บทที่ 4
ผลการศึกษา

ในบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงการทดสอบสายอากาศ โดยเริ่มต้นจากหัวข้อที่ 4.1 ที่จะกล่าวถึงผลการจำลองและทดสอบสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว F ที่นำเสนอใน S. H. Yeh *et al.* [1] เพื่อที่จะศึกษาถึงความถูกต้องของหลักการที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ ก่อนที่จะปรับปรุงโครงสร้างและเปลี่ยนย่านความถี่ไปใช้งานใน 2 ย่านความถี่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ หลังจากนั้น หัวข้อที่ 4.2 จะกล่าวถึงผลการทดสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติในการทำงานของสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์โครงสร้างใหม่ที่นำเสนอ 2 แบบ คือ แบบตัว L หัวกลับ และแบบรูปตัว C โดยสายอากาศโมโนโพลโครงสร้างใหม่ที่มีคุณสมบัติในการทำงานที่ดีที่สุดเพียง 1 ต้นเท่านั้นที่จะถูกเลือกและถูกนำไปสร้างจริงและถูกวัดค่าคุณสมบัติการทำงานจริง (Measurement Results) เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้รับกับผลการทดสอบที่ได้จากการเขียนโปรแกรมจำลองสายอากาศในทางทฤษฎี (Simulation Results) ซึ่งจะถูกอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.3 เป็นหัวข้อสุดท้าย รายละเอียดของแต่ละหัวข้อ มีดังนี้

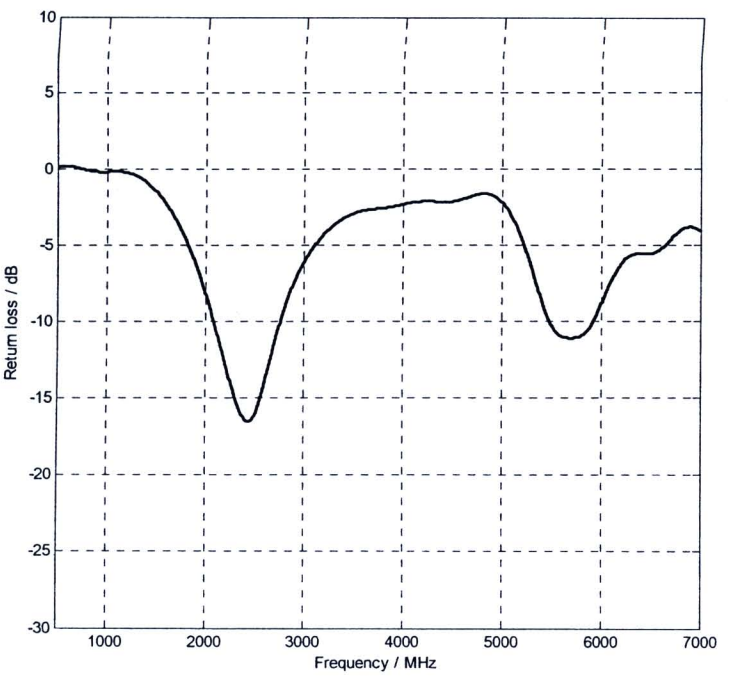
4.1 ผลการจำลองและทดสอบสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว F

จากการที่หัวข้อที่ 3.1 ได้อธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างและหลักการออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูปตัว F (F-Shaped Monopole Antenna) [1] ไปแล้วนั้น ในหัวข้อที่ 4.1 นี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว F ที่ได้รับจากการเขียนโปรแกรมและจำลองตัวสายอากาศโมโนโพลรูปตัว F นี้ในทางทฤษฎี จากการทดสอบพบว่า ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return Loss หรือ S_{11}) ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -16.55 dB และ –11.1 dB ที่ค่าความถี่ 2.44 GHz และ 5.7 GHz ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่า สายอากาศต้นนี้สามารถทำงานได้ดีตามต้องการ ณ ย่านความถี่ต่ำ 2.4 GHz แต่ที่ย่านความถี่สูงจะใช้งานได้จริง ณ ค่าความถี่ที่เลื่อนออกไปจากค่าความถี่ 5.25 GHz ที่ต้องการ ซึ่งอาจจะเป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกราวด์เพลนและขนาดของสตริปตัวนำที่อาจจะต้อง

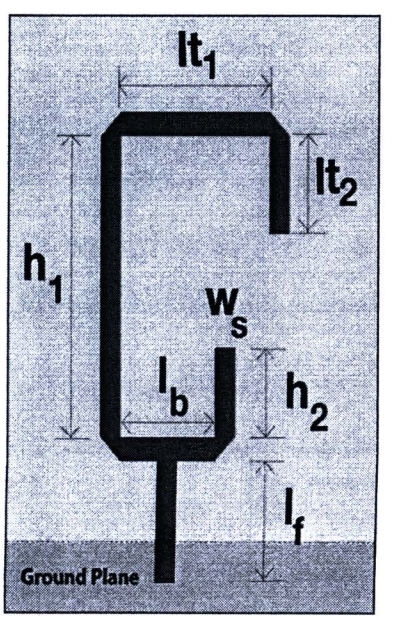
---

[1] S. H. Yeh and K. L. Wong. (2002, July). "Integrated F-shaped monopole antenna for 2.4/5.2 GHz dual-band operation." **Microwave Opt. Technol. Letter. 34.** pp. 24 – 26.

มีการปรับปรุง จึงส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าสูญเสียจากการย้อนกลับที่ค่าความถี่ออกแบบ 5.25 GHz จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้รับ ทำให้ทราบว่า หลักการที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูปตัว F นั้นสามารถจะนำไปใช้ในการออกแบบสายอากาศโมโนโพลที่มีโครงสร้างใหม่แบบอื่นๆ ได้ แต่ทั้งนี้อาจจะต้องมีสตับ (Stub) ต่อออกจากสายอากาศโมโนโพลเพิ่ม



ภาพที่ 4.1 ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับที่ได้รับจากการจำลองสายอากาศโมโนโพลรูปตัว F



ภาพที่ 4.2 สัญลักษณ์ความยาวต่างๆ ของสายอากาศที่นำเสนอ

เติมเพื่อชดเชยผลกระทบของกราวด์เพลนที่มีต่อย่านความถี่สูงและทำการแมชชิ่งอิมพีแดนซ์ จากการศึกษาดังกล่าว จึงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะสร้างสายอากาศโมโนโพลโครงสร้างใหม่ 2 แบบ ได้แก่ แบบรูปตัว L หัวกลับ ซึ่งมีปลายด้านบนยื่นตรงและแบบรูปตัว C ที่มีปลายด้านบนยื่นตรงและมีสตับปองลง เพื่อปรับจูนค่าอิมพีแดนซ์ให้สอดคล้องกับ SMA 50 โอหม์ (Impedance Matching)

อ้างถึงหัวข้อที่ 3.2 การออกแบบสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์โครงสร้างใหม่ที่นำเสนอ ซึ่งได้กำหนดการทำงานของสายอากาศที่ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงไว้ที่ค่าความถี่กลางเท่ากับ 850 MHz และ 2.25 GHz ตามลำดับ ดังนั้น ค่าความยาวของสายอากาศโมโนโพลที่ทำงานย่านความถี่ต่ำนี้จะมีค่าเท่ากับ $L_{low}=h_1+lt_1+lt_2=\lambda_{gl}/4$ และความยาวของสายอากาศโมโนโพลที่ทำงานย่านความถี่สูงนี้จะมีค่าเท่ากับ $L_{high}=lt_1=\lambda_{gh}/4$ โดยสัญลักษณ์ความยาวต่างๆ ของสายอากาศที่กล่าวข้างต้นมีแสดงไว้ในภาพที่ 4.2 และจากสมการที่ 1 และ 2 ในบทที่ 3 เราสามารถคำนวณหาค่าความยาว (L) ของสายอากาศโมโนโพลในหน่วย mm ที่สร้างขึ้นมาใช้งานดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ซึ่งในที่นี้ ค่าความยาวของสายอากาศโมโนโพลที่สร้างขึ้นบนแผ่นวงจรพิมพ์ในทางทฤษฎีจะถูกใช้งานเป็นความยาวหลัก (ความยาวทั้งหมด) ของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอ กล่าวคือ $L_{low}=h_1+lt_1+lt_2=68\,mm$ และความยาวของสายอากาศโมโนโพลที่ทำงานย่านความถี่สูงนี้จะมีค่าเท่ากับ $L_{high}=lt_1=\lambda_{gh}/4=26\,mm$ โดยในที่นี้ จะใช้ความยาว lt_2 และ h_2 ทำหน้าที่ในการปรับการแมทช์ชิ่งอิมพีแดนซ์ให้ได้คุณสมบัติการทำงานของสายอากาศตามที่ต้องการ แต่ทั้งนี้ เพื่อที่จะทำให้การออกแบบสายอากาศที่นำเสนอนั้นง่ายขึ้น จะทำการกำหนดค่า h_2 ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 8 mm และปรับค่าความยาว lt_2 เพียงค่าเดียว

ดังนั้น ในการออกแบบและจำลองสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอต่อไปนี้จะทำการเปลี่ยนค่าความยาวของ h_1, lt_1 และ lt_2 เพื่อที่จะพิจารณาดูว่าความยาวค่าใดที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติการทำงานของสายอากาศมากที่สุด แต่ทั้งนี้ ความยาวทั้งหมดของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอยังคงมีค่าเท่ากับ $L_{low}=h_1+lt_1+lt_2=68\,mm$ โดยค่าความยาวของ lt_1 และ lt_2 จะเกี่ยวข้องกันโดยตรง ในการออกแบบสายอากาศต่อไปนี้จะปรับค่าความยาว lt_2 ให้มีค่าความยาวตั้งแต่ 0 - 9 mm ซึ่งค่าความยาว h_1 และ lt_1 จะต้องเปลี่ยนแปลงด้วย ดังแสดงในตารางการจำลอง

ตารางที่ 4.1 ค่าความยาวของสายอากาศโมโนโพล (หน่วย mm)

