

การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งาน
แถบความถี่แคบ โดยใช้สายอากาศที่หมุนลำคลื่นอัตโนมัติ



นางสาวชนตวรรณ กมลกลาง

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2562

**NB-IoT SYSTEM PERFORMANCE ENHANCEMENT
USING AUTOMATIC BEAM-STEERING ANTENNA**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering in
Telecommunication and Computer Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2019**

การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งาน
แถบความถี่แคบโดยใช้สายอากาศที่หมุนลำคลื่นอัตโนมัติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร. พิชญา ชัยปัญญา)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร. มนต์ทิพย์ภา อูซารสกุล)

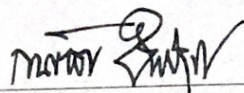
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร. ชิตพงศ์ เวชไชสงค์)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชานีประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชนตวรรษ กมลกลาง : การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ โดยใช้สายอากาศที่หมุนลำคลื่นอัตโนมัติ (NB-IOT SYSTEM PERFORMANCE ENHANCEMENT USING AUTOMATIC BEAM-STEERING ANTENNA) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อูซารสกุล, 92 หน้า.

โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ เป็นเทคโนโลยีไร้สายที่ออกแบบมาเพื่อปรับปรุงอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งให้สามารถใช้งานครอบคลุมพื้นที่การใช้งานที่กว้าง มีอายุการใช้งานของแบตเตอรี่นาน และถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ทุกที่ตลอดเวลา โดยโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ มักจะถูกนำมาติดตั้งภายในพื้นที่ที่จะเข้าถึงในระยะไกลจากสถานีปล่อยสัญญาณโทรศัพท์มือถือ เช่น ในตึกสูงหรือใต้ดิน ทำให้ความแรงของสัญญาณถูกลดทอนลง ซึ่งแม้ว่าส่วนกลางไม่สามารถระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ได้ ส่งผลให้ข้อมูลที่ส่งจากอุปกรณ์เหล่านั้นเกิดการสูญเสียและสิ้นเปลืองพลังงาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบด้วยการใช้สายอากาศแบบเจาะจงทิศทาง และเป็นระบบอัตโนมัติที่ปรับตัวเองเพื่อให้ได้ความแรงของสัญญาณสูงสุด อุปกรณ์ต้นแบบของสายอากาศและระบบประมวลผลสัญญาณถูกออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และถูกสร้างวัดในสถานการณ์จริงเพื่อพิจารณาประสิทธิภาพของระบบด้วยค่าพารามิเตอร์ดังนี้ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ แบบรูปการแผ่พลังงาน และอัตราขยาย ประสิทธิภาพของระบบที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้จะถูกเปรียบเทียบกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางและไม่มีการปรับตัวแบบอัตโนมัติ นอกจากนี้งานวิจัยจะทดสอบการใช้งานของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบในสถานการณ์จริงทั้งหมดสองลักษณะ คือ การทดสอบแบบสถิต ซึ่งอุปกรณ์ถูกติดตั้งอยู่ในตำแหน่งคงที่ โดยจะวิเคราะห์ผลกระทบของความแรงของสัญญาณจากระดับความสูงและระยะห่างระหว่างอุปกรณ์กับสถานีฐาน และการทดสอบแบบพลวัต อุปกรณ์มีการเคลื่อนที่และสายอากาศต้นแบบหมุนอัตโนมัติ เพื่อให้ได้ความแรงของสัญญาณสูงสุดตลอดเวลาขณะวัดทดสอบ

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา ชนตวรรษ กมลกลาง
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา จม -

TANATAWAN KAMOLKLANG : NB-IOT SYSTEM PERFORMANCE
ENHANCEMENT USING AUTOMATIC BEAM-STEERING ANTENNA
THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. MONTHIPPA UTHANSAKUL,
Ph.D., 92 PP.

NARROWBAND INTERNET OF THING/
INDOOR COVERAGE/MOBILITY/RECEIVED SIGNAL STRENGTH

Narrowband Internet of Thing (NB-IoT) is a wireless technology which is designed to improve Internet of Thing (IoT) to be able to cover wide area, survive with long life battery, and connect various devices anytime and anywhere. NB-IoT is often installed in area where are difficult to reach far away from the base station such as building and underground basement. According to this, signal strength is reduced, then the central server is unable to determine the location of devices. As a result, the data cannot be sent or delivered to those devices. Therefore, this research increases the efficiency of NB-IoT using directional antenna which can perform automatic beam steering to get the highest signal strength. The prototype antenna and signal processing system are designed using computer program. In addition, the antenna is fabricated and measured to determine the system performance considering return loss, radiation pattern and gain of the antenna. The system efficiency is compared with NB-IoT employing omnidirectional antenna. Moreover, the experiment results are achieved in real environment with two scenarios: static and dynamic situations. Firstly, in static case, the device is installed in a fixed position while measuring to analyze the effect of distance between device and base station in both horizon and elevation. On the other hand, in dynamic case, the device moves away from base station, and the


prototype antenna automatically steers while connecting to the base station to get the best signal strength all the time.



School of Telecommunication Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature ณพพร ภาสกลาง

Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา, แนะนำและแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร. ประโยชน์ คำสวัสดิ์ หัวหน้าสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรคร์ รองศาสตราจารย์ ดร. พิระพงษ์ อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชนันต์ชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐวิทย์ ภูญาษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตพงษ์ เวชโชตสังค์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ด้านวิชาการและให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนทุนกิตติบัณฑิตทุนการศึกษา ขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องบัณฑิตศึกษาทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ และขอบคุณคุณคุณวิรินทร์ อาจหาญ เลขานุการสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ให้คำปรึกษาและจัดการด้านเอกสารตลอดระยะเวลาการศึกษา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษาโดยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

ชนตววรรณ กมลกลาง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.7 นวัตกรรมของงานวิจัยนี้	4
1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	4
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2.1 โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ	5
2.2.2 สภาพเหตุการณ์ในอาคาร.....	6
2.2.3 เงื่อนไขสภาพเคลื่อนที่ได้.....	7

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	การเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้สาย	7
24.	การสื่อสารผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ	10
2.4.1	มอดูลโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ	11
2.4.2	คุณลักษณะของมอดูลโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งาน แถบความถี่แคบ	11
2.5	สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป	12
2.5.1	โครงสร้างและคุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ ที่ใช้สายส่งแบบ ไมโครสตริป	12
2.5.2	การป้อนสัญญาณของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่ง แบบไมโครสตริป	14
2.6	คุณลักษณะและพารามิเตอร์ของสายอากาศ	15
2.6.1	อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง	15
2.6.2	ค่าการสูญเสียย้อนกลับ	15
2.6.3	แบบรูปการแผ่พลังงาน	16
2.6.4	บริเวณการแผ่พลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	17
2.6.5	อัตราขยายของสายอากาศ	18
2.7	กล่าวสรุป.....	19
3	การออกแบบ.....	20
3.1	บทนำ	20
3.2	การออกแบบสายอากาศ.....	20
3.3	การจำลองแบบสายอากาศ	28
3.3.1	ค่าการสูญเสียย้อนกลับ	28
3.3.2	แบบรูปการแผ่พลังงาน	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	การปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศ.....	34
3.4.1	การศึกษาผลกระทบจากการป้อนสัญญาณแบบอินเซต.....	34
3.4.2	การศึกษาผลกระทบจากการเจาะร่อง.....	37
3.4.3	การศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มตัวสะท้อน.....	40
3.5	การจำลองแบบการใช้งานสายอากาศร่วมกับแท่นวางสายอากาศ.....	42
3.6	ภาพรวมของสายอากาศที่ออกแบบ.....	45
3.7	กล่าวสรุป.....	47
4	ผลการทดลอง.....	48
4.1	บทนำ.....	48
4.2	การสร้างสายอากาศ.....	48
4.3	ผลการวัดทดสอบค่าสูญเสียย้อนกลับ.....	50
4.4	ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน.....	51
4.5	ผลการวัดทดสอบอัตราขยาย.....	54
4.6	กล่าวสรุป.....	55
5	การทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ.....	56
5.1	กล่าวนำ.....	56
5.2	อุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ.....	56
5.3	การวัดทดสอบอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งาน แถบความถี่แคบแบบสถิต.....	57
5.3.1	วิธีการตั้งค่าอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งาน แถบความถี่แคบแบบสถิต.....	59
5.3.2	การวัดและวิเคราะห์ผลการทดสอบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง ที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบสถิต.....	62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4 การวัดทดสอบอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งาน แถบความถี่แคบแบบพลวัต	67
5.4.1 วิธีการตั้งค่าอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งาน แถบความถี่แคบแบบพลวัต.....	67
5.4.2 การวัดและวิเคราะห์ผลการทดสอบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง ที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบพลวัต	71
5.5 กล่าวสรุป.....	74
6 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ	75
6.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์	75
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต	76
รายการอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	80
ประวัติผู้เขียน.....	92

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	คุณสมบัติของวัสดุฐานรองที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์เพื่อใช้งานที่ความถี่ 900 MHz 22
3.2	ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ถูกออกแบบที่ความถี่ใช้งาน 900 MHz และใช้วัสดุฐานรองคือ FR-4 ซึ่งมีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกเท่ากับ 4.3 27
3.3	ค่าพารามิเตอร์ขนาดการเจาะร่องบนแผ่นพิมพ์ของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป..... 38
3.4	ค่าพารามิเตอร์การปรับขนาดการเจาะร่องบนแผ่นพิมพ์ของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปเมื่อเพิ่มตัวสะท้อน 40
4.1	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สร้างสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป..... 49
4.2	สรุปคุณลักษณะของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป 55
5.1	ความแรงของสัญญาณในการอ้างอิงของโครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่ง ที่ใช้งานแถบความถี่แคบ 63
5.2	ผลการทดสอบความแรงของสัญญาณ ณ ตำแหน่งของอุปกรณ์ ที่ระดับความสูงต่างกัน 64
5.2	ผลการทดสอบความแรงของสัญญาณ ณ ระยะทางที่ห่างจากสถานีฐานที่ต่างกัน 66

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง 8
2.2	โครงสร้างมอดูลโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ 11
2.3	สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีการป้อนสัญญาณแบบอินเซต 14
2.4	การเกิดการย้อนกลับของกำลังงาน 16
2.5	แบบรูปการแผ่พลังงานของคลื่น 17
2.6	การแบ่งบริเวณการแผ่พลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 18
3.1	โครงสร้างสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป 22
3.2	แบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ได้จากการคำนวณ โดยถูกออกแบบที่ความถี่ใช้งาน 900 MHz 28
3.3	ค่าการสูญเสียย้อนกลับของแบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ได้จากการคำนวณ โดยถูกออกแบบที่ความถี่ใช้งาน 900 MHz 29
3.4	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ในระนาบสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก 30
3.5	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ได้จากการคำนวณ โดยถูกออกแบบที่ความถี่ใช้งาน 900 MHz 31
3.6	แบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่ปรับระนาบกราวด์ และสายส่งไมโครสตริป ทำงานที่ความถี่ 900 MHz 32
3.7	ค่าการสูญเสียย้อนกลับของแบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่ง แบบไมโครสตริปที่ปรับระนาบกราวด์และสายส่งไมโครสตริป ทำงานที่ความถี่ 900 MHz 32
3.8	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป ที่ปรับระนาบกราวด์และสายส่งไมโครสตริปทำงานที่ความถี่ 900 MHz 33
3.9	แบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เมื่อป้อนสัญญาณแบบอินเซต 35

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10	ค่าการสูญเสียย้อนกลับของแบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เมื่อป้อนสัญญาณแบบอินเซต.....35
3.11	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เมื่อป้อนสัญญาณแบบอินเซต.....36
3.12	แบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เมื่อมีการเจาะร่องบนแผ่นพิมพ์38
3.13	ค่าการสูญเสียย้อนกลับของแบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เมื่อมีการเจาะร่องบนแผ่นพิมพ์38
3.14	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เมื่อมีการเจาะร่องบนแผ่นพิมพ์39
3.15	แบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปเมื่อเพิ่มตัวสะท้อน41
3.16	ค่าการสูญเสียย้อนกลับของแบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เมื่อเพิ่มตัวสะท้อน41
3.17	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เมื่อเพิ่มตัวสะท้อน42
3.18	แบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป ที่มีตัวสะท้อนและแทนวางสายอากาศ43
3.19	ค่าการสูญเสียย้อนกลับของแบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่มีตัวสะท้อนและแทนวางสายอากาศ.....43
3.20	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่มีตัวสะท้อนและแทนวางสายอากาศ.....44
3.21	ขนาดของโครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป โดยมีการป้อนสัญญาณแบบอินเซตและการเจาะร่อง.....45
3.22	ขนาดของโครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป โดยมีการเพิ่มตัวสะท้อนและแทนวางสายอากาศ.....46
4.1	โครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	ต้นแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป.....49
4.3	ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองแบบและผลการวัดทดสอบที่ 900 MHz.....51
4.4	การติดตั้งสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เพื่อวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า.....52
4.5	การติดตั้งสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เพื่อวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก.....53
4.6	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป ทำงานที่ความถี่ 900 MHz53
5.1	การเชื่อมต่ออุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ57
5.2	การติดตั้งอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ ภายในห้องปฏิบัติการ58
5.3	สถานที่ที่ใช้ทำการทดสอบอุปกรณ์แบบสติด.....59
5.4	แผนผังวิธีการวัดทดสอบความแรงของสัญญาณของระบบโครงข่าย อินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบสติด โดยใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป.....61
5.5	แผนผังการเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณของระบบโครงข่าย อินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ.....62
5.6	ทิศทางของลำคลื่นของสายอากาศที่มีความแรงของสัญญาณที่ได้รับมากที่สุด ณ ตำแหน่งของอุปกรณ์ที่อยู่ในระดับความสูงต่างกัน64
5.7	ทิศทางของลำคลื่นของสายอากาศที่มีความแรงของสัญญาณที่ได้รับมากที่สุด ณ ระยะทางที่ห่างจากสถานีฐานต่างกัน66
5.8	การติดตั้งอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ ภายในยานพาหนะ ขณะทำการวัดทดสอบ.....68
5.9	เส้นทางรอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ใช้ในการวัดทดสอบประสิทธิภาพ ของโครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบพลวัต68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10	แผนผังวิธีการวัดทดสอบความแรงของสัญญาณของระบบ โครงข่าย อินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบพลวัต โดยใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่ง แบบไมโครสตริป 70
5.11	การวัดทดสอบความแรงของสัญญาณของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง ที่ใช้งาน แถบความถี่แคบแบบพลวัตทั้ง 3 เส้นทางขณะที่ยานพาหนะ ใช้ความเร็ว 60 กม./ชม. 73
5.12	การวัดทดสอบความแรงของสัญญาณของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง ที่ใช้งาน แถบความถี่แคบแบบพลวัตทั้ง 3 เส้นทางขณะที่ยานพาหนะ ใช้ความเร็ว 80 กม./ชม. 73
5.13	การวัดทดสอบความแรงของสัญญาณของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง ที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบพลวัตทั้ง 3 เส้นทางขณะที่ยานพาหนะ ใช้ความเร็ว 100 กม./ชม. 74

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีผู้ให้บริการการสื่อสาร โทรศัพท์เคลื่อนที่จำนวนมากให้ความสนใจกับเทคโนโลยีโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง (Internet of Thing: IoT) เพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างกันของอุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยีโครงข่ายแบบกว้างที่ใช้พลังงานต่ำ (Low Power Wide Area Network: LPWAN) โดยที่โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ (Narrowband Internet of Thing : NB-IoT) เป็นเทคโนโลยีโครงข่ายแบบกว้างที่ใช้พลังงานต่ำชนิดหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบเป็นเทคโนโลยีที่เชื่อมต่อกันผ่านโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้สายที่ออกแบบมาเพื่อปรับปรุงอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งให้สามารถใช้งานครอบคลุมพื้นที่การใช้งานที่กว้าง มีอายุการใช้งานของแบตเตอรี่นาน และถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ทุกที่ทุกเวลา โดยโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบมักจะถูกนำมาติดตั้งภายในพื้นที่ที่จำกัดและไกลจากสถานีฐาน เช่น ภายในอาคารหรือพื้นที่ใต้ดิน

นอกจากนี้โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบนั้นถูกนำมาใช้งานเพื่ออำนวยความสะดวกสบาย ความรวดเร็วและความปลอดภัย ในหลากหลายรูปแบบ เช่น ระบบเมืองอัจฉริยะ ซึ่งมีความสามารถในการวัดปริมาณการใช้สาธารณูปโภค หรือวัดคุณภาพสาธารณูปโภคต่าง ๆ ภายในเมือง รวมทั้งจัดการพลังงานไฟฟ้า จัดการน้ำและขยะได้อีกด้วย หรือจะเป็นระบบที่จอดรถอัจฉริยะ ที่ผู้ขับขี่สามารถรู้สถานะการใช้งานของที่จอดรถก่อนถึงที่หมาย รวมทั้งการนำเทคโนโลยีเหล่านี้ไปใช้ภายในบ้านทำให้เกิดเป็นระบบบ้านอัจฉริยะ ด้วยการนำเทคโนโลยีมาควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในบ้าน เพื่อช่วยให้การดำรงชีวิตของมนุษย์มีความสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น เป็นต้น โดยโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบของแอปพลิเคชันเหล่านี้จะถูกติดตั้งภายในอาคารหรือสถานที่ที่มีข้อจำกัด ทำให้ความแรงของสัญญาณที่ได้รับนั้นมีขนาดอยู่ในระดับต่ำ เนื่องจากโครงสร้างอาคารหรือระยะห่างระหว่างอุปกรณ์กับสถานีฐาน นอกจากนี้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา มีผลโดยตรงกับความแรงของสัญญาณที่ได้รับ และบางแอปพลิเคชันอาจต้องการเชื่อมต่อกับสถานีฐานตลอดเวลา ดังนั้นความแรงของสัญญาณที่มีความเสถียรภาพเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง

อย่างไรก็ตามโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบได้รับความสนใจเฉพาะกรณีที่ถูกคิดตั้งในตำแหน่งคงที่เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการใช้งานโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบขณะอุปกรณ์เคลื่อนที่โดยมีการศึกษาทั้งเชิงทฤษฎีและเชิงการทดลองซึ่งจะแบ่งการทดสอบเป็นสองลักษณะคือ วิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ สำหรับอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนที่ในสภาพแวดล้อมจริงด้วยสายอากาศแบบเจาะจงทิศทางซึ่งสามารถหมุนหาทิศทางที่รับความแรงของสัญญาณสูงสุดได้อัตโนมัติและยังสามารถเชื่อมต่อกับสถานีฐานได้อย่างต่อเนื่อง รวมไปถึงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบโดยที่อุปกรณ์อยู่ในตำแหน่งคงที่ เพื่อศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างอุปกรณ์กับสถานีฐานทั้งในระดับความสูงและในแนวราบ นอกจากนี้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปยังถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้งานร่วมกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้สำหรับงานแถบความถี่แคบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศที่นำเสนอนี้กับการใช้สายอากาศโมโนโพลซึ่งเป็นสายอากาศเดิมของอุปกรณ์ โดยจะพิจารณาจากความแรงของสัญญาณที่ได้รับ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานในแถบความถี่แคบ
- 1.2.2 เพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานในแถบความถี่แคบ โดยใช้สายอากาศที่หมุนลำคลื่นอัตโนมัติ
- 1.2.3 สร้างต้นแบบสายอากาศที่หมุนลำคลื่นอัตโนมัติ

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

การใช้สายอากาศแบบเจาะจงทิศทางที่หมุนลำคลื่นอัตโนมัติจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานในแถบความถี่แคบได้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 จำลองแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นสายอากาศที่มีอัตราขยายมากกว่าสายอากาศโมโนโพล และทำงานที่ความถี่ 900 MHz

- 1.4.2 ประสิทธิภาพที่ใช้ในการพิจารณาจากค่าของความแรงของสัญญาณ

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน

- 1.5.1.1 ดำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 1.5.1.2 ศึกษาการออกแบบสายอากาศแบบเจาะจงทิศทาง
- 1.5.1.3 วัดความแรงและคุณภาพของสัญญาณ

1.5.2 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการการสื่อสารโทรคมนาคม อาคารเครื่องมือ 11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

1.5.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1.5.3.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
- 1.5.3.2 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 เพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลของ โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ
- 1.6.2 ได้ต้นแบบสายอากาศที่หมุนลำคลื่นอัตโนมัติ

1.7 นวัตกรรมของงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่หมุนลำคลื่นได้อัตโนมัติ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบได้ ซึ่งจะแบ่งการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบเป็น 2 ลักษณะคือ การทดสอบแบบสถิตซึ่งอุปกรณ์ถูกติดตั้งอยู่ในตำแหน่งคงที่เพื่อศึกษาผลกระทบของความแรงของสัญญาณจากระดับความสูงและระยะห่างระหว่างอุปกรณ์กับสถานีฐาน และการทดสอบแบบพลวัตโดยที่อุปกรณ์มีการเคลื่อนที่และสายอากาศต้นแบบหมุนอัตโนมัติเพื่อให้ได้ความแรงของสัญญาณสูงสุดตลอดเวลา โดยในงานวิจัยนี้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป สามารถหมุนหาทิศทางที่สามารถรับความแรงของสัญญาณสูงสุดได้อัตโนมัติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ ทั้งขณะที่อุปกรณ์อยู่ในตำแหน่งคงที่และขณะอุปกรณ์เคลื่อนที่

1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

สำหรับเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการศึกษาค้นคว้า รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ และสรุปผล โดยประกอบไปด้วยเนื้อหาทั้งหมด 6 บท

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมติฐานของการวิจัย ขอบเขตการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และนวัตกรรมของงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับ โครงข่ายสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ และสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและการจำลองแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป รวมถึงการปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศ โดยพิจารณาจากค่าการสูญเสียย้อนกลับ และแบบรูปการแผ่พลังงาน

บทที่ 4 กล่าวถึงการสร้างและวัดทดสอบสายอากาศต้นแบบ รวมถึงผลการวัดทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับ แบบรูปการแผ่พลังงานและอัตราขยาย

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ โดยพิจารณาจากความแรงของสัญญาณ ซึ่งแบ่งการทดสอบเป็นการทดสอบแบบสถิตและแบบพลวัต เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศสำหรับ โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปผลของการวิจัย ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งมีความต้องการใช้งานเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในการใช้งานโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง อุปกรณ์สื่อสารมีความต้องการที่จะส่งข้อมูลในปริมาณน้อย และทำการส่งข้อมูลด้วยความเร็วต่ำ แต่ต้องการความถูกต้องและน่าเชื่อถือของการส่งผ่านข้อมูลในโครงข่ายการสื่อสารแบบไร้สาย โดยในการใช้งานบางลักษณะที่มีความต้องการเสถียรภาพของการส่งสัญญาณ อาจจะต้องออกแบบให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น จึงจะทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้อุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งได้ด้วย

ในการสื่อสารแบบไร้สายนั้น การเพิ่มประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณา เพื่อรองรับการใช้งานที่เพิ่มขึ้นของจำนวนผู้ใช้ ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศที่นำมาใช้งานจึงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง เนื่องจากสายอากาศมีหน้าที่ในการรับส่งสัญญาณข้อมูล มีโครงสร้างสามารถเลือกใช้สายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งได้ง่าย ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักคือ 1) โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานในแถบความถี่แคบ 2) สายอากาศที่ใช้งานในย่านความถี่ใช้งาน 900 MHz ซึ่งเป็นคลื่นความถี่ใช้งานของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ และสามารถนำความรู้นี้ไปพัฒนาต่อได้ จึงได้มีการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพอสังเขป ดังนี้

2.2.1 โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ

งานวิจัยของ Hoglund et al. (2017), Chen et al. (2017) และ Ratasuk et al. (2017) กล่าวถึงโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ทำให้อุปกรณ์หรือสิ่งของต่าง ๆ

สามารถเชื่อมต่อสื่อสารกันเป็นโครงข่าย รับส่งข้อมูลเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลหรือควบคุมการทำงานของสิ่งของต่าง ๆ ได้ ดังนั้นโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งจึงเข้ามามีบทบาทในการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ เพื่อให้สามารถใช้ชีวิตได้สะดวกสบาย รวดเร็วและมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น โดยโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มากมาย เช่น ด้านการเกษตร ด้านการแพทย์ ด้านการศึกษา ด้านการรักษาความปลอดภัย และด้านอุตสาหกรรมและการผลิต เป็นต้น

โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบเป็นโครงข่ายไร้สายสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานต่ำ ถูกพัฒนาโดยโครงข่ายมาตรฐานทางโทรคมนาคม ซึ่งใช้สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งต่าง ๆ เข้าสู่อินเทอร์เน็ตผ่านการใช้โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ รวมไปถึงการทำงานที่สามารถเข้าถึงในพื้นที่ที่มีข้อจำกัด เช่น พื้นที่ใต้ดินหรือจุดอับสัญญาณภายในอาคาร โดยข้อดีของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบมีอยู่หลายประการคือเป็นอุปกรณ์ประเภทส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วต่ำ ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ ช่วยให้อายุการใช้งานแบตเตอรี่ของอุปกรณ์อยู่ได้นานมากขึ้น รองรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งได้สูงสุดถึงหนึ่งแสนตัวต่อสถานีฐาน และมีรัศมีครอบคลุมของโครงข่ายต่อสถานีฐานสูงสุด 10 กิโลเมตร อีกทั้งการใช้งานในอาคารก็ยังสามารถรับสัญญาณได้ดี ปัจจุบันโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบของผู้ให้บริการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ใช้งานคลื่นความถี่ 900 MHz มีความเร็วอัปโหลด 60 kbps และดาวน์โหลด 30 kbps ครอบคลุมพื้นที่การใช้งานทั้ง 77 จังหวัดทั่วประเทศไทย ซึ่งจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ

2.2.2 สภาพเหตุการณ์ในอาคาร

งานวิจัยของ Lauridsen et al. (2016), Beyene et al. (2017) และ Wan et al. (2017) กล่าวถึงเทคโนโลยีโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบที่ถูกนำไปใช้ในสภาพเหตุการณ์ในอาคาร (indoor scenario) ซึ่งเทคโนโลยีนี้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ โดยถูกนำไปใช้งานกับแอปพลิเคชันต่าง ๆ ในหลายด้าน เช่น ระบบมาตรวัดอัจฉริยะซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการวัดความชื้นหรือ ความดันแก๊ส เป็นต้น โดยอุปกรณ์มักจะถูกติดตั้งอยู่ภายในอาคารหรือใต้ดิน ซึ่งเป็นพื้นที่ที่สัญญาณสามารถเข้าถึงได้ยากและมีโครงสร้างของอาคารที่ส่งผลกระทบต่อสัญญาณที่ได้รับ บางครั้งการวัดผลต้องการการเชื่อมต่อกับสถานีฐานอยู่ตลอดเวลา ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถรับส่งสัญญาณได้อย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่วิเคราะห์ประสิทธิภาพของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบในรูปแบบอื่น ๆ กล่าวคืองานวิจัยของ Malik et al. (2019) และ Tong et al. (2018) ได้มีการทดสอบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบที่บริเวณภายนอกอาคาร ซึ่งจะสามารถรับสัญญาณได้

มากกว่าพื้นที่ภายในอาคาร ด้วยการนำเทคโนโลยีเข้าไปผสมผสานเข้ากับงานด้านการเกษตรเพื่อช่วยเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของการเกษตร และงานวิจัยของ Khan et al. (2019) มีการทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบในระดับระดับความสูงของอาคารที่แตกต่างกัน โดยระดับความสูงที่สูงกว่านั้นสามารถรับความแรงของสัญญาณได้มากกว่าที่ระดับความสูงต่ำกว่า ดังนั้นจะเห็นว่าอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบได้รับความสนใจและถูกนำไปทดสอบประสิทธิภาพขณะที่อุปกรณ์อยู่ในตำแหน่งคงที่ ในหลายรูปแบบ เพื่อให้สามารถนำมาใช้งานในชีวิตประจำวันได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

2.2.3 เงื่อนไขสภาพเคลื่อนที่ได้

ส่วนใหญ่แล้วอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบจะถูกใช้งานโดยจะติดตั้งไว้ภายในอาคารและอยู่ในตำแหน่งคงที่ แต่มีบางการใช้งานที่อุปกรณ์จะถูกติดตั้งบนยานพาหนะและเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน เพื่อศึกษาเงื่อนไขสภาพเคลื่อนที่ได้ของอุปกรณ์ (mobility condition) โดยงานวิจัยของ Moon et al. (2017) ทำการวัดสัญญาณระยะทางประมาณ 1 กิโลเมตรโดยยานพาหนะมีความเร็วประมาณ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และในงานวิจัยของ Ayoub et al. (2018) และ Kim et al. (2019) อุปกรณ์ถูกใช้ในอุตสาหกรรมและการผลิต เพื่อใช้ในการติดตามสิ่งต่าง ๆ หรือตรวจสอบพารามิเตอร์บางอย่าง เช่น การติดตามโลจิสติก การติดตามยานพาหนะ การติดตามสัตว์เลี้ยงและอื่น ๆ ซึ่งกรณีนี้มีการศึกษาว่าเมื่ออุปกรณ์เริ่มมีระยะห่างจากสถานีฐานมากขึ้น จะทำให้การเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์กับสถานีฐานสูญหายไป อาจสรุปได้ว่าอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการการสื่อสารในยานพาหนะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ โดยใน Thailand IoT Industry White Paper (2019) ได้กล่าวถึงความเร็วสูงสุดที่อุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบยังสามารถเชื่อมต่อกับสถานีฐานได้คือความเร็วประมาณ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง นอกจากนี้ยังมีอีกหนึ่งเงื่อนไขคