



การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน(Low Pass Filter)
ที่ใช้กำลังงานสูง ย่านความถี่ FM 88-108 MHz

โดย

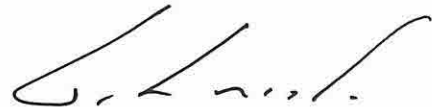
นางสาวศุภรดา	ธัญเกิดผล	รหัสนักศึกษา B5122325
นายปรเมษฐ์	นามวงศ์	รหัสนักศึกษา B5132089
นางสาวพรทิวา	วีระสร	รหัสนักศึกษา B5141067

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 วิศวกรรมโทรคมนาคม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ประจำภาคการศึกษาที่ 3 ปีการศึกษา 2554

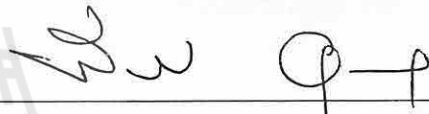
การออกแบบวงจรความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) ที่ใช้กำลังงานสูงย่านความถี่

FM 88 - 108 MHz

คณะกรรมการสอบโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภิต)
กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)
กรรมการ



(อาจารย์ ดร. สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำรายงานโครงการฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม รายวิชา 427499 โครงการวิศวกรรม
โทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2554

โครงการ	การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน(Low Pass Filter) ที่ใช้กำลังงานสูงย่านความถี่ FM 88-108 MHz	
จัดทำโดย	นางสาวศุภรดา	ธนัชเกิดผล
	นายปรเมษฐ์	นามวงศ์
	นางสาวพรทิวา	วีระสร
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม	
ภาคการศึกษา	3/2554	

บทคัดย่อ (Abstract)

การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) ที่ใช้กำลังงานสูงในย่านความถี่ FM 88-108 MHz ขนาด 1500 วัตต์ , 2000 วัตต์ และ 3000 วัตต์ ตามลำดับ ออกแบบโดยใช้หลักการของแผ่น PCB ร่วมกับขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductor) โดยการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านมีลักษณะการต่อวงจรโดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับวงจรและใช้ตัวเก็บประจุ (capacitors) ต่อขนานกับวงจร ซึ่งแต่ละอุปกรณ์จะมีคุณลักษณะประจำตัวของอุปกรณ์แต่ละชนิดคือ ขดลวดเหนี่ยวนำจะยอมให้ความถี่สูงผ่านไปได้ง่าย ความถี่ต่ำผ่านยาก ส่วนตัวเก็บประจุจะยอมให้ความถี่สูงผ่านยาก ความถี่ต่ำผ่านง่าย มาใช้ประโยชน์กับการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ใช้กำลังงานสูง และมีจำนวนอุปกรณ์ไม่ต่ำกว่า 5 จำนวนในแต่ละขนาดของกำลังงาน และมีค่าการสูญเสียน้อยกว่า 2 dB ในช่วงความถี่ต่ำผ่านซึ่งจะนำไปใช้งานจริงในการส่งสัญญาณวิทยุ FM ย่าน 88-108 MHz ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

โครงการฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญชัย ทองโสภณ ผู้ที่เป็นเจ้าของแนวคิดของการออกแบบ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) ที่ใช้กำลังงานสูง ย่านความถี่ FM 88 – 108 MHz และ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ได้ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับแนวคิด การดูแลเอาใจใส่ติดตามงาน ชี้แนะข้อบกพร่อง ตลอดจนช่วยฝึกฝนและให้การสนับสนุนคณะผู้จัดทำให้มีความสามารถในการทำโครงการตลอดจนเสนอผลงานให้เป็นที่รู้จักและยอมรับได้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือแก่คณะผู้จัดทำโดยตลอด พี่นักศึกษาปริญญาโทและเอกวิศวกรรมโทรคมนาคม และเพื่อนนักศึกษาสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคนที่เป็นกำลังใจมาโดยตลอด

นายปรเมษฐ์ นามวงศ์
นางสาวพรทิวา วีระสร
นางสาวศุภรดา ธนัชเกิดผล

สารบัญ

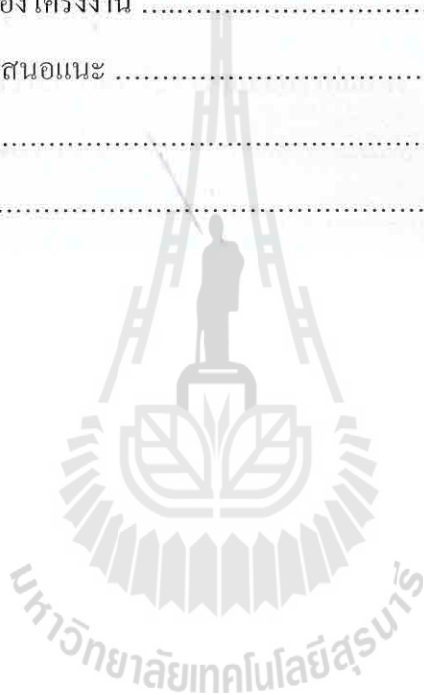
เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญรูป	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1. บทนำ	1
1.2. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.3. วัตถุประสงค์	2
1.4. ขอบเขตของงาน	2
1.5. วิธีดำเนินการ	3
1.6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	4
2.1. กล่าวนำ	4
2.2. วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน	5
2.3. ขดลวดเหนี่ยวนำ	6
2.3.1. หลักการทำงานของขดลวดเหนี่ยวนำ	7
2.3.2. หน้าที่และคุณสมบัติของขดลวดเหนี่ยวนำ	7
2.3.3. ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำ	7
2.3.4. คำนวณขดลวดแกนอากาศ (AIR-CORE INDUCTORS)	8
2.3.5. ตารางขนาดลวดทองแดงมาตรฐาน AWG	9
2.4. ตัวเก็บประจุ	11
2.4.1. การทำงานของตัวเก็บประจุ	12

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.4.2. การเก็บประจุ	12
2.4.3. การคายประจุ	14
2.4.4. ความจุไฟฟ้า	14
2.4.5. องค์ประกอบของความจุ	14
2.4.5.1. พื้นที่ของแผ่นตัวนำ	15
2.4.5.2. ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ	15
2.4.5.3. ชนิดของ ไดอิเล็กตริกที่นำมาใช้ทำตัวเก็บประจุ	15
2.5. ตารางแสดงค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ	16
2.6. แผ่นเทปลอน RF- 35	16
2.6.1. คุณลักษณะเฉพาะ	16
2.6.2. การออกแบบตัวเก็บประจุแบบไมโครสตริป	17
2.7. ลักษณะการรบกวนสัญญาณ	17
2.7.1. การแพร่สัญญาณฮาร์โมนิกส์	18
2.7.2. ลักษณะการรบกวน	18
บทที่ 3 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	19
3.1. กล่าวนำ	19
3.2. การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ขนาด 1500 วัตต์	19
3.3. การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ขนาด 2000 วัตต์	26
3.4. การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ขนาด 3000 วัตต์	29
บทที่ 4 การวัดและผลการทดลอง	33
4.1. กล่าวนำ	33
4.2. การวัดผลการทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	33

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.3. การวัดผลการทดลองกำลังงานสูง	60
บทที่ 5 สรุปผลโครงการและข้อเสนอแนะ	62
5.1. สรุปเนื้อหาของโครงการ	62
5.2. ปัญหาและข้อเสนอแนะ	63
บรรณานุกรม	64
ประวัติผู้เขียน	65



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ในอุดมคติ	4
2.2.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและสัญลักษณ์	5
2.2.2 ตัวอย่างวงจรอันดับ 1 , 2 และ 3	5
2.2.3 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำอันดับต่างๆและกราฟแสดง อัตราขยายแรงดันเชิงความถี่ (dB)	6
2.3 ขดลวดเหนี่ยวนำ	8
2.4 โครงสร้างภายในและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุ	12
2.4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแผ่นตัวนำในการเก็บประจุของตัวเก็บประจุ	13
2.4.2 การคายประจุของตัวเก็บประจุ	14
2.4.3 แสดงพื้นที่ของแผ่นตัวนำที่มีผลต่อความจุ	15
2.4.4 ระยะห่างระหว่างตัวนำ	15
3.1 ลักษณะการลดทอนแบบ Chebychev ที่มี Ripple 0.1 dB	19
3.2 วงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต่ำ	22
3.3 ขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	23
3.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 88 MHz S ₁₁ ,S ₂₁	23
3.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 108 MHz S ₁₁ ,S ₂₁	24
3.6 ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ตำแหน่งความถี่คัตออฟ	24
3.7 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 176 MHz S ₁₁ ,S ₂₁	25
3.8 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 216 MHz S ₁₁ ,S ₂₁	25
3.9 วงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	26
3.10 ขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	26
3.11 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 88 MHz S ₁₁ ,S ₂₁	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 108 MHz S11,S21	27
3.13 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 176 MHz S11,S21	28
3.15 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 216 MHz S11,S21	28
3.16 วงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	29
3.17 ขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	30
3.18 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 88 MHz S11,S21	30
3.19 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 108 MHz S11,S21	30
3.20 ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ตำแหน่งความถี่คัทออฟ	31
3.21 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 176 MHz S11,S21	31
3.22 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 216 MHz S11,S21	32
4.1 ลักษณะการทดลองกราฟวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	33
4.2 เครื่องวัดสัญญาณกรองความถี่ต่ำผ่าน	34
4.3 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21 ของความถี่ 88 MHz	35
4.4 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21 ของความถี่ 108 MHz	36
4.5 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21 ของความถี่ตัด	37
4.6 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21 ของฮาร์มอนิกที่สองของความถี่วิทยุ	38
4.7 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21 ของฮาร์มอนิกที่สามของความถี่วิทยุ	39
4.8 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S11 ของย่านความถี่วิทยุ	40
4.9 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S11 ของฮาร์มอนิกที่สองของย่านความถี่วิทยุ	41
4.10 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S11 ของฮาร์มอนิกที่สามของย่านความถี่วิทยุ	42
4.11 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ขนาด 1500 วัตต์	43
4.12 ภาพถ่ายจากกล้องอินฟราเรด วงจรขนาด 1500 วัตต์	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
แสดงอุณหภูมิที่ 43.4 องศาเซลเซียสขณะทดสอบกำลังงาน 250วัตต์	43
4.13 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21ของย่านความถี่วิทยุ	44
4.14 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21ของความถี่คัตออฟ	45
4.15 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21ของฮาร์มอนิกที่สองของย่านความถี่วิทยุ	46
4.16 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21ของฮาร์มอนิกที่สามของย่านความถี่วิทยุ	47
4.17 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S11 ของย่านความถี่วิทยุ	48
4.18 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S11ของฮาร์มอนิกที่สองของย่านความถี่วิทยุ	49
4.19 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S11ของฮาร์มอนิกที่สามของย่านความถี่วิทยุ	50
4.20 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ขนาด 2000 วัตต์	51
4.21 ภาพถ่ายจากกล้องอินฟราเรด วงจรขนาด 2000 วัตต์ แสดงอุณหภูมิที่ 39.3 องศาเซลเซียสขณะทดสอบกำลังงาน 250 วัตต์	51
4.22 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21 ของย่านความถี่วิทยุ	52
4.23 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21 ของย่านความถี่คัตออฟ	53
4.24 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21 ของฮาร์มอนิกที่สองของย่านความถี่วิทยุ	54
4.25 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21 ของฮาร์มอนิกที่สามของย่านความถี่วิทยุ	55
4.26 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S11 ของย่านความถี่วิทยุ	56
4.27 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S11 ของฮาร์มอนิกที่สองของย่านความถี่วิทยุ	57
4.28 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S11 ของฮาร์มอนิกที่สามของย่านความถี่วิทยุ	58
4.29 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ขนาด 3000 วัตต์	59
4.30 ภาพถ่ายจากกล้องอินฟราเรด วงจรขนาด 3000 วัตต์ แสดงอุณหภูมิที่ 34.2 องศาเซลเซียสขณะทดสอบกำลังงาน 250 วัตต์	59
4.31 บล็อกไดอะแกรมการวัดกำลังงานสูง	60

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 กราฟแสดงสัญญาณฮาโมนิกส์ (ก่อนใส่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน)	60
4.33 กราฟแสดงสัญญาณฮาโมนิกส์ (ก่อนใส่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน)	61
4.34 ภาพการวัดกำลังงานสูง	61



บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

วงจรฟิลเตอร์ (filter) หรือวงจรกรองสัญญาณไฟฟ้ามีบทบาทสำคัญมากในกระบวนการที่อนุภาคและคิจิตอด ใช้กำจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการออกและแยกสัญญาณที่มีความซับซ้อนออกมาเป็นส่วนๆ เพื่อป้อนเข้าสู่วงจรต่างๆ ของระบบต่อไป ซึ่งวงจรจะประกอบขึ้นจากค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์พื้นฐาน ได้แก่ ตัวต้านทาน (R), ตัวเก็บประจุ (C) และตัวเหนี่ยวนำ (L) เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ ซึ่งโครงการนี้เป็นการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบต่ำผ่านที่ใช้กำลังงานสูง ขนาด 1500 วัตต์, 2000 วัตต์ และ 3000 วัตต์ ตามลำดับ ในย่านความถี่วิทยุ โดยใช้หลักการของแผ่น PCB และขดลวดเหนี่ยวนำในการออกแบบ ซึ่งในแต่ละกำลังงานควรมีค่าการสูญเสียไม่น้อยกว่า 2 dB ในช่วงที่ความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนั้น จะยอมให้สัญญาณผ่านไปได้ในช่วงหนึ่ง จนถึงความถี่ที่ตัดออกหรือความถี่ตัด ช่วงที่ยอมให้สัญญาณผ่านไปได้นี้เรียกว่า พาสแบนด์ (Pass-band) และจะสกัดกั้นสัญญาณหรือลดทอดสัญญาณในช่วงของความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านไปได้นี้เรียกว่า สตอปแบนด์ (Stop-band) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน มีลักษณะการต่อคือ ใช้ L อนุกรมกับวงจร และ C ขนานกับวงจร คุณสมบัติของวงจรก็คือ เมื่อเราป้อนความถี่ต่ำเข้าวงจร L จะมีค่า X_L ต่ำ C จะมีค่า X_C สูง ทำให้ความถี่ต่ำผ่าน L ได้สะดวก ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้มาก แต่เมื่อความถี่สูงกว่าจุดที่กำหนด ค่า X_L จะมากขึ้น ค่า X_C จะลดลง ทำให้ความถี่ผ่านขดลวดได้ลดลง บางส่วนที่ผ่านไปได้ก็จะถูก C ดึงลงกราวด์ ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้น้อยมาก ซึ่งสามารถนำไปใช้งาน ได้จริงในการส่งสัญญาณวิทยุต่อไป

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการส่งวิทยุกระจายเสียงของสถานีวิทยุชุมชน ทั้งในพื้นที่เขตกรุงเทพมหานคร ปริมณฑล และในเขตภูมิภาค ทั่วประเทศ ประมาณ 3,000-4,000 สถานี ทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นแปลกปลอมที่ก่อให้เกิดการรบกวนต่อข่ายการสื่อสารอื่น โดยเฉพาะข่ายสื่อสารทางการบินที่ใช้สำหรับการควบคุมการจราจรทางอากาศ ซึ่งมีผลกระทบต่อความปลอดภัยของชีวิตและทรัพย์สินโดยตรง ดังนั้นคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ ได้แต่งตั้ง

คณะกรรมการเฉพาะกิจจัดทำมาตรฐานเทคนิคสำหรับเครื่องวิทยุคมนาคม เพื่อรับผิดชอบ การศึกษามาตรฐานสากล และยกร่างมาตรฐานทางเทคนิคสำหรับเครื่องส่งวิทยุคมนาคมที่ เหมาะสม ของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงสำหรับชุมชนย่านความถี่วิทยุ 87.5 MHz ถึง 108 MHz เพื่อป้องกันและลดการรบกวนที่เกิดขึ้นกับข่ายสื่อสารในกิจการวิทยุคมนาคมอื่น

ด้วยเหตุผลดังกล่าวผู้จัดทำโครงการจึงได้เห็นความสำคัญและมีความสนใจที่จะศึกษาวงจร กรองความถี่ต่ำผ่านในย่านวิทยุ จึงได้ออกแบบและสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านกำลังงานสูงย่าน ความถี่วิทยุ ซึ่งประกอบด้วย 3 ขนาด คือ 1500 วัตต์, 2000 วัตต์ และ 3000 วัตต์ ตามลำดับ เพื่อลด สัญญาณรบกวน และนำไปใช้งานจริงในเครื่องส่งวิทยุต่อไป

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ใช้กำลังงานสูง
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ใช้กำลังงานสูงใน ย่านความถี่วิทยุ
3. เพื่อสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ใช้กำลังงานขนาด 1500 วัตต์, ขนาด 2000 วัตต์ และขนาด 3000 วัตต์

1.4 ขอบเขตของงาน

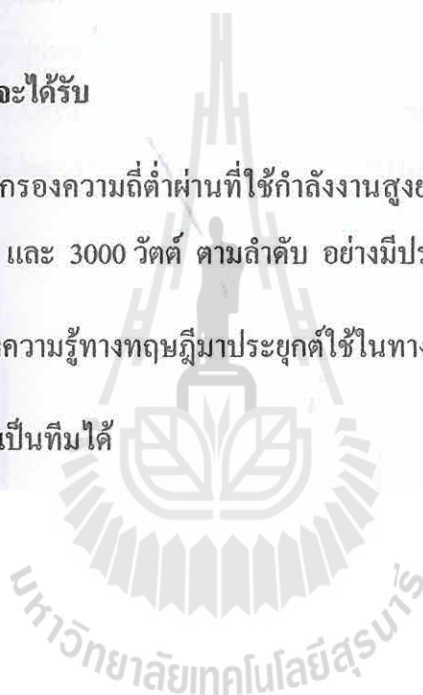
1. ออกแบบและสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านขนาด 1500 วัตต์
2. ออกแบบและสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านขนาด 2000 วัตต์
3. ออกแบบและสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านขนาด 3000 วัตต์

1.5 วิธีดำเนินการ

1. ศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ขนาด 1500 วัตต์, 2000 วัตต์ และ 3000 วัตต์ ตามลำดับ
2. จัดหาอุปกรณ์ต่างๆ และสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านกำลังงานสูงทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจร
3. จัดทำรูปเล่มรายงานและนำเสนอ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ใช้กำลังงานสูงย่านความถี่วิทยุ จำนวน 3 วงจร ขนาด 1500 วัตต์, 2000 วัตต์ และ 3000 วัตต์ ตามลำดับ อย่างมีประสิทธิภาพ
2. สามารถนำความรู้ทางทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้
3. การทำงานเป็นทีมได้



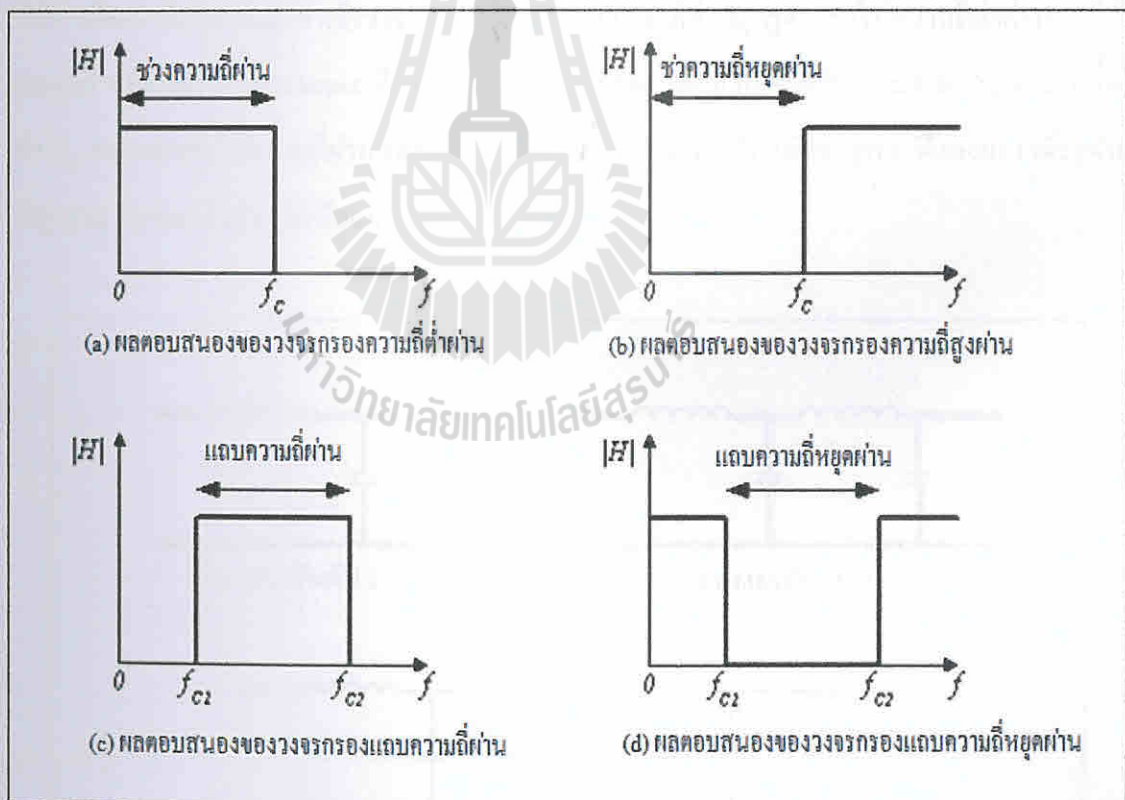
บทที่ 2

ทฤษฎีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

2.1 กล่าวนำ

วงจรกรองความถี่หรือฟิลเตอร์ (Filter) คือวงจรไฟฟ้าที่ยอมให้สัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่ใด ความถี่หนึ่งหรือช่วงความถี่ใดความถี่หนึ่งเท่านั้นผ่านไปได้ ส่วนความถี่อื่นหรือช่วงความถี่อื่น ๆ นอกเหนือจากที่กำหนดจะถูกกลดทอนไปซึ่งจะเป็นช่วงความถี่ใดนั้นจะขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจร

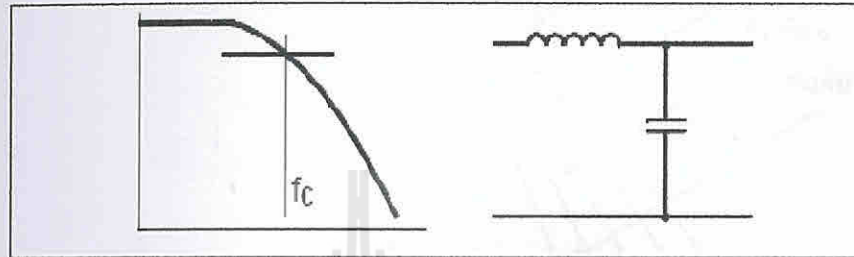
วงจรกรองความถี่ทำหน้าที่จำแนกความถี่ตามความต้องการของผู้ใช้แบ่งตามคุณลักษณะของผลตอบสนองความถี่(frequency response) ดังรูปที่ 2.1 ได้ 4 ชนิดด้วยกันคือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน(low-pass filter ; LPF) , วงจรกรองความถี่สูงผ่าน(high-pass filter ; HPF) , วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน(band-pass filter ; BPF) และวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน(band-stop filter ; BSF)



รูปที่ 2.1 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ในอุดมคติ

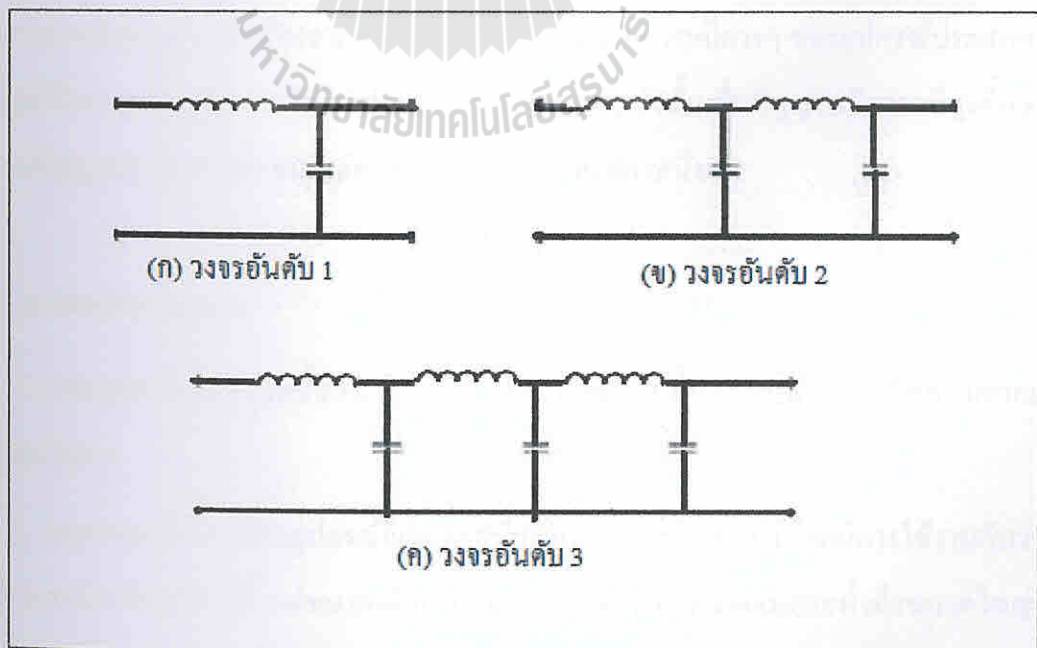
2.2 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน

หมายถึง วงจรที่จะยอมให้สัญญาณความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ถึงความถี่ที่กำหนดผ่านไปได้ ส่วนความถี่ตั้งแต่ที่กำหนดสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ จะลดทอนไปตามลำดับลักษณะของวงจรมีตั้งแต่อันดับหนึ่งขึ้นไป

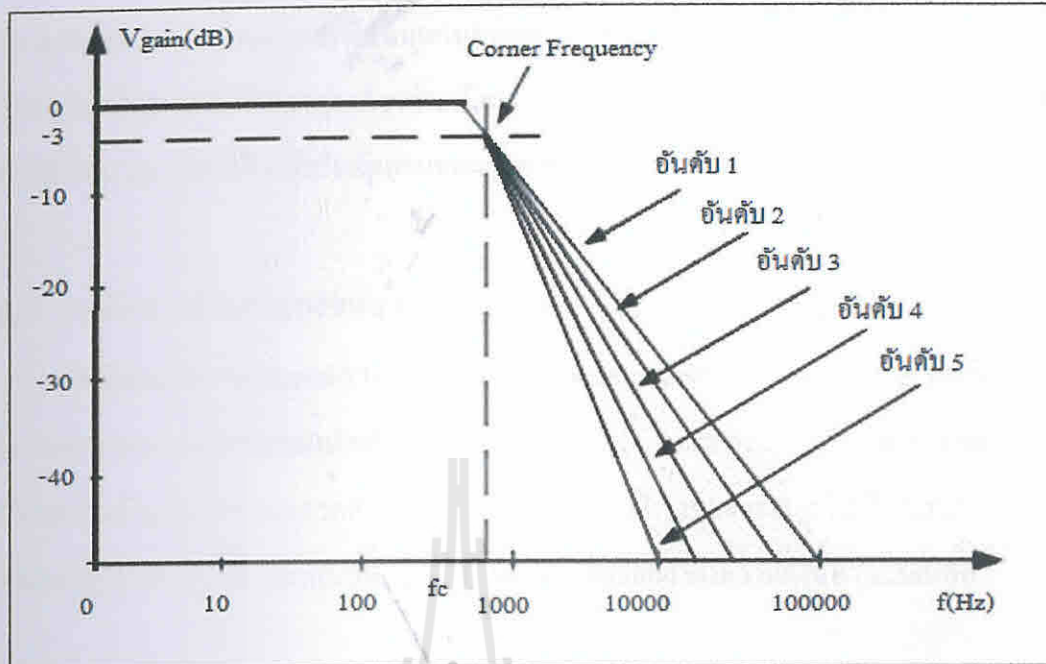


รูปที่ 2.2.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและสัญลักษณ์

วงจร มีลักษณะการต่อคือ ใช้ L อนุกรมกับวงจร และ C ขนานกับวงจร คุณสมบัติของวงจรก็คือ เมื่อเราป้อนความถี่ต่ำเข้าวงจร L จะมีค่า X_L ต่ำ C จะมีค่า X_C สูง ทำให้ความถี่ต่ำผ่าน L ได้สะดวก ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้มาก แต่เมื่อความถี่สูงกว่าจุดที่กำหนด ค่า X_L จะมากขึ้น ค่า X_C จะลดลงทำให้ความถี่ผ่านขดลวดได้ลดลง บางส่วนที่ผ่านไปได้ก็จะถูก C ดึงลงกราวด์ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้น้อยมาก