ค่า L ที่ใช้งานในอากาศ	ค่า L ที่ใช้งานบนแผ่นวงจรพิมพ์
$L_{low}\approx\frac{\lambda_0}{4}=88.23\,mm$ (ที่ความถี่ 850 MHz)	$L_{low}\approx\frac{\lambda_{gl}}{4}=67.9\approx 68\,mm$
$L_{high}\approx\frac{\lambda_0}{4}=33.33\,mm$ (ที่ความถี่ 2.25 GHz)	$L_{high}\approx\frac{\lambda_{gh}}{4}=25.6\approx 26\,mm$

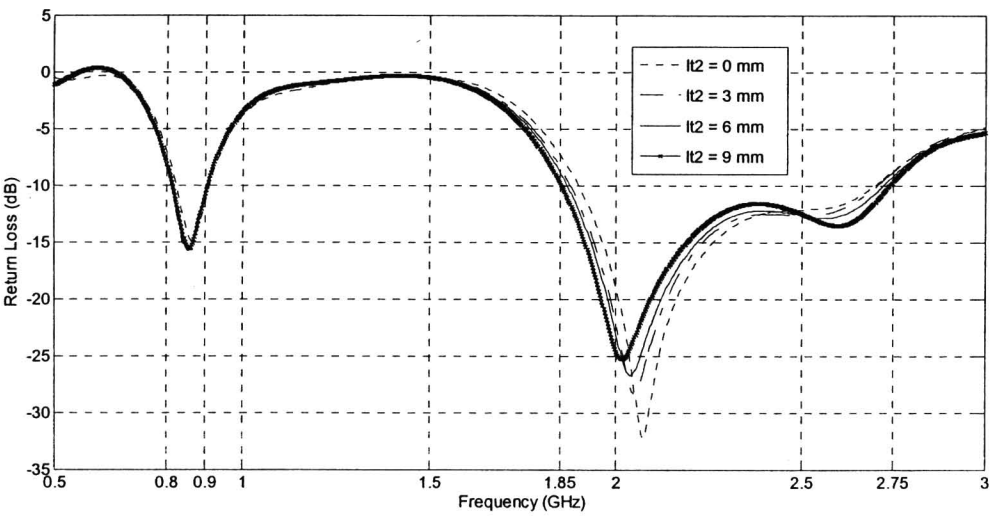
4.2 ผลการจำลองและทดสอบสายอากาศโมโนโพลรูปตัว L หัวกลับและรูปตัว C ที่ความยาวต่าง ๆ

4.2.1 สายอากาศมีค่า $h_1 = 37\,mm$ คงที่ ส่วน lt_1 และ lt_2 มีค่าที่เปลี่ยนแปลง

อ้างถึงความยาวทั้งหมดของสายอากาศโมโนโพลมีค่าเท่ากับ $L_{low}=h_1+lt_1+lt_2=68\,mm$ เมื่อกำหนดค่า $h_1 = 37\,mm$ คงที่และค่าความยาว lt_2 มีค่าตั้งแต่ 0 mm ไปจนถึง 9 mm ดังนั้นค่าความยาวที่เหลือคือค่า lt_1 จะมีค่าดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 หลังจากที่ได้ทำการกำหนดค่าความยาวต่างๆ ให้แก่สตริปตัวนำของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอแล้ว เราจะทำการจำลองสายอากาศที่มีความยาวต่างๆ เหล่านี้ขึ้นมา เพื่อที่จะพิจารณาดูว่าความยาวค่าใดที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติการทำงานของสายอากาศมากที่สุด โดยภาพที่ 4.3 แสดงค่า S_{11} (Return Loss) และตารางที่ 4.2 แสดงค่า S_{11} และแบนด์วิดธ์ของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอที่ได้รับจากการจำลองในทางทฤษฎี เมื่อกำหนดค่า $h_1 = 37\,mm$ คงที่

ตารางที่ 4.2 ค่า Return Loss และ Bandwidth ของสายอากาศเมื่อกำหนดค่า $h_1 = 37\,mm$ คงที่

h_1 (mm)	lt_1 (mm)	lt_2 (mm)	Min. Return Loss of Lower Freq.	Min. Return Loss of Higher Freq.	Bandwidth of Lower Freq.	Bandwidth of Higher Freq.
37	31	0	-15 dB	-32.5 dB	90 MHz	700 MHz
37	28	3	-15 dB	-28 dB	90 MHz	750 MHz
37	25	6	-15.5 dB	-26.5 dB	90 MHz	750 MHz
37	22	9	-16 dB	-25 dB	90 MHz	950 MHz



ภาพที่ 4.3 ผลการจำลองค่า Return Loss เมื่อกำหนดค่า h_1 = 37 mm คงที่

ภาพที่ 4.3 แสดงผลการจำลองค่า S_{11} เมื่อกำหนดค่า h_1 = 37 mm คงที่ ซึ่งมีรายละเอียดของผลการเปรียบเทียบและวิเคราะห์คุณลักษณะการทำงานในแต่ละย่านความถี่ใช้งาน ดังนี้

1. เมื่อกำหนดค่า h_1 = 37 mm คงที่และเปลี่ยนแปลงค่า lt_1 และ lt_2 ไปเป็นค่าความยาวต่างๆ อีก 4 กรณี พบว่า ทั้ง 4 กรณีดังกล่าวให้ค่า S_{11} ที่ย่านความถี่ต่ำมีค่าต่ำสุดทั้งหมดใกล้เคียงกันคือประมาณ -15 dB และค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่ต่ำก็กว้างพอๆ กันทั้ง 4 กรณี

2. กรณีที่ 1 ค่า h_1 = 37 mm และค่า lt_1 = 31 mm เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่สูงที่น้อยที่สุด แต่ค่า S_{11} มีค่าต่ำสุดเท่ากับ -32.5 dB ณ ค่าความถี่เท่ากับ 2.1 GHz เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ ที่เหลืออีก 3 กรณี

3. กรณีที่ 4 ค่า h_1 = 37 mm และค่า lt_1 = 22 mm เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่สูงที่กว้างมากที่สุด แต่ค่า S_{11} มีค่าสูงที่สุดประมาณ -25 dB ณ ค่าความถี่ 2.02 GHz

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า กรณีที่ 4 เป็นกรณีที่เหมาะสมมากที่สุดและควรนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างสายอากาศ เนื่องจากค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่สูงที่กว้างมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ ที่เหลืออีก 3 กรณี ถึงแม้ว่าค่า S_{11} ที่ได้รับของย่านความถี่สูงจะมีค่าสูงที่สุดก็ตาม อีกทั้ง ค่า S_{11} ที่ได้รับใน 2 ย่านความถี่ใช้งานของกรณีที่ 4 ก็มีค่าที่ต่ำกว่า -10 dB ตามที่ออกแบบไว้

4.2.2 สายอากาศมีค่า $h_1 = 40\,mm$ คงที่ ส่วน lt_1 และ lt_2 มีค่าที่เปลี่ยนแปลง

อ้างถึงความยาวทั้งหมดของสายอากาศโมโนโพลมีค่าเท่ากับ $L_{low} = h_1 + lt_1 + lt_2 = 68\,mm$ เมื่อกำหนดค่า $h_1 = 40\,mm$ คงที่และค่าความยาว lt_2 มีค่าตั้งแต่ 0 mm ไปจนถึง 9 mm ดังนั้นค่าความยาวที่เหลือคือค่า lt_1 จะมีค่าดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 หลังจากที่ได้ทำการกำหนดค่าความยาวต่างๆ ให้แก่สตริปตัวนำของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอแล้ว เราจะทำการจำลองสายอากาศที่มีความยาวต่างๆ เหล่านี้ขึ้นมา เพื่อที่จะพิจารณาดูว่าความยาวค่าใดที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติการทำงานของสายอากาศมากที่สุด โดยภาพที่ 4.4 แสดงค่า S_{11} และตารางที่ 4.2 แสดงค่า S_{11} และแบนด์วิดธ์ของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอที่ได้รับจากการจำลองในทางทฤษฎี เมื่อกำหนดค่า $h_1 = 40\,mm$ คงที่

ภาพที่ 4.4 แสดงผลการจำลองค่า Return Loss เมื่อกำหนดค่า $h_1 = 40\,mm$ คงที่ ซึ่งมีรายละเอียดของผลการเปรียบเทียบและวิเคราะห์คุณลักษณะการทำงานในแต่ละย่านความถี่ใช้งาน ดังนี้

1. เมื่อกำหนดค่า $h_1 = 40\,mm$ คงที่และเปลี่ยนแปลงค่า lt_1 และ lt_2 ไปเป็นค่าความยาวต่างๆ อีก 4 กรณี พบว่า ทั้ง 4 กรณีดังกล่าวให้ค่า S_{11} ที่ย่านความถี่ต่ำมีค่าต่ำสุดทั้งหมดใกล้เคียงกันคือประมาณ -15 dB และค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่ต่ำก็กว้างพอๆ กันทั้ง 4 กรณี

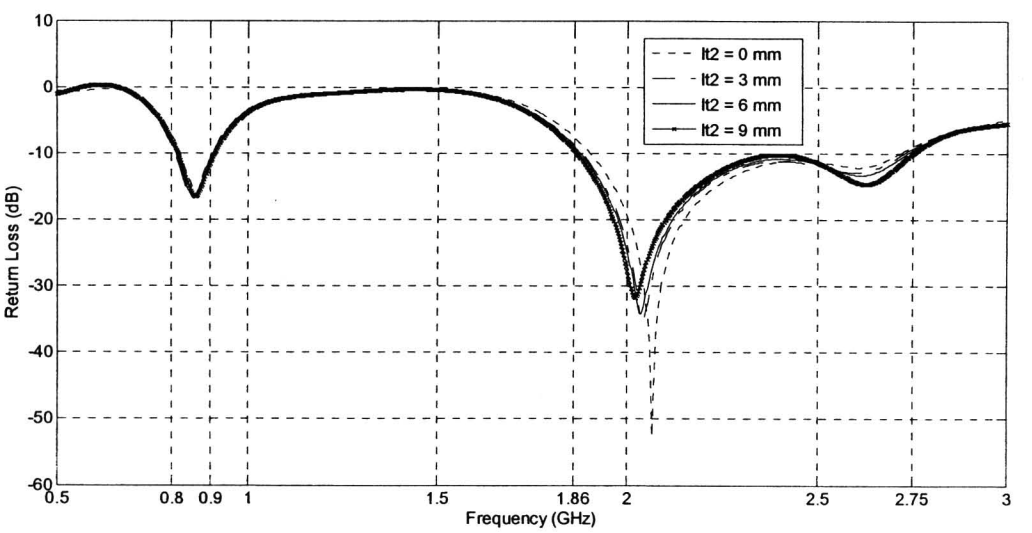
2. กรณีที่ 1 ค่า $h_1 = 40\,mm$ และค่า lt_1 = 28 mm เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่สูงที่น้อยที่สุด แต่ค่า S_{11} มีค่าต่ำสุดเท่ากับ -52 dB ณ ค่าความถี่เท่ากับ 2.1 GHz เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ ที่เหลืออีก 3 กรณี

3. กรณีที่ 4 ค่า $h_1 = 40\,mm$ และค่า lt_1 = 25 mm เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่สูงที่พอๆ กันกับ 3 กรณีที่เหลือ แต่ค่า S_{11} มีค่าสูงกว่ากรณีแรกที่ค่าความถี่ 2.02 GHz

สรุปได้ว่า ค่า $h_1 = 40\,mm$ จะมีค่า S_{11} ในย่านความถี่สูงมีค่ามากกว่าที่ $h_1 = 37\,mm$ ดังนั้นจึงควรนำขนาดความยาว $h_1 = 37\,mm$ ที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.1 ไปใช้ในการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอมากกว่า

ตารางที่ 4.3 ค่า Return Loss และ Bandwidth ของสายอากาศเมื่อกำหนดค่า $h_1 = 40\,mm$ คงที่

h_1 (mm)	lt_1 (mm)	lt_2 (mm)	Min. Return Loss of Lower Freq.	Min. Return Loss of Higher Freq.	Bandwidth of Lower Freq.	Bandwidth of Higher Freq.
40	28	0	-15 dB	-52 dB	100 MHz	800 MHz
40	25	3	-15 dB	-35 dB	100 MHz	850 MHz
40	22	6	-15 dB	-33 dB	100 MHz	875 MHz
40	19	9	-15 dB	-31dB	100 MHz	900 MHz



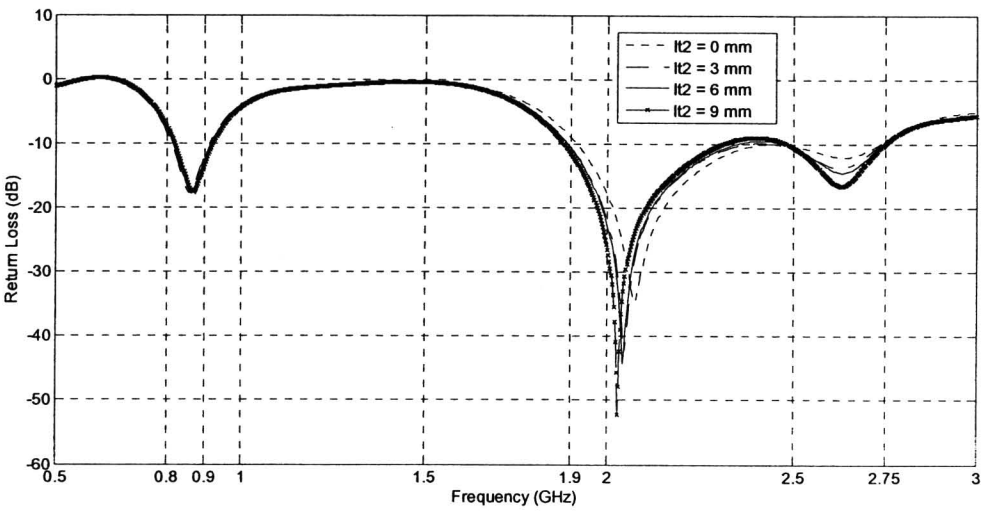
ภาพที่ 4.4 ผลการจำลองค่า Return Loss เมื่อกำหนดค่า $h_1 = 40\,mm$ คงที่

4.2.3 สายอากาศมีค่า $h_1 = 43\,mm$ คงที่ ส่วน lt_1 และ lt_2 มีค่าที่เปลี่ยนแปลง

อ้างถึงความยาวทั้งหมดของสายอากาศโมโนโพลมีค่าเท่ากับ $L_{low}=h_1+lt_1+lt_2= 68\,mm$ เมื่อกำหนดค่า $h_1 = 43\,mm$ คงที่และค่าความยาว lt_2 มีค่าตั้งแต่ 0 mm ไปจนถึง 9 mm ดังนั้นค่าความยาวที่เหลือคือค่า lt_1 จะมีค่าดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 หลังจากที่ได้ทำการกำหนดค่าความยาวต่างๆ ให้แก่สตริปตัวนำของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอแล้ว เราจะทำการจำลองสายอากาศที่มีความยาวต่างๆ เหล่านี้ขึ้นมา เพื่อที่จะพิจารณาดูว่าความยาวค่าใดที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติการทำงานของสายอากาศมากที่สุด โดยภาพที่ 4.4 แสดงค่า S_{11} และตารางที่ 4.5 แสดงค่า S_{11} และแบนด์วิดธ์ของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอที่ได้รับจากการจำลองในทางทฤษฎี เมื่อกำหนดค่า $h_1 = 43\,mm$ คงที่

ตารางที่ 4.4 ค่า Return Loss และ Bandwidth ของสายอากาศเมื่อกำหนดค่า $h_1 = 43\,mm$ คงที่

h_1 (mm)	lt_1 (mm)	lt_2 (mm)	Min. Return Loss of Lower Freq.	Min. Return Loss of Higher Freq.	Bandwidth of Lower Freq.	Bandwidth of Higher Freq.
43	25	0	-18 dB	-35 dB	100 MHz	850 MHz
43	22	3	-18 dB	-40 dB	100 MHz	870 MHz
43	19	6	-18 dB	-44 dB	100 MHz	870 MHz
43	16	9	-18 dB	-52 dB	100 MHz	870 MHz



ภาพที่ 4.5 ผลการจำลองค่า Return Loss เมื่อกำหนดค่า h_1 = 43 mm คงที่

ภาพที่ 4.5 แสดงผลการจำลองค่า Return Loss เมื่อกำหนดค่า h_1 = 43 mm คงที่ ซึ่งมีรายละเอียดผลการเปรียบเทียบและวิเคราะห์คุณลักษณะการทำงานในแต่ละย่านความถี่ใช้งาน ดังนี้

1. เมื่อกำหนดค่า h_1 = 43 mm คงที่และเปลี่ยนแปลงค่า lt_1 และ lt_2 ไปเป็นค่าความยาวต่างๆ อีก 4 กรณี พบว่า ทั้ง 4 กรณีดังกล่าวให้ค่า S_{11} ที่ย่านความถี่ต่ำมีค่าต่ำสุดทั้งหมดใกล้เคียงกันคือประมาณ -18 dB และค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่ต่ำก็กว้างพอๆ กันทั้ง 4 กรณี

2. กรณีที่ 1 ค่า h_1 = 43 mm และค่า lt_1 = 25 mm เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่สูงที่น้อยที่สุด แต่ค่า S_{11} มีค่าต่ำสุดเท่ากับ -35 dB ณ ค่าความถี่เท่ากับ 2.1 GHz เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ ที่เหลืออีก 3 กรณี

3. กรณีที่ 4 ค่า h_1 = 43 mm และค่า lt_1 = 22 mm เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่สูงที่พอๆ กันกับ 3 กรณีที่เหลือ แต่ค่า S_{11} มีค่าต่ำกว่ากรณีแรกที่ ค่าความถี่ 2.02 GHz

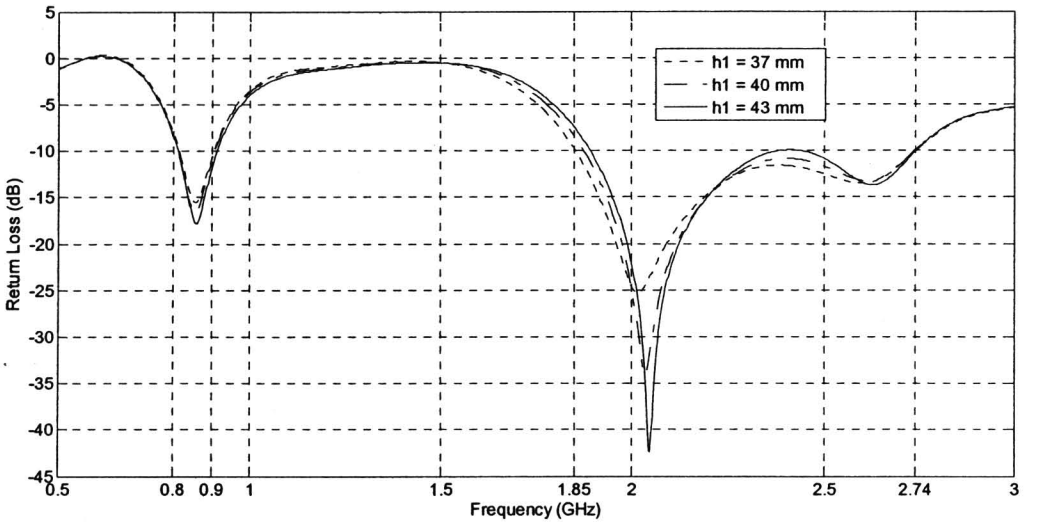
สรุปได้ว่า ค่า $h_1 = 43\,mm$ จะมีค่า S_{11} ในย่านความถี่สูงมีค่ามากกว่าที่ $h_1 = 37\,mm$ เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.2.2 ดังนั้น จึงควรนำขนาดความยาว $h_1 = 37\,mm$ ไปใช้ในการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอมากที่สุด

4.2.4 สายอากาศมีค่า $lt_1 = 22\,mm$ คงที่ ส่วน h_1 และ lt_2 มีค่าที่เปลี่ยนแปลง

อ้างถึงความยาวทั้งหมดของสายอากาศโมโนโพลมีค่าเท่ากับ $L_{low} = h_1 + lt_1 + lt_2 = 68\,mm$ เมื่อกำหนดค่า $lt_1 = 22\,mm$ คงที่และค่าความยาว h_1 และ lt_2 มีค่าที่เปลี่ยนแปลงดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 หลังจากที่ได้ทำการกำหนดค่าความยาวต่างๆ ให้แก่สตริปตัวนำของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอแล้ว เราจะทำการจำลองสายอากาศที่มีความยาวต่างๆ เหล่านี้ขึ้นมา เพื่อที่จะพิจารณาดูว่าความยาวค่าใดที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติการทำงานของสายอากาศมากที่สุด โดยภาพที่ 4.6 แสดงค่า S_{11} และตารางที่ 4.5 แสดงค่า S_{11} และแบนด์วิดธ์ของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอที่ได้รับจากการจำลองในทางทฤษฎี เมื่อกำหนดค่า $lt_1 = 22\,mm$ คงที่

ตารางที่ 4.5 ค่า Return Loss และ Bandwidth ของสายอากาศเมื่อกำหนดค่า $lt_1 = 22\,mm$ คงที่

h_1 (mm)	lt_1 (mm)	lt_2 (mm)	Min. Return Loss of Lower Freq.	Min. Return Loss of Higher Freq.	Bandwidth of Lower Freq.	Bandwidth of Higher Freq.
37	22	9	-16 dB	-25 dB	90 MHz	950 MHz
40	22	6	-15 dB	-33 dB	100 MHz	875 MHz
43	22	3	-18 dB	-40 dB	100 MHz	870 MHz



ภาพที่ 4.6 ผลการจำลองค่า Return Loss เมื่อกำหนดค่า $lt_1 = 22\,mm$ คงที่

ภาพที่ 4.6 แสดงผลการจำลองค่า Return Loss เมื่อกำหนดค่า $lt_1 = 22\,mm$ คงที่ ซึ่งมีรายละเอียดของผลการเปรียบเทียบและวิเคราะห์คุณลักษณะการทำงานในแต่ละย่านความถี่ ดังนี้

1. เมื่อกำหนดค่า $lt_1 = 22\,mm$ คงที่และเปลี่ยนแปลงค่า h_1 และ lt_2 ไปเป็นค่าความยาวต่างๆ อีก 3 กรณี พบว่า ทั้ง 3 กรณีดังกล่าวให้ค่า S_{11} ที่ย่านความถี่ต่ำมีค่าต่ำสุดทั้งหมดใกล้เคียงกันคือ -15 dB แต่ไม่เกิน -18 dB และค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่ต่ำก็กว้างพอๆ กันทั้ง 3 กรณี

2. กรณีที่ 1 ค่า $lt_1 = 22\,mm$ และค่า $h_1 = 37\,mm$ เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่สูงที่มากที่สุด แต่ให้ค่า S_{11} มีค่าที่สูงที่สุดเท่ากับ -25 dB ณ ค่าความถี่เท่ากับ 2 GHz เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ ที่เหลืออีก 2 กรณี ซึ่ง ที่ได้รับมีค่าที่ต่ำกว่า -10 dB ตามที่กำหนดไว้ จึงถือว่ามีแบนด์วิดธ์กว้างที่สุด ก็ย่อมรองรับความถี่ในการใช้งาน ณ ย่านความถี่สูงที่มากกว่า

3. กรณีที่ 2 ค่า $lt_1 = 22\,mm$ และค่า $h_1 = 40\,mm$ เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่สูงเท่ากับ 875 MHz และให้ค่า S_{11} มีค่าปานกลางเท่ากับ -33 dB ณ ความถี่ 2.05 GHz

4. กรณีที่ 3 ค่า $lt_1 = 22\,mm$ และค่า $h_1 = 43\,mm$ เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่สูงเท่ากับ 840 MHz และให้ค่า S_{11} มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ -40 dB ณ ความถี่ 2.08 GHz

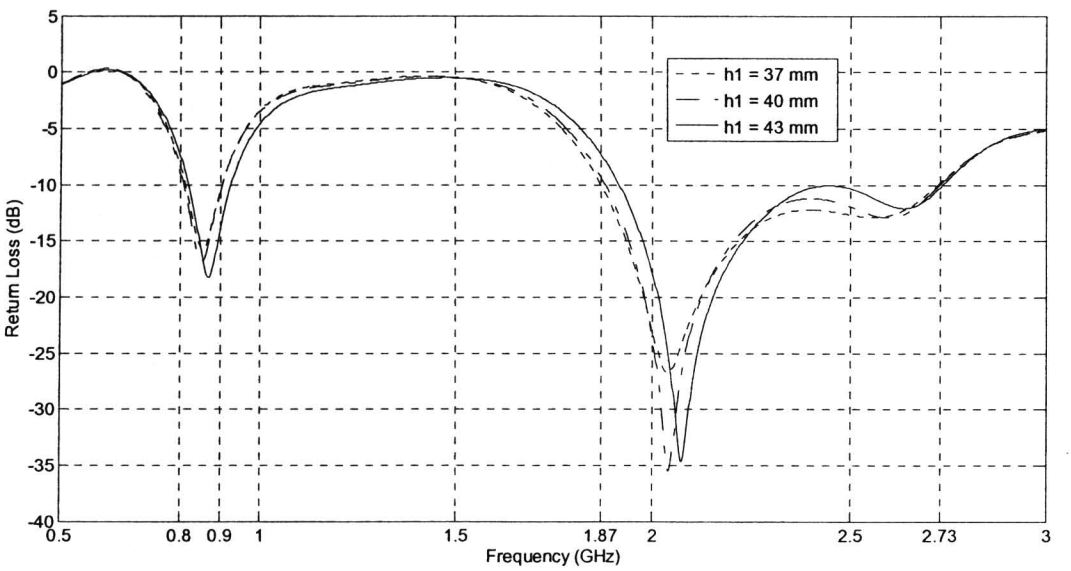
สรุปได้ว่า ถึงแม้ว่าค่าความยาว $h_1 = 40\,mm$ และ $h_1 = 43\,mm$ จะให้ค่า S_{11} ในย่านความถี่สูงมีค่าต่ำ แต่แบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้มีค่าที่น้อยกว่ากรณีที่ 1 ที่ใช้ค่า $h_1 = 37\,mm$ ดังนั้น จึงควรนำขนาดความยาว $h_1 = 37\,mm$ ไปใช้ในการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองและการทดสอบที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา

4.2.5 สายอากาศมีค่า $lt_1 = 25\,mm$ คงที่ ส่วน h_1 และ lt_2 มีค่าที่เปลี่ยนแปลง

อ้างถึงความยาวทั้งหมดของสายอากาศโมโนโพลมีค่าเท่ากับ $L_{low}=h_1+lt_1+lt_2=68\,mm$ เมื่อกำหนดค่า $lt_1 = 25\,mm$ คงที่และค่าความยาว h_1 และ lt_2 มีค่าที่เปลี่ยนแปลงดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 หลังจากที่ได้ทำการกำหนดค่าความยาวต่างๆ ให้แก่สตริปตัวนำของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอแล้ว เราจะทำการจำลองสายอากาศที่มีความยาวต่างๆ เหล่านี้ขึ้นมา เพื่อที่จะพิจารณาดูว่าความยาวค่าใดที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติการทำงานของสายอากาศมากที่สุด โดยภาพที่ 4.7 แสดงค่า S_{11} และตารางที่ 4.6 แสดงค่า S_{11} และแบนด์วิดธ์ของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอที่ได้รับจากการจำลองในทางทฤษฎี เมื่อกำหนดค่า $lt_1 = 25\,mm$ คงที่

ตารางที่ 4.6 ค่า Return Loss และ Bandwidth ของสายอากาศเมื่อกำหนดค่า $lt_1 = 25\,mm$ คงที่

h_1 (mm)	lt_1 (mm)	lt_2 (mm)	Min. Return Loss of Lower Freq.	Min. Return Loss of Higher Freq.	Bandwidth of Lower Freq.	Bandwidth of Higher Freq.
37	25	6	-15.5 dB	-26.5 dB	90 MHz	750 MHz
40	25	3	-15 dB	-35 dB	100 MHz	850 MHz
43	25	0	-18 dB	-35 dB	100 MHz	850 MHz



ภาพที่ 4.7 ผลการจำลองค่า Return Loss เมื่อกำหนดค่า $lt_1 = 25\,mm$ คงที่

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ภาพที่ 4.7 แสดงผลการจำลองค่า Return Loss เมื่อกำหนดค่า $lt_1 = 25\ mm$ คงที่ ซึ่งมีรายละเอียดของผลการเปรียบเทียบและวิเคราะห์คุณลักษณะการทำงานในแต่ละย่านความถี่ ดังนี้

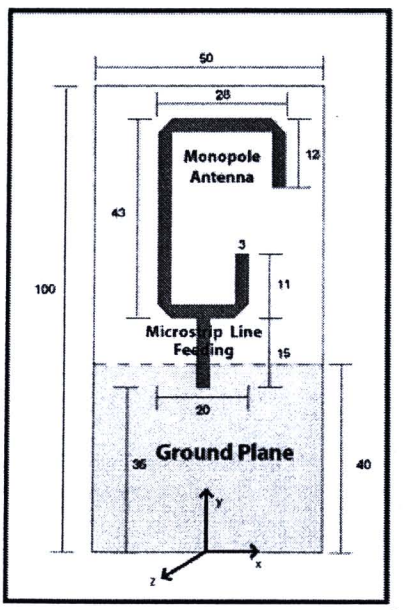
1. เมื่อกำหนดค่า $lt_1 = 25\ mm$ คงที่และเปลี่ยนแปลงค่า h_1 และ lt_2 ไปเป็นค่าความยาวต่างๆ อีก 3 กรณี พบว่า ทั้ง 3 กรณีดังกล่าวให้ค่า S_{11} ที่ย่านความถี่ต่ำมีค่าใกล้เคียงกันคือ -15 dB ไม่เกิน -18 dB และค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่ต่ำก็กว้างพอกันทั้ง 3 กรณี คือประมาณ 100 dB
2. กรณีที่ 1 ค่า $lt_1 = 25\ mm$ และค่า $h_1 = 37\ mm$ เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่สูงที่มากที่สุด แต่ให้ค่า S_{11} มีค่าที่สูงที่สุดเท่ากับ -26.5 dB ณ ค่าความถี่เท่ากับ 2.03 GHz แต่แบนด์วิดธ์มีค่ากว้างที่สุดมีค่าเท่ากับ 750 MHz เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่เหลืออีก 2 กรณี
3. กรณีที่ 2 ค่า $lt_1 = 25\ mm$ และค่า $h_1 = 40\ mm$ เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่สูงเท่ากับ 850 MHz และให้ค่า S_{11} มีค่าเท่ากับ -35 dB ณ ความถี่ 2.05 GHz
4. กรณีที่ 3 ค่า $lt_1 = 22\ mm$ และค่า $h_1 = 43\ mm$ เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่สูงเท่ากับ 850 MHz และให้ค่า S_{11} มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ -35 dB ณ ความถี่ 2.1 GHz

สรุปได้ว่า ถึงแม้ว่าค่าความยาว $h_1 = 40\ mm$ และ $h_1 = 43\ mm$ จะให้ค่า S_{11} ในย่านความถี่สูงมีค่าต่ำ แต่แบนด์วิดธ์ที่ใช้งานได้มีค่าที่น้อยกว่ากรณีที่ 1 ที่ใช้ค่า $h_1 = 37\ mm$ อย่างไรก็ตาม ค่าแบนด์วิดธ์ที่ได้รับในกรณีนี้มีค่าน้อยกว่าค่า $lt_1 = 22\ mm$ และค่า $h_1 = 37\ mm$ จึงอาจจะกล่าวได้ว่า "ขนาดความยาวค่า $lt_1 = 22\ mm$ และค่า $h_1 = 37\ mm$ จึงเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอมากที่สุด"

บทสรุปและการวิเคราะห์หัวข้อ 4.2 ผลการจำลองและทดสอบสายอากาศโมโนโพลรูปตัว L หัวกลับและรูปตัว C ที่ความยาวต่างๆ กล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

1. ค่าความยาว $h_1 = 37\ mm$ เป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่สำคัญที่ให้แบนด์วิดธ์ในย่านความถี่สูงที่กว้างมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบค่าความยาว h_1 ค่าอื่นๆ
2. จากนั้น เมื่อพิจารณาค่า $h_1 = 37\ mm$ คงที่ และทดลองพิจารณาค่าความยาว $lt_2 = 9\ mm$ (สตับงอลง ทำให้มองเป็นรูปตัว C) เป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่ช่วยทำให้แบนด์วิดธ์ในย่านความถี่สูงมีค่าที่กว้างมากที่สุดเช่นกัน
3. สุดท้าย เมื่อพิจารณาค่า $h_1 = 37\ mm$ และค่า $lt_2 = 9\ mm$ เป็นค่าคงที่ เราจะได้ค่าความยาว lt_1 ที่เหลือจึงมีค่าเท่ากับ 22 mm จึงเป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดธ์ในย่านความถี่สูงที่กว้างมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกรณีอื่น ๆ
4. สรุปได้ว่า "ขนาดความยาวค่า $h_1 = 37\ mm$, ค่า $lt_1 = 22\ mm$, และ ค่า $lt_2 = 9\ mm$ รวมถึงเมื่อพิจารณาค่าความยาว $h_2 = 8\ mm$ เป็นคงที่ จึงเป็นค่าความยาวที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอมากที่สุด"

หลังจากที่ได้ทราบค่าความยาวที่เหมาะสมดังแสดงในภาพที่ 4.8 ต่อการนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอแล้ว กล่าวคือ "ค่า $h_1 = 37\,mm$, ค่า $lt_1 = 22\,mm$, ค่า $lt_2 = 9\,mm$, และค่า $h_2 = 8\,mm$ เป็นคงที่" เราจึงนำค่าความยาวเหล่านี้ไปสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัว C ที่นำเสนอจริงบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ที่มีความหนาเป็น h มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเป็น ε_R และอาศัยกราวด์เพลนของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเป็นกราวด์เพลนของสายอากาศ และมีการป้อนกำลังงานแก่สายอากาศผ่านไมโครสตริป เนื่องจาก FR-4 เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีราคาถูกและหาซื้อง่าย อีกทั้งสายอากาศนี้มีค่าความถี่ใช้งานไม่เกิน 3 - 4 GHz จึงทำให้สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ได้ โดยภาพถ่ายของสายอากาศที่นำเสนอแสดงไว้ในภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.8 ขนาดของสายอากาศโมโนโพลรูปตัว C และแผ่น FR-4 ที่นำเสนอ (หน่วย mm)

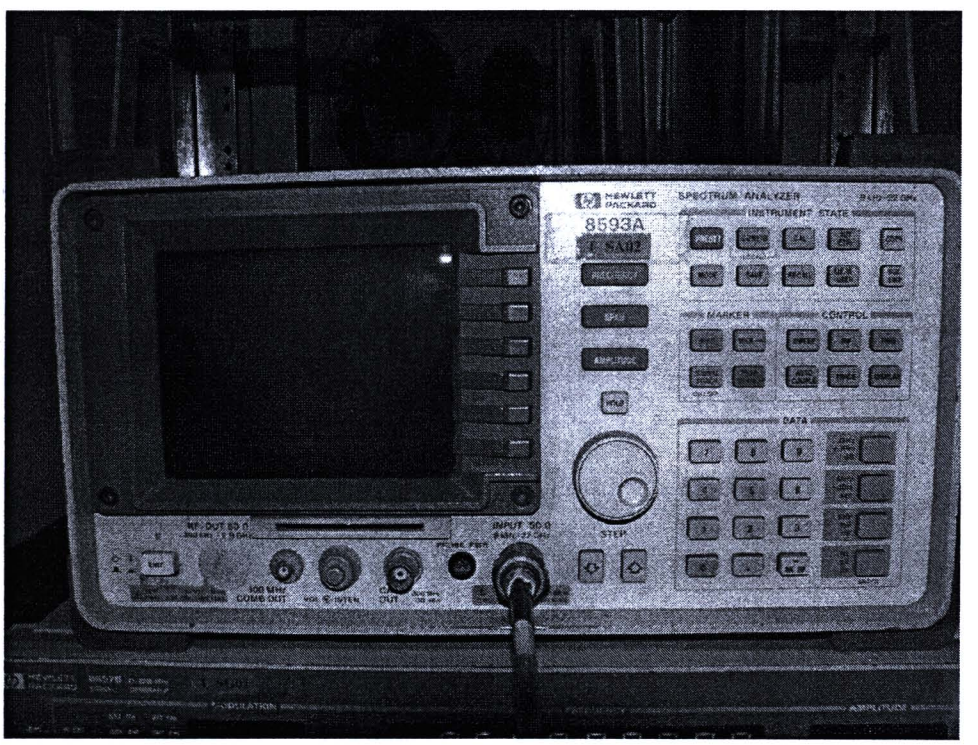
ภาพที่ 4.9 ภาพถ่ายของสายอากาศโมโนโพลรูปตัว C ที่นำเสนอ

4.3 ผลการจำลองและทดสอบสายอากาศโมโนโพลรูปตัว C

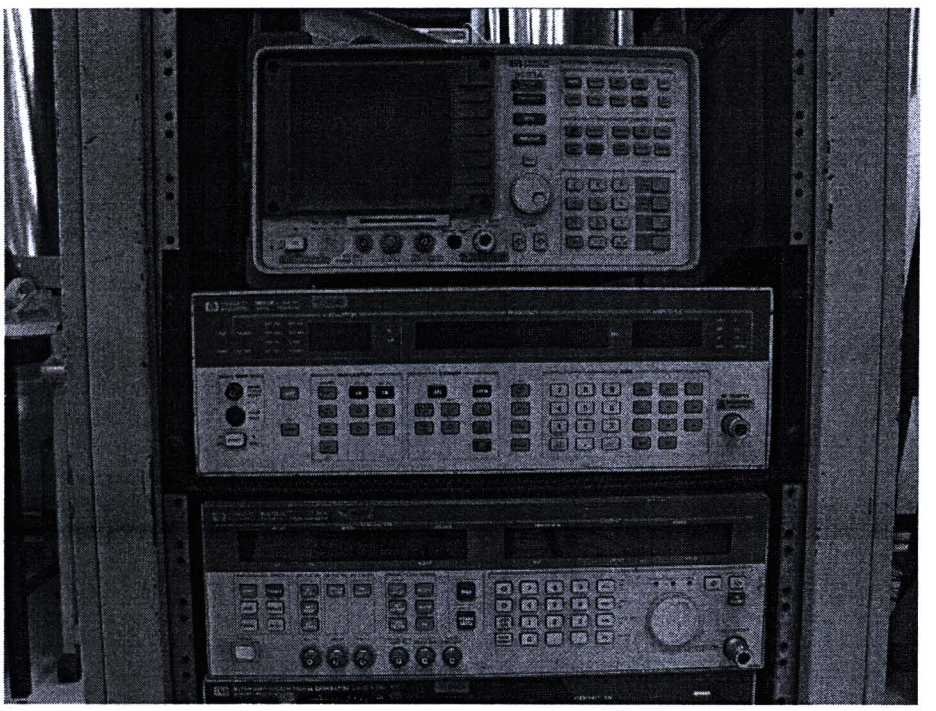
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองและทดสอบสายอากาศโมโนโพลโครงสร้างใหม่ที่นำเสนอแบบรูปตัว C ซึ่งเป็นโครงสร้างใหม่และให้คุณสมบัติการทำงานเป็นไปตามที่ต้องการ โดยมีขนาดความยาวค่าต่างๆ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.8 สายอากาศที่สร้างเสร็จแล้วดังในภาพที่ 4.9 จะถูกวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติการทำงานของสายอากาศที่นำเสนอ ดังนี้

1. วัดค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return Loss) โดยใช้เครื่องเน็ตเวิร์กอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) HP8753E (ย่านความถี่ใช้งาน 30 kHz – 3 GHz)
2. วัดระดับกำลังสัญญาณเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ของสายอากาศโดยใช้เครื่อง Signal Generator HP8657B (ย่านความถี่ใช้งาน 0.1 MHz – 2060 MHz), เครื่อง Signal Generator HP83731A (ย่านความถี่ใช้งาน 1 GHz – 20 GHz) และสเปกตรัมอนาไลเซอร์ (Spectrum Analyzer) HP8593A (ย่านความถี่ใช้งาน 9 kHz – 22 GHz)

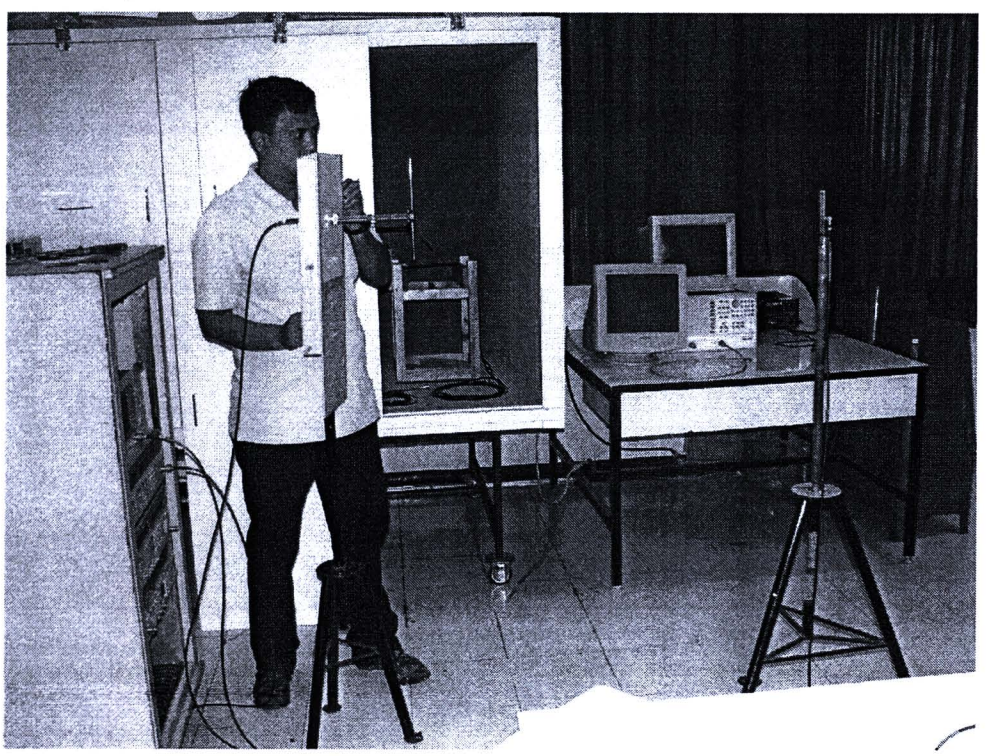
ภาพถ่ายของเครื่องมือวัดที่ใช้งานและภาพถ่ายเหตุการณ์ต่างๆ ในขณะทำการทดสอบสายอากาศที่นำเสนอที่แสดงไว้ในภาพที่ 4.10 – 4.12



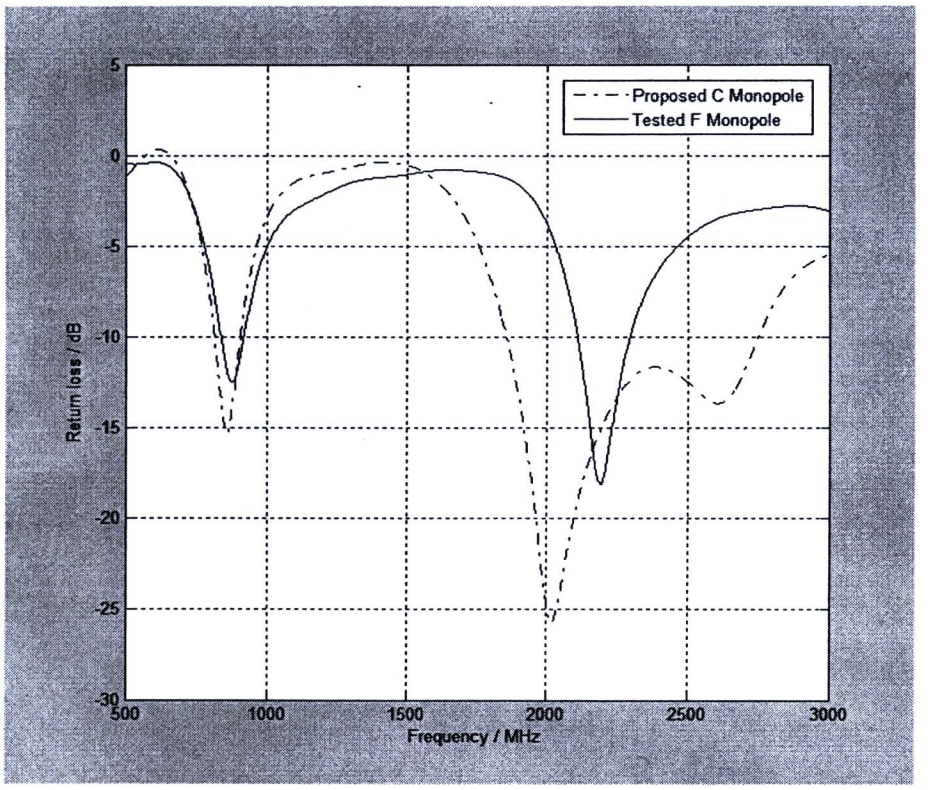
ภาพที่ 4.10 ภาพถ่ายของเครื่องสเปกตรัมอนาไลเซอร์ (ย่านความถี่ใช้งาน 9 kHz – 22 GHz)



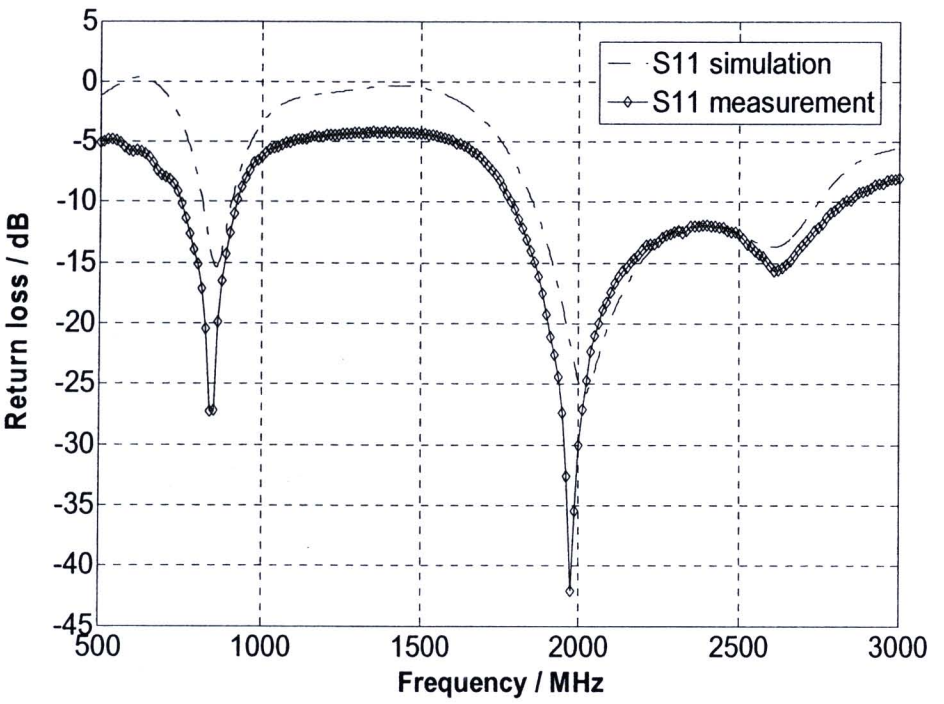
ภาพที่ 4.11 ภาพถ่าย Signal Generator HP8657B (ย่านความถี่ใช้งาน 0.1 MHz – 2060 MHz) และ Signal Generator HP83731A (ย่านความถี่ใช้งาน 1 GHz – 20 GHz)



ภาพที่ 4.12 ภาพถ่ายเหตุการณ์ต่างๆ ในขณะทำการทดสอบสายอากาศที่นำเสนอ



ภาพที่ 4.13 ค่า Return Loss (S_{11}) ที่ได้จากการจำลองสายอากาศรูปตัว F กับตัว C ที่นำเสนอ



ภาพที่ 4.14 ค่า Return Loss (S_{11}) ที่ได้จากการจำลองและวัดสายอากาศที่นำเสนอ

ตารางที่ 4.7 ย่านความถี่ใช้งานของสายอากาศโมโนโพลรูปตัว C ที่ได้การจำลองและทดลอง

	ผลการจำลองสายอากาศ	ผลจากการทดสอบสายอากาศ
ย่านความถี่ต่ำ	807 – 891 MHz	749 – 922 MHz
ย่านความถี่สูง	1.828 – 2.810 GHz	1.789 – 2.831 GHz

ในเบื้องต้น จะทำการจำลองสายอากาศโมโนโพลรูปตัว F ขึ้นมาเพื่อเปรียบเทียบผลการทำงานกับสายอากาศโมโนโพลรูปตัว C ที่นำเสนอในภาพที่ 4.8 ที่ย่านความถี่ 850 MHz และ 2.25 GHz โดยสายอากาศโมโนโพลรูปตัว F มีความยาวของสตริปตัวนำ ณ ย่านความถี่ต่ำและสูงเท่ากับ 74 mm และ 23 mm ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการย้อนกลับ หรือ Return Loss (S_{11}) ที่ได้จากการจำลองสายอากาศโมโนโพลรูปตัว F กับตัว C ที่นำเสนอ กล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

1. สายอากาศโมโนโพลรูปตัว F ให้ค่า S_{11} ที่ต่ำสุด -12.5 dB ที่ความถี่ 860 MHz และมีค่าเท่ากับ -12 dB ที่ความถี่ 850 MHz และมีค่าแบนด์วิดธ์อิมพีแดนซ์ 70 MHz ซึ่งค่าการทำงานที่ย่านความถี่ต่ำเหล่านี้มีค่าที่น้อยกว่าสายอากาศโมโนโพลรูปตัว C ที่นำเสนอ ดังในภาพที่ 4.13

2. สายอากาศโมโนโพลรูปตัว F ให้ค่า S_{11} ที่ต่ำสุด -18 dB ที่ความถี่ 2.21 GHz และมีค่าเท่ากับ -13.5 dB ที่ความถี่ 2.25 GHz และมีค่าแบนด์วิดธ์อิมพีแดนซ์ 180 MHz ซึ่งค่าการทำงานที่ย่านความถี่สูงเหล่านี้มีค่าที่น้อยกว่าสายอากาศโมโนโพลรูปตัว C ที่นำเสนอ ดังในภาพที่ 4.13

หลังจากนั้น จะทำการทดสอบและวัดค่า S_{11} ที่ได้จากสายอากาศโมโนโพลรูปตัว C ที่สร้างขึ้น แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลอง ผลการเปรียบเทียบกล่าวสรุปได้ดังนี้

1. สายอากาศที่สร้างขึ้นและถูกวัดในทางปฏิบัติให้ย่านความถี่ในการใช้งานทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่กว้างกว่าผลที่ได้รับจากการจำลองสายอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 4.7

2. ค่า S_{11} ที่ได้รับจากการวัดสอดคล้องเป็นอย่างดีกับค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองระบบ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ค่า S_{11} ที่ได้จากการวัดจะมีค่าต่ำกว่าค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลอง ซึ่งผู้วิจัยขอระบุที่มาของผลที่ได้รับดังกล่าวนี้ว่า "อาจจะเป็นเพราะว่า การจำลองสายอากาศจะมองว่า ถ้าย่านความถี่ที่ไม่ต้องการใช้งานจะกำหนดให้ค่า S_{11} มีค่าประมาณ 0 dB (เกือบจะสะท้อนกลับมาหมด ไม่สามารถส่งย่านความถี่เหล่านั้นออกไปทางเอาต์พุตได้เลย) แต่พอนำไปสร้างจริงและวัดค่า S_{11} ปรากฏว่า ย่านความถี่ที่ไม่ต้องการอาจจะถูกส่งออกจากสายอากาศไปได้บ้าง ทำให้ค่า S_{11} ที่ได้จากการวัดมีค่าต่ำกว่าค่า S_{11} ที่ได้จากการจำลองประมาณ 5 dB ในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 2 GHz แต่หลังจากความถี่ 2 GHz ขึ้นไป พบว่าค่า S_{11} ที่ได้รับทั้ง 2 กรณีมีค่าที่ใกล้เคียงกัน"

3. ที่ย่านความถี่ต่ำ 0850 MHz ค่าสูญเสียจากการย้อนกลับที่ได้จากการวัดมีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้รับจากการจำลองสายอากาศ 11 dB โดยมีค่า -27 dB และ -16 dB ตามลำดับ ดังในภาพที่ 4.14

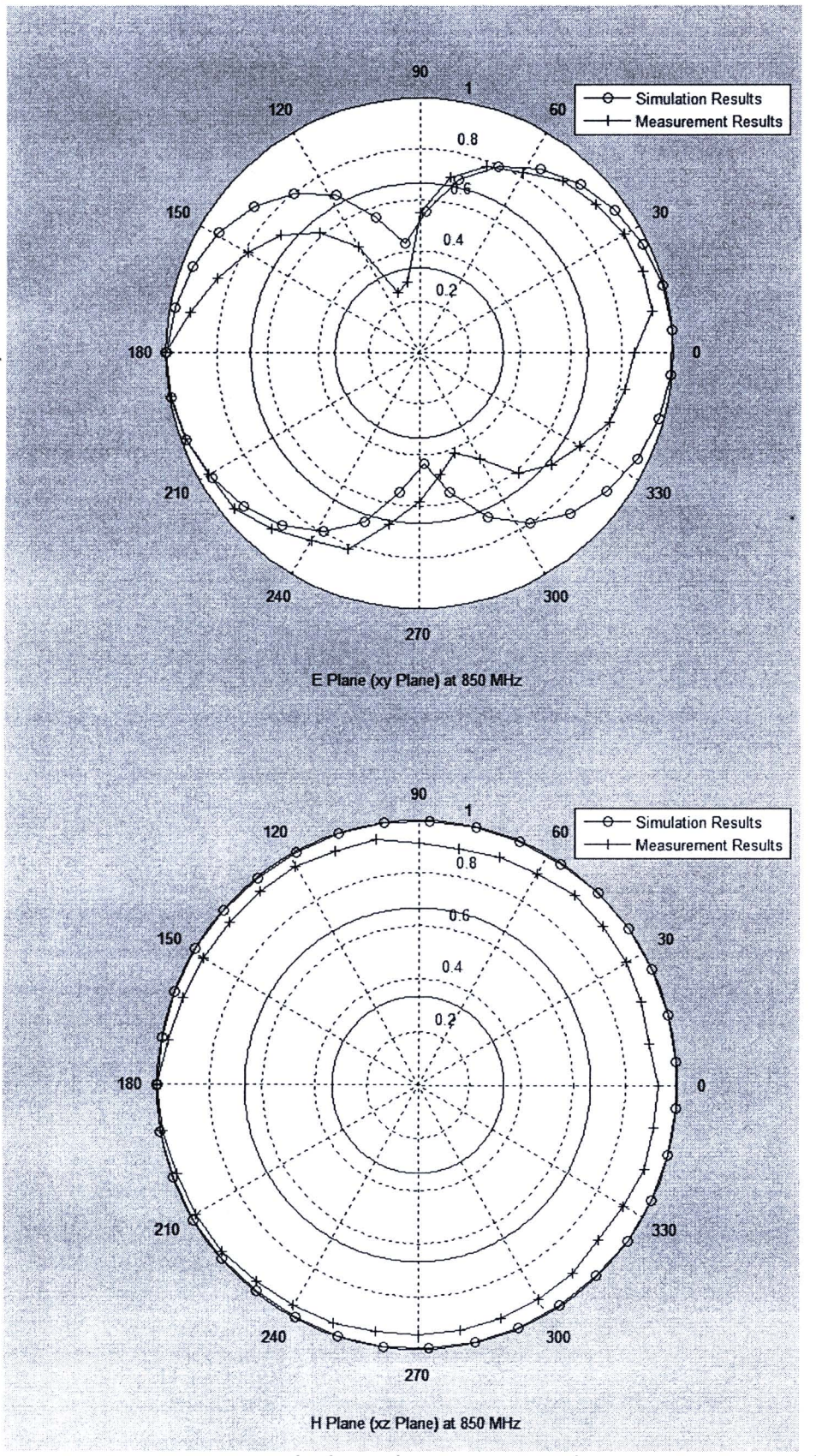
4. ที่ย่านความถี่สูง 1.95 GHz ค่า S_{11} ที่ได้จากการวัดมีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้รับจากการจำลองสายอากาศ 20.5 dB โดยมีค่า -42.5 dB และ -22 dB ตามลำดับ ดังในภาพที่ 4.14

5. ที่ค่าความถี่ที่ออกแบบ 2.25 GHz ค่า S_{11} ที่ได้จากการวัดมีค่าเท่ากับค่าที่ได้รับจากการจำลองซึ่งมีค่าเท่ากับ -13.5 dB ตามลำดับ ดังในภาพที่ 4.14

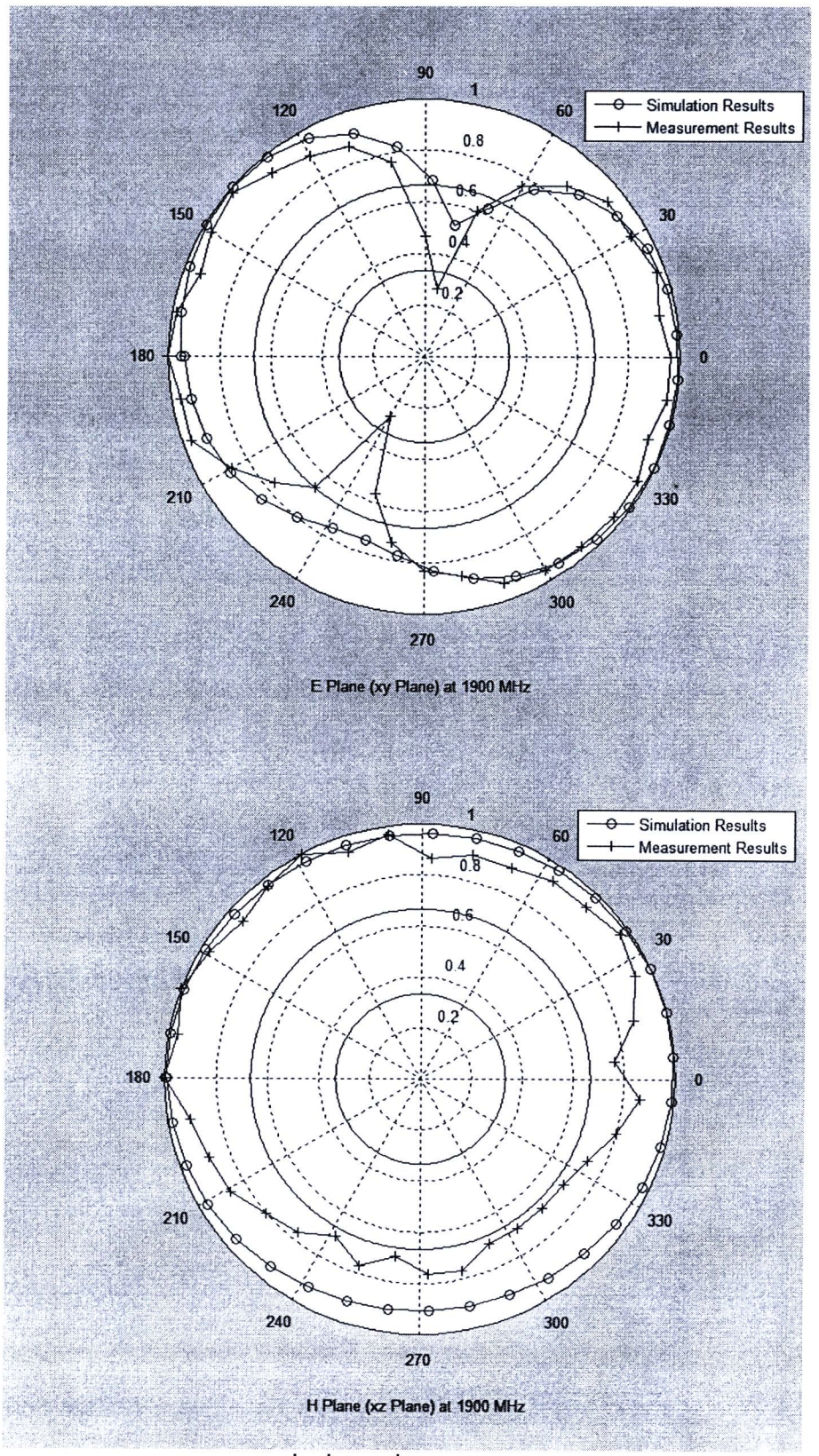
6. ที่ย่านความถี่สูง 2.625 GHz ค่า S_{11} ที่ได้จากการวัดมีค่าที่สูงกว่าค่าที่ได้รับจากการจำลองสายอากาศ 3 dB โดยมีค่า -16 dB และ -13 dB ตามลำดับ ดังในภาพที่ 4.14

7. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ณ ค่าความถี่เท่ากับ 850 MHz, 1.9 GHz, 2.25 GHz และ 2.5 GHz มีแสดงไว้ในภาพที่ 4.15 – 4.18 ตามลำดับ ในแต่ละรูป มีการแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้รับทั้งจากการวัดจริงและจากการจำลองสายอากาศทางทฤษฎี ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า สายอากาศโมโนโพลรูปตัว C ที่นำเสนอให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทุกค่าความถี่ที่ใช้งานเป็นแบบรอบทิศทางตามต้องการ โดยภาพด้านบนคือ E Plane (ระนาบ xy) ซึ่งเป็นระนาบเอลลิเวชันมีรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Figure Eight (รูปเลข 8) ส่วนภาพด้านล่างแสดง H Plane (ระนาบ xz) ซึ่งเป็นระนาบอะซิมุธมีรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Nondirectional (ไม่มีทิศทาง)

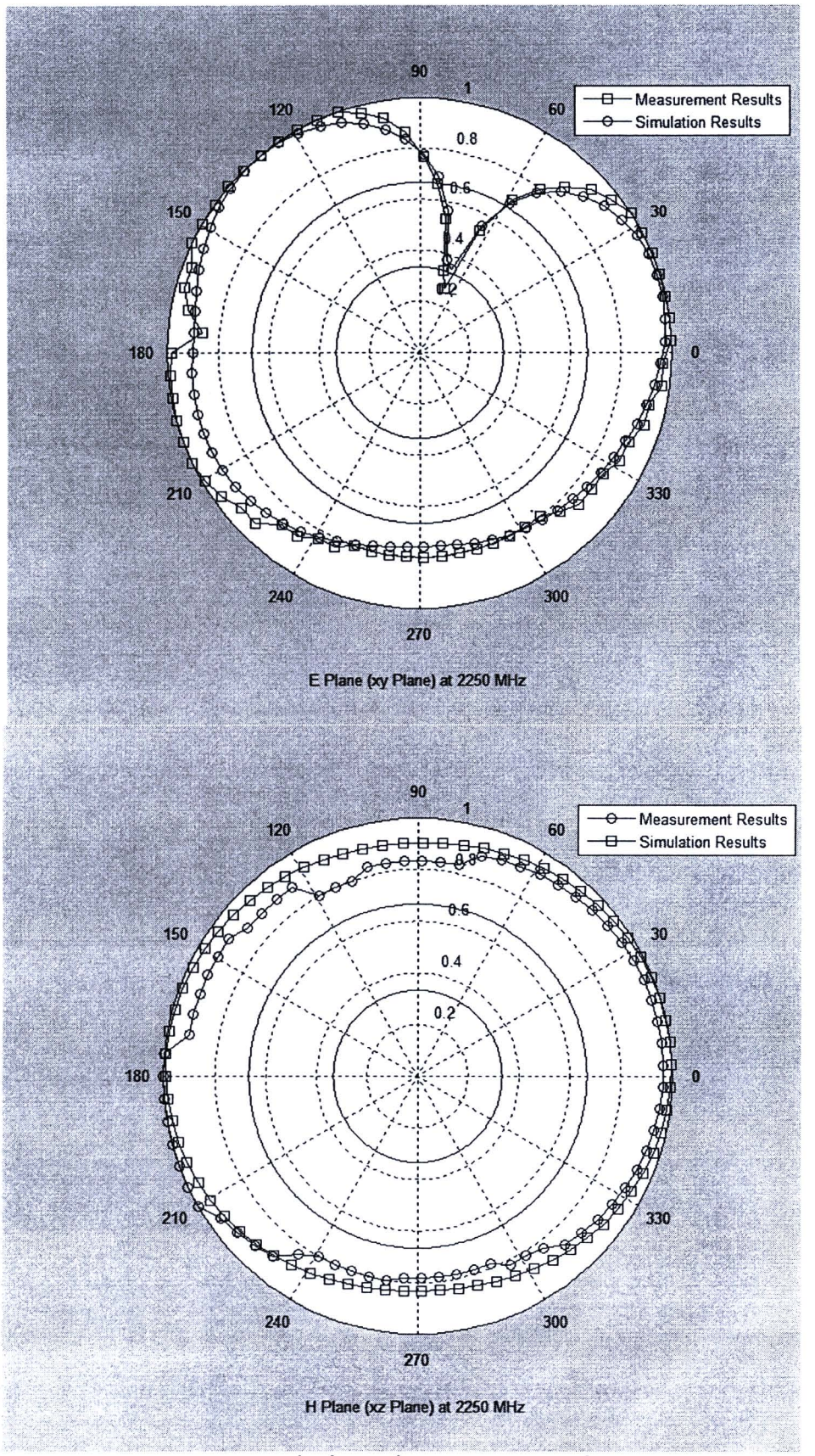
ทั้งนี้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ย่านความถี่ 2.5 GHz จะส่งสัญญาณคลื่นได้ดีทางด้านหลังกล่าวคือ มุมในการส่งคลื่นอยู่ระหว่าง 90 – 270 องศา จึงทำให้ทราบว่า สายอากาศโมโนโพลรูปตัว C ที่นำเสนอนี้จะถูกหันด้านหลังหรือด้านกราวด์เพลนออกในขณะใช้งาน เนื่องจากสายอากาศแพร่กระจายคลื่นออกได้ดีทางด้านหลัง ส่วนการแพร่กระจายคลื่นที่ย่านความถี่อื่นๆ อีก 3 ค่าความถี่ที่เหลือ ไม่มีปัญหาใดๆ ในการใช้งาน เนื่องจากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทางที่สมบูรณ์ เกือบจะเป็นวงกลม เมื่อมองในระนาบอะซิมุธ และเกือบจะเป็นรูปเลข 8 เมื่อมองในแนวเอลลิเวชัน ดังแสดงในภาพที่ 4.15 – 4.18



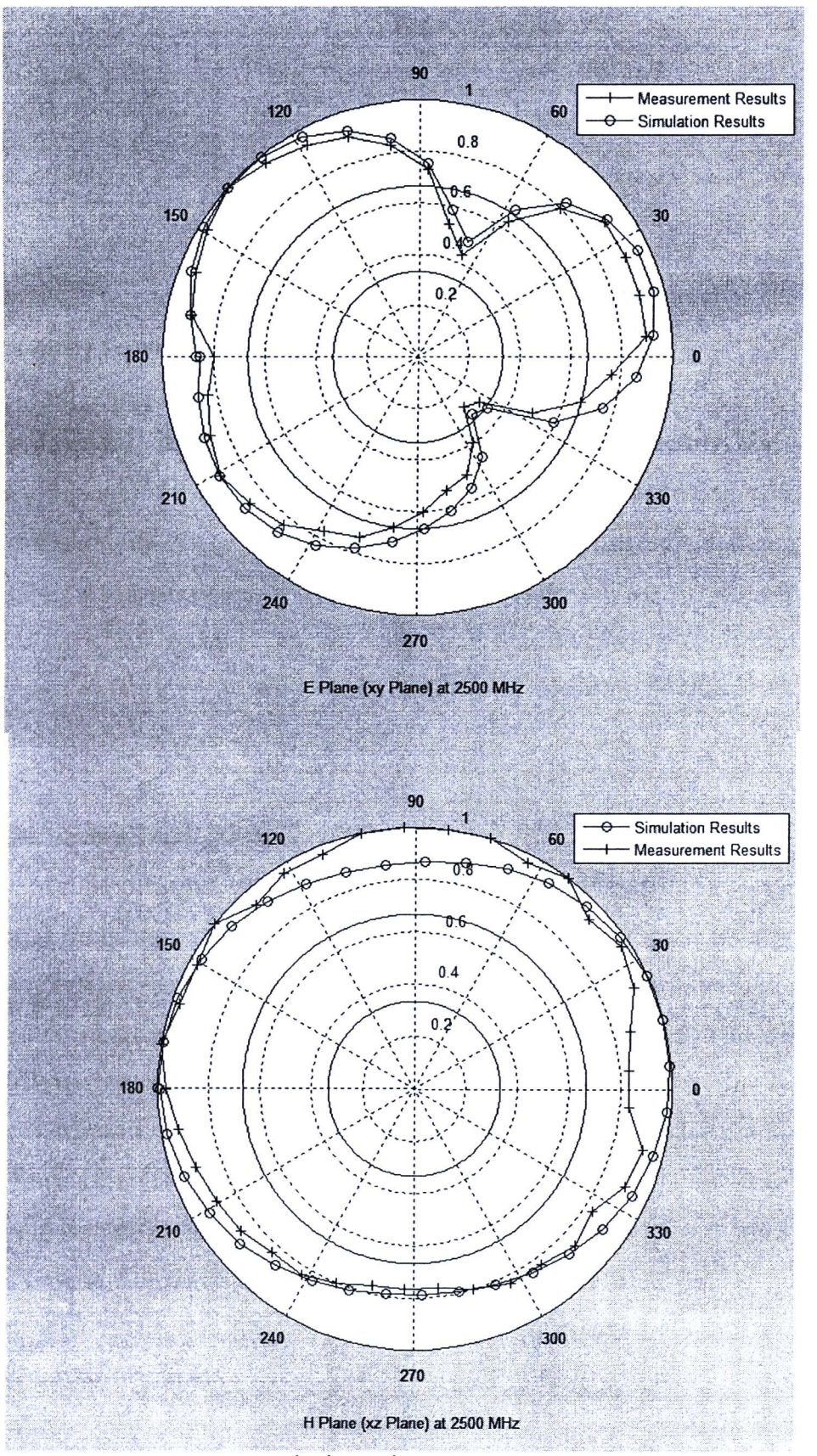
ภาพที่ 4.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 850 MHz (ความถี่ศูนย์กลางของย่านความถี่ต่ำ)



ภาพที่ 4.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 1.9 GHz



ภาพที่ 4.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.250 GHz (ความถี่ศูนย์กลางของย่านความถี่สูง)



ภาพที่ 4.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.5 GHz