# บทที่ 4
# ผลการศึกษา

ในบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงผลการจำลองและการวิเคราะห์สมรรถนะหรือคุณสมบัติในการทำงานของเรโซเนเตอร์หยุดแถบบนแผ่นวงจรพิมพ์โครงสร้างใหม่ที่มีขนาดความยาวและความกว้างค่าต่างๆ โดยในที่นี้ ขนาดและความยาวที่เหมาะสมที่สุดที่ให้คุณสมบัติในการทำงานที่ดีที่สุดจะถูกนำไปสร้างเรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่เพียงวงจรเดียวเท่านั้นและถูกวัดค่าคุณสมบัติการทำงานจริง (Measurement Results) ได้แก่ ค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return Loss หรือ $S_{11}$) และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion Loss หรือ $S_{21}$) เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้รับกับผลการทดสอบที่ได้จากการเขียนโปรแกรมจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบในทางทฤษฎี (Simulation Results)

หลักการที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบวงจรไมโครเวฟชนิดต่างๆ ขึ้นมาใช้งานนั้น ผู้วิจัยหรือผู้ที่ออกแบบจะต้องกำหนดค่าความถี่ที่ใช้งาน ค่าเป้าหมายหรือเกณฑ์ที่ใช้ในการบ่งชี้ถึงสมรรถนะการทำงานของวงจรนั้นๆ ขึ้นมาเสียก่อน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะกำหนดค่าเป้าหมายต่างๆ ที่ต้องการจะได้รับจากเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีโครงสร้างใหม่และต้องการออกแบบเพื่อสร้าง ดังนี้

(1) รองรับการใช้งาน 2 ย่านความถี่ ได้แก่ ย่านความถี่ต่ำ 800 – 900 MHz และย่านความถี่สูง 2.3 - 2.7 GHz (กำหนดแบนด์วิดธ์ -3 dB ไว้ที่แถบหยุด 1.1 GHz – 2.2 GHz)

(2) ค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return Loss หรือ $S_{11}$) มีค่าต่ำกว่า -20 dB (ค่าลบยิ่งมาก จะทำงานได้ดีกว่า กล่าวคือ สัญญาณที่ส่งไปแทบจะสะท้อนกลับมาทางด้านอินพุตน้อยมากขึ้นเท่านั้น)

(3) ค่าสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion Loss หรือ $S_{21}$) มีค่าไม่เกิน -1.5 dB (ค่าลบยิ่งน้อย จะทำงานได้ดีกว่า กล่าวคือ สัญญาณที่ส่งไปจะส่งผ่านจากอินพุตไปยังเอาต์พุตได้มากขึ้นเท่านั้น)

ในหัวข้อที่ 4.1 จะกล่าวถึงผลการจำลองและการวิเคราะห์เรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่ที่มีขนาดความยาวและความกว้างค่าต่างๆ หัวข้อที่ 4.2 จะกล่าวถึง ขนาดความกว้างและความยาว ผลการทดสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติในการทำงานของ เรโซเนเตอร์หยุดแถบ

โครงสร้างใหม่ที่นำเสนอ ซึ่งจะให้คุณสมบัติในการทำงานที่ดีที่สุดและให้สมรรถนะในการทำงานค่าต่างๆ เป็นไปตามค่าความถี่ใช้งานและค่าเป้าหมายที่ใช้งานที่กำหนด รายละเอียดของแต่ละหัวข้อมีดังนี้

**4.1 ผลการจำลองและวิเคราะห์เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความกว้างและความยาวค่าต่างๆ**

จากการที่หัวข้อที่ 3.2 ได้อธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างและหลักการออกแบบเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีโครงสร้างแบบใหม่ที่นำเสนอไปแล้ว ดังนั้น ในหัวข้อที่ 4.1 นี้ เราจะนำหลักการดังกล่าวมาใช้และจำลองชิ้นงานขึ้นมาโดยอาศัยโปรแกรมที่เขียนขึ้นมาเพื่อจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบในทางทฤษฎี

ในการจำลองชิ้นงานด้วยโปรแกรมเพื่อจำลองและวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

**<u>กลุ่มที่ 1</u>** กำหนดให้ TL2 (J-Inverter) มีค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 25 mm, 24 mm, และ 23 mm โดยในแต่ค่าความยาวที่กำหนดนั้น จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของ TL2 (J-Inverter) จำนวน 4 ค่า ได้แก่ 3.0 mm, 2.7 mm, 2.3 mm, และ 1.9 mm

**<u>กลุ่มที่ 2</u>** กำหนดให้ TL4 และ TL7 (สายนำสัญญาณยาว $\lambda_g/4$ แบบวงจรเปิด หรือ Open-Line Quarter Transmission Lines) มีค่าความกว้างที่เปลี่ยนแปลงจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 2.44 mm, 2.64 mm, และ 2.84 mm โดยในแต่ค่าความกว้างที่กำหนดนั้น จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของ TL4 และ TL7 ที่ยาวรวมกันจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 24.6 mm, 25.6 mm, 26.3 mm, และ 26.6 mm ส่วนค่าความกว้างและความยาวของ TL2 (J-Inverter) ที่เลือกใช้จะมีค่าคงที่ โดยถูกหาได้จากค่าความกว้างและความยาวที่เหมาะสมที่สุดและให้สมรรถนะการทำงานที่ดีที่สุดค่าเดียวที่ได้รับจากการจำลองชิ้นงานกลุ่มที่ 1

**<u>หมายเหตุ</u>** ค่าความกว้างและความยาวของ TL4 และ TL7 ที่ใช้งานมีค่าเท่ากับ TL3 และ TL6 ตามลำดับ เนื่องจากเป็นสายนำสัญญาณยาว $\lambda_g/4$ แบบวงจรเปิดที่เหมือนกันดังที่กล่าวไว้ในทฤษฎีหัวข้อ 3.2

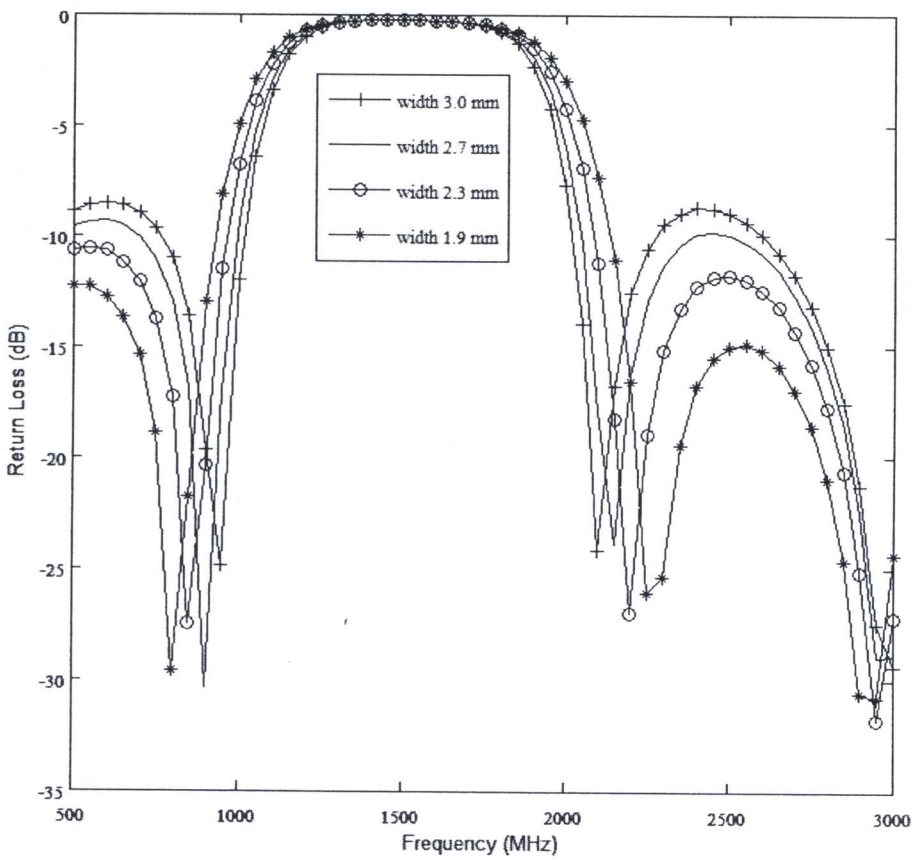
**4.1.1 ผลการจำลองและวิเคราะห์เรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่กลุ่มที่ 1**

การจำลองชิ้นงานในหัวข้อแรกนี้เป็นการจำลองและวิเคราะห์เรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่กลุ่มที่ 1 ดังที่กล่าวข้างต้น ซึ่งกำหนดให้ TL2 (J-Inverter) มีค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 25 mm, 24 mm, และ 23 mm โดยในแต่ค่าความยาวที่กำหนดนั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของ TL2 (J-Inverter) จำนวน 4 ค่า ได้แก่ 3.0 mm, 2.7 mm, 2.3

mm, และ 1.9 mm เพื่อที่จะทำการหาค่าความกว้างและความยาวของ TL2 (J-Inverter) ที่เหมาะสมที่สุดและให้สมรรถนะการทำงานที่ดีที่สุดค่าเดียวท่ามกลางการจำลองและการวิเคราะห์ชิ้นงานกลุ่มที่ 1 โดยแต่ละกรณีมีรายละเอียดดังนี้

**กรณีที่ 1** พิจารณาค่าความยาวของ TL2 มีค่าคงที่เท่ากับ 25 mm และค่าความกว้างของ TL2 มีค่าเปลี่ยนแปลงจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 3.0 mm, 2.7 mm, 2.3 mm, และ 1.9 mm จากการเขียนโปรแกรมจำลองชิ้นงานตามค่าความกว้างและความยาวที่กำหนดไว้ในกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 1 จะได้ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ ($S_{11}$) และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก ($S_{21}$) ดังแสดงในภาพที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ อีกทั้ง ตารางที่ 4.1 แสดงค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุดและแบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง โดยพิจารณาที่ค่า $S_{11}$ เท่ากับ -20 dB และตารางที่ 4.2 แสดงค่า $S_{21}$ ที่สูงที่สุดและต่ำที่สุด

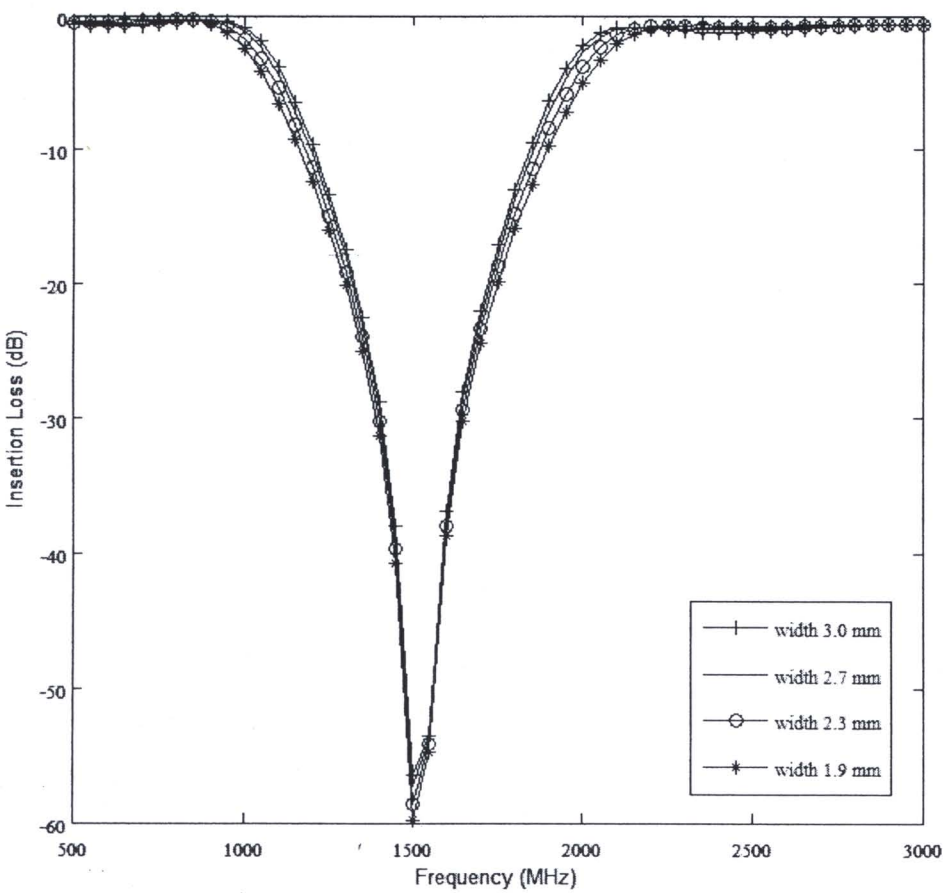
**<u>หมายเหตุ</u>** ในตารางผลการจำลองต่อไปนี้ จะใช้สัญลักษณ์ – ในแต่ละตาราง ถ้าหากความยาวและความกว้างของสายนำสัญญาณที่เป็นโครงสร้างของเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีค่านั้นๆ ไม่สามารถใช้งานรองรับย่านความถี่ต่ำ 800 – 900 MHz และย่านความถี่สูง 2.3 – 2.7 GHz ที่ออกแบบได้




ภาพที่ 4.1 ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 25 mm

ตารางที่ 4.1 ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 25 mm

| ความยาว TL2 (mm) | ความกว้าง TL2 (mm) | ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ช่วง 800 - 900 MHz (dB) | ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB) | แบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ช่วง 800 - 900 MHz (MHz) | แบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (MHz) |
|---|---|---|---|---|---|
| 25 | 3 | -18.5 | -12 | - | - |
| 25 | 2.7 | -30.5 | -11.5 | 37.5 | - |
| 25 | 2.3 | -27.5 | -15 | 75 | - |
| 25 | 1.9 | -29.5 | -25.5 | 62.5 | 37.5 |




ภาพที่ 4.2 ค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 25 mm

ตารางที่ 4.2 ค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 25 mm

| ความยาว TL2 (mm) | ความกว้าง TL2 (mm) | ค่า $S_{21}$ ที่มีค่าต่ำที่สุดที่ค่าความถี่ค่าหนึ่ง ณ ย่านความถี่หยุดแถบ | ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz (dB) | ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB) |
|---|---|---|---|---|
| 25 | 3 | -60 dB @ 1.5 GHz | -0.4 | -0.4 |
| 25 | 2.7 | -58.5 dB @ 1.5 GHz | -0.5 | -0.5 |
| 25 | 2.3 | -57.5 dB @ 1.5 GHz | -0.6 | -0.6 |
| 25 | 1.9 | -57 dB @ 1.5 GHz | -0.7 | -0.7 |

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 1 มีดังนี้

(1) ความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 2.7 mm ให้ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -30.5 dB แต่ให้ค่า $S_{11}$ มีค่ามากที่สุด ณ ย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -11.5 dB ซึ่งจากการทดสอบหาค่าแบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ใน 2 ย่านความถี่ที่กำหนด พบว่า ค่าแบนด์วิดธ์ในกรณีนี้สามารถรองรับการใช้งานเพียง 37.5 MHz จากย่านความถี่ต่ำออกแบบทั้งหมด 100 MHz ได้เท่านั้น ไม่สามารถรองรับการใช้งานในช่วงย่านความถี่สูงที่กำหนดได้

(2) ความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 1.9 mm ให้ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุดรองขึ้นมา ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -29.5 dB แต่ให้ค่า $S_{11}$ มีค่าต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -25.5 dB โดยที่นี้ พบว่า ค่าแบนด์วิดธ์ที่ได้รับสามารถรองรับการใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่ออกแบบได้ โดยมีค่าเท่ากับ 62.5 MHZ และ 37.5 MHz ตามลำดับ

(3) ส่วนค่าแบนด์วิดธ์ในกรณีที่ค่าความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 3 mm และความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 2.3 mm พบว่า ทั้ง 2 กรณีนี้ไม่สามารถรองรับการใช้งานในช่วงย่านความถี่สูงที่กำหนดได้ จึงไม่เหมาะสมที่ใช้ค่าความกว้างของ TL2 ทั้ง 2 ค่านี้ไปใช้ในการสร้างเรโซเนเตอร์ที่นำเสนอจริงในทางปฏิบัติ

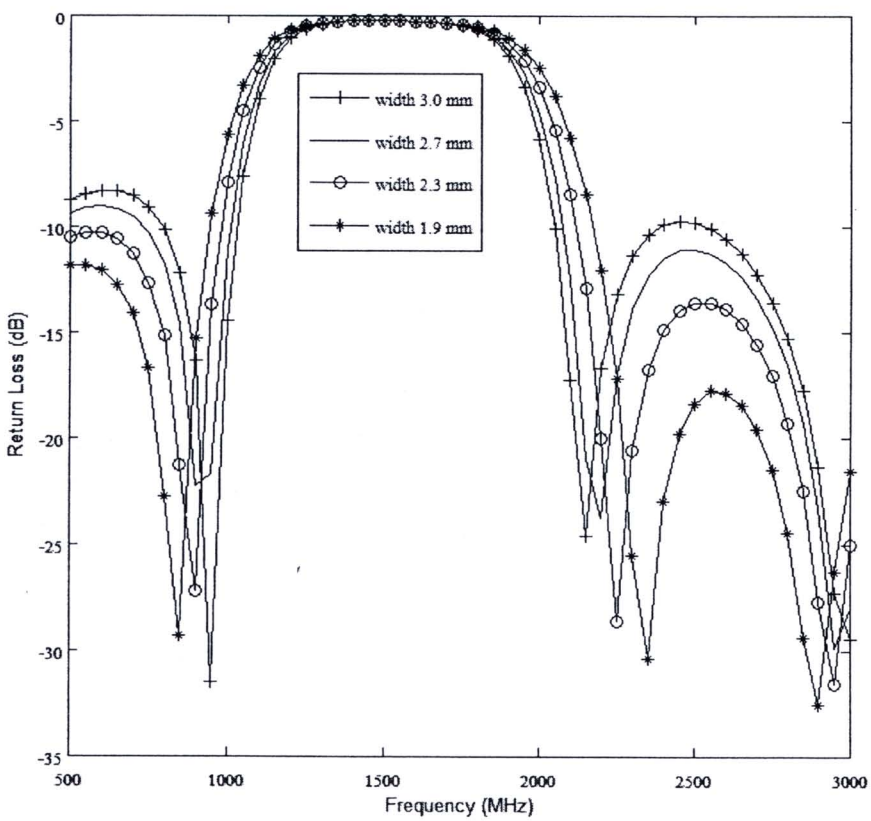
ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 1.9 mm ให้ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุดรองขึ้นมา ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -29.5 dB แต่ให้ค่า $S_{11}$ มีค่าต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -25.5 dB โดยในที่นี้ พบว่า ค่าแบนด์วิดธ์ที่ได้รับสามารถรองรับการใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่ออกแบบได้ โดยสามารถรองรับการใช้งานในช่วงดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 62.5 MHZ และ 37.5 MHz ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 1 มีดังนี้

(1) ค่าความกว้างของ TL2 ที่ทดสอบทั้ง 4 กรณีนี้ต่างก็ให้ค่า $S_{21}$ ที่ต่ำที่สุดใกล้เคียงกัน คือประมาณ 57 – 60 dB ที่ค่าความถี่ 1.5 GHz ณ ย่านความถี่หยุดแถบที่กำหนด ดังนั้น เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถทำงานได้ดีในย่านความถี่หยุดแถบที่ออกแบบ กล่าวคือ ย่านความถี่ที่ไม่ต้องการแทบจะสะท้อนกลับหมด ไม่สามารถส่งออกไปที่เอาต์พุตของวงจรนี้ได้เลย

(2) ค่าความกว้างของ TL2 ที่ทดสอบทั้ง 4 กรณีนี้ต่างก็ให้ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz และช่วง 2.3 – 2.7 GHz ที่ใกล้เคียงกัน คือมีค่าระหว่าง 0.4 – 0.7 dB ดังนั้น เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถทำงานได้ดีใน 2 ย่านความถี่ที่กำหนด

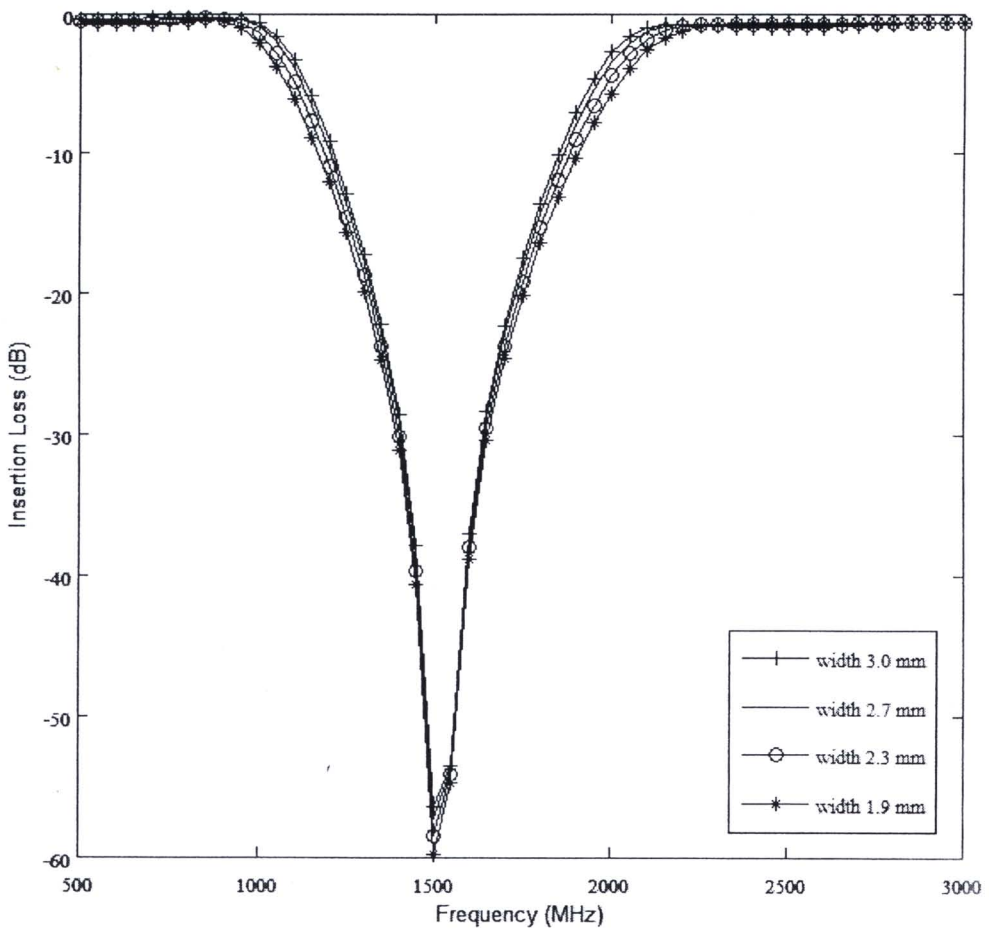
**กรณีที่** 2 พิจารณาค่าความยาวของ TL2 มีค่าคงที่เท่ากับ 24 mm และค่าความกว้างของ TL2 มีค่าเปลี่ยนแปลงจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 3.0 mm, 2.7 mm, 2.3 mm, และ 1.9 mm จากการเขียนโปรแกรมจำลองชิ้นงานตามค่าความกว้างและความยาวที่กำหนดไว้ในกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 จะได้ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ ($S_{11}$) และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก ($S_{21}$) ดังแสดงในภาพที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ อีกทั้ง ตารางที่ 4.3 แสดงค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุดและแบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง โดยพิจารณาที่ค่า $S_{11}$ เท่ากับ -20 dB และตารางที่ 4.4 แสดงค่า $S_{21}$ ที่สูงที่สุดและต่ำที่สุด




ภาพที่ 4.3 ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 24 mm

ตารางที่ 4.3 ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 24 mm

| ความยาว TL2 (mm) | ความกว้าง TL2 (mm) | ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ช่วง 800 - 900 MHz (dB) | ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB) | แบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ช่วง 800 - 900 MHz (MHz) | แบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (MHz) |
|---|---|---|---|---|---|
| 24 | 3 | -16.5 | -12 | - | - |
| 24 | 2.7 | -22 | -13.3 | 20 | - |
| 24 | 2.3 | -27 | -20 | 66 | - |
| 24 | 1.9 | -29.5 | -30.5 | 105.3 | 131.6 |




ภาพที่ 4.4 ค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 24 mm

ตารางที่ 4.4 ค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 24 mm

| ความยาว TL2 (mm) | ความกว้าง TL2 (mm) | ค่า $S_{21}$ ที่มีค่าต่ำที่สุดที่ค่าความถี่ค่าหนึ่ง ณ ย่านความถี่หยุดแถบ | ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz (dB) | ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB) |
|---|---|---|---|---|
| 24 | 3 | -57 dB @ 1.5 GHz | -0.4 | -0.4 |
| 24 | 2.7 | -57.5 dB @ 1.5 GHz | -0.5 | -0.5 |
| 24 | 2.3 | -58.5 dB @ 1.5 GHz | -0.6 | -0.6 |
| 24 | 1.9 | -60 dB @ 1.5 GHz | -0.7 | -0.7 |

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

(1) ความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 1.9 mm ให้ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -29.5 dB และก็ให้ค่า $S_{11}$ มีค่าต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่สูงเช่นกัน คือมีค่าเท่ากับ -30.5 dB โดยที่นี้ พบว่า ค่าแบนด์วิดธ์ที่ได้รับสามารถรองรับการใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่ออกแบบได้ โดยมีค่าเท่ากับ 105.3 MHZ และ 131.6 MHz ตามลำดับ

(2) ส่วนค่าแบนด์วิดธ์ในกรณีที่ค่าความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 3 mm, 2.7 mm และ 2.3 mm พบว่า ทั้ง 3 กรณีนี้ไม่สามารถรองรับการใช้งานในช่วงย่านความถี่สูงที่กำหนดได้ จึงไม่เหมาะสมที่ใช้ค่าความกว้างของ TL2 ทั้ง 3 ค่านี้ไปใช้ในการสร้างชิ้นงานที่นำเสนอในทางปฏิบัติ

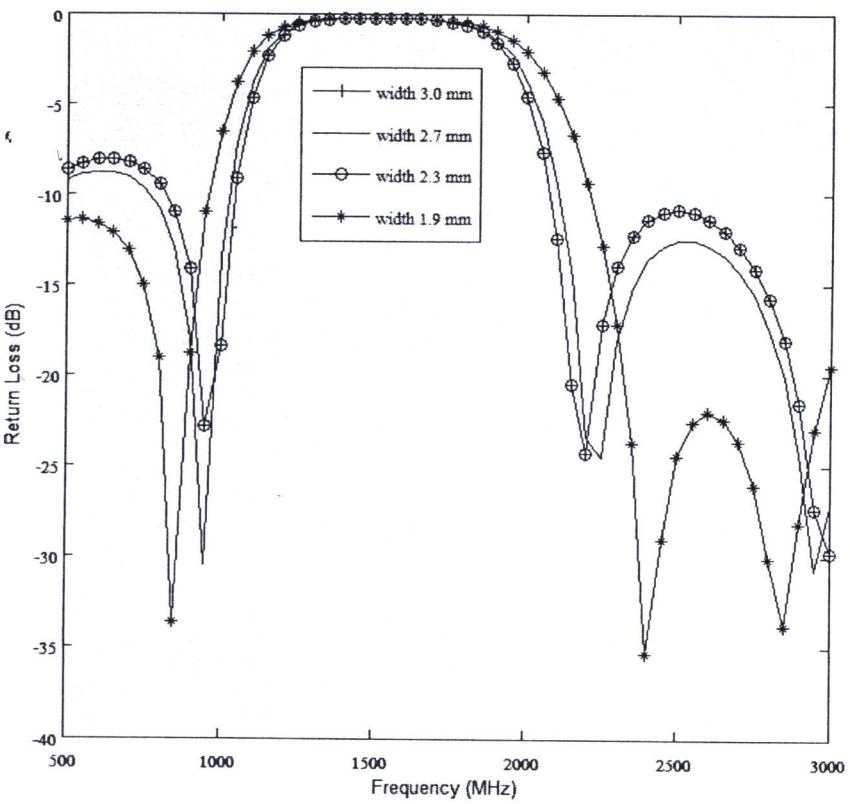
ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 1.9 mm ให้ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -29.5 dB และ -30.5 dB ตามลำดับ อีกทั้ง รองรับการใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง เท่ากับ 105.3 MHZ และ 131.6 MHz ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

(1) ค่าความกว้างของ TL2 ที่ทดสอบทั้ง 4 กรณีนี้ต่างก็ให้ค่า $S_{21}$ ที่ต่ำที่สุดใกล้เคียงกัน คือประมาณ 57 – 60 dB ที่ค่าความถี่ 1.5 GHz ณ ย่านความถี่หยุดแถบที่กำหนด ดังนั้น เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถทำงานได้ดีในย่านความถี่หยุดแถบที่ออกแบบ กล่าวคือ ย่านความถี่ที่ไม่ต้องการแทบจะสะท้อนกลับหมด ไม่สามารถส่งออกไปที่เอาต์พุตของวงจรนี้ได้เลย

(2) ค่าความกว้างของ TL2 ที่ทดสอบทั้ง 4 กรณีนี้ต่างก็ให้ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz และช่วง 2.3 – 2.7 GHz ที่ใกล้เคียงกัน คือมีค่าระหว่าง 0.4 – 0.7 dB ดังนั้น เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถทำงานได้ดีใน 2 ย่านความถี่ที่กำหนด

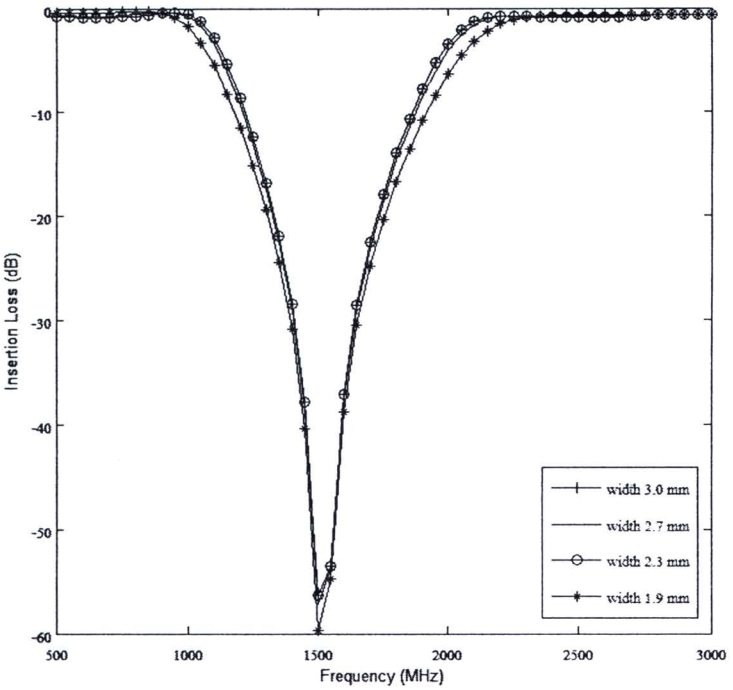
**กรณีที่ 3** พิจารณาค่าความยาวของ TL2 มีค่าคงที่เท่ากับ 23 mm และค่าความกว้างของ TL2 มีค่าเปลี่ยนแปลงจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 3.0 mm, 2.7 mm, 2.3 mm, และ 1.9 mm จากการเขียนโปรแกรมจำลองชิ้นงานตามค่าความกว้างและความยาวที่กำหนดไว้ในกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 จะได้ผลการจำลองค่า Return Loss และค่า Insertion Loss ดังแสดงในภาพที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ อีกทั้ง ตารางที่ 4.5 แสดงค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุดและแบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง โดยพิจารณาที่ค่า $S_{11}$ เท่ากับ -20 dB และตารางที่ 4.6 แสดงค่า $S_{21}$ ที่สูงที่สุดและต่ำที่สุด




ภาพที่ 4.5 ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 23 mm

ตารางที่ 4.5 ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 23 mm

| ความยาว TL2 (mm) | ความกว้าง TL2 (mm) | ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ช่วง 800 - 900 MHz (dB) | ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB) | แบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ช่วง 800 - 900 MHz (MHz) | แบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (MHz) |
|---|---|---|---|---|---|
| 23 | 3 | -14.2 | -14 | - | - |
| 23 | 2.7 | -18.5 | -18.5 | - | - |
| 23 | 2.3 | -14.2 | -14 | - | - |
| 23 | 1.9 | -33.5 | -35.5 | 87.5 | 375 |




ภาพที่ 4.6 ค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 23 mm

ตารางที่ 4.6 ค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีความยาว TL2 คงที่เท่ากับ 23 mm

| ความยาว TL2 (mm) | ความกว้าง TL2 (mm) | ค่า $S_{21}$ ที่มีค่าต่ำที่สุดที่ค่าความถี่ค่าหนึ่ง ณ ย่านความถี่หยุดแถบ | ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz (dB) | ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB) |
|---|---|---|---|---|
| 23 | 3 | -57 dB @ 1.5 GHz | -0.2 | -0.4 |
| 23 | 2.7 | -57 dB @ 1.5 GHz | -0.3 | -0.5 |
| 23 | 2.3 | -57 dB @ 1.5 GHz | -0.4 | -0.6 |
| 23 | 1.9 | -59.5 dB @ 1.5 GHz | -0.5 | -0.7 |

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

(1) ความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 1.9 mm ให้ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -33.5 dB และก็ให้ค่า $S_{11}$ มีค่าต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่สูงเช่นกัน คือมีค่าเท่ากับ -35.5 dB โดยที่นี้ พบว่า ค่าแบนด์วิดธ์ที่ได้รับสามารถรองรับการใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่ออกแบบได้ โดยมีค่าเท่ากับ 87.5 MHZ และ 375 MHz ตามลำดับ

(2) ส่วนค่าแบนด์วิดธ์ในกรณีที่ค่าความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 3 mm, 2.7 mm และ 2.3 mm พบว่า ทั้ง 3 กรณีนี้ไม่สามารถรองรับการใช้งานใน 2 ย่านความถี่ที่กำหนดได้ จึงไม่เหมาะสมที่ใช้ค่าความกว้างของ TL2 ทั้ง 3 ค่านี้ไปใช้ในการสร้างชิ้นงานที่นำเสนอในทางปฏิบัติ

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 1.9 mm ให้ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -33.5 dB และ -35.5 dB ตามลำดับ อีกทั้ง รองรับการใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง เท่ากับ 87.5 MHZ และ 375 MHz ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

(1) ค่าความกว้างของ TL2 ที่ทดสอบทั้ง 4 กรณีนี้ต่างก็ให้ค่า $S_{21}$ ที่ต่ำที่สุดใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 57 – 59.5 dB ที่ค่าความถี่ 1.5 GHz ณ ย่านความถี่หยุดแถบที่กำหนด ดังนั้น เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถทำงานได้ดีในย่านความถี่หยุดแถบที่ออกแบบ กล่าวคือ ย่านความถี่ที่ไม่ต้องการแทบจะสะท้อนกลับหมด ไม่สามารถส่งออกไปที่เอาต์พุตของวงจรนี้ได้เลย

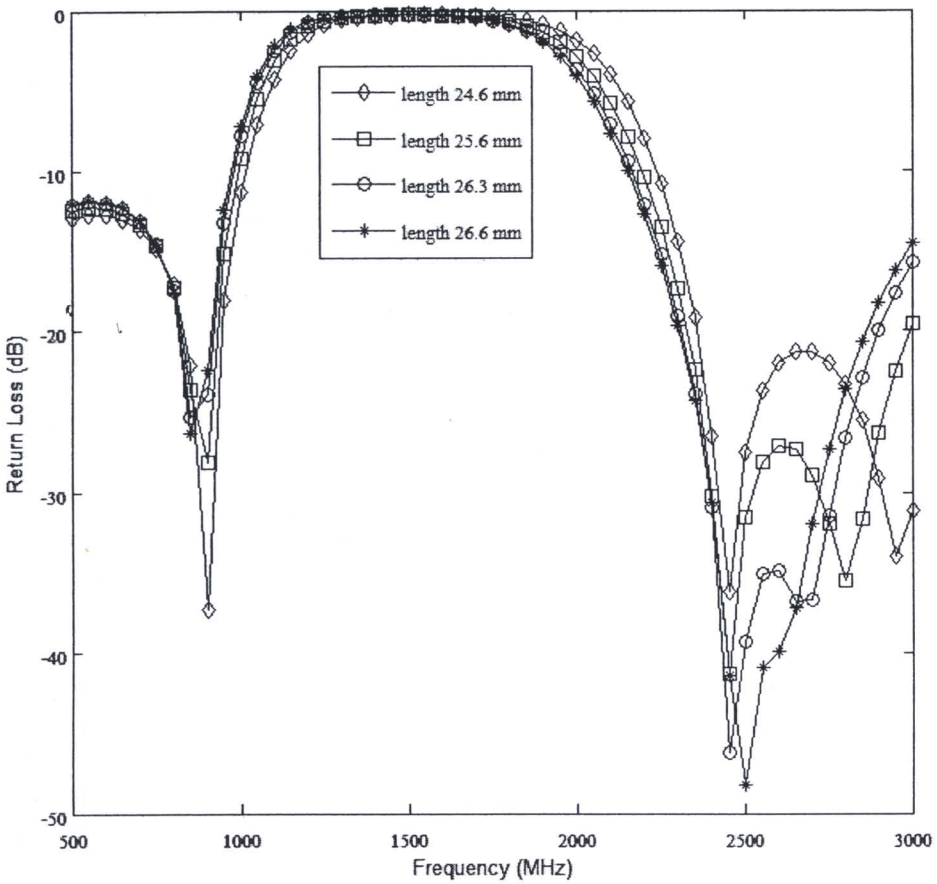
(2) ค่าความกว้างของ TL2 ที่ทดสอบทั้ง 4 กรณีนี้ต่างก็ให้ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz และช่วง 2.3 – 2.7 GHz ที่ใกล้เคียงกัน คือมีค่าระหว่าง 0.2 – 0.7 dB ดังนั้น เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถทำงานได้ดีใน 2 ย่านความถี่ที่กำหนด

### 4.1.2 ผลการจำลองและวิเคราะห์เรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่กลุ่มที่ 2

การจำลองชิ้นงานในหัวข้อที่ 2 นี้เป็นการจำลองและวิเคราะห์เรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่กลุ่มที่ 2 ดังที่กล่าวข้างต้น ซึ่งกำหนดให้ TL4 และ TL7 (สายนำสัญญาณยาว $\lambda_g/4$ แบบวงจรเปิด หรือ Open-Line Quarter Transmission Lines) มีค่าความกว้างที่เปลี่ยนแปลงจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 2.44 mm, 2.64 mm, และ 2.84 mm โดยในแต่ค่าความกว้างที่กำหนดนั้น จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของ TL4 และ TL7 ที่ยาวรวมกันจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 24.6 mm, 25.6 mm, 26.3 mm, และ 26.6 mm ส่วนค่าความกว้างและความยาวของ TL2 (J-Inverter) ที่เลือกใช้จะมีค่าคงที่ โดยถูกหาได้จากค่าความกว้างและความยาวที่เหมาะสมที่สุดและให้สมรรถนะการทำงานที่ดีที่สุดค่าเดียวที่ได้รับจากการจำลองชิ้นงานกลุ่มที่ 1 โดยแต่ละกรณีมีรายละเอียดดังนี้

**กรณีที่ 1** พิจารณาค่าความกว้างของ TL4 และ TL7 มีค่าคงที่เท่ากับ 2.44 mm และค่าความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเปลี่ยนแปลงจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 24.6 mm, 25.6 mm, 26.3 mm, และ 26.6 mm จากการเขียนโปรแกรมจำลองชิ้นงานตามค่าความกว้างและความยาวที่กำหนดไว้ในกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 จะได้ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ ($S_{11}$) และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก ($S_{21}$) ดังแสดงในภาพที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ อีกทั้ง ตารางที่ 4.7 แสดงค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุดและ

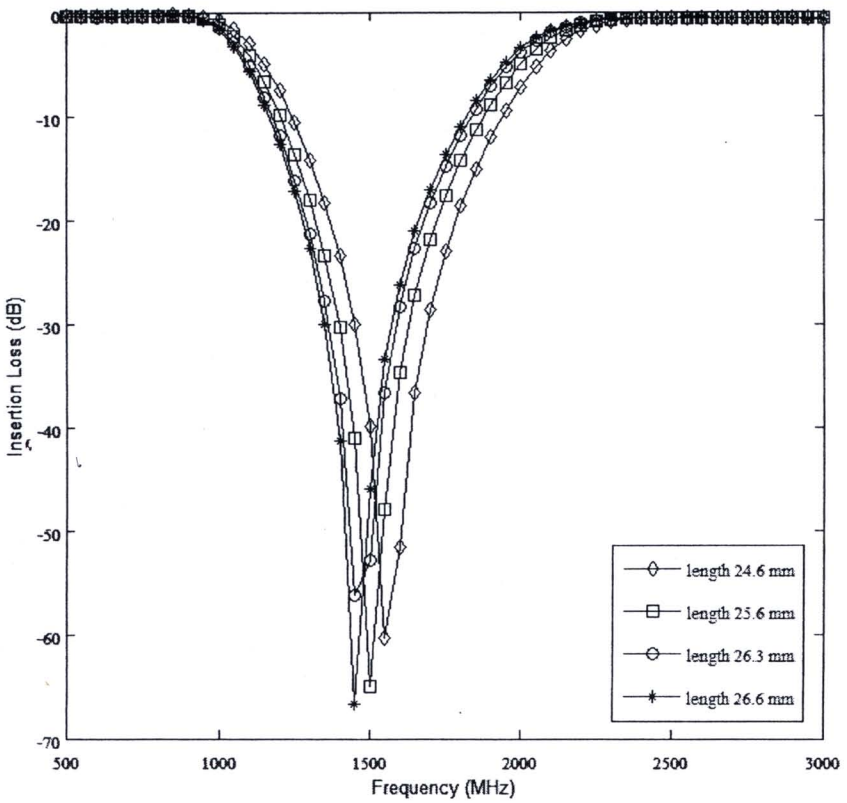
แบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง โดยพิจารณาที่ค่า $S_{11}$ เท่ากับ -20 dB และตารางที่ 4.8 แสดงค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง และค่า $S_{21}$ ที่ต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่หยุดแถบ




ภาพที่ 4.7 ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.44 mm

ตารางที่ 4.7 ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.44 mm

| ความกว้าง TL4 และ TL7 (mm) | ความยาว TL4 และ TL7 (mm) | ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ช่วง 800 - 900 MHz (dB) | ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB) | แบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ช่วง 800 - 900 MHz (MHz) | แบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (MHz) |
|---|---|---|---|---|---|
| 2.44 | 24.6 | -37.5 | -36.2 | 92 | 276 |
| 2.44 | 25.6 | -28 | -41.2 | 92 | 303 |
| 2.44 | 26.3 | -25.5 | -46.3 | 92 | 382 |
| 2.44 | 26.6 | -26.5 | -48.2 | 92 | 395 |




ภาพที่ 4.8 ค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.44 mm

ตารางที่ 4.8 ค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.44 mm

| ความกว้าง TL4 และ TL7 (mm) | ความยาว TL4 และ TL7 (mm) | ค่า $S_{21}$ ที่มีค่าต่ำที่สุดที่ค่าความถี่ค่าหนึ่ง ณ ย่านความถี่หยุดแถบ | ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz (dB) | ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB) |
|---|---|---|---|---|
| 2.44 | 24.6 | -60 dB @ 1.55 GHz | -0.2 | -0.4 |
| 2.44 | 25.6 | -65 dB @ 1.5 GHz | -0.3 | -0.5 |
| 2.44 | 26.3 | -56 dB @ 1.45 GHz | -0.4 | -0.6 |
| 2.44 | 26.6 | -67 dB @ 1.45 GHz | -0.5 | -0.7 |

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

(1) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 24.6 mm ให้ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -37.5 dB แต่ให้ค่า $S_{11}$ มีค่ามากที่สุด ณ ย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -36.2

dB โดยที่นี้ พบว่า ค่าแบนด์วิดธ์ที่ได้รับสามารถรองรับการใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่ออกแบบได้ โดยมีค่าเท่ากับ 92 MHZ และ 276 MHz ตามลำดับ

(2) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.6 mm ให้ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำปานกลาง ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -26.5 dB แต่ให้ค่า $S_{11}$ มีค่าต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -48.2 dB โดยที่นี้ พบว่า ค่าแบนด์วิดธ์ที่ได้รับสามารถรองรับการใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่ออกแบบได้ โดยมีค่าเท่ากับ 92 MHZ และ 395 MHz ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

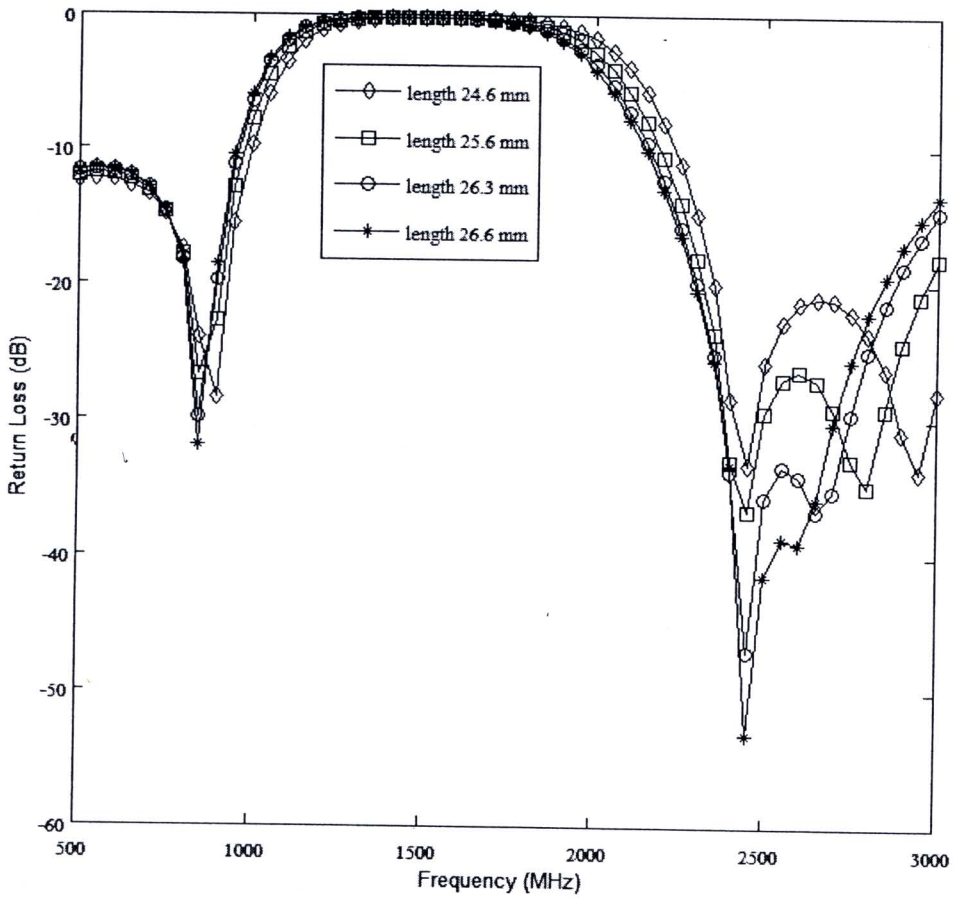
(1) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.6 mm ให้ค่า $S_{21}$ ที่ต่ำที่สุดคือ -67 dB ที่ค่าความถี่ 1.45 GHz ณ ย่านความถี่หยุดแถบที่กำหนด

(2) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.3 mm ให้ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดคือ -56 dB ที่ค่าความถี่ 1.45 GHz ณ ย่านความถี่หยุดแถบที่กำหนด

(3) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 ที่ทดสอบทั้ง 4 กรณีนี้ต่างก็ให้ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz และช่วง 2.3 – 2.7 GHz ที่ใกล้เคียงกัน คือมีค่าระหว่าง 0.2 – 0.7 dB ดังนั้น เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถทำงานได้ดีใน 2 ย่านความถี่ที่กำหนด

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อกำหนดค่าความกว้างของ TL4 และ TL7 ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 2.44 mm และทำการเปลี่ยนค่าความยาวของ TL4 และ TL7 ให้มีค่าต่างๆ ตาม 4 กรณีข้างต้นที่กำหนด พบว่า คุณสมบัติในการทำงานของวงจรที่ทดสอบ ได้แก่ ค่า $S_{11}$ ที่ย่านความถี่ต่ำและสูง, ค่า $S_{21}$ ที่ย่านความถี่ต่ำและสูง และแบนด์วิดธ์ที่รองรับการใช้งาน ณ ย่านความถี่ต่ำ ต่างก็ให้ค่าต่างๆ ที่ดีและใช้งานได้ใกล้เคียงกัน ยกเว้น ค่าแบนด์วิดธ์ที่รองรับการใช้งาน ณ ย่านความถี่สูง

**กรณีที่ 2** พิจารณาค่าความกว้างของ TL4 และ TL7 มีค่าคงที่เท่ากับ 2.64 mm และค่าความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเปลี่ยนแปลงจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 24.6 mm, 25.6 mm, 26.3 mm, และ 26.6 mm จากการเขียนโปรแกรมจำลองชิ้นงานตามค่าความกว้างและความยาวที่กำหนดไว้ในกรณีที่ 2 ของกลุ่มที่ 2 จะได้ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ ($S_{11}$) และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก ($S_{21}$) ดังแสดงในภาพที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ อีกทั้ง ตารางที่ 4.9 แสดงค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุดและแบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง โดยพิจารณาที่ค่า $S_{11}$ เท่ากับ -20 dB และตารางที่ 4.10 แสดงค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง และค่า $S_{21}$ ที่ต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่หยุดแถบ

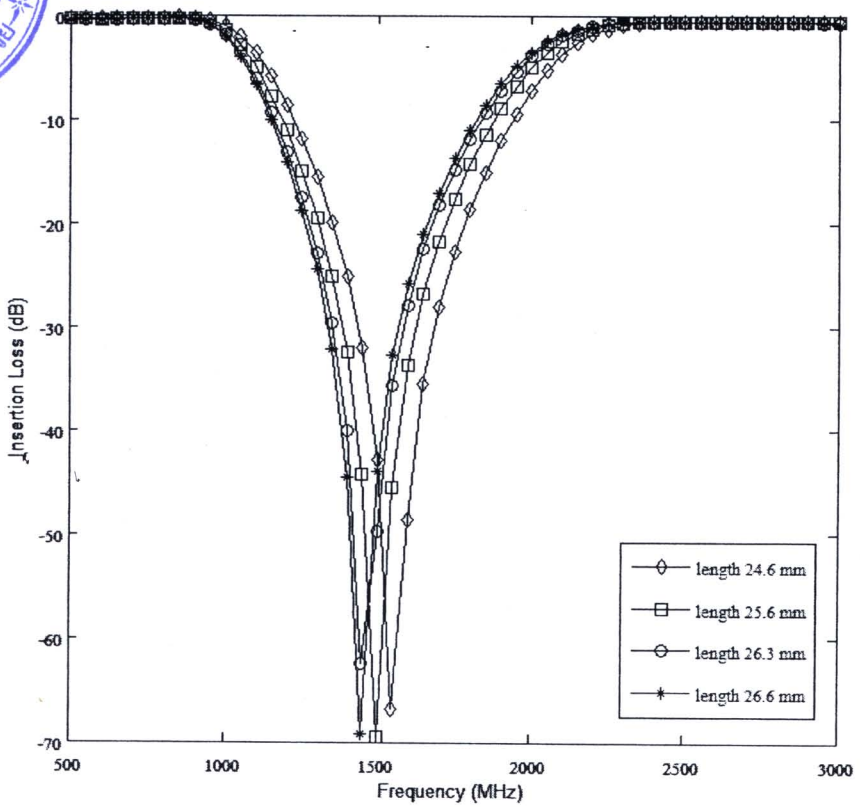



ภาพที่ 4.9 ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.64 mm

ตารางที่ 4.9 ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.64 mm

| ความกว้าง TL4 และ TL7 (mm) | ความยาว TL4 และ TL7 (mm) | ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ช่วง 800 - 900 MHz (dB) | ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB) | แบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ช่วง 800 - 900 MHz (MHz) | แบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (MHz) |
|---|---|---|---|---|---|
| 2.64 | 24.6 | -26 | -33.5 | 92 | 355 |
| 2.64 | 25.6 | -27 | -37 | 92 | 388 |
| 2.64 | 26.3 | -30 | -47 | 99 | 395 |
| 2.64 | 26.6 | -32 | -53 | 92 | 395 |

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย




ภาพที่ 4.10 ค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.64 mm

ตารางที่ 4.10 ค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.64 mm

| ความกว้าง TL4 และ TL7 (mm) | ความยาว TL4 และ TL7 (mm) | ค่า $S_{21}$ ที่มีค่าต่ำที่สุดที่ค่าความถี่ค่าหนึ่ง ณ ย่านความถี่หยุดแถบ | ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz (dB) | ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB) |
|---|---|---|---|---|
| 2.64 | 24.6 | -66.5 dB @ 1.55 GHz | -0.2 | -0.4 |
| 2.64 | 25.6 | -70 dB @ 1.5 GHz | -0.3 | -0.5 |
| 2.64 | 26.3 | -62.5 dB @ 1.45 GHz | -0.4 | -0.6 |
| 2.64 | 26.6 | -69 dB @ 1.45 GHz | -0.5 | -0.7 |

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

(1) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.3 mm ให้ค่า $S_{11}$ ที่มีค่าเกือบต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -30 dB แต่ให้ค่า $S_{11}$ มีค่าต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -47

dB และให้ค่าแบนด์วิดธ์ที่รองรับการใช้งานที่ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่กว้างมากที่สุด เท่ากับ 99 dB และ 395 MHz ตามลำดับ

(2) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.6 mm ให้ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง คือ มีค่าเท่ากับ -32 dB และ -53 dB ตามลำดับ โดยในที่นี้ พบว่า ค่าแบนด์วิดธ์ที่ใช้งานเพื่อรองรับย่านความถี่ต่ำ มีค่าเท่ากับ 92 MHz ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าแบนด์วิดธ์ที่ได้รับจากกรณีที่ TL4 และ TL7 มีค่าความยาวเท่ากับ 26.3 mm และค่าแบนด์วิดธ์ที่ใช้งานเพื่อรองรับย่านความถี่สูง มีค่าเท่ากับ 395 MHZ ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าแบนด์วิดธ์ที่ได้รับจากกรณีที่ TL4 และ TL7 มีค่าความยาวเท่ากับ 26.3 mm

(3) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 24.6 mm และ 25.6 mm ให้ค่า $S_{11}$ ที่มากที่สุดใกล้เคียงกัน ณ ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ -26.5 dB และ -35.25 dB ตามลำดับ อีกทั้ง ค่าแบนด์วิดธ์ที่ใช้งานเพื่อรองรับย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 92 MHz และ ต่ำกว่า 388 MHz ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่น้อยกว่าค่าแบนด์วิดธ์ที่ได้รับจากกรณีที่ TL4 และ TL7 มีค่าความยาวเท่ากับ 26.3 mm

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

(1) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 25.6 mm ให้ค่า $S_{21}$ ที่ต่ำที่สุดคือ -70 dB ที่ค่าความถี่ 1.5 GHz ณ ย่านความถี่หยุดแถบที่กำหนด

(2) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.3 mm ให้ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดคือ -62.5 dB ที่ค่าความถี่ 1.45 GHz ณ ย่านความถี่หยุดแถบที่กำหนด

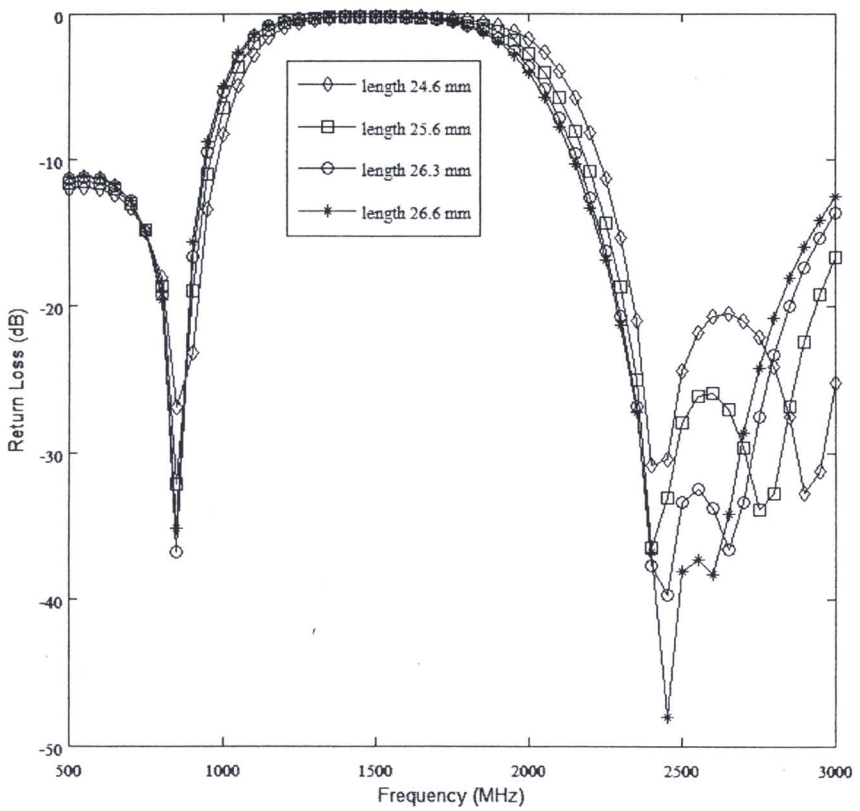
(3) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 ที่ทดสอบทั้ง 4 กรณีนี้ต่างก็ให้ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz และช่วง 2.3 – 2.7 GHz ที่ใกล้เคียงกัน คือมีค่าระหว่าง 0.2 – 0.7 dB ดังนั้น เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถทำงานได้ดีใน 2 ย่านความถี่ที่กำหนด

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า จากการจำลองชิ้นงาน เมื่อกำหนดให้ค่าความกว้างของ TL4 และ TL7 ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 2.64 mm และทำการเปลี่ยนค่าความยาวของ TL4 และ TL7 ให้มีค่าต่างๆ ตาม 4 กรณีข้างต้นที่กำหนด พบว่า ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.3 mm จะให้ค่า $S_{11}$ ที่มีค่าเกือบต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -30 dB แต่ให้ค่า $S_{11}$ มีค่าต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -47 dB และให้ค่าแบนด์วิดธ์ที่รองรับการใช้งานที่ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่กว้างมากที่สุดเท่ากับ 99 dB และ 395 MHz ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า “ค่าความกว้างและความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 2.64 mm และ 26.3 mm เป็นขนาดของสายนำสัญญาณยาว

$\lambda_g/4$ แบบวงจรเปิดที่เหมาะสมที่สุดที่ควรนำไปใช้ในการสร้างเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้"

ทั้งนี้ ค่าความกว้างและความยาวของ TL4 และ TL7 ที่ใช้งานมีค่าเท่ากับ TL3 และ TL6 ตามลำดับ เนื่องจากเป็นสายนำสัญญาณยาว $\lambda_g/4$ แบบวงจรเปิดที่เหมือนกันดังที่กล่าวไว้ในทฤษฎีหัวข้อ 3.2

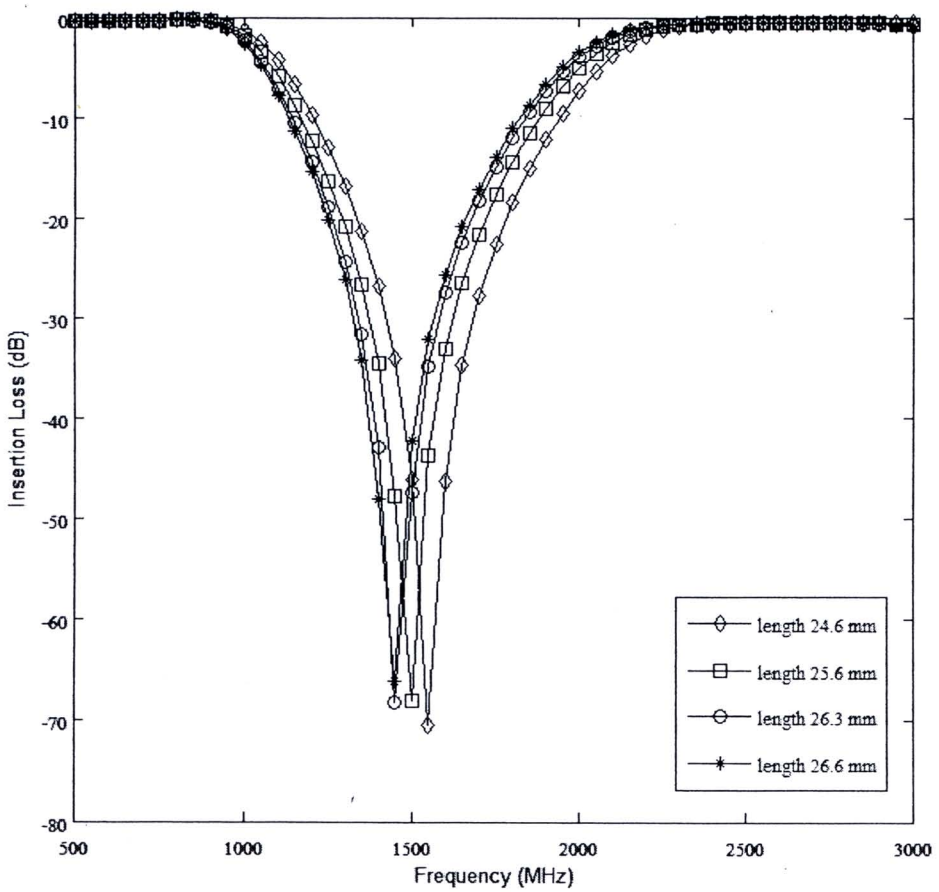
**กรณีที่ 3** พิจารณาค่าความกว้างของ TL4 และ TL7 มีค่าคงที่เท่ากับ 2.84 mm และค่าความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเปลี่ยนแปลงจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 24.6 mm, 25.6 mm, 26.3 mm, และ 26.6 mm จากการเขียนโปรแกรมจำลองชิ้นงานตามค่าความกว้างและความยาวที่กำหนดไว้ในกรณีที่ 3 ของกลุ่มที่ 2 จะได้ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ ($S_{11}$) และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก ($S_{21}$) ดังแสดงในภาพที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ อีกทั้ง ตารางที่ 4.11 แสดงค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุดและแบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง โดยพิจารณาที่ค่า $S_{11}$ เท่ากับ -20 dB และตารางที่ 4.12 แสดงค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง และค่า $S_{21}$ ที่ต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่หยุดแถบ




ภาพที่ 4.11 ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.84 mm

ตารางที่ 4.11 ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.84 mm

| ความกว้าง TL4 และ TL7 (mm) | ความยาว TL4 และ TL7 (mm) | ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ช่วง 800 - 900 MHz (dB) | ค่า $S_{11}$ ที่ต่ำที่สุด ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB) | แบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ช่วง 800 - 900 MHz (MHz) | แบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้ช่วง 2.3 - 2.7 GHz (MHz) |
|---|---|---|---|---|---|
| 2.84 | 24.6 | -37.5 | -36.2 | 92 | 276 |
| 2.84 | 25.6 | -28 | -41.2 | 92 | 303 |
| 2.84 | 26.3 | -25.5 | -46.3 | 92 | 382 |
| 2.84 | 26.6 | -26.5 | -48.2 | 92 | 395 |




ภาพที่ 4.12 ค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.84 mm

ตารางที่ 4.12 ค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ TL4 และ TL7 กว้างคงที่ 2.84 mm

| ความกว้าง TL4 และ TL7 (mm) | ความยาว TL4 และ TL7 (mm) | ค่า $S_{21}$ ที่มีค่าต่ำที่สุดที่ค่าความถี่ค่าหนึ่ง ณ ย่านความถี่หยุดแถบ | ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz (dB) | ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดช่วง 2.3 - 2.7 GHz (dB) |
|---|---|---|---|---|
| 2.84 | 24.6 | -60 dB @ 1.55 GHz | -0.2 | -0.4 |
| 2.84 | 25.6 | -65 dB @ 1.5 GHz | -0.3 | -0.5 |
| 2.84 | 26.3 | -56 dB @ 1.45 GHz | -0.4 | -0.6 |
| 2.84 | 26.6 | -67 dB @ 1.45 GHz | -0.5 | -0.7 |

ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

(1) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 24.6 mm ให้ค่า $S_{11}$ ที่มีค่าต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -37.5 dB แต่ให้ค่า $S_{11}$ มีค่ามากที่สุด ณ ย่านความถี่สูง คือมีค่าเท่ากับ -36.2 dB นอกจากนี้ ยังให้ค่าแบนด์วิดธ์ที่รองรับการใช้งานที่ย่านความถี่สูงที่แคบที่สุดเท่ากับ 276 MHz เท่านั้น

(2) ส่วนที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.6 mm ให้ค่า $S_{11}$ ที่มากที่สุด ณ ย่านความถี่ต่ำ คือมีค่าเท่ากับ -26.5 dB แต่ให้ค่า $S_{11}$ มีค่าต่ำที่สุด ณ ย่านความถี่สูง เท่ากับ -48.2 dB นอกจากนี้ ยังให้ค่าแบนด์วิดธ์ที่รองรับการใช้งานที่ย่านความถี่สูงที่กว้างมากที่สุดเท่ากับ 395 MHz ซึ่งเป็นค่าแบนด์วิดธ์ที่รองรับการใช้งานที่ย่านความถี่สูงที่มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับจากการที่ TL4 และ TL7 มีความยาวค่าอื่นๆ แต่ให้ค่าแบนด์วิดธ์ที่รองรับการใช้งานที่ย่านความถี่ต่ำที่พอๆ กับกรณีอื่นๆ คือเท่ากับ 92 MHz

แต่ทั้งนี้ ผลการจำลองในกรณีนี้ก็ด้อยกว่ากรณีที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.3 mm (ข้อที่ 1 ที่กล่าวไว้ข้างต้น) ซึ่งให้ค่า $S_{11}$ ณ ย่านความถี่ต่ำที่ดีกว่า คือ มีค่าเท่ากับ -30 dB และให้ค่าแบนด์วิดธ์ที่รองรับการใช้งานที่ย่านความถี่ต่ำที่กว้างกว่า คือมีค่าเท่ากับ 99 dB ซึ่งแสดงให้เห็นว่า "ค่าความกว้างและความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 2.64 mm และ 26.3 mm ยังคงเป็นขนาดของสายนำสัญญาณยาว $\lambda_g/4$ แบบวงจรเปิดที่เหมาะสมที่สุดที่ควรนำไปใช้ในการสร้างเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้"

(3) ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 25.6 mm และ 26.3 mm ให้ค่า $S_{11}$ ที่มีค่าต่ำปานกลาง ณ ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ -26.75 dB และ -43.75 dB ตามลำดับ ค่าแบนด์วิดธ์ที่ใช้งานเพื่อรองรับย่านความถี่ต่ำที่เท่ากัน คือมีค่าเท่ากับ 92 MHz แต่ให้ค่า

แบนด์วิดธ์ที่ใช้งานเพื่อรองรับย่านความถี่สูงที่แตกต่างกันเท่ากับ 79 MHz ซึ่งคุณสมบัติในการใช้งานที่ได้รับจากการกำหนดค่าความยาว TL4 และ TL7 ในกรณีนี้ให้ผลการใช้งานที่ด้อยกว่ากรณีที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.3 mm (ข้อที่ 1 ที่กล่าวไว้ข้างต้น) ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบกรณีที่ 1 ของกลุ่มที่ 2 มีดังนี้

ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 26.6 mm ให้ค่า $S_{21}$ ที่ต่ำที่สุดคือ -67 dB ที่ค่าความถี่ 1.45 GHz ณ ย่านความถี่หยุดแถบที่กำหนด ส่วนที่ความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 24.6 mm ให้ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดคือ -60 dB ที่ค่าความถี่ 1.55 GHz ณ ย่านความถี่หยุดแถบที่กำหนด นอกจากนั้น ที่ความยาวของ TL4 และ TL7 ที่ทดสอบทั้ง 4 กรณีนี้ต่างก็ให้ค่า $S_{21}$ ที่มากที่สุดช่วง 800 - 900 MHz และช่วง 2.3 – 2.7 GHz ที่ใกล้เคียงกัน คือมีค่าระหว่าง 0.2 – 0.7 dB ดังนั้น เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถทำงานได้ดีใน 2 ย่านความถี่ที่กำหนด

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า จากการจำลองชิ้นงานเมื่อกำหนดให้ค่าความกว้างของ TL4 และ TL7 ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 2.84 mm และทำการเปลี่ยนค่าความยาวของ TL4 และ TL7 ให้มีค่าต่างๆ ตาม 4 กรณีข้างต้นที่กำหนด (กรณีที่ 3) พบว่า ค่าความกว้างของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 2.84 mm ให้คุณสมบัติในการใช้งานต่างๆ ทั้งหมดที่ด้อยกว่ากรณีที่ใช้ค่าความกว้างของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 2.64 mm (กรณีที่ 2) ทั้งนี้ผลการทดสอบที่มีผลกระทบต่อการทำงานของเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอ เมื่อทำการปรับค่าความกว้างและความยาวของสายนำสัญญาณแต่ละเส้นมีแสดงไว้ในตารางที่ 4.13 โดยบทสรุปและการวิเคราะห์ผลการจำลองและทดสอบเรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่ที่นำเสนอที่มีความกว้างและความยาวค่าต่างๆ กล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

(1) ค่าความยาวและความกว้างของ TL2 มีค่าเท่ากับ 23 mm และ 1.9 mm ตามลำดับ เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ทำให้เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอสามารถใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและสูงที่กำหนดได้ เมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างและความยาวค่าอื่นๆ (การทดสอบกลุ่มที่ 1 กรณีที่ 3)

(2) หลังจากนั้น เมื่อกำหนดค่าความยาวและความกว้างของ TL2 (J-Inverter) มีค่าคงที่คือมีค่าเท่ากับ 23 mm และ 1.9 mm ตามลำดับ แล้ว จะทำการทดลองเปลี่ยนค่าความกว้างและค่าความยาวของ TL4 และ TL7 ให้มีค่าต่างๆ พบว่า ค่าความกว้างและความยาวของ TL4 และ TL7 มีค่าเท่ากับ 2.64 mm และ 26.3 mm ตามลำดับ ให้สมรรถนะการทำงานที่ดีและเป็นไปตามเกณฑ์

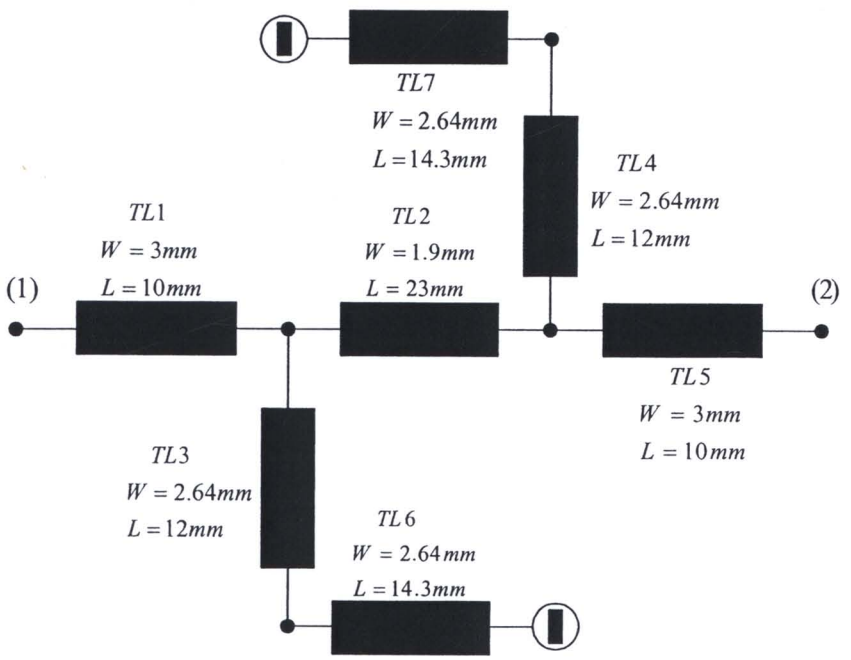
(3) สรุปได้ว่า "ค่าความยาวและความกว้างของ TL2 (J-Inverter) มีค่าเท่ากับ 23 mm และ 1.9 mm ตามลำดับ รวมถึงค่าความกว้างและความยาวของ TL4 และ TL7 (TL3 และ TL6) มีค่าเท่ากับ 2.64 mm และ 26.3 mm ตามลำดับ จึงเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการสร้างและทดสอบเรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่ที่นำเสนอมากที่สุด"

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบที่มีต่อการทำงานเมื่อปรับความกว้างและความยาวของสายนำสัญญาณ

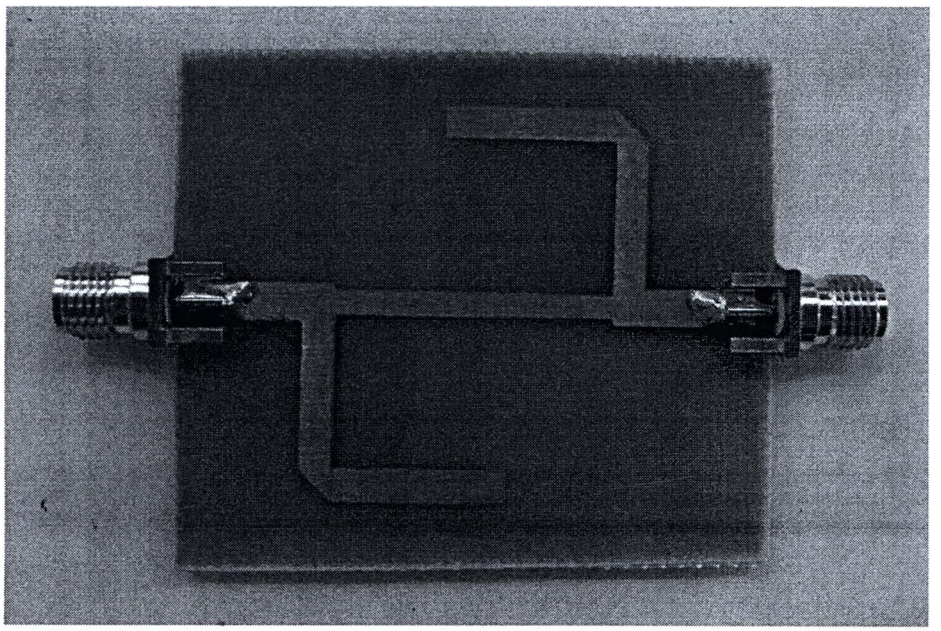
| หมายเลขของสายนำสัญญาณ | หน้าที่ของสายนำสัญญาณ | ผลการทดสอบและผลกระทบที่มีต่อคุณสมบัติในการทำงานของเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอ |
|---|---|---|
| TL2 | J-Inverter | ควรจะออกแบบให้มีขนาดความกว้างที่น้อยกว่าสายป้อนสัญญาณ 3 มม. มากๆ และชดเชยโดยใช้ความยาวที่น้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ในทางทฤษฎี 25 มม. เพื่อจะให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ ณ ย่านความถี่ต่ำและสูงที่ออกแบบได้เหมาะสมและดีที่สุด โดยค่าความกว้างและความยาวของ TL2 ที่ได้รับจากการทดสอบและนำไปใช้ในการออกแบบมีค่าเท่ากับ 1.9 มม. และ 23 มม. ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าจะสอดคล้องกับค่า LC ที่ขนานกันในวงจรลัมพ์ เพราะค่าตัวเลขของ L ที่ใช้มีค่าใกล้เคียงกับค่าตัวเลขของ C จึงทำให้สตริปมีความกว้างที่ลดลงมาก และยาวลดลง ที่ซึ่งแสดงไว้ในวงจรสมบูรณ์รูปที่ 2 ของบทความวิจัย C.-Y. Hsu[1] |
| TL4 และ TL7 (มีค่าเท่ากับ TL3 และ TL6 ตามลำดับ) | สายนำสัญญาณแบบวงจรเปิดที่ยาวเท่ากับ $\lambda/4$ | ควรจะออกแบบให้มีขนาดความกว้างที่น้อยกว่าสายป้อนสัญญาณ 3 มม. เพียงเล็กน้อยและชดเชยโดยใช้ความยาวที่มากขึ้นกว่าค่าที่คำนวณได้ในทางทฤษฎี 25 มม. เพื่อจะให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ ณ ย่านความถี่ต่ำและสูงที่ออกแบบได้เหมาะสมและดีที่สุด โดยค่าความกว้างและความยาวของ TL4 และ TL7 ที่ได้รับจากการทดสอบและนำไปใช้ในการออกแบบมีค่าเท่ากับ 2.64 มม. และ 26.3 มม. ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าจะสอดคล้องกับค่า LC ที่อนุกรมกันในวงจรลัมพ์ เพราะค่าตัวเลขของ L ที่ใช้มีค่ามากกว่า C จึงทำให้สตริปมีความกว้างที่น้อยแต่ยาวที่ซึ่งแสดงไว้ในวงจรสมบูรณ์รูปที่ 2 ของบทความวิจัย C.-Y. Hsu[1] |

[1] C.-Y. Hsu, et. al. H.–R. Chuang and C.–Y. Chen. (2009). "Compact microstrip UWB dual-band bandpass filter with tunable rejection band." **J. of Electromagn. Waves and Appl.** pp. 617 – 626.

หลังจากที่ได้ทำการจำลองชิ้นงานและได้ทราบค่าความกว้างและความยาวที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอ ดังแสดงในภาพที่ 4.13 แล้ว จึงนำค่าความกว้างและความยาวเหล่านี้ไปสร้างเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอจริงบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ที่มีความหนาเป็น $h$ มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเป็น $\varepsilon_R$ และมีกราวด์เพลนอยู่ด้านล่างของเรโซเนเตอร์หยุดแถบ ซึ่งกราวด์เพลนของเรโซเนเตอร์หยุดแถบก็เป็นกราวด์เพลนเดียวกับวงจรอื่นๆ ของอุปกรณ์สื่อสารแบบพกพาทั่วไป ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 เนื่องจาก FR-4 เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีราคาถูกและหาซื้อง่าย อีกทั้งเรโซเนเตอร์หยุดแถบนี้มีค่าความถี่ใช้งานไม่เกิน 3 – 4 GHz จึงทำให้สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ได้ โดยภาพถ่ายของเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอแสดงไว้ในภาพที่ 4.14




ภาพที่ 4.13 ขนาดความกว้างและความยาวของเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีโครงสร้างใหม่ที่นำเสนอ



ภาพที่ 4.14 ภาพถ่ายของเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่สร้างขึ้นบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4

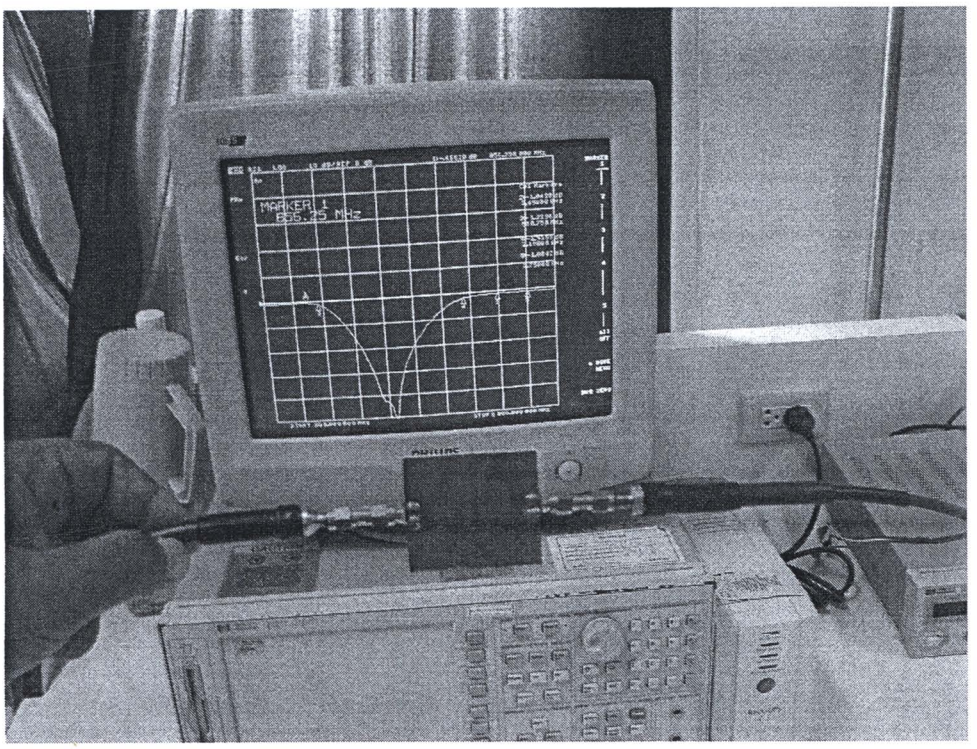
**4.2 ผลการจำลองและทดสอบเรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่ที่นำเสนอ**

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองและทดสอบเรโซเนเตอร์หยุดแถบโครงสร้างใหม่ที่นำเสนอและให้คุณสมบัติการทำงานเป็นไปตามที่ต้องการ โดยมีขนาดความกว้างและความยาวค่าต่างๆ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.13 เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่สร้างเสร็จแล้วดังในภาพที่ 4.14 จะถูกวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการทำงานของเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอ ดังนี้

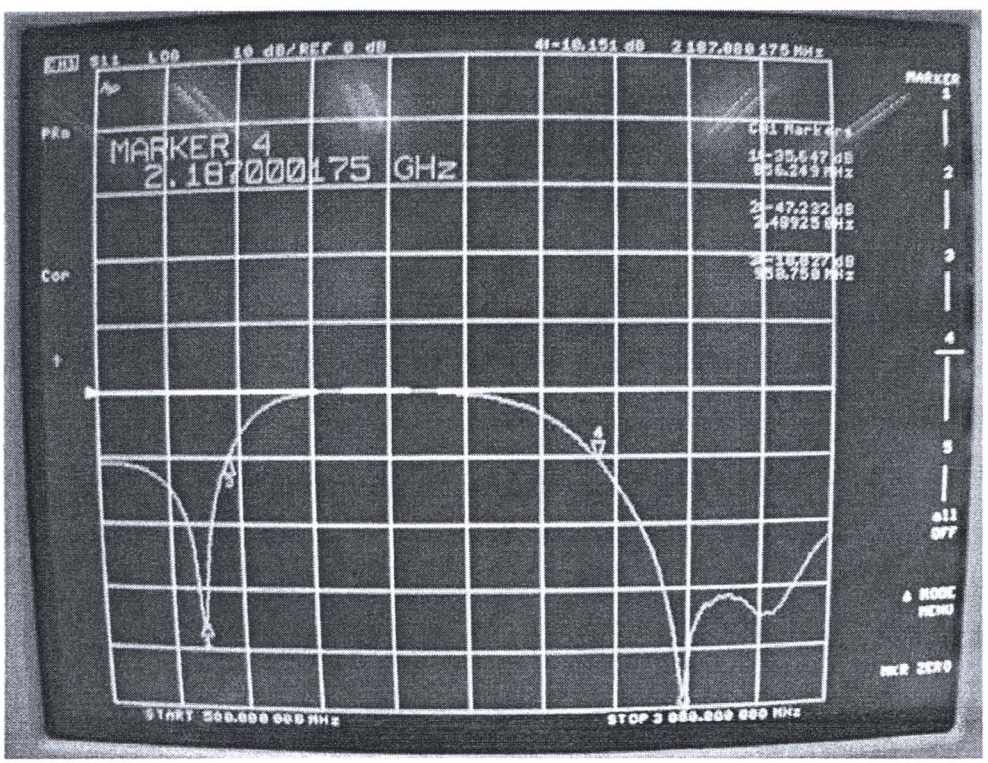
(1) วัดค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return Loss) โดยใช้เครื่องเน็ตเวิร์กอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) HP8753E (ย่านความถี่ใช้งาน 30 kHz – 3 GHz)

(2) วัดระดับกำลังสัญญาณเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ของเรโซเนเตอร์หยุดแถบโดยใช้เครื่อง Signal Generator HP8657B (ย่านความถี่ 0.1 MHz – 2060 MHz), เครื่อง Signal Generator HP83731A (ย่านความถี่ 1 GHz – 20 GHz) และเครื่องสเปกตรัมอนาไลเซอร์ (Spectrum Analyzer) HP8593A (ย่านความถี่ 9 kHz – 22 GHz)

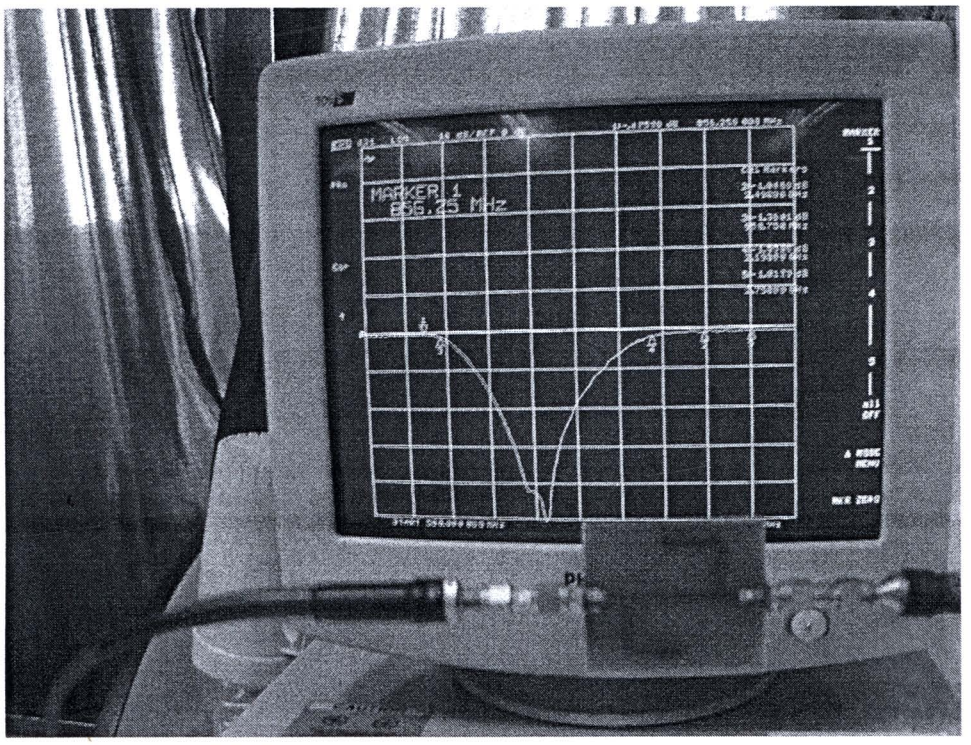
ภาพถ่ายของเครื่องมือวัดที่ใช้งานและภาพถ่ายในขณะทำการทดสอบเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอที่แสดงไว้ในภาพที่ 4.15 – 4.17



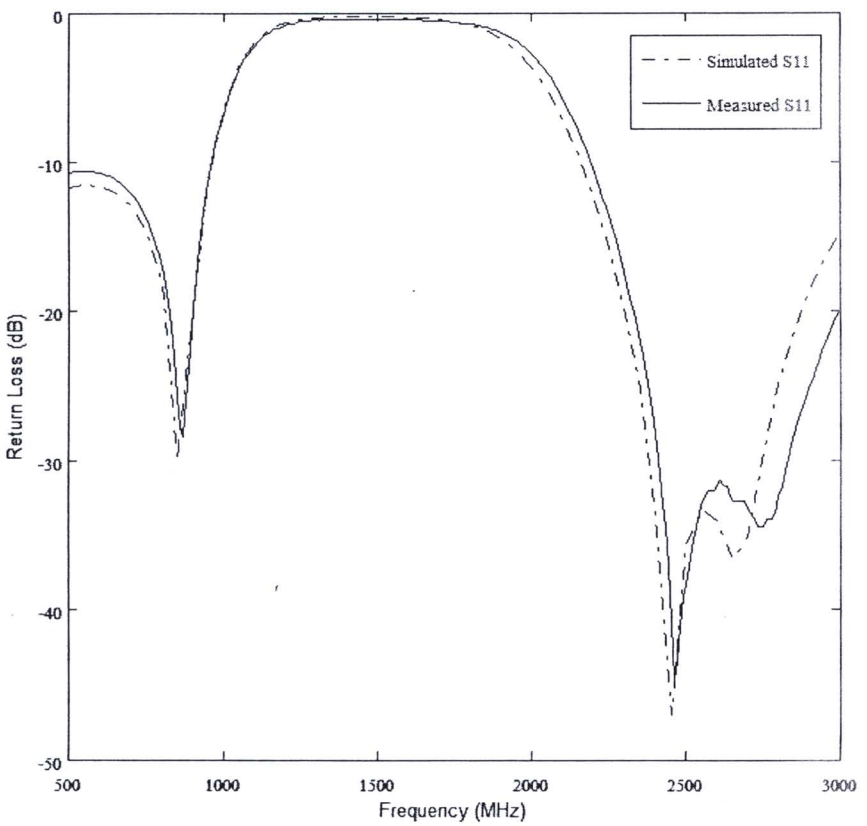

ภาพที่ 4.15 ภาพถ่ายของเครื่องเน็ตเวิร์กอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) HP8753E



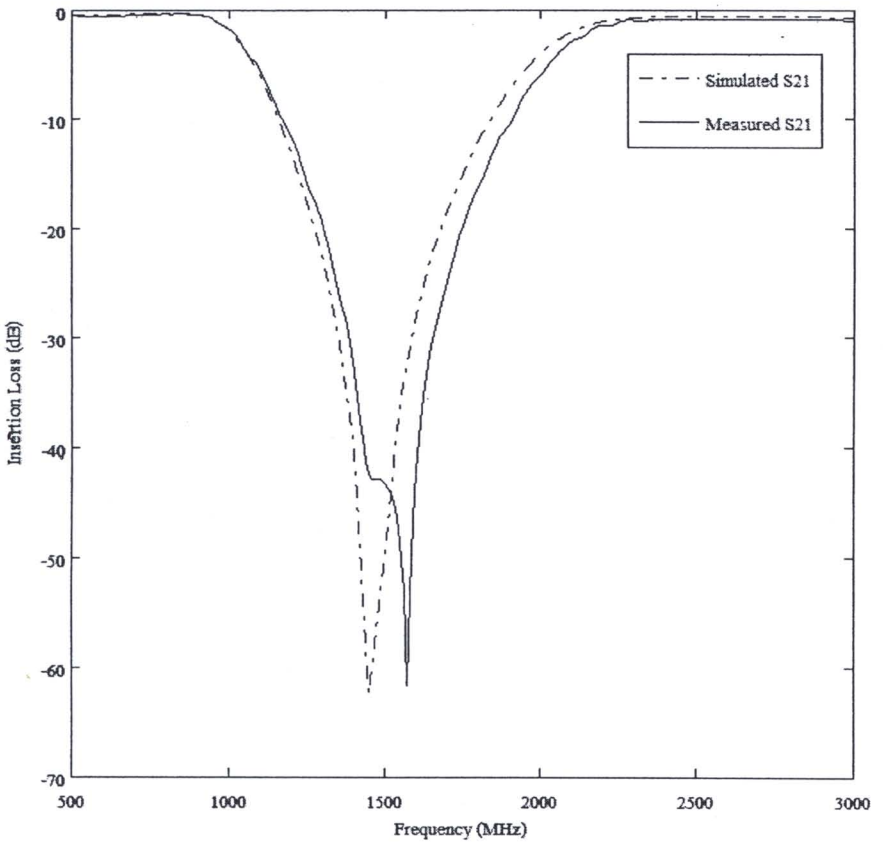

ภาพที่ 4.16 ภาพถ่ายเหตุการณ์ต่างๆ ในขณะทำการทดสอบเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอ




ภาพที่ 4.17 ภาพถ่ายเหตุการณ์ต่างๆ ในขณะทำการทดสอบเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอ (ต่อ)




ภาพที่ 4.18 ค่า Return Loss ($S_{11}$) ที่ได้จากการจำลองและวัดเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอ




ภาพที่ 4.19 ค่า Insertion Loss ($S_{21}$) ที่ได้จากการจำลองและวัดเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอ

โดยชิ้นงานที่สร้างเสร็จดังในภาพที่ 4.14 นั้นจะถูกนำมาทดสอบเพื่อวัดค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ ($S_{11}$) และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก ($S_{21}$) พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับจากการจำลองชิ้นงาน ภาพที่ 4.18 แสดงค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการวัดและจากการจำลองวงจร ที่ซึ่งสรุปได้ดังนี้

(1) ที่ความถี่ 800 MHz ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการวัดและค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองมีค่าเท่ากับ -20 dB และ -22.5 dB ตามลำดับ ส่วนที่ความถี่ 900 MHz ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการวัดและค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองมีค่าเท่ากัน คือเท่ากับ -20 dB

(2) ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการวัดมีค่าต่ำกว่า -20 dB ตลอดทั้งย่านความถี่ต่ำ 800 - 900 MHz โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ -28 dB ที่ 870 MHz ส่วนค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองมีค่าต่ำกว่า -20 dB ตลอดทั้งย่านเช่นกัน โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ –30 dB ที่ 860 MHz ซึ่งจะเห็นว่า ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการวัดสอดคล้องกับค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลอง

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย



(3) ที่ความถี่ 2.3 GHz ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการวัดและค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองมีค่ามีค่าเท่ากับ -20 dB และ -25 dB ตามลำดับ ส่วนที่ความถี่ 2.7 GHz ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการวัดมีค่าที่ต่ำกว่าค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองเท่ากับ -4.5 dB โดยมีค่าเท่ากับ -32.5 dB และ -37 dB ตามลำดับ

(4) ทั้งค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการวัดและค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองมีค่าต่ำกว่า -20 dB ตลอดทั้งย่านความถี่สูง 2.3 – 2.7 GHz โดยค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการวัดมีค่าต่ำสุดประมาณ -45 dB ที่ 2.46 GHz แต่ค่า $S_{11}$ ที่ได้จากการจำลองมีค่าต่ำสุดประมาณ -47 dB ที่ 2.44 GHz

(5) เมื่อพิจารณาค่า $S_{11}$ เท่ากับ -20 dB พบว่า ค่าแบนด์วิดธ์ที่ได้จากชิ้นงานที่สร้างขึ้นจริงมีค่าที่กว้างกว่าค่าแบนด์วิดธ์ที่ได้จากการจำลองระบบในช่วงย่านความถี่สูง และมีค่าแบนด์วิดธ์ที่ใช้งานที่ใกล้เคียงกับค่าแบนด์วิดธ์ที่ได้จากการจำลองระบบในช่วงย่านความถี่ต่ำ

ภาพที่ 4.19 แสดงค่า ค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการวัดและจากการจำลองวงจรที่ซึ่งสรุปได้ดังนี้

(1) ทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงของการทำงาน ค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองสอดคล้องตามค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการวัด

(2) ตลอดทั้งย่านความถี่ต่ำ 800 - 900 MHz ค่า $S_{21}$ ที่ได้รับจากการจำลองมีค่าอยู่ในช่วง -0.22 dB ไปจนถึง -0.31 dB แต่ค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการวัดมีค่าอยู่ในช่วง -0.38 dB ไปจนถึง -0.5 dB

(3) ตลอดทั้งย่านความถี่สูง 2.3 – 2.7 GHz ค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการจำลองมีค่า -0.55dB ไปจนถึง -0.4 dB แต่ค่า $S_{21}$ ที่ได้จากการวัดมีค่าที่สูงกว่า โดยมีค่าอยู่ในช่วง -1.1 dB ถึง -0.85 dB

กล่าวโดยสรุปที่ว่า วงจรเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้มีข้อดีในแง่ของค่า $S_{11}$ ที่ดีและยอมรับได้ แถบหยุดก็มีค่าที่กว้างกว่าวงจรที่เสนอโดย C.-Y. Hsu *et. al.* [1] โดยมีค่าแบนด์วิดธ์ -3 dB เท่ากับ 1.1 GHz อีกทั้ง ยังมีขนาดเล็กกว่าวงจรที่เสนอโดย H.-Y. Anita Yim *et. al.* [2] โดยความกว้างและความยาวของวงจรมีค่าเท่ากับ 26.28 มม. และ 43 มม. ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.13

## 4.3 นิยามคำศัพท์ ค่าข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ และข้อสังเกตผลที่ได้จากการทดสอบ

4.3.1 วงจรกรองหยุดแถบที่ใช้งาน มี 2 แบบ คือ วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์ลัมพ์ และ วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากสายนำสัญญาณ โดยการที่เลือกใช้วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากสายนำสัญญาณ เนื่องจากว่า "อุปกรณ์ลัมพ์ที่นำมาใช้สร้างวงจรหยุดแถบนั้นมักจะเป็นค่าทศนิยม ที่ซึ่งจะหาค่าที่แม่นยำยาก ทำให้ในการทดสอบจะต้องปรับค่าอุปกรณ์ลัมพ์

---

[1] C.-Y. Hsu, et. al. H.–R. Chuang and C.–Y. Chen. (2009). "Compact microstrip UWB dual-band bandpass filter with tunable rejection band." **J. of Electromagn. Waves and Appl.** pp. 617 – 626.

[2] H.-Y. Anita Yim and K.-K. Michael Cheng. (2005, June). "Novel dual-band planar resonator and admittance inverter for filter design and applications." **IEEE MTT-S Int' 200**5, 4 pages.

และทดสอบหลายครั้ง จนกว่าจะได้คุณสมบัติการทำงานตามที่ต้องการ แม้กระนั้น เมื่อนำไปสร้างจริง ก็อาจจะไม่ได้ให้คุณสมบัติตามที่ต้องการก็ได้ เนื่องจากผลกระทบที่ได้รับจากแผ่นวงจรพิมพ์"

4.3.2 ทฤษฎีของสายนำสัญญาณ พบว่า สายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda/4$ แบบที่ปลายด้านหนึ่งเป็นวงจรเปิดจะถูกใช้งานเป็นเรโซเนเตอร์ *RLC* แบบอนุกรม ส่วนสายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda/4$ แบบที่ปลายด้านหนึ่งเป็นวงจรลัดจะถูกใช้งานเป็นเรโซเนเตอร์ *RLC* แบบขนาน

4.3.3 เรโซเนเตอร์ *RLC* แบบอนุกรมที่ถูกเลือกนำมาใช้งานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพราะว่าเรโซเนเตอร์ *RLC* แบบอนุกรมนั้นเป็นส่วนหนึ่งของวงจรกรองหยุดแถบที่ทำจากอุปกรณ์ลัมพ์ ดังแสดงด้านซ้ายมือของภาพที่ 3.2 ของบทที่ 3 โดย R ในภาพดังกล่าวไม่มี เพราะถือว่าเป็นค่าความต้านทานแฝงที่อยู่ในวงจร ซึ่งอาจเป็นค่าความต้านทานของสายนำสัญญาณที่เชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และกราวนด์ได้) ส่วนเรโซเนเตอร์ *RLC* แบบขนานในรูปข้างล่างนี้ ด้านบนจะถูกแทนด้วยโดยใช้หลักการของ J-Inverter ดังที่กล่าวในตัวเล่มวิทยานิพนธ์หัวข้อที่ 3.2 ซึ่งที่นี้อาจจะเลือกใช้สายนำสัญญาณที่ยาว $\lambda/4$ แบบที่ปลายด้านหนึ่งเป็นวงจรลัดก็ได้ แต่ที่ไม่เลือกใช้เพราะมองว่ามีขนาดวงจรที่ใหญ่

4.3.4 J-Inverter เป็นวงจรแปลงแอดมิตแตนซ์ ซึ่งถูกนำมาใช้งานเพื่อที่จะแปลงจากวงจรกรองความถี่ที่ทำจากอุปกรณ์ Lump RLC เป็นวงจรที่ทำจากสายนำสัญญาณ โดยทั้งสองวงจรจะมีค่าแอดมิตแตนซ์ (Y) เท่ากัน จึงอาจจะกล่าวได้ว่า วงจรทั้งสองนี้เป็นวงจรที่เทียบเท่ากันหรือสมมูลกัน

4.3.5 ค่าความกว้างของ TL4 และ TL7 (หรือ TL3 และ TL6) เท่ากับ 2.64 มม. ที่ได้รับเกิดขึ้นจากการออพติไมซ์หาค่าความกว้างที่เหมาะสมเบื้องต้นจากการเขียนโปรแกรมจำลองชิ้นงานทางทฤษฎี หลังจากที่ได้ทำการทดสอบปรับค่าและหาค่าความกว้างและความยาวของ TL2 ที่เหมาะสมแล้ว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.9 mm และ 23 mm ตามลำดับ (ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.1.1)

หลังจากนั้น จะทำการทดสอบความถูกต้องของค่าความกว้างที่เหมาะสมเบื้องต้นดังกล่าว โดยทำการทดสอบความกว้างของ TL4 และ TL7 ค่าอื่นๆ ข้างเคียงอีกด้วย ได้แก่ 2.44 มม. และ 2.84 มม. และปรับหาค่าความยาวของ TL4 และ TL7 ณ ค่าความกว้าง 3 ค่าดังกล่าวอีกด้วย เพื่อทำการเปรียบเทียบว่าค่าความกว้างและความยาวที่เหมาะสมที่สุดและให้คุณสมบัติการทำงานที่ดีที่สุดของ TL4 และ TL7 ควรมีค่าเท่าไร ก่อนที่จะนำไปสร้างและทดสอบการใช้งานจริงในทางปฏิบัติ (ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.1.2)

4.3.6 การที่ค่า $S_{11}$ ที่ได้รับในช่วงย่านความถี่ 2.5 GHz – 2.8 GHz มีค่าที่แย่กว่าค่า $S_{11}$ ที่ได้รับในช่วงย่านความถี่ 2.4 GHz – 2.5 GHz น่าจะเกิดขึ้นโดยมีสาเหตุดังนี้ "ย่านความถี่ 2.4 GHz – 2.5 GHz เป็นย่านความถี่สูงย่านแรกที่ผ่านออกไปยังเอาต์พุตของวงจรหยุดแถบได้ ดังนั้นวงจรหยุด

แถบจึงให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ดีมากตามที่ต้องการ จึงส่งผลให้ได้รับค่า $S_{11}$ ที่ดี ซึ่งเป็นผลการทดสอบที่ได้รับตามทฤษฎีธรรมดา กล่าวคือ

"ย่านความถี่ที่ผ่านออกไปได้ช่วงแรก จะได้ค่า $S_{11}$ ที่ลงลึกมาก" ส่วนย่านความถี่ 2.5 GHz – 2.8 GHz GHz เป็นย่านความถี่สูงย่านที่ 2 ที่ผ่านออกไปยังเอาต์พุตของวงจรหยุดแถบได้ ดังนั้นวงจรหยุดแถบจึงให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ไม่ดีเท่ากับย่านความถี่แรกที่วงจรยอมให้ผ่านไปได้ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า $S_{11}$ ที่ได้รับในย่านความถี่ 2.4 GHz – 2.5 GHz (อย่างไรก็ตาม ค่า $S_{11}$ ที่ได้รับก็มีค่าต่ำกว่า -20 dB ตามที่ต้องการในการออกแบบ) ซึ่งโดยทั่วไป "วงจรหยุดแถบก็ให้ผลตอบสนองเชิงความถี่เช่นเดียวกับผลการวัดและจำลองของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้"