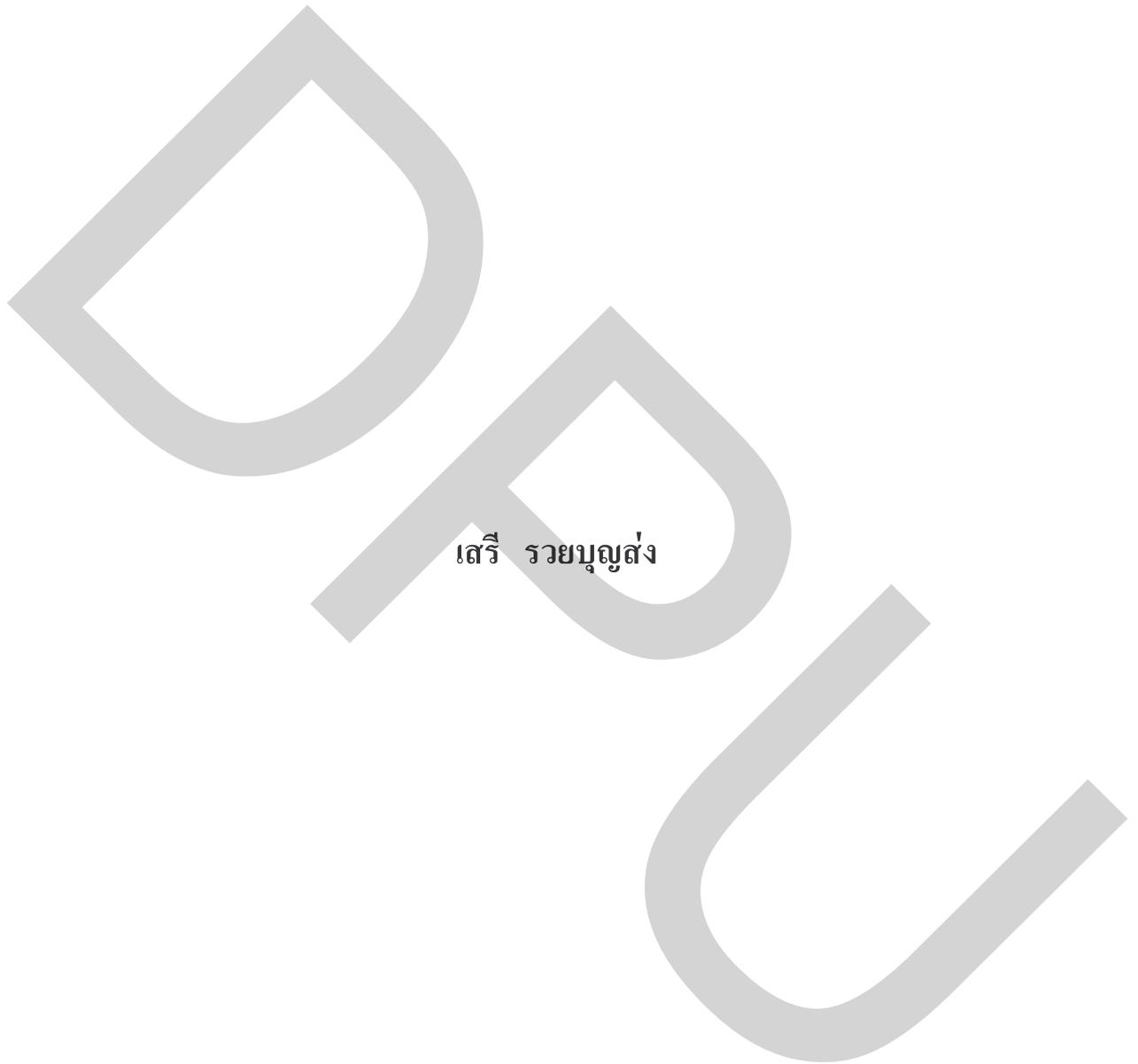


สายอากาศโมนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว C แบบหลายย่านความถี่
สำหรับระบบการสื่อสารแบบไร้สาย



เรย์ รวยบุญส่ง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

พ.ศ. 2553

**Multiband C-Shaped Printed Monopole Antenna for
Wireless Communication Systems**



Sari Ruayboonsong

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Computer and Telecommunication Engineering
Graduate School, Dhurakij Pundit University**

2010

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเอาใจใส่และดูแลเป็นอย่างมากจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์บุญยวีร์ จามจรีกุล ซึ่งท่านคอยให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ นอกจากนี้ กระผมใคร่ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.ชัยพร เขมะภักตะพันธ์ ผู้อำนวยการหลักสูตรฯ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และเอาใจใส่นักศึกษาทุกๆ คนเสมอมา

ขอขอบคุณ อ.ดร.ประศาสน์ จันทราทิพย์ และ อ.ดร.พีรเดช ฌ น่าน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ช่วยดำเนินเรื่องต่างๆ ให้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ร่วมรุ่นทุกๆ คน ที่คอยช่วยเหลือกันมาตลอด

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ตลอดจนบุคคลในครอบครัวของผู้วิจัย ที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยในทุกๆ ด้าน ตลอดระยะเวลาการศึกษาจบจนสำเร็จการศึกษา

เสรี รวยบุญส่ง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ฅ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
2. แนวคิด ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีของสายอากาศ.....	4
2.1.1 คำจำกัดความและชนิดของสายอากาศ.....	4
2.1.2 พารามิเตอร์ของสายอากาศ.....	5
2.2 สายอากาศไดโพลและสายอากาศโมนโพล.....	8
2.3 สายอากาศโมนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์.....	9
2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
3. ระเบียบวิธีวิจัย.....	15
3.1 การออกแบบสายอากาศโมนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว F.....	15
3.2 การออกแบบสายอากาศโมนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์โครงสร้างใหม่ที่นำเสนอ....	16
4. ผลการศึกษา.....	21
4.1 ผลการจำลองและทดสอบสายอากาศโมนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว F.....	21
4.2 ผลการจำลองและทดสอบสายอากาศโมนโพลรูปตัว L หัวกลับและรูปตัว C ที่ความยาวต่างๆ	24
4.3 ผลการจำลองและทดสอบสายอากาศโมนโพลรูปตัว C	33

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5. สรุปผลการศึกษา.....	42
5.1 สรุปผลการทำงานตามขอบเขตงานวิจัย.....	42
5.2 สรุปผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์งานวิจัย.....	42
5.3 สรุปประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	43
5.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	43
บรรณานุกรม.....	44
ประวัติผู้เขียน.....	46

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าความยาวของสายอากาศโมโนโพล (หน่วย mm).....	20
4.1 ค่าความยาวของสายอากาศโมโนโพล (หน่วย mm).....	23
4.2 ค่า Return Loss และ Bandwidth ของสายอากาศเมื่อกำหนด ค่า $h_1 = 37 \text{ mm}$ คงที่.....	24
4.3 ค่า Return Loss และ Bandwidth ของสายอากาศเมื่อกำหนด ค่า $h_1 = 40 \text{ mm}$ คงที่.....	26
4.4 ค่า Return Loss และ Bandwidth ของสายอากาศเมื่อกำหนด ค่า $h_1 = 43 \text{ mm}$ คงที่.....	27
4.5 ค่า Return Loss และ Bandwidth ของสายอากาศเมื่อกำหนด ค่า $l_{t_1} = 22 \text{ mm}$ คงที่.....	28
4.6 ค่า Return Loss และ Bandwidth ของสายอากาศเมื่อกำหนด ค่า $l_{t_1} = 25 \text{ mm}$ คงที่.....	30
4.7 ย่านความถี่ใช้งานของสายอากาศโมโนโพลรูปตัว C ที่ได้รับการจำลองและทดลอง.....	36

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 สายอากาศโมโนโพลรูปตัว F แบบต่อกัน 2 ตัว.....	11
2.2 สายอากาศโมโนโพลรูปตัว F.....	12
2.3 สายอากาศโมโนโพลรูปก้นหอยแบบสี่เหลี่ยม.....	13
3.1 สายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรมิครูปตัว F	16
3.2 สัญลักษณ์ความยาวต่างๆ ของสายอากาศที่นำเสนอ.....	18
3.3 สายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรมิครูปแบบที่มีปลายตรงลักษณะ คล้ายตัว L กลับหัว.....	19
3.4 สายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรมิครูปแบบที่มีปลายงอคล้ายรูปตัว C.....	19
4.1 ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับที่ได้จากการจำลองสายอากาศโมโนโพลรูปตัว F.....	22
4.2 สัญลักษณ์ความยาวต่างๆ ของสายอากาศที่นำเสนอ.....	22
4.3 ผลการจำลองค่า Return Loss เมื่อกำหนดค่า $h_1 = 37 \text{ mm}$ คงที่.....	24
4.4 ผลการจำลองค่า Return Loss เมื่อกำหนดค่า $h_1 = 40 \text{ mm}$ คงที่.....	26
4.5 ผลการจำลองค่า Return Loss เมื่อกำหนดค่า $h_1 = 43 \text{ mm}$ คงที่.....	27
4.6 ผลการจำลองค่า Return Loss เมื่อกำหนดค่า $l_{t1} = 22 \text{ mm}$ คงที่.....	29
4.7 ผลการจำลองค่า Return Loss เมื่อกำหนดค่า $l_{t1} = 25 \text{ mm}$ คงที่.....	30
4.8 ขนาดของสายอากาศโมโนโพลรูปตัว C และแผ่น FR-4 ที่นำเสนอ (หน่วย mm).....	32
4.9 ภาพถ่ายของสายอากาศโมโนโพลรูปตัว C ที่นำเสนอ.....	32
4.10 ภาพถ่ายของเครื่องสเปกตรัมอนาลิเซอร์ (ย่านความถี่ใช้งาน 9 kHz – 22 GHz).....	33
4.11 ภาพถ่าย Signal Generator HP8657B (ย่านความถี่ใช้งาน 0.1 MHz – 2060 MHz) และ Signal Generator HP83731A (ย่านความถี่ใช้งาน 1 GHz – 20 GHz).....	34
4.12 ภาพถ่ายเหตุการณ์ต่างๆ ในขณะที่ทำการทดสอบสายอากาศที่นำเสนอ.....	34
4.13 ค่า Return Loss (S_{11}) ที่ได้จากการจำลองสายอากาศรูปตัว F กับตัว C ที่นำเสนอ.....	35
4.14 ค่า Return Loss (S_{11}) ที่ได้จากการจำลองและวัดสายอากาศที่นำเสนอ.....	35
4.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 850 MHz.....	38
4.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 1.9 GHz.....	39
4.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.25 GHz.....	40
4.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.5 GHz.....	41

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว C แบบหลายย่านความถี่ สำหรับระบบการสื่อสารแบบไร้สาย
ชื่อผู้เขียน	เสรี รวยบุญส่ง
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ปยุตย์วีร์ จามจรีกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอหลักการในการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว C แบบหลายย่านความถี่สำหรับระบบการสื่อสารแบบไร้สายที่มีอยู่หลายระบบ โดยที่ย่านความถี่ต่ำ 749 – 891 MHz สามารถรองรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ CDMA ของบริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน) และ ที่ย่านความถี่สูง 1.789 – 2.831 GHz สามารถรองรับระบบสื่อสารไร้สาย GSM1800, GSM1900 (1885 – 1980 MHz), WCDMA/UMTS (3G), WiFi-2.45 GHz และ WiMAX-2.5 GHz ฯลฯ ซึ่งพิจารณาที่ค่าสูญเสียจากการย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ผลการทดสอบที่ได้รับจากการวัดสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลเชิงทฤษฎีที่ได้จากการจำลองชิ้นงาน โดยค่าสูญเสียจากการย้อนกลับที่ได้จากการวัดมีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการจำลองชิ้นงานประมาณ 11 dB ที่ย่านความถี่ต่ำ 850 MHz และประมาณ 20.5 dB ที่ย่านความถี่สูง 1.95 GHz แต่ค่าสูญเสียจากการย้อนกลับที่ได้จากการวัดมีค่าที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการจำลองชิ้นงานประมาณ 3 dB ที่ย่านความถี่สูง 2.625 GHz อีกทั้ง แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำเสนอก็เป็นแบบรอบทิศทางในย่านความถี่ใช้งานตามที่ต้องการ

Thesis Title Multiband C-Shaped Printed Monopole Antenna for Wireless
 Communication Systems

Author Sari Ruayboonsong

Thesis Advisor Assoc. Prof. Punyawit Jamjareekul

Department Computer and Telecommunication Engineering

Academic Year 2010

ABSTRACT

This paper proposes a principle of design and construction about multiband C-shaped printed monopole antenna for the existing wireless communication systems. The low frequency band, 749 – 891 MHz, can be served the CDMA mobile systems of CAT Telecom Public Company Limited, and the high frequency band, 1.789 – 2.831 GHz, can be served the wireless systems, for example, GSM1800, GSM1900 (1885 – 1980 MHz), WCDMA/UMTS (3G), WiFi-2.45 GHz, and WiMAX-2.5 GHz etc. Those operating frequency bands are taken into account at the return loss of 10 dB. The measured results are in good agreement with the simulated theoretical results. The measured return loss is lower than the simulated return loss about 11 dB at the low frequency band 850 MHz and about 20.5 dB at the high frequency band 1.95 GHz. In contrast, the measured return loss is higher than the simulated return loss about 3 dB at the high frequency band 2.625 GHz. Moreover, the radiation patterns of a proposed antenna are also omnidirectional in the operating frequency bands as desired.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันนี้ การติดต่อสื่อสารนับว่ามีบทบาทและมีความสำคัญต่อชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์เป็นอย่างมาก โดยถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบหลักๆ คือ การสื่อสารแบบไร้สายและการสื่อสารแบบไร้สาย ซึ่งในปัจจุบันนี้ โลกของเรากำลังเข้าสู่การสื่อสารแบบไร้สายอย่างเต็มตัว เนื่องจากระบบการสื่อสารแบบไร้สายสามารถอำนวยความสะดวกและตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่เวลาและสถานที่ใดก็ได้ โดยมีอุปกรณ์ที่สำคัญของการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายคือ สายอากาศ (Antenna)

โดยจะเห็นได้ชัดเจนว่า ที่ผ่านมามีนักวิจัยจำนวนมากได้ออกแบบและสร้างสายอากาศแบบไดโพลและแบบโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Antennas) รวมถึงสายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna) ออกมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อที่จะรองรับการใช้งานหลายย่านความถี่ในเครือข่ายการสื่อสารแบบไร้สายระบบต่างๆ เนื่องจากสายอากาศที่สร้างขึ้นเหล่านี้มีขนาดแบน บางเบา มีขนาดเล็กกะทัดรัด มีราคาถูก สร้างและออกแบบง่ายโดยใช้เทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์ ให้แบนด์วิดท์ที่กว้างได้ สามารถแนบติดกับพื้นผิวของอุปกรณ์ชนิดต่างๆ ได้ รวมถึงให้คุณลักษณะการแพร่กระจายหลายย่านความถี่ตามต้องการ

อีกทั้ง ในปัจจุบันนี้ มีเครือข่ายสื่อสารแบบไร้สายที่ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าหลายย่านความถี่และระบบ เช่น CDMA ของ บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน), GSM1800, GSM1900, WLAN (WiFi), WMAN (WiMAX) และ WCDMA ฯลฯ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่สายอากาศที่ถูกสร้างขึ้นมาใช้งาน ณ ขณะนี้ควรจะรองรับการใช้งานได้หลายย่านความถี่ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ตั้งแต่ 2 ย่านความถี่ขึ้นไป

ดังนั้น การออกแบบและการสร้างสายอากาศของบทความฉบับนี้จึงเน้นไปที่การสร้างสายอากาศโมโนโพลที่มีโครงสร้างใหม่และรองรับการใช้งานสองย่านความถี่ ได้แก่ ย่านความถี่ต่ำในช่วง 800 – 900 MHz เพื่อที่จะสามารถทำงานรองรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ CDMA ของ บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน) และ ย่านความถี่สูงในช่วง 1.8 – 2.6 GHz เพื่อที่จะสามารถทำงานรองรับระบบสื่อสารไร้สาย GSM1800, GSM1900 , WCDMA/UMTS (3G), WiFi-2.45 GHz

และ WiMAX-2.5 GHz ฯลฯ ได้ โดยในการออกแบบและสร้างสายอากาศนั้น จะใช้หลักการสร้างและออกแบบเช่นเดียวกับบทความที่ผ่านมา ซึ่งมีการป้อนกำลังงานแก่สายอากาศโดยผ่านสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปและอาศัยกราวด์เพลนของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปเป็นกราวด์เพลนถึงอนันต์ของสายอากาศไปในตัว (เคาเตอร์โพซ หรือ Counterpoise) ซึ่งเป็นแนวความคิดในการสร้างสายอากาศแบบใหม่ที่สามารถบรรจุอยู่ในโทรศัพท์เคลื่อนที่และอุปกรณ์สื่อสารแบบพกพาได้ จึงทำให้สายอากาศมีที่นำเสนอนี้มีโครงสร้างเป็นแบบแผ่นบาง เบา เล็กกะทัดรัด (ขนาดแผ่นวงจรพิมพ์ $5 \times 10 \text{ cm}^2$) และราคาถูก แต่ประสิทธิภาพในการใช้งานของสายอากาศนั้นต่ำลง แต่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ เนื่องจากในปัจจุบันนี้ได้มีการขยายเครือข่ายสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์เป็นจำนวนมาก อีกทั้งมีการเพิ่มระดับความแรงของสัญญาณให้สูงขึ้นจากอดีตไว้อีก 2 - 3 dB เพื่อเป็นการชดเชยให้กับการออกแบบสายอากาศแบบใหม่ดังกล่าวข้างต้นที่มีคุณภาพในการรับสัญญาณได้แยลง 2 - 3 dB

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างสายอากาศโมโนโพลที่มีโครงสร้างแบบใหม่บนแผ่นวงจรพิมพ์และรองรับการใช้งาน 2 ย่านความถี่ได้

1.2.2 เพื่อสร้างสายอากาศโมโนโพลที่ใช้งานได้ดีในหลายย่านความถี่ที่ต้องการและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง

1.2.3 เพื่อเป็นพื้นฐานในการนำความรู้ที่ได้รับไปสร้างสายอากาศโมโนโพลที่มีโครงสร้างใหม่แบบอื่นๆ บนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้งานในย่านความถี่อื่นๆ สำหรับเครือข่ายสื่อสารไร้สายของประเทศไทยในอนาคตได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลที่มีโครงสร้างใหม่บนแผ่นวงจรพิมพ์ที่รองรับการใช้งานสองย่านความถี่ ได้แก่ ย่านความถี่ต่ำในช่วง 800 – 900 MHz เพื่อรองรับการใช้งานกับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ CDMA ของ บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน) และย่านความถี่สูงในช่วง 1.8 – 2.6 GHz เพื่อรองรับการใช้งานกับระบบสื่อสารไร้สาย GSM1800, GSM1900, WCDMA/UMTS (3G), WiFi-2.45 GHz และ WiMAX-2.5 GHz

1.3.2 สร้างสายอากาศที่ใช้งานได้ดีใน 2 ย่านความถี่ที่ต้องการและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำไปใช้งานได้จริงกับโทรศัพท์เคลื่อนที่และอุปกรณ์สื่อสารแบบพกพาที่มีย่านความถี่ใช้งานตรงกับที่นำเสนอ อีกทั้งสามารถรองรับการใช้งานระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายของประเทศไทยในอนาคตได้ อาทิเช่น เครือข่ายบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูง (WiMAX) และเครือข่าย CDMA ฯลฯ

1.4.2 เป็นพื้นฐานในการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลที่รองรับการใช้งานระบบสื่อสารไร้สาย WiMAX ย่านความถี่ 3.3 - 3.7 GHz และ 5.25 – 5.85 GHz นอกเหนือจากย่านความถี่ 2.5 GHz ที่นำเสนอ

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1.5.1 ดำเนินการรวบรวมทรัพย์สินที่เกี่ยวกับสายอากาศที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์แบบต่างๆ

1.5.2 ศึกษาสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้งานกับโทรศัพท์เคลื่อนที่และเครือข่าย WLAN

1.5.3 จำลองและวิเคราะห์ผลการทำงานของสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีการนำเสนอก่อนหน้านี้

1.5.4 จำลอง ปรับแต่ง และวิเคราะห์ผลการทำงานของสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีโครงสร้างใหม่

1.5.5 สร้างสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่นำเสนอ

1.5.6 ทดสอบ ปรับแต่ง และบันทึกผลการทดสอบสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่นำเสนอ โดยมีการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างผลที่ได้จากการวัดและผลที่ได้จากการจำลองสายอากาศ

1.5.7 จัดทำรายงานความคืบหน้าและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีของสายอากาศ

2.1.1 คำจำกัดความและชนิดของสายอากาศ

สายอากาศ (Antenna) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้รับส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบสื่อสารโทรคมนาคมที่มีอากาศเป็นสื่อนำสัญญาณ โดยคำจำกัดความของสายอากาศตาม Webster's Dictionary; IEEE Standard Definition Terms of Antennas นั้นคือ อุปกรณ์ที่เป็นตัวนำหรือส่วนประกอบของตัวนำสำหรับรับส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางในอากาศนั้นประกอบไปด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตั้งฉากกันเสมอและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เดินทาง บางครั้งเราจะเรียกว่า คลื่น โหมด TEM (Transverse Electric Magnetic) สายอากาศถูกแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด ได้แก่

2.1.1.1 สายอากาศเส้นลวด (Wire Antenna) ทำมาจากเส้นลวดโลหะ (Conducting Wire) ได้แก่ สายอากาศไดโพลและสายอากาศโมโนโพล

2.1.1.2 สายอากาศแบบช่องเปิด (Aperture Antenna) หรือ สายอากาศฮอร์น (Horn Antenna) เป็นสายอากาศที่มีช่องเปิดเป็นรูปทรงต่างๆ ได้แก่ แบบกรวย แบบสี่เหลี่ยม ฯลฯ

2.1.1.3 สายอากาศแบบไมโครสตริป (Microstrip Antenna) เป็นสายอากาศที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board หรือ PCB) 2 หน้า ด้านบนเป็นตัวนำสายอากาศรูปร่างต่างๆ ได้แก่ สี่เหลี่ยม วงกลม ฯลฯ และด้านล่างเป็นระนาบกราวด์ (Ground Plane)

2.1.1.4 สายอากาศจานสะท้อน (Reflector Antenna) เป็นสายอากาศที่ออกแบบขึ้นมาเป็นรูปจานโค้งรูปทรงพาราโบลา มีทั้งแบบหงายและแบบคว่ำขึ้นอยู่กับการใช้งาน โดยจะมีการส่งคลื่นออกจากภาคส่งผ่านสายป้อนสัญญาณ (Feeder Lines) และสายอากาศฮอร์น เพื่อที่จะส่งคลื่นไปสะท้อนที่สายอากาศจานสะท้อน ก่อนที่จะส่งต่อไปยังภาครับสัญญาณที่อยู่ห่างออกไประยะไกล เนื่องจากต้องการสร้างคลื่นระนาบ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้สายอากาศชนิดนี้ในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมและระบบเคเบิลทีวี ในที่นี้ สายอากาศฮอร์น (1st Radiator) ทำหน้าที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นตัวแรกและสายอากาศจานสะท้อน ทำหน้าที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นตัวที่ 2 (2nd Radiator)

2.1.1.5 สายอากาศแบบอาร์เรย์ (Array Antenna) เป็นสายอากาศที่มีหลายๆ ตัวมาเรียงต่อกัน โดยมีมิติ (แนวนอนและแนวตั้ง) ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับ ขนาด อัตราขยาย (Gain) โพลาริเซชัน (Polarization) บีมวิดท์ (Beamwidth) และคุณสมบัติอื่นๆ ที่ต้องการจะใช้งานเฉพาะทาง ซึ่งในปัจจุบันนี้ นิยมออกแบบสายอากาศแบบอาร์เรย์เป็นแบบไมโครสตริปและถูกนำไปใช้บนเครื่องบิน เพื่อมีให้ยื่นออกมาจากตัวเครื่องบิน

2.1.1.6 สายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Antenna) เป็นสายอากาศที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์เช่นเดียวกับสายอากาศแบบไมโครสตริป เพียงแต่ด้านล่างเป็นระนาบกราวด์ เนื่องจากจะใช้กราวด์ร่วมกันกับวงจรไมโครเวฟหรือวงจรอื่นๆ ของอุปกรณ์ใช้งานตัวนั้น ส่วนด้านบนก็ยังคงเป็นตัวนำสายอากาศรูปร่างต่างๆ ได้แก่ สี่เหลี่ยม วงกลม ฯลฯ ที่ถูกออกแบบขึ้นมาตามการใช้งาน

2.1.2 พารามิเตอร์ของสายอากาศ

2.1.2.1 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) เป็นรูปภาพที่แสดงทิศทางการแพร่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศว่ากระจายไปได้ดีในทิศทางใดบ้าง โดยเราจะแบ่งสายอากาศออกตามแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้ 2 แบบหลักๆ คือ

2.1.2.1.1 สายอากาศแบบไม่มีทิศทาง (Non-Directional Antenna) เป็นสายอากาศที่แพร่กระจายคลื่นเท่าๆ กันทุกทิศทาง (รูปทรงกลม) โดยทั่วไปจะถูกเรียกว่า ตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก (Isotropic Radiator) หรือ สายอากาศแบบจุด (Point Source) สายอากาศชนิดนี้เป็นสายอากาศที่ใช้อ้างอิงทางทฤษฎีที่สมมติขึ้นมา ซึ่งไม่มีอยู่จริง

2.1.2.1.2 สายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) เป็นสายอากาศที่มีการชี้ทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่นๆ ได้แก่

2.1.2.1.3 สายอากาศแบบทิศทางเดียว (Uni-directional Antenna) เป็นสายอากาศที่มีโลบหลัก (Main Lobe) พุ่งตรงไปยังภาครับสัญญาณทิศทางเดียว เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการลำคลื่นแคบๆ เพื่อส่งไปให้ได้ในระยะทางที่ไกล เช่น ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม ฯลฯ

2.1.2.1.3.1 สายอากาศแบบ 2 ทิศทาง (Bi-directional Antenna) เป็นสายอากาศที่มีโลบหลัก (Main Lobe) พุ่งออก 2 ทิศทางที่ตรงข้ามกันออกไปยังภาครับสัญญาณที่อยู่ทั้ง 2 ด้าน เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการชี้ลำคลื่นตลอดความยาวของพื้นที่ให้บริการ เช่น สายอากาศที่ใช้งานในระบบรถไฟใต้ดินและทางเดินระหว่างตึก ฯลฯ

2.1.2.1.3.2 สายอากาศแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional Antenna) เป็นสายอากาศที่แพร่กระจายคลื่นออกรอบตัวของสายอากาศ เหมาะสำหรับการใช้งานในพื้นที่ให้บริการเป็นแบบวงกลม เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่, WiFi, WiMAX ฯลฯ

2.1.2.2 อัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศ เป็นการเปรียบเทียบการรับส่งสัญญาณของสายอากาศตัวหนึ่งในทิศทางที่รับส่งได้ดีที่สุดเทียบกับสายอากาศมาตรฐาน ในที่นี้ สายอากาศไม่ได้ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ ถ้าเทียบกับสายอากาศแบบจุดที่มีการกระจายคลื่นเท่ากันทุกทิศทาง ผลที่ได้จะเป็นอัตราขยายแบบสัมบูรณ์ หน่วยเป็น dBi ถ้าเทียบกับสายอากาศไดโพลมาตรฐาน ($\lambda/2$ -Dipole) ก็จะเป็นอัตราขยายสัมพัทธ์ หน่วยเป็น dBd

เราสามารถหาค่าอัตราขยายได้จากการนำค่าไดเรกตีวีตี (Directivity หรือ D_0) คูณกับค่าประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency หรือ e_r) หรือ อาจหาค่าได้จากการทดสอบสายอากาศที่สร้างขึ้นจริงในทางปฏิบัติก็ได้ ถ้าหากมีสายอากาศมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

ในที่นี้ ค่าไดเรกตีวีตีนี้เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงว่าสายอากาศมีความแรงที่ทิศทางต่างๆ มากน้อยแค่ไหน โดยไดเรกตีวีตีมีหน่วยวัดเหมือนกับอัตราขยาย กล่าวคือ มีหน่วยเป็น dBi และ dBd เมื่อเทียบกับสายอากาศแบบจุดและสายอากาศไดโพลมาตรฐาน ตามลำดับ

โดย สำหรับสายอากาศแบบจุด ค่า $D_0 = 1 = 0$ dB คิดเป็น 0 dBi

สำหรับสายอากาศไดโพลมาตรฐาน ค่า $D_0 = 1.6 = 2.15$ dBi คิดเป็น 0 dBd

ยกตัวอย่างเช่น สายอากาศไดโพลที่เชื่อมมาใช้งานมีค่าไดเรกตีวีตีเท่ากับ 5 dBi หมายถึงว่า สายอากาศไดโพลต้นนี้มีความสามารถรับส่งสัญญาณในทิศทางที่ดีที่สุดได้ดีเท่ากับ 5 dBi หรือ 2.85 dBd ($5 \text{ dBi} - 2.15 = 2.85 \text{ dBd}$)

2.1.2.3 ช่วงกว้างของลำคลื่น (Half Power Beamwidth หรือ HPBW) หรือเรียกสั้นๆ ว่า บีมวิดท์ เป็นช่วงกว้างของลำคลื่นเต็มที่ ณ จุดที่ค่ากำลังส่งมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่ากำลังส่งสูงสุดของสายอากาศ โดยค่าบีมวิดท์นั้นเป็นการพิจารณาลำคลื่นหรือ โลบ แขนงนอนของกราฟเป็นค่ามุม

2.1.2.4 ค่าแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ (Impedance Bandwidth) หรือเรียกสั้นๆ ว่า แบนด์วิดท์ เป็นค่าช่วงกว้างของแถบความถี่ที่ใช้งานได้จริงของสายอากาศ ซึ่งเราหาได้จาก การนำค่าความถี่มากลบด้วยค่าความถี่น้อย ณ ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB หรือค่าอื่นๆ ที่ต่ำกว่า ขึ้นอยู่กับการพิจารณา โดยค่าแบนด์วิดท์นั้นเป็นการพิจารณาความถี่ แขนงนอนของกราฟเป็นค่าความถี่ และสามารถค่าแบนด์วิดท์ได้จากสมการ

$$BW = \frac{f_H - f_L}{f_0}$$

โดย ค่า f_H เป็นค่าความถี่ที่ใช้งานได้มากที่สุดของสายอากาศ

ค่า f_L เป็นค่าความถี่ที่ใช้งานได้น้อยที่สุดของสายอากาศ และ

ค่า f_0 เป็นค่าความถี่ใช้งาน (Operating Frequency) ของสายอากาศ

2.1.2.5 ระดับลำคลื่นย่อย (Side Lobe Level) เป็นค่าผลต่างระหว่างระดับความสูงของลำคลื่นย่อย (dB) กับระดับความสูงของลำคลื่นหลัก (dB)

2.1.2.6 อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (Front to Back Ratio หรือ F/B Ratio) เป็นค่าผลต่างระหว่างระดับความสูงของลำคลื่นหลัก (dB) กับระดับความสูงของลำคลื่นหลัง (dB) ซึ่งโดยทั่วไปจะนิยมใช้วัดค่าอัตราส่วนนี้กับจานดาวเทียมและสายอากาศวิทยุ

2.1.2.7 อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) ของสายอากาศ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนคือ Z_{in} เป็นค่าที่ต้องคำนึงถึงเมื่อนำสายนำสัญญาณมาเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศกับเครื่องส่งหรือเครื่องรับ ซึ่งโดยทั่วไป สายอากาศกับสายนำสัญญาณจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ที่เท่ากันหรือการแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Matching Impedance) เพื่อไม่ให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นและกำลังของคลื่นที่ส่งออกไปจะมีค่ามากที่สุดที่ปลายสุดของโบลหลัก (เท่ากับค่าไดเรคตีวิตี) ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดค่าการสูญเสียการย้อนกลับ (Return Loss หรือ S_{11}) ถ้าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไม่เท่ากับสายนำสัญญาณ ก็ต้องมีการนำอุปกรณ์มาช่วยหรือมาแปลงค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อที่จะทำให้เกิดการแมตซ์อิมพีแดนซ์มากที่สุด เท่าที่จะทำได้ เพื่อให้เกิดค่าการสูญเสียการย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB

2.1.2.8 การแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ หมายถึง การทำแมตซ์อิมพีแดนซ์ โดยอิมพีแดนซ์อินพุตของสายอากาศ (Z_A) จะต้องมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) ของสายนำสัญญาณ (Z_0) ซึ่งค่ามาตรฐานของ Z_0 ได้แก่ ค่า 50 Ω , ค่า 75 Ω และค่า 300 Ω

ในทางปฏิบัติ การแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเกิดขึ้น 3 กรณี ดังนี้

1. ถ้าค่า $Z_A = Z_0$ ผลที่ได้รับคือ ไม่เกิดการสะท้อนคลื่น
2. ถ้าค่า $Z_A \neq Z_0$ ผลที่ได้รับคือ เกิดการสะท้อนคลื่น
3. ถ้าค่า $Z_A = 0$ หรือค่า $Z_A = \infty$ (แสดงถึง การเกิดการลัดวงจรและการเปิดวงจรตามลำดับ) ผลที่ได้รับคือ เกิดการสะท้อนคลื่นกลับหมด (Total Reflection)

ค่าพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ได้แก่

1. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) =
$$\frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0}$$
2. ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ (RL) =
$$-20 \log \left| \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \right|$$
3. ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio หรือ VSWR) =
$$\frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$
 โดยทั่วไป ค่า VSWR ต้องมีค่าเป็นบวกและมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 ด้วย

สัญลักษณ์ที่ใช้แทนคือ Z_{in} เป็นค่าที่ต้องคำนึงถึงเมื่อนำสายนำสัญญาณมาเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศกับเครื่องส่งหรือเครื่องรับ ซึ่งโดยทั่วไป สายอากาศกับสายนำสัญญาณจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ที่เท่ากันหรือการแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Matching Impedance) เพื่อไม่ให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่น ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดค่าการสูญเสียการย้อนกลับ (Return Loss หรือ S_{11}) ถ้า

อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไม่เท่ากับสายนำสัญญาณ ก็ต้องมีการนำอุปกรณ์มาช่วยหรือมาแปลงค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อที่จะทำให้เกิดการแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์มากที่สุด เท่าที่จะทำได้ เพื่อให้เกิดค่าการสูญเสียการย้อนกลับในทางปฏิบัติที่ต่ำกว่า -10 dB

2.1.2.9 โพลาริเซชัน (Polarization) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตลอดการเดินทางของคลื่น หากสายอากาศถูกวางในแนวนอน (Horizontal) ก็จะเกิดคลื่นโพลาริเซชันในแนวนอน ในทางกลับกัน ถ้าหากสายอากาศวางในแนวตั้ง (Vertical) ก็จะเกิดคลื่นโพลาริเซชันแนวตั้ง ส่วนโพลาริเซชันแบบวงกลม (Circular) และวงรี (Elliptical) นั้น จะเกิดขึ้นได้จากโครงสร้างของสายอากาศเอง เช่น สายอากาศแบบเฮลิคซ์ (Helix) เป็นต้น

ความสำคัญของโพลาริเซชัน คือ การรับคลื่นที่มีโพลาริเซชันแบบใด ก็ต้องรับด้วยสายอากาศที่มีโพลาริเซชันแบบเดียวกัน จึงจะรับคลื่นได้ดีที่สุด เช่น ส่งคลื่นที่มีโพลาริเซชันแนวนอนออกมา ด้านรับก็ต้องใช้สายอากาศที่มีโพลาริเซชันแนวนอนรับ (Co-Polarization) จึงจะดีที่สุด หากใช้สายอากาศที่มีโพลาริเซชันไม่ตรงกัน (Cross Polarization) ผลที่เกิดขึ้นก็คือจะทำให้ประสิทธิภาพในการรับสัญญาณแยกลงไปด้วยตัวประกอบที่เรียกว่า Polarization Factor (PLF) ซึ่งเป็นค่าการสูญเสียเนื่องจากโพลาริเซชันไม่ตรงกัน นิยามเป็นค่าฟังก์ชัน \cos ของมุมระหว่างโพลาริเซชันของคลื่นที่จะรับกับโพลาริเซชันของสายอากาศรับ ซึ่งถ้าโพลาริเซชันตรงกัน หรือ Co-Polarization มุมนี้จะเท่ากับ 0 และค่า PLF มีค่าเท่ากับ 1

2.2 สายอากาศไดโพลและสายอากาศโมโนโพล

2.2.1 สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) เป็นสายอากาศที่มีสองขั้ว ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Omnidirectional มีโพลาริเซชันตามแนวของเส้นลวดตัวนำ โดยสายอากาศไดโพลถูกแบ่งออกได้เป็นหลายประเภทตามความยาวที่ใช้งาน ดังนี้

2.2.1.1 สายอากาศไดโพลที่มีความยาวสั้นมาก เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น ($l < \lambda/50$) เรียกว่า Infinitesimal Dipole มีค่าความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Resistance) ที่ต่ำมาก ประสิทธิภาพของสายอากาศต่ำ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Omnidirectional และมีมุมวิดท์กว้าง

2.2.1.2 สายอากาศไดโพลที่มีความยาวสั้น เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น ($l < \lambda/10$) เรียกว่า Small Dipole มีค่าความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นที่ต่ำมาก ประสิทธิภาพของสายอากาศต่ำ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Omnidirectional และมีมุมวิดท์ค่อนข้างกว้าง

2.2.1.3 สายอากาศไดโพลที่มีความยาวใกล้เคียงกับความยาวคลื่น ($l > \lambda/10$) เรียกว่า Large Dipole มีค่าความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นที่สูงขึ้นมาก มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็น

แบบ Omnidirectional และมีบีบอัดที่แคบลง และยิ่งมีความยาวมากกว่าความยาวคลื่น ก็จะทำให้มีบีบอัดที่กว้างขึ้นเท่านั้นและเกิด Side Lobe มาก

สายอากาศไดโพลที่มีความยาวเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น เป็นถูกใช้งานเป็นสายอากาศมาตรฐาน เรียกว่า สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น (Half-Wavelength Dipole หรือ $\lambda/2$ -Dipole) โดยอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ $\lambda/2$ -Dipole นี้มีค่าเท่ากับ $73 + j 42.5 \Omega$ ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ ทำให้สามารถแมตช์กันได้ และมีโคเรคทีวิตีเท่ากับ 2.15 dBi (หรือคิดเป็น 0 dBd) มีโพลาริเซชันตามแนวการวางตัวของตัวนำ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง ซึ่งสายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศที่นิยมนำมาใช้งานในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงกับหัวต่อคอนเนกเตอร์ SMA 50 โอห์ม ทำให้ไม่ต้องใช้วงจรแปลงค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มเติม ผลลัพธ์ที่ได้คือสามารถออกแบบแผงสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีราคาถูก (Low Cost) ขนาดเล็กกะทัดรัด (Compact) และมีรูปทรงพื้นฐานต่ำ (Low Profile) อีกทั้งยังให้คุณสมบัติการทำงานของสายอากาศเป็นไปตามที่ต้องการได้ง่าย

2.2.2 สายอากาศโมนโพล (Monopole Antenna) เป็นสายอากาศที่มีขั้วเดียวที่มีความยาวเท่ากับ $\lambda/4$ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Omnidirectional และมีโพลาริเซชันตามแนวของเส้นลวดตัวนำเช่นกัน สายอากาศโมนโพลนี้เป็นสายอากาศที่วางตั้งเหนือกราวด์เพลน (Ground Plane) หรือพื้นดินโดยใช้ทฤษฎีเงา (Image Theory) ราวกับว่ามีเงาของสายอากาศโมนโพลอยู่อีกข้างหนึ่ง ทำให้ดูประหนึ่งว่าเป็นสายอากาศไดโพล โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำมาก ในทำนองเดียวกับสายอากาศไดโพล สายอากาศโมนโพลก็เป็นสายอากาศอีกประเภทหนึ่งที่นิยมนำมาใช้งานในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงกับหัวต่อคอนเนกเตอร์ SMA 50 โอห์ม มาก ทำให้ไม่ต้องใช้วงจรแปลงค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มเติมเช่นกัน

2.3 สายอากาศโมนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์

สายอากาศโมนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Antenna) นี้เป็นการออกแบบสายอากาศที่มีความยาวเท่ากับ $\lambda/4$ ขึ้นมาใช้งานสมัยใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาหลังจากที่มีการนำเสนอสายอากาศไมโครสตริปแล้ว เนื่องจากสายอากาศโมนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์นี้มีลักษณะเป็นแผ่นตัวนำ (Patch) ที่วางอยู่บนแผ่นไดอิเล็กตริก (Dielectric) ซึ่งเรียกว่า ซับสเตรต (Substrate) โดยมีการป้อนกำลังงานแก่สายอากาศโมนโพลโดยผ่านสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปและอาศัยกราวด์เพลน ของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปเป็นกราวด์เพลนถึงอนันต์ของสายอากาศไปในตัว (เคาเตอร์โพซ หรือ Counterpoise) จึงทำให้สายอากาศโมนโพลมีโครงสร้างเป็นแบบ

แบนราบ (Flat) บาง เบา เล็กกะทัดรัด ราคาถูก และโดยทั่วไปจะมีรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู กล่าวคือ ออกแบบง่าย แต่ประสิทธิภาพในการใช้งานของสายอากาศนั้นต่ำลง แต่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

คุณสมบัติของสายอากาศโมโนโพลโพลบนแผ่นวงจรมีดังนี้ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของนั้นมีทั้งแบบ Omnidirectional และแบบ Uni-Directional ขึ้นอยู่กับชนิดของ Patch ค่าไดเรกทิวิตีขึ้นอยู่กัชนิดและขนาดของ Patch และค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศขึ้นอยู่กัชนิดและขนาดของ Patch รวมถึงระบบการป้อนสัญญาณ (Feeder System) และโพลาริเซชันขึ้นอยู่กัระบบการป้อนสัญญาณ

เนื่องจากสายอากาศโมโนโพลที่สร้างขึ้นมาใช้งานนี้ถูกสร้างขึ้นบนแผ่นวงจรมีพื้ ดังนั้นค่าความยาวคลื่นที่ใช้ในการสร้างสายอากาศจึงมีค่าไม่เท่ากับค่าความยาวคลื่นในอากาศ ($\lambda \neq \lambda_0$) ซึ่งหาค่าจากสมการที่ 1 ดังนี้

$$\lambda_g \approx \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1)$$

เมื่อ $\lambda_0 = c/f$ เป็นค่าความยาวคลื่นในอากาศ, λ_g เป็นค่าความยาวคลื่นบนแผ่นวงจรมีพื้ (Guided Waveguide) และ ϵ_{eff} เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) ที่ซึ่งเราไม่สามารถจะนำเอาของสมการที่เกี่ยวข้องกัสายนำสัญญาณไมโครสตริปมาใช้ได้ เพราะแผ่นวงจรมีพื้ที่สร้างสายอากาศโมโนโพลนี้ไม่มีกราวด์เพลน แต่เราสามารถที่จะประมาณค่า ϵ_{eff} นี้ได้ จากสมการที่ 2¹

$$\epsilon_{eff} = 1 + \frac{\epsilon_R - 1}{2} \left\{ 1 - \left[\frac{w_s/h}{1 + w_s/h} \right] \right\} \quad (2)$$

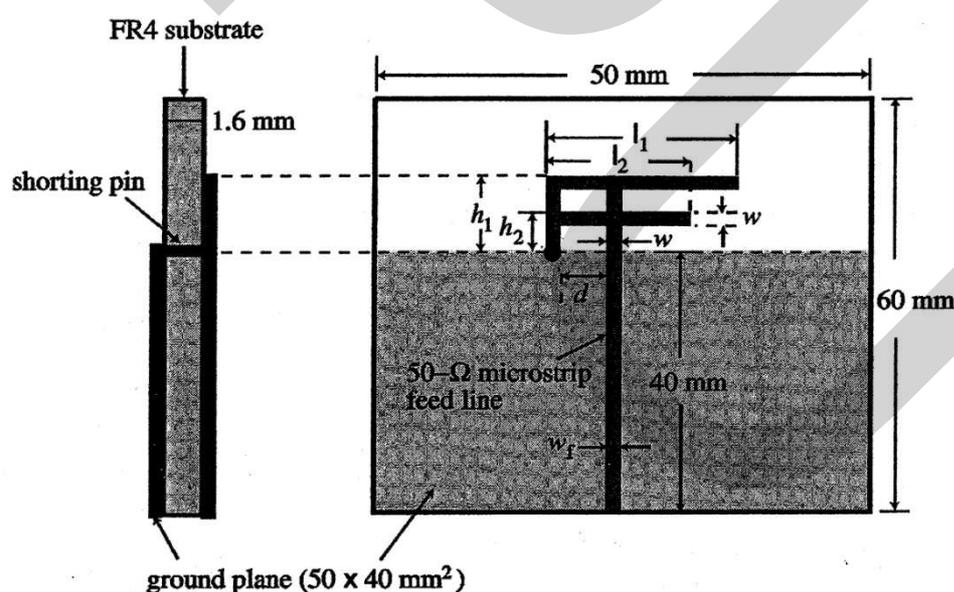
เมื่อ w_s เป็นความกว้างของสตริป

¹ C. Laohapensaeng, C. Free, and K.M. Lum. (2005, March). "Printed strip monopole antenna with the parasitic elements on the circular ground plane." *IWAT 2005*. pp. 371 – 374.

2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Y. L. Kuo *et al.*¹ ได้ทำการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัว F แบบต่อกัน 2 ตัวบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ดังแสดงในภาพที่ 2.1 เพื่อรองรับการใช้งานในเครือข่าย WLAN ย่านความถี่ 2.4 และ 5.2 GHz และใช้การป้อนกำลังงานผ่านสายนำสัญญาณไมโครสตริปและหัวต่อ SMA 50 โอห์ม โดยความยาวของสตริปตัวนำหรือสายอากาศโมโนโพลที่ใช้งานย่านความถี่ต่ำ 2.4 GHz มีความยาวเท่ากับ 31 mm และที่ใช้งานย่านความถี่สูง 5.2 GHz มีความยาวเท่ากับ 20 mm อีกทั้งมีการใช้พิน (Pin) เป็นตัวลัดวงจรให้แก่สตริปตัวนำที่เป็นสายอากาศ 2 ตัวนี้ลงกราวด์เพลน หลักการสำคัญที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศโมโนโพลชนิดนี้ก็คือ “ความยาวของสตริปตัวนำที่ใช้งานรองรับย่านความถี่สูงที่วางตัวในแนวตั้งเป็นส่วนหนึ่งของความยาวของสตริปตัวนำที่ใช้งานรองรับย่านความถี่ต่ำ” โดยมีการปรับระยะห่างระหว่างจุดที่ลัดวงจรกับสายนำสัญญาณไมโครสตริป 50 โอห์มเพื่อทำให้เกิดการแมทซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ที่ดี ค่าแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ที่ได้จากการพิจารณาค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ -14 dB สำหรับย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 645 MHz และ 255 MHz ตามลำดับ ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับที่ย่านความถี่ต่ำมีค่าต่ำสุด -18 dB ที่ความถี่ 2.5 GHz และที่ย่านความถี่สูงมีค่าต่ำสุด -29 dB ที่ความถี่ 5.2 GHz

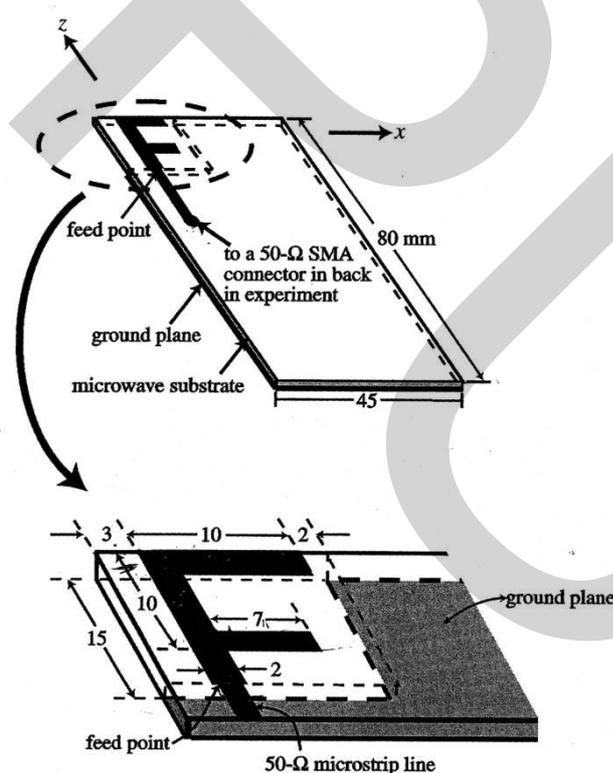
F-Shaped Monopole Antenna



ภาพที่ 2.1 สายอากาศโมโนโพลรูปตัว F แบบต่อกัน 2 ตัว¹

¹ Y. L. Kuo, T. W. Chiou, and K. L. Wong. (2001, December). "A novel dual-band printed inverted-F antenna." *Microwave Opt. Technol. Letter.* 31, pp. 353 - 355.

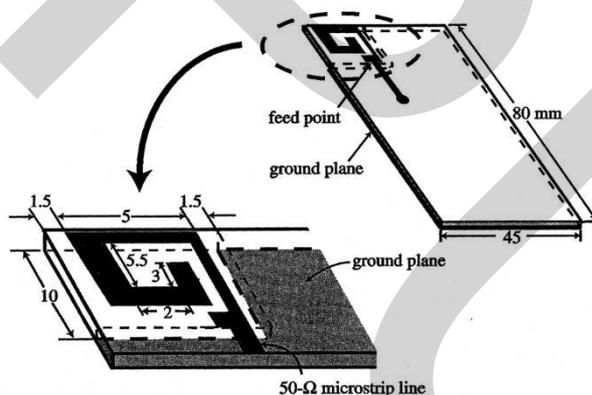
S. H. Yeh *et al.*¹ ได้ทำการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัว F (F-Shaped Monopole Antenna) บนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 โดยมีกราวด์เพลนอยู่อีกด้านหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ความกว้างของสตริปตัวนำรูปตัว F มีค่าเท่ากันทั้งหมดเท่ากับ 2 mm สตริปตัวนำในแนวนอนด้านบนห่างจากสตริปตัวนำในแนวนอนด้านล่างประมาณ 6 - 8 mm ความยาวของสตริปตัวนำหรือสายอากาศโมโนโพล (ยาว $\lambda_g/4$) ด้านบนที่ใช้งานย่านความถี่ต่ำ 2.4 GHz มีความยาวเท่ากับ 23 mm และความยาวของสตริปตัวนำด้านล่างที่ใช้งานย่านความถี่สูง 5.25 GHz มีความยาวเท่ากับ 12 mm โดยค่าแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ที่ย่านความถี่ต่ำและที่ย่านความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 570 MHz และ 280 MHz ตามลำดับ ส่วนสาเหตุที่แบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ย่านความถี่สูงมีค่าน้อยกว่าย่านความถี่ต่ำคือ ผลกระทบของกราวด์เพลนที่มีต่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นย่านความถี่สูงมีมากกว่าย่านความถี่ต่ำ หลักการที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศโมโนโพลชนิดนี้ก็คือ “ความยาวของสตริปตัวนำที่ใช้งานรองรับย่านความถี่สูงที่วางตัวในแนวตั้งเป็นส่วนหนึ่งของความยาวของสตริปตัวนำที่ใช้งานรองรับย่านของความถี่ต่ำ”



ภาพที่ 2.2 สายอากาศโมโนโพลรูปตัว F¹

¹ S. H. Yeh and K. L. Wong. (2002, July). "Integrated F-shaped monopole antenna for 2.4/5.2 GHz dual-band operation."

H. C. Tung *et al.*¹ ได้ทำการออกแบบและสร้างสายอากาศโมนโพลรูปก้นหอยแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Spiral Monopole Antenna) บนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ขนาด $45 \times 80 \text{ mm}^2$ ที่ใช้งานในย่านความถี่ 2.4 และ 5.2 GHz ดังแสดงในภาพที่ 2.3 โดยใช้ โดยขนาดพื้นที่ของตัวสายอากาศโมนโพลรูปก้นหอยแบบสี่เหลี่ยมมีค่าเท่ากับ $5 \times 10 \text{ mm}^2$ และขนาดที่ล้อมรอบสายอากาศนี้มีค่าเท่ากับ $8 \times 10 \text{ mm}^2$ โดยไม่มีกราวด์เพลนที่ด้านล่างของสายอากาศ ความยาวรวมของสตริปตัวนำที่ขดเป็นก้นหอยมีความยาวเท่ากับ 30 mm ซึ่งยาวเป็น $\lambda_g/4$ ของความยาวคลื่นใช้งานย่านความถี่ต่ำ 2.4 GHz ความกว้างของสตริปที่ใช้งานถูกแบ่งเป็น 2 ช่วงโดยช่วงแรกมีความหนาเท่ากับ 0.5 mm พิจารณาความยาวตั้งแต่จุดป้อนสัญญาณไปจนถึงท่อนที่ 2 ของสตริปตัวนำ ส่วนที่เหลือของสตริปตัวนำมีความกว้างเท่ากับ 1 mm โดยจุดป้อนสัญญาณจะถูกปรับให้สูงขึ้นหรือต่ำลงเพื่อให้ได้สามารถทำงานรองรับทั้งย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่ใช้งานได้ นอกจากนี้ มีสตัป (Stub) เล็กๆ ยื่นออกมาที่จุดป้อนสัญญาณเพื่อที่จะทำการแมชชิงอิมพีแดนซ์กับคอนเน็คเตอร์ SMA ขนาด 50 โอห์ม สายอากาศชนิดนี้ให้ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์เท่ากับ 156 MHz และ 540 MHz ที่ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง ตามลำดับ



ภาพที่ 2.3 สายอากาศโมนโพลรูปก้นหอยแบบสี่เหลี่ยม¹

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น จึงเกิดแนวความคิดที่จะออกแบบและสร้างสายอากาศโมนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีโครงสร้างใหม่และรองรับการใช้งาน 2 ย่านความถี่ ได้แก่ ย่านความถี่ต่ำในช่วง 800 – 900 MHz เพื่อที่จะสามารถทำงานรองรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ CDMA ของ บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน) และ ย่านความถี่สูงในช่วง 1.8 – 2.6 GHz

¹ H. C. Tung, W. S. Chen, and K. L. Wong, "Integrated rectangular spiral monopole antenna for 2.4/5.2 GHz dual-band operation." IEEE Antennas Propagat. Soc. Int. Symp. Dig. 3, pp. 446 - 449.

เพื่อที่จะสามารถทำงานรองรับระบบสื่อสารไร้สาย GSM1800, GSM1900, WCDMA/UMTS (3G), WiFi-2.45 GHz และ WiMAX-2.5 GHz ฯลฯ ได้ โดย 2 ย่านความถี่ใช้งานดังกล่าวนี้เป็นย่านความถี่ที่ใช้งานจริงในปัจจุบันและในอนาคตของประเทศไทย ที่ซึ่งยังไม่มีนักวิจัยท่านใดๆ นำเสนอและตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารและบทความเชิงวิชาการต่างๆ และยังไม่ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อขายและใช้งานจริงในประเทศไทย จึงไม่มีการเปรียบเทียบผลการทดสอบวงจรนี้กับวงจรอื่นๆ ที่ปรากฏในวารสารและบทความเชิงวิชาการต่างๆ

หลักการสำคัญในเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอและเป็นโครงสร้างใหม่นั้นจะอาศัยหลักการเดียวกับงานวิจัยที่มีการนำเสนอก่อนหน้านี้ กล่าวคือ “ความยาวของสตริปตัวนำที่ใช้งานรองรับย่านความถี่สูงที่วางตัวในแนวตั้งเป็นส่วนหนึ่งของความยาวของสตริปตัวนำที่ใช้งานรองรับย่านของความถี่ต่ำ” อีกทั้ง ยังมีการปรับความยาวของสตับ (Stub) เพิ่มเติม เพื่อทำการแมทซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์และลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกราวด์เพลน ทำให้สามารถรองรับการทำงานที่ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงที่นำเสนอได้

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

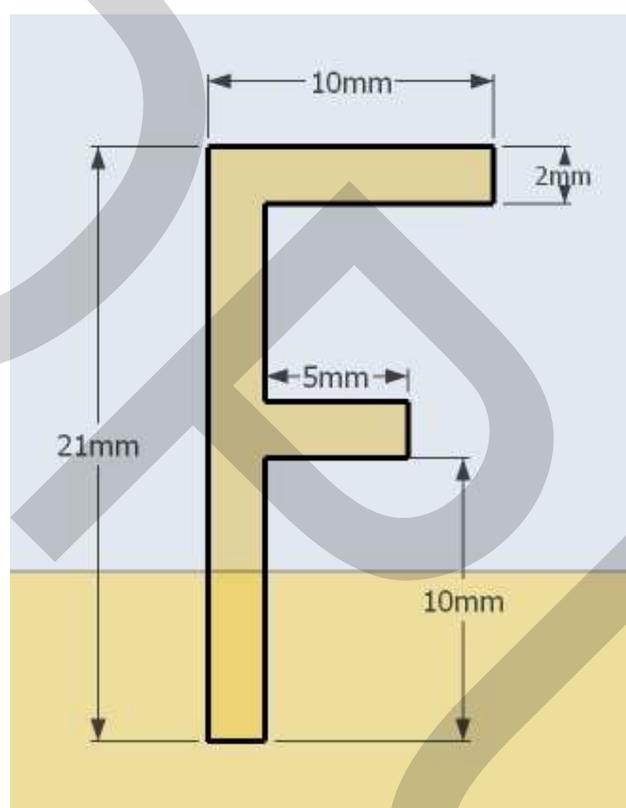
ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงหลักการและการออกแบบที่ละเอียดขึ้นตอน โดยเริ่มต้นจากหัวข้อที่ 3.1 ที่จะกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว F ที่นำเสนอผ่านมาแล้ว หลังจากนั้น หัวข้อที่ 3.2 จะกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์โครงสร้างใหม่ที่น่าสนใจ ซึ่งจะนำเสนอการออกแบบและพัฒนาโครงสร้างสายอากาศแบบใหม่ 2 แบบ คือ แบบที่มีปลายตรงลักษณะคล้ายกับตัว L หัวกลับและแบบที่มีปลายงอลงคล้ายรูปตัว C โดยสายอากาศที่น่าสนใจจะต้องสามารถรองรับการใช้งานที่ 2 ย่านความถี่และคุณสมบัติในการใช้งาน เป็นไปตามที่ต้องการได้ ส่วนผลการทดสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติในการทำงานของสายอากาศ เหล่านี้จะกล่าวถึงต่อไปในบทที่ 4 ต่อไป รายละเอียดของแต่ละหัวข้อมีดังนี้

3.1 การออกแบบสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว F¹

สายอากาศโมโนโพลรูปตัว F (F-Shaped Monopole Antenna) บนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 และมีกราวด์เพลนอยู่อีกด้านหนึ่ง¹ ได้ถูกจำลองขึ้นมาดังแสดงในภาพที่ 3.1 โดยความกว้างของ สตรีปตัวนำรูปตัว F มีค่าเท่ากันทั้งหมดเท่ากับ 2 mm สตรีปตัวนำในแนวนอนด้านบนห่างจากสตรีป ตัวนำในแนวนอนด้านล่างประมาณ 6 - 8 mm ความยาวของสตรีปตัวนำหรือสายอากาศโมโนโพล (ยาว $\lambda_g/4$) ด้านบนที่ใช้งานย่านความถี่ต่ำ 2.4 GHz มีความยาวเท่ากับ 23 mm และความยาวของ สตรีปตัวนำด้านล่างที่ใช้งานย่านความถี่สูง 5.25 GHz มีความยาวเท่ากับ 12 mm หลักการที่สำคัญที่ ใช้ในการออกแบบสายอากาศโมโนโพลชนิดนี้ก็คือ “ความยาวของสตรีปตัวนำที่ใช้งานรองรับย่าน ความถี่สูงที่วางตัวในแนวตั้งเป็นส่วนหนึ่งของความยาวของสตรีปตัวนำที่ใช้งานรองรับย่านของ ความถี่ต่ำ” จากการเขียนโปรแกรมและจำลองตัวสายอากาศโมโนโพลรูปตัว F นี้ในทางทฤษฎี พบว่า ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return Loss หรือ S_{11}) ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -16.58 dB และ -10 dB ที่ค่าความถี่ 2.41 GHz และ 5.81 GHz ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่า สายอากาศต้นนี้สามารถทำงานได้ดี

¹ S. H. Yeh and K. L. Wong. (2002, July). “Integrated F-shaped monopole antenna for 2.4/5.2 GHz dual-band operation.”

ตามต้องการ ณ ย่านความถี่ต่ำ 2.4 GHz แต่ที่ย่านความถี่สูงจะใช้งานได้จริงเลื่อนออกไปจากค่าความถี่ 5.25 GHz ที่ต้องการ ซึ่งอาจจะเป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกราวด์เพลนและขนาดของสตริปตัวนำที่อาจจะต้องมีการปรับปรุง จึงส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าสูญเสียจากการย้อนกลับที่ค่าความถี่ออกแบบ 5.25 GHz และแบบภาพการแพร่กระจายคลื่นที่ย่านความถี่สูงมีมากกว่าที่ย่านความถี่ต่ำ โดยกราฟของค่าสูญเสียจากการย้อนกลับจะแสดงไว้ในบทที่ 4 หัวข้อผลการทดสอบ



ภาพที่ 3.1 สายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว F

3.2 การออกแบบสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์โครงสร้างใหม่ที่นำเสนอ

จากหลักการที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศที่ทำงาน 2 ย่านความถี่ โดยนำความยาวของสตริปตัวนำขนาด $\lambda_g/4$ ที่ใช้งานย่านความถี่สูงมาเป็นส่วนหนึ่งของความยาวของสตริปตัวนำขนาด $\lambda_g/4$ ที่ใช้งานย่านความถี่ต่ำมีความเป็นไปได้ ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.1 จึงนำหลักการดังกล่าวไปใช้การออกแบบสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีแนวโน้มว่าจะสามารถนำเสนอโครงสร้างใหม่ได้

จากหลักการที่ใช้ในการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ และจากการใช้เขียนโปรแกรมและจำลองตัวสายอากาศในทางทฤษฎี จึงทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถที่จะนำเสนอสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีโครงสร้างใหม่และสามารถรองรับ การใช้งาน 2 ย่านความถี่ตามที่ต้องการได้ โดยตัวโมโนโพลโครงสร้างใหม่ที่น่าเสนอนี้จะถูกสร้าง ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ที่มีความหนาเป็น h มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเป็น ϵ_R และอาศัยกราฟต์ เพลนของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปเป็นกราฟต์เพลนของสายอากาศ และมีการป้อนกำลัง งานแก่สายอากาศผ่านสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริป เนื่องจาก FR-4 เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีราคา ถูกและหาซื้อง่ายในประเทศไทย อีกทั้งการออกแบบและสร้างสายอากาศที่น่าเสนอนี้มีค่าความถี่ใช้ งานไม่เกิน 3 – 4 GHz จึงทำให้สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ได้อย่างไม่มีปัญหา

แต่เนื่องจากสายอากาศโมโนโพลที่น่าเสนอนี้ถูกสร้างขึ้นบนแผ่นวงจรพิมพ์ ดังนั้นค่า ความยาวคลื่นที่ใช้ในการสร้างสายอากาศจึงมีค่าไม่เท่ากับค่าความยาวคลื่นในอากาศ ($\lambda \neq \lambda_0$) ซึ่ง หาค่าจากสมการที่ 1 ดังนี้

$$\lambda_g \approx \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1)$$

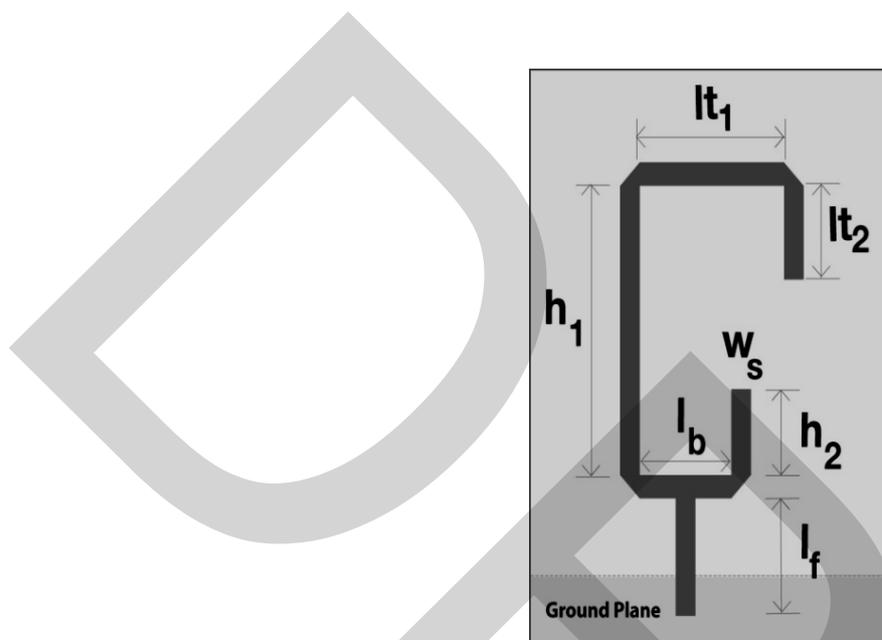
เมื่อ $\lambda_0 = c/f$ เป็นค่าความยาวคลื่นในอากาศ, λ_g เป็นค่าความยาวคลื่นในแผ่นวงจร พิมพ์ (Guided Waveguide) และ ϵ_{eff} เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) ที่ซึ่ง เราไม่สามารถจะนำเอาของสมการที่เกี่ยวข้องกับสายนำสัญญาณไมโครสตริปมาใช้ได้ เพราะแผ่น วงจรพิมพ์ที่สร้างสายอากาศโมโนโพลนี้ไม่มีกราฟต์เพลน แต่เราสามารถที่จะประมาณค่า ϵ_{eff} นี้ได้ จากสมการที่ 2¹

$$\epsilon_{eff} \approx 1 + \frac{\epsilon_R - 1}{2} \left\{ 1 - \left[\frac{w_s/h}{1 + w_s/h} \right] \right\} \quad (2)$$

เมื่อ w_s เป็นความกว้างของสตริป จากการใช้แผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ที่พิจารณาค่า $h = 1.6$ mm และ $\epsilon_R = 4.9$ อีกทั้งสายอากาศโมโนโพลนี้ถูกป้อนกำลังงานผ่านสายนำสัญญาณไมโคร สตริป 50 โอห์ม จึงทำให้ได้ค่าความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริปมีค่าเท่ากับ 3 mm หลังจากนั้น จะคำนวณหาค่า ϵ_{eff} มีค่าเท่ากับ 1.678 ซึ่งจะนำค่า ϵ_{eff} นี้ไปแทนค่าในสมการที่ 1 เพื่อ หาค่าความยาวของสายอากาศโมโนโพลที่ใช้งาน ณ ย่านความถี่ต่ำและสูงที่ต้องการ

¹ C. Laohapensaeng, C. Free, and K.M. Lum. (2005, March). "Printed strip monopole antenna with the parasitic elements on the circular ground plane." *IWAT 2005*, pp. 371 - 374.

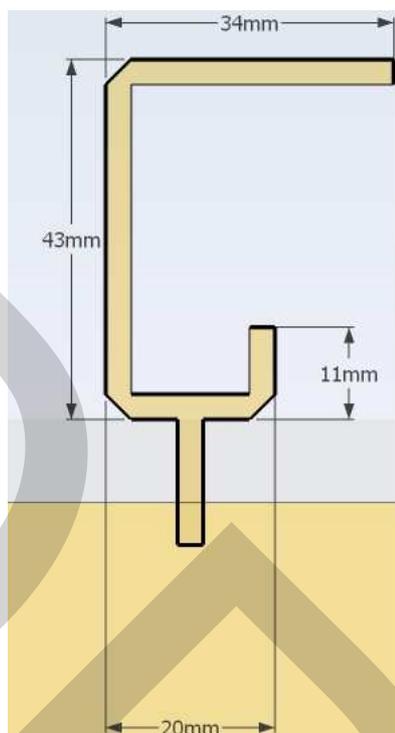
ทั้งนี้ ตัวโมโนโพลโครงสร้างใหม่ที่นำเสนอก็จะมีค่าความกว้างของสตริปตัวนำเท่ากับ 3 mm ทั้งหมดเช่นกัน ในที่นี้ จะกำหนดสัญลักษณ์ความยาวต่างๆ ของสายอากาศที่นำเสนอเพื่อใช้ในการคำนวณดังในภาพที่ 3.2



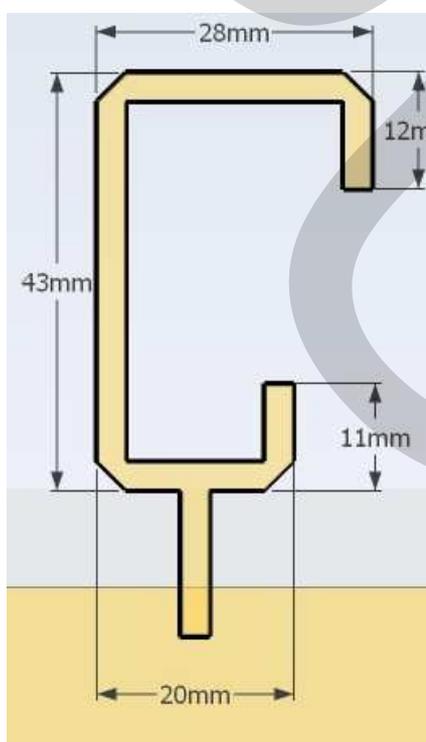
ภาพที่ 3.2 สัญลักษณ์ความยาวต่างๆ ของสายอากาศที่นำเสนอ

โดยการทำงานของสายอากาศที่ย่านความถี่ต่ำจะถูกกำหนดให้มีความถี่กลางเท่ากับ 850 MHz ดังนั้น ความยาวของสายอากาศโมโนโพลที่ทำงานย่านความถี่ต่ำนี้จะมีค่าเท่ากับ $L_{low} = h_1 + lt_1 + lt_2 = \lambda_{gl}/4$ ส่วนที่ย่านความถี่สูงจะถูกกำหนดให้มีความถี่กลางเท่ากับ 2.25 GHz ดังนั้น ความยาวของสายอากาศโมโนโพลที่ทำงานย่านความถี่สูงมีค่าเท่ากับ $L_{high} = lt_1 = \lambda_{gh}/4$ โดยจะใช้ความยาว lt_2 และ h_2 ทำหน้าที่ในการปรับการแมทซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ (Impedance Matching) ให้ได้คุณสมบัติการทำงานของสายอากาศตามที่ต้องการ

จากหลักการออกแบบที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด จึงทำให้เกิดโครงสร้างสายอากาศแบบใหม่ 2 แบบ คือ แบบที่มีปลายตรงลักษณะคล้ายกับตัว L หัวกลับและแบบที่มีปลายโค้งลงลักษณะคล้ายรูปตัว C (โครงสร้างแบบหลังนี้จะถูกเรียกย่อๆ ต่อไปนี้ว่า “รูปตัว C”) ดังแสดงในภาพที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอ 2 โครงสร้างใหม่นี้ดังกล่าวเพื่อแสดงให้เห็นถึงลำดับขั้นของการพัฒนาสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอและแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอ ก่อนที่จะได้รับสายอากาศโมโนโพลโครงสร้างรูปสุดท้ายที่มีคุณสมบัติในการทำงานที่ดีที่สุดและตอบสนองต่อความต้องการในการออกแบบได้



ภาพที่ 3.3 สายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรมีพื้แบบที่มีปลายตรงลักษณะคล้ายตัว L กลับหัว



ภาพที่ 3.4 สายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรมีพื้แบบที่มีปลายงอคล้ายรูปตัว C

จากสมการที่ 1 และ 2 เราสามารถคำนวณหาค่าความยาว (L) ของสายอากาศโมโนโพล ในหน่วย mm ที่สร้างขึ้นมาใช้งานในอากาศกับที่สร้างขึ้นใช้งานบนแผ่นวงจรพิมพ์ในทางทฤษฎี ซึ่งค่าที่คำนวณได้มีแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าความยาวของสายอากาศโมโนโพล (หน่วย mm)

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

บทที่ 4

ผลการศึกษา

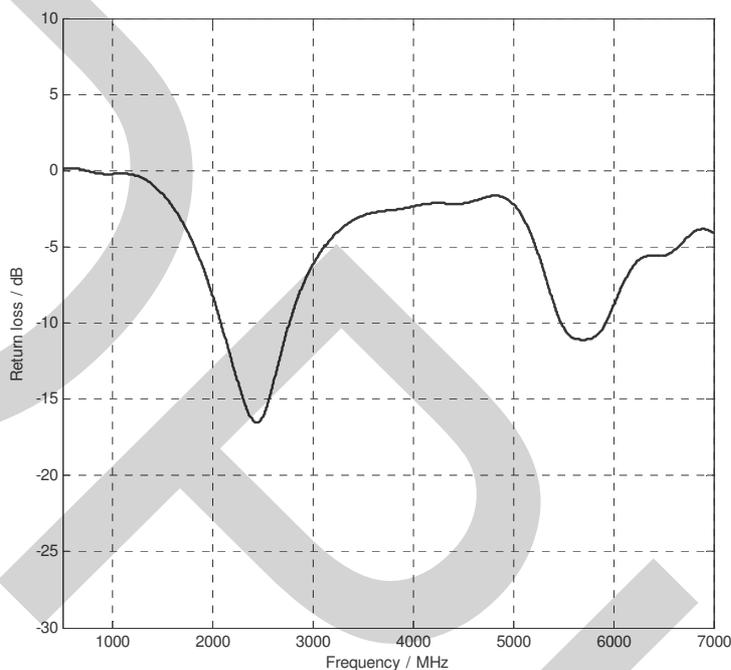
ในบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงการทดสอบสายอากาศ โดยเริ่มต้นจากหัวข้อที่ 4.1 ที่จะกล่าวถึงผลการจำลองและทดสอบสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว F ที่นำเสนอใน S. H. Yeh *et al.*¹ เพื่อที่จะศึกษาถึงความถูกต้องของหลักการที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ ก่อนที่จะปรับปรุงโครงสร้างและเปลี่ยนย่านความถี่ไปใช้งานใน 2 ย่านความถี่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้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

4.1 ผลการจำลองและทดสอบสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว F

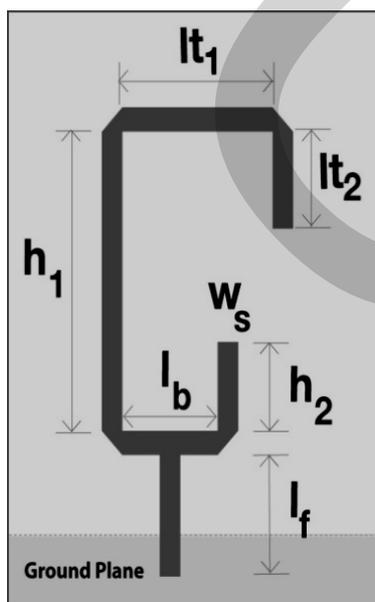
จากการที่หัวข้อที่ 3.1 ได้อธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างและหลักการออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูปตัว F (F-Shaped Monopole Antenna)¹ ไปแล้วนั้น ในหัวข้อที่ 4.1 นี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว F ที่ได้รับจากการเขียนโปรแกรมและจำลองตัวสายอากาศโมโนโพลรูปตัว F นี้ในทางทฤษฎี จากการทดสอบพบว่า 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."

มีการปรับปรุง จึงส่งผลกระทบต่อค่าสูญเสียจากการย้อนกลับที่ค่าความถี่ออกแบบ 5.25 GHz จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้รับ ทำให้ทราบว่า หลักการที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศโมโนโพลรูปตัว F นั้นสามารถจะนำไปใช้ในการออกแบบสายอากาศโมโนโพลที่มีโครงสร้างใหม่แบบอื่นๆ ได้ แต่ทั้งนี้อาจจะต้องมีสตัด (Stub) ต่อกออกจากสายอากาศโมโนโพลเพิ่ม



ภาพที่ 4.1 ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับที่ได้รับจากการจำลองสายอากาศโมโนโพลรูปตัว F



ภาพที่ 4.2 สัญลักษณ์ความยาวต่างๆ ของสายอากาศที่นำเสนอ

เดิมเพื่อชดเชยผลกระทบของกราวด์เพลนที่มีต่อย่านความถี่สูงและทำการแมชชิงอิมพีแดนซ์ จากการศึกษาดังกล่าว จึงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะสร้างสายอากาศโมโนโพลโครงสร้างใหม่ 2 แบบ ได้แก่ แบบรูปตัว L หัวกลับ ซึ่งมีปลายด้านบนยื่นตรงและแบบรูปตัว C ที่มีปลายด้านบนยื่นตรง และมีสตัดปองลง เพื่อปรับจูนค่าอิมพีแดนซ์ให้สอดคล้องกับ SMA 50 โอห์ม (Impedance Matching)

อ้างอิงหัวข้อที่ 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 เราสามารถคำนวณหาความยาว (L) ของสายอากาศโมโนโพลในหน่วย mm ที่สร้างขึ้นมาใช้งานดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ซึ่งในที่นี้ ค่าความยาวของสายอากาศโมโนโพลที่สร้างขึ้นบนแผ่นวงจรพิมพ์ในทางทฤษฎีจะถูกใช้งานเป็นความยาวหลัก (ความยาวทั้งหมด) ของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอ กล่าวคือ $L_{low} = h_1 + lt_1 + lt_2 = 68 \text{ mm}$ และความยาวของสายอากาศโมโนโพลที่ทำงานย่านความถี่สูงนี้จะมีค่าเท่ากับ $L_{high} = lt_1 = \lambda_{gh}/4 = 26 \text{ mm}$ โดยในที่นี้ จะใช้ความยาว lt_2 และ h_2 ทำหน้าที่ในการปรับการแมชชิงอิมพีแดนซ์ให้ได้คุณสมบัติการทำงานของสายอากาศตามที่ต้องการ แต่ทั้งนี้ เพื่อที่จะทำให้การออกแบบสายอากาศที่นำเสนอนั้นง่ายขึ้น จะทำการกำหนดค่า h_2 ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 8 mm และปรับค่าความยาว lt_2 เพียงค่าเดียว

ดังนั้น ในการออกแบบและจำลองสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอดังกล่าวไปนี้จะทำการเปลี่ยนค่าความยาวของ h_1 , lt_1 และ lt_2 เพื่อที่จะพิจารณาว่าความยาวค่าใดที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติการทำงานของสายอากาศมากที่สุด แต่ทั้งนี้ ความยาวทั้งหมดของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอยังคงมีค่าเท่ากับ $L_{low} = h_1 + lt_1 + lt_2 = 68 \text{ mm}$ 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
$L_{low} \approx \frac{\lambda_0}{4} = 88.23 \text{ mm}$ (ที่ความถี่ 850 MHz)	$L_{low} \approx \frac{\lambda_{gl}}{4} = 67.9 \approx 68 \text{ mm}$
$L_{high} \approx \frac{\lambda_0}{4} = 33.33 \text{ mm}$ (ที่ความถี่ 2.25 GHz)	$L_{high} \approx \frac{\lambda_{gh}}{4} = 25.6 \approx 26 \text{ mm}$

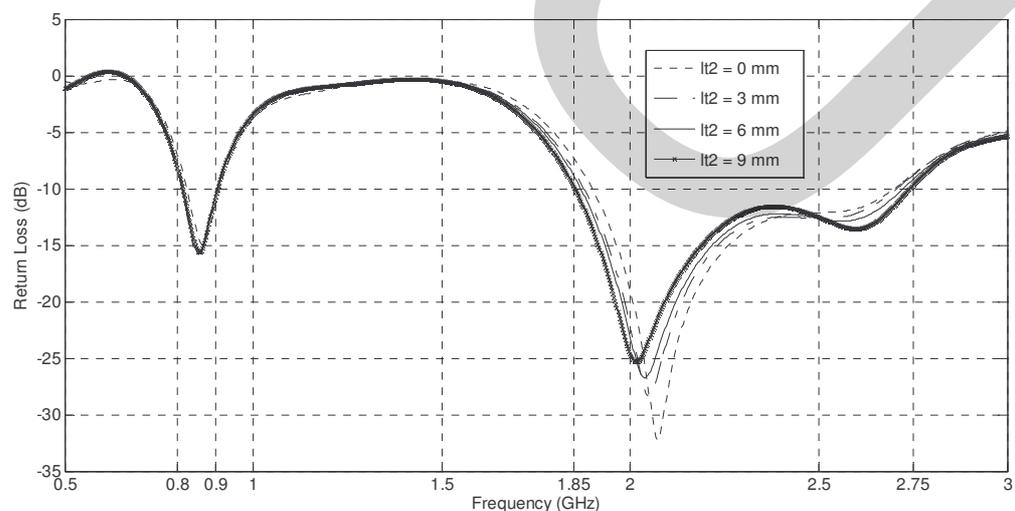
4.2 ผลการจำลองและทดสอบสายอากาศโมโนโพลรูปตัว L หักกลับและรูปตัว C ที่ความยาวต่าง ๆ

4.2.1 สายอากาศมีค่า $h_1 = 37 \text{ mm}$ คงที่ ส่วน lt_1 และ lt_2 มีค่าที่เปลี่ยนแปลง

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

ตารางที่ 4.2 ค่า Return Loss และ Bandwidth ของสายอากาศเมื่อกำหนดค่า $h_1 = 37 \text{ mm}$ 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 $h_1 = 37 \text{ mm}$ 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 อีกทั้งค่า 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

อ้างอิงความยาวทั้งหมดของสายอากาศโมโนโพลมีค่าเท่ากับ $L_{low} = h_1 + lt_1 + lt_2 = 68$ 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 เพื่อที่จะพิจารณาว่าคุณสมบัติความยาวค่าใดที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัตินำการทำงานของสายอากาศมากที่สุด 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

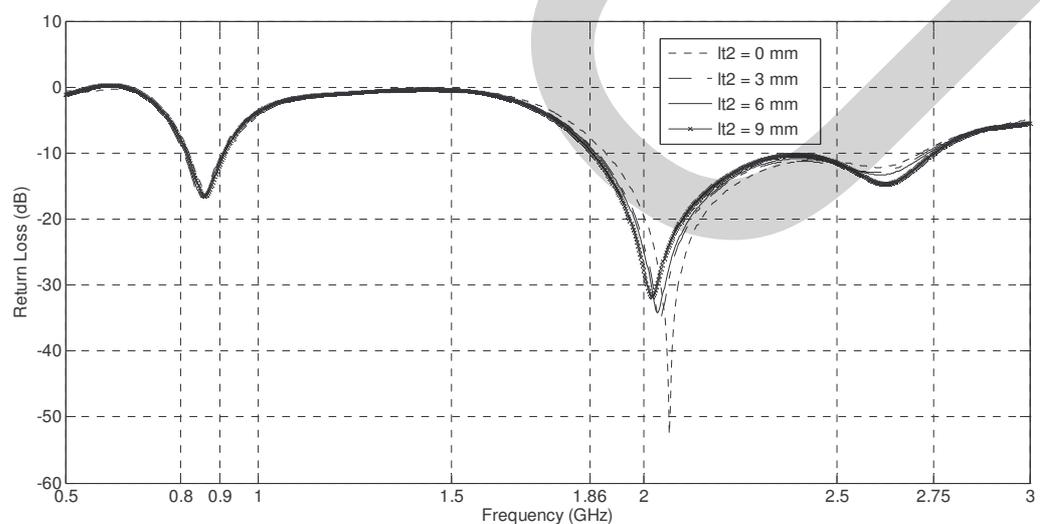
2. กรณีที่ 1 ค่า $h_1 = 40 \text{ mm}$ และค่า $lt_1 = 28 \text{ mm}$ เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่สูงที่น้อยที่สุด แต่ค่า S_{11} มีค่าต่ำสุดเท่ากับ -52 dB ณ ค่าความถี่เท่ากับ 2.1 GHz เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ ที่เหลืออีก 3 กรณี

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

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

ตารางที่ 4.3 ค่า Return Loss และ Bandwidth ของสายอากาศเมื่อกำหนดค่า $h_1 = 40 \text{ mm}$ ลงที่

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



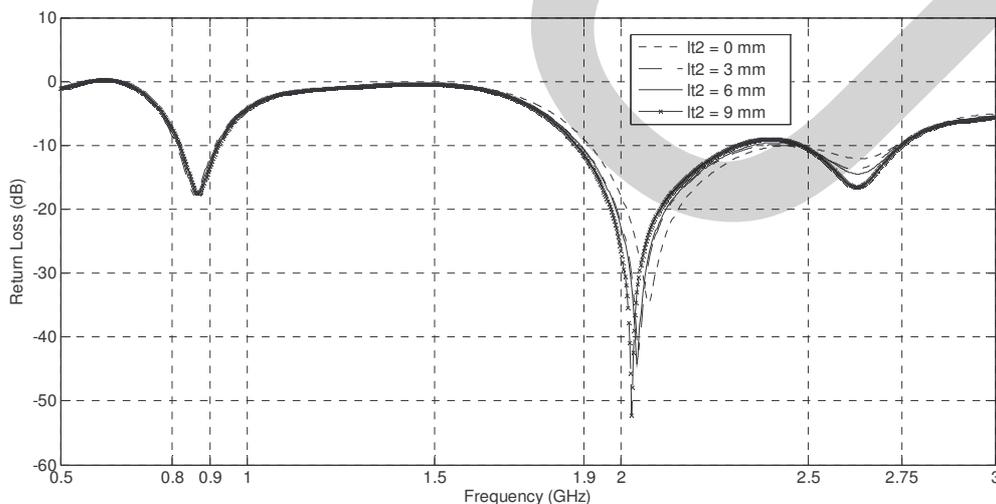
ภาพที่ 4.4 ผลการจำลองค่า Return Loss เมื่อกำหนดค่า $h_1 = 40 \text{ mm}$ ลงที่

4.2.3 สายอากาศมีค่า $h_1 = 43 \text{ mm}$ คงที่ ส่วน lt_1 และ lt_2 มีค่าที่เปลี่ยนแปลง

อ้างอิงความยาวทั้งหมดของสายอากาศโมโนโพลมีค่าเท่ากับ $L_{low} = h_1 + lt_1 + lt_2 = 68 \text{ mm}$ เมื่อกำหนดค่า $h_1 = 43 \text{ mm}$ คงที่และค่าความยาว lt_2 มีค่าตั้งแต่ 0 mm ไปจนถึง 9 mm ดังนั้นค่าความยาวที่เหลือคือค่า lt_1 จะมีค่าดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 หลังจากที่ได้ทำการกำหนดค่าความยาวต่างๆ ให้แก่สตริปตัวนำของสายอากาศโมโนโพลที่น่าเสนอแล้ว เราจะทำการจำลองสายอากาศที่มีความยาวต่างๆ เหล่านี้ขึ้นมา เพื่อที่จะพิจารณาว่าความยาวค่าใดที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติการทำงานของสายอากาศมากที่สุด โดยภาพที่ 4.4 แสดงค่า S_{11} และตารางที่ 4.5 แสดงค่า S_{11} และแบนด์วิดธ์ของสายอากาศโมโนโพลที่น่าเสนอที่ได้รับจากการจำลองในทางทฤษฎี เมื่อกำหนดค่า $h_1 = 43 \text{ mm}$ คงที่

ตารางที่ 4.4 ค่า Return Loss และ Bandwidth ของสายอากาศเมื่อกำหนดค่า $h_1 = 43 \text{ mm}$ 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 $h_1 = 43 \text{ mm}$ 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

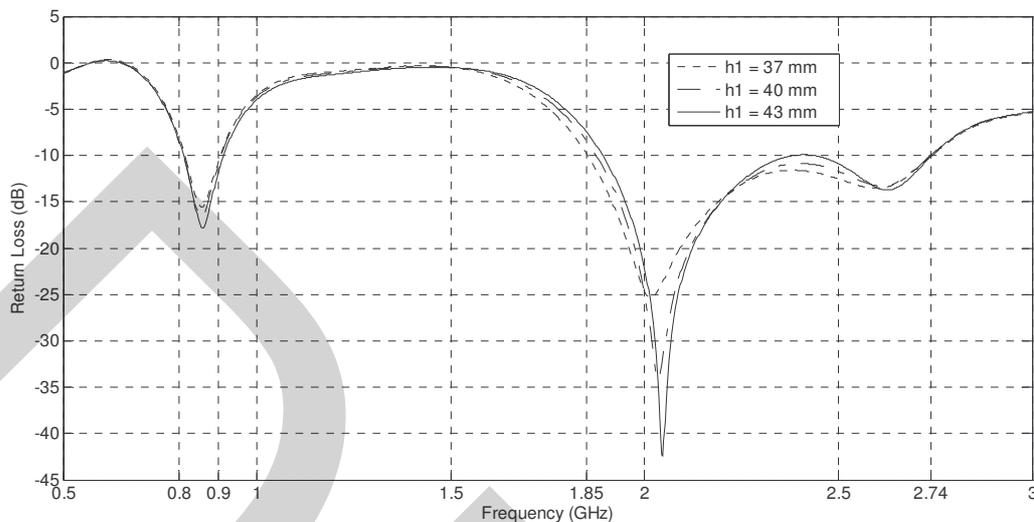
สรุปได้ว่า ค่า $h_1 = 43$ mm จะมีค่า S_{11} ในย่านความถี่สูงมีค่ามากกว่าที่ $h_1 = 37$ mm เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.2.2 ดังนั้น จึงควรนำขนาดความยาว $h_1 = 37$ mm ไปใช้ในการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลที่น่าเสนอมากที่สุด

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

อ้างอิงความยาวทั้งหมดของสายอากาศโมโนโพลมีค่าเท่ากับ $L_{low} = h_1 + lt_1 + lt_2 = 68$ mm เมื่อกำหนดค่า $lt_1 = 22$ mm คงที่และค่าความยาว h_1 และ lt_2 มีค่าที่เปลี่ยนแปลงดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 หลังจากที่ได้ทำการกำหนดค่าความยาวต่างๆ ให้แก่สตริปตัวนำของสายอากาศโมโนโพลที่น่าเสนอแล้ว เราจะทำการจำลองสายอากาศที่มีความยาวต่างๆ เหล่านี้ขึ้นมา เพื่อที่จะพิจารณาว่าความยาวค่าใดที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติการทำงานของสายอากาศมากที่สุด โดยภาพที่ 4.6 แสดงค่า S_{11} และตารางที่ 4.5 แสดงค่า S_{11} และแบนด์วิดธ์ของสายอากาศโมโนโพลที่น่าเสนอที่ได้รับจากการจำลองในทางทฤษฎี 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 $l_{t_1} = 22 \text{ mm}$ คงที่

ภาพที่ 4.6 แสดงผลการจำลองค่า Return Loss เมื่อกำหนดค่า $l_{t_1} = 22 \text{ mm}$ คงที่ ซึ่งมีรายละเอียดของการเปรียบเทียบและวิเคราะห์คุณลักษณะการทำงานในแต่ละย่านความถี่ ดังนี้

1. เมื่อกำหนดค่า $l_{t_1} = 22 \text{ mm}$ คงที่และเปลี่ยนแปลงค่า h_1 และ l_{t_2} ไปเป็นค่าความยาวต่างๆ อีก 3 กรณี พบว่า ทั้ง 3 กรณีดังกล่าวให้ค่า S_{11} ที่ย่านความถี่ต่ำมีค่าต่ำสุดทั้งหมดใกล้เคียงกันคือ -15 dB แต่ไม่เกิน -18 dB และค่าแบนด์วิดท์ย่านความถี่ต่ำก็กว้างพอๆ กันทั้ง 3 กรณี

2. กรณีที่ 1 ค่า $l_{t_1} = 22 \text{ mm}$ และค่า $h_1 = 37 \text{ mm}$ เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดท์ย่านความถี่สูงที่มากที่สุด แต่ให้ค่า S_{11} มีค่าที่สูงที่สุดเท่ากับ -25 dB ณ ค่าความถี่เท่ากับ 2 GHz เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ ที่เหลืออีก 2 กรณี ซึ่ง ที่ได้รับมีค่าที่ต่ำกว่า -10 dB ตามที่กำหนดไว้ จึงถือว่ามีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด ก็ยอมรับความถี่ในการใช้งาน ณ ย่านความถี่สูงที่มากกว่า

3. กรณีที่ 2 ค่า $l_{t_1} = 22 \text{ mm}$ และค่า $h_1 = 40 \text{ mm}$ เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดท์ย่านความถี่สูงเท่ากับ 875 MHz และให้ค่า S_{11} มีค่าปานกลางเท่ากับ -33 dB ณ ความถี่ 2.05 GHz

4. กรณีที่ 3 ค่า $l_{t_1} = 22 \text{ mm}$ และค่า $h_1 = 43 \text{ mm}$ เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดท์ย่านความถี่สูงเท่ากับ 840 MHz และให้ค่า S_{11} มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ -40 dB ณ ความถี่ 2.08 GHz

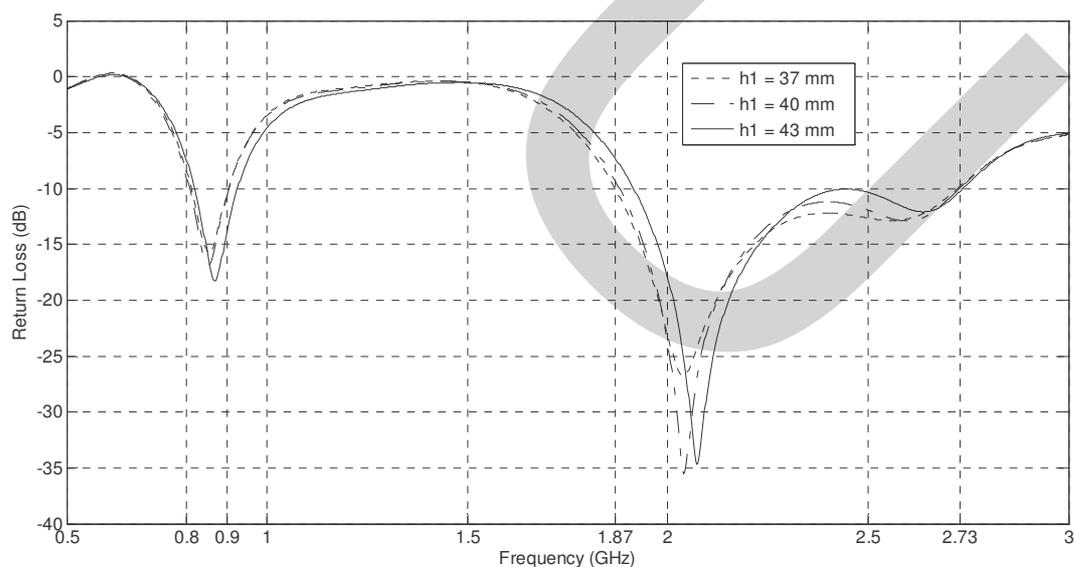
สรุปได้ว่า ถึงแม้ว่าค่าความยาว $h_1 = 40 \text{ mm}$ และ $h_1 = 43 \text{ mm}$ จะให้ค่า S_{11} ในย่านความถี่สูงมีค่าต่ำ แต่แบนด์วิดท์ที่ใช้งานได้มีค่าที่น้อยกว่ากรณีที่ 1 ที่ใช้ค่า $h_1 = 37 \text{ mm}$ ดังนั้น จึงควรนำขนาดความยาว $h_1 = 37 \text{ mm}$ ไปใช้ในการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอมากที่สุด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

4.2.5 สายอากาศมีค่า $lt_1 = 25 \text{ mm}$ คงที่ ส่วน h_1 และ lt_2 มีค่าที่เปลี่ยนแปลง

อ้างอิงความยาวทั้งหมดของสายอากาศโมโนโพลมีค่าเท่ากับ $L_{low} = h_1 + lt_1 + lt_2 = 68 \text{ mm}$ เมื่อกำหนดค่า $lt_1 = 25 \text{ mm}$ คงที่และค่าความยาว h_1 และ lt_2 มีค่าที่เปลี่ยนแปลงดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 หลังจากที่ได้ทำการกำหนดค่าความยาวต่างๆ ให้แก่สตริปตัวนำของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอแล้ว เราจะทำการจำลองสายอากาศที่มีความยาวต่างๆ เหล่านี้ขึ้นมา เพื่อที่จะพิจารณาว่าความยาวค่าใดที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติการทำงานของสายอากาศมากที่สุด โดยภาพที่ 4.7 แสดงค่า S_{11} และตารางที่ 4.6 แสดงค่า S_{11} และแบนด์วิดท์ของสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอที่ได้รับจากการจำลองในทางทฤษฎี เมื่อกำหนดค่า $lt_1 = 25 \text{ mm}$ คงที่

ตารางที่ 4.6 ค่า Return Loss และ Bandwidth ของสายอากาศเมื่อกำหนดค่า $lt_1 = 25 \text{ mm}$ 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 $lt_1 = 25 \text{ mm}$ คงที่

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

1. เมื่อกำหนดค่า $lt_1 = 25 \text{ mm}$ 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 $lt_1 = 25 \text{ mm}$ และค่า $h_1 = 37 \text{ mm}$ เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่สูงที่มากที่สุด แต่ให้ค่า S_{11} มีค่าที่สูงที่สุดเท่ากับ -26.5 dB ณ ค่าความถี่เท่ากับ 2.03 GHz แต่แบนด์วิดธ์มีค่ากว้างที่สุดมีค่าเท่ากับ 750 MHz เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่เหลืออีก 2 กรณี

3. กรณีที่ 2 ค่า $lt_1 = 25 \text{ mm}$ และค่า $h_1 = 40 \text{ mm}$ เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่สูงเท่ากับ 850 MHz และให้ค่า S_{11} มีค่าเท่ากับ -35 dB ณ ความถี่ 2.05 GHz

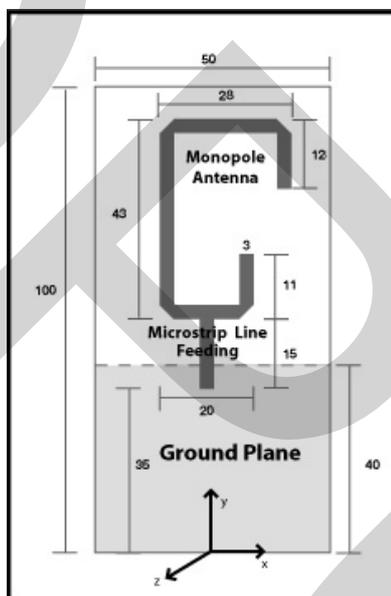
4. กรณีที่ 3 ค่า $lt_1 = 22 \text{ mm}$ และค่า $h_1 = 43 \text{ mm}$ เป็นขนาดความยาวที่ให้ค่าแบนด์วิดธ์ย่านความถี่สูงเท่ากับ 850 MHz และให้ค่า S_{11} มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ -35 dB ณ ความถี่ 2.1 GHz

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

บทสรุปและการวิเคราะห์หัวข้อ 4.2 ผลการจำลองและทดสอบสายอากาศโมโนโพลรูปตัว L หัวกลับและรูปตัว C ที่ความยาวต่างๆ กล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

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

หลังจากที่ได้ทราบค่าความยาวที่เหมาะสมดังแสดงในภาพที่ 4.8 ต่อการนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอแล้ว กล่าวคือ “ค่า $h_1 = 37 \text{ mm}$, ค่า $lt_1 = 22 \text{ mm}$, ค่า $lt_2 = 9 \text{ mm}$, และค่า $h_2 = 8 \text{ mm}$ 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. วัดระดับกำลังสัญญาณเพื่อหาแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (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 ในขณะที่ทำการทดสอบสายอากาศที่นำเสนอที่แสดงไว้ในภาพที่ 4.10 – 4.12



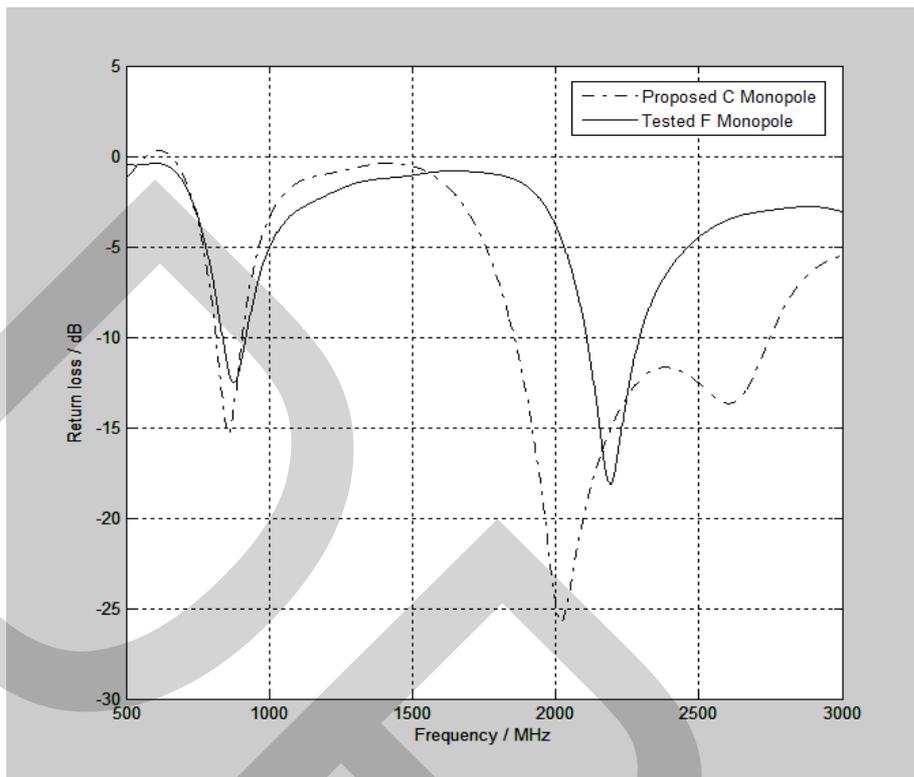
ภาพที่ 4.10 ภาพถ่ายของเครื่องสเปกตรัมอนาไลเซอร์ (ย่านความถี่ใช้งาน 9 kHz – 22 GHz)



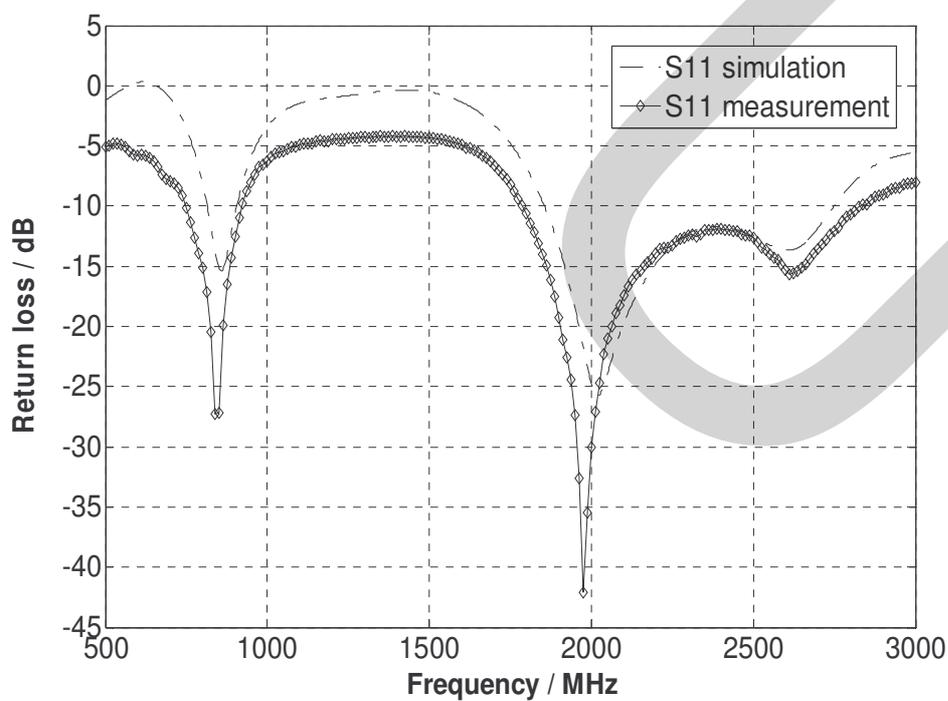
ภาพที่ 4.11 ภาพถ่าย Signal Generator HP8657B (ย่านความถี่ใช้งาน 0.1 MHz – 2060 MHz) และ Signal Generator HP83731A (ย่านความถี่ใช้งาน 1 GHz – 20 GHz)



ภาพที่ 4.12 ภาพถ่ายเหตุการณ์ต่างๆ ในขณะที่ทำการทดสอบสายอากาศที่นำเสนอ



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 ที่ได้รับการจำลองและทดลอง

	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 ซึ่งค่าการทำงานที่ ย่านความถี่ต่ำเหล่านี้มีค่าที่น้อยกว่าสายอากาศโมโนโพลรูปตัว 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 ซึ่งค่าการทำงานที่ ย่านความถี่สูงเหล่านี้มีค่าที่น้อยกว่าสายอากาศโมโนโพลรูปตัว 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} ที่ได้รับการวัดสอดคล้องเป็นอย่างดีกับค่า 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

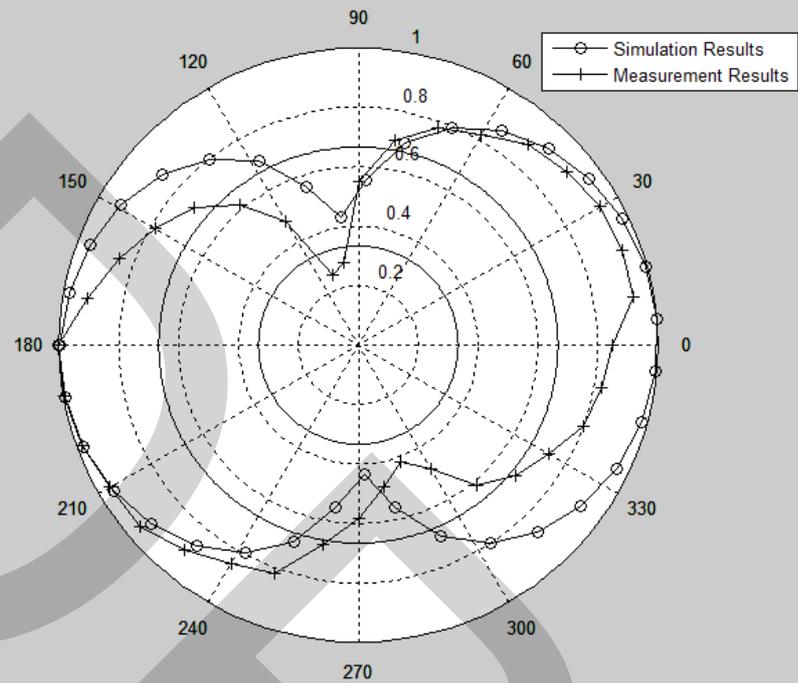
4. ที่ย่านความถี่สูง 1.95 GHz ค่า S_{11} ที่ได้จากการวัดมีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้รับจากการจำลองสายอากาศ 20.5 dB โดยมีค่า -42.5 dB และ -22 dB ตามลำดับ ดังในภาพที่ 4.14

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

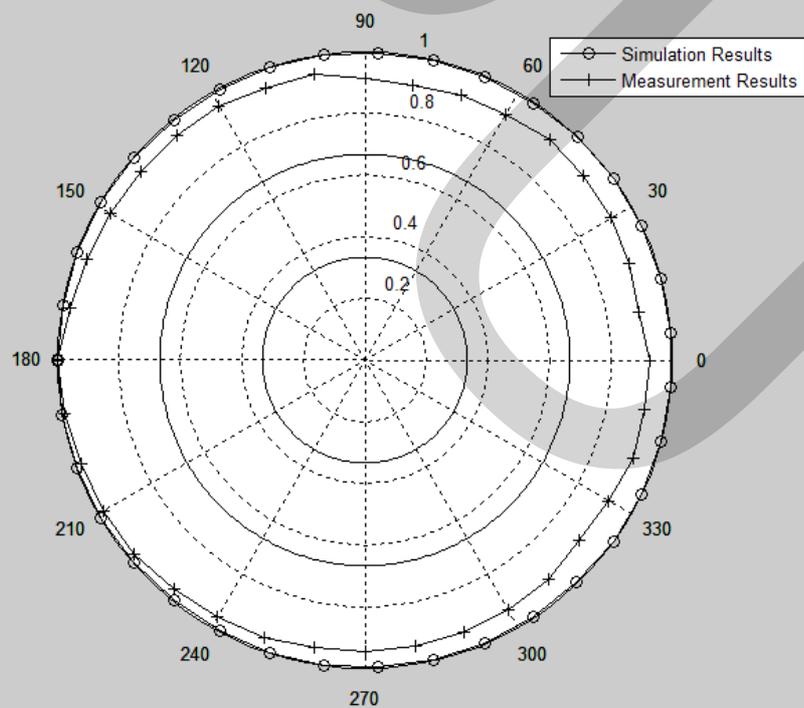
6. ที่ย่านความถี่สูง 2.625 GHz ค่า S_{11} ที่ได้จากการวัดมีค่าที่สูงกว่าค่าที่ได้รับจากการจำลองสายอากาศ 3 dB โดยมีค่า -16 dB และ -13 dB ตามลำดับ ดังในภาพที่ 4.14

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) ซึ่งเป็นระนาบเอเดลิเวชันมีรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Figure Eight (รูปเลข 8) ส่วนภาพด้านล่างแสดง H Plane (ระนาบ xz) ซึ่งเป็นระนาบอะซิมุทมีรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบ Nondirectional (ไม่มีทิศทาง)

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

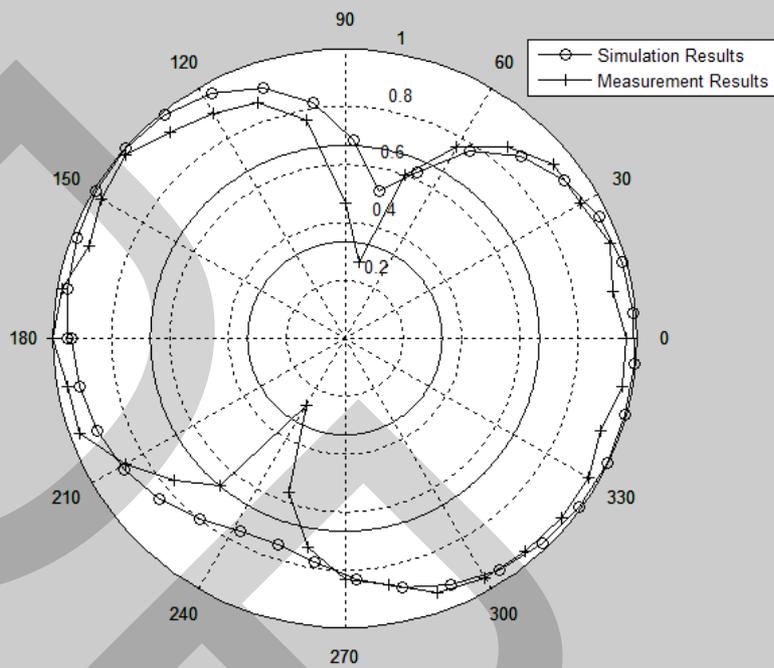


E Plane (xy Plane) at 850 MHz

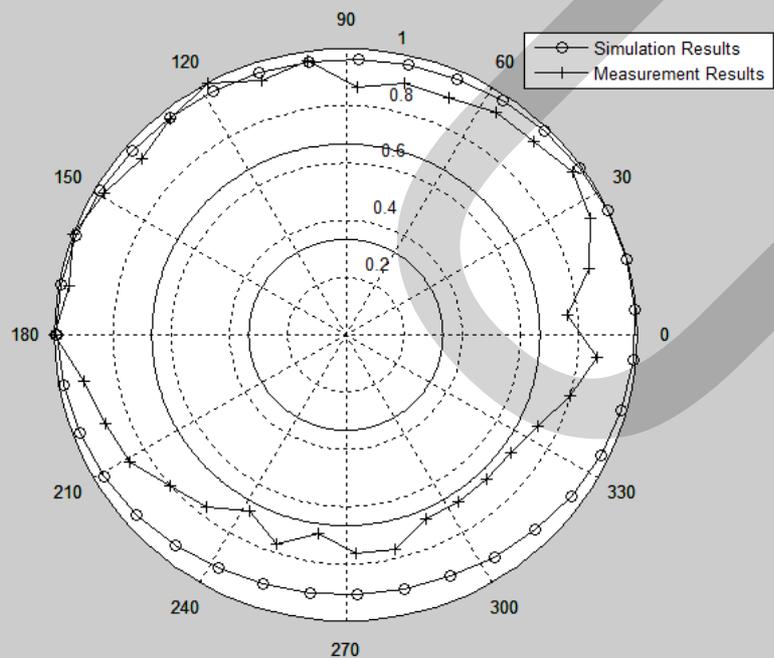


H Plane (xz Plane) at 850 MHz

ภาพที่ 4.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 850 MHz (ความถี่ศูนย์กลางของย่านความถี่ต่ำ)

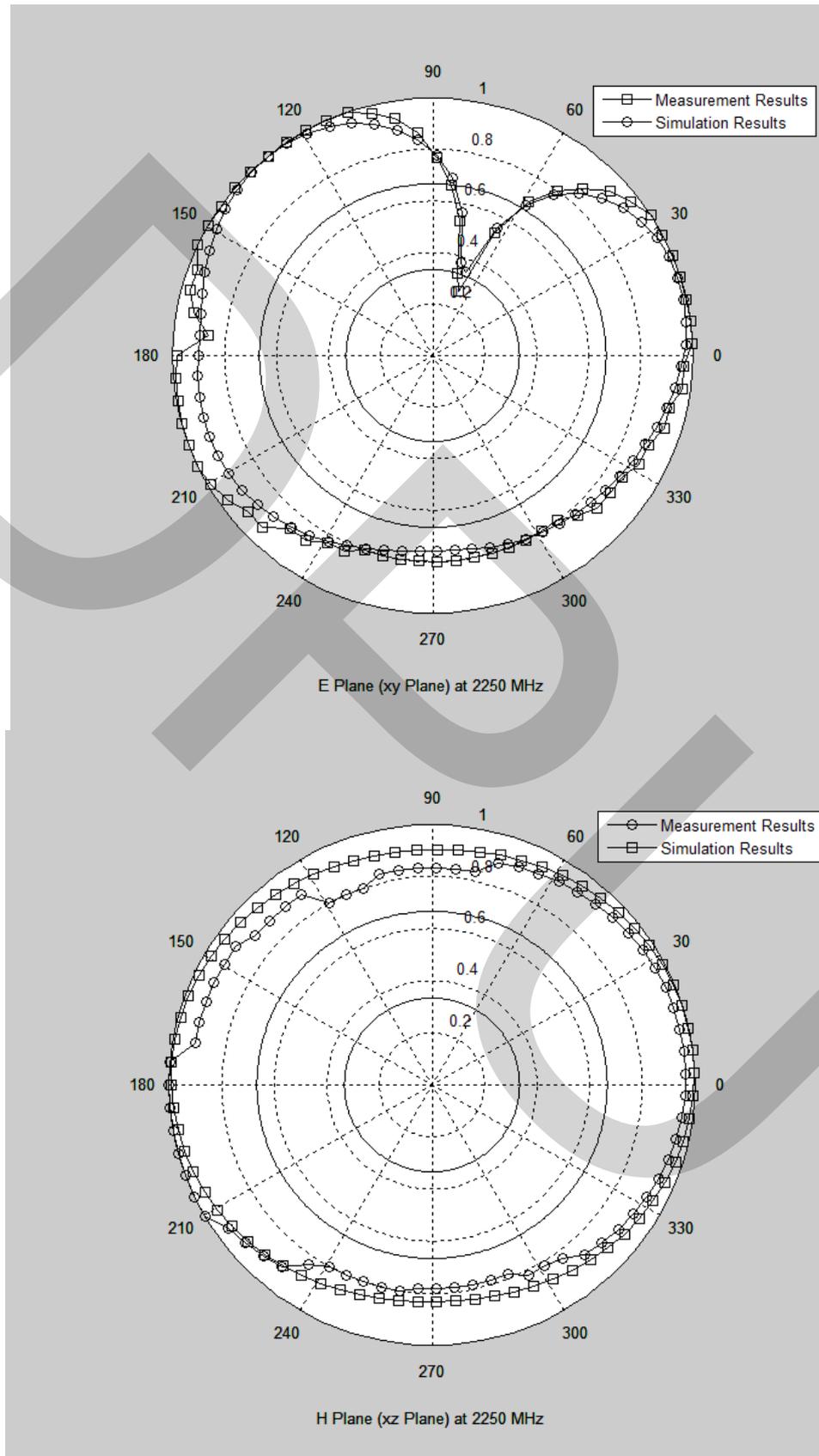


E Plane (xy Plane) at 1900 MHz

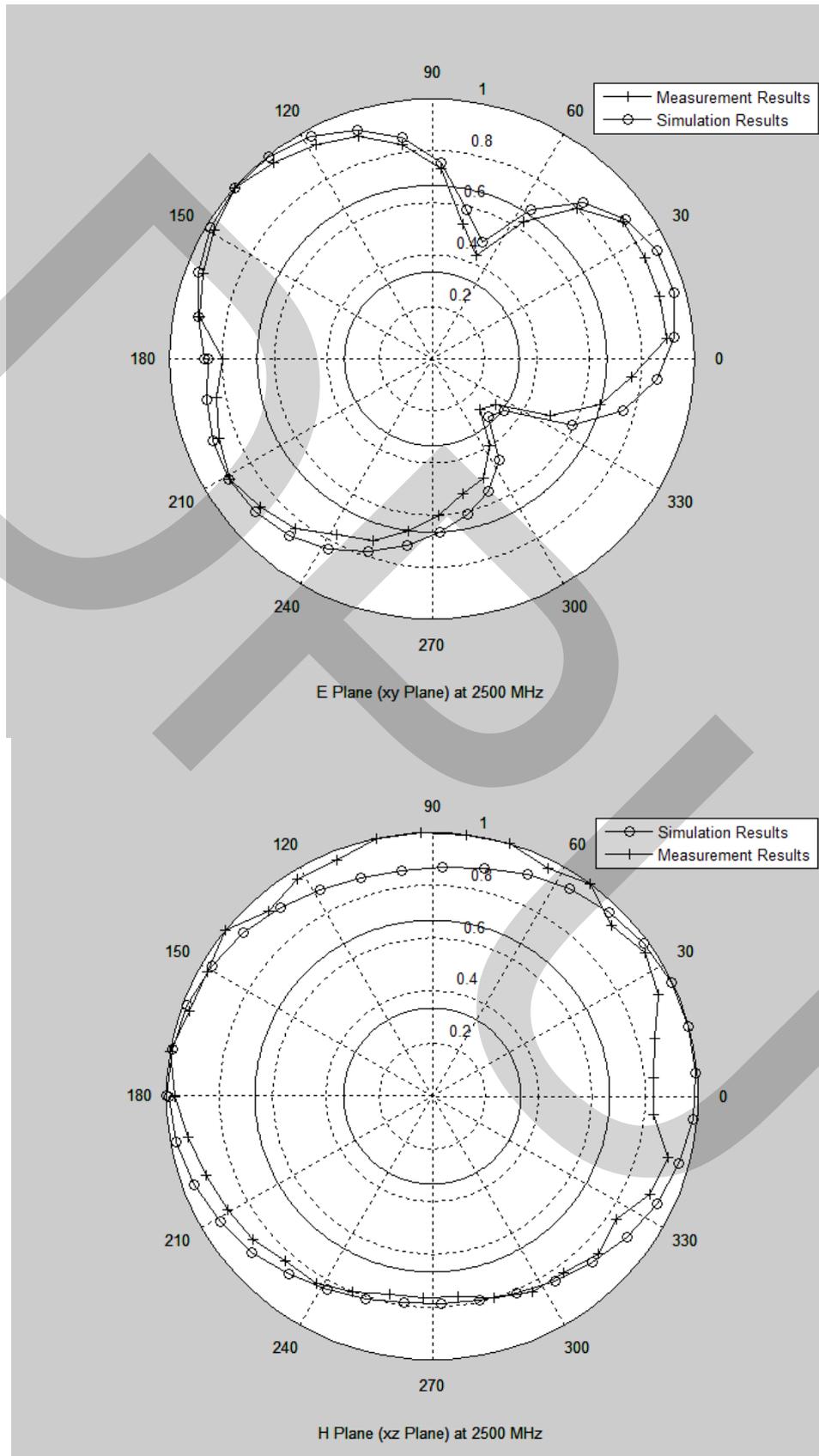


H Plane (xz Plane) at 1900 MHz

ภาพที่ 4.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 1.9 GHz



ภาพที่ 4.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.250 GHz (ความถี่ศูนย์กลางของย่านความถี่สูง)



ภาพที่ 4.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 2.5 GHz

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

5.1 สรุปผลการทำงานตามขอบเขตงานวิจัย

หลังจากทดสอบระบบในด้านต่างๆ แล้วนั้น พบว่า สายอากาศโมโนโพลรูปตัว C บนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นมาสามารถรองรับการใช้งาน 2 ย่านความถี่ตามที่ต้องการได้ ได้แก่ ย่านความถี่ต่ำในช่วง 800 – 900 MHz เพื่อรองรับการใช้งานกับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ CDMA ของ บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน) และย่านความถี่สูงในช่วง 1.8 – 2.6 GHz เพื่อรองรับการใช้งานในระบบสื่อสารไร้สาย ได้แก่ GSM1800, GSM1900, WCDMA/UMTS (3G), WiFi-2.45 GHz และ WiMAX-2.5 GHz โดยให้ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return Loss) ที่ต่ำกว่า -10 dB อีกทั้งสายอากาศต้นดังกล่าวยังมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทางในย่านความถี่ใช้งานอีกด้วย

5.2 สรุปการศึกษาตามวัตถุประสงค์งานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีวัตถุประสงค์ เพื่อสร้างสายอากาศโมโนโพลที่มีโครงสร้างใหม่ โดยทำการศึกษายานอากาศที่สร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์แบบต่างๆ และสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้งานกับโทรศัพท์เคลื่อนที่และเครือข่าย WLAN ทำการจำลองและทดสอบการทำงานของสายอากาศโมโนโพลที่ถูกนำเสนอก่อนหน้านี้ สร้างและทดสอบสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่นำเสนอไปจนถึงการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้รับจากการจำลองสายอากาศเชิงทฤษฎีและการวัดสายอากาศจริง โดยสามารถสรุปตามวัตถุประสงค์งานวิจัยได้ดังนี้

5.2.1 ผู้วิจัยสามารถสร้างสายอากาศโมโนโพลที่มีโครงสร้างใหม่เป็นรูปตัว C บนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 และรองรับการใช้งานสองย่านความถี่ตามที่กำหนดได้สำเร็จ

5.2.2 ผู้วิจัยสร้างสายอากาศที่ใช้งานได้ดีและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในย่านความถี่ที่ต้องการได้สำเร็จ

5.2.3 ผู้วิจัยมีความเข้าใจในหลักการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่นำเสนอ จึงทำให้พบว่า สายอากาศโมโนโพลที่มีโครงสร้างใหม่แบบอื่นถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้งานในย่านความถี่ที่ต้องการสำหรับเครือข่ายสื่อสารไร้สายของประเทศไทยในอนาคตได้

5.3 สรุปประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

ผลจากการพัฒนาสายอากาศโมโนโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์สามารถสรุปประโยชน์ที่ได้ดังนี้

5.3.1 สามารถนำไปใช้งานได้จริงกับโทรศัพท์เคลื่อนที่และอุปกรณ์สื่อสารแบบพกพาที่มีย่านความถี่ใช้งานตรงกับที่นำเสนอ อีกทั้งสามารถรองรับการใช้งานระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายของประเทศไทยในอนาคตได้ อาทิเช่น เครือข่ายบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูง (WiMAX) และเครือข่าย CDMA ฯลฯ

5.3.2 สามารถนำหลักการที่ใช้ในการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลที่นำเสนอรูปตัว C นี้ไปใช้งานเพื่อออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลที่มีโครงสร้างใหม่แบบอื่นที่สามารถรองรับการใช้งานระบบสื่อสารไร้สาย WiMAX ที่ย่านความถี่ 3.3 - 3.7 GHz และ 5.25 - 5.85 GHz นอกเหนือจากย่านความถี่ 2.5 GHz ที่นำเสนอได้

5.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

เนื่องจากระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายที่ถูกใช้งานในปัจจุบันและในอนาคตของประเทศไทยยังคงที่มีอัตราการเติบโตที่สูงขึ้นเรื่อยๆ อีกทั้งแต่ละระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายมีการใช้งานย่านความถี่ที่แตกต่างกัน จึงทำให้ผู้วิจัยคาดหวังเป็นอย่างยิ่งและขอเสนอแนะว่า มีโอกาสที่จะนำหลักการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลในงานวิจัยฉบับนี้ไปออกแบบและปรับปรุงเพื่อให้ได้โครงสร้างใหม่ที่สามารถรองรับการใช้งาน ณ ย่านความถี่อื่นๆ ของระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายของประเทศไทยในอนาคตได้ เช่น เครือข่ายบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูง (WiMAX) ที่ย่านความถี่ 3.3 - 3.7 GHz และ 5.25 - 5.85 GHz นอกเหนือจากย่านความถี่ 2.5 GHz ที่นำเสนอและเครือข่าย CDMA ของบริษัทเอกชนรายอื่นๆ นอกเหนือจาก บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน)

กรม
พัฒนา
การค้า

บรรณานุกรม

ภาษาต่างประเทศ

ARTICLES

- C. Laohapensaeng, C. Free, and K.M. Lum. (2005, March). "Printed strip monopole antenna with the parasitic elements on the circular ground plane." **IWAT 2005**. pp. 371 – 374.
- H. C. Tung, W. S. Chen, and K. L. Wong. "Integrated rectangular spiral monopole antenna for 2.4/5.2 GHz dual-band operation." **IEEE Antennas Propagat. Soc. Int. Symp. Dig. 3**. pp. 446 - 449.
- K. P. Ray. (2008). "Design aspects of printed monopole antennas for ultra-wide band applications." **Int' Journal of Antennas and Propagation**. 2008. pp. 1 - 8.
- Reto Zingg. (1999, Fall). "Printed dipole antenna." **University of Colorado at Boulder, Department of Electrical Engineering**.
- 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.
- W. - C. Liu. (2007). "Optimal design of dualband CPW-fed G-shaped monopole antenna for WLAN application." **PIER**. pp. 21 – 38.
- Y. L. Kuo, T. W. Chiou, and K. L. Wong. (2001, December). "A novel dual-band printed inverted-F Antenna." **Microwave Opt. Technol. Letter**. 31. pp. 353 – 355.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล

นายเสรี รวยบุญส่ง

ประวัติการศึกษา

อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิทยาเขตพระนครเหนือ

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

นายช่างโทรคมนาคม ระดับ 4 ฝ่ายโครงข่ายระหว่างประเทศ

บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน)