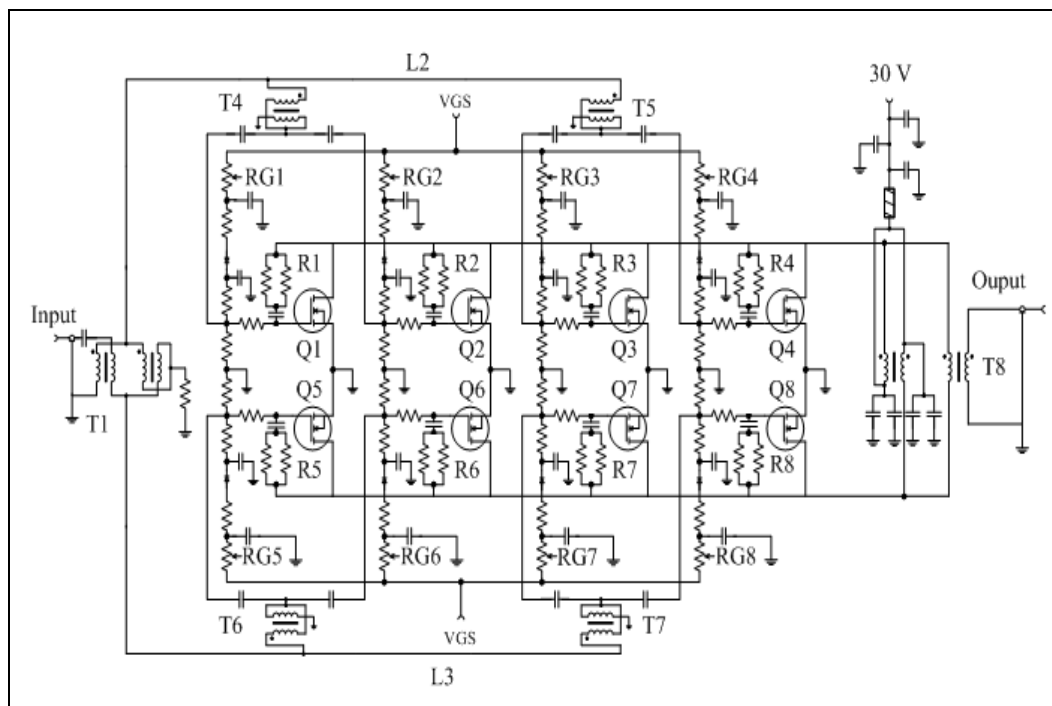


รูปที่ 3.27 ลักษณะวงจรไบอัสวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง

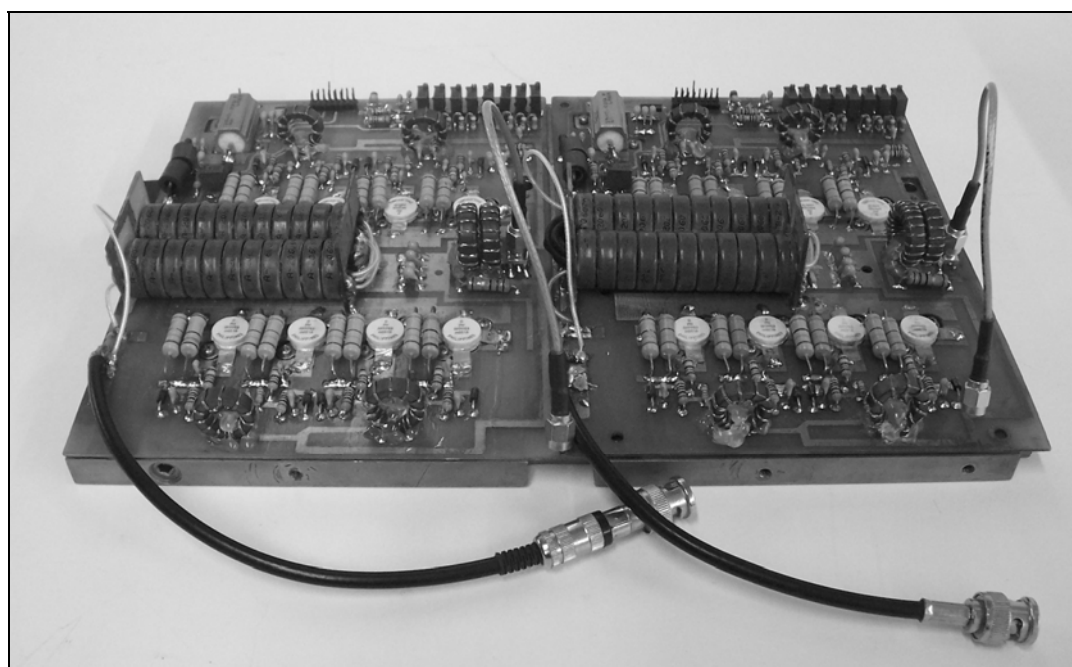
การออกแบบวงจรไบอัสจะพิจารณาจากรูปที่ 3.27 เลือกใช้  $V_{GS}$  เท่ากับ 5 โวลต์  $V_{DS}$  เท่ากับ 20 โวลต์ และ  $I_D$  เท่ากับ 10 แอมป์แปร์ และหาค่า  $R_D$  จากสมการที่ 3.20 ดังนั้น  $R_D$  เท่ากับ 1.5 โอห์ม

$$V_D - I_D R_D - V_{DS} = 0 \quad (3.20)$$

จากการออกแบบของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงแต่ละส่วนข้างต้นทำให้ได้ลักษณะของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงชุดเดียวดังรูปที่ 3.28 และเมื่อลงอุปกรณ์เรียบร้อยทั้ง 2 ชุดจะแสดงดังรูปที่ 3.29 โดยในแต่ละชุดมีขนาดความกว้างเท่ากับ 15 เซนติเมตร และความยาวเท่ากับ 20 เซนติเมตร วางบนแผ่นระบายความร้อนและมีการออกแบบเพื่อระบายความร้อนด้วยน้ำ



รูปที่ 3.28 ลักษณะวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงที่ออกแบบ 1 ชุด

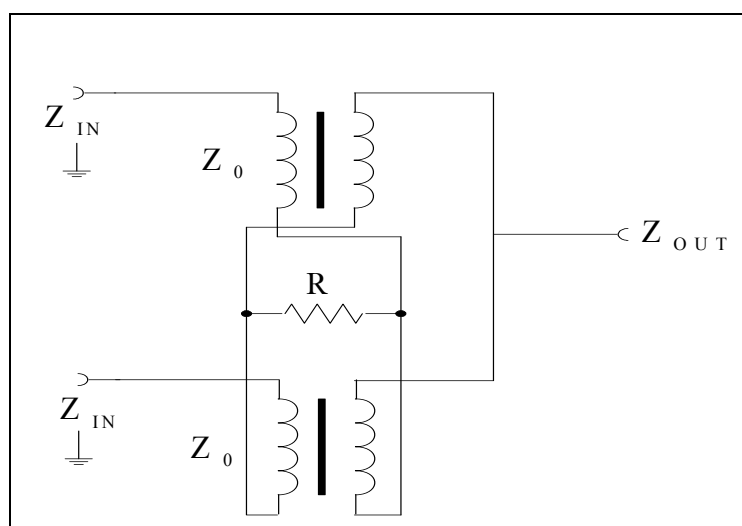


รูปที่ 3.29 วงจรขยายสัญญาณกำลังสูงที่ลงอุปกรณ์แล้ว 2 ชุด



### 3.3 การออกแบบวงจรรวมสัญญาณ

วงจรรวมสัญญาณนั้นมีบทบาทสำคัญในวงจรความถี่วิทยุ เนื่องจากเป็นส่วนที่รวมกำลังสัญญาณเพื่อให้ได้กำลังงานที่มากขึ้น ซึ่งในการออกแบบต้องคำนึงถึงลักษณะของการทำงานของวงจร โดยลักษณะของวงจรจะมีหลายแบบทั้งแบบที่ใช้ไมโครสตริป ซึ่งเหมาะสมกับวงจรที่ใช้ความถี่สูงแต่ใช้กำลังงานไม่สูงมาก และอีกรูปแบบคือการใช้หม้อแปลงในการออกแบบซึ่งเหมาะกับการออกแบบให้กับวงจรที่ต้องการกำลังงานสูงแต่เหมาะสมกับความถี่ต่ำไม่สูงมาก ซึ่งการออกแบบวงจรรวมสัญญาณกำลังสูงในหัวข้อนี้ได้ออกแบบโดยใช้หม้อแปลงแกนเทอร์ลอยด์ ซึ่งลักษณะของวงจรรวมสัญญาณกำลังสูงจะรับสัญญาณอินพุตจากวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงทั้ง 2 ชุด ที่ได้ทำการออกแบบไว้ในหัวข้อที่แล้วสำหรับรวมสัญญาณให้ได้กำลังสัญญาณออกเป็น 1 สัญญาณเอาต์พุตซึ่งลักษณะของวงจรจะเป็นดังรูปที่ 3.30



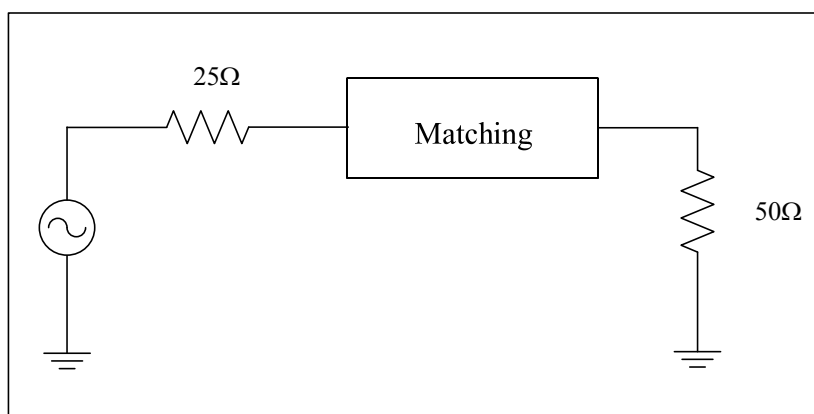
รูปที่ 3.30 ลักษณะวงจรรวมสัญญาณ

จากวงจรดังรูปที่ 3.30 ลักษณะของวงจรที่ออกแบบจะเป็นแบบ Wilkinson ซึ่งจะใช้หม้อแปลงในการออกแบบ เนื่องจากวงจรรวมสัญญาณที่ออกแบบใช้ความถี่ประมาณ 1 เมกะเฮิรตซ์ โดยใช้แกนเทอร์ลอยด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอก 23.9 มิลลิเมตร รอบใน 13.6 มิลลิเมตร และความสูง 9.53 มิลลิเมตร พันในลักษณะเหมือนกัน 2 ชุด และใช้สายโคแอกเซียลขนาดความหนา 2 มิลลิเมตร พันรอบแกน ซึ่งจากการคำนวณจากสมการที่ 3.16 และสมการที่ 3.17 โดยที่  $R$  เท่ากับ 50 โอห์ม และ  $f$  เท่ากับ 1 เมกะเฮิรตซ์ได้ ความเหนี่ยวนำ  $L$  เท่ากับ 31.83 ไมโครเฮนรีและสามารถหาจำนวนรอบได้เท่ากับ 14.18 รอบ และจากวงจรรวมสัญญาณสามารถวิเคราะห์สมการได้ดัง

สมการที่ 3.21 โดยที่  $Z_{in}$  คืออินพุตอิมพีแดนซ์  $Z_{out}$  คือเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ ซึ่งจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากเอาต์พุตของภาควจรขยายสัญญาณกำลังสูงทั้ง 2 ชุด เท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้นเมื่อทำการคำนวณจากสมการที่ 3.21 จะได้  $Z_{out}$  เท่ากับ 25 โอห์มและเนื่องจากต้องการเอาต์พุตอิมพีแดนซ์

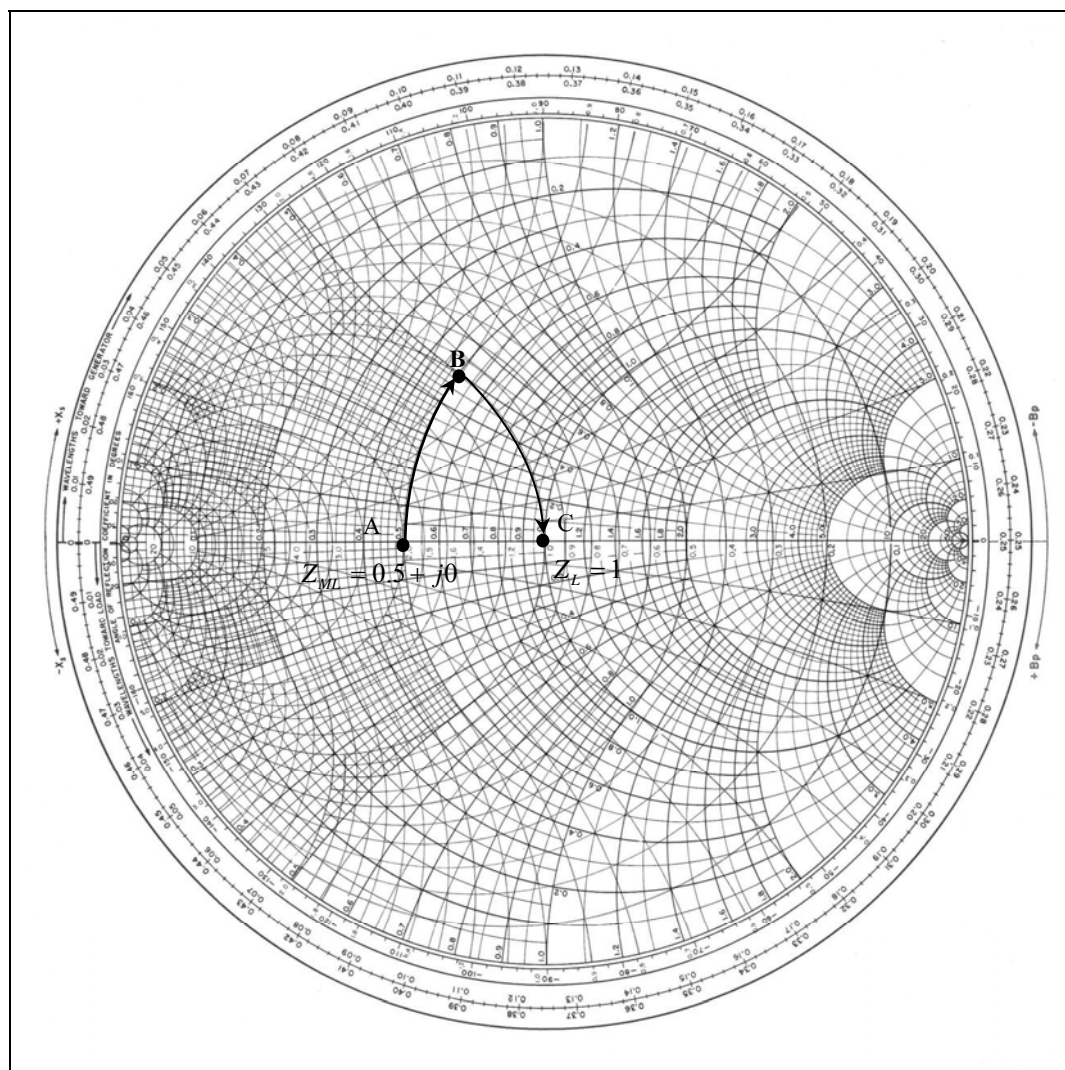
$$Z_{out} = \frac{1}{2}(Z_{in}) \quad (3.21)$$

เท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบวงจรแมตช์ซึ่งของสัญญาณเอาต์พุตให้ได้เท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งออกแบบโดยใช้ Smith Charts ที่อินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ 25 โอห์ม และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งลักษณะวงจรแมตช์ซึ่งอิมพีแดนซ์แสดงดังรูปที่ 3.31



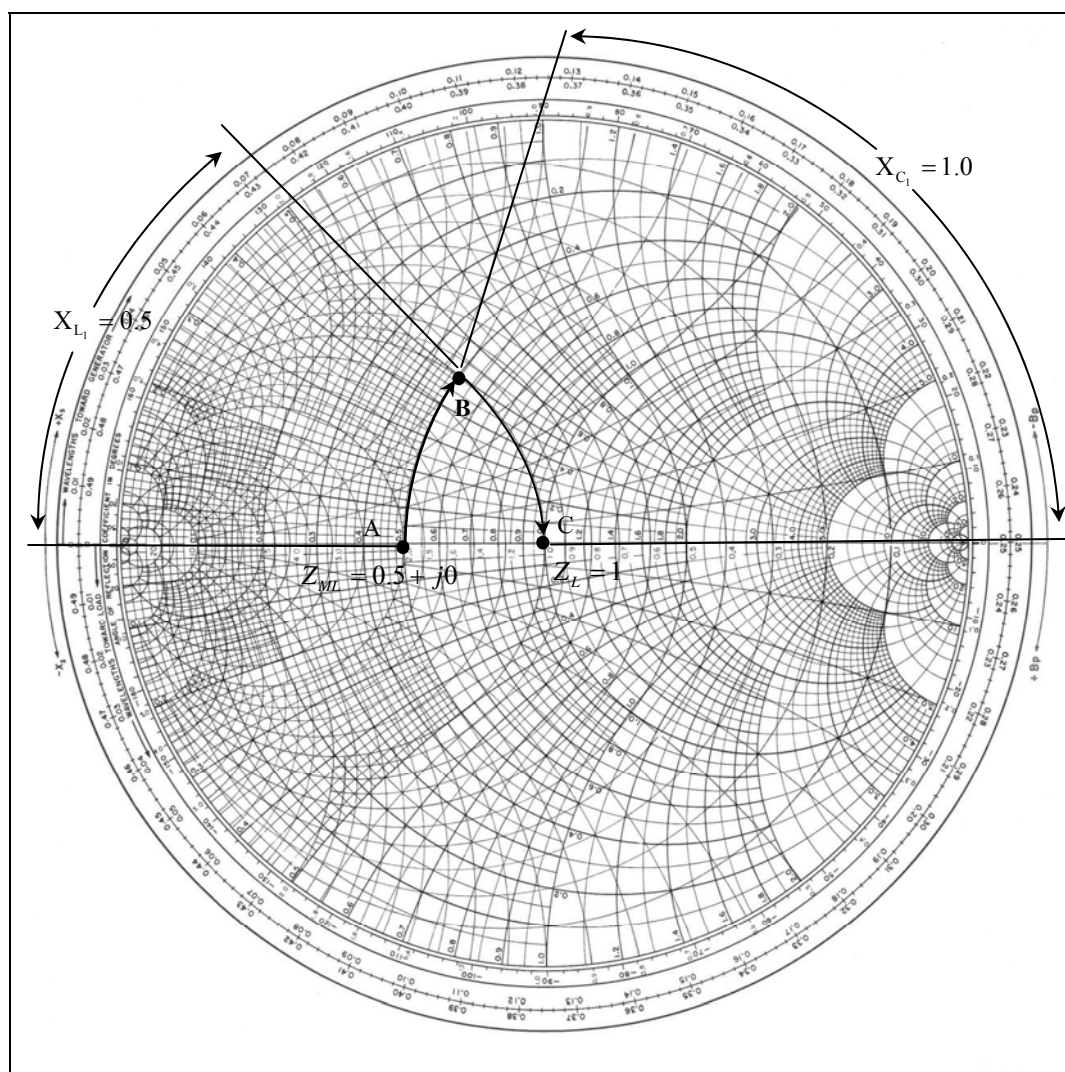
รูปที่ 3.31 วงจรแมตช์ซึ่งอิมพีแดนซ์วงจรรวมสัญญาณ

การคำนวณโครงข่ายแมตช์ซึ่งพิจารณาดังรูปที่ 3.32 โดยที่  $Z_s$  เท่ากับ 25 โอห์ม และ  $Z_L$  เท่ากับ 50 โอห์ม แล้ว Normalize  $Z_s$  และ  $Z_L$  ด้วย 50 จะได้  $Z_s$  เท่ากับ  $0.5 + j0$  และ  $Z_L$  เท่ากับ  $1 + j0$  จากนั้นนำค่า  $Z_s$  และ  $Z_L$  มาพล็อตบนแผนภูมิสมิทโดยการกำหนดจุด  $Z_s$  และ  $Z_L$  บนแผนภูมิสมิท จากนั้นลากเส้นจาก  $Z_s$  และ  $Z_L$  เพื่อจำกัดค่าจริงซึ่งในรูปที่ 3.32 เป็นการกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิท



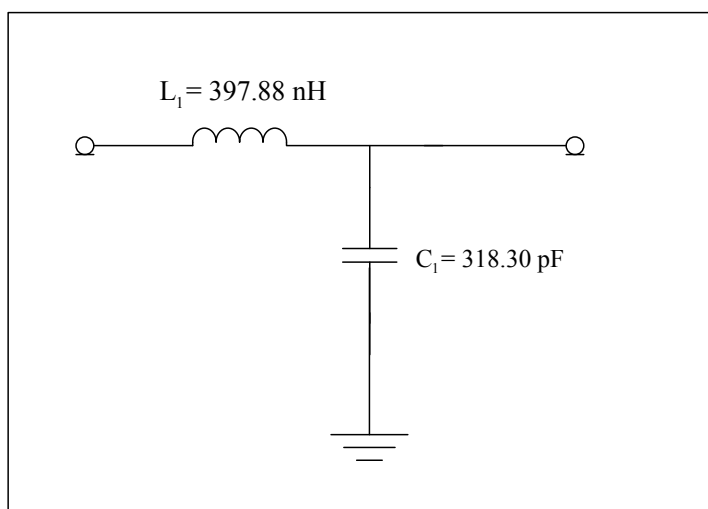
รูปที่ 3.32 การกำหนดจุด  $Z_S$  และ  $Z_L$  สำหรับวบบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริง

จากนั้นหาค่าความยาวของแต่ละเส้นที่ลากจาก  $Z_S$  ถึง  $Z_L$  แสดงดังรูปที่ 3.33 โดยเส้นโค้ง AB คือการจำกัดค่าเพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำ L แบบอนุกรม ซึ่งได้ค่า  $X_L$  เท่ากับ 0.58 และเส้นโค้ง BC คือการจำกัดค่าตัวเก็บประจุ C แบบขนาน ซึ่งได้ค่า  $X_C$  เท่ากับ 0.28 และจากนั้นนำค่าที่ได้จากการหาความยาวของส่วนโค้งมาคำนวณหาค่าองค์ประกอบของวงจรจากสมการที่ 3.10 และสมการที่ 3.11

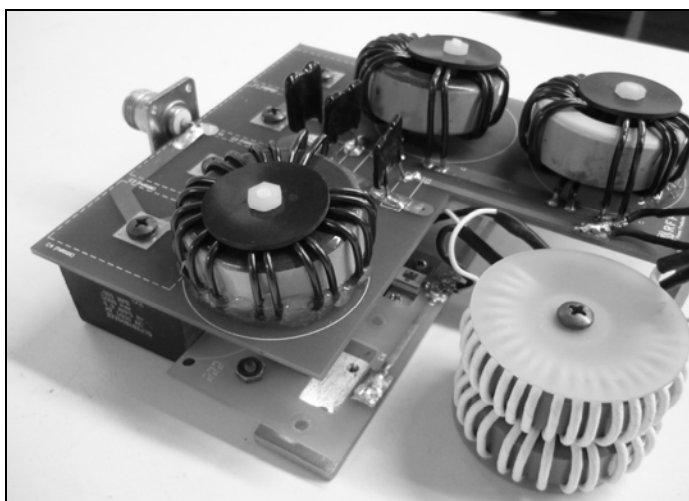


รูปที่ 3.33 การหาค่าความยาวบนแผนภูมิสมิทเพื่อจำกัดค่าจริง

จากการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของวงจรจากสมการที่ 3.10 และ 3.11 ดังนั้นจะได้  $X_{C_1}$  เท่ากับ 50 โอห์ม และ  $X_{L_1}$  เท่ากับ 25 โอห์ม ซึ่งจากการออกแบบที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ จะได้ค่าองค์ประกอบ โดยคำนวณจากสมการที่ 3.12 และ 3.13 ดังนั้นจะได้  $L_1 = 397.88$  nH และ  $C_1 = 318.30$  pF ดังนั้นจะได้ค่าขององค์ประกอบด้านอินพุต ดังรูปที่ 3.34 และลงอุปกรณ์เรียบร้อยแล้วดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.34 วงจรแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์วงจรรวมสัญญาณ



รูปที่ 3.35 วงจรรวมสัญญาณที่ออกแบบและลงอุปกรณ์แล้ว

### 3.4 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ได้จากสมการที่ 3.22 ดังต่อไปนี้

$$L = \frac{a^2 N^2}{9a + 10b} \quad (3.22)$$

พิจารณาการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำจากการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำจากสมการที่ 3.23 ซึ่งจะเป็นสมการเรโซแนนซ์

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.23)$$

สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้ เมื่อความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์และค่าของตัวเก็บประจุเท่ากับ 100 pF ดังนั้นจะได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 15.8  $\mu\text{H}$  จากสมการที่ 3.22 เมื่อกำหนดให้  $a$  เท่ากับ 2 นิ้ว  $b$  เท่ากับ 2.5 นิ้ว สามารถคำนวณหาจำนวนรอบได้เท่ากับ 13.03 รอบ ดังนั้นจะจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำประมาณ 14 รอบ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.36 ซึ่งได้ออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่าง ๆ ทั้งนี้เพื่อทดสอบถึงการให้ความร้อนของขนาดขดลวดเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.36 ขดลวดเหนี่ยวนำเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 มิลลิเมตร 30 มิลลิเมตร 40 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร ที่สร้างสำหรับการทดลอง

### 3.5 สรุป

ในการออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่วิทยุ ซึ่งใช้หลักการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบภาคส่วนต่าง ๆ คือ ภาควงจรขับเคลื่อนกำลังสัญญาณออกแบบด้วยมอสเฟตเบอร์ BLF177 โดยต้องมีข้อมูลที่ต้องพิจารณาในการออกแบบได้แก่ อัตราขยาย ความกว้างแถบ

ความถี่กลาง กำลังด้านออก สัมประสิทธิ์การสะท้อนด้านเข้า สัมประสิทธิ์การสะท้อนด้านออก แรงดันและกระแสที่ใช้บังคับทิศทางกรไหลของกระแสเช่นเดียวกับการออกแบบภาควงจรขยาย สัญญาณกำลังสูงซึ่งใช้มอสเฟต 8 ตัวในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลาสเอบีแบบpush-pull

การออกแบบวงจรรวมสัญญาณ ใช้หม้อแปลงในการวิเคราะห์และออกแบบ โดยจะมีการพิจารณาถึงอิมพีแดนซ์ด้านเข้าและด้านออกและกำลังด้านเข้าและด้านออก

การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับการให้ความร้อนของวงจรถ่ายเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่วิทยุ พิจารณาการใช้ขดลวดทองแดงพันเป็นขดในรูปแบบต่าง ๆ ที่สามารถเกิดการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีที่สุดและเหมาะสมกับงานมากที่สุดและพิจารณาการเรโซแนนซ์ของภาควงจรซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดสำหรับการให้ความร้อน

## บทที่ 4

### การวัดและผลการทดลอง

#### 4.1 กล่าวนำ

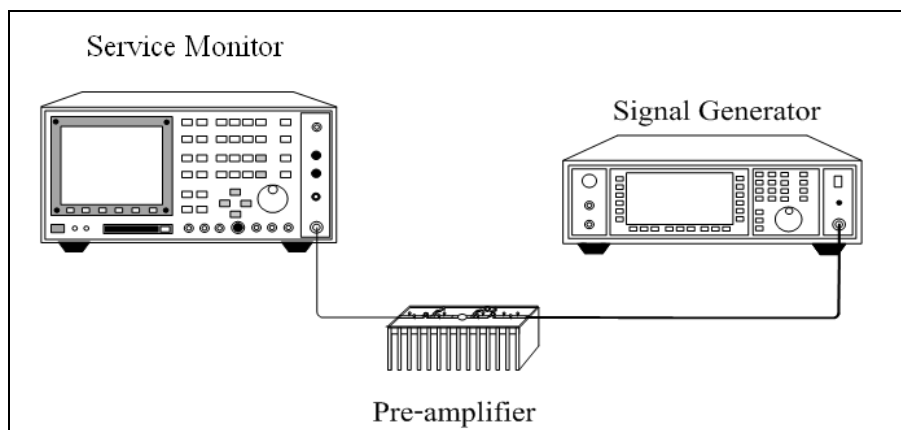
จากการกล่าวถึงการออกแบบวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนในบทที่ 1 ผ่านมาโดยใช้ทฤษฎีของแต่ละวงจรในการวิเคราะห์และออกแบบ สำหรับในบทนี้จึงกล่าวถึงการทดลองและผลการทดสอบวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนที่ได้ออกแบบเพื่อยืนยันการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้ โดยประกอบด้วยการวัดผลสองส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนวงจรภาคกำลังและการทดสอบการเหนี่ยวนำความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ โดยวงจรภาคกำลังประกอบด้วยการวัดสัญญาณอินพุต กำลังอินพุต สัญญาณเอาต์พุต กำลังเอาต์พุต อัตราขยายสัญญาณ และประสิทธิภาพของวงจร ซึ่งในส่วนนี้ประกอบด้วยวงจรขับกำลังสัญญาณ วงจรขยายสัญญาณกำลังสูงชุดเดียว วงจรขยายสัญญาณสองชุด วงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (spectrum analyzer IFR AN930A) และเครื่อง Service Monitor ในการวัดทดสอบและในส่วนการวัดและทดสอบการเหนี่ยวนำความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำด้วยการเหนี่ยวนำความร้อนกับแท่งอลูมิเนียมได้ทดสอบการให้ความร้อนด้วยขดลวดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างๆเพื่อวิเคราะห์ปริมาณการให้ความร้อนและนำผลที่ได้จากการวัดทั้งสองส่วนมาวิเคราะห์และสรุปผลต่อไป

#### 4.2 การวัดผลการทดลองวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

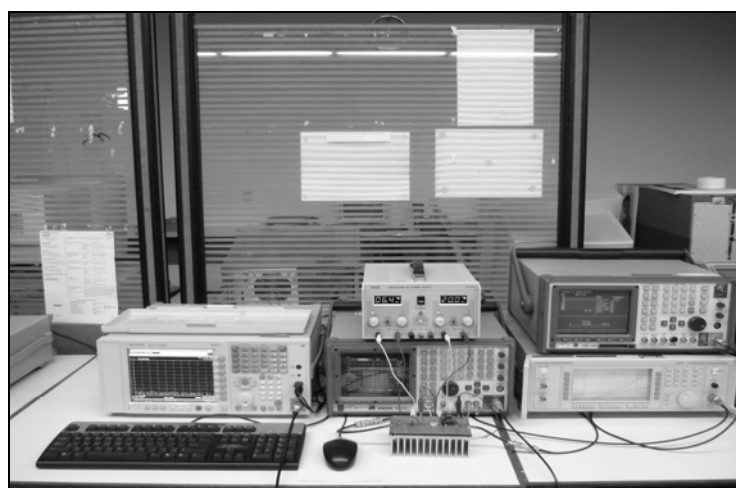
##### 4.2.1 วงจรขับกำลังสัญญาณ

วงจรขับกำลังสัญญาณรับอินพุต 10 มิลลิวัตต์ จากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าขาเดรนเท่ากับ 20 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าขาเกตเท่ากับ 8 โวลต์ ทดลองวัดสัญญาณอินพุต สัญญาณเอาต์พุต กำลังสัญญาณอินพุต และกำลังสัญญาณเอาต์พุตตลอดย่านความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และคำนวณอัตราขยายสัญญาณ (gain) และประสิทธิภาพ (efficiency) ของวงจร โดยลักษณะการเตรียมเครื่องมือสำหรับการวัดผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 ประกอบด้วยส่วนแรกเป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่จ่ายสัญญาณอินพุต (CW) ให้กับวงจรขับกำลังสัญญาณและเชื่อมต่อเอาต์พุตกับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม สำหรับแสดงผลการทดลองและในรูปที่ 4.2 เป็นการแสดงการวัดผลการทดลองของวงจรขับกำลังสัญญาณ



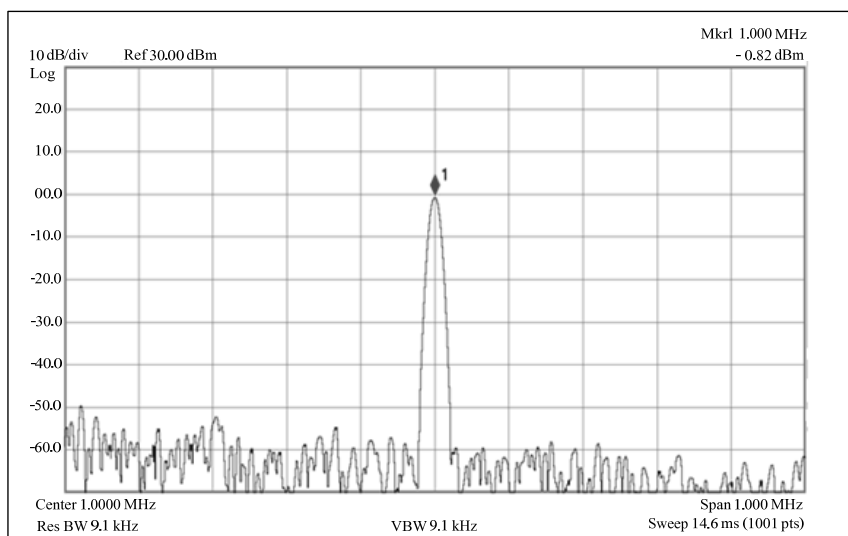


รูปที่ 4.1 ลักษณะการทดลองวงจรขับกำลังสัญญาณ

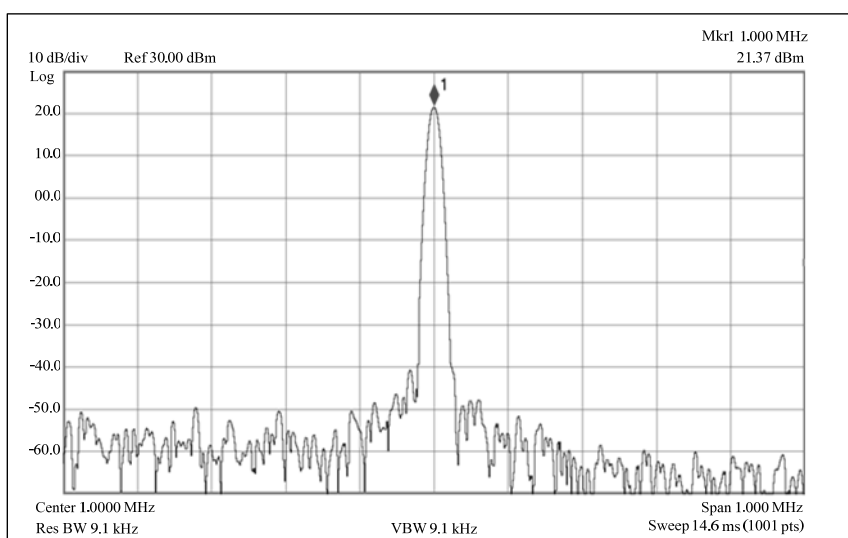


รูปที่ 4.2 การวัดผลการทดลองวงจรขับกำลังสัญญาณ

สำหรับผลการทดลองการวัดสัญญาณของวงจรขับกำลังสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นผลการวัดสัญญาณอินพุตวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยการใช้โพรบจิ้มวัดสัญญาณของวงจร เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรแรงดันขาเดรนขนาด 20 โวลต์ และ แรงดันขาเกต 8 โวลต์ และเมื่อวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรในลักษณะเดียวกันแสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งลักษณะของสัญญาณเป็นการวัดเพื่อทดสอบถึงสัญญาณความถี่ของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต ในการทดลองนี้ใช้ความถี่อินพุตเท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ พบว่าสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่วัดได้มีความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และไม่มีสัญญาณความถี่อื่นที่รบกวน



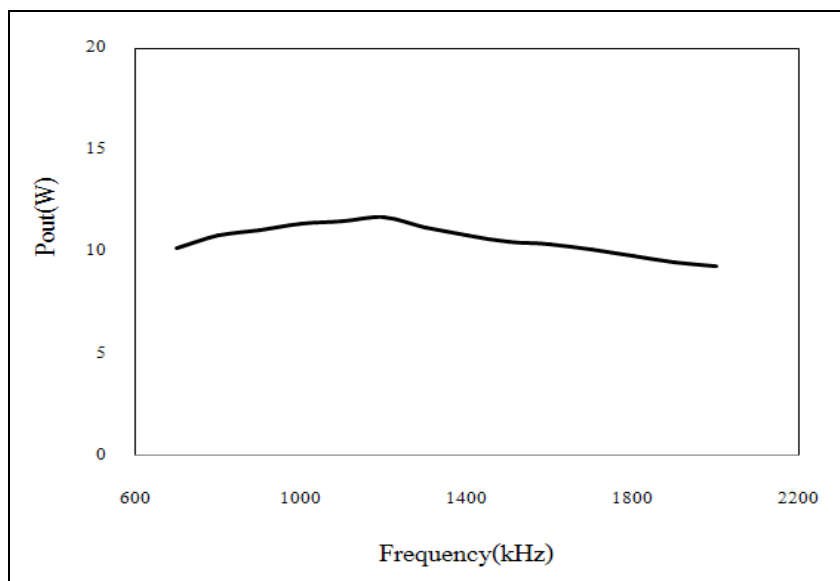
รูปที่ 4.3 สัญญาณอินพุตวงจรขับกำลังสัญญาณ



รูปที่ 4.4 สัญญาณเอาต์พุตวงจรขับกำลังสัญญาณ

สำหรับการวัดกำลังเอาต์พุตของวงจรขับกำลังสัญญาณ ใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม โดยกำลังอินพุตขนาดเท่ากับ 10 มิลลิวัตต์ ซึ่งผลที่ได้ทำให้สามารถพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์และคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเอาต์พุตตลอดย่านความถี่ตั้งแต่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยกำลังเอาต์พุตที่วัดได้มีกำลังงานเฉลี่ยที่ประมาณ 10 วัตต์



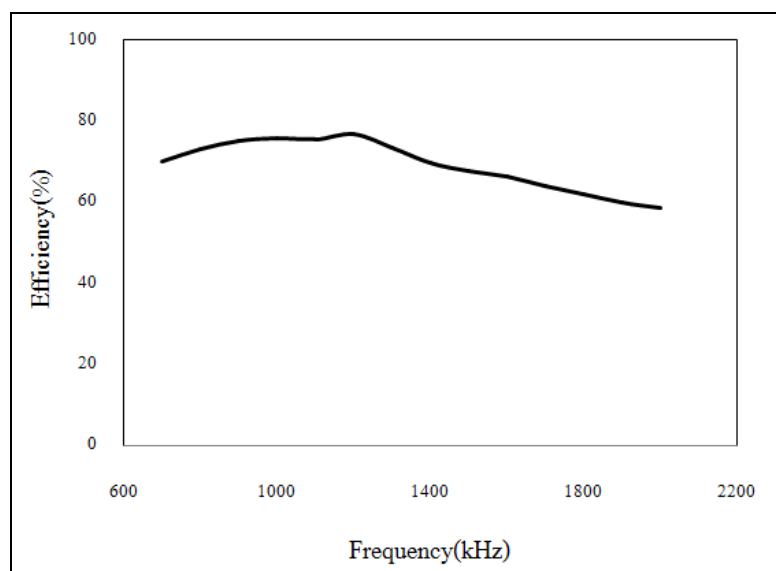
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับความถี่ย่านความถี่ 700 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ของวงจรขับกำลังสัญญาณ

มีกำลังสัญญาณสูงที่สุดที่ประมาณ 11.7 วัตต์ ความถี่ 1.2 เมกะเฮิรตซ์ และกำลังต่ำสุดที่ประมาณ 9.3 วัตต์ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อแวนอนเป็นย่านความถี่ 700 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ และแนวตั้ง เป็นกำลังเอาต์พุตของวงจรขับกำลังสัญญาณ

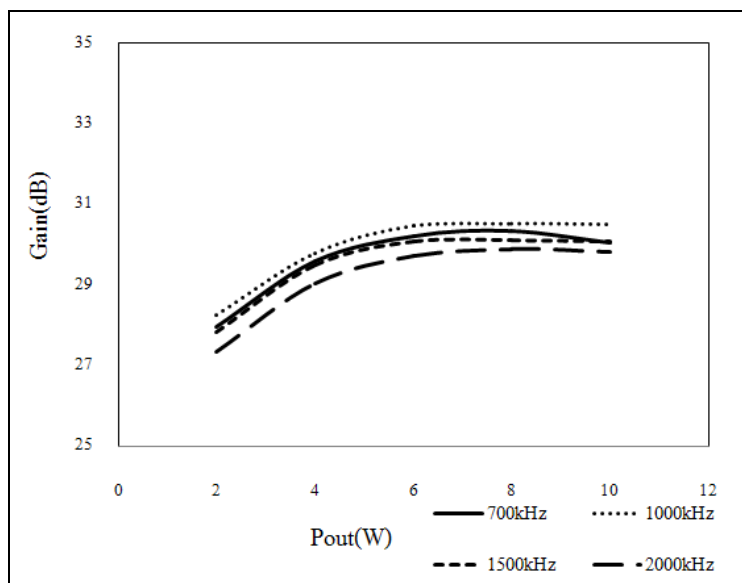
จากผลการทดลองสามารถนำค่ากำลังเอาต์พุตที่ได้มาคำนวณหาค่าอัตราขยายของสัญญาณจากสมการที่ 2.2 เพื่อคำนวณหาอัตราขยายสัญญาณ ดังนั้น เมื่อนำค่ามาคำนวณ ทำให้ได้อัตราขยายสัญญาณดังที่แสดงในรูปที่ 4.6 แสดงอัตราขยายตลอดย่านความถี่ 700 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ โดยผลที่ได้อัตราขยายของวงจรเฉลี่ยแล้วประมาณ 30 dB สูงสุดที่ประมาณ 30.68 dB ความถี่ 1.2 เมกะเฮิรตซ์ และอัตราขยายสัญญาณต่ำที่สุดอยู่ที่ประมาณ 29.68 dB ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อแวนอนเป็นย่านความถี่ 700 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ และแนวตั้งเป็นอัตราขยายของวงจรขับกำลังสัญญาณและสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรขับกำลังสัญญาณได้จากสมการที่ 2.5 ผลที่ได้จากการคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรแสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นผลตลอดย่านความถี่ 700 กิโลเฮิรตซ์ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยแล้วประมาณ 69% ที่ความถี่ 1.2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อแวนอนเป็นย่านความถี่ 700 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ และแนวตั้ง เป็นอัตราขยายของวงจรขับกำลังสัญญาณ



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบอัตราขยายสัญญาณกับความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของวงจรขับกำลังสัญญาณ



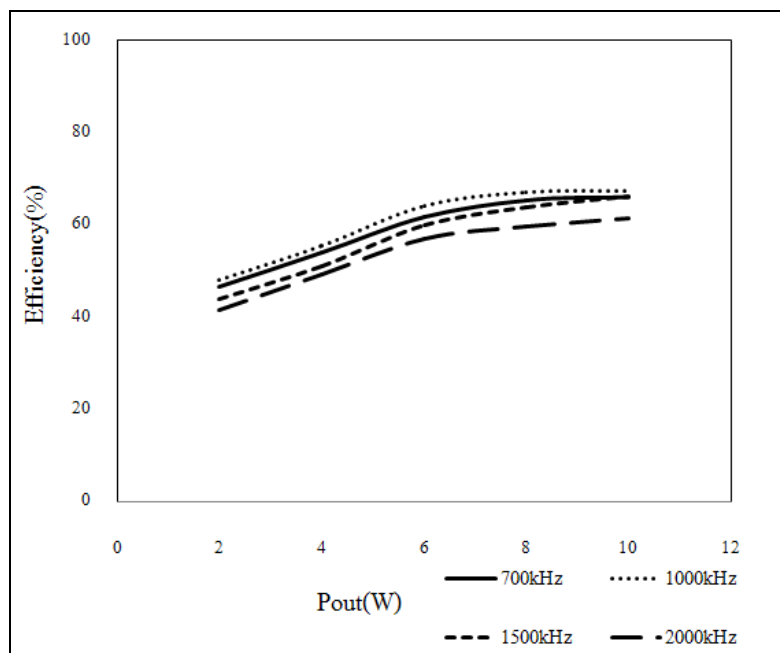
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของวงจรขับกำลังสัญญาณ



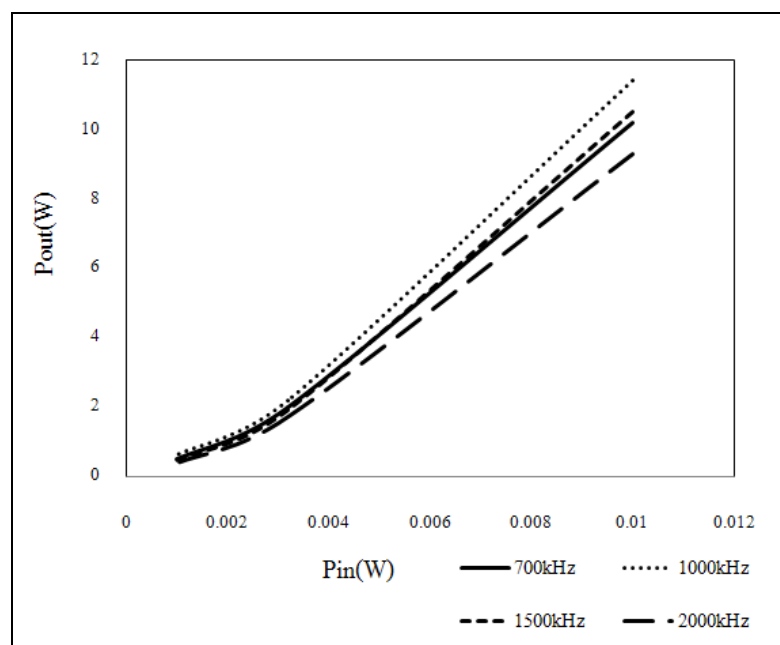
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับอัตราขยายสัญญาณย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ของวงจรขับกำลังสัญญาณ

และเมื่อวัดเปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับอัตราขยายสัญญาณที่ความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยกำหนดเอาต์พุตให้มีกำลังตั้งแต่ 2 วัตต์ ถึง 10 วัตต์ ผลที่ได้และแสดงดังรูปที่ 4.8 เมื่อแวนอนเป็นกำลังเอาต์พุตตั้งแต่ 2 วัตต์ ถึง 10 วัตต์ และแนวตั้งเป็นอัตราขยายของวงจรขับกำลังสัญญาณ โดยผลที่ได้จากการเปรียบเทียบพบว่าเมื่อเอาต์พุตเริ่มสูงขึ้นอัตราขยายสัญญาณจะเริ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงประมาณ 7 วัตต์ พบว่าอัตราขยายเริ่มคงที่เป็นลักษณะเดียวกันตลอดย่านความถี่แต่ที่ความถี่ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ มีอัตราการขยายสัญญาณสูงที่สุด โดยมีค่าประมาณ 30 dB

สำหรับรูปที่ 4.9 เป็นประสิทธิภาพของวงจรขับกำลังสัญญาณย่านความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อเทียบกับกำลังเอาต์พุตตั้งแต่ 2 วัตต์ ถึง 10 วัตต์ ผลที่ได้พบว่าเมื่อเอาต์พุตเริ่มสูงขึ้นพบว่าประสิทธิภาพของวงจรเริ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ และที่ความถี่ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ มีประสิทธิภาพของวงจรสูงที่สุด โดยมีค่าประมาณ 70% และความถี่ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ จะมีประสิทธิภาพน้อยที่สุดที่ประมาณ 60% เมื่อกำลังเอาต์พุตเท่ากับ 10 วัตต์และสำหรับการเปรียบเทียบกำลังอินพุตกับกำลังเอาต์พุตของวงจรขับกำลังสัญญาณย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยที่แวนอนเป็นกำลังอินพุตตั้งแต่ 2 มิลลิวัตต์ ถึง 10 มิลลิวัตต์ และแนวตั้งเป็นอัตราขยายของวงจรขับกำลังสัญญาณ พบว่ากำลังเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามกำลังอินพุตที่เพิ่มขึ้น



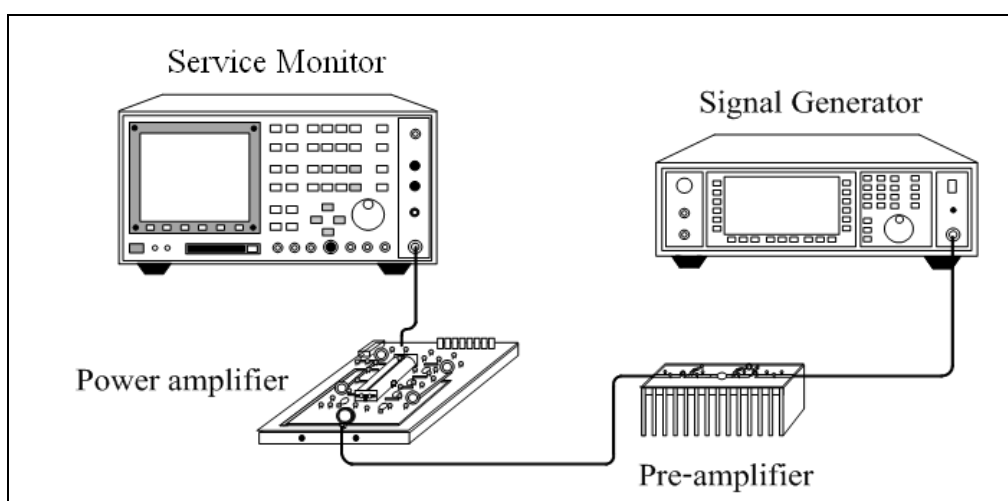
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกำลังเอาต์พุตย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ ของวงจรขับกำลังสัญญาณ



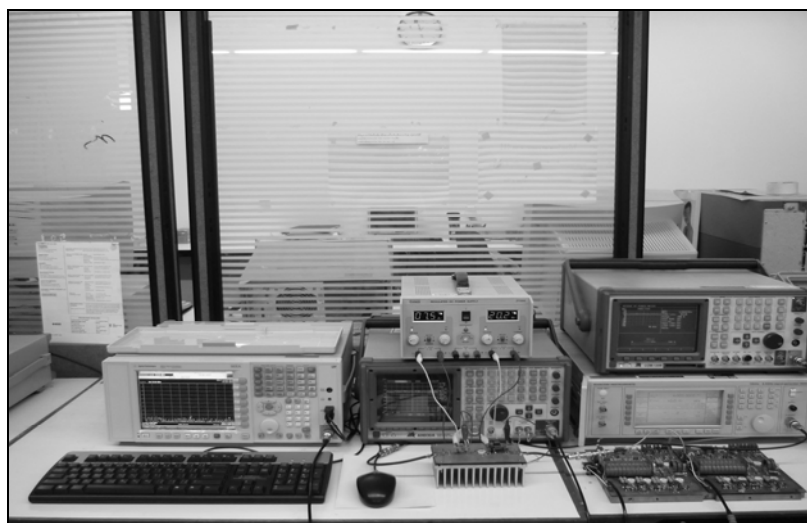
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับกำลังอินพุตย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ ของวงจรขับกำลังสัญญาณ

#### 4.2.2 วงจรขยายสัญญาณกำลังสูงชุดเดียว

ลักษณะวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงรับสัญญาณอินพุตจากวงจรขับกำลังสัญญาณและใช้แรงดันไฟฟ้าขาเดรนเท่ากับ 30 โวลต์ สำหรับภาควงจรนี้ได้ทดลองวัดผลวงจขยายสัญญาณกำลังสูงชุดเดียวซึ่งได้วัดสัญญาณอินพุต สัญญาณเอาต์พุต กำลังสัญญาณอินพุต กำลังสัญญาณเอาต์พุต และนำผลที่ได้คำนวณค่าอัตราขยายและประสิทธิภาพของวงจขยายสัญญาณกำลังสูงในรูปที่ 4.11 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการทดลองประกอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ (Signal Generator MACRONI 2032) เครื่อง Service Monitor วงจรขับกำลังสัญญาณ และวงจขยายสัญญาณกำลังสูงและในรูปที่ 4.12 แสดงการวัดผลวงจขยายสัญญาณกำลังสูงโดยลักษณะจะเป็นดังนี้ ในส่วนแรกเป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่จ่ายสัญญาณอินพุต (CW) ให้กับวงจรขับกำลังสัญญาณจากนั้นเอาต์พุตที่ได้จากวงจรขับกำลังสัญญาณจะเป็นอินพุตให้กับวงจขยายสัญญาณกำลังสูงและเชื่อมต่อไปเอาต์พุตกับเครื่อง Service Monitor สำหรับแสดงผลการทดลอง



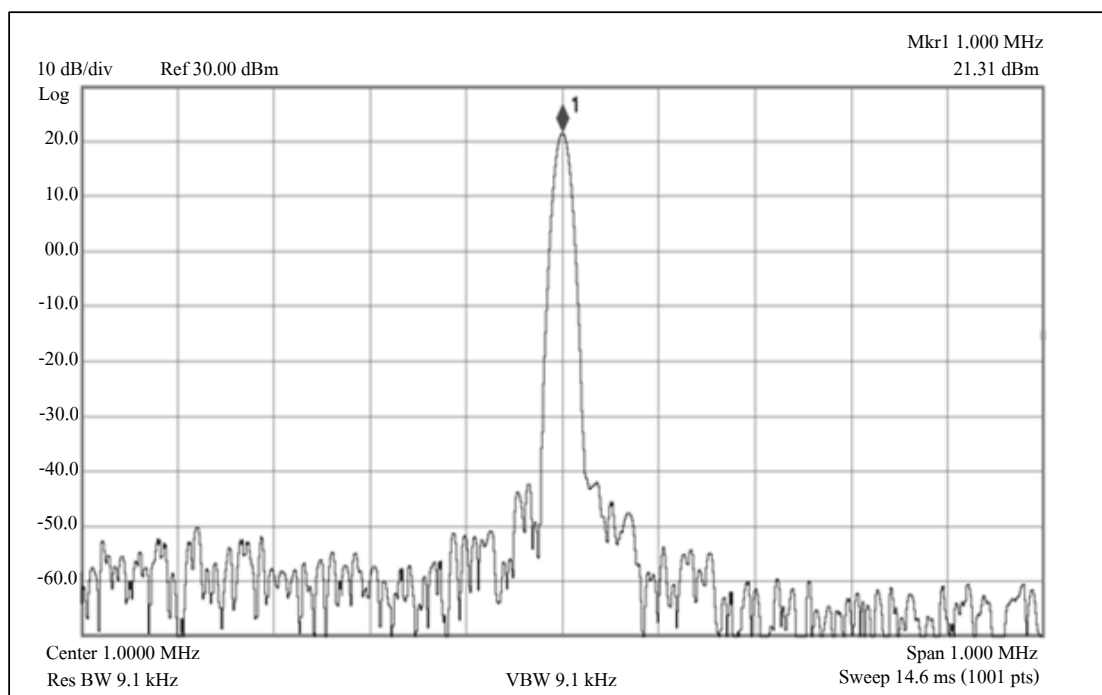
รูปที่ 4.11 ลักษณะการทดลองวงจขยายสัญญาณกำลังสูง



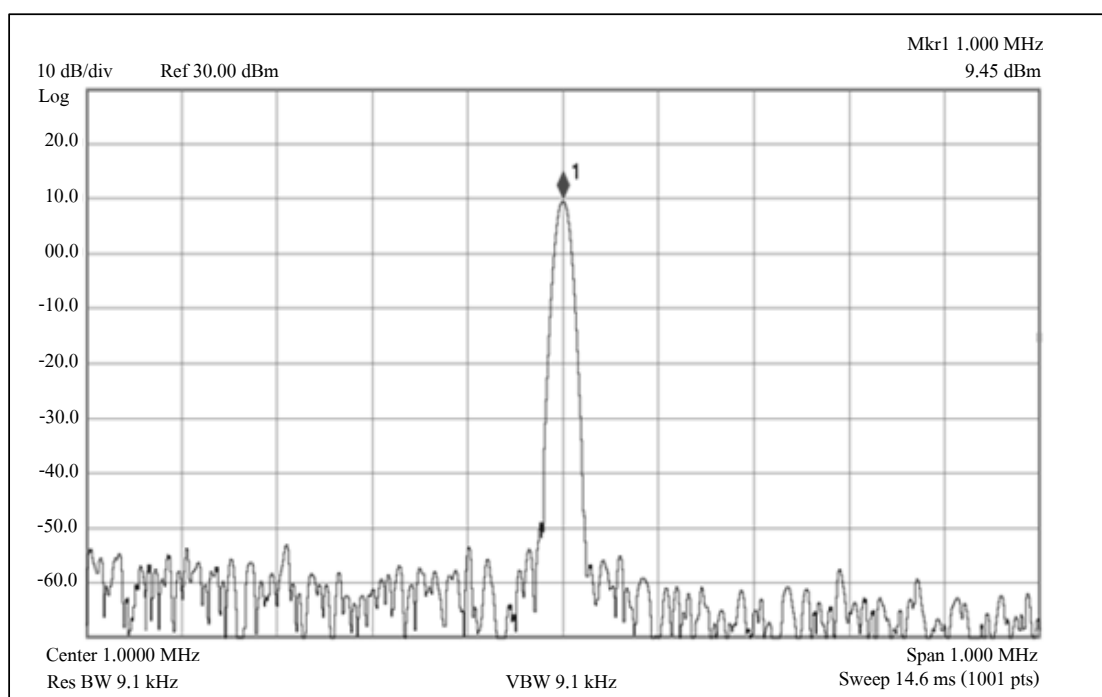
รูปที่ 4.12 การวัดผลการทดลองวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง

รูปสัญญาณที่ 4.13 เป็นสัญญาณอินพุตของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงซึ่งวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม เป็นสัญญาณที่รับมาจากวงจรขับกำลังสัญญาณ โดยจากเอาต์พุตของวงจรขับกำลังสัญญาณมีค่าอยู่ที่ประมาณ 21.37 dBm เมื่อวัดโดยการใช้โพรบจัมวัด และเมื่อวัดที่อินพุตของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงในลักษณะแบบเดียวกัน ปรากฏว่าสัญญาณได้ลดลงเหลือ 21.31 dBm เนื่องจากการสูญเสียในสายส่งจากนั้นได้วัดสัญญาณที่ตำแหน่งหลังหม้อแปลงทั้งสองตัว พบว่าสัญญาณที่วัดได้เป็นดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 โดยสัญญาณจะเหลือเพียง 9.45 dBm สำหรับ L2 (รูปที่ 3.28) และ 9.04 dBm สำหรับ L3 ตามลำดับ โดยสัญญาณลดลงประมาณครึ่งหนึ่งของสัญญาณอินพุต จากนั้นวัดสัญญาณที่ตำแหน่งขาเกทของมอสเฟต ปรากฏว่าสัญญาณเป็นดังรูปที่ 4.16 จะเป็นสัญญาณที่อยู่ด้านบนของวงจรซึ่งมีสัญญาณที่เท่ากันทั้ง 4 ชุดประมาณ 3.33 dBm วัดสัญญาณที่ G1 (รูปที่ 3.13) มาแสดงและรูปที่ 4.17 จะเป็นสัญญาณที่อยู่ด้านล่างของวงจร ซึ่งมีสัญญาณที่เท่ากันที่ประมาณ 2.77 dBm วัดสัญญาณที่ G5 มาแสดงเมื่อวัดโดยใช้โพรบจัมวัดทั้งสองสัญญาณ

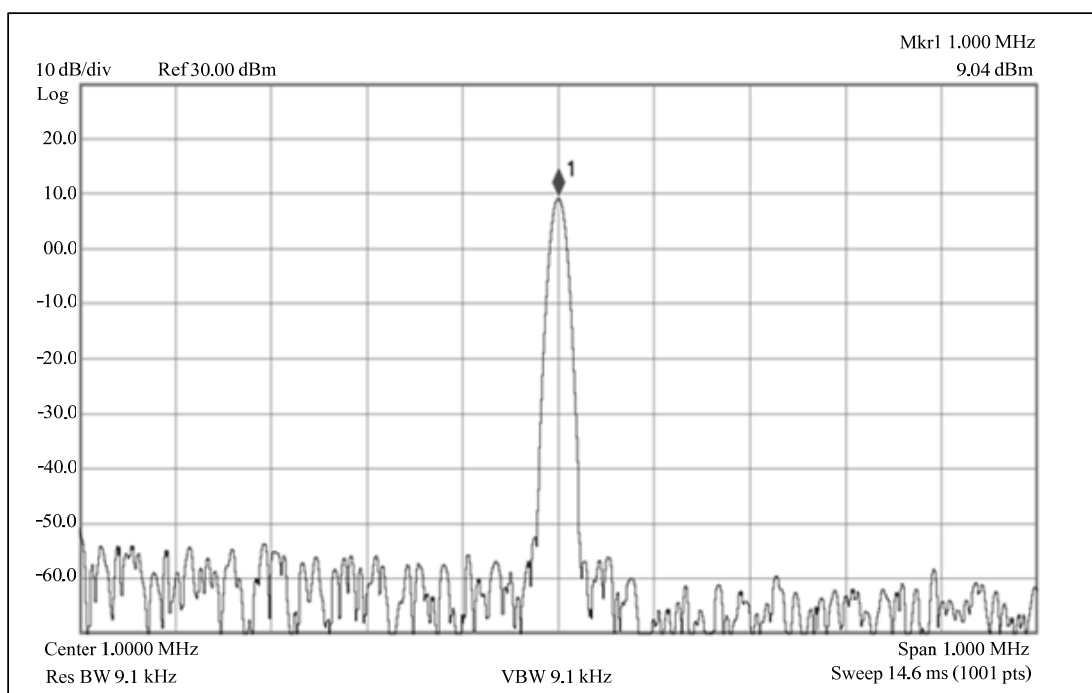




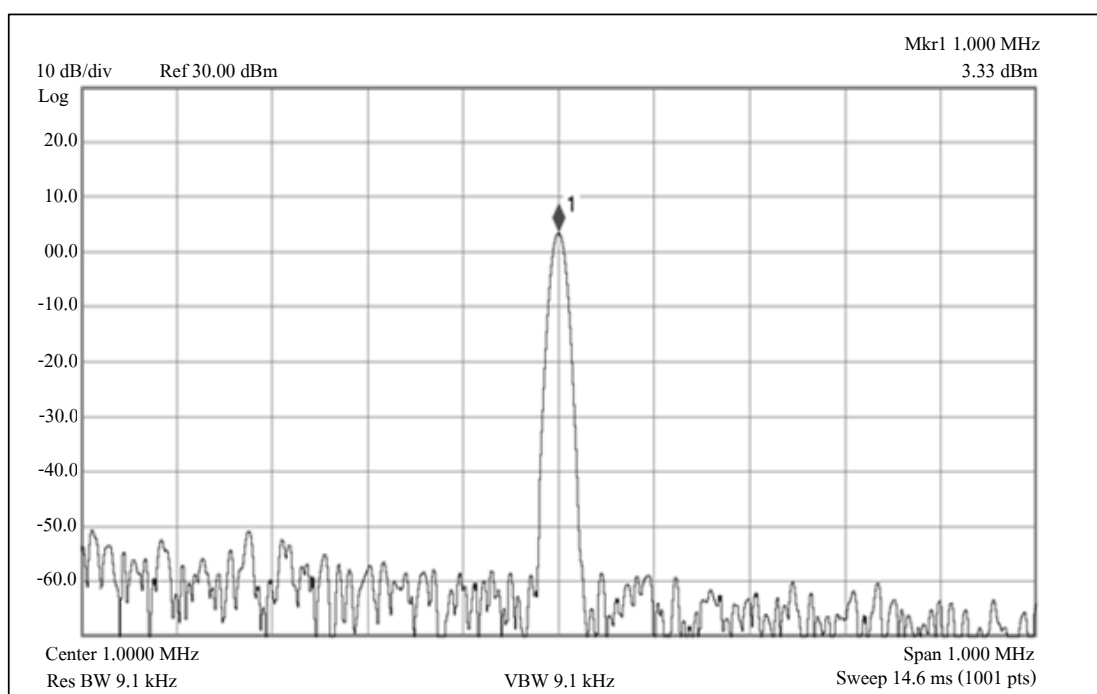
รูปที่ 4.13 สัญญาณอินพุตวงจรมายสัญญาณกำลังสูง



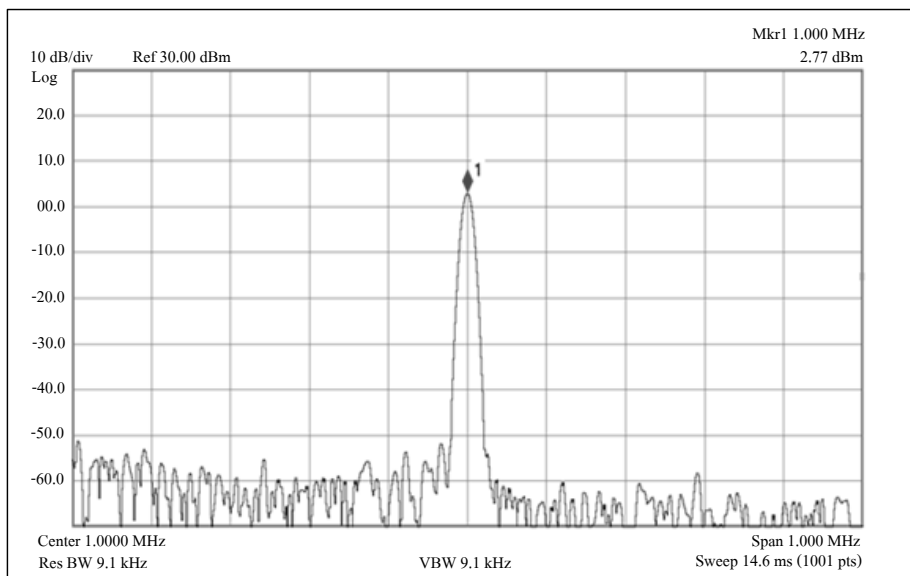
รูปที่ 4.14 สัญญาณเอาต์พุตจากหม้อแปลงแยกสัญญาณ (L2)



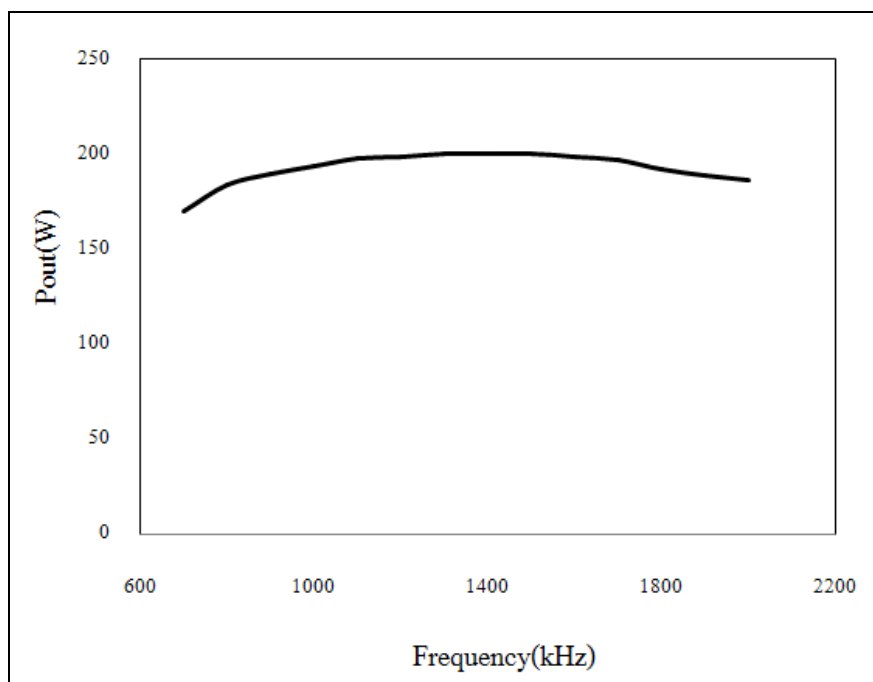
รูปที่ 4.15 สัญญาณเอาต์พุตจากหม้อแปลง (L3)



รูปที่ 4.16 สัญญาณอินพุตจากเกทของมอสเฟต (G1)



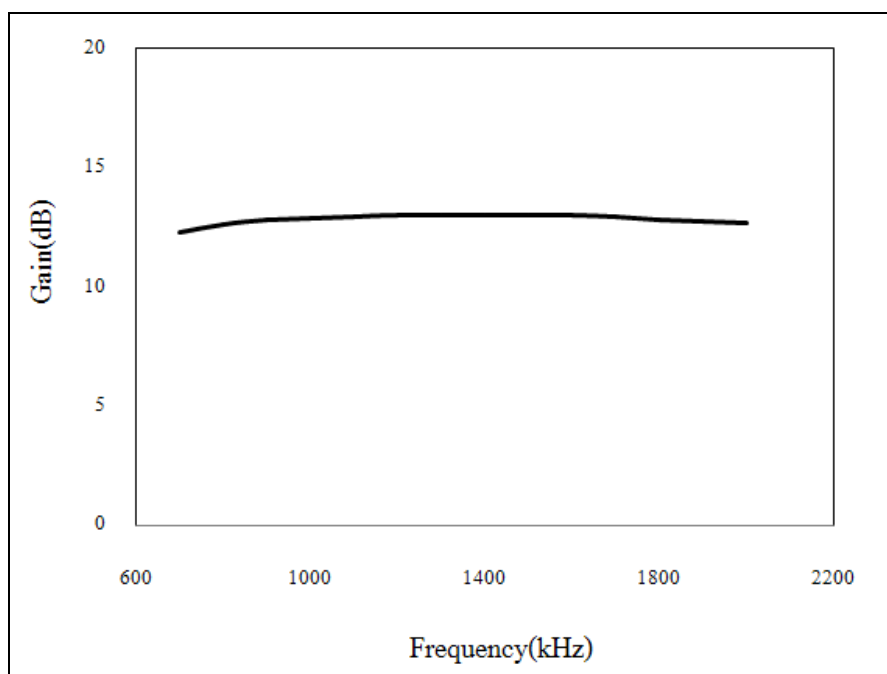
รูปที่ 4.17 สัญญาณอินพุตที่ขาเกทของมอสเฟต (G5)



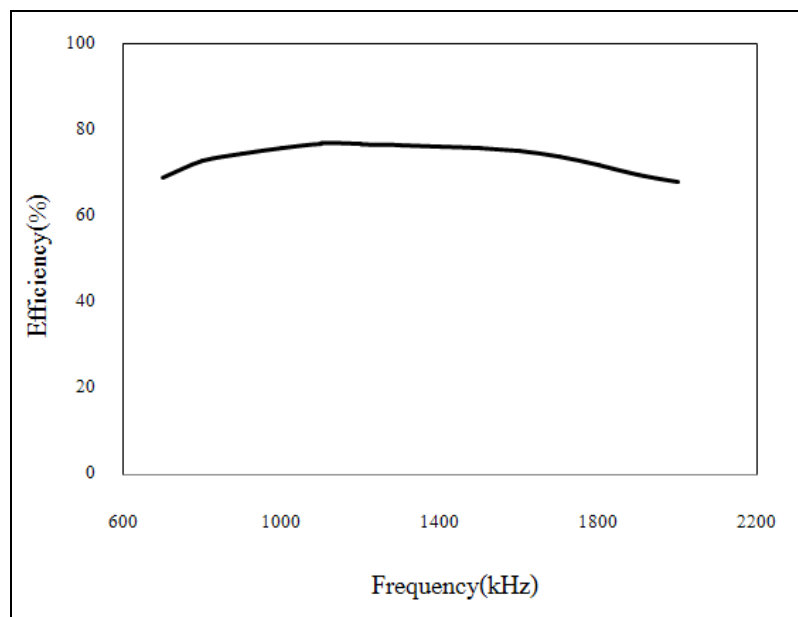
รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบกำลังสัญญาณเอาต์พุตกับความถี่ย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของ วงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 1 ชุด

จากการวัดกำลังเอาต์พุตของวงจร โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.18 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเอาต์พุตในย่านความถี่ตั้งแต่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยสัญญาณเอาต์พุตที่วัดจะมีกำลังสัญญาณเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 192 วัตต์ โดยมีกำลังสัญญาณสูงสุดที่ 200 วัตต์ ความถี่ 1.2 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 1.5 เมกะเฮิร์ตซ์ และกำลังต่ำสุดอยู่ที่ 170 วัตต์ ที่ความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์

จากการวัดกำลังอินพุตและกำลังเอาต์พุตจึงสามารถนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าอัตราขยายสัญญาณจากสมการที่ 4.1 จะทำให้ได้อัตราขยายสัญญาณโดยเฉลี่ยประมาณ 13 dB แสดงดังรูปที่ 4.19 โดยแสดงอัตราขยายสัญญาณตั้งแต่ความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยพบว่าอัตราขยายสัญญาณเริ่มสูงขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้นและสูงสุดที่ความถี่ 1.2 เมกะเฮิร์ตซ์ เท่ากับ 13.01 dB และเริ่มลดลงที่ความถี่ประมาณ 1600 กิโลเฮิร์ตซ์ และสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงได้จากสมการที่ 4.2 และผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.20 เป็นประสิทธิภาพของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงตลอดย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยพบว่าประสิทธิภาพของวงจรเริ่มสูงขึ้นตามความถี่ที่สูงขึ้นและสูงสุดที่ ความถี่ 1.2 เมกะเฮิร์ตซ์ และเริ่มลดลงเมื่อความถี่สูงไปเรื่อย ๆ โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ยประมาณ 74%

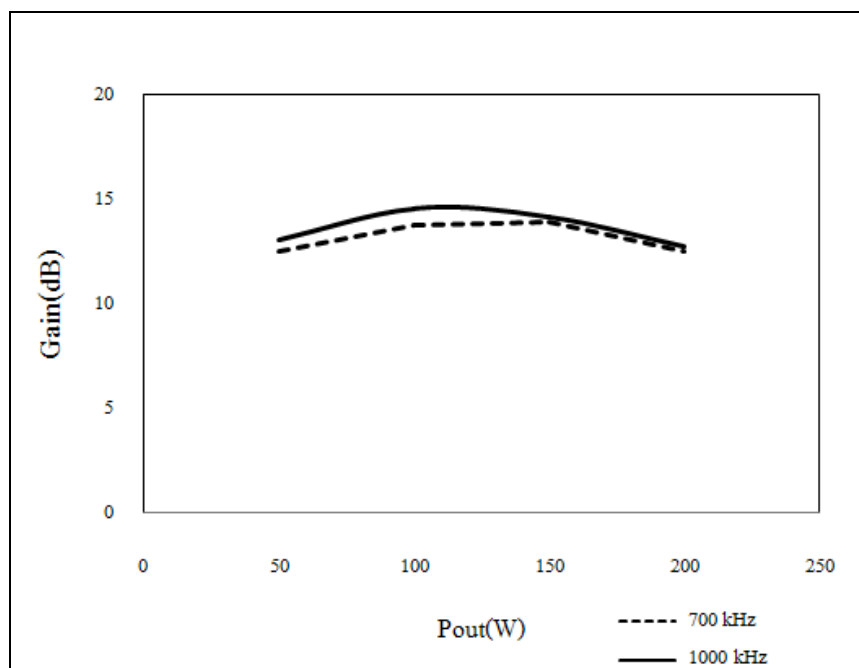


รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบอัตราขยายกับความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 1 ชุด

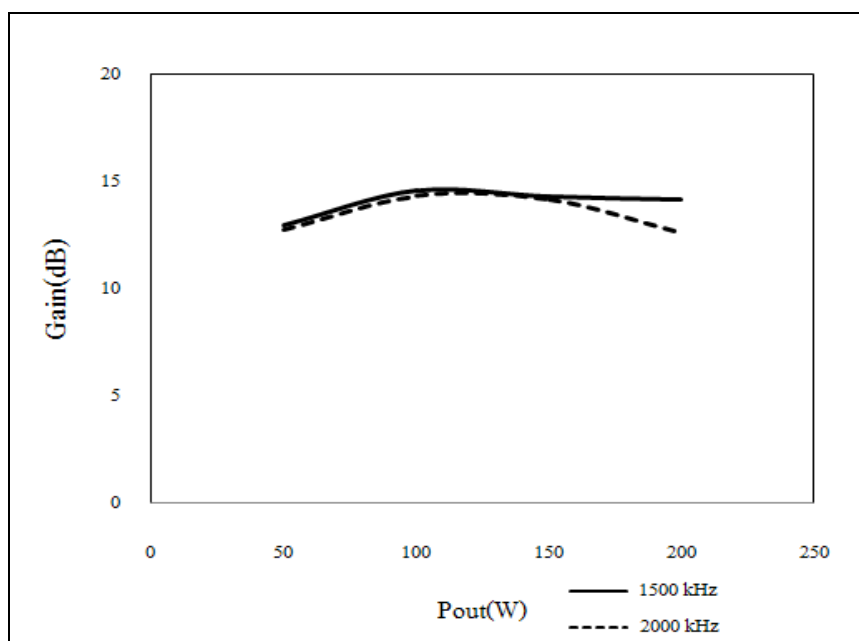


รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 1 ชุด

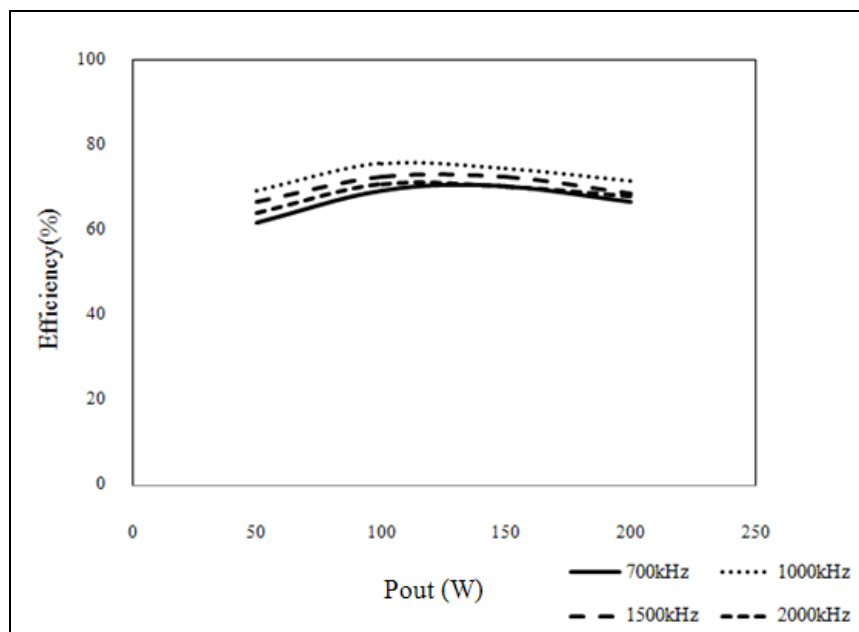
สำหรับรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับอัตราขยายสัญญาณ ความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ กับ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ กับ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ โดยที่แนวนอนเป็นกำลังเอาต์พุตและแนวตั้งเป็นอัตราขยายสัญญาณ ในรูปที่ 4.21 พบว่า อัตราขยายสัญญาณที่ความถี่ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์มีอัตราขยายที่สูงกว่า 700 กิโลเฮิร์ตซ์เพียง เล็กน้อย โดยมีอัตราขยายอยู่ที่ประมาณ 13 dB และรูปที่ 4.22 พบว่าอัตราขยายสัญญาณเฉลี่ยอยู่ที่ ประมาณ 13 dB และเมื่อเปรียบเทียบสัญญาณความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าอัตราขยายสูงสุดอยู่ที่กำลังเอาต์พุตประมาณ 120 วัตต์ และเมื่อกำลังเอาต์พุตเริ่มสูงขึ้นอัตราขยายสัญญาณเริ่มที่จะลดลงเหมือนกันทั้ง 4 ความถี่ แต่สังเกตเห็นว่าที่ความถี่ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ มีอัตราการขยายสัญญาณมากที่สุด



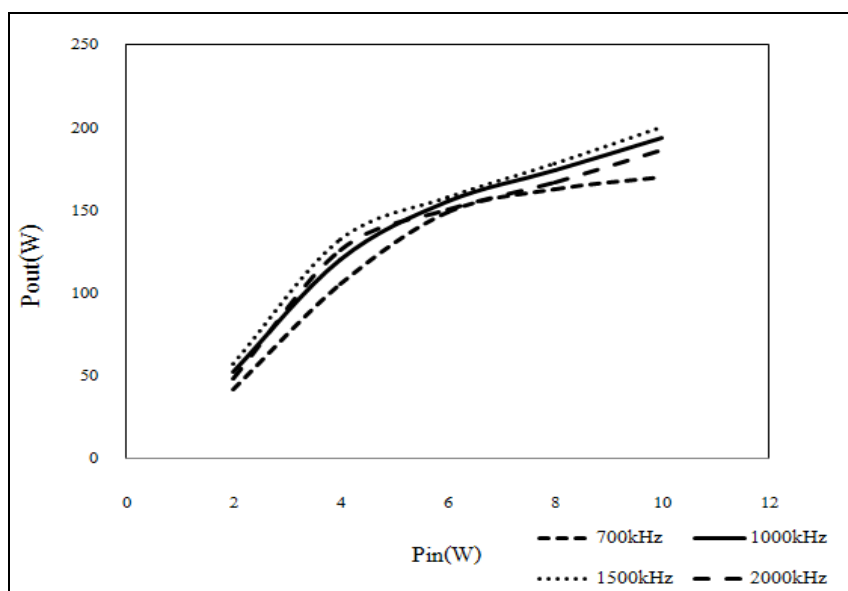
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับอัตราขยายสัญญาณย่านความถี่ 700 กิโลเฮิรตซ์ กับ 1000 กิโลเฮิรตซ์ ของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 1 ชุด



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับอัตราขยายสัญญาณย่านความถี่ 1500 กิโลเฮิรตซ์ กับ 2000 กิโลเฮิรตซ์ ของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 1 ชุด



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกำลังเอาต์พุตย่าน 700 กิโลเฮิรตซ์ 1000 กิโลเฮิรตซ์ 1500 กิโลเฮิรตซ์ และ 2000 กิโลเฮิรตซ์ ของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 1 ชุด

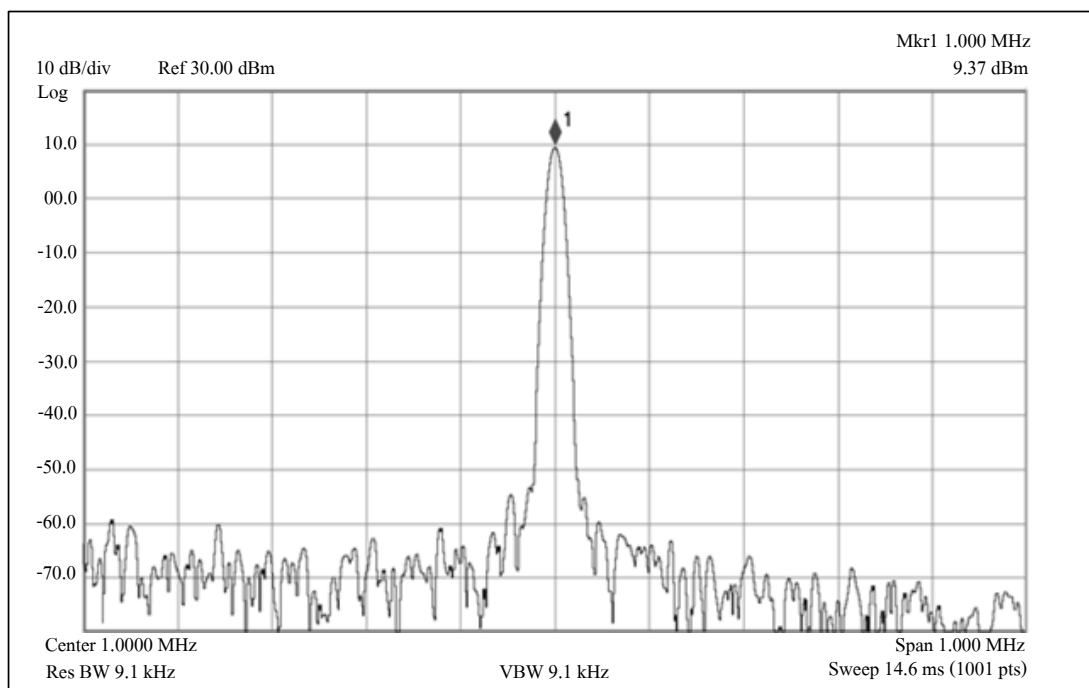


รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับกำลังอินพุตย่าน 700 กิโลเฮิรตซ์ 1000 กิโลเฮิรตซ์ 1500 กิโลเฮิรตซ์ และ 2000 กิโลเฮิรตซ์ ของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 1 ชุด

สำหรับรูปที่ 4.23 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกำลังเอาต์พุตของวงจรขับกำลัง สัญญาณความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยที่แวนอนเป็นกำลังเอาต์พุตและแนวตั้งเป็นประสิทธิภาพของวงจร ซึ่งพบว่าความถี่ 1200 กิโลเฮิร์ตซ์ มีประสิทธิภาพมากกว่าช่วงความถี่อื่น ๆ และความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด และสำหรับรูปที่ 4.24 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับกำลังอินพุตของ วงจรขยายสัญญาณความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยที่แวนอนเป็นกำลังอินพุตและแนวตั้งเป็นกำลังเอาต์พุตของวงจร พบว่ากำลังเอาต์พุตจะมีค่า เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามกำลังอินพุตที่เพิ่มขึ้น

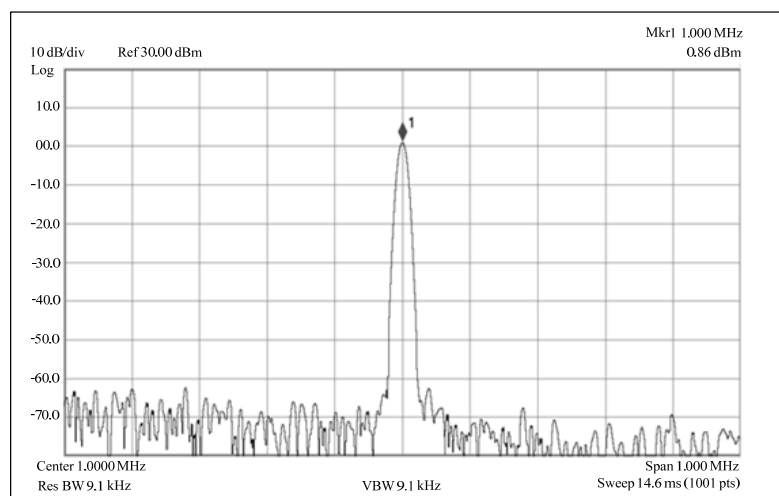
#### 4.2.3 วงจรแยกสัญญาณ

การวัดผลวงจรแยกสัญญาณวัดสัญญาณอินพุตเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาต์พุต เพื่อดูกำลังงานที่แยกสัญญาณออกไป ซึ่งใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมในการวัดผลการทดลอง ซึ่งใน รูปที่ 4.25 เป็นสัญญาณอินพุตมีขนาดเท่ากับ 9.37 dBm และรูปที่ 4.26 เป็นสัญญาณเอาต์พุต มีขนาด เท่ากับ 0.86 dBm จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีค่าลดลงจากจากสัญญาณอินพุตเนื่องจากการ แยกสัญญาณออกเป็น 2 เส้นทาง



รูปที่ 4.25 สัญญาณอินพุตวงจรแยกสัญญาณ

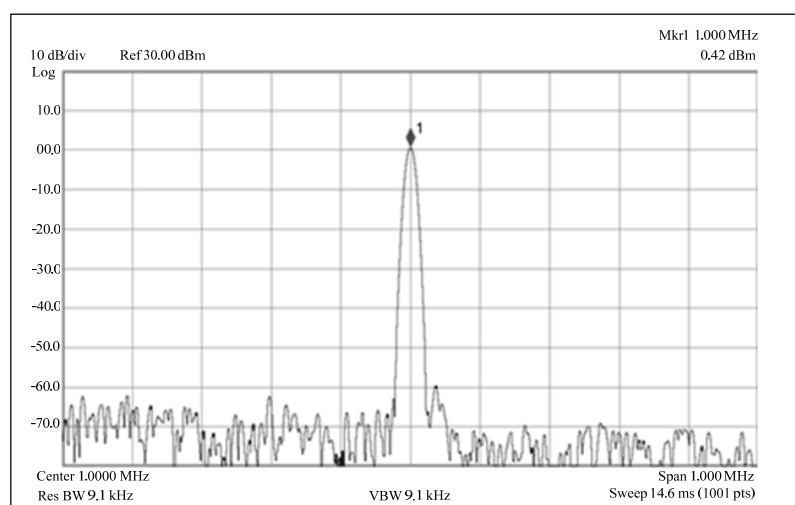




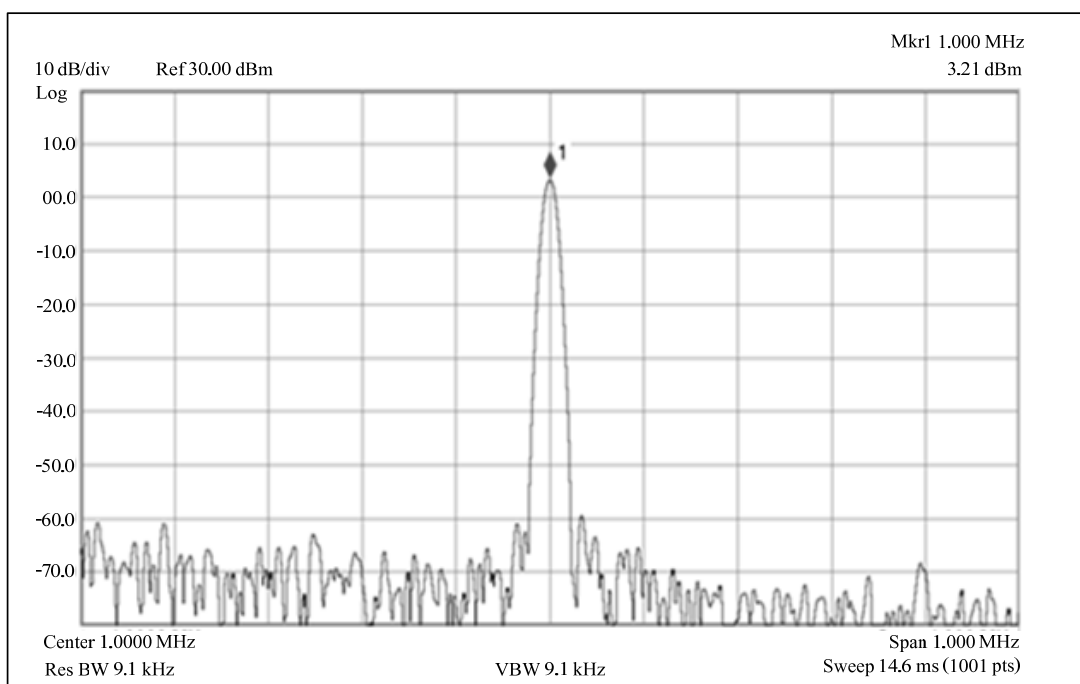
รูปที่ 4.26 สัญญาณเอาต์พุตวงจรแยกสัญญาณ

#### 4.2.4 วงจรรวมสัญญาณ

การวัดผลวงจรรวมสัญญาณจะวัดสัญญาณอินพุตเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาต์พุต เพื่อดูกำลังงานที่รวมสัญญาณออกไป ซึ่งจะใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมในการวัดผลการทดลอง ซึ่งในรูปที่ 4.27 เป็นสัญญาณอินพุตมีขนาดเท่ากับ 0.42 dBm และรูปที่ 4.28 เป็นสัญญาณเอาต์พุตมีขนาดเท่ากับ 3.21 dBm จะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีค่าเท่ากับเพิ่มขึ้นหนึ่งเท่าตัวของสัญญาณอินพุตเป็นไปตามทฤษฎีการรวมสัญญาณ



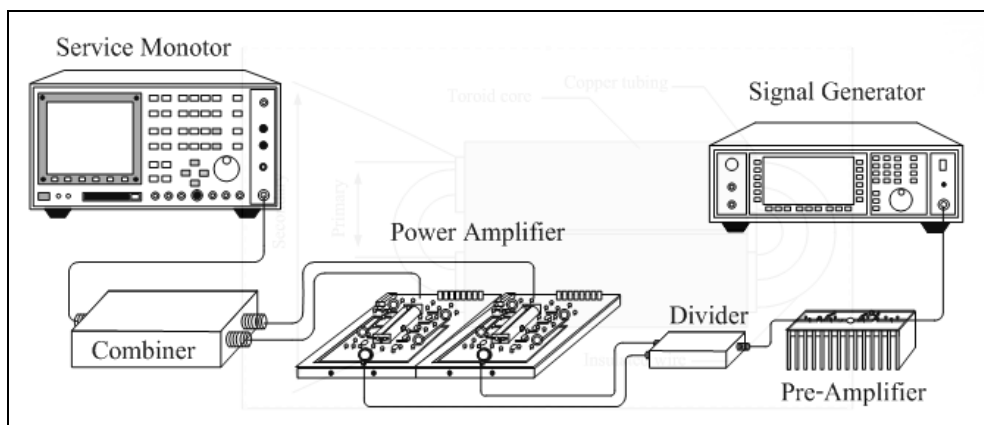
รูปที่ 4.27 สัญญาณอินพุตวงจรรวมสัญญาณ



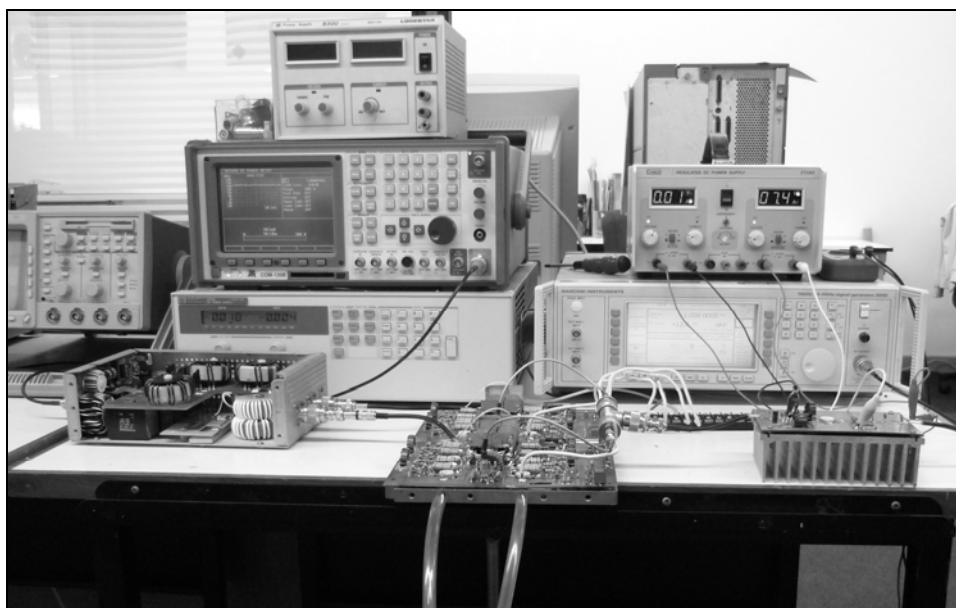
รูปที่ 4.28 สัญญาณเอาต์พุตวงจรรวมสัญญาณ

#### 4.2.5 วงจรขยายสัญญาณกำลังสูงสองชุด

การวัดผลวงจรขยายสัญญาณ 2 ชุด วัดกำลังงานทั้งหมดของวงจรซึ่งประกอบด้วย ภาควงจรขับกำลังสัญญาณ ภาควงจรแยกสัญญาณ ภาควงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุดและภาควงจรรวมสัญญาณกำลังสูง ซึ่งบล็อกไดอะแกรมการเตรียมการทดลองของระบบแสดงดังรูป 4.29 และการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.30 โดยหลักการการทำงานจะเป็นดัง ดังนี้ ในส่วนแรกเป็นวงจรขับกำลังสัญญาณ โดยรับสัญญาณมาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ จากนั้นเอาต์พุตที่ได้จากวงจรขับกำลังสัญญาณจะเป็นอินพุตของวงจรแยกสัญญาณเพื่อแยกเป็น 2 สัญญาณ จากนั้นส่งต่อสัญญาณไปยังภาควงจรขยายสัญญาณ 2 ชุด หลังจากขยายสัญญาณแล้วกำลังงานทั้งหมดจะรวมสัญญาณที่ภาควงจรรวมสัญญาณกำลังสูง และเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม สำหรับแสดงผลการทดลอง โดยวงจรขับกำลังสัญญาณ จะกำหนดไบอัสแรงดันไฟฟ้าขาเดรนเท่ากับ 20 โวลต์ และแรงดันไฟฟ้าขาเกตเท่ากับ 8 โวลต์ ซึ่งได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 และวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง จะกำหนดไบอัสแรงดันไฟฟ้าขาเดรนเท่ากับ 30 โวลต์ และแรงดันไฟฟ้าขาเกตเท่ากับ 8 โวลต์ ซึ่งได้ทำการทดลองวัดผลกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุต ตลอดย่านความถี่ 700 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2000 กิโลเฮิรตซ์ และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ถึงอัตราขยายสัญญาณและประสิทธิภาพของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงต่อไป

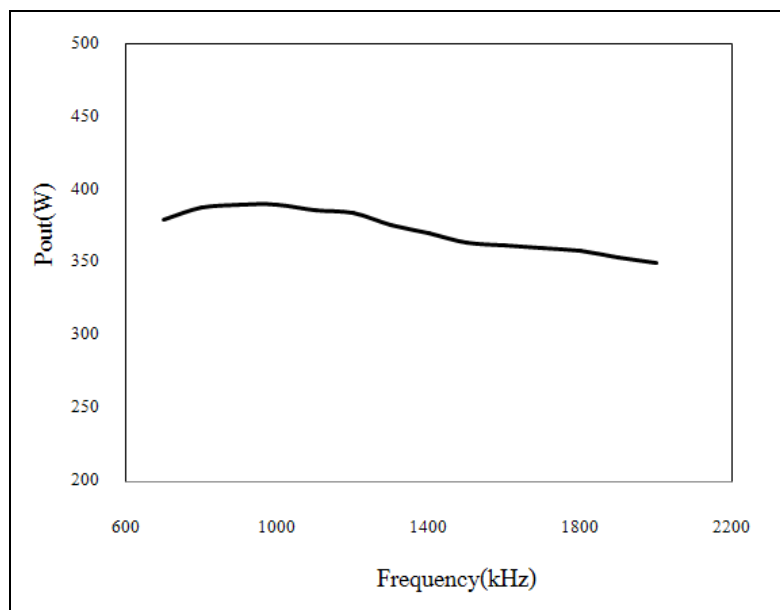


รูปที่ 4.29 ลักษณะการวัดผลการทดลองวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุด

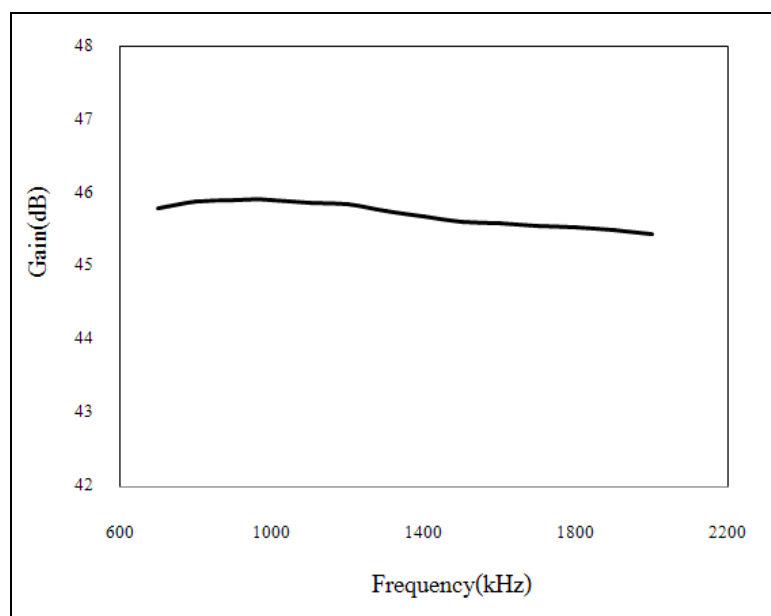


รูปที่ 4.30 การทดลองวัดผลการทดลองวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุด

สำหรับรูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณเอาต์พุตในย่านความถี่ ตั้งแต่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยที่แวนอนคือช่วงความถี่และแนวตั้งคือกำลังเอาต์พุตจากการทดลองพบว่ากำลังเอาต์พุตโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 372 วัตต์ โดยมีกำลังสัญญาณสูงที่สุดที่ 390 วัตต์ ความถี่ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ และเมื่อความถี่เริ่มสูงขึ้นทำให้กำลังเอาต์พุตเริ่มต่ำลงและต่ำสุดที่ 350 วัตต์ ความถี่ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์

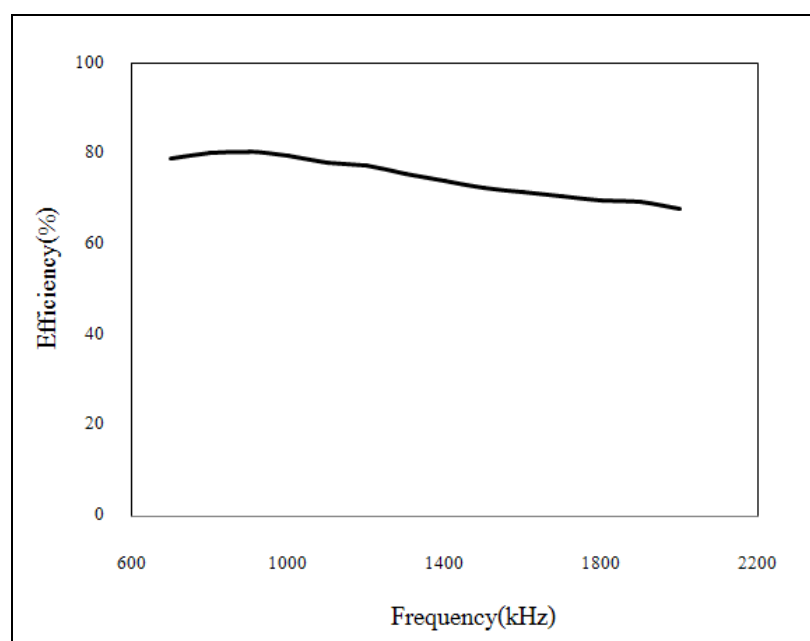


รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบกำลังสัญญาณเอาต์พุตกับความถี่ 700 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ของวงจรมายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุด



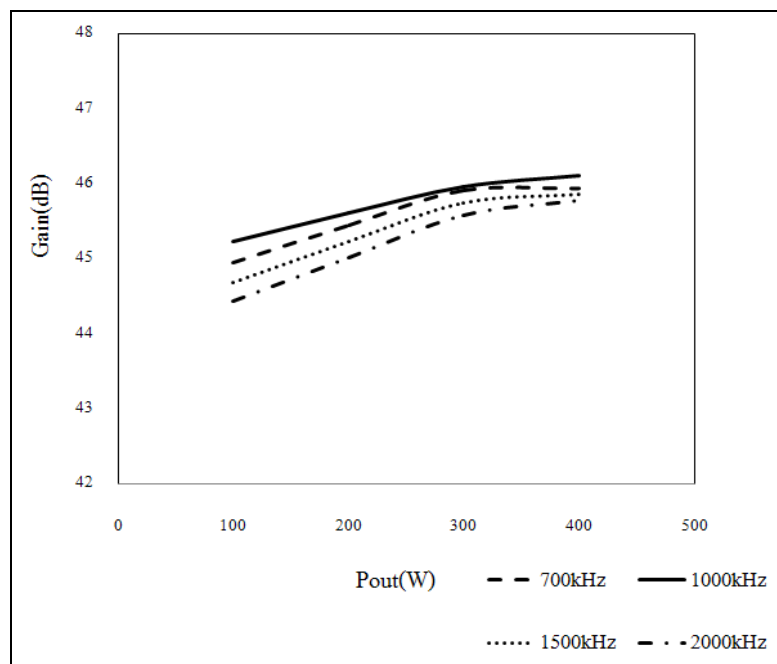
รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบอัตราขยายกับความถี่ 700 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ของวงจรมายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุด

จากผลการทดลองวัดกำลังเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงสามารถนำค่าที่ได้มาคำนวณหาอัตราขยายของสัญญาณจากสมการที่ 4.1 ดังนั้น เมื่อนำค่ามาคำนวณจะทำให้ได้อัตราขยายสัญญาณดังที่แสดงในรูปที่ 4.32 เมื่อแวนอนคือช่วงความถี่และแนวตั้งคืออัตราขยายสัญญาณ พบว่าอัตราขยายสัญญาณสูงสุดอยู่ที่ 46 dB ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และเริ่มลดลงตามความถี่ที่สูงขึ้นโดยต่ำสุดที่ 45.44 dB ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เหลือแล้วมีอัตราขยายสัญญาณประมาณ 45.70 dB และสามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของวงจรได้จากสมการที่ 4.2 และผลที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 4.33 เมื่อแวนอนคือช่วงความถี่และแนวตั้งคือประสิทธิภาพของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงโดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ประมาณ 74%

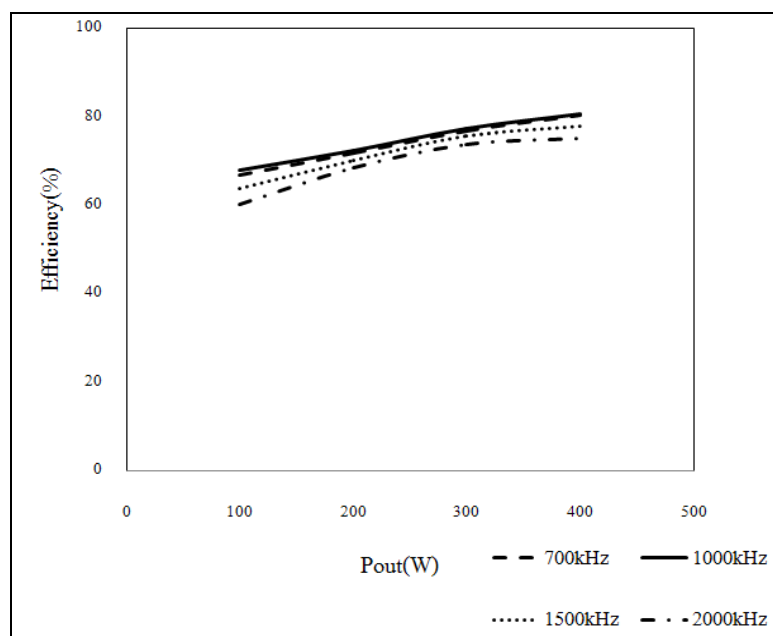


รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุด

สำหรับรูปที่ 4.34 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับอัตราขยายสัญญาณย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยที่แวนอนคือกำลังเอาต์พุตและแนวตั้งคืออัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง ซึ่งอัตราขยายสัญญาณแต่ละความถี่จะมีการเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังเริ่มสูงขึ้นและจะเริ่มคงที่ที่ความถี่ประมาณ 300 วัตต์ แต่ที่ความถี่ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ จะมีอัตราขยายสูงสุด โดยมีอัตราขยายสูงสุดประมาณ 46 dB

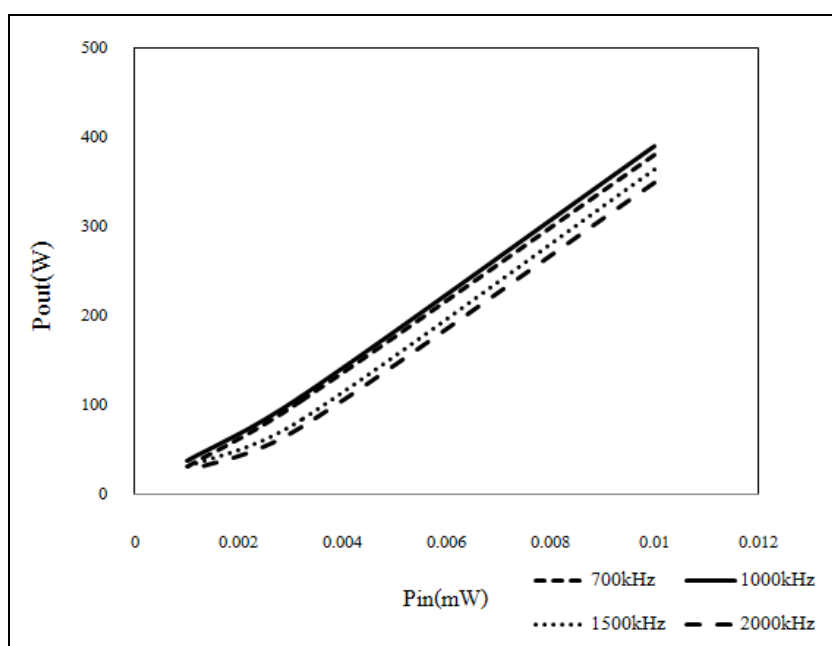


รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับอัตราขยายสัญญาณย่าน 700 กิโลเฮิรตซ์ 1000 กิโลเฮิรตซ์ 1500 กิโลเฮิรตซ์ และ 2000 กิโลเฮิรตซ์ ของวงจรขยายสัญญาณ 2 ชุด



รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกำลังเอาต์พุตย่าน 700 กิโลเฮิรตซ์ 1000 กิโลเฮิรตซ์ 1500 กิโลเฮิรตซ์ และ 2000 กิโลเฮิรตซ์ ของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุด

สำหรับรูปที่ 4.35 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรขยายสัญญาณย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อเทียบกับกำลังเอาต์พุต โดยที่แวนอนคือกำลังเอาต์พุตและแนวตั้งคือประสิทธิภาพของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง พบว่า ประสิทธิภาพเริ่มสูงขึ้นเมื่อกำลังสูงขึ้นจนถึงกำลังเอาต์พุตประมาณ 300 วัตต์ ประสิทธิภาพเริ่มคงที่ แต่ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด และ ความถี่ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ มีประสิทธิภาพ น้อยที่สุดและรูปที่ 4.36 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงความถี่ 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อเทียบกับกำลังอินพุต โดยที่ แวนอนคือกำลังอินพุตและแนวตั้งคือกำลังเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง พบว่ากำลัง เอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามกำลังอินพุตที่เพิ่มขึ้น

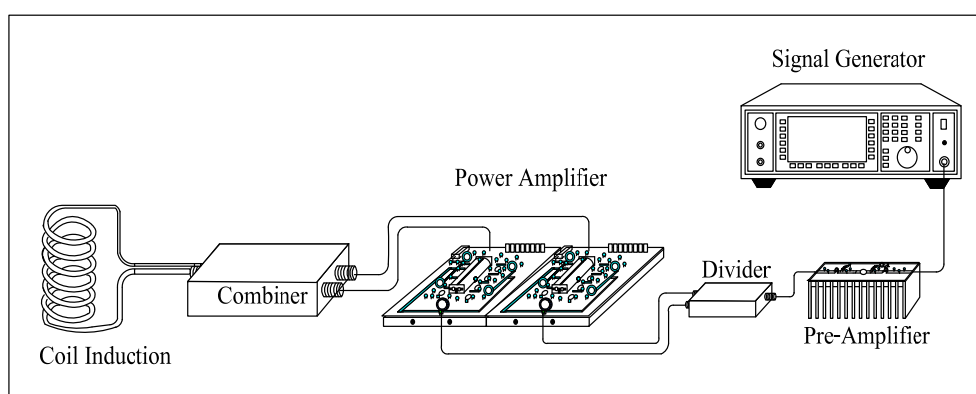


รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบกำลังเอาต์พุตกับกำลังอินพุตย่าน 700 กิโลเฮิร์ตซ์ 1000 กิโลเฮิร์ตซ์ 1500 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ ของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุด

### 4.3 การให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ

สำหรับการวัดผลการให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งจะให้ความร้อนกับแท่ง อลูมิเนียม โดยมีการเตรียมอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.37 และการวัดทดสอบผลดังแสดงดังรูปที่ 4.38 ซึ่งประกอบด้วย วงจรขับกำลังสัญญาณ โดยรับสัญญาณมาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ จากนั้น

เอาต์พุตที่ได้จากวงจรขับกำลังสัญญาณจะเป็นอินพุตของวงจรแยกสัญญาณเพื่อแยกเป็น 2 สัญญาณ จากนั้นส่งต่อสัญญาณไปยังภาควงจรขยายสัญญาณ 2 ชุด หลังจากขยายสัญญาณแล้วกำลังงานทั้งหมดจะรวมสัญญาณที่ภาควงจรรวมสัญญาณกำลังสูงและเชื่อมต่อกับภาควงจรเหนี่ยวนำความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ โดยที่วงจรขับกำลังสัญญาณจะกำหนดไบอัสแรงดันไฟฟ้าขาเดรนเท่ากับ 20 โวลต์ และแรงดันไฟฟ้าขาเกตเท่ากับ 8 โวลต์ สำหรับวงจขยายสัญญาณกำลังสูงจะกำหนดไบอัสแรงดันไฟฟ้าขาเดรนเท่ากับ 30 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าขาเกตเท่ากับ 8 โวลต์ สำหรับการทดลองการให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำนี้ ได้ทดลองที่ย่านความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ โดยใช้กำลังงานขนาดต่าง ๆ ดังแสดงการวัดผลดังต่อไปนี้



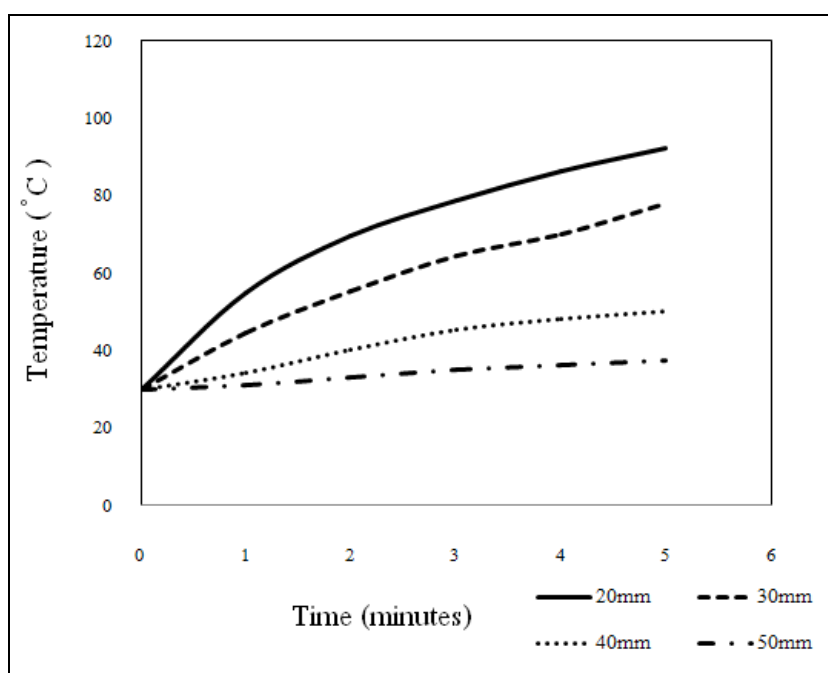
รูปที่ 4.37 ลักษณะการวัดผลการให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.38 การวัดผลการให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำกับแท่งอลูมิเนียม



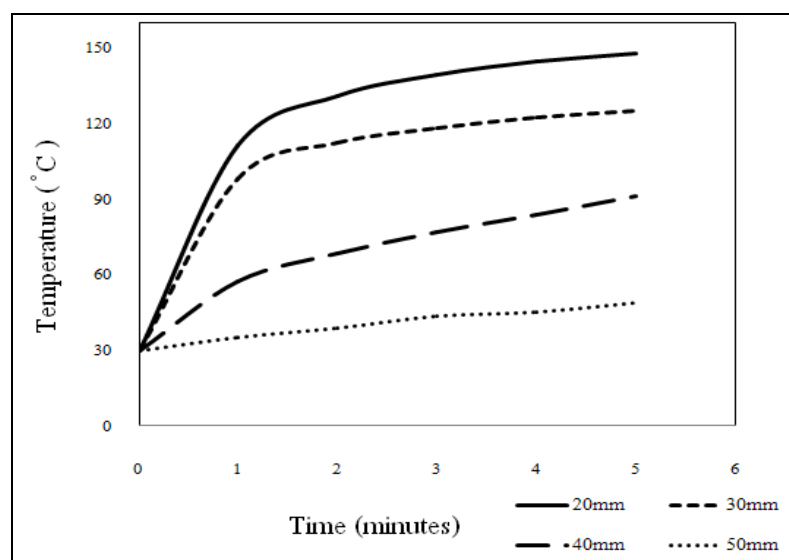
การทดลองการให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียมที่มีขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และความหนา 4 มิลลิเมตร ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ขนาดกำลังงาน 100 วัตต์ วัดอุณหภูมิเทียบกับเวลานาน 5 นาที และเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดให้มีระยะ 20 มิลลิเมตร 30 มิลลิเมตร 40 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร โดยค่าความเหนี่ยวนำเท่าเดิมที่ได้ ออกแบบในบทที่ 3 ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.39 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ขดลวดขนาดต่าง ๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่ขดลวดเหนี่ยวนำที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราให้ความร้อนที่เร็วและสูงกว่าขนาดใหญ่ อย่างเช่นที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร อุณหภูมิเริ่มต้นของแท่งอลูมิเนียมที่  $25^{\circ}\text{C}$  เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 92 องศาเซลเซียส ส่วน 50 มิลลิเมตร เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที เช่นเดียวกันอุณหภูมิอยู่ที่  $32^{\circ}\text{C}$  เป็นต้น



รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ 100 วัตต์ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเหนี่ยวนำ 20 มิลลิเมตร 30 มิลลิเมตร 40 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร ในการให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียม

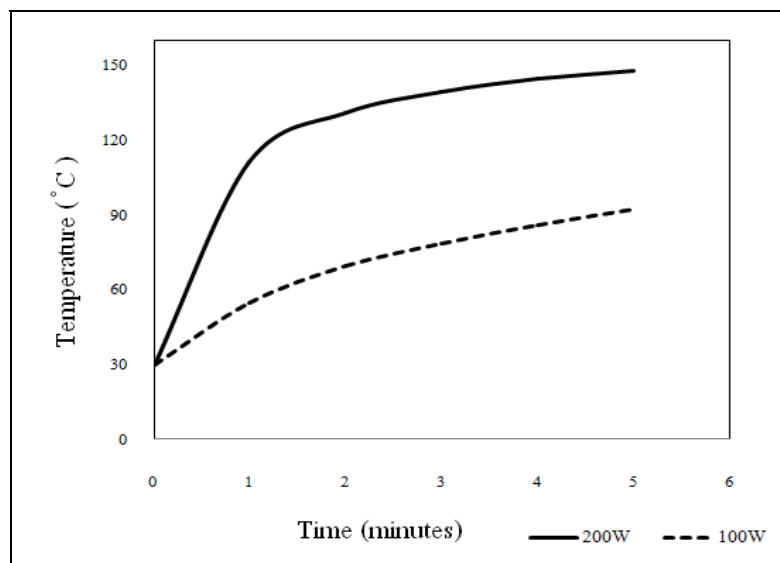
สำหรับการให้ความร้อนโดยการเพิ่มกำลังงานสูงขึ้น ซึ่งจะทดลองให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียมที่มีขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และความหนา 4 มิลลิเมตร ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และใช้ขนาดกำลังงานเท่ากับ 200 วัตต์ วัดอุณหภูมิเทียบกับ

เวลานาน 5 นาที และเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดให้มียาระยะ 20 มิลลิเมตร 30 มิลลิเมตร 40 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร โดยค่าความเหนียวนำเท่าเดิม ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.40 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ขดลวดขนาดต่าง ๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จะให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่ขดลวดเหนียวนำที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราให้ความร้อนที่เร็วและสูงกว่าขนาดใหญ่ อย่างเช่นที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร อุณหภูมิเริ่มต้นของแท่งอลูมิเนียมที่ 25 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 142 องศาเซลเซียส ส่วนที่ 50 มิลลิเมตร เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที เช่นเดียวกันอุณหภูมิอยู่ที่ 32 องศาเซลเซียส เป็นต้น

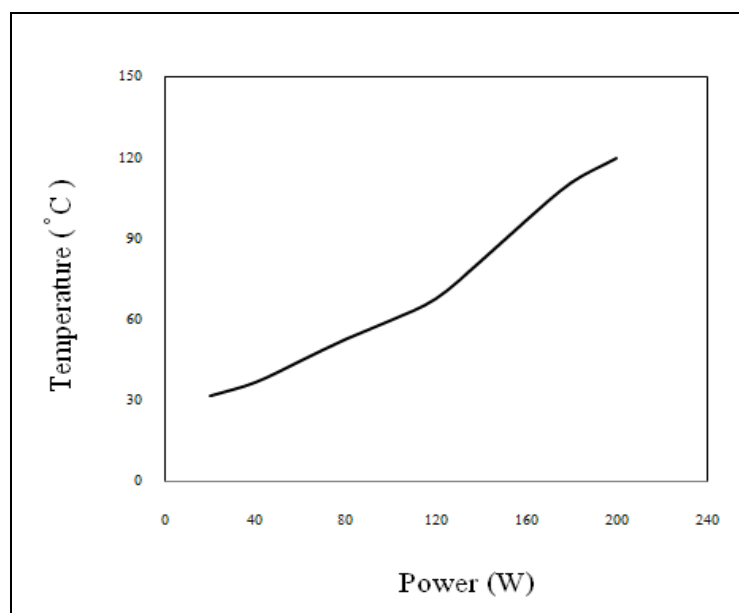


รูปที่ 4.40 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ 200 วัตต์ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเหนียวนำ 20 มิลลิเมตร 30 มิลลิเมตร 40 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร ในการให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียม

และจากผลการวัดและทดสอบการให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียมด้วยกำลังงานขนาด 100 วัตต์ และ 200 วัตต์ ที่ขดลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 มิลลิเมตร ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ แสดงดังรูปที่ 4.41 โดยที่แวนอนเป็นเวลา และแนวตั้งเป็นอุณหภูมิ โดยพบว่าในช่วงเวลาแรก ๆ การให้ความร้อนสูงขึ้นเร็วมากจนเวลาผ่านไปถึงประมาณ 1.20 นาที ความร้อนจะเริ่มเพิ่มขึ้นทีละน้อยโดยการให้กำลังงานที่สูงทำให้การให้ความร้อนสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นที่กำลังงาน 200 วัตต์ มีการให้ความร้อนถึง 142 องศาเซลเซียส ในเวลา 5 นาที และที่กำลังงาน 100 วัตต์ มีการให้ความร้อน 92 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาเท่ากัน



รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ กำลังงาน 100 วัตต์ และ 200 วัตต์ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเหนี่ยวนำ 20 มิลลิเมตร ในการให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียม



รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับกำลังงานที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเหนี่ยวนำ 20 มิลลิเมตร ในการให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียมเป็นเวลา 1 นาที

และเมื่อทำการทดสอบการให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียมที่มีขนาดเท่าเดิมและใช้ขดลวดเหนียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเท่ากับ 20 มิลลิเมตร ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้กำลังงานตั้งแต่ 20 วัตต์จนถึง 200 วัตต์ เป็นเวลา 1 นาที ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.42 พบว่าเมื่อกำลังงานสูงขึ้นทำให้มีอัตราการให้ความร้อนที่สูงขึ้นตามไปด้วยอย่างเช่น ที่กำลังงาน 20 วัตต์มีความร้อนเพียงประมาณ 40 องศาเซลเซียส กับกำลังงาน 200 วัตต์ มีความร้อนถึง 142 องศาเซลเซียส เป็นต้น

#### 4.4 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอการวัดและผลการทดลองของวงจรย่านความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนียวทำความร้อน โดยได้วัดสัญญาณและกำลังงานของภาควงจรต่าง ๆ และการให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียม ซึ่งผลการวัดภาควงจรขับกำลังสัญญาณ จะมีขนาดกำลังงานเฉลี่ยประมาณ 10 วัตต์ มีอัตราขยายสัญญาณเฉลี่ยประมาณ 30 dB ประสิทธิภาพรวมของวงจรเท่ากับ 69% ภาควงจรขยายสัญญาณกำลังสูงชุดเดียว มีขนาดกำลังงานเฉลี่ยประมาณ 192 วัตต์ มีอัตราขยายสัญญาณเฉลี่ยประมาณ 13 dB ประสิทธิภาพรวมของวงจรเท่ากับ 74% ภาควงจรขยายสัญญาณกำลังสูงสองชุดมีขนาดกำลังงานเฉลี่ยประมาณ 372 วัตต์ มีอัตราขยายสัญญาณเฉลี่ยประมาณ 46 dB และมีประสิทธิภาพรวมของวงจรเท่ากับ 74% และสำหรับภาควงจรการให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนียวนำซึ่งให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียมที่มีขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และความหนา 4 มิลลิเมตร ใช้กำลังงานจากเครื่องขยายสัญญาณขนาด 100 วัตต์ และ 200 วัตต์เป็นเวลา 5 นาที และให้ความร้อนด้วยขดลวดขนาดต่าง ๆ จะเห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดที่มีขนาดเล็กมีอัตราการให้ความร้อนที่เร็วและสูงกว่าขดลวดเหนียวนำที่มีขนาดใหญ่กว่าและการให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนียวนำโดยใช้วงจรขยายสัญญาณขนาด 200 วัตต์ จะทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นกับแท่งอลูมิเนียมเร็วขึ้น ซึ่งผลที่ได้ทำให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพมากต่อการใช้งานเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในการให้ความร้อนในรูปแบบต่าง ๆ และพัฒนาต่อไป

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์ ออกแบบ ทดสอบ และเปรียบเทียบผลของการวัดผลวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน การวิจัยเริ่มจากการศึกษาเนื้อหาและความสำคัญของปัญหา ตั้งแต่วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย จากนั้นศึกษาทฤษฎีของวงจรนำความร้อนสำหรับการเหนี่ยวนำความร้อนด้วยสนามแม่เหล็ก ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะของวงจรเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับการให้ความร้อนกับอลูมิเนียม ทฤษฎีวงจรรขยายสัญญาณกำลังสูง ออกแบบวงจร และสร้างวงจรความถี่วิทยุสำหรับการเหนี่ยวนำความร้อน โดยจากการศึกษาลักษณะวงจรประกอบด้วย วงจรขับกำลังสัญญาณที่มีกำลังเอาต์พุตขนาดประมาณ 10 วัตต์ เป็นกำลังอินพุตให้กับวงจรแยกสัญญาณเป็นสองทางและส่งต่อยังภาควงจรรขยายสัญญาณกำลังสูงทั้งสองชุดเท่า ๆ กันและรวมสัญญาณทั้งสองชุดในภาคสุดท้ายสำหรับเป็นแหล่งจ่ายกำลังให้กับภาควงจรเหนี่ยวนำความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำและในส่วนของการทดลองและผลการทดลองจะวัดเป็นสองส่วนในส่วนแรกวัดในส่วนของวงจรรภาคกำลังประกอบด้วยวงจรขับกำลังสัญญาณ วงจรรขยายสัญญาณกำลังสูงและในส่วนที่สองวัดการให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียมโดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำ

จากการวัดผลวงจรรขับกำลังสัญญาณพบว่ามีกำลังงานโดยเฉลี่ยประมาณ 10 วัตต์ มีอัตราการขยายสัญญาณเฉลี่ยประมาณ 30 dB มีประสิทธิภาพรวมของวงจรประมาณ 69% และเมื่อวัดวงจรรขยายสัญญาณกำลังสูงสำหรับชุดเดียว พบว่ามีกำลังงานโดยเฉลี่ยประมาณ 192 วัตต์ มีอัตราขยายเฉลี่ยประมาณ 13 dB และมีประสิทธิภาพรวมของวงจรประมาณ 74% และเมื่อวัดวงจรรขยายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุด พบว่ามีกำลังงานสูงสุดที่ประมาณ 390 วัตต์ หรือมีอัตราการขยายสัญญาณโดยเฉลี่ยประมาณ 45.7 dB มีประสิทธิภาพรวมของวงจรประมาณ 74% และสำหรับการทดสอบการให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำกับแท่งอลูมิเนียมที่มีขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และความหนา 4 มิลลิเมตร ใช้กำลังงานจากวงจรรขยายสัญญาณกำลังสูงขนาด 200 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที ในการให้ความร้อนด้วยขดลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่าง ๆ จะเห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดที่มีขนาดเล็กมีอัตราการให้ความร้อนที่เร็วและสูงกว่าขดลวดเหนี่ยวนำที่มีขนาดใหญ่กว่า อย่างเช่นที่ขดลวดขนาด 20 มิลลิเมตร มีการให้ความร้อน

ถึง 148 องศาเซลเซียส กับ 50 มิลลิเมตร มีการให้ความร้อนเพียง 40 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลา 5 นาทีเท่ากัน และเมื่อให้ความร้อนด้วยกำลังงานที่แตกต่างจะพบว่าเมื่อกำลังงานสูงขึ้นจะทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลที่ได้ทำให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพต่อการใช้งาน เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในการให้ความร้อนกับอลูมิเนียมและพัฒนาต่อไป

สรุปผลที่ได้จากการทดสอบวงจรความถี่วิทยุที่ได้สร้างและออกแบบมีกำลังงาน อัตราขยาย และประสิทธิภาพที่สูงและเมื่อนำไปทดสอบการให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียมพบว่าการตอบสนองการให้ความร้อนที่ดี

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

การออกแบบวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนในส่วนของวงจรขยาย สัญญาณกำลังสูงมีการออกแบบวงจรหลายส่วนประกอบด้วยส่วนแรกภาคการแยกสัญญาณเพื่อเป็นอินพุตให้กับขาเกตของมอสเฟตแต่ละตัวลักษณะของสัญญาณที่ขาเกตความถี่สัญญาณที่เท่ากันและเหมือนกันเพื่อการทำงานที่มีประสิทธิภาพของวงจรและในส่วนของตัวมอสเฟตถ้าต้องการให้ทนต่อการใช้งานควรใช้มอสเฟตที่มีการทนแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น และในส่วนของการป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback) ส่วนของตัวต้านทานควรเป็นตัวต้านทานที่มีกำลังวัตต์สูงเนื่องจากจะมีความร้อนเกิดขึ้นสูง ถ้าใช้กำลังวัตต์ต่ำอาจทำให้วงจรเกิดการเสียหายได้ และความ เป็นชนิด Carbon สำหรับภาควงจรรวมในภาคสุดท้ายการออกแบบจะเป็นหม้อแปลงแมตซ์ซึ่งเอาต์พุต ในส่วนนี้หม้อแปลงควรมีขนาดใหญ่เพื่อทนต่อกำลังงานสูง และในส่วนของภาควงจรเหนี่ยวนำความร้อนการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำมีผลต่อการให้ความร้อนพอสมควร ดังนั้นการออกแบบจึงควรคำนึงถึงการคำนวณกับวงจรเรโซแนนซ์ และความเหมาะสมกับการใช้งานเพื่อให้ได้กำลังงานที่ดีที่สุดสำหรับนำไปใช้งานต่อไป

## 5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

แนวทางการพัฒนาต่อไปของวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสามารถออกแบบโดยการเพิ่มส่วนของวงจรขยายสัญญาณให้มากขึ้นอีกเพื่อเพิ่มกำลังและประสิทธิภาพของวงจร และการให้ความร้อนที่สูงและสามารถเลือกมอสเฟตที่มีอัตราการขยายสัญญาณที่สูงขึ้น และ ทดกระแสไฟฟ้ามมากขึ้น เพื่อทนต่อการใช้งาน และสามารถออกแบบให้วงจรมีกำลังงานสูงสำหรับนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่อไปได้

## รายการอ้างอิง

- ชาญชัย ทองโสภากา. (2549). การออกแบบวงจรคลื่นความถี่วิทยุ. เอกสารประกอบการสอน  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Frenzel, Louis E. (2004). **RF Power for industrial Applications**. Upper Saddle River, NJ:  
Prentice-Hall.
- Gonzalez, G. (1984). **Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design**. New Jersey:  
Prentice-Hall.
- Grebennikov, A. (2004). **RF and Microwave Power Amplifier Design**. New York: McGraw-  
Hill.
- Hang, C.Y. Wang, Y. Itoh, T. (2002) **A new amplifier power combining scheme with optimum  
efficiency under variable outputs**. IEEE Microwave Symposium Digest, Vol.2 : pp  
916-916.
- Hinchliffe, S. Hobson, L. (1988) **High-frequency (>1 MHz) convertors for induction heating  
applications**. IET Electronics Letters, Vol 24 : pp 697-698
- Hinchliffe, S. Hobson, L. (1988) **High power class-E amplifier for high-frequency induction  
heating applications**. IET Electronics Letters, Vol.24 : pp. 886-888.
- Kenington, Peter B. (2000). **High-Linearity RF Amplifier Design**. Boston, MA: Artech House.
- Kotsuka, Y. Watanabe, M. Hosoi, M. Isono, I. and Izumi, M. (2000) **Development of Inductive  
Regional Heating System for Breast Hyperthermia**. IEEE Microwave Theory and  
Techniques, : pp.1807-1814.
- Kwan, J. W. Vries, G. J. Ackerman, G. D. and Williams, M. D. (1993). **Radio Frequency Power  
System For Inductive Heating in Ion Sources**. IEEE/NPSS Fusion Engineering, 15<sup>th</sup>,  
Vol. 2 :pp. 743-746.
- Ludwig, R. Bretchko, P. (2000). **RF Circuit Design Theory and Application**. New Jersey:  
Prentice-Hall.

- Sugimura, H. Sang-Pil Mun, Soon-Kurl Kwon, Mishima, T. and Nakaoka, M. (2008) High-frequency resonant matrix converter using one-chip reverse blocking IGBT-Based bidirectional switches for induction heating **IEEE Power Electronics Specialists Conference, :pp. 3960-3966.**
- Sahan, N. Inal, M. E. Demir, S. and Toker, C. (2008) **High-Power 20–100-MHz Linear and Efficient Power-Amplifier Design.** IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, Vol. 56 : pp.2032-2039.
- 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
- Wu, L. Yilmaz, H. Bitzer, T. Berroth, A. and Pescht, M (2005) A Dual-Frequency Wilkinson Power Divider For a Frequency and Its First Harmonic. **IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS, Vol.15 : pp. 107-109.**



ภาคผนวก ก

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

## บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Santalunai, S. and Thongsopa, C. (2009). **High Power Amplifier Design for RF Induction**

**Heating.** Proceedings of the Electrical Engineering Conference, Prajeenburi, Thailand

Thongsopa, C. and Santalunai, S. (2010). **RF Induction Heating Circuit Design for Aluminum**

**Heating.** The Journal of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand.(Submit)

## การออกแบบวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง สำหรับการเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่วิทยุ

### High Power Amplifier Design for RF Induction Heating

สำราญ สันทาลุนย์ และ ชาญชัย ทองโสภิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทร 085-0161502,081-8378185

E-mail: M5140695@g.sut.ac.th and Chan@sut.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างวงจรขยายกำลัง (Power amplifier) สำหรับการเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่ 700 kHz ถึง 2 MHz ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction coil) โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก โดยภาคขยายสัญญาณกำลังสูงมีขนาด 200 W ใช้มอสเฟตเบอร์ BLF177 ออกแบบเป็นคลาสเอบีแบบพุชพูลรับสัญญาณอินพุต 10 W จากภาควงจรขับกำลังสัญญาณ (Preamplifier) และใช้หม้อแปลงแยกสัญญาณ (Splitter) เป็นแปดเส้นทางสำหรับเป็นสัญญาณอินพุตให้กับมอสเฟตแต่ละตัวของภาคขยายสัญญาณ วงจรขยายสัญญาณนี้ใช้แหล่งจ่ายแรงดัน 30 โวลต์ อิมพีแดนซ์ด้านเข้าและด้านออก 50 โอห์ม ออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 แบบสองหน้า มีความต้านทานป้อนกลับป้องกันการเกิดการออสซิลเลชันของภาคขยายสัญญาณกำลังสูง ซึ่งผลที่ได้วงจรถายสัญญาณมีอัตราขยายเท่ากับ 12 dB ประสิทธิภาพวงจรถาย 72.78% และเมื่อให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียม โดยขดลวดเหนี่ยวนำพบว่าประสิทธิภาพการให้ความร้อนที่ดี ซึ่งวงจรมีขนาดเล็ก กะทัดรัด ต้นทุนต่ำ เหมาะที่จะใช้ในการให้ความร้อนกับอลูมิเนียมต่อไป

คำสำคัญ : วงจรขยายสัญญาณกำลังสูง, เหนี่ยวนำความร้อน

#### Abstract

This paper presents design and implementation of high power amplifier for induction heating using radio frequency (RF) from 700 kHz to 2 MHz. The maximum output of the high power amplifier power is 200 W and it is implemented by using MOSFETs (BLF177) operating in class AB (push-pull) configuration. The amplifier consists of pre-amplifier, power splitter, MOSFET power amplifiers, and power combiner. The continuous wave (CW) signal is amplified to 10 Watts by the pre-amplifier. This 10-watt CW signal is feed into splitter transformer and each output from the splitter is amplified by each MOSFET power amplifier. The MOSFET amplifiers employ the resistive negative feedback to avoid oscillation. Then, the output signals from MOSFET power amplifiers are combined by the final stage power combiner. The amplifier uses a single 30 volts power supply. The amplifier's input and output impedance are 50 ohms. The amplifier gain

is 12 dB with the efficiency of 72.78 %. All components of the amplifier are on double sides plated through hole FR4 PCB. Hence, the amplifier is compact and low cost. The amplifier exhibits high performance for aluminum heating.

Keywords : High power amplifier , Induction heating.

#### 1. บทนำ

ปัจจุบันการเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Heating) ได้รับความสนใจอย่างมาก และมีการใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมต่างๆและทางการแพทย์เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและประหยัดพลังงาน ซึ่งลักษณะของการเหนี่ยวนำความร้อนจะมีทั้งแบบวงจรที่เป็นสวิทช์ซิง (Switching circuit) ที่ส่วนใหญ่จะใช้ในงานอุตสาหกรรมครัวเรือนหรืออุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น เตาอบแบบเหนี่ยวนำ หม้อต้มแบบเหนี่ยวนำ การชุบแข็งโลหะ เป็นต้น ซึ่งความถี่ที่ใช้ในการสวิทช์จะอยู่ในย่านความถี่ต่ำไม่เกิน 200 kHz [1] และอีกแบบหนึ่งคือ การเหนี่ยวนำความร้อนด้วยความถี่สูงย่านความถี่วิทยุ (RF Induction Heating) โดยส่วนใหญ่จะออกแบบเป็นวงจรขยายสัญญาณ [2] และใช้ความถี่ระดับเมกะเฮิรตในการเหนี่ยวนำความร้อน ซึ่งจะขึ้นประโยชน์ทางด้านให้ความร้อนทางการแพทย์ เช่น การให้ความร้อนสำหรับการบำบัดรักษาโรคมะเร็ง (Hyperthermia) [3] การให้ความร้อนกับอลูมิเนียม ซึ่งวงจรที่เป็นสวิทช์ซิงความถี่ต่ำไม่สามารถให้ความร้อนได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เห็นความสำคัญและมีความสนใจที่จะศึกษาการเหนี่ยวนำความร้อนย่านความถี่วิทยุ จึงได้ออกแบบและสร้างเครื่องที่เป็นวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงเพื่อที่จะเป็นแหล่งจ่ายกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ ลักษณะวงจรถายสัญญาณกำลังสูงสำหรับการเหนี่ยวนำความร้อนจะเป็นดังโครงสร้างในรูปที่ 1 ซึ่งจะประกอบด้วยวงจรขับกำลังสัญญาณที่มีกำลังสัญญาณเอาต์พุตประมาณ 10 W เป็นกำลังสัญญาณอินพุตให้กับวงจรถายสัญญาณกำลังสูง ซึ่งสัญญาณอินพุตเข้ามาผ่านหม้อแปลงชุดแรกทำหน้าที่แยกสัญญาณออกเป็น 2 ทางและแปลงสัญญาณให้มีความต่างเฟสกัน 180 องศาจากนั้นแยกสัญญาณที่ได้ให้เป็น 4 สัญญาณและทำการแยกสัญญาณอีกครั้งโดยใช้หม้อแปลงจะทำให้ได้สัญญาณทั้งหมด 8 สัญญาณอินพุตเท่ากันและเมื่อขยายสัญญาณกำลังสูงเอาต์พุตทั้งหมดจะรวมสัญญาณในภาคสุดท้ายเป็นหม้อแปลงเอาต์พุต

แมตซ์ซิ่ง ซึ่งจะรวมกำลังงานทั้งหมดของวงจรรขยายสัญญาณเพื่อจ่ายกำลังให้กับ โหลดซึ่งเป็นขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนและนำไปใช้งานต่อไป

**2. การออกแบบวงจรรขยายสัญญาณและขดลวดเหนี่ยวนำ**

การเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูงย่านความถี่วิทยุจะมี ส่วนประกอบหลักสองส่วนคือวงจรรขยายสัญญาณกำลังสูงที่เป็น แหล่งจ่ายกำลังงานและส่วนของการเหนี่ยวนำความร้อนโดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำ

**2.1 การออกแบบวงจรรขยายสัญญาณกำลังสูง**

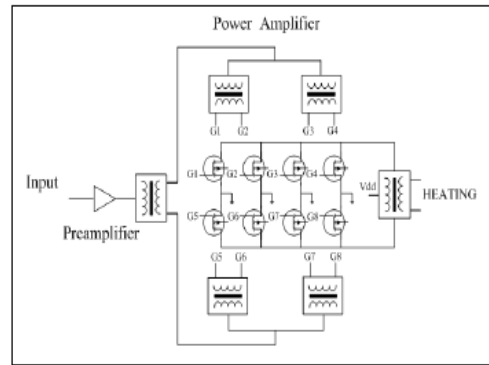
ลักษณะของวงจรรขยายสัญญาณกำลังสูงจะออกแบบ โดยใช้ มอสเฟตเบอร์ BLF177 ทั้งหมด 8 ตัว ออกแบบเป็นคลาสเอบีในย่าน ความถี่วิทยุ โดยลักษณะของวงจรจะแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งในส่วนของวงจรร ายแบบที่ได้ออกแบบจะมีการใส่ตัวต้านทานปรับค่าได้ RG1-RG8 เพื่อ กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าขาเกตแต่ละตัวของมอสเฟต และจากการ คำนวณหาค่า K (Rollett Stability Factor) เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของ มอสเฟตเบอร์ BLF177 คำนวณที่ ความถี่ 1 MHz โดย  $\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$  และ  $S_{11} = 0.86 \angle -110.20^\circ$ ,  $S_{22} = 36.90 \angle 114.20^\circ$ ,  $S_{12} = 0.02 \angle 25.20^\circ$  และ  $S_{21} = 0.86 \angle -84.90^\circ$  ซึ่งสามารถคำนวณหา ค่า K ได้จากสมการที่ (1) โดยเงื่อนไข ถ้าค่า  $K < 1$  วงจรรขยายสัญญาณจะมี การออสซิลเลตตัวเอง [4] จากการคำนวณได้ค่า  $K = -0.21$  ซึ่งจะเป็นตาม เงื่อนไขที่ทำให้เกิดการออสซิลเลต ดังนั้นจึงแก้ปัญหาด้วยการนำตัว ต้านทานที่มีกำลังวัตต์สูง ซึ่งจะเพิ่ม R1-R8 ต่อคร่อมระหว่างขาเกตกับขา เกตหรือที่เรียกว่า Negative feedback เพื่อป้องกันการออสซิลเลตของ วงจรรขยายสัญญาณกำลังสูง

$$K = \frac{1 + |\Delta|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2 \times |S_{21}| \times |S_{12}|} \tag{1}$$

สำหรับสัญญาณอินพุตที่รับมาจากวงจรรับกำลังสัญญาณจะ ผ่านทางหม้อแปลงอินพุต T1 พันในอัตราส่วน 1:1 คำนวณหาค่าโดยใช้ สมการที่ (2)

$$L = \frac{4R}{2\pi f} \tag{2}$$

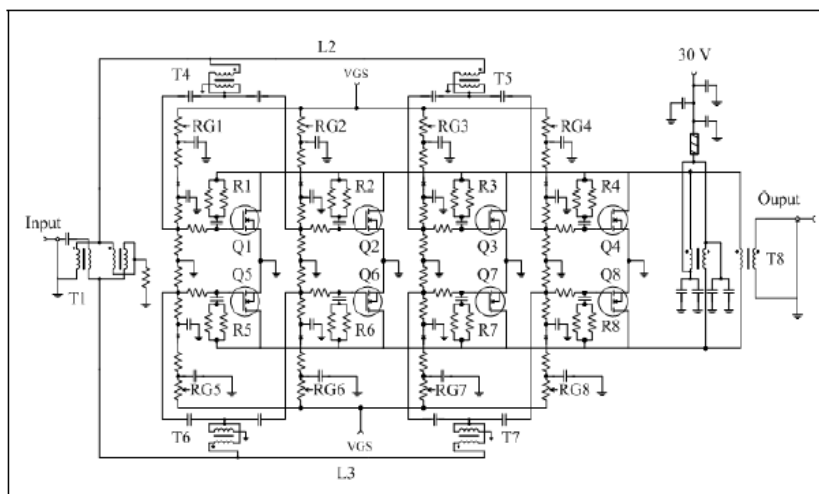
โดยที่ L คือค่าความนำไฟฟ้า, R คือค่าอิมพีแดนซ์, f คือความถี่ และเมื่อ กำหนดให้ค่าความถี่เท่ากับ 1 MHz ค่าอิมพีแดนซ์อินพุตหม้อแปลง 50 โอห์ม หากค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 31.8  $\mu\text{H}$  และใช้สมการที่ (3) ในการ หาความสัมพันธ์ค่าจำนวนรอบโดยที่ N คือ จำนวนรอบ,  $\mu_r$  คือสภาพ ความซึมซาบในอากาศว่าง,  $\mu_w$  คือสภาพความซึมซาบสัมพัทธ์ของ ตัวกลาง, A คือพื้นที่หน้าตัดของแกนเทอร์ลอยด์, L คือค่าความเหนี่ยวนำ และ I คือค่าเฉลี่ยของเส้นแรง ซึ่งจากการคำนวณ โดยขนาดของแกน



รูปที่ 1 โครงสร้างของวงจรรขยายสัญญาณกำลังงานสูงย่านความถี่วิทยุ

$$N = \sqrt{\frac{Ll}{\mu_0 \mu_r A}} \tag{3}$$

เทอร์ลอยด์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรอบนอก 24 mm รอบใน 15 mm และ ความสูง 8 mm ทำให้ได้จำนวนรอบเท่ากับ 19 รอบ สร้างหม้อแปลง จำนวน 2 ตัวต่ออนุกรมกันทำหน้าที่แยกสัญญาณเป็น L2 และ L3 และทำ ให้สัญญาณที่มีความต่างเฟสกัน 180 องศา จากนั้นแยกสัญญาณที่ได้ให้ เป็น 4 สัญญาณเพื่อเป็นอินพุตให้กับหม้อแปลง T4, T5, T6 และ T7 ซึ่งจะ เป็นหม้อแปลงแยกสัญญาณอีกชุดหนึ่งจะใช้แกนเทอร์ลอยด์ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางรอบนอก 18 mm รอบใน 7 mm และความสูง 6 mm คำนวณหาค่าจำนวนรอบจากสมการที่ (3) ซึ่งจะทำได้จำนวนรอบเท่ากับ 16 รอบ หลังจากนั้นเอาต์พุตจากหม้อแปลงทั้ง 4 ชุดจะเป็นสัญญาณ อินพุตให้กับมอสเฟตของแต่ละชุดโดยหม้อแปลง T4 เป็นสัญญาณ อินพุตให้กับมอสเฟต Q1 และ Q2 หม้อแปลง T5 เป็นอินพุตให้กับ มอสเฟต Q3 และ Q4 หม้อแปลง T6 เป็นสัญญาณอินพุตให้กับมอสเฟต Q5 และ Q6 และ หม้อแปลง T7 เป็น สัญญาณ อินพุต ให้กับ มอสเฟต Q7 และ Q8 เมื่อทำการขยายสัญญาณแล้วกำลังสัญญาณเอาต์พุต ทั้งหมดจะถูกรวมสัญญาณในภาคสุดท้าย ซึ่งเป็นส่วนของการรวมกำลัง สัญญาณทั้งหมดโดยใช้หม้อแปลงเอาต์พุตแมตซ์ซิ่ง T8 ซึ่งการออกแบบ จะใช้แกนเทอร์ลอยด์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรอบนอก 15 mm รอบใน 12 mm และความสูง 4 mm นำมาต่อติดกันทั้งหมด 11 ตัวทั้งหมดรวมกัน 2 ชุดและนำมาต่อติดกันและใช้สายโคแอกเชียลขนาด 2 mm พันรอบ แกนเทอร์ลอยด์ที่ประกบติดกันไว้ให้ได้ค่าเท่ากับ 31.8  $\mu\text{H}$  เป็นค่าที่ได้ โดยการคำนวณแมตซ์ซิ่งเอาต์พุต โดยลักษณะของวงจรรขยายสัญญาณ กำลังสูงที่ได้ออกแบบและลงอุปกรณ์เรียบร้อยแล้วจะเป็นดังรูปที่ 3 มี ขนาดความยาวเท่ากับ 20 เซนติเมตรและความกว้างเท่ากับ 15 เซนติเมตร ด้านอินพุตเชื่อมต่อด้วยขั้วต่อแบบ SMA ทางด้านเอาต์พุตเชื่อมต่อด้วย สายโคแอกเชียลและมีการระบายความร้อนด้วยน้ำ (water cooling)



รูปที่ 2 วงจรขยายสัญญาณกำลังสูงขนาด 200 W ย่านความถี่ 1 MHz

### 2.2 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำจะใช้ลวดทองแดงพื้นเป็นรูปก้นหอยชนิดหนึ่งชั้นแก้วอากาศ ซึ่งสามารถลอกแบบได้จากสมการที่ (4) โดยที่  $a$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด,  $b$  คือความยาวของขดลวด  $N$  คือจำนวนรอบและ  $L$  คือค่าอินดักแตนซ์และกำหนดค่าตัวแปรดังนี้

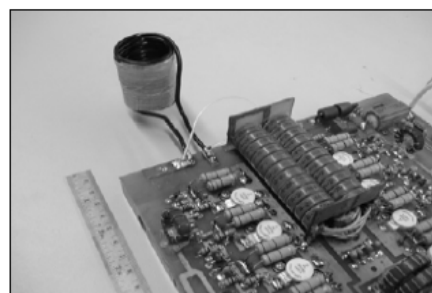
$$L = \frac{a^2 N^2}{9a + 10b} \quad (4)$$

ได้แก่ ระยะห่างระหว่างเส้นขดลวดเหนี่ยวนำ 1 mm ขนาดของเส้นลวด 2 mm และค่าอินดักแตนซ์ 25.33  $\mu$ H ซึ่งได้จากการคำนวณเรโซแนนซ์จากสมการที่ (5) เมื่อ  $C$  คือตัวเก็บประจุ 1 nF และ  $f$  คือความถี่ 1 MHz และกำหนดตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงได้ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด โดยกำหนดให้มีระยะ 20 mm 30 mm 40 mm และ 50 mm ตามลำดับ และใช้แหล่งจ่ายกำลังงานจากเครื่องขยายสัญญาณส่งกำลังงานป้อนเข้าที่ขดลวดเหนี่ยวนำ สำหรับตัวอย่างการให้ความร้อนแก่อลูมิเนียมขนาดความกว้าง 10 mm ความยาว 100 mm และความหนา 4 mm วางตรงกลางของขดลวดเหนี่ยวนำ

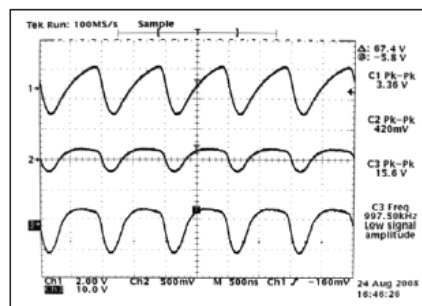
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

### 3. การวัดผลการทดลอง

การวัดผลจะวัดเป็นสองส่วนในส่วนแรกจะวัดวงจขยายสัญญาณกำลังสูงและส่วนที่สองจะวัดการให้ความร้อนโดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำ โดยที่วงจรขับกำลังสัญญาณขนาด 10 W เป็นสัญญาณอินพุตให้กับวงจขยายสัญญาณกำลังสูง ซึ่งวงจขยายสัญญาณกำลังสูงจะใช้แรงดันไฟฟ้ที่ขาเดรนเท่ากับ 30 โวลต์ แรงดันไฟฟ้ขาเกตเท่ากับ



รูปที่ 3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่สร้างทดลอง



รูปที่ 4 สัญญาณออสซิลโลสโคปโพรบคูณ 10 ที่อินพุต (CH1),ขาเกตทั้ง 8 ชุด (CH2) และสัญญาณที่เอาต์พุต (CH3)

3 โวลต์ และการทดลองวัดย่านความถี่ 1 MHz ได้สัญญาณอินพุต (CH1) เท่ากับ 33.6 โวลต์ สัญญาณขาเกตทั้ง 8 ชุด (CH2) เท่ากับ 4.2 โวลต์และสัญญาณเอาต์พุต (CH3) เท่ากับ 156 โวลต์ ดังรูปที่ 4 และค่ากำลังสัญญาณเอาต์พุตเทียบกับความถี่ 700 KHz ถึง 2 MHz ดังตารางที่ 1 โดยใช้เครื่อง Spectrum Analyzer IFR AN930A ในการวัดผลการทดลอง ซึ่ง

F (KHz)	Pout(W)	F (KHz)	Pout(W)
700	170	1400	200
800	184	1500	200
900	190	1600	199
1000	194	1700	197
1100	198	1800	192
1200	199	1900	189
1300	200	2000	186

ตารางที่ 1 กำลังเอาต์พุตต่อความถี่ของวงจรถยายสัญญาณกำลังสูงย่านความถี่ 700 KHz ถึง 2 MHz

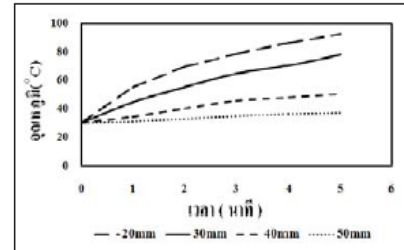
กำลังสัญญาณเอาต์พุตสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 200W ที่ความถี่ 1.3 MHz ถึง 1.5 MHz อัตราขยายสัญญาณอยู่ที่ประมาณ 12 dB ที่ความถี่ 1 MHz มีประสิทธิภาพของวงจรถยายสัญญาณกำลังสูงเท่ากับ 72.78% เมื่อเทียบกับกำลังงานที่ป้อนให้กับวงจรทั้งหมด ในส่วนการวัดผลการให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียมที่มีขนาดความกว้าง 10 mm ความยาว 100 mm และความหนา 4 mm ความถี่ 1 MHz ขนาดกำลังงาน 100 W ในการทดลองวัดอุณหภูมิเทียบกับเวลานาน 5 นาที และเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดให้มีระยะ 20 mm, 30 mm, 40 mm และ 50 mm โดยค่าความเหนี่ยวนำเท่าเดิม ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าที่ขดลวดขนาดต่าง ๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จะให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ขดลวดเหนี่ยวนำที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราให้ความร้อนที่เร็วและสูงกว่าขนาดใหญ่ อย่างเช่นที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm อุณหภูมิเริ่มต้นของแท่งอลูมิเนียมที่ 25 °C เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 92 องศาเซลเซียส ส่วน 50 mm เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที เช่นเดียวกันอุณหภูมิอยู่ที่ 32 °C เป็นต้น

#### 4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบวงจรถยายสัญญาณกำลังสูง สำหรับการเหนี่ยวนำความร้อน โดยใช้การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กซึ่งวงจรประกอบด้วย ภาควงจรถยายสัญญาณกำลังสูงโดยใช้โมสเฟตเบอร์ BLF177 ออกแบบเป็นคลาสเอบีแบบพุทรีบ์สัญญาณอินพุต 10 W จากวงจรถบกำลังสัญญาณ โดยผลที่ได้จะมีกำลังงานสูงสุดที่ 200 W หรือมีอัตราขยายสัญญาณประมาณ 12 dB มีประสิทธิภาพรวมของวงจรเท่ากับ 72.78% และผลการให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำกับแท่งอลูมิเนียมที่มีขนาดความกว้าง 10 mm ความยาว 100 mm และความหนา 4 mm ใช้กำลังงานจากเครื่องขยายสัญญาณขนาด 100 W เป็นเวลา 5 นาที จะเห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดที่มีขนาดเล็กมีอัตราให้ความร้อนที่เร็วและสูงกว่าขดลวดเหนี่ยวนำที่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งผลที่ได้ทำให้เห็นว่าประสิทธิภาพต่อการใช้งานเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในการให้ความร้อนกับอลูมิเนียมและพัฒนาต่อไป

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถานวิจัย สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 5 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาที่ความถี่ 1MHz 100 W และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเหนี่ยวนำ 20mm, 30mm, 40mm และ 50mm ในการให้ความร้อนกับแท่งอลูมิเนียม

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Hisayuki Sugimura, Sang-Pil Mun, Soon-Kurl Kwon, Tomokazu Mishima, Mutsuo Nakaoka "High-frequency resonant matrix converter using one-chip reverse blocking IGBT-Based bidirectional switches for induction heating" PESC 2008. IEEE, 15-19 June 2008, PP.3960-3966
- [2] J. W. Kwan, G. J. de Vries, G. D. Ackerman, and M. D. Williams, "Radio Frequency Power System For Inductive Heating in Ion Sources" Fusion Engineering, 1993, 15th IEEE/NPSS, PP.743-746
- [3] Youji Kotsuka, Masashi Watanabe, Masayuki Hosoi, Iku Isono, and Masaki Izumi "Development of Inductive Regional Heating System for Breast Hyperthermia" Microwave Theory and Techniques, November 2000, PP.1807-1814
- [4] R. Ludwig, P. Bretchko, RF Circuit Design Theory and Application, Prentice-Hall, 2000



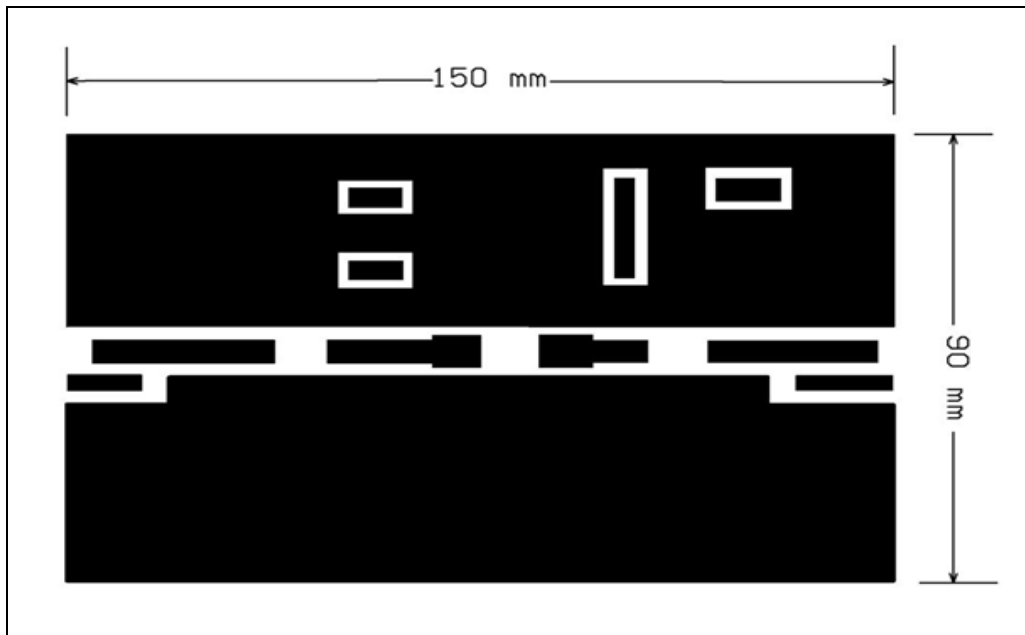
ศาสตราจารย์ สัททกุนย์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2551 ปัจจุบันศึกษาในระดับปริญญาโท สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่สนใจ การออกแบบวงจรทางด้านความถี่สูง



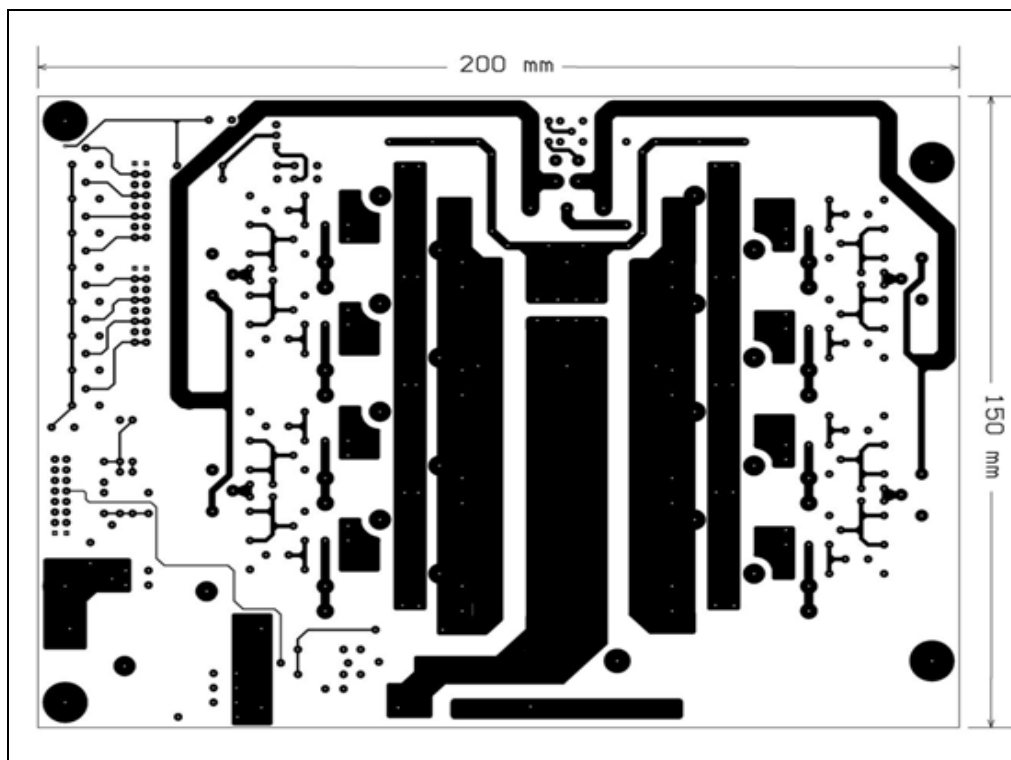
ชาญชัย ทองโสภาก สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี อิเล็กทรอนิกส์ (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2535 ปริญญาโท ไฟฟ้าสื่อสาร จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ปี 2539 และปริญญาเอก ไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2542 ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านวงจรทางด้านความถี่สูงสายอากาศแอคทีฟ และการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ภาคผนวก ข

รายละเอียดวงจรมพิมพ์

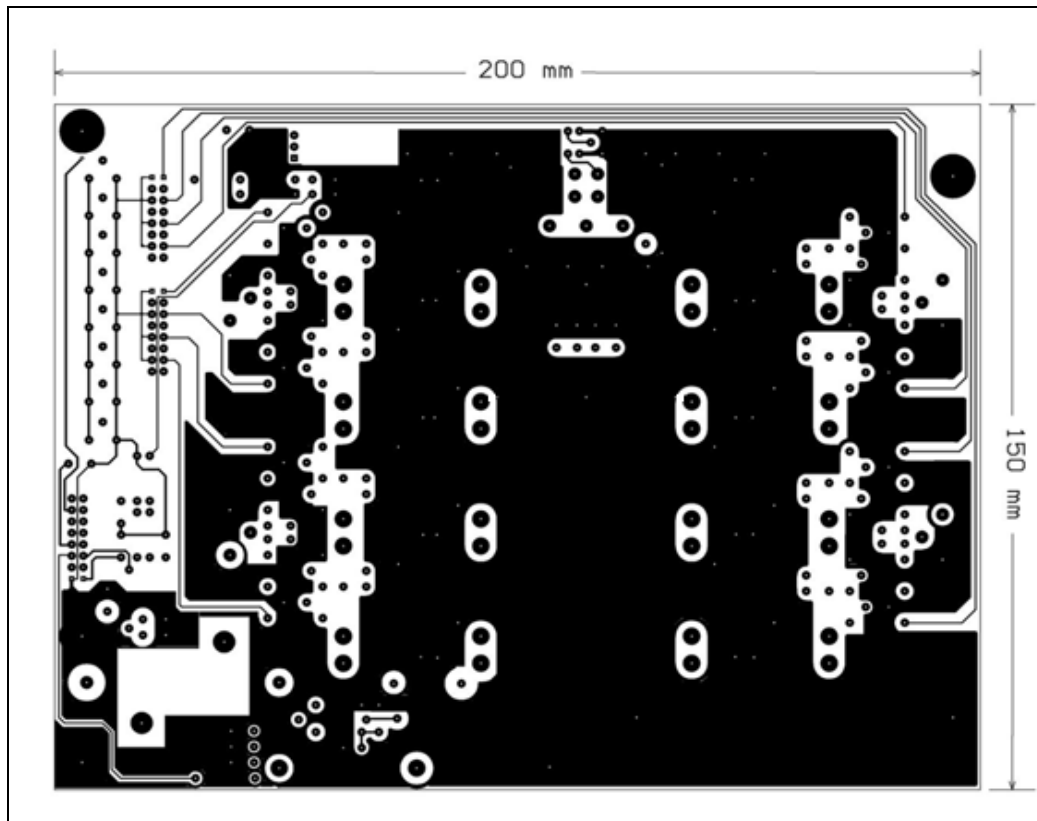


รูปที่ ข.1 วงจรขับกำลังสัญญาณ



รูปที่ ข.2 วงจรขยายสัญญาณกำลังสูงส่วนหน้า





รูปที่ ข.3 วงจรขยายสัญญาณกำลังสูงส่วนหลัง

ภาคผนวก ค

รายละเอียดทางเทคนิคของวงจรความถี่วิทยุสำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลทางเทคนิคของวงจรขับกำลังสัญญาณ

ความถี่	700kHz – 2MHz
อัตราขยายเฉลี่ย	~ 30 dB
กำลังงานเฉลี่ย	~ 10 วัตต์
ประสิทธิภาพเฉลี่ย	~ 69 %
อิมพีแดนซ์	~ 50 โอห์ม
ขั้วเชื่อมต่อ	สายโคแอกเซียล
ขนาด	15 × 9 เซนติเมตร

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลทางเทคนิคของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 1 ชุด

ความถี่	700kHz – 2MHz
อัตราขยายเฉลี่ย	~ 13 dB
กำลังงานเฉลี่ย	~ 192 วัตต์
ประสิทธิภาพเฉลี่ย	~ 74 %
อิมพีแดนซ์	~ 50 โอห์ม
ขั้วเชื่อมต่อ	สายโคแอกเซียล
ขนาด	20 × 15 เซนติเมตร

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลทางเทคนิคของวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง 2 ชุด

ความถี่	700kHz – 2MHz
อัตราขยายเฉลี่ยเฉลี่ย	~ 46 dB
กำลังงานเฉลี่ย	~ 372 วัตต์
ประสิทธิภาพเฉลี่ย	~ 74 %
อิมพีแดนซ์	~ 50 โอห์ม
ขั้วเชื่อมต่อ	สายโคแอกเซียล
ขนาด	40 × 30 เซนติเมตร

## ประวัติผู้เขียน

นายสำราญ สันทาลุนย์ เกิดเมื่อวันที่ 3 เมษายน พ.ศ. 2528 ที่อำเภอสำโรงทาบ จังหวัดสุรินทร์ ปัจจุบันอาศัยอยู่บ้านเลขที่ 79 หมู่ที่ 6 ตำบลหนองไผ่ล้อม อำเภอสำโรงทาบ จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสำโรงทาบวิทยาคม จังหวัดสุรินทร์ ปีการศึกษา 2546 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี 2550

ในปี พ.ศ. 2551 ได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โดยขณะศึกษาระดับปริญญาโท ได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการ 2 รายวิชา ได้แก่

(1) 427333 ปฏิบัติการวิศวกรรมโทรคมนาคม 1

(2) 427434 ปฏิบัติการวิศวกรรมโทรคมนาคม 2

และมีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในปี 2552 ในระดับชาติ 1 ฉบับ ในงานการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 (EECON-32) ในหัวข้อ “*High Power Amplifier Design for RF Induction Heating*” ณ จังหวัดปราจีนบุรี ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 28-30 ตุลาคม 2552