รูปที่ 2.2.2 ตัวอย่างวงจรอันดับ 1, 2 และ 3



รูปที่ 2.2.3 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำอันดับต่างๆ และกราฟแสดงอัตราขยายแรงดันเชิงความถี่ (dB)

ในทางทฤษฎีวงจรกรองความถี่ต่ำจะยอมให้สัญญาณใดๆ ที่มีความถี่ตั้งแต่ 0 Hz จนถึงความถี่ที่กำหนดซึ่งเรียกว่า ความถี่คัตออฟ ผ่านไปได้โดยไม่มีการลดทอนของสัญญาณ และถ้าความถี่ของสัญญาณเข้ามีค่าเกินที่กำหนดไว้ สัญญาณออกควรจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถจะทำเช่นนั้นได้ เนื่องจากการตอบสนองสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ ของอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ จะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไปไม่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ดังนั้นเมื่อสัญญาณมีความถี่สูงขึ้นวงจรจะลดสัญญาณลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งจะลดลงในอัตราคงที่ค่าหนึ่ง

2.3 ขดลวดเหนี่ยวนำ

ขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นชิ้นส่วนในวงจรไฟฟ้า มีคุณสมบัติทางการเหนี่ยวนำไฟฟ้า มีมากมายหลายประเภท

ขดลวดเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง โดยมีการใช้งานกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป มีตั้งแต่ขนาดเล็กมาก ๆ ประมาณปลายนิ้วมือจนกระทั่งถึงขนาดใหญ่เท่าห้องปฏิบัติการ ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำจะเป็นการนำเอาลวดตัวนำมาพันเรียงกันเป็นขดลวด อาจมีจำนวนรอบไม่กี่รอบจนกระทั่งถึงพันรอบแล้วแต่ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการใช้งาน การพัน

ขดลวดของขดลวดเหนี่ยวนำอาจพันบนแกนชนิดต่าง ๆ หรือเป็นแบบไม่มีแกน (แกนอากาศ) ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ค่าเหนี่ยวนำ (มีหน่วยเป็น เฮนรี , H) เป็นค่าของผลที่เกิดขึ้นจากการที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตัดผ่านขดลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลอยู่

2.3.1 หลักการทำงานของขดลวดเหนี่ยวนำ

หลักการทำงานของขดลวดเหนี่ยวนำก็คือ เมื่อต่อแรงดันไฟให้กับขดลวด จะเกิดกระแสไหลในขดลวดและเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ขดลวดนั้น ขณะที่กระแสไฟไหลผ่านขดลวดตัวนำ จะมีค่าความต้านทานของขดลวดตัวนำเป็นตัวต้านทานการไหลของกระแสไฟเมื่อมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบ ๆ เส้นลวดจะมีค่าความต้านทานอีกชนิดหนึ่งเรียกว่าค่าความต้านทานแม่เหล็ก

2.3.2 หน้าที่และคุณสมบัติของขดลวดเหนี่ยวนำ

- เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ไหลในขดลวดเหนี่ยวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ขดลวด
- เมื่อขดลวดเหนี่ยวนำเคลื่อนที่ตัดกับสนามแม่เหล็ก จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดเหนี่ยวนำ
- สัญญาณไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำจะทำให้มุม (Phase) ของแรงดันนำหน้ากระแส 90 องศา
- จะต่อต้านการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำโดยทันทีทันใด
- ยอมให้ไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านได้สะดวกและต่อต้านไฟฟ้ากระแสสลับ
- ยอมให้สัญญาณความถี่ต่ำผ่านได้สะดวกและต่อต้านสัญญาณความถี่สูง

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำ

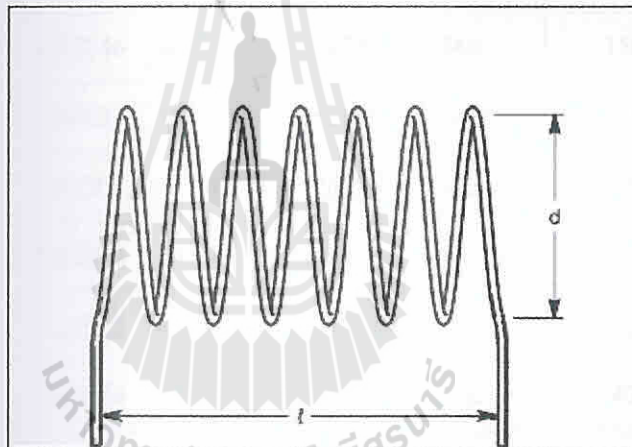
ค่าความเหนี่ยวนำจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปร 4 ประการคือ

1. จำนวนรอบของขดลวด ถ้าจำนวนรอบของขดลวดมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวด
2. วัสดุที่นำมาทำเป็นแกน วัสดุที่นำมาทำเป็นแกนมีหลายชนิดเช่น อากาศ, เหล็ก, เฟอร์ไรต์, โคอบอล ฯลฯ เป็นต้น แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่

เรียกว่าความซาบซึม (Permeability) แตกต่างกัน ในกรณีที่มีความซาบซึมมากก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมาก ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับความซาบซึมของแกน

3. เส้นผ่านศูนย์กลางของแกน ถ้าพื้นที่ของแกนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับพื้นที่ของแกน
4. ความยาวของแกน ถ้าความยาวของแกนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำน้อย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผกผันกับความยาวของแกน

2.3.4 คำนวณขดลวดแกนอากาศ (AIR-CORE INDUCTORS)



รูปที่ 2.3 ขดลวดเหนี่ยวนำ

สูตรการคำนวณ

$$L(\mu\text{H}) = \frac{d^2 n^2}{18d + 40l}$$

โดยที่

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็น micro henrys

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด (จากตรงกลางลวด ถึงตรงกลางลวดอีกด้าน)

l คือ ความยาวของขดลวด มีหน่วยเป็น นิ้ว

n คือ จำนวนรอบของขดลวด

2.3.5 ตารางขนาดลวดทองแดงมาตรฐาน AWG

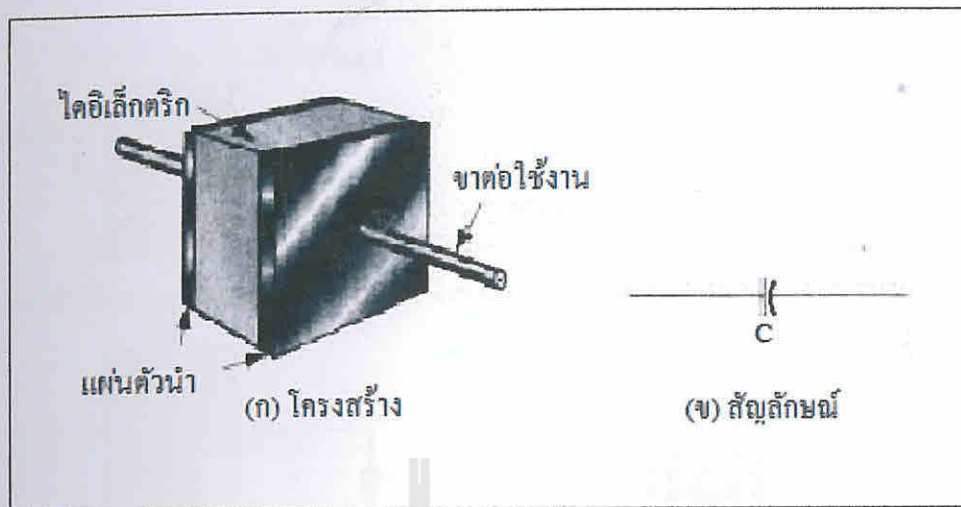
AWG gauge	Conductor Diameter Inches	Conductor Diameter mm	Ohms per 1000 ft.	Ohms per km	Maximum amps for chassis wiring	Maximum amps for power transmission	Maximum frequency for 100% skin depth for solid conductor copper
0000	0.46	11.684	0.049	0.16072	380	302	125 Hz
000	0.4096	10.40384	0.0618	0.202704	328	239	160 Hz
00	0.3648	9.26592	0.0779	0.255512	283	190	200 Hz
0	0.3249	8.25246	0.0983	0.322424	245	150	250 Hz
1	0.2893	7.34822	0.1239	0.406392	211	119	325 Hz
2	0.2576	6.54304	0.1563	0.512664	181	94	410 Hz
3	0.2294	5.82676	0.197	0.64616	158	75	500 Hz
4	0.2043	5.18922	0.2485	0.81508	135	60	650 Hz
5	0.1819	4.62026	0.3133	1.027624	118	47	810 Hz
6	0.162	4.1148	0.3951	1.295928	101	37	1100 Hz
7	0.1443	3.66522	0.4982	1.634096	89	30	1300 Hz
8	0.1285	3.2639	0.6282	2.060496	73	24	1650 Hz
9	0.1144	2.90576	0.7921	2.598088	64	19	2050 Hz
10	0.1019	2.58826	0.9989	3.276392	55	15	2600 Hz
11	0.0907	2.30378	1.26	4.1328	47	12	3200 Hz
12	0.0808	2.05232	1.588	5.20864	41	9.3	4150 Hz
13	0.072	1.8288	2.003	6.56984	35	7.4	5300 Hz
14	0.0641	1.62814	2.525	8.282	32	5.9	6700 Hz

15	0.0571	1.45034	3.184	10.44352	28	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	4.016	13.17248	22	3.7	11 k Hz
17	0.0453	1.15062	5.064	16.60992	19	2.9	13 k Hz
18	0.0403	1.02362	6.385	20.9428	16	2.3	17 kHz
19	0.0359	0.91186	8.051	26.40728	14	1.8	21 kHz
20	0.032	0.8128	10.15	33.292	11	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	12.8	41.984	9	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	16.14	52.9392	7	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	20.36	66.7808	4.7	0.729	53 kHz
24	0.0201	0.51054	25.67	84.1976	3.5	0.577	68 kHz
25	0.0179	0.45466	32.37	106.1736	2.7	0.457	85 kHz
26	0.0159	0.40386	40.81	133.8568	2.2	0.361	107 kHz
27	0.0142	0.36068	51.47	168.8216	1.7	0.288	130 kHz
28	0.0126	0.32004	64.9	212.872	1.4	0.226	170 kHz
29	0.0113	0.28702	81.83	268.4024	1.2	0.182	210 kHz
30	0.01	0.254	103.2	338.496	0.86	0.142	270 kHz
31	0.0089	0.22606	130.1	426.728	0.7	0.113	340 kHz
32	0.008	0.2032	164.1	538.248	0.53	0.091	430 kHz
Metric 2.0	0.00787	0.200	169.39	555.61	0.51	0.088	440 kHz
33	0.0071	0.18034	206.9	678.632	0.43	0.072	540 kHz
Metric 1.8	0.00709	0.180	207.5	680.55	0.43	0.072	540 kHz
34	0.0063	0.16002	260.9	855.752	0.33	0.056	690 kHz

Metric 1.6	0.0063	0.16002	260.9	855.752	0.33	0.056	690 kHz
35	0.0056	0.14224	329	1079.12	0.27	0.044	870 kHz
Metric 1.4	.00551	.140	339	1114	0.26	0.043	900 kHz
36	0.005	0.127	414.8	1360	0.21	0.035	1100 kHz
Metric 1.25	.00492	0.125	428.2	1404	0.20	0.034	1150 kHz
37	0.0045	0.1143	523.1	1715	0.17	0.0289	1350 kHz
Metric 1.12	.00441	0.112	533.8	1750	0.163	0.0277	1400 kHz
38	0.004	0.1016	659.6	2163	0.13	0.0228	1750 kHz
Metric 1	.00394	0.1000	670.2	2198	0.126	0.0225	1750 kHz
39	0.0035	0.0889	831.8	2728	0.11	0.0175	2250 kHz
40	0.0031	0.07874	1049	3440	0.09	0.0137	2900 kHz

2.4 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์อีกชิ้นหนึ่งที่ถูกใช้งานอย่างมากในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพราะตัวเก็บประจุจะเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเก็บประจุไฟฟ้าเอาไว้ในตัวมันได้ ซึ่งมีคุณสมบัติเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ต่ออยู่ภายในวงจรเพื่อใช้งานในช่วงที่ระดับแรงดันไม่เพียงพอหรือใช้กรองสัญญาณทางไฟฟ้าหรืออื่นๆ



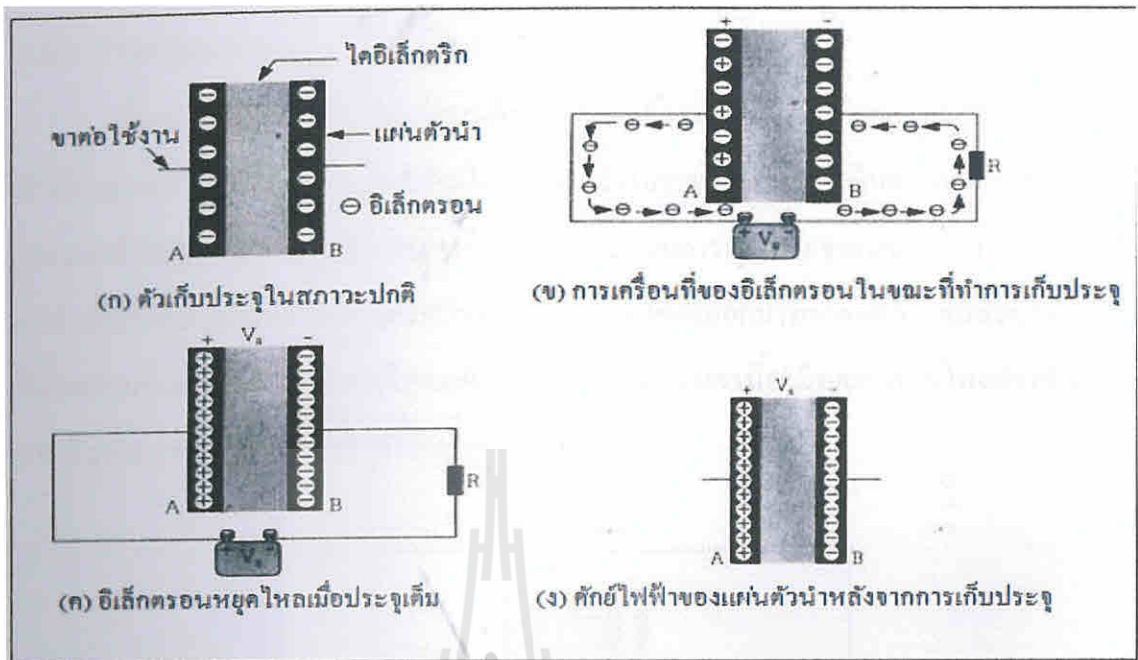
รูปที่ 2.4 โครงสร้างภายในและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุ

2.4.1 การทำงานของตัวเก็บประจุ

การทำงานของตัวเก็บประจุมีอยู่ 2 ลักษณะคือ ประเก็บประจุ (Charge) และการคายประจุ (Discharge)

2.4.2 การเก็บประจุ

จากรูป (ก) เป็นโครงสร้างภายในของตัวเก็บประจุที่ยังไม่ได้ผ่านการเก็บประจุ เราจะเห็นว่าแผ่นตัวนำทั้งสองข้างของตัวเก็บประจุจะมีประจุไฟฟ้าเป็นกลาง คือมีจำนวนประจุบวกและจำนวนประจุลบอยู่ในจำนวนที่เท่ากัน

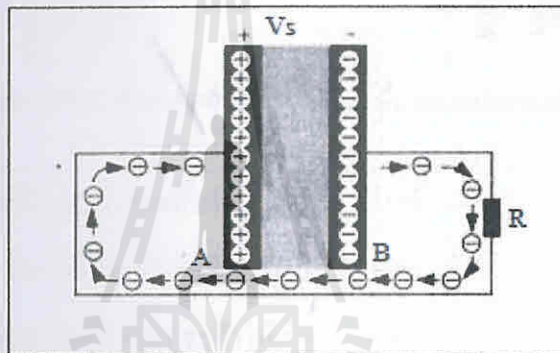


รูปที่ 2.4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแผ่นตัวนำในการเก็บประจุของตัวเก็บประจุ

ในขณะที่ทำการต่อตัวเก็บประจุเข้ากับแบตเตอรี่ (V_s) ดังรูป (ข) แบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้อิเล็กตรอนบางส่วนเคลื่อนที่ได้ ทั่วทั้งตัวเก็บประจุเป็นตัวเปิดวงจร โดยมีโคอิเล็คทริกกันระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนนี้เกิดขึ้นได้เพราะระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำจะวางชิดกัน และขนาดของพื้นที่แผ่นตัวนำเมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำแล้วจะใหญ่กว่ามาก แบตเตอรี่จะพยายามผลักอิเล็กตรอนให้ออกจากขั้วลบ ไปยังแผ่นตัวนำ (B) ที่ต่ออยู่และอิเล็กตรอนจำนวนนี้จะผลักอิเล็กตรอนที่อยู่บนแผ่นตัวนำ (A) ซึ่งเป็นไปตามกฎธรรมชาติของอิเล็กตรอนที่จะต้องผลักซึ่งกันและกัน ระหว่างมีอิเล็กตรอนไหลไปยังแผ่นตัวนำ (B) ก็จะมีอิเล็กตรอนจำนวนเท่ากันไหลออกจากแผ่นตัวนำ (A) แต่ไม่ไหลผ่านโคอิเล็คทริกที่เป็นฉนวนกัน ถ้าตัวเก็บประจุทำการประจุจนเต็มที่แล้วก็จะไม่มีอิเล็กตรอนไหล ดังรูป (ค) ซึ่งสาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะผลักดันให้อิเล็กตรอนไหลได้เพียงจำนวนหนึ่งเท่านั้น และในรูป (ง) จะเห็นแผ่นตัวนำ (B) มีประจุเป็นลบส่วนแผ่นตัวนำ (A) ที่อิเล็กตรอนถูกผลักออกไปก็จะเหลือเป็นประจุบวก แม้ว่าไม่มีแบตเตอรี่ (V_s) ต่ออยู่ก็ตาม

2.4.3 การคายประจุ

เมื่อเรานำตัวเก็บประจุที่ผ่านการเก็บประจุมาแล้ว มาต่อตามรูปข้างล่างประจุลบของแผ่นตัวนำ (B) จะทำให้อิเล็กตรอนไหลผ่าน โหลด (R) เข้าไปรวมกับประจุภายในตัวนำ (A) เพราะโดยธรรมชาติประจุลบจะรวมตัวกับประจุบวกเสมอ กระบวนการคายประจุจะสิ้นสุดลงก็ต่อเมื่อแผ่นตัวนำทั้งสองแผ่นมีศักย์เป็นกลางทางไฟฟ้า คือ ไม่แสดงศักย์ออกมาที่ขาคู่ของแผ่นตัวนำทั้งสอง อิเล็กตรอนจึงจะหยุดไหล ซึ่งการไหลของอิเล็กตรอนภายในวงจรนี้จะมีทิศทางการไหลตรงข้ามกับการเก็บประจุ เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการคายประจุ



รูปที่ 2.4.2 การคายประจุของตัวเก็บประจุ

2.4.4 ความจุไฟฟ้า

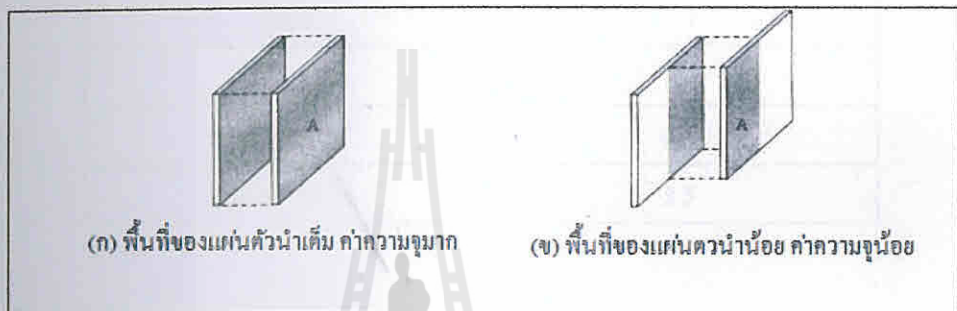
ความจุ (Capacitance) คือความสามารถในการสะสมประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ โดยความจุมีหน่วยเป็น ฟารัด (Farad)

2.4.5 องค์ประกอบของความจุ

ความจุของตัวเก็บประจุจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางฟิสิกส์ที่สำคัญอยู่ 3 ประการคือ

1. พื้นที่ของแผ่นตัวนำ
2. ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ
3. ชนิดของไดอิเล็กตริกที่นำมาใช้ทำตัวเก็บประจุ

2.4.5.1 พื้นที่ของแผ่นตัวนำ เป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการกำหนดค่าความจุ เพราะถ้าเราวางแผ่นตัวนำซ้อนกันตามรูป (ก) ตัวเก็บประจุก็จะสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้มาก และถ้าเราวางแผ่นตัวนำให้ซ้อนกันน้อย ก็จะทำให้ตัวเก็บประจุสามารถเก็บประจุได้น้อยลง ดังรูป (ข) ซึ่งปรากฏการแบบนี้จะเกิดขึ้นในตัวเก็บประจุชนิดแปรค่าได้ หรืออีกประการหนึ่ง ถ้าพื้นที่ผิวของแผ่นตัวนำมีขนาดน้อยในทางตรงกันข้าม ถ้าพื้นที่ผิวของแผ่นตัวนำมีขนาดใหญ่่มาก ก็จะสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้มากด้วย



รูปที่ 2.4.3 แสดงพื้นที่ของแผ่นตัวนำที่มีผลต่อค่าความจุ

2.4.5.2 ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ จะมีผลต่อปฏิกิริยาระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง โดยถ้าเราวางแผ่นตัวนำทั้งสองให้มีระยะห่างน้อยลง จะทำให้ค่าความจุเพิ่มมากขึ้น ดังรูป (ค) แต่ถ้าเราเลื่อนแผ่นตัวนำทั้งสองออกให้มีระยะห่างกันมากๆจะทำให้ค่าความจุลดลง ดังรูป (ง)



รูปที่ 2.4.4 ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ

2.4.5.3 ชนิดของไดอิเล็กตริกที่นำมาใช้ทำตัวเก็บประจุ จะเป็นสิ่งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุของตัวเก็บประจุ โดยทั่วไปชนิดของไดอิเล็กตริกที่ดูจะใช้จะเปรียบเทียบกับ ไดอิเล็กตริกที่เป็นชนิดอากาศ เพราะว่ามันจะมีค่าไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1 ซึ่งค่าไดอิเล็กตริกคงตัวที่นำมาใช้ทำตัวเก็บประจุชนิดต่างๆจะแสดงไว้ในตาราง

2.5 ตารางแสดงค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ

วัสดุ	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก
สุญญากาศ	1
ยาง	2-3
กระดาษ	2-3
ไมก้า	5-7
น้ำ	80
FR-4 PCB	4.8
RF-35 PCB	3.5

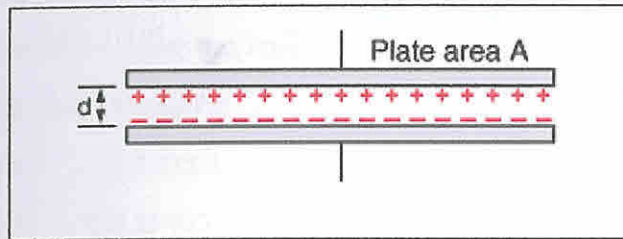
2.6 แผ่นเทปลอน RF - 35

แผ่นเทปลอน RF - 35 เป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการใช้งานในคุณภาพที่สูง ในความถี่วิทยุ และไมโครเวฟ แผ่น RF - 35 มีความแข็งแรงดีเยี่ยมที่สำคัญก็คือสามารถทนอุณหภูมิ (Tg) ได้มากกว่า 600 องศาฟาเรนไฮต์ หรือ 315 องศาเซลเซียส , อัตราการดูดซึมความชื้นต่ำ และป้องกันการกระจายต่ำลดการเปลี่ยนแปลงเฟสที่มีความถี่ แผ่น RF - 35 ถูกออกแบบให้มีเสถียรภาพโดยการทอเหมือนการทอผ้า RF-35 มีการทดสอบตาม IPC-TM-650

2.6.1 คุณลักษณะเฉพาะ

1. ต้นทุนไม่สูงมาก
2. มีความแข็งแรงสูง
3. ป้องกันการกระจาย (Dissipation) ที่ต่ำเป็นพิเศษ
4. การดูดซึมความชื้นต่ำ
5. ความราบเรียบของผิวมากขึ้น
6. ความน่าเชื่อถือเรื่องทนความสูงมาก

2.6.2 การออกแบบตัวเก็บประจุแบบไมโครสตริป



สูตรการคำนวณ

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$

โดยที่

C คือ ความจุไฟฟ้าจุลอมบ์

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุ

A คือ พื้นที่

d คือ ความหนาแผ่น PCB

2.7 ลักษณะการรบกวน

เครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงที่มีลักษณะทางเทคนิคที่ไม่เหมาะสม จะก่อให้เกิดการรบกวนต่อการใช้ความถี่วิทยุในข่ายสื่อสารอื่น เรียกว่า การแพร่แปลกลอด (conducted spurious emissions) คือ เครื่องส่งวิทยุสร้างควมถี่ที่เกินกว่าที่กำหนดให้ออกอากาศมาด้วย มี 2 ลักษณะคือ

2.7.1 การแพร่ฮาร์มอนิก (harmonic emission)

เป็นการสร้างความถี่ที่มีค่าเป็นทวีคูณของความถี่ที่กำหนด คือความถี่ที่สูง 2 เท่า 3 เท่า 4 เท่า 5 เท่า ของความถี่ที่กำหนดในการออกอากาศ ซึ่งเครื่องส่งวิทยุที่ไม่ได้มาตรฐานจะไปรบกวนความถี่ข้างสื่อสารอื่น ๆ หรือย่านความถี่ในการส่งวิทยุโทรทัศน์

ย่านความถี่ที่ออกอากาศ			87.75 - 107.75 MHz
Harmonic ที่ 2	ความถี่	175.5-215.5 MHz	รบกวนการส่งโทรทัศน์ช่อง 5-10
Harmonic ที่ 3	ความถี่	263.25-323.25 MHz	รบกวนการส่งเคเบิลทีวีช่อง S11-S22
Harmonic ที่ 4	ความถี่	351-431 MHz	รบกวนการส่งเคเบิลทีวีช่อง S27-S37
Harmonic ที่ 5	ความถี่	438.75-538.75 MHz	รบกวนการส่งเคเบิลทีวีช่อง S38-S41 การส่งโทรทัศน์ช่อง 29 (โทรทัศน์สาธารณะ Thai PBS)
Harmonic ที่ 6	ความถี่	526.5-646.5 MHz	รบกวนการส่งโทรทัศน์ช่อง 28-43
Harmonic ที่ 7	ความถี่	614.25-754.25 MHz	รบกวนการส่งโทรทัศน์ช่อง 39-56

2.7.2 ลักษณะการรบกวน

จะมีผลต่อการรับชมโทรทัศน์ คือ ภาพลึ้ม หรือมีลายรบกวนภาพ หรือกวนด้านเสียง มีเสียงวิทยุออกมารบกวน การรบกวนนี้มีผลในบริเวณใกล้สถานีเครื่องส่งวิทยุที่ส่งคลื่นไม่เหมาะสมออกมา (Harmonic Emission) ส่วนผู้ที่รับชมโทรทัศน์ที่อยู่ห่างไกลจากสถานีวิทยุจะไม่มีผลต่อการรบกวนการรับชมโทรทัศน์

การแพร่พาราซิติค (Parasitic emission) เป็นความถี่แปลกปลอมที่แพร่ออกมาจากเครื่องส่งวิทยุในย่านความถี่วิทยุ 87.5-108 MHz ซึ่งเกิดจากชุดขยายสัญญาณวิทยุของเครื่องส่งวิทยุทำงานไม่ถูกต้อง สังเกตได้จากเครื่องรับวิทยุจะรับสัญญาณที่ส่งออกอากาศได้หลายช่องความถี่พร้อมกัน

บทที่ 3

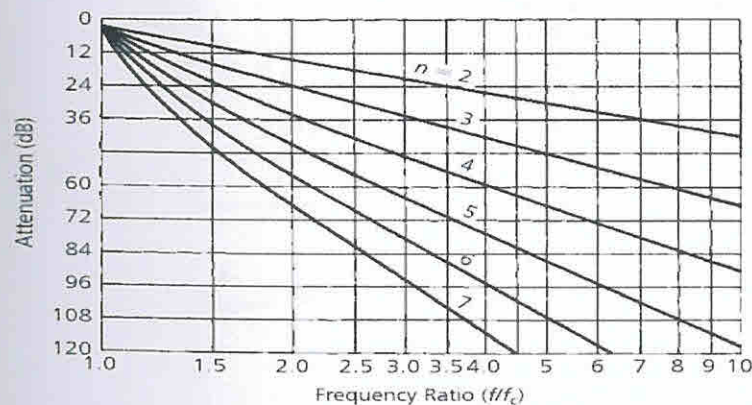
การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

3.1 กล่าวนำ

ในบทที่ 3 จะเป็นการนำหลักการการใช้โปรแกรม CST DESIGN STUDIO และ RFSIM99 เบื้องต้นใช้ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน รวมไปถึงการวิเคราะห์ผลจากโปรแกรม ซึ่งได้นำทฤษฎีที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 มาช่วยในการวิเคราะห์คุณลักษณะที่สำคัญของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยจะอธิบายถึงวิธีการสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน จากนั้นทำการสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบ และนำมาวัดทดสอบ ค่าพารามิเตอร์

3.2 การออกแบบวงจรความถี่ต่ำผ่าน ขนาด 1500 วัตต์

ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อให้สามารถใช้งานได้บนย่านความถี่ที่เราต้องการ คืออยู่ในช่วง 88-108 MHz ซึ่งทำบนแผ่น RF-35 แบบสองหน้า มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (ϵ_0) เท่ากับ 8.854×10^{-12} ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุ (ϵ_r) เท่ากับ 3.5 ความสูงของไมโครสตริป (h) เท่ากับ 0.67 mm และความสูงของโลหะ เท่ากับ 0.035 mm จากนั้นกำหนดคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยให้แบนด์วิดท์ เท่ากับ 115 MHz ขนาดของการกระเพื่อม (Ripple) เท่ากับ 0.1 dB ชนิดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เชบีเชฟ (Chebyshev) อันดับของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน 7 อันดับ โดยค่าองค์ประกอบความถี่ต่ำผ่านต้นแบบของวงจรกรองความถี่แบบ เชบีเชฟ คำนวณได้จาก



รูปที่ 3.1 ลักษณะการลดทอนแบบ Chebyshev ที่มี Ripple 0.1 dB

ตารางที่ 3.1 ค่าองค์ประกอบแบบ Chebyshev Low Pass ที่มี Ripple 0.1 dB

n	R_s/R_L	C_1	L_2	C_3	L_4	
2	1.355	1.209	1.638			
	1.429	0.977	1.982			
	1.667	0.733	2.489			
	2.000	0.560	3.054			
	2.500	0.417	3.827			
	3.333	0.293	5.050			
	5.000	0.184	7.426			
	10.000	0.087	14.433			
	∞		1.391	0.819		
3	1.000	1.433	1.594	1.433		
	0.900	1.426	1.494	1.622		
	0.800	1.451	1.356	1.871		
	0.700	1.521	1.193	2.190		
	0.600	1.648	1.017	2.603		
	0.500	1.853	0.838	3.159		
	0.400	2.186	0.660	3.968		
	0.300	2.763	0.486	5.279		
	0.200	3.942	0.317	7.850		
	0.100	7.512	0.155	15.466		
		1.513	1.510	0.716		
4	1.355	0.992	2.148	1.585	1.341	
	1.429	0.779	2.348	1.429	1.700	
	1.667	0.576	2.730	1.185	2.243	
	2.000	0.440	3.227	0.967	2.856	
	2.500	0.329	3.961	0.760	3.698	
	3.333	0.233	5.178	0.560	5.030	
	5.000	0.148	7.607	0.367	7.614	
	10.000	0.070	14.887	0.180	15.230	
	∞		1.511	1.768	1.455	0.673

ตารางที่ 3.1 ค่าองค์ประกอบแบบ Chebyshev Low Pass ที่มี Ripple 0.1 dB (ต่อ)

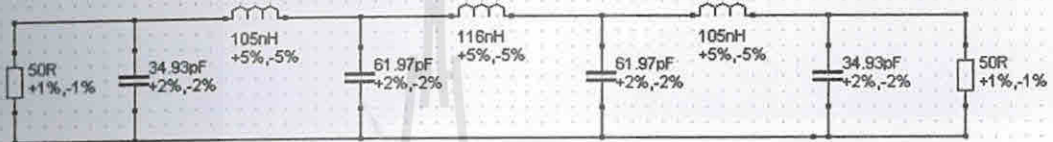
n	R_S/R_L	C_1	L_2	C_3	L_4	C_5	L_6	C_7	
5	1.000	1.301	1.556	2.241	1.556	1.301			
	0.900	1.285	1.433	2.350	1.488	1.488			
	0.800	1.300	1.282	2.582	1.382	1.738			
	0.700	1.358	1.117	2.868	1.244	2.062			
	0.600	1.470	0.947	3.269	1.085	2.484			
	0.500	1.654	0.778	3.845	0.913	3.055			
	0.400	1.954	0.612	4.720	0.733	3.886			
	0.300	2.477	0.451	6.190	0.550	5.237			
	0.200	3.546	0.295	9.127	0.366	7.889			
	0.100	6.787	0.115	17.937	0.182	15.745			
	∞	1.561	1.807	1.766	1.766	1.417	0.651		
8	1.355	0.942	2.080	1.659	2.247	1.534	1.277		
	1.429	0.735	2.249	1.454	2.544	1.405	1.629		
	1.667	0.542	2.600	1.183	3.064	1.185	2.174		
	2.000	0.414	3.068	0.958	3.712	0.979	2.794		
	2.500	0.310	3.765	0.740	4.651	0.778	3.645		
	3.333	0.220	4.927	0.551	6.195	0.580	4.996		
	5.000	0.139	7.250	0.361	9.261	0.384	7.818		
	10.000	0.067	14.220	0.178	18.427	0.190	15.350		
	∞	1.534	1.884	1.831	1.749	1.394	0.638		
	7	1.000	1.262	1.520	2.239	1.680	2.239	1.520	1.262
		0.900	1.242	1.395	2.361	1.578	2.397	1.459	1.447
0.800		1.255	1.245	2.548	1.443	2.624	1.362	1.697	
0.700		1.310	1.083	2.819	1.283	2.942	1.233	2.021	
0.600		1.417	0.917	3.205	1.209	3.384	1.081	2.444	
0.500		1.595	0.753	3.764	0.928	4.015	0.914	3.018	
0.400		1.855	0.593	4.618	0.742	4.970	0.738	3.855	
0.300		2.392	0.437	6.054	0.556	6.569	0.557	5.217	
0.200		3.428	0.286	8.937	0.369	9.770	0.372	7.890	
0.100		6.570	0.141	17.603	0.184	19.376	0.186	15.813	
∞		1.575	1.858	1.921	1.827	1.734	1.379	0.631	

จากรูปที่ 3.1 และ ตารางที่ 3.1 จะได้อ่า $\frac{R_S}{R_L} = 1$ ค่า $C_1 = C_7 = 1.262$, $C_3 = C_5 = 2.239$,
 $L_2 = L_6 = 1.520$, $L_4 = 1.680$ จากนั้นทำการแปลงค่าองค์ประกอบพื้นฐานจากวงจรของความถี่ต่ำ
 ผ่านต้นแบบไปยังวงจรองค์ความถี่สูงทำให้สามารถคำนวณได้
 จากสมการ

$$C = \frac{C_n}{2\pi f_c R}$$

$$L = \frac{RL_n}{2\pi f_c C}$$

จะได้ $C1 = C7 = 34.93 \text{ pF}$, $C3 = C5 = 61.97 \text{ pF}$, $L2 = L6 = 105 \text{ nH}$, $L4 = 116 \text{ nH}$ ซึ่งสามารถแสดงออกมาเป็นวงจรสมมูลดังภาพที่ 3.1



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่ต่ำ

ทำการคำนวณตัวเก็บประจุเป็นแบบไมโครสตริป และ ขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศ

สมการ ตัวเก็บประจุ แบบ ไมโครสตริป จากสมการ

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad \text{หน่วยเป็น ฟาร์ต(F)}$$

สมการ ขดลวดเหนี่ยวนำ ขนาดขดลวด AWG 14

$$L = \frac{d^2 n^2}{18d + 40l} \quad \text{หน่วยเป็น ไมโครเฮนรี่ (\mu H)}$$

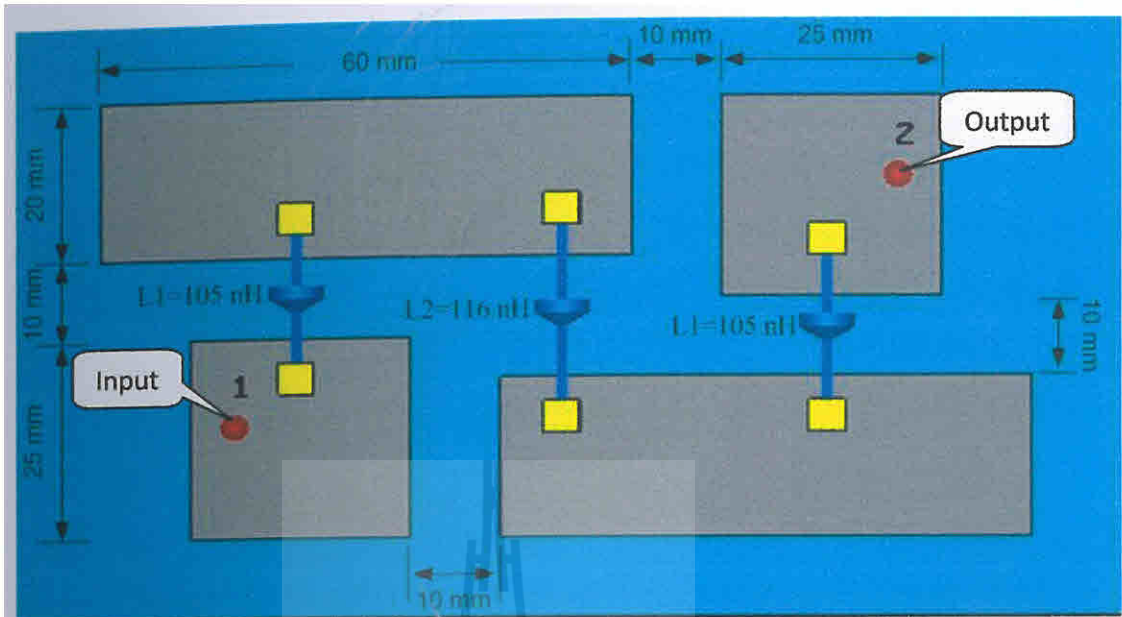
จะได้ ตัวเก็บประจุ 34.93 pF มีขนาดพื้นที่ 856 ตารางมิลลิเมตร

ตัวเก็บประจุ 61.97 pF มีขนาดพื้นที่ 1519 ตารางมิลลิเมตร

ขดลวดเหนี่ยวนำ 105 nH $n = 3$ รอบ $d = 0.59$ นิ้ว $l = 0.48$ นิ้ว

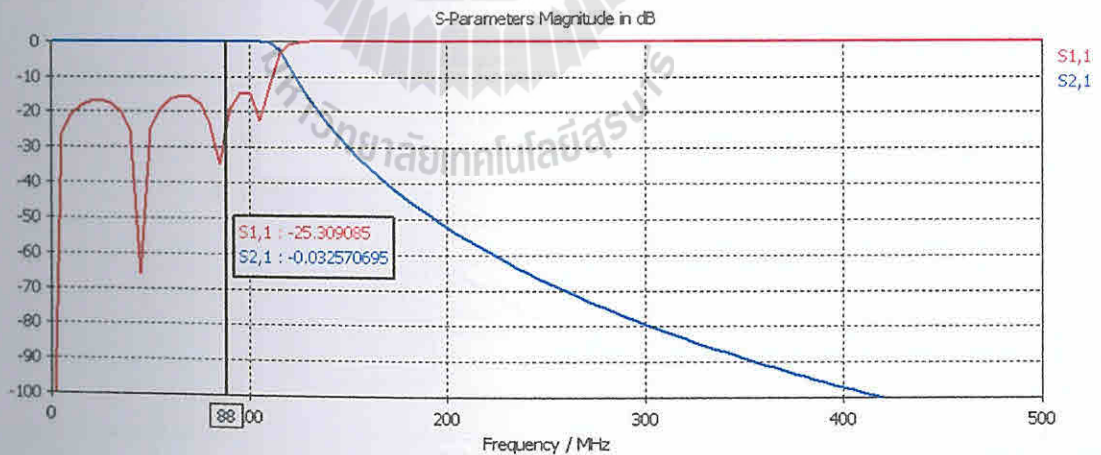
ขดลวดเหนี่ยวนำ 116 nH $n = 3$ รอบ $d = 0.59$ นิ้ว $l = 0.40$ นิ้ว

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำ และใช้โปรแกรม CST DESIGN STUDIO ช่วยในการปรับขนาดให้ตรงตามความถี่ต่ำที่ต้องการ ซึ่งขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.3 และภาพที่ 3.4-3.8 คือ ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำ

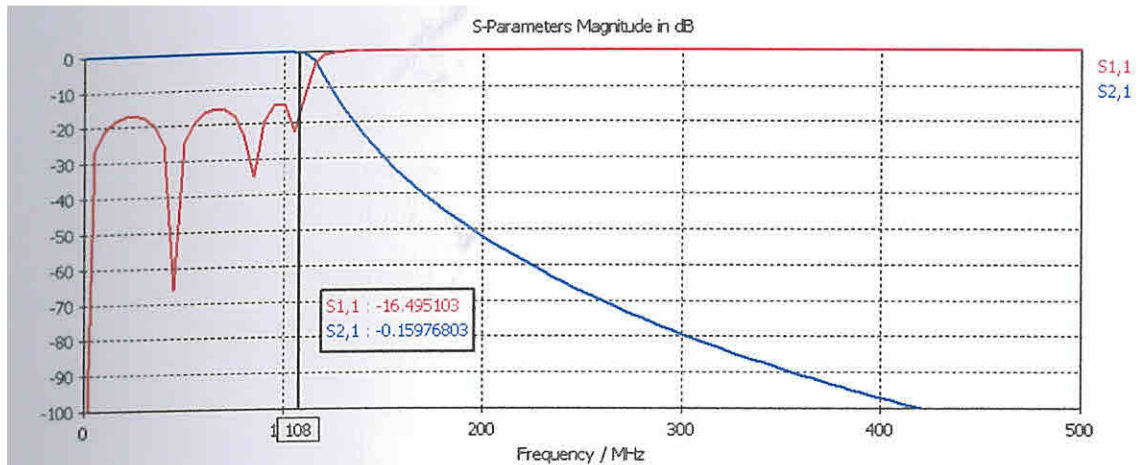


รูปที่ 3.3 ขนาดของวงจรความถี่ต่ำผ่าน

เมื่อทำการออกแบบได้ดังรูปที่ 3.3 จากนั้นทำการจำลองผล (simulation) เพื่อดูค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยได้ค่าพารามิเตอร์ ดังรูปที่ 3.4-3.8

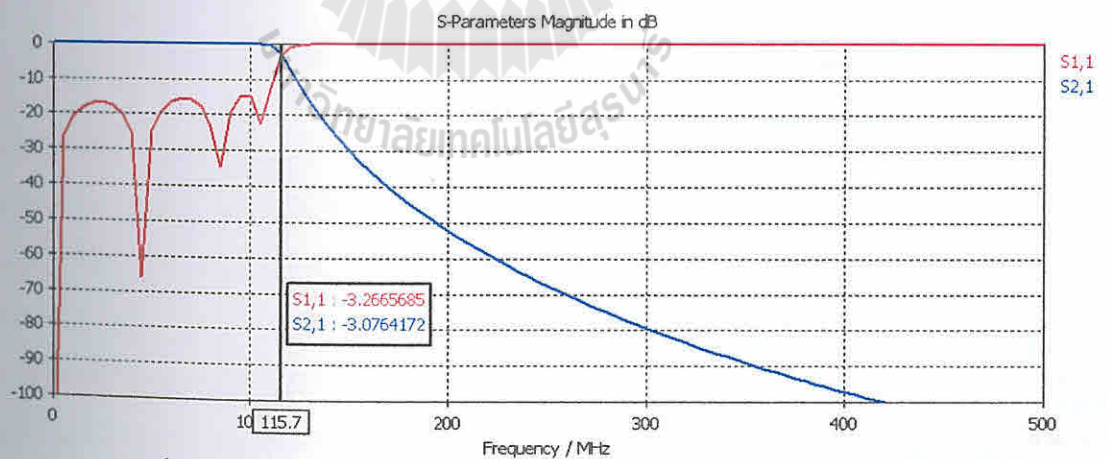


รูปที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 88 MHz S11, S21

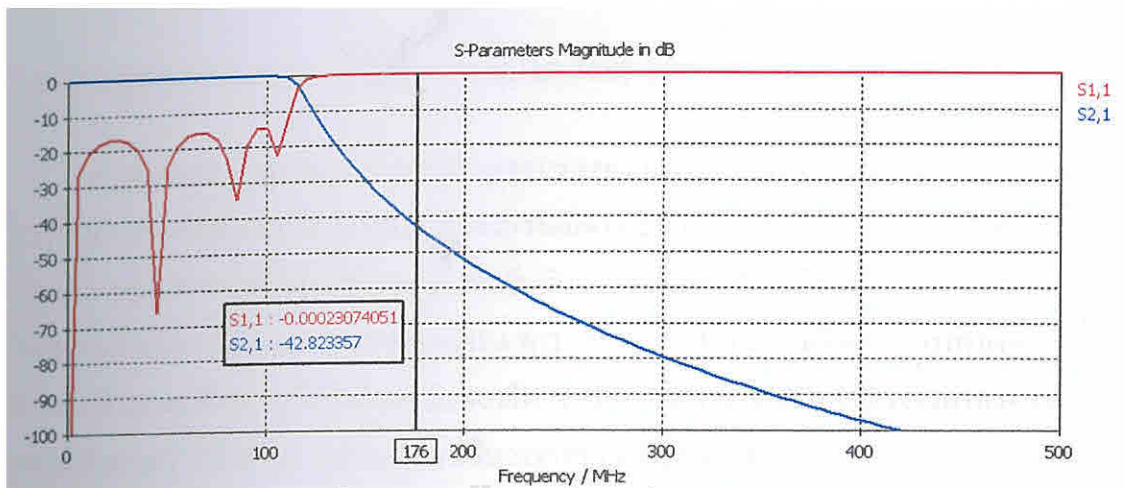


รูปที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 108 MHz S11, S21

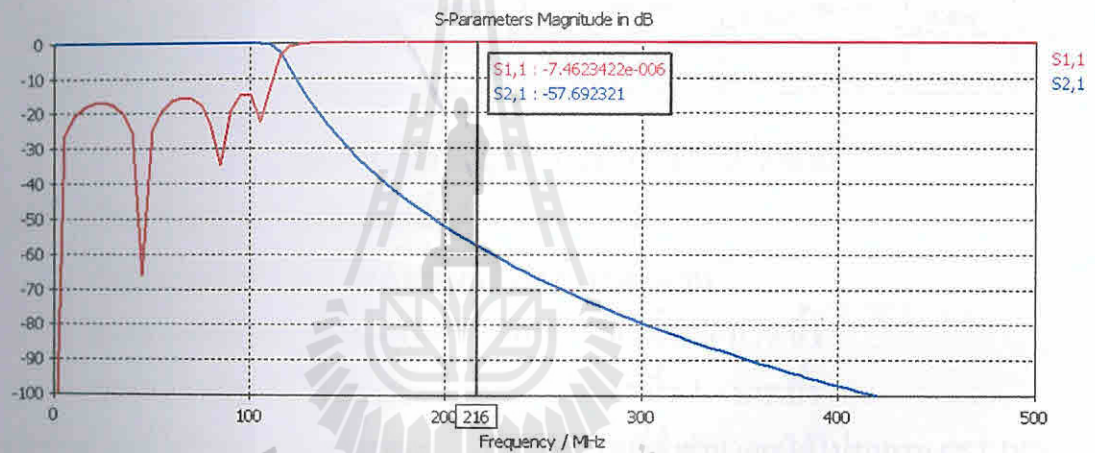
จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S11, S21 ดังรูปที่ 3.3 , 3.4 ซึ่งเป็นค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) ค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่า -10 dB ในทางทฤษฎีนั้นถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1 ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 88 MHz มีค่า -25.309085 dB และที่ความถี่ 108 MHz มีค่า -16.495103 dB ค่าความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (S21) ค่าที่ได้มีค่ามากกว่า -2 dB ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีสัญญาณไหลจากพอร์ต 1 ออกพอร์ต 2 ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 88 MHz มีค่า -0.03257 dB และที่ความถี่ 108 MHz มีค่า -0.159768 dB จากการทดสอบนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้



รูปที่ 3.6 ผลตอบสนองของวงจรรองความถี่ผ่านต่ำ ตำแหน่งความถี่คัตออฟ



รูปที่ 3.7 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 176 MHz S11, S21

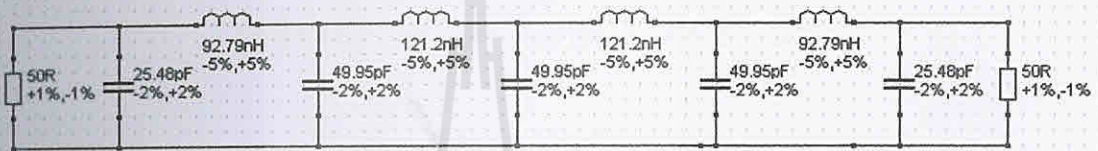


รูปที่ 3.8 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 216 MHz S11, S21

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S11, S21 ดังรูปที่ 3.6, 3.7 ซึ่งเป็นค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) ค่าที่ได้ นั้น มีค่าเข้าใกล้ 0 dB ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1 หมด ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 176 MHz มีค่า -0.00023 dB และที่ความถี่ 216 MHz มีค่า -0.000007 dB ค่าความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (S21) ค่าที่ได้ นั้น มีค่าการสูญเสียหลายๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีสัญญาณไหลจากพอร์ต 1 ออกพอร์ต 2 ลดทอนออกไป ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 176 MHz มีค่า -42.823353 dB และที่ความถี่ 216 MHz มีค่า -57.692321 dB จากการทดสอบนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

3.3 การออกแบบวงจรความถี่ต่ำผ่าน ขนาด 2000 วัตต์

การออกแบบและทดสอบผลของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ใช้โปรแกรม CST DESIGN STUDIO และ RFSim99 ต้องการวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีความคมในการลดทอนสัญญาณนอกแถบความถี่ต่ำผ่านสูงขึ้นทำได้โดยการเพิ่มอันดับของวงจรเป็น 9 อันดับ สามารถทนกำลังงานส่งได้สูงขึ้นจึงเพิ่มขนาดขดลวดทองแดงเป็น AWG 10 จะทำให้คุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนี้ดีขึ้น และทำการปรับค่าตำแหน่งของโครงสร้างให้ได้คุณลักษณะของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่กำหนดไว้ให้ดีที่สุด แสดงออกมาเป็นวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

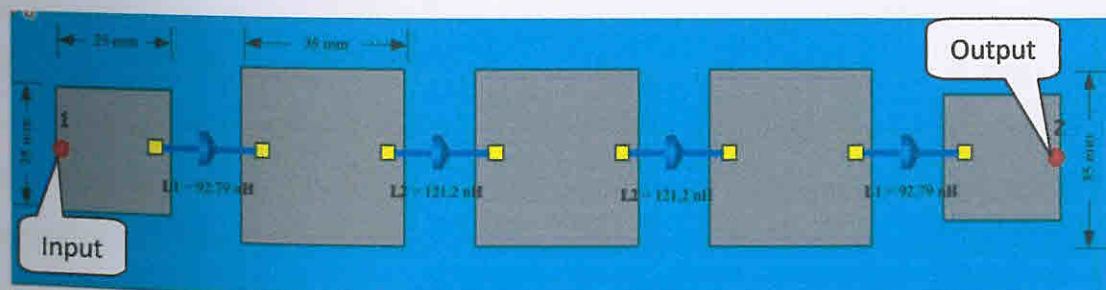
จะได้ ตัวเก็บประจุ 27.7 pF มีขนาดพื้นที่ 625 ตารางมิลลิเมตร

ตัวเก็บประจุ 49.15 pF มีขนาดพื้นที่ 1225 ตารางมิลลิเมตร

ขดลวดเหนี่ยวนำ 92.79 nH $n = 3$ รอบ $d = 0.67$ นิ้ว $l = 0.79$ นิ้ว

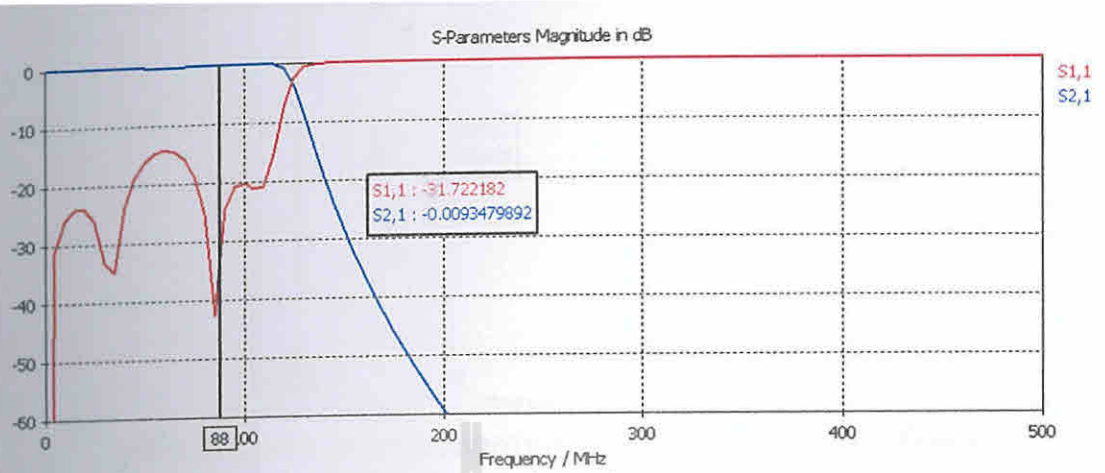
ขดลวดเหนี่ยวนำ 121.2 nH $n = 4$ รอบ $d = 0.67$ นิ้ว $l = 1.18$ นิ้ว

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และใช้โปรแกรม CST DESIGN STUDIO ช่วยในการปรับขนาดให้ตรงตามความถี่ต่ำผ่านที่ต้องการ ซึ่งขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ได้แสดงดังภาพที่ 3.10 และภาพที่ 3.11-3.15 คือ ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

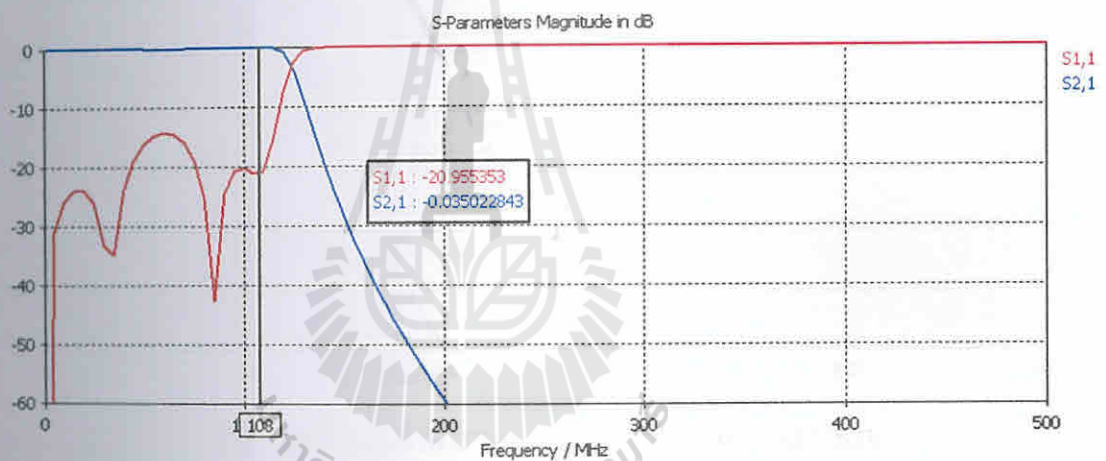


ภาพที่ 3.10 ขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เมื่อทำการออกแบบได้ดังรูปที่ 3.10 จากนั้นทำการจำลองผล (simulation) เพื่อดูค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยได้ค่าพารามิเตอร์ ดังรูปที่ 3.11 – 3.15

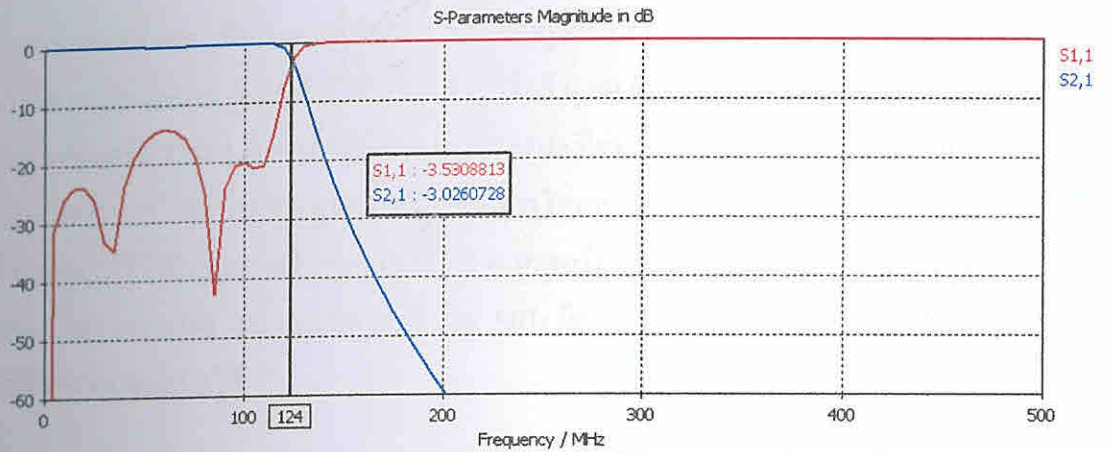


รูปที่ 3.11 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 88 MHz S11, S21

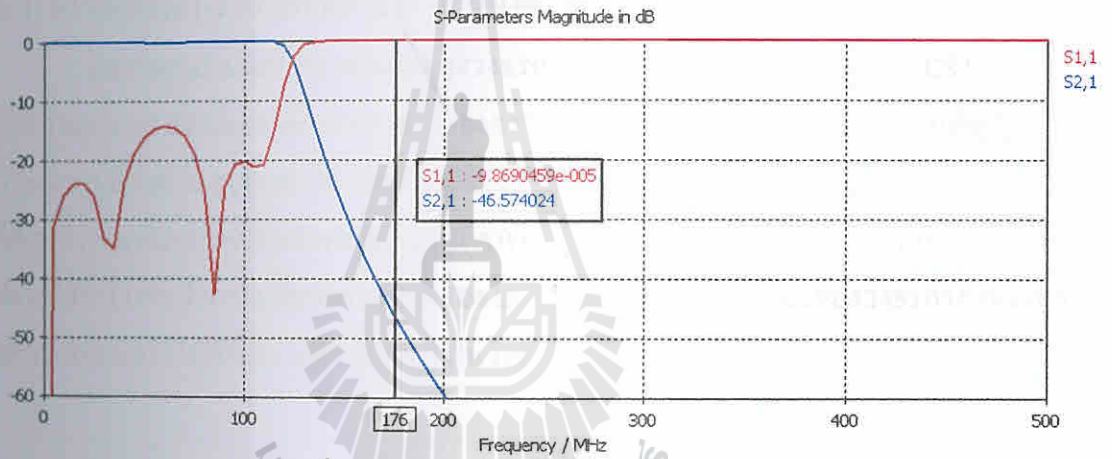


รูปที่ 3.12 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 108 MHz S11, S21

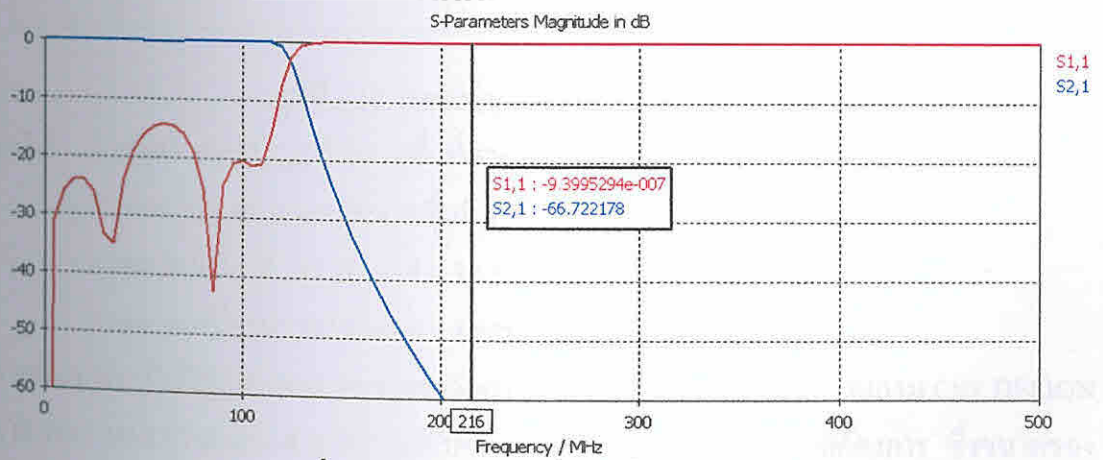
จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S11, S21 ดังรูปที่ 3.11, 3.12 ซึ่งเป็นค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) ค่าที่ได้ นั้น มีค่าต่ำกว่า -10 dB ในทางทฤษฎีนั้นถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1 ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 88 MHz มีค่า -31.7222 dB และที่ความถี่ 108 MHz มีค่า -20.9554 dB ค่าความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (S21) ค่าที่ได้ นั้น มีค่ามากกว่า -2 dB ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีสัญญาณไหลจากพอร์ต 1 ออกพอร์ต 2 ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 88 MHz มีค่า -0.0093 dB และที่ความถี่ 108 MHz มีค่า -0.0350 dB จากการทดสอบนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้



รูปที่ 3.13 ผลตอบสนองของวงจรความถี่ต่ำผ่าน ตำแหน่งความถี่คัตออฟ



รูปที่ 3.14 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 176 MHz S11, S21

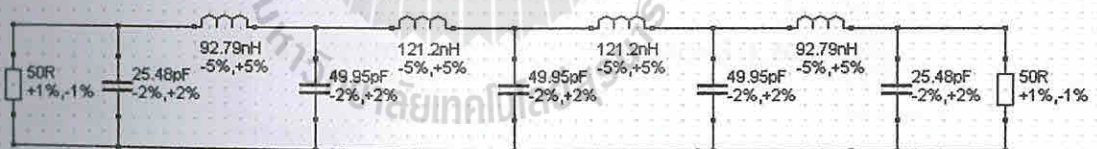


รูปที่ 3.15 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 216 MHz S11, S21

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S11, S21 ดังรูปที่ 3.14 , 3.15 ซึ่งเป็นค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) ค่าที่ได้มีค่าเข้าใกล้ 0 dB ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1 หมด ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 176 MHz มีค่า -9.869×10^{-5} dB และที่ความถี่ 216 MHz มีค่า -9.3995×10^{-7} dB ค่าความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (S21) ค่าที่ได้มีค่าการสูญเสียหลายๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีสัญญาณไหลจากพอร์ต 1 ออกพอร์ต 2 ลดทอนออกไป ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 176 MHz มีค่า -46.5740 dB และที่ความถี่ 216 MHz มีค่า -66.7221 dB จากการทดสอบนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

3.4 การออกแบบวงจรความถี่ต่ำผ่าน ขนาด 3000 วัตต์

การออกแบบและทดสอบผลของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ใช้โปรแกรม CST DESIGN STUDIO และ RFSim99 ต้องการวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีความคมในการลดทอนสัญญาณนอกแถบความถี่ต่ำผ่านสูงขึ้นทำได้โดยการเพิ่มอันดับของวงจรเป็น 9 อันดับ สามารถทนกำลังงานส่งได้สูงขึ้นจึงเพิ่มขนาดขดลวดทองแดงเป็น AWG 10 จะทำให้คุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านดีขึ้น และทำการปรับค่าตำแหน่งของโครงสร้างให้ได้คุณลักษณะของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่กำหนดไว้ให้ดีที่สุด แสดงออกมาเป็นวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 วงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

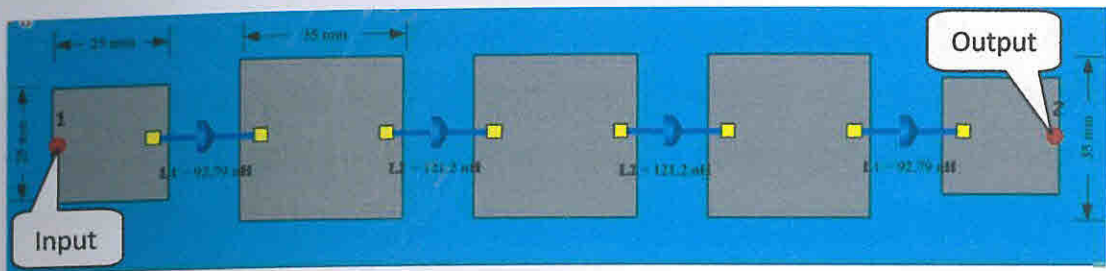
จะได้ ตัวเก็บประจุ 27.7 pF มีขนาดพื้นที่ 625 ตารางมิลลิเมตร

ตัวเก็บประจุ 49.15 pF มีขนาดพื้นที่ 1225 ตารางมิลลิเมตร

ขดลวดเหนี่ยวนำ 92.79 nH n = 3 รอบ d = 0.67 นิ้ว l = 0.79 นิ้ว

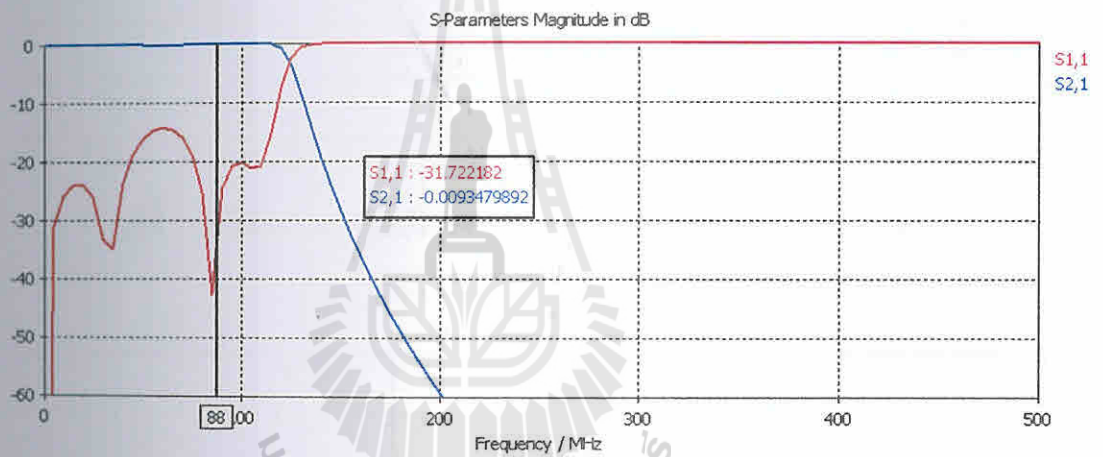
ขดลวดเหนี่ยวนำ 121.2 nH n = 4 รอบ d = 0.67 นิ้ว l = 1.18 นิ้ว

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และใช้โปรแกรม CST DESIGN STUDIO และ RFSim99 ช่วยในการปรับขนาดให้ตรงตามความถี่ต่ำผ่านที่ต้องการ ซึ่งขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ได้แสดงดังภาพที่ 3.17 และภาพที่ 3.18-3.22 คือ ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

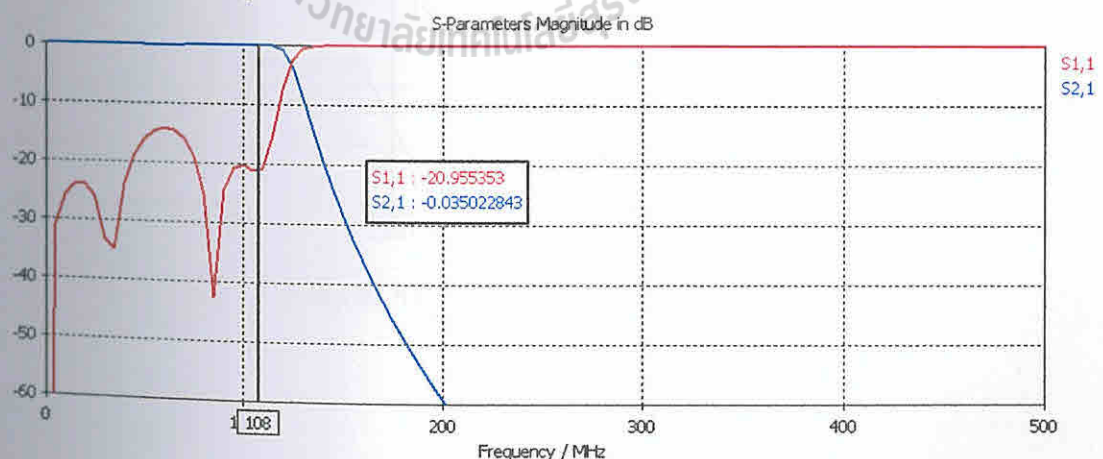


ภาพที่ 3.17 ขนาดของวงจรความถี่ต่ำผ่าน

เมื่อทำการออกแบบได้ดังรูปที่ 3.17 จากนั้นทำการจำลองผล (simulation) เพื่อดูค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยได้ค่าพารามิเตอร์ ดังรูปที่ 3.18 – 3.22



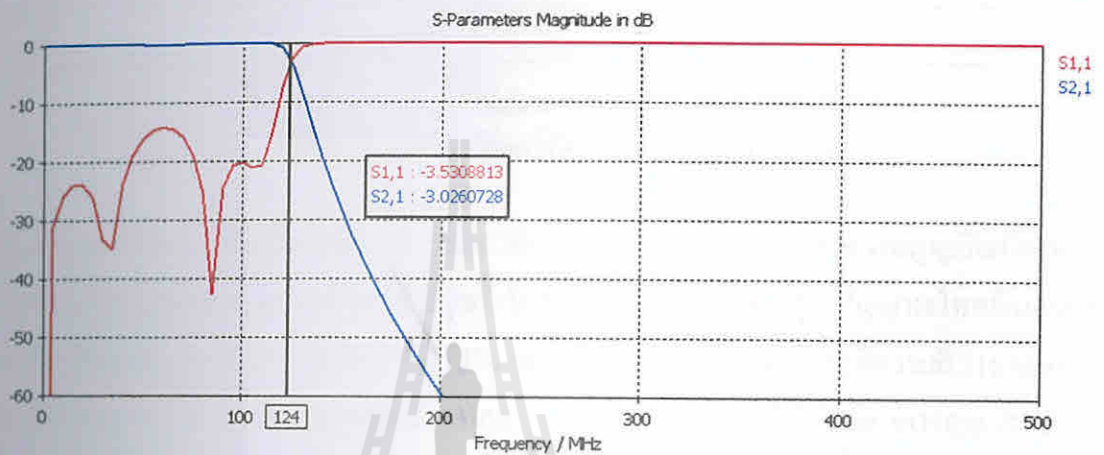
รูปที่ 3.18 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 88 MHz S11, S21



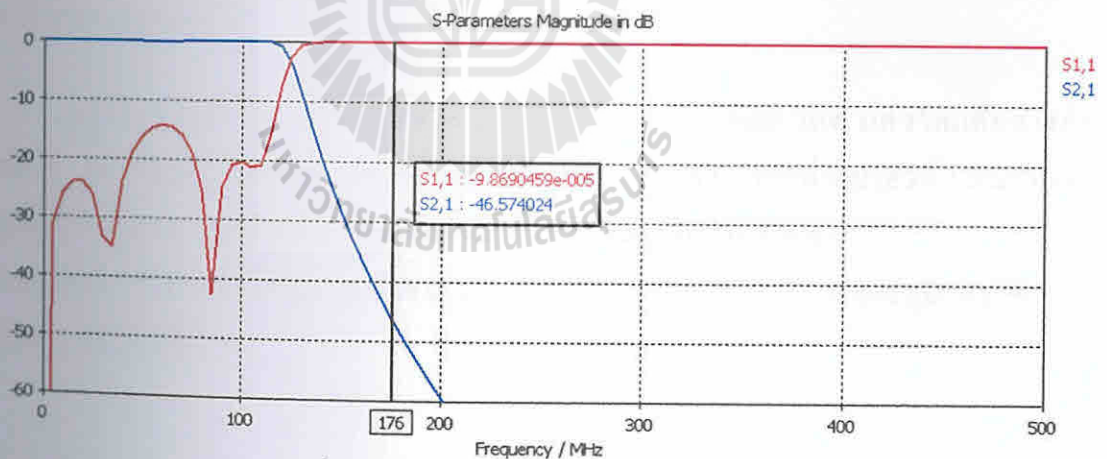
รูปที่ 3.19 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 108 MHz S11, S21

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S11, S21 ดังรูปที่ 3.18 , 3.19 ซึ่งเป็นค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) ค่าที่ได้ นั้น มีค่าต่ำกว่า -10 dB ในทางทฤษฎีนั้นถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้

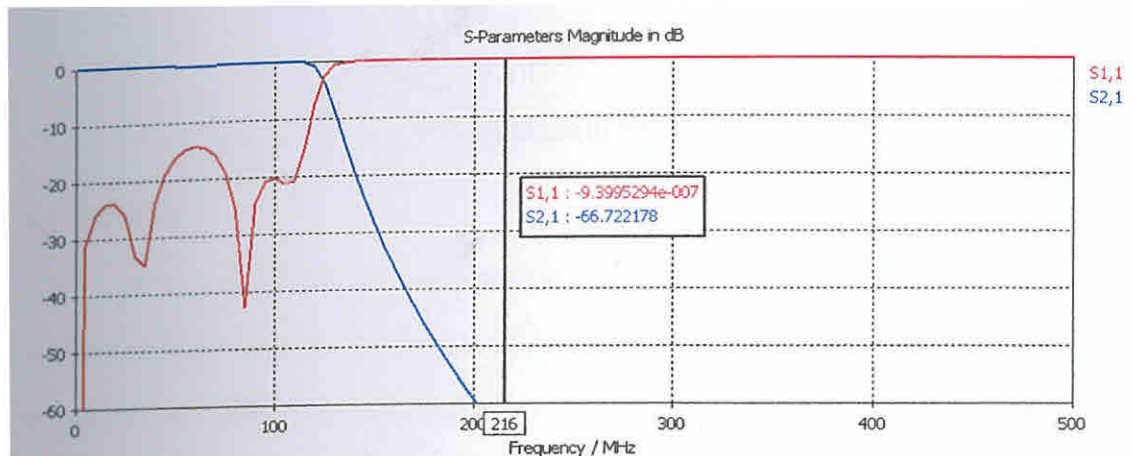
ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1 ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 88 MHz มีค่า -31.7222 dB และที่ความถี่ 108 MHz มีค่า -20.9554 dB ค่าความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (S21) ค่าที่ได้ นั้น มีค่ามากกว่า -2 dB ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีสัญญาณไหลจากพอร์ต 1 ออกพอร์ต 2 ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 88 MHz มีค่า -0.0093 dB และที่ความถี่ 108 MHz มีค่า -0.0350 dB จากการทดสอบนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้



รูปที่ 3.20 ผลตอบสนองของวงจรความถี่ต่ำผ่าน ตำแหน่งความถี่ที่ตัดออฟ



รูปที่ 3.21 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 176 MHz S11, S21



รูปที่ 3.22 ค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่ 216 MHz S11, S21

จากกราฟแสดงผล เมื่อสังเกตที่ค่า S11, S21 ดังรูปที่ 3.21 , 3.22 ซึ่งเป็นค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) ค่าที่ได้มีค่าเข้าใกล้ 0 dB ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1 หมด ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 176 MHz มีค่า -9.869×10^{-5} dB และที่ความถี่ 216 MHz มีค่า -9.3995×10^{-7} dB ค่าความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (S21) ค่าที่ได้มีค่าการสูญเสียมากๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีสัญญาณไหลจากพอร์ต 1 ออกพอร์ต 2 ลดทอนออกไป ซึ่งค่าที่ได้ที่ความถี่ 176 MHz มีค่า -46.5740 dB และที่ความถี่ 216 MHz มีค่า -66.7221 dB จากการทดสอบนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

วงจรรองความถี่ต่ำผ่านขนาด 2000 วัตต์ และ 3000 วัตต์ มีความแตกต่างกัน ขนาด 2000 วัตต์ การพันขดลวดเหนี่ยวนำจะพันกลับด้านกัน ขดลวดเหนี่ยวนำตัวที่ 1 พันตามเข็มนาฬิกา ขดลวดเหนี่ยวนำตัวที่ 2 พันทวนเข็มนาฬิกา วางสลับกันครบทั้ง 4 ตัว ขนาด 3000 วัตต์ การพันขดลวดเหนี่ยวนำพันตามเข็มนาฬิกาทั้ง 4 ตัว และมีแผ่นอะลูมิเนียมกั้นกลางระหว่างขดลวดทั้ง 2 ตัว

บทที่ 4

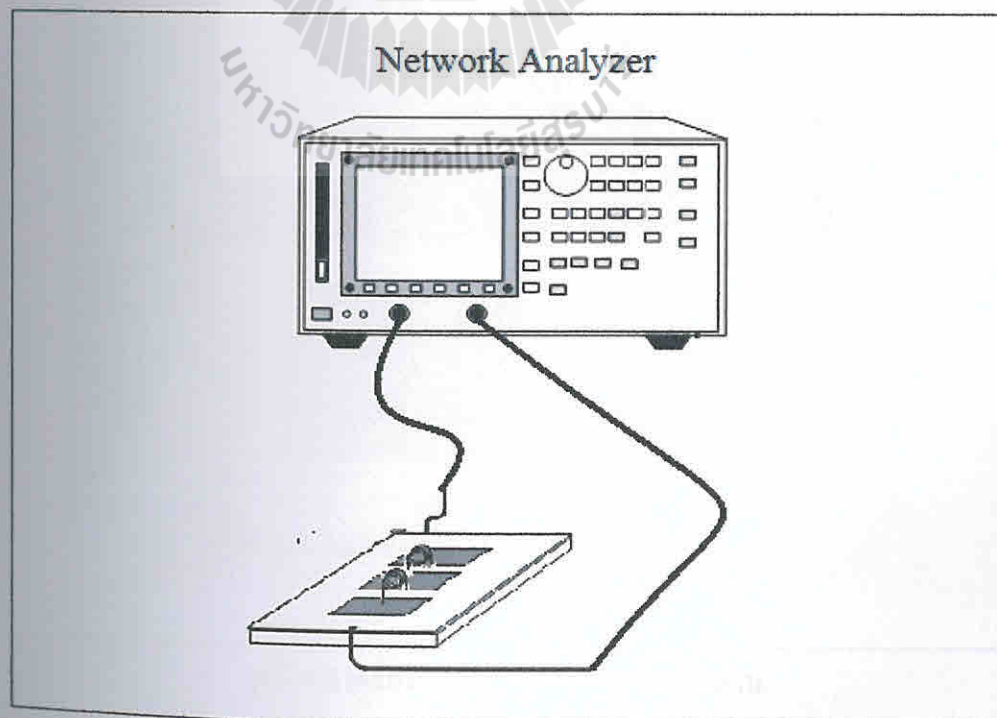
การวัดและผลการทดลอง

4.1 กล่าวนำ

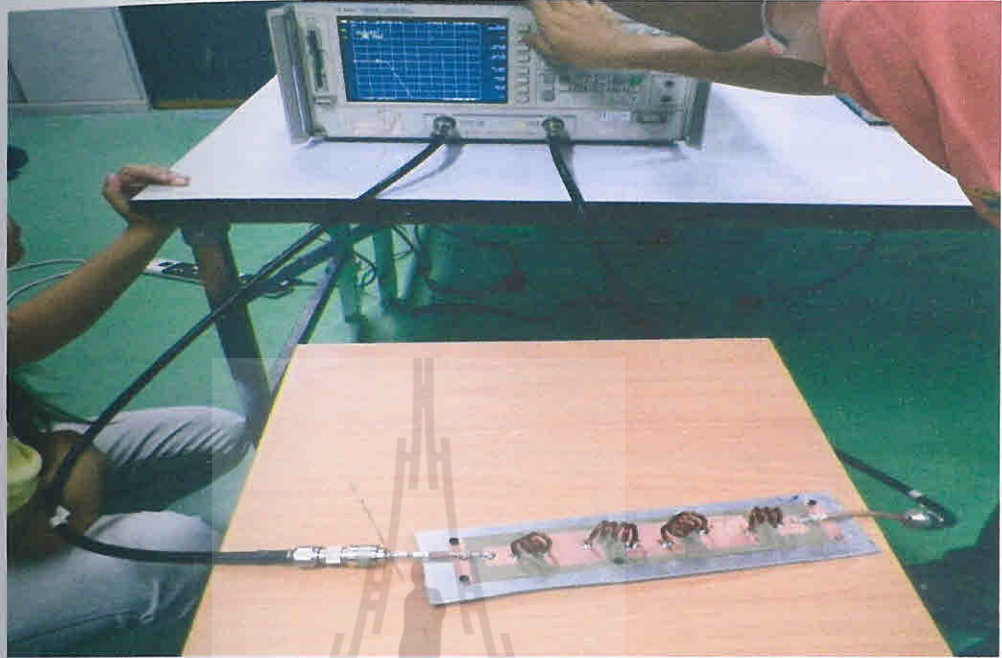
จากการกล่าวถึงการออกแบบวงจรของความถี่ต่ำผ่านในบทที่ผ่านมาโดยการใช้ทฤษฎีในการวิเคราะห์และออกแบบ สำหรับในบทนี้จึงกล่าวถึงการทดลองและผลการทดสอบวงจรของความถี่ต่ำผ่านที่ได้ออกแบบเพื่อยืนยันการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้ โดยประกอบด้วยผลการวัดสองส่วนคือ ส่วนวัดความถี่ตัดผ่านและส่วนวัดกำลังงาน โดยใช้เครื่อง Network Analyzer และเครื่องในในส่วนการวัดและทดสอบการกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านและนำผลที่ได้จากการวัดมาวิเคราะห์และสรุปผลต่อไป

4.2 การวัดผลการทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ในการหาความถี่ใช้งานที่ความถี่ย่าน 88 – 108 MHz และดูการลดของฮาร์มอนิก ที่ 2, 3,.. จะใช้เครื่อง Network Analyzer ในวัดค่าที่ทำการวัดได้จะแสดงเป็นกราฟที่เริ่มจาก 0 – 500 MHz

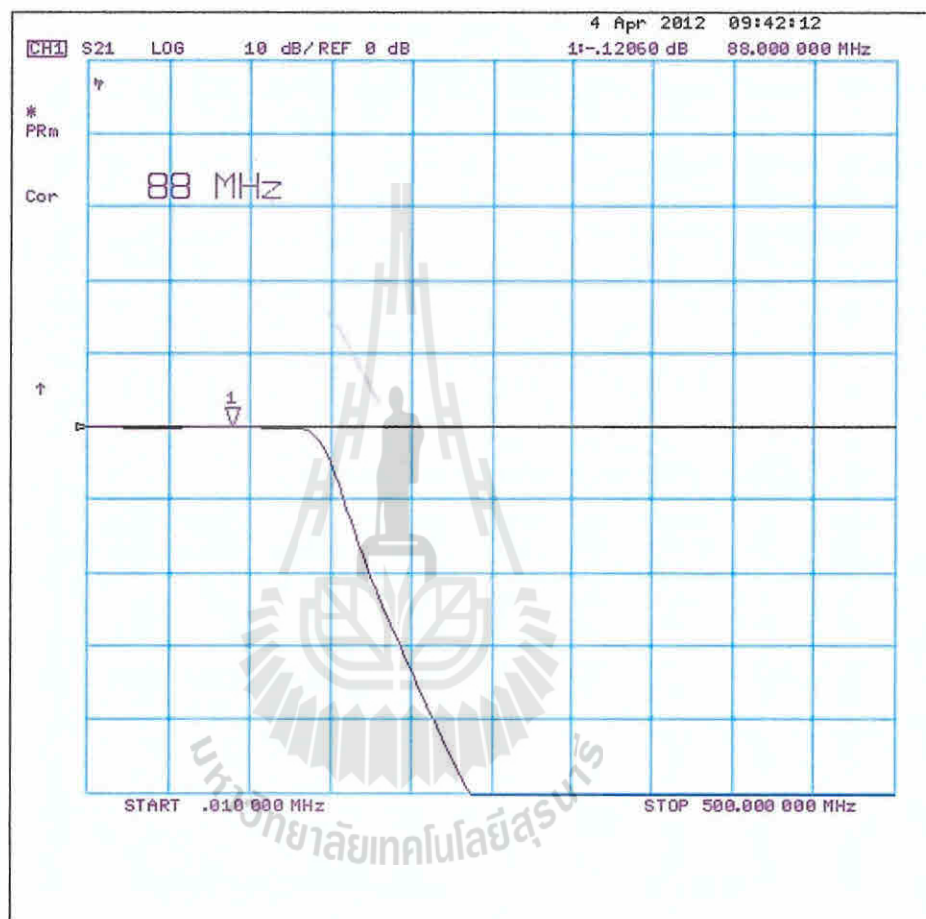


รูปที่ 4.1 ลักษณะการทดลองกราฟวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



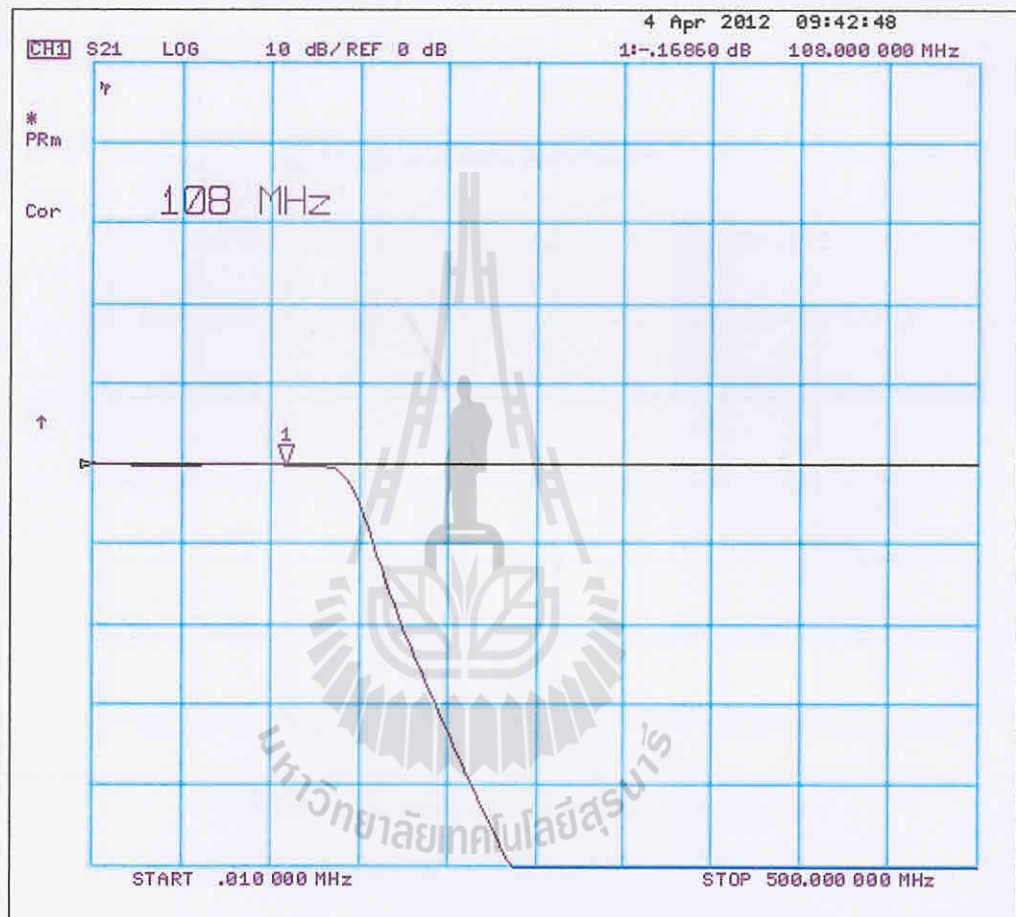
รูปที่ 4.2 เครื่องวัดสัญญาณกรองความถี่ต่ำผ่าน

ผลการทดลองการวัดสัญญาณของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นผลการวัดสัญญาณที่ 88 MHz เพื่อดูค่าการสูญเสียที่ความถี่นั้นๆ ซึ่งที่ความถี่นี้มีค่าการสูญเสียน้อยกว่า 2 dB โดยใช้เครื่อง Network Analyzer ในการวัดสัญญาณของวงจรกรองความถี่ต่ำ 1500วัตต์ จากผลการวัดสัญญาณที่ 88 MHz มีค่าการสูญเสียประมาณ 0.12 dB



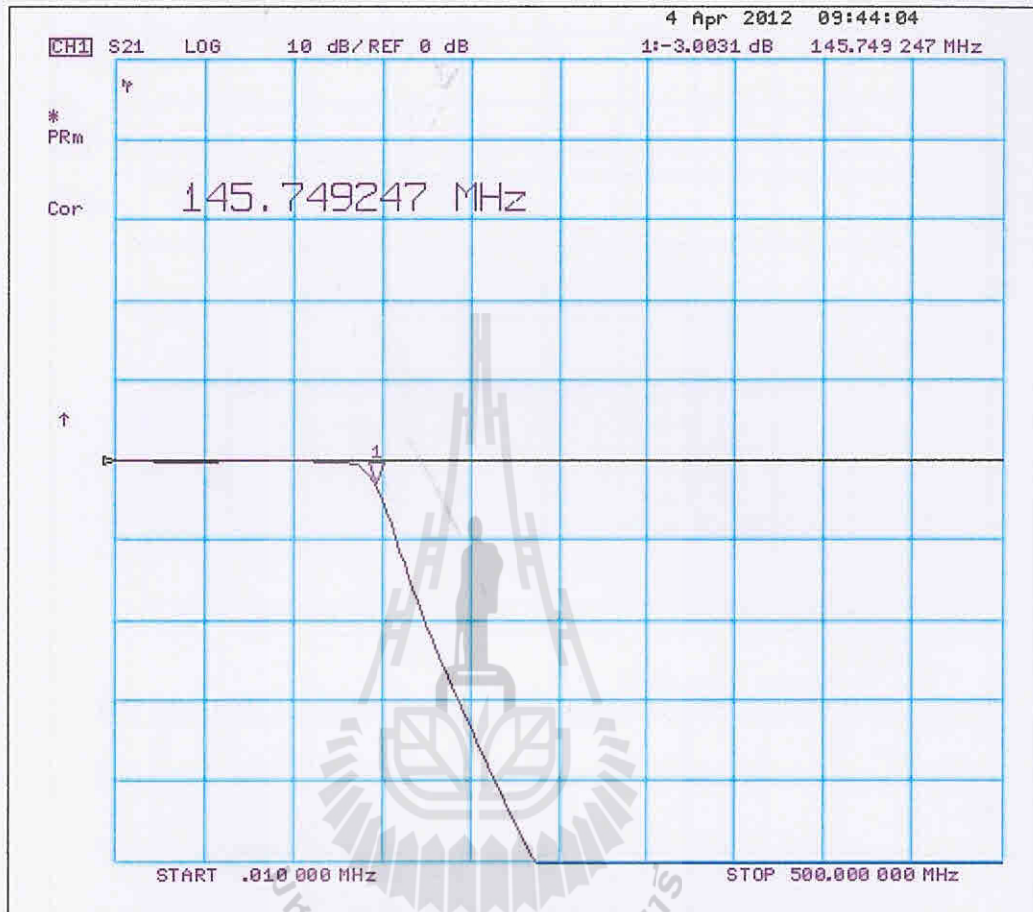
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21 ของความถี่ 88 MHz

ผลการทดลองการวัดสัญญาณของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นผลการวัดสัญญาณที่ 108 MHz เพื่อค่าการสูญเสียที่ความถี่นั้นๆ ซึ่งที่ความถี่นี้มีค่าการสูญเสียน้อยกว่า 2 dB โดยใช้เครื่อง Network Analyzer ในการวัดสัญญาณของวงจรกรองความถี่ต่ำ 1500วัตต์ จากผลการวัดสัญญาณที่ 108 MHz มีค่าการสูญเสียประมาณ 0.17 dB



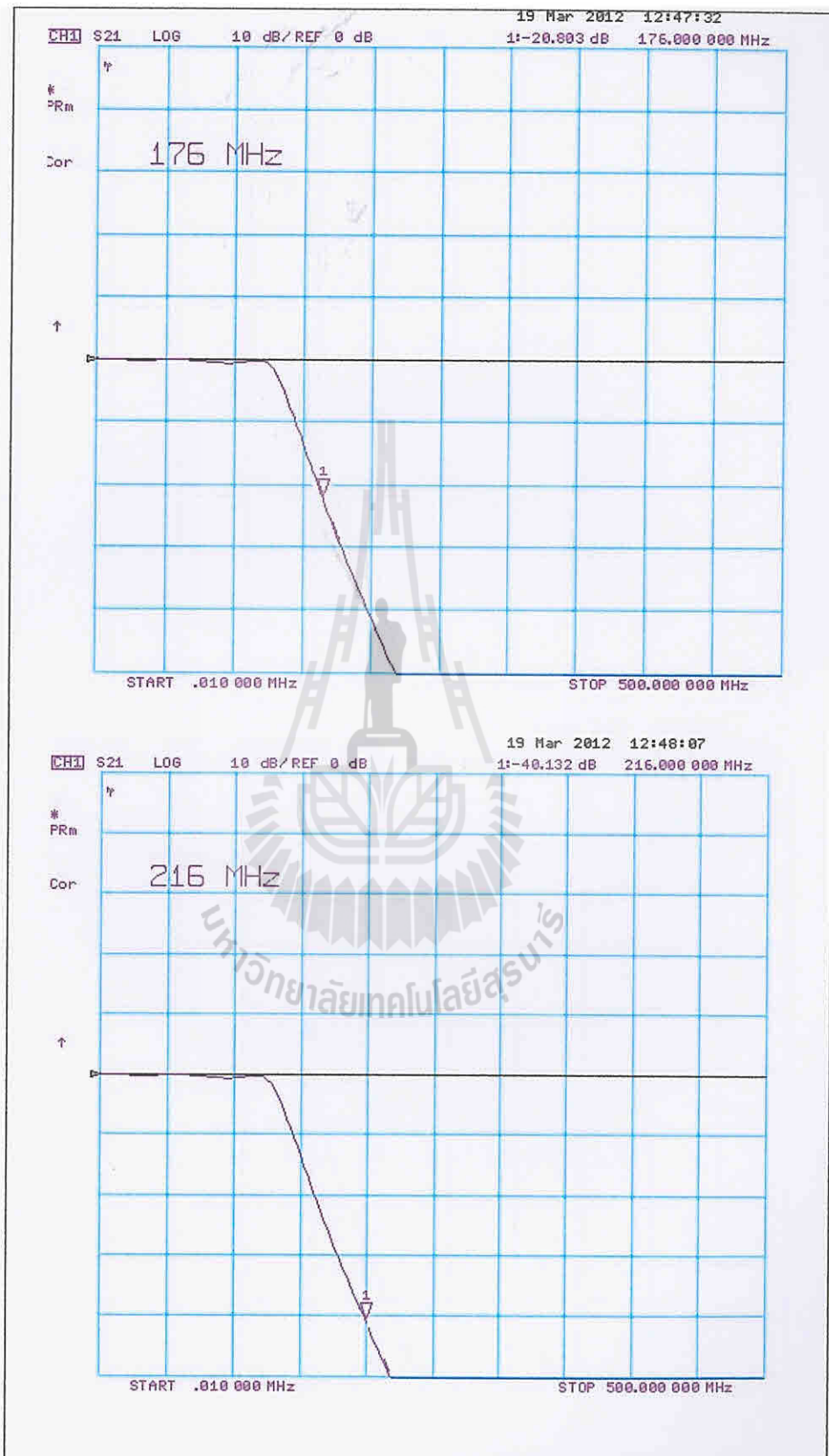
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21ของควมถี่ 108 MHz

สำหรับ รูปที่ 4.5 คือกราฟแสดงสัญญาณที่ความถี่ตัดออฟ หรือความถี่ตัด (f_c) ประมาณ 145 MHz และมีค่าการสูญเสียอยู่ที่ 3 dB

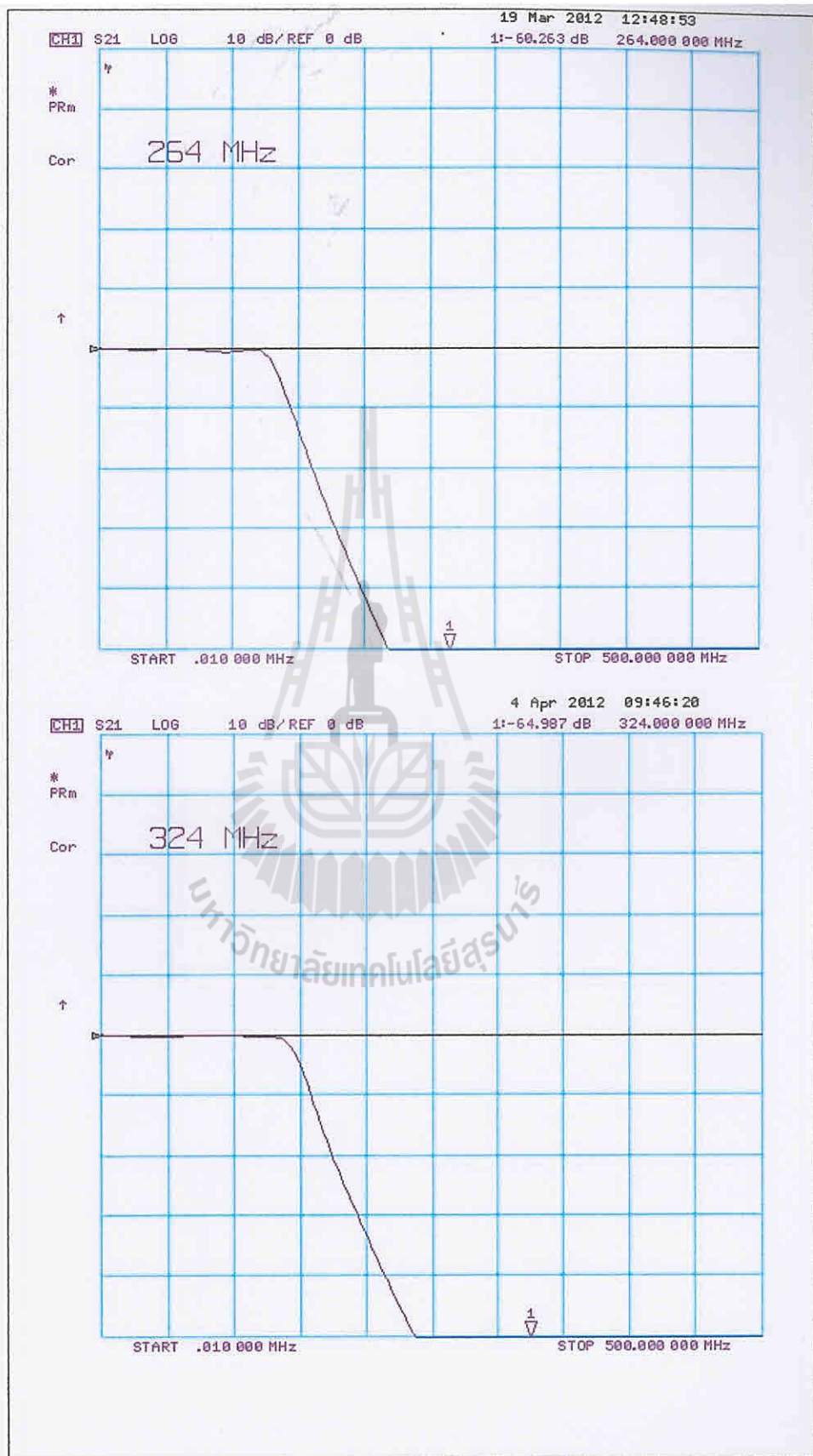


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21 ของความถี่ตัด

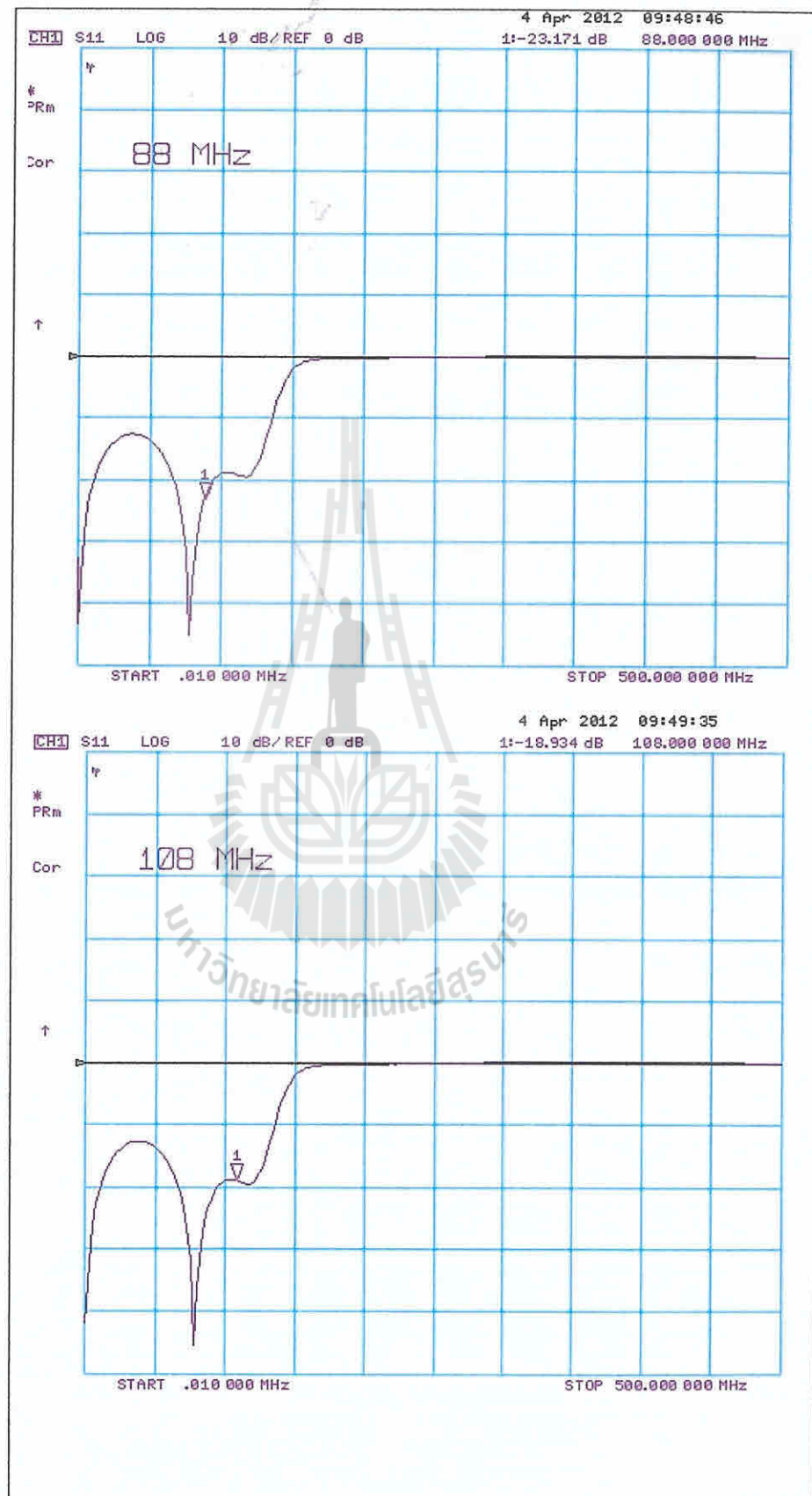
สำหรับ รูปที่ 4.6 คือกราฟแสดงสัญญาณฮาร์โมนิกที่สองของ 88 MHz และ 108 MHz โดยฮาร์โมนิกที่สองของความถี่ 88MHz คือ 176 MHz , ฮาร์โมนิกที่สองของความถี่ 108MHz คือ 216 MHz ค่าการลดทอนอยู่ที่ 40 dB สำหรับ รูปที่ 4.7 คือกราฟแสดงสัญญาณฮาร์โมนิกที่สามของ 88 MHz และ 108 MHz โดยฮาร์โมนิกที่สามของความถี่ 88MHz คือ 264 MHz , ฮาร์โมนิกที่สามของความถี่ 108MHz คือ 324 MHz ค่าการลดทอนอยู่ที่ 60 dB



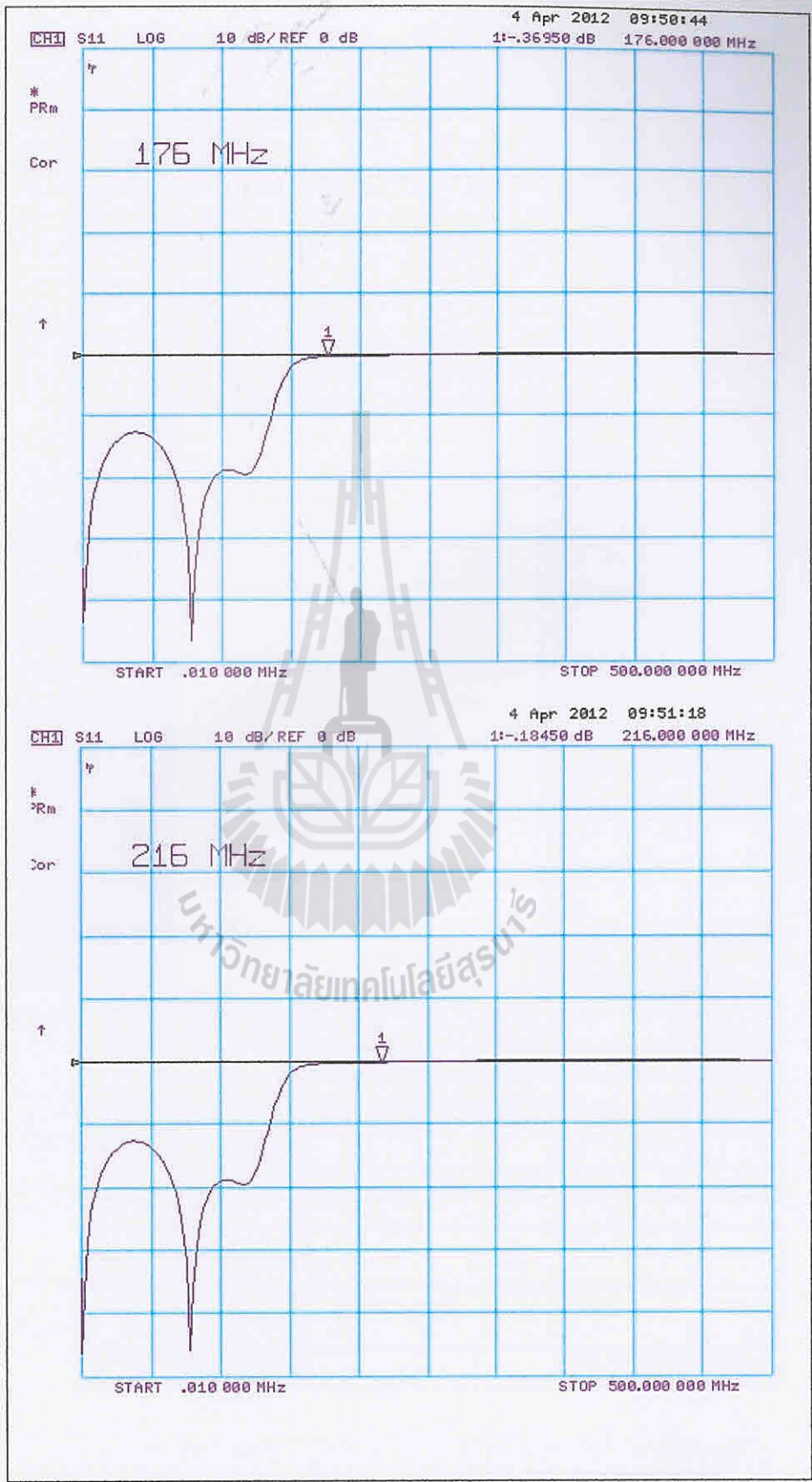
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21 ของฮาร์โมนิกที่สองของความถี่วิทยุ



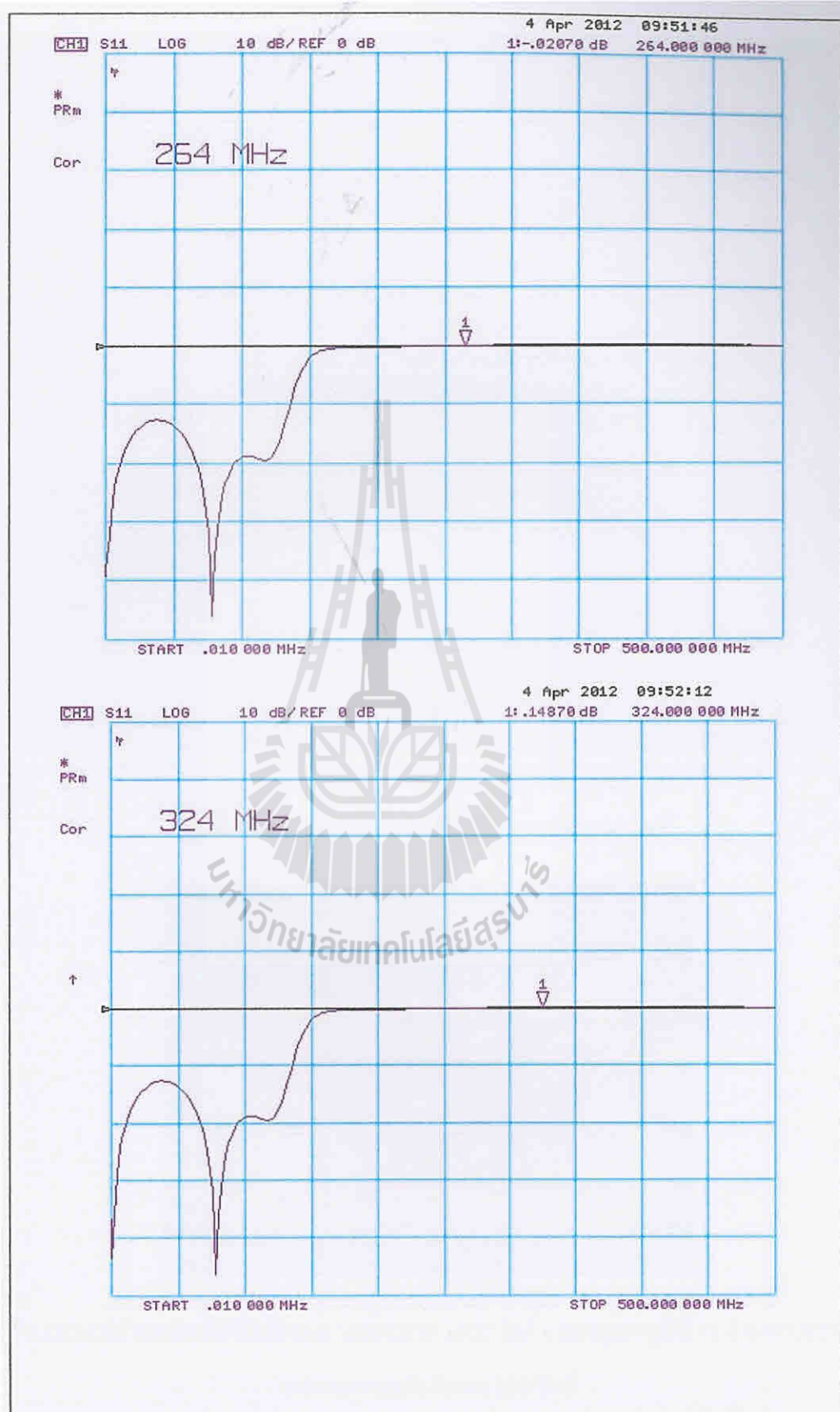
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21 ของฮาร์มอนิกที่สามของความถี่วิทยุ



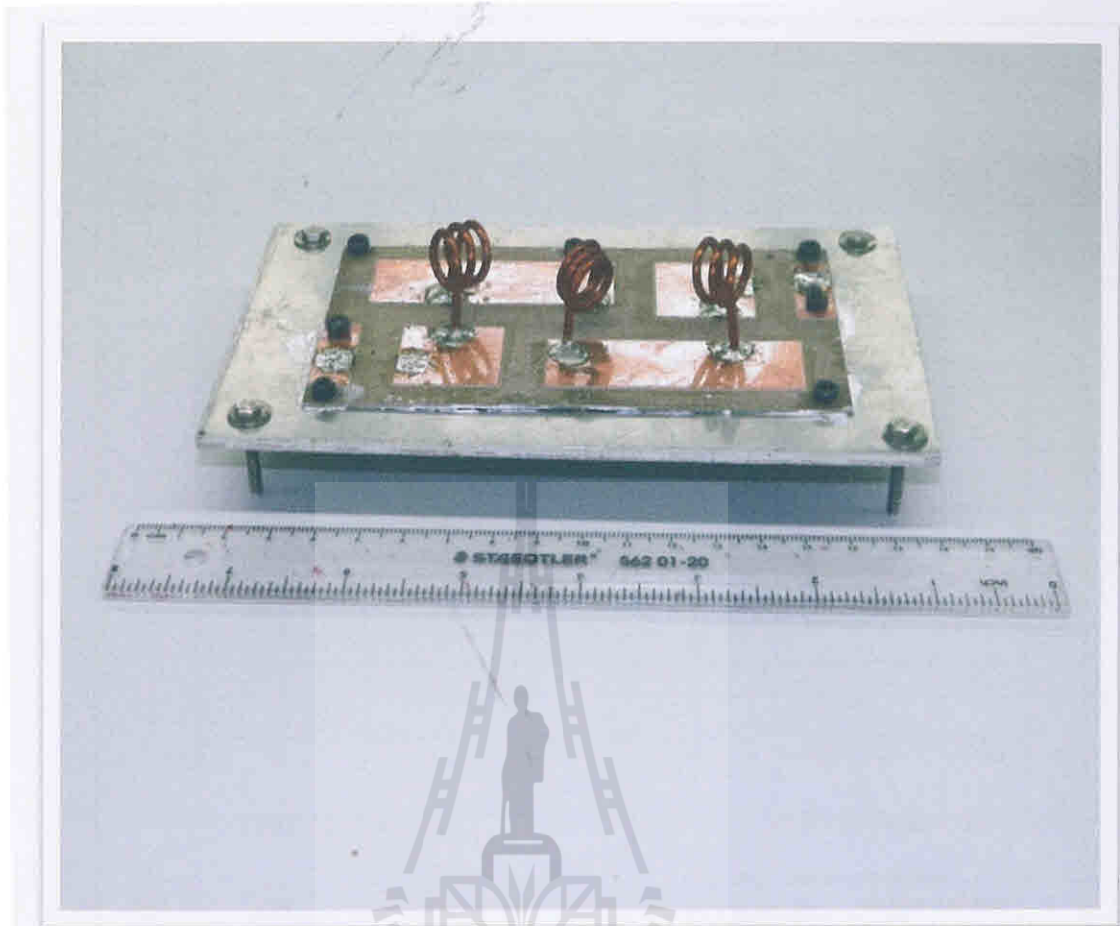
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S11 ของย่านความถี่วิทยุ



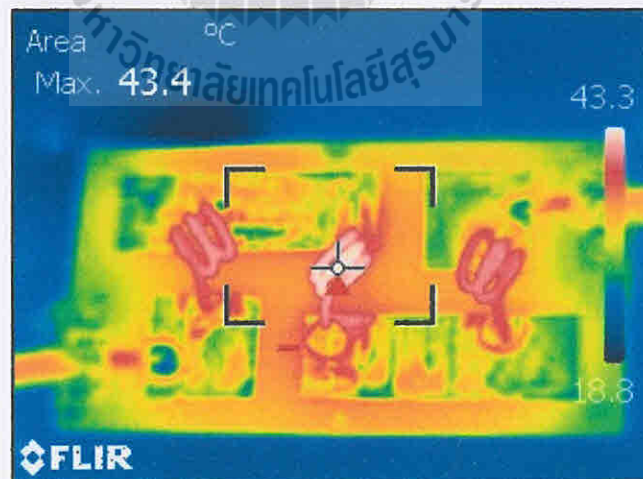
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S11 ของฮาร์มอนิกที่สองของย่านความถี่วิทยุ



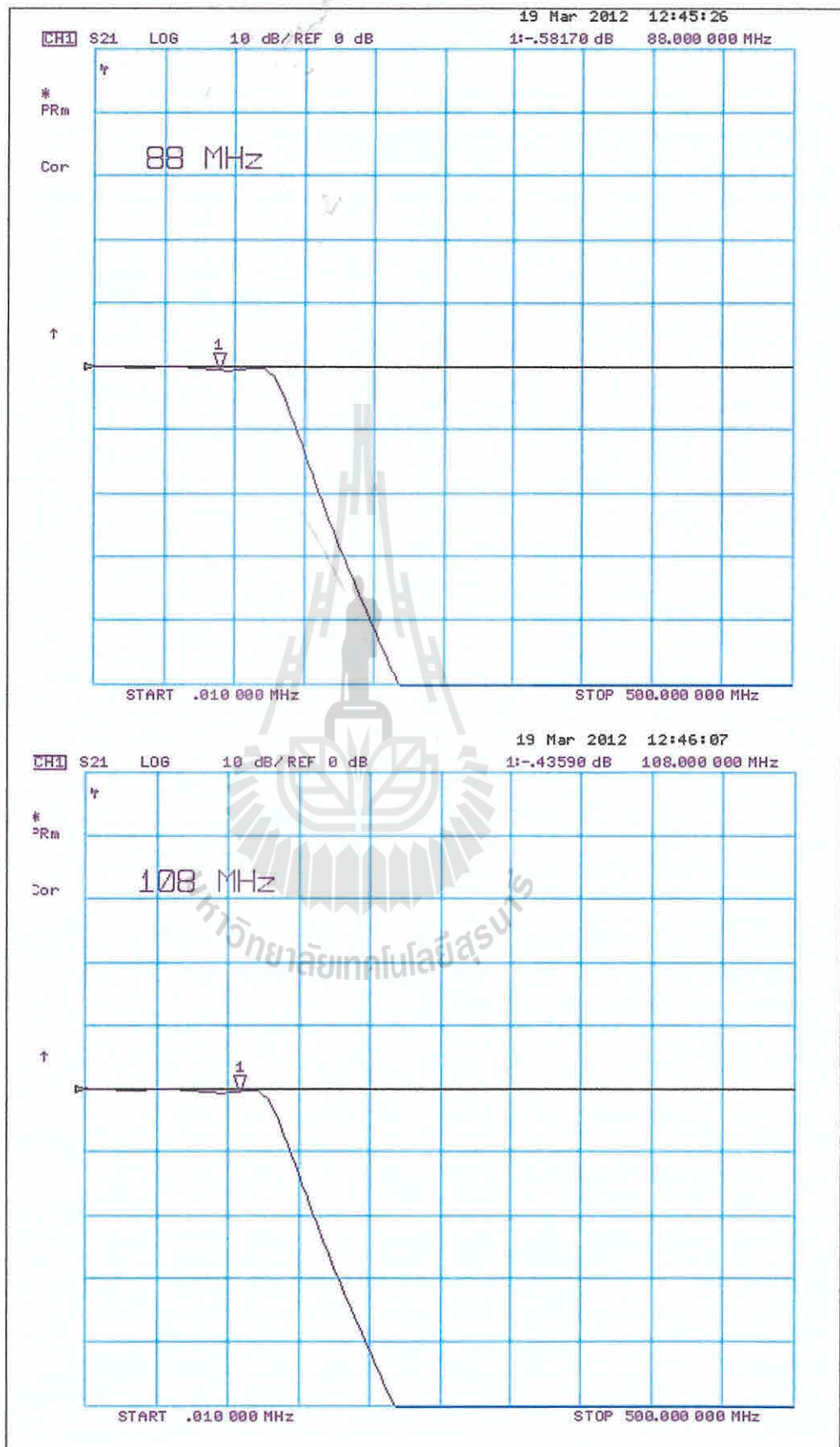
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S11ของฮาร์มอนิกที่สามของย่านความถี่วิทยุ



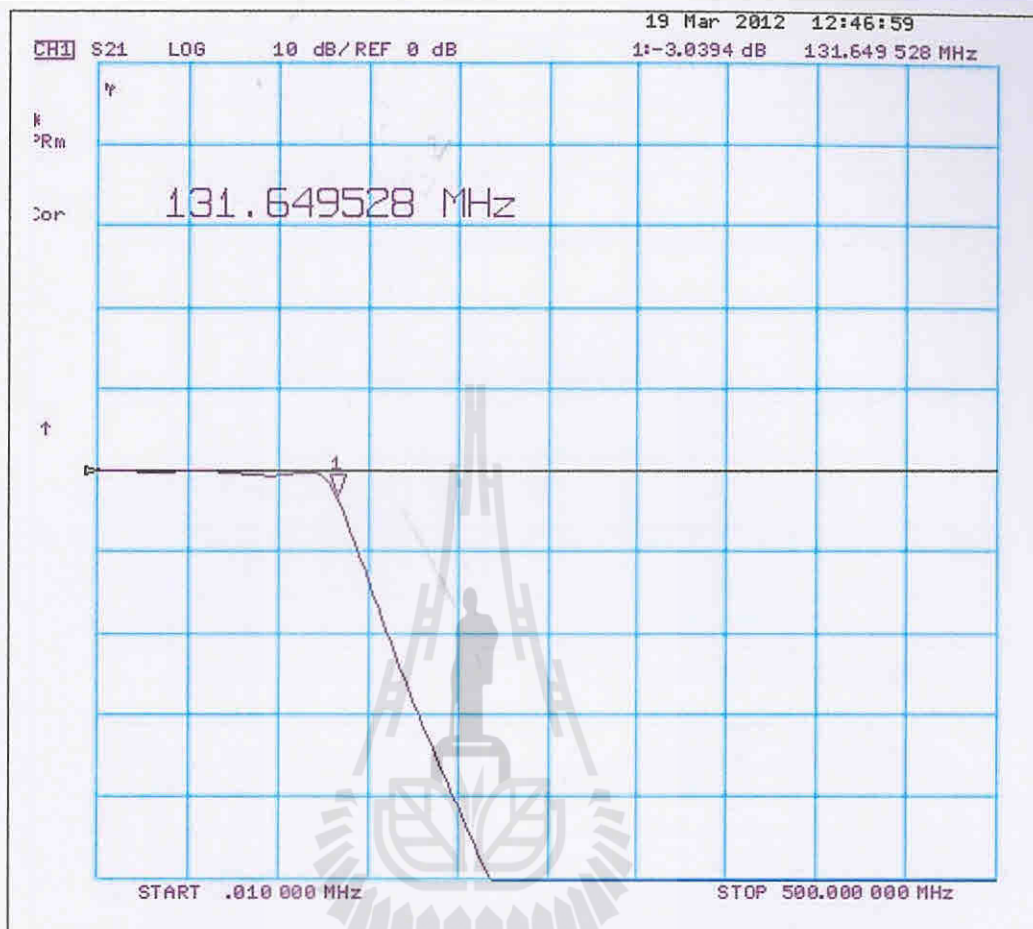
รูปที่ 4.11 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ขนาด 1500 วัตต์



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายจากกล้องอินฟราเรด วงจรขนาด 1500 วัตต์ แสดงอุณหภูมิที่ 43.4 องศาเซลเซียส ขณะทดสอบกำลังงาน 250 วัตต์



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21ของย่านความถี่วิทยุ

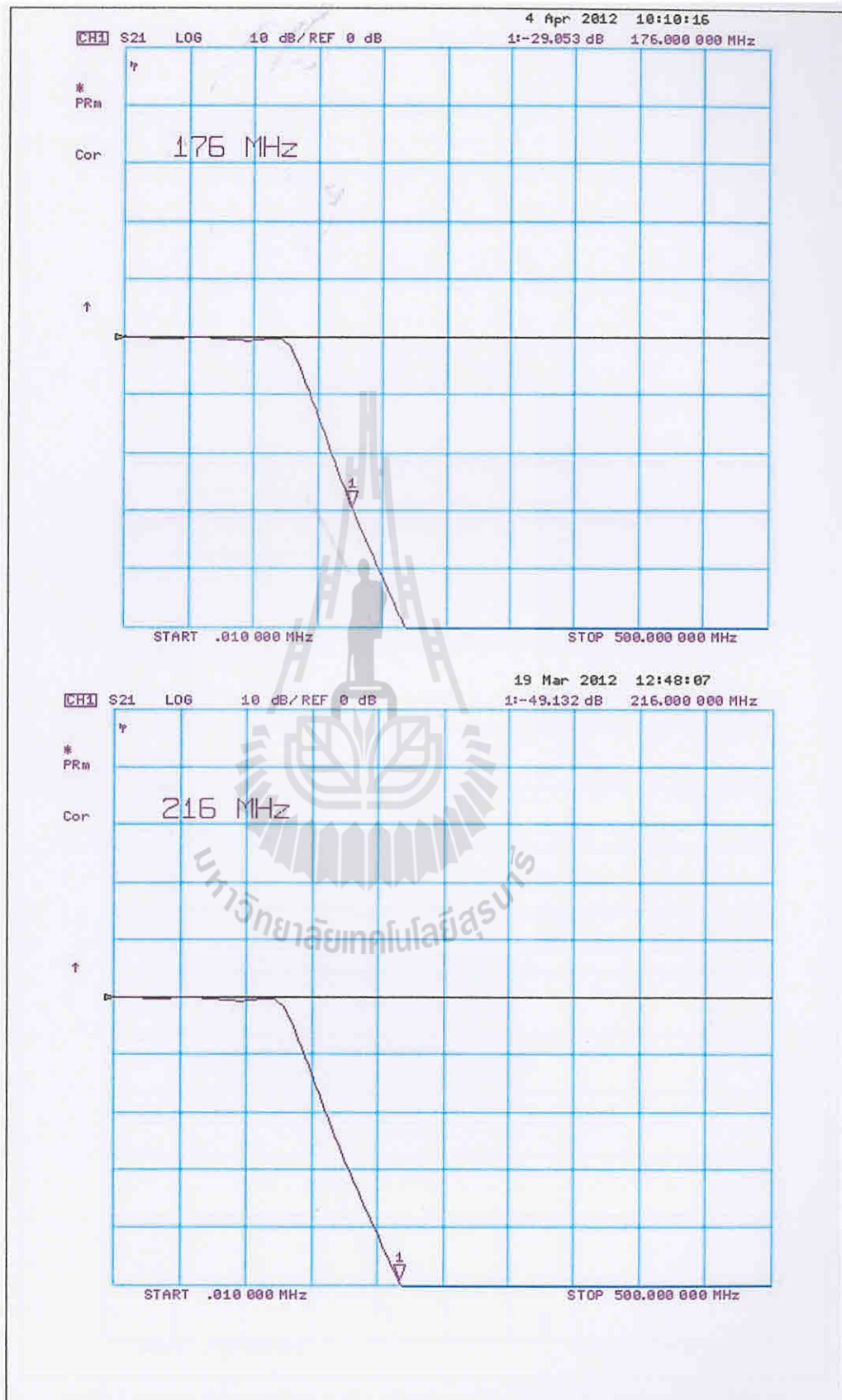


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21 ของความถี่คัตออฟ

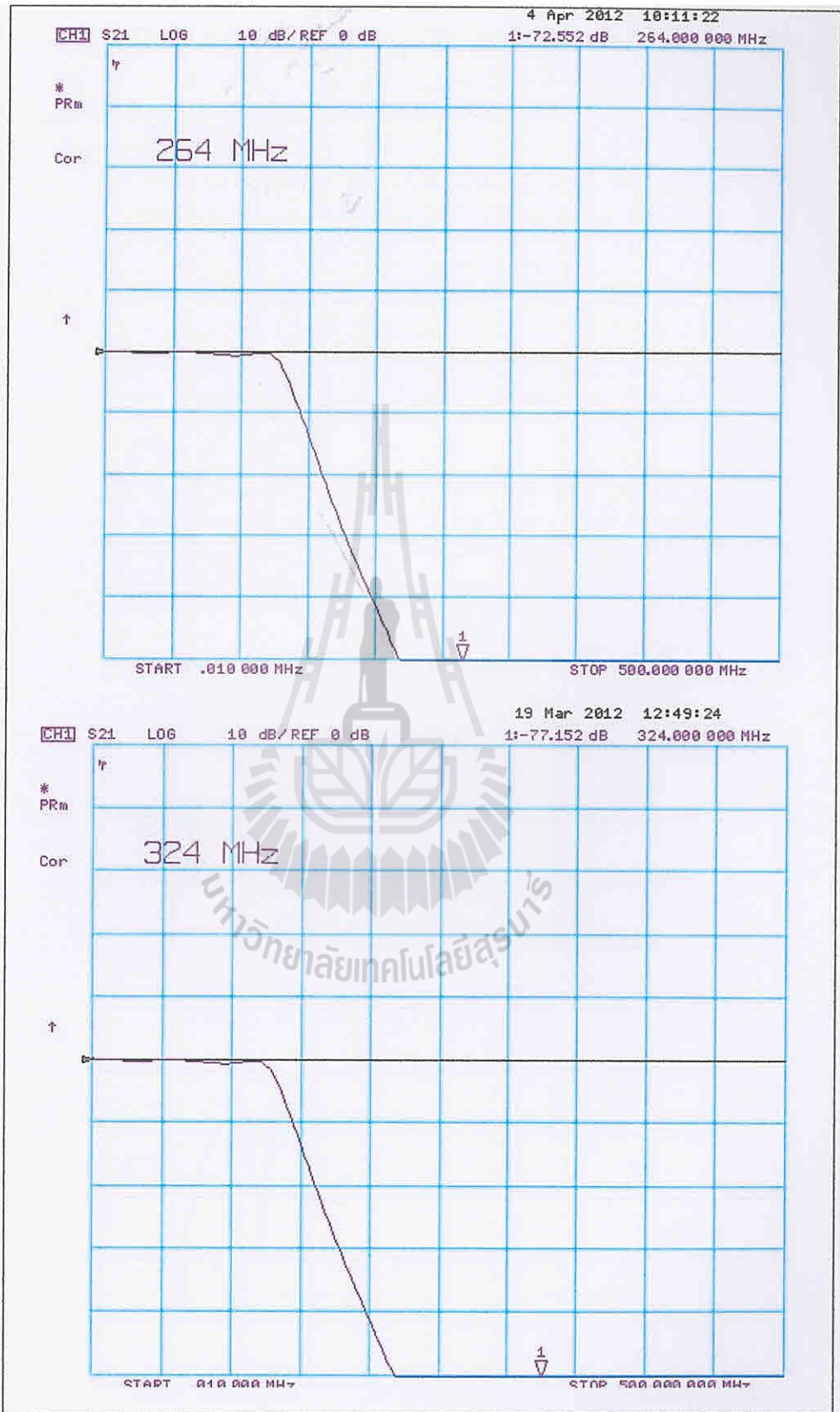
รูปที่ 4.13 แสดงสัญญาณของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน 2000 วัตต์ ย่านความถี่วิทยุ มีค่าการสูญเสียประมาณ 0.5 dB

รูปที่ 4.14 กราฟแสดงสัญญาณที่ความถี่คัตออฟ (f_c) ประมาณ 131 MHz

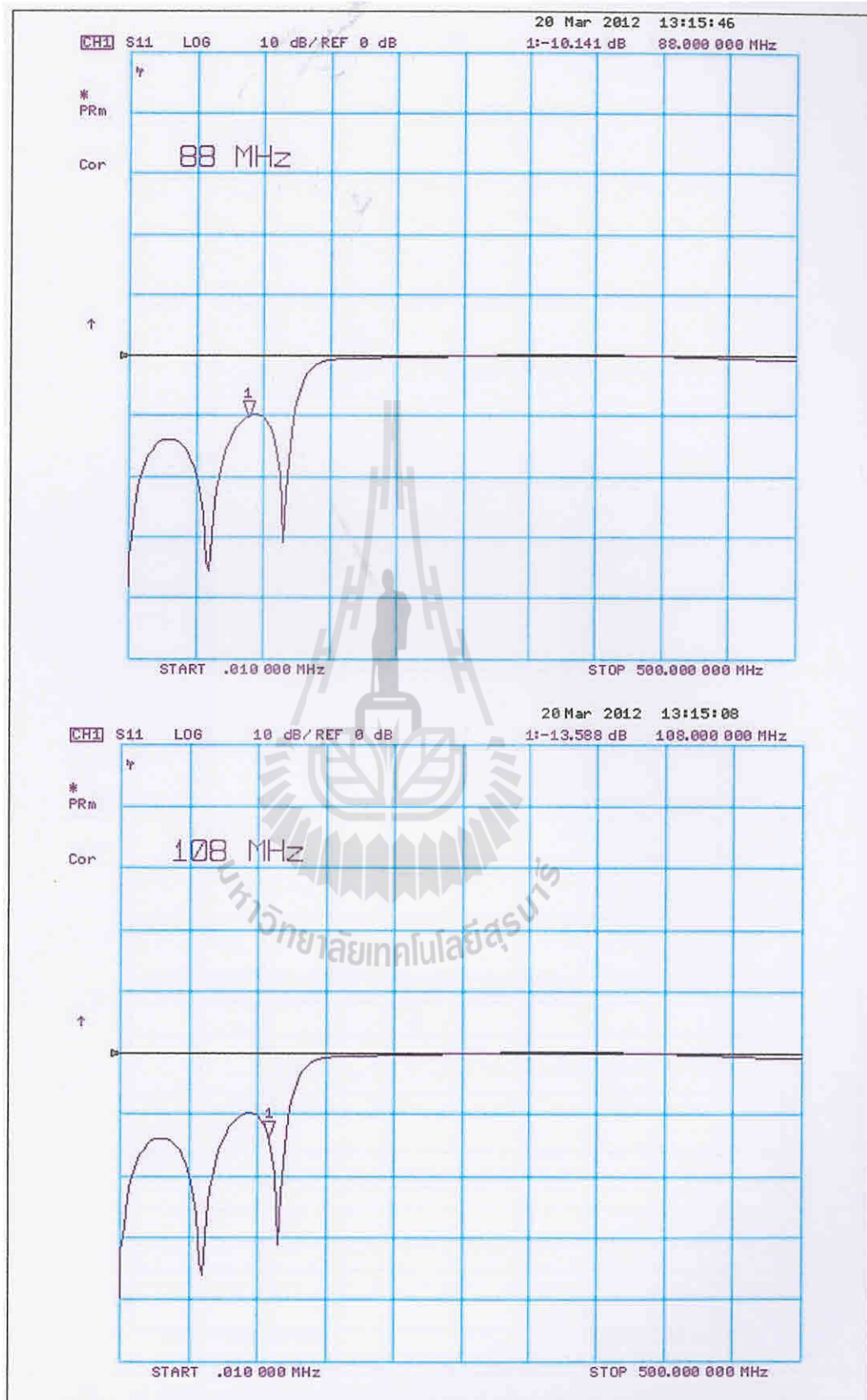
รูปที่ 4.15 แสดงสัญญาณฮาร์โมนิกที่สองของความถี่วิทยุย่านความถี่ 88 มีค่าการลดทอนประมาณ 30 dB ที่ความถี่ 108 MHz มีค่าการลดทอนประมาณ 50 dB และรูปที่ 4.16 แสดงสัญญาณฮาร์โมนิกที่สามของความถี่วิทยุย่านความถี่ 88 - 108 MHz มีค่าการสูญเสียประมาณ 70 dB



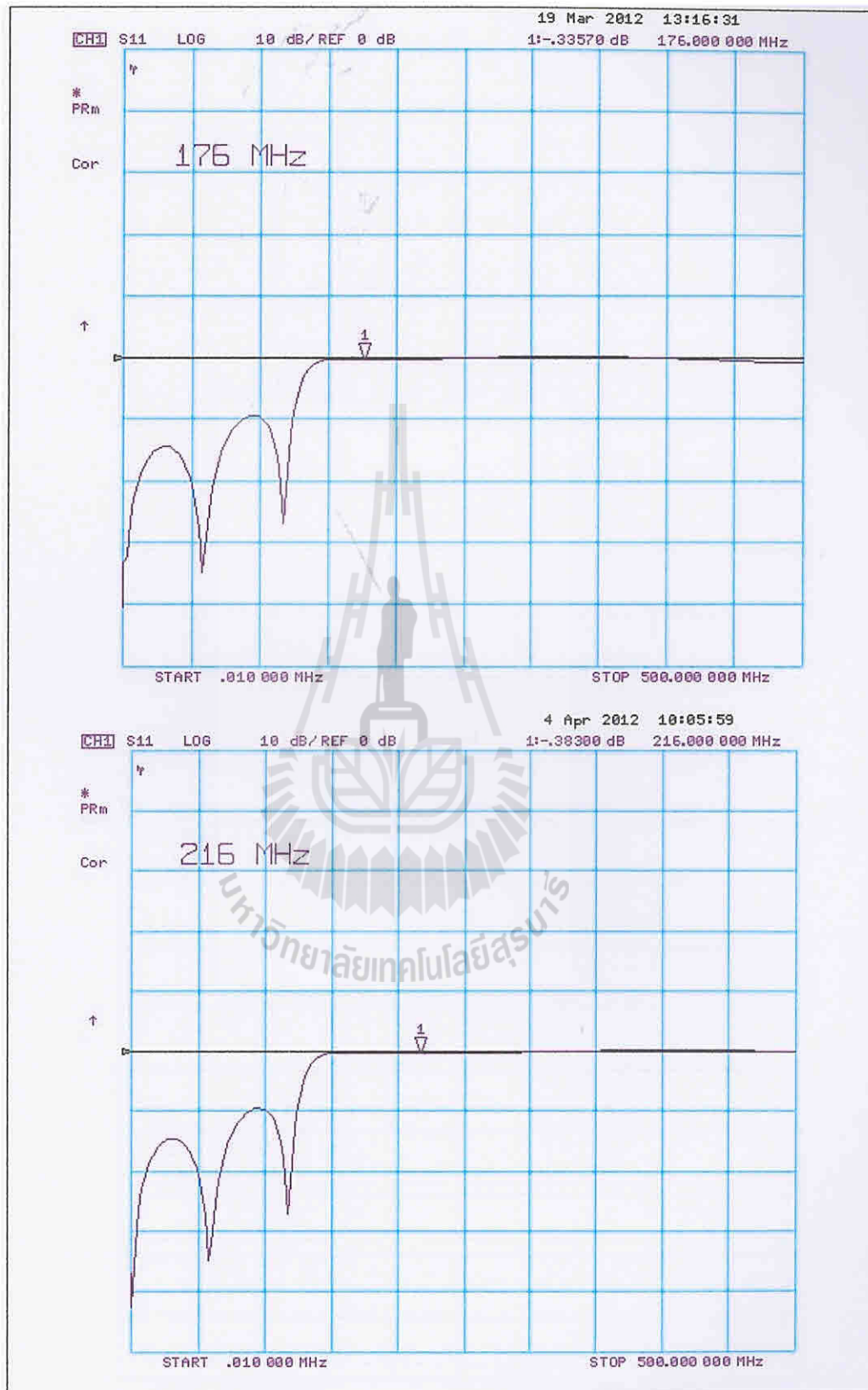
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21ของฮาร์โมนิกที่สองย่านความถี่วิทยุ



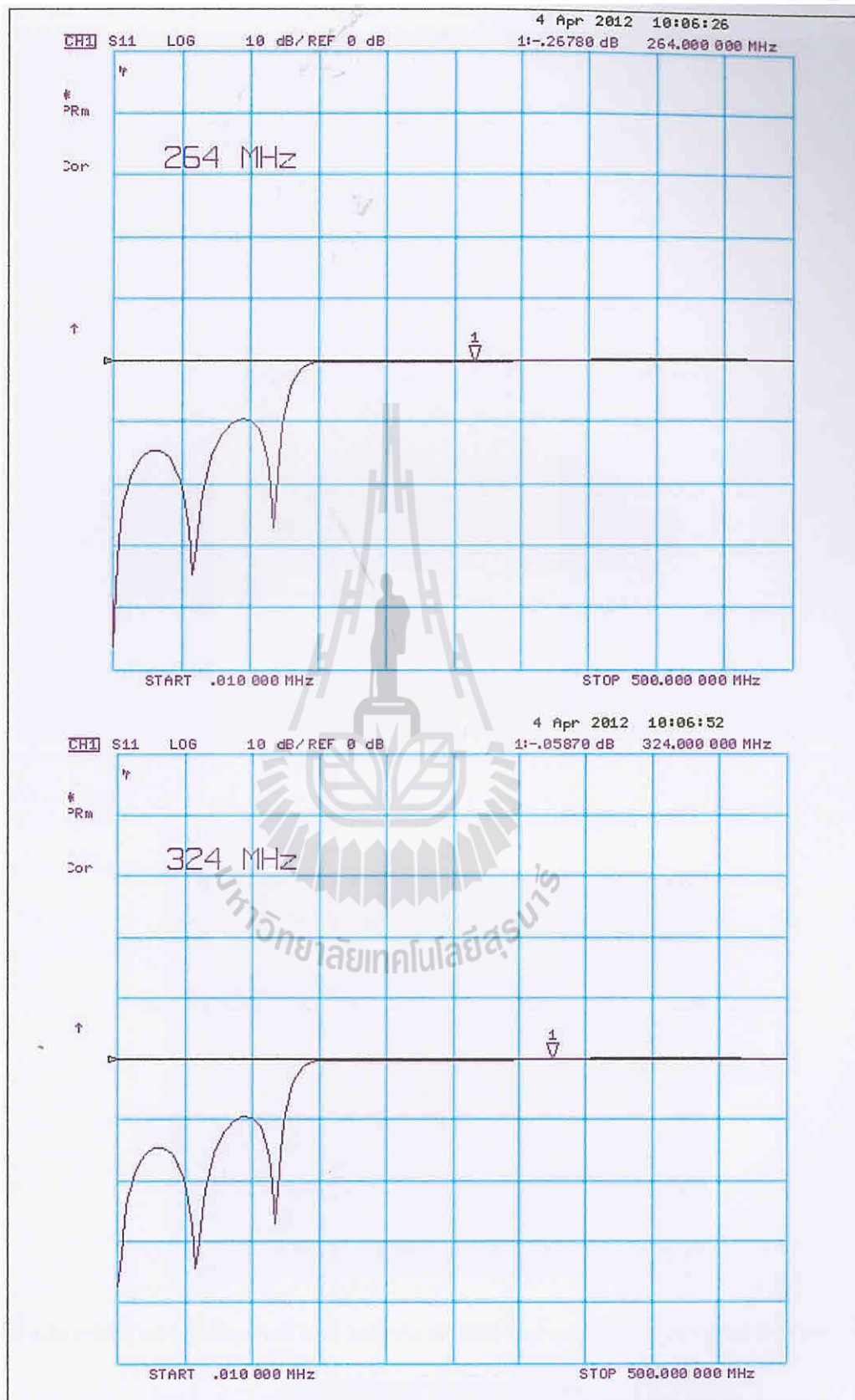
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21 ของฮาร์โมนิกที่สามย่านความถี่วิทยุ



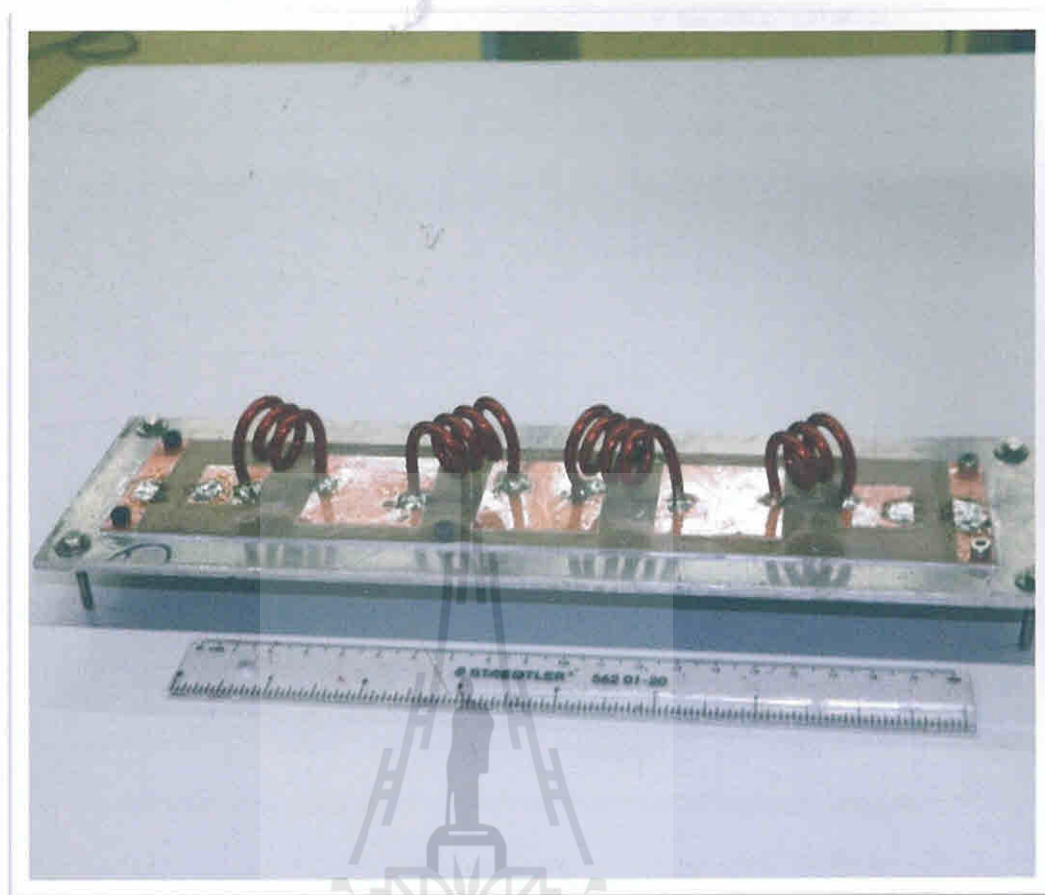
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S11 ของย่านความถี่วิทยุ



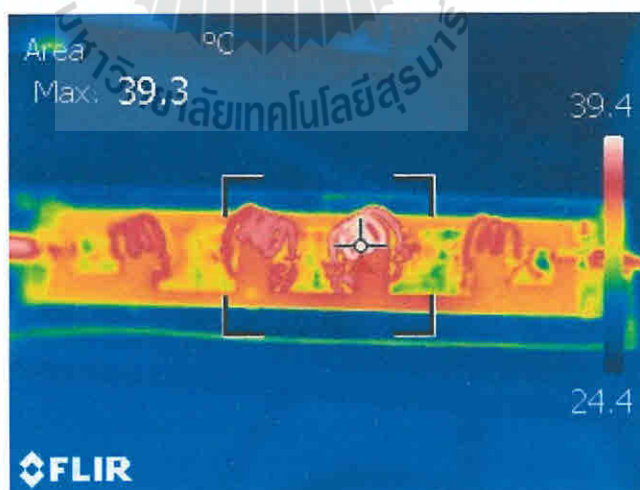
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S_{11} ของฮาร์มอนิกที่สองของย่านความถี่วิทยุ



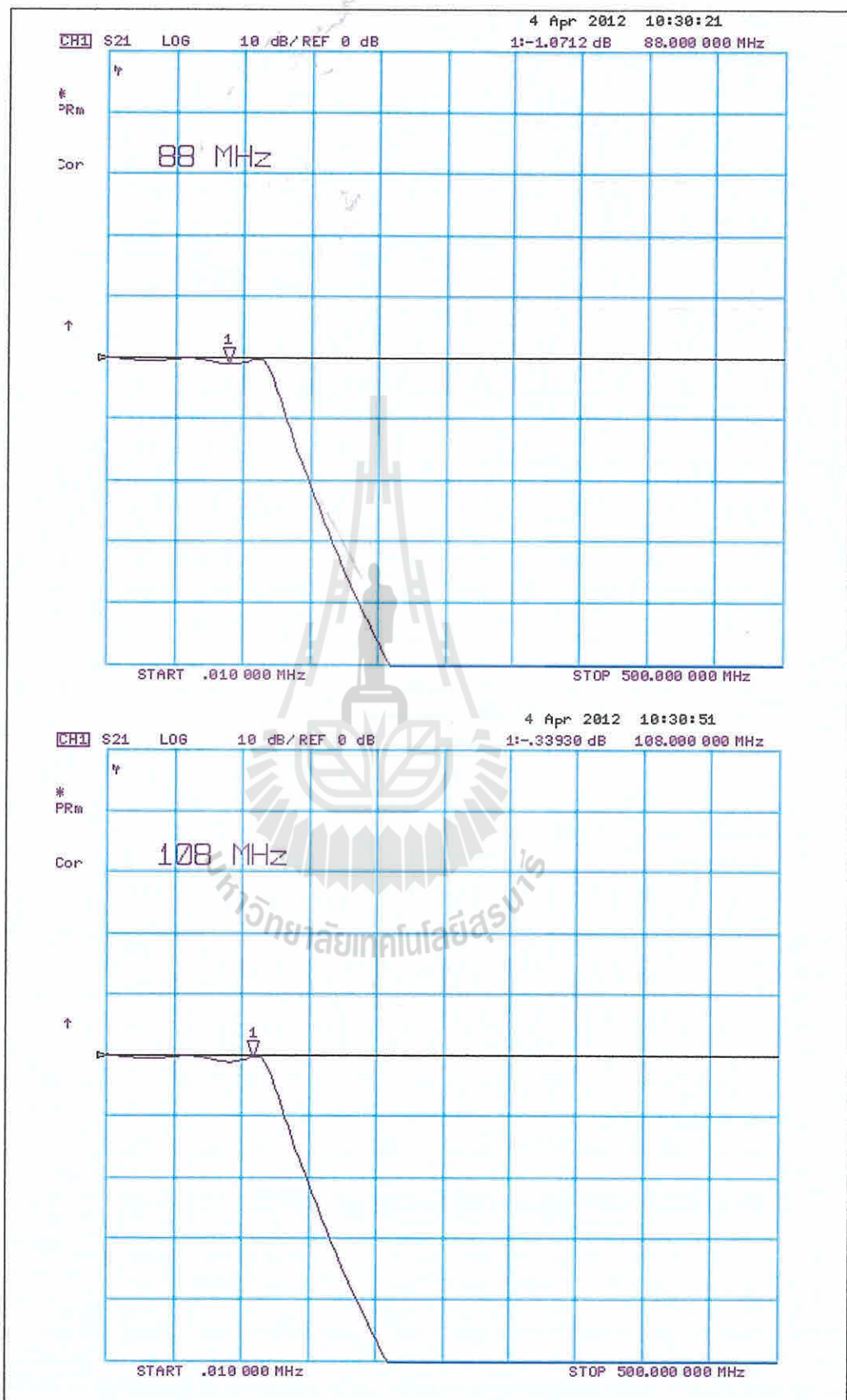
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S11ของฮาร์โมนิกที่สามของย่านความถี่วิทยุ



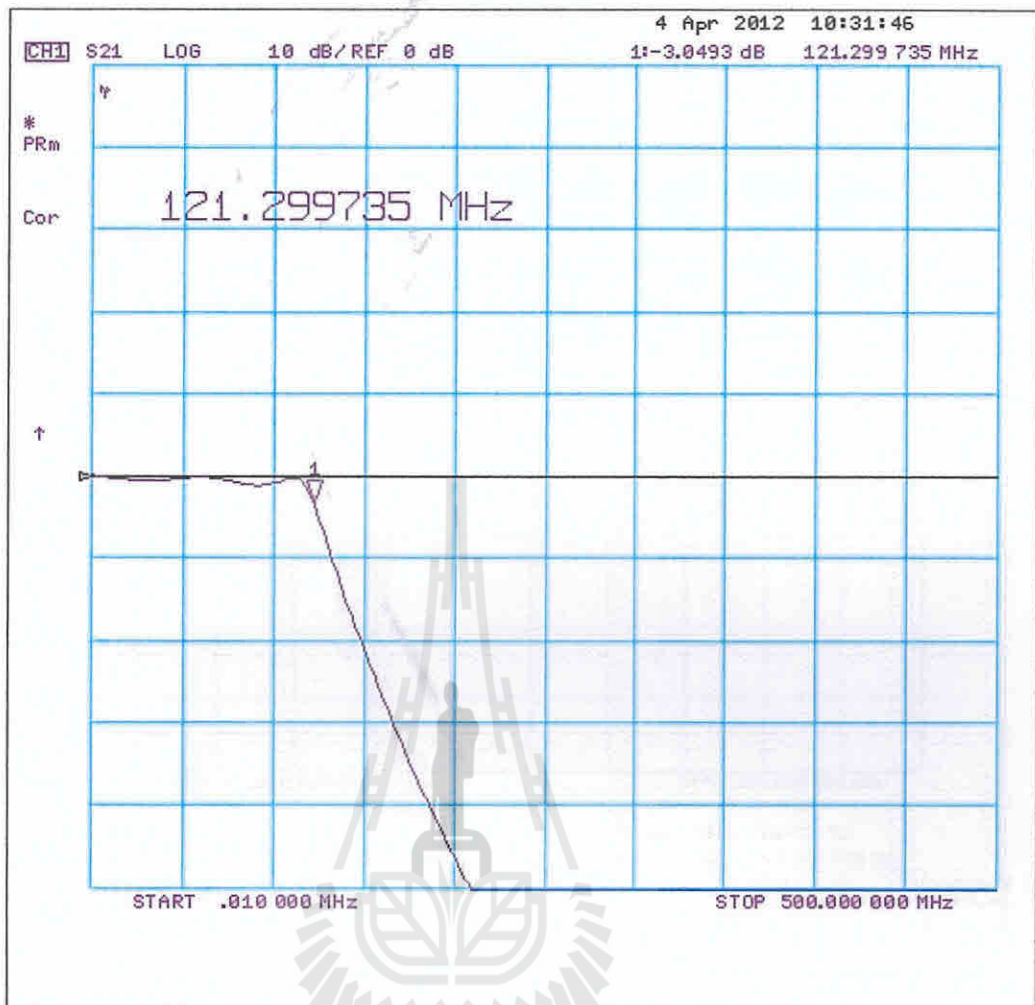
รูปที่ 4.20 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ขนาด 2000 วัตต์



รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายจากกล้องอินฟราเรด วงจรขนาด 2000 วัตต์ แสดงอุณหภูมิที่ 39.3 องศาเซลเซียส
ขณะทดสอบกำลังงาน 250 วัตต์



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21ของย่านความถี่วิทยุ



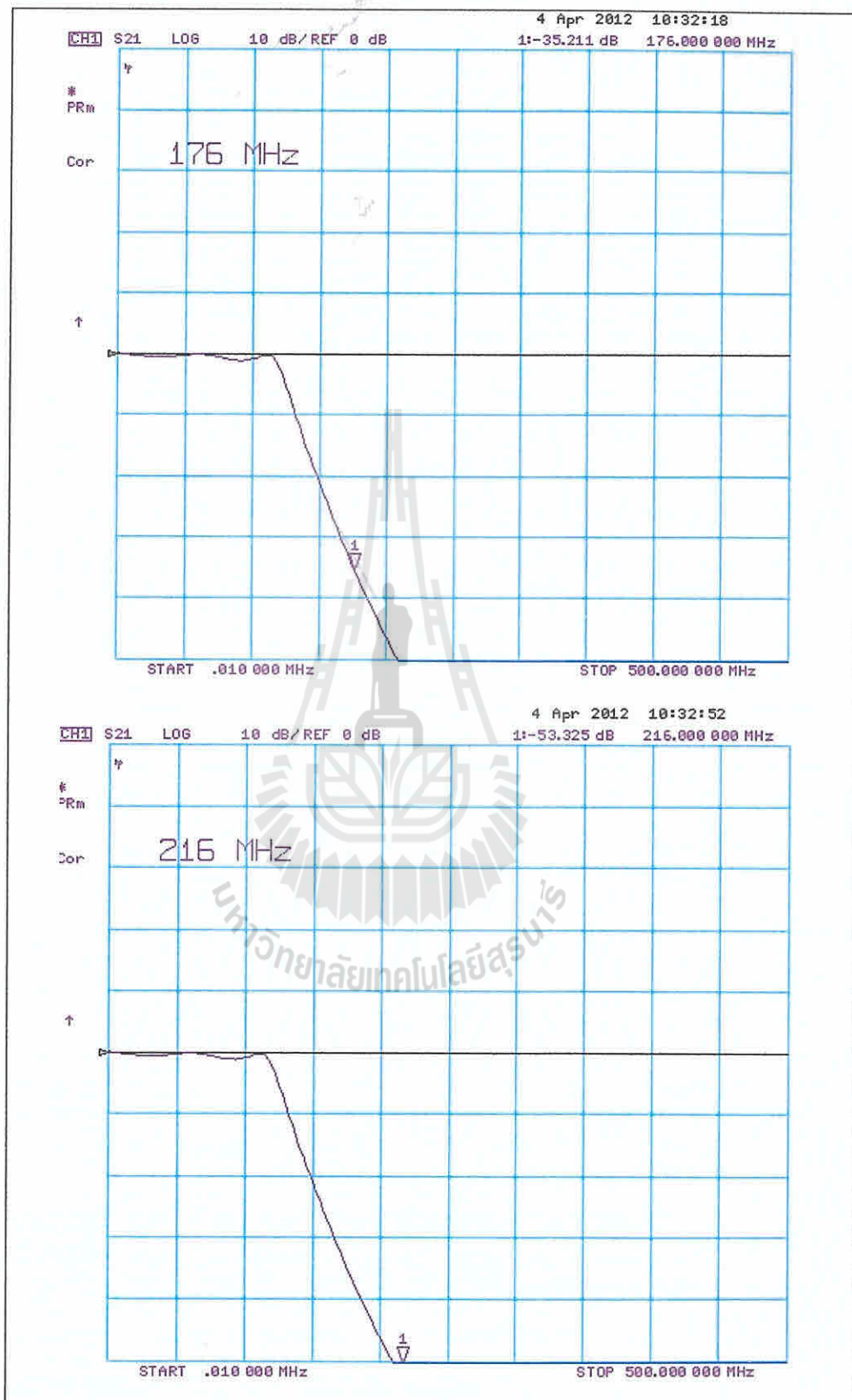
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21ของความถี่คัตออฟ

สำหรับ รูปที่ 4.22 คือแสดงสัญญาณของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน 3000 วัตต์ ย่านความถี่ 88 MHz มีค่าการสูญเสียประมาณ 1 dB และความถี่ 108 MHz มีค่าการสูญเสียประมาณ 0.3 dB

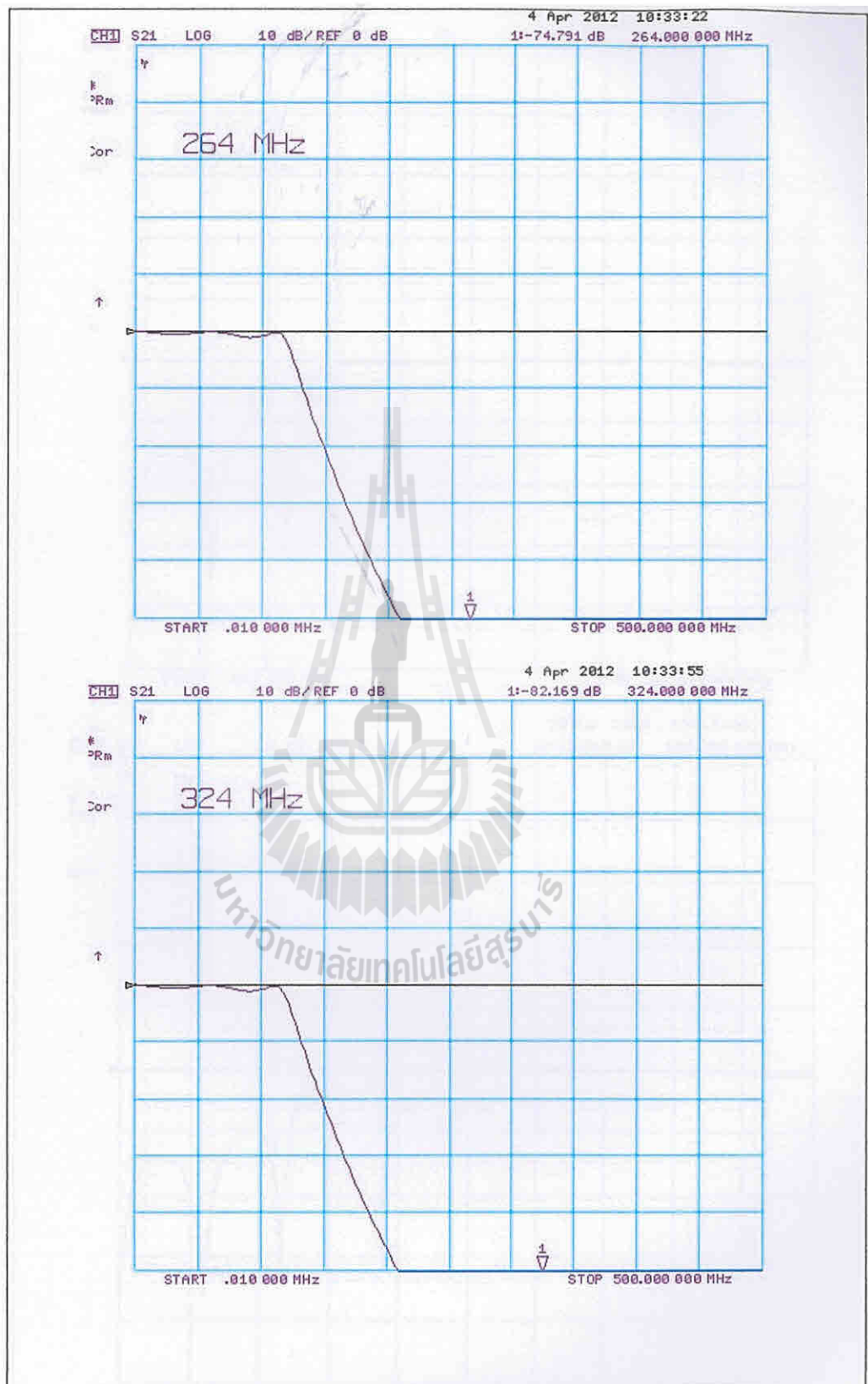
รูปที่ 4.23 คือกราฟแสดงสัญญาณที่ความถี่คัตออฟที่ประมาณ 121 MHz

รูปที่ 4.24 คือกราฟแสดงสัญญาณฮาร์โมนิกที่สองของ 88 MHz และ 108 MHz โดยฮาร์โมนิกที่สองของความถี่ 88MHz คือ 176 MHz , ฮาร์โมนิกที่สองของความถี่ 108MHz คือ 216 MHz ค่าการลดทอนอยู่ที่ 50 dB สำหรับ

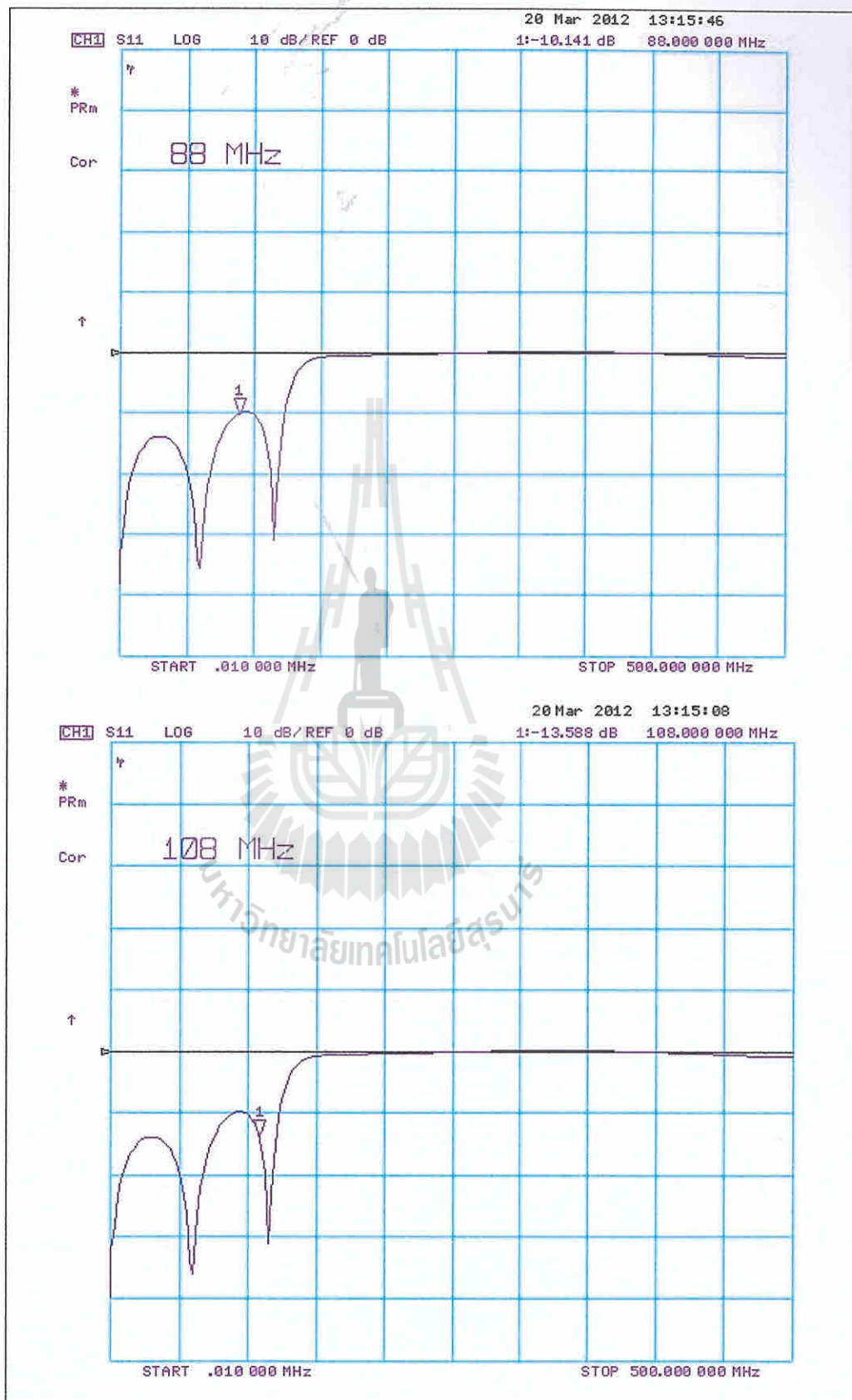
รูปที่ 4.25 คือกราฟแสดงสัญญาณฮาร์โมนิกที่สามของ 88 MHz และ 108 MHz โดยฮาร์โมนิกที่สามของความถี่ 88MHz คือ 264 MHz , ฮาร์โมนิกที่สามของความถี่ 108MHz คือ 324 MHz ค่าการลดทอนอยู่ที่ 80 dB



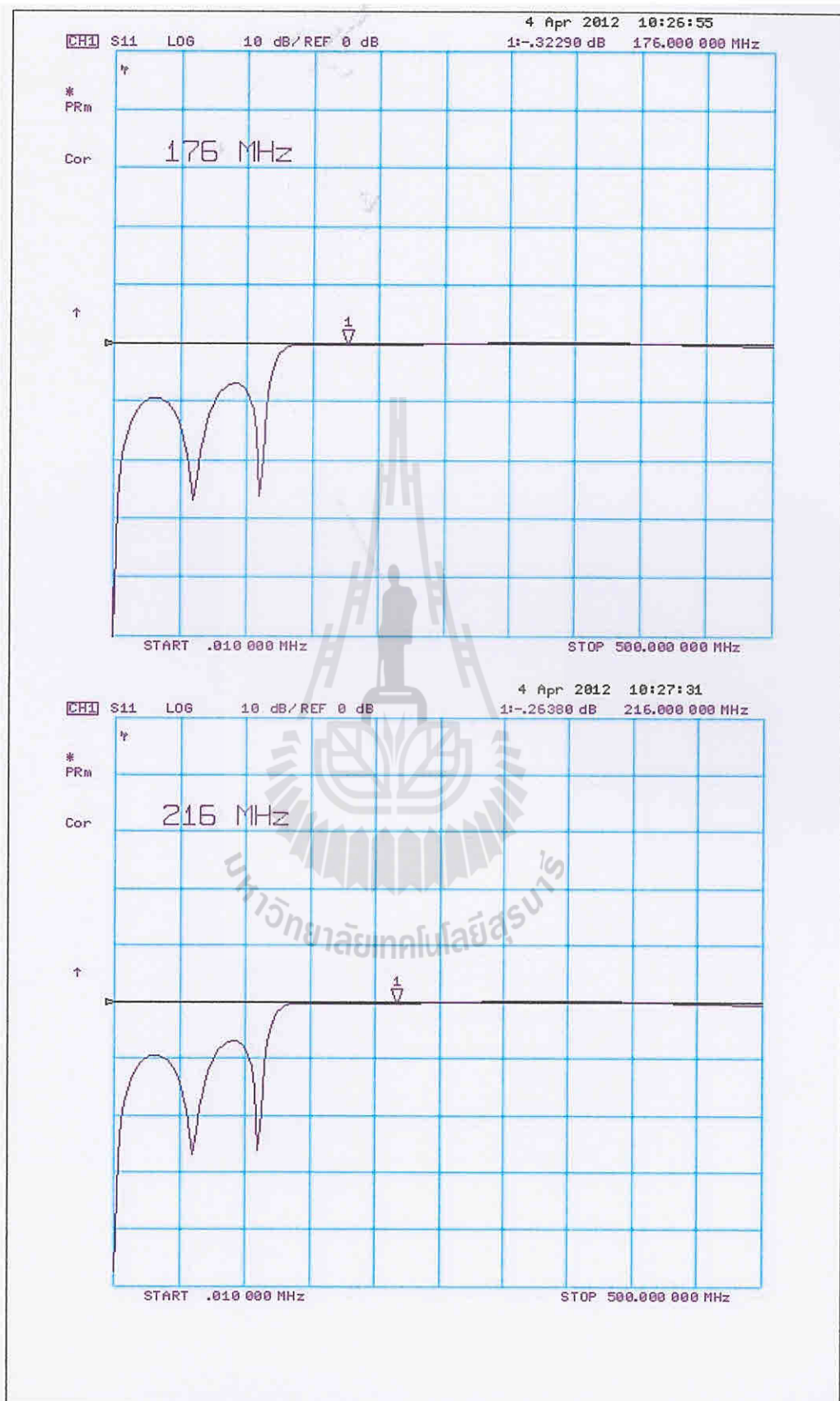
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21 ของฮาร์มอนิกที่สองย่านความถี่วิทยุ



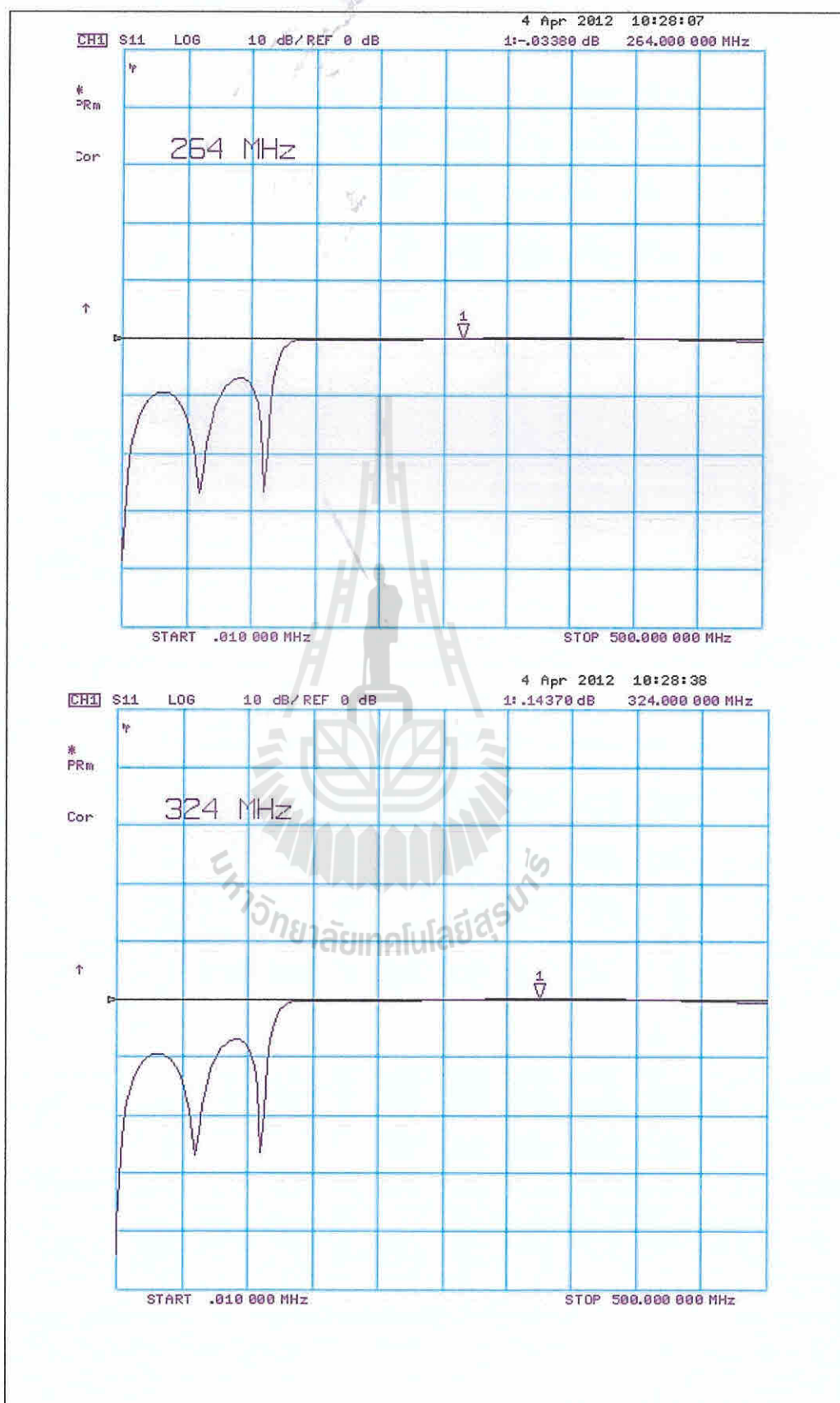
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S21ของฮาร์โมนิกที่สามของความถี่วิทยุ



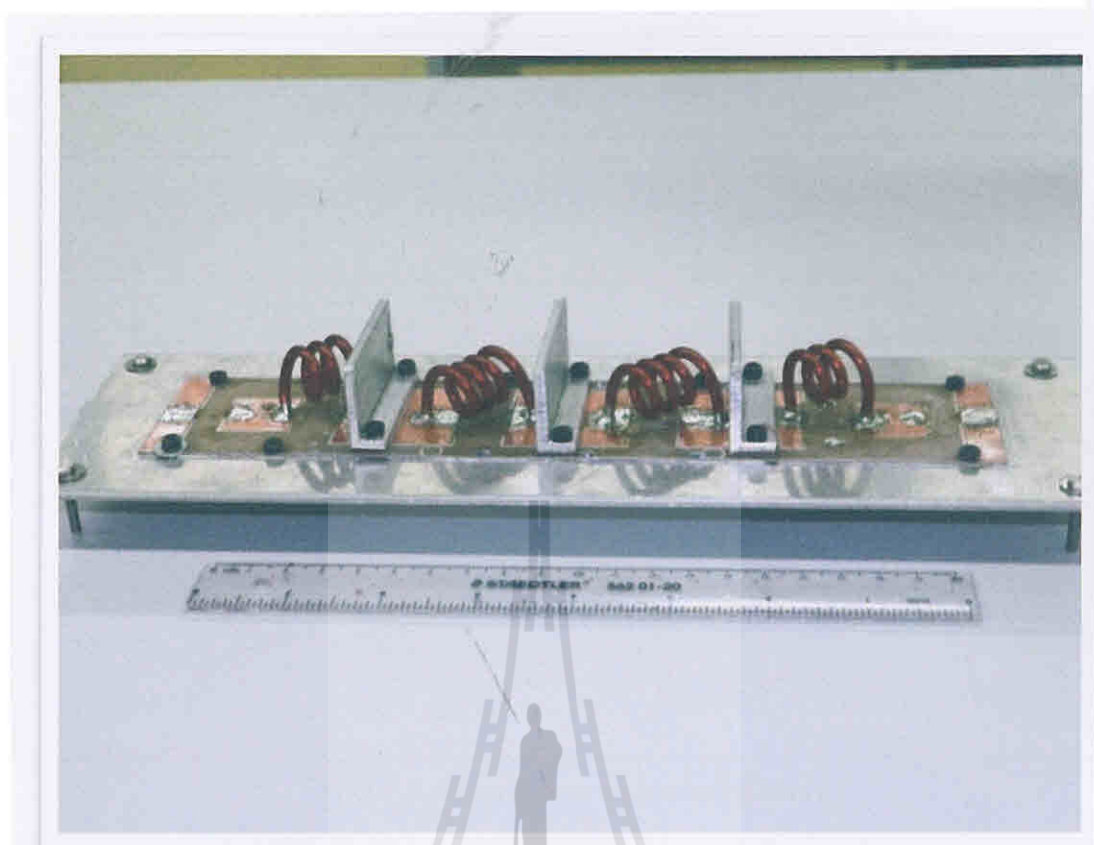
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S11ของย่านความถี่วิทยุ



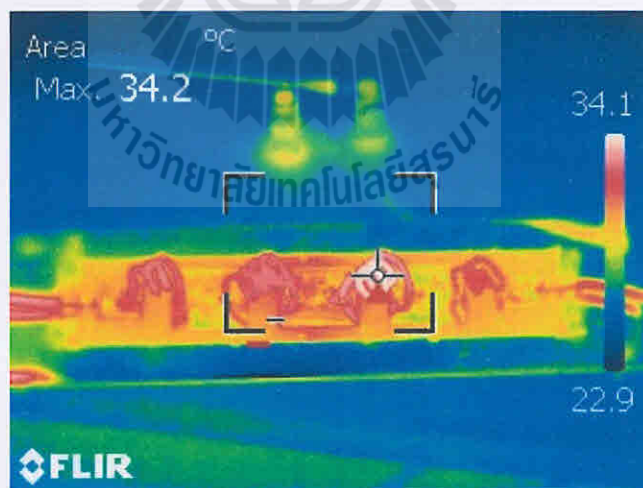
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S11 ของฮาร์มอนิกที่สองของย่านความถี่วิทยุ



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ S11 ของฮาร์โมนิกที่สามของย่านความถี่วิทยุ

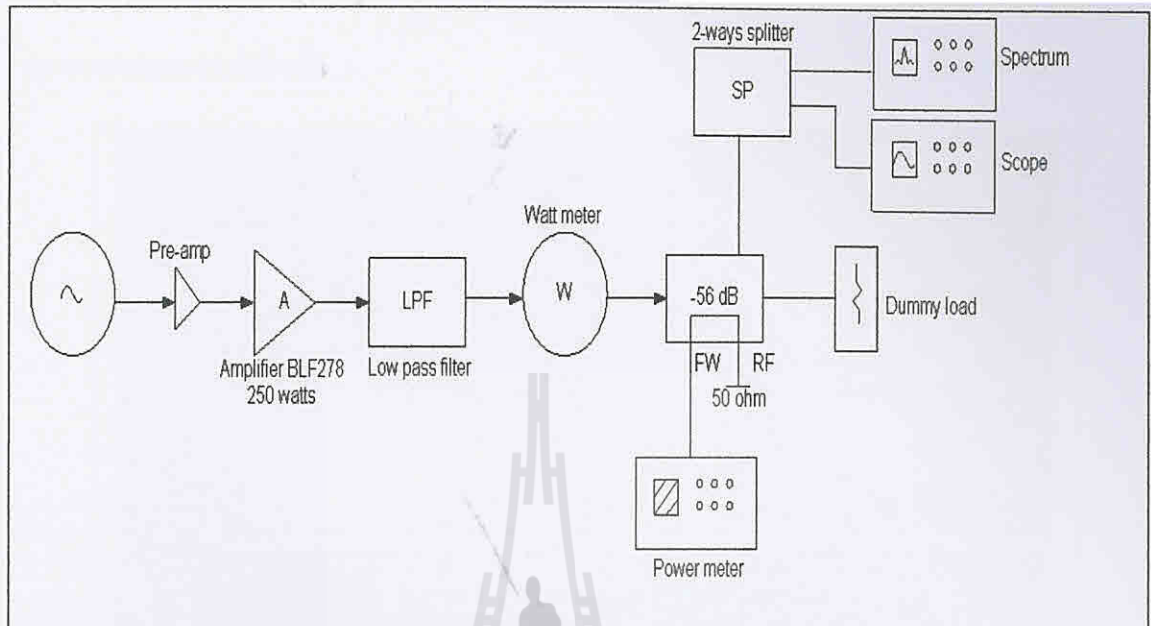


รูปที่ 4.29 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ขนาด 3000 วัตต์



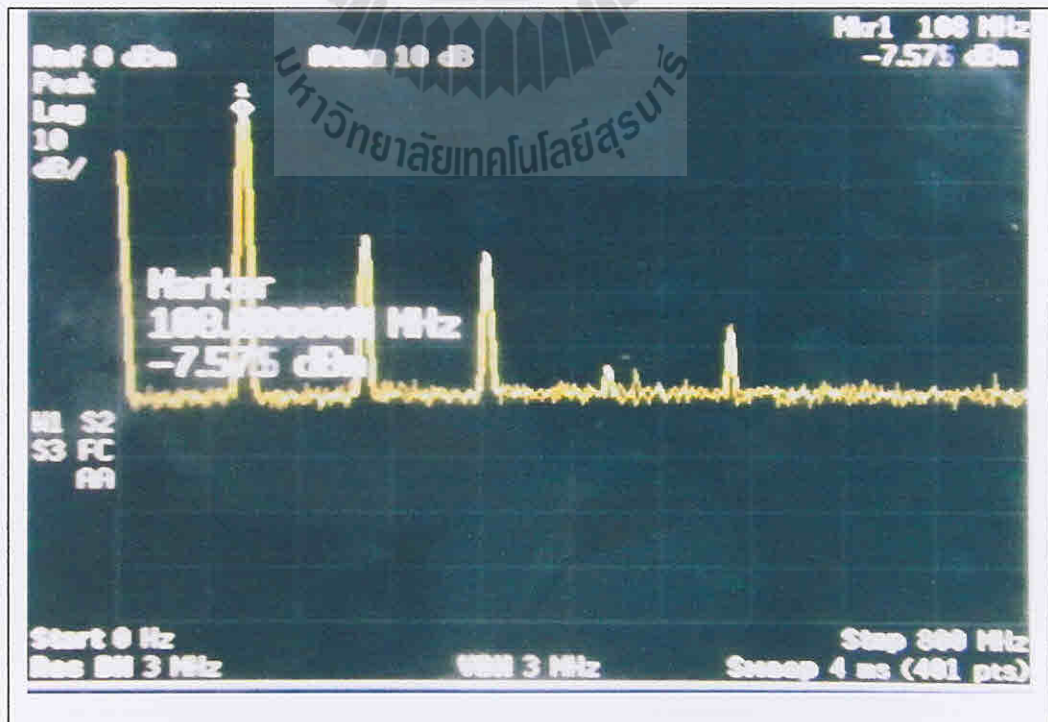
รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายจากกล้องอินฟราเรด วงจรขนาด 3000 วัตต์ แสดงอุณหภูมิที่ 34.2 องศาเซลเซียส ขณะทดสอบกำลังงาน 250 วัตต์

4.3 การวัดผลการทดลองกำลังงานสูง



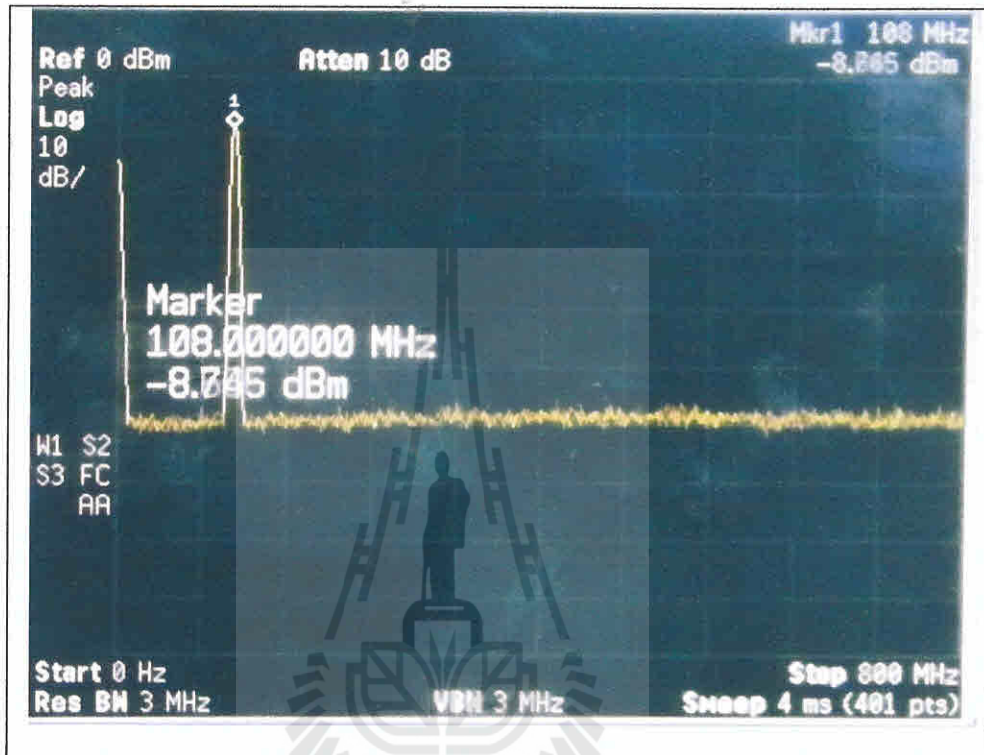
รูปที่ 4.31 บล็อกไดอะแกรมการวัดกำลังงานสูง

จากการทดลองวัดค่ากำลังงาน ก่อนใส่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน จากรูปที่ 4.32 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 108 MHz เกิดฮาร์มอนิกที่ 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ

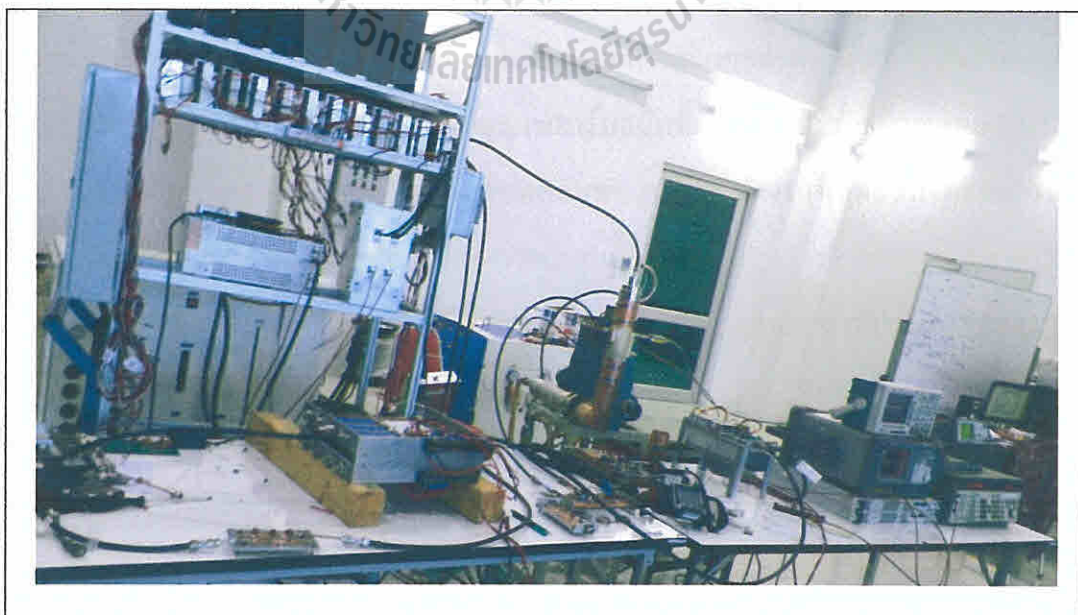


รูปที่ 4.32 กราฟแสดงสัญญาณฮาร์มอนิก (ก่อนใส่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน)

โดยที่ รูปที่ 4.33 คือ กราฟแสดงสัญญาณหลังจากการใส่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดูสัญญาณที่ความถี่ 108 MHz จะเห็นได้ว่าสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นก่อนใส่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้ถูกลดทอนลงจนแทบไม่เหลือ



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงสัญญาณ(หลังใส่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน)



รูปที่ 4.34 ภาพการวัดกำลังงานสูง

บทที่ 5

สรุปผลโครงการและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลเนื้อหาของโครงการ

โครงการฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์ ออกแบบ และทดสอบการวัดผลของวงจรรอง ความถี่แบบต่ำผ่านที่ใช้กำลังงานสูง ในย่านความถี่วิทยุ การเริ่มโครงการจากการศึกษาเนื้อหาและความสำคัญของปัญหา ตั้งแต่วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ ขอบเขตของการทำโครงการ วิธีดำเนินการ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงการ จากนั้นศึกษาทฤษฎีของวงจรมีความถี่วิทยุสำหรับวงจรรองความถี่แบบต่ำผ่าน ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ศึกษาวงจรรองความถี่ที่ใช้กำลังงานสูง ออกแบบวงจร และสร้างวงจรมีความถี่วิทยุสำหรับวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน กำลังงานสูง โดยจากการศึกษาลักษณะวงจรประกอบด้วย วงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่ 1500 วัตต์ , 2000 วัตต์ และ 3000 วัตต์ ตามลำดับ เป็นวงจรที่สามารถรองรับฮาร์มอนิกที่ 2 , 3 , 4 , ... เท่า ของความถี่ในย่านวิทยุ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวนย่านความถี่อื่นๆ ที่นอกเหนือจากย่านที่เราต้องการ

จากการวัดผลวงจรรองความถี่ต่ำผ่านพบว่าก่อนการต่อวงจรรองความถี่ต่ำผ่านเข้าไปจะเกิดสัญญาณฮาร์มอนิกของความถี่ย่านวิทยุขึ้นเป็น 2 , 3 , 4 , ... เท่า ซึ่งสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะไปรบกวนคลื่นความถี่อื่นซึ่งมีผลไม่ดีต่อภาคส่วนต่างๆ อย่างแน่นอน ซึ่งหลังจากการต่อวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแล้วจะทำให้สัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนั้นมีสัญญาณลดลงจนหายไป ตามลำดับของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น จากการทดสอบพบว่ามีความถี่กำลังงานที่ทดสอบได้จากเครื่องโดยเฉลี่ย 250 วัตต์ เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ในการทดสอบที่มีกำลังงานสูงกว่านี้ จากวงจรรองความถี่ที่ออกแบบและสร้าง มีค่าการสูญเสียที่ความถี่วิทยุประมาณ 0.5 dB ซึ่งมีประสิทธิภาพรวมของวงจรประมาณ 89 . 125 %

สรุปผลที่ได้จากการทดสอบวงจรรองความถี่ต่ำผ่านย่านความถี่วิทยุที่ได้สร้างและออกแบบมีกำลังงานสูง ค่าการสูญเสียต่ำ และประสิทธิภาพที่สูงเมื่อนำไปทดสอบเพื่อลดสัญญาณฮาร์มอนิกที่ 2 , 3 , 4 เป็นต้น ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพที่สูงตามที่ได้ออกแบบและสร้างวงจร

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

การออกแบบวงจรกรองความถี่แบบต่ำผ่านสำหรับความถี่วิทยุ ที่มีกำลังงานสูงนั้นเพื่อลดทอนสัญญาณฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นจากเครื่องขยายสัญญาณ ซึ่งสัญญาณฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นนั้นจะสามารถไปรบกวนความถี่อื่น ๆ ที่ใช้งานอยู่ในภาคส่วนต่างๆ ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นมากที่จะต้องมีการเพิ่มวงจรกรองความถี่แบบต่ำผ่านเข้าไปในเครื่องส่งวิทยุเพื่อให้ได้สัญญาณที่ดี และลดทอนสัญญาณฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นด้วย ขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ในนั้นควรเป็นขดลวดเหนี่ยวนำที่มีเบอร์ขนาดใหญ่พอสมควร เพราะยิ่งขดลวดเบอร์ใหญ่ก็จะทำให้มีพื้นที่หน้าตัดมากขึ้น ค่าความต้านทานในเส้นลวดน้อยซึ่งกระแสสามารถไหลผ่านได้สะดวกมากขึ้นและสามารถทนความร้อนได้มากขึ้น ค่ากำลังงานจึงมีค่าสูงขึ้นตาม ในขณะที่เดียวกันนั้นเราก็จะต้องมีการระบายความร้อนที่ขดลวดเหนี่ยวนำด้วยการใช้พัดลมเพื่อระบายความร้อน ส่วนได้แผ่นวงจรควรใช้แผ่นอลูมิเนียมและซิงค์เพื่อช่วยระบายความร้อนอีกทางหนึ่ง เพื่อที่จะได้กำลังงานที่ดีที่สุดและเหมาะสมกับการนำไปใช้งานต่อไป

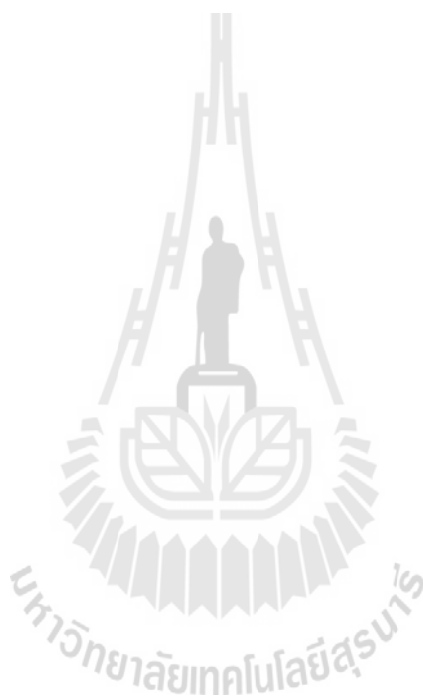
บรรณานุกรม

Chris Bowick . **RF circuit Design** . chapter 1 – 3 , H.W. Sams , Inc , 1982.

http://www.powerstream.com/Wire_Size.htm

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/pplate.html>

http://www.wa4dsy.net/filter/hp_lp_filter.html



ประวัติผู้เขียน



นายปรเมษฐ์ นามวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 7 ธันวาคม พ.ศ. 2532 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนนารีนุกูล อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี เมื่อปี พ.ศ. 2550 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



นางสาวพรทิวา วิระสร เกิดเมื่อวันที่ 21 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2532 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลโพธิ์กลาง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนสุรนารีวิทยา2 อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2550 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



นางสาวสุธรรดา ธนัชเกิดผล เกิดเมื่อวันที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2533 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลเมืองคง อำเภอคง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนมารีย์วิทยา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2550 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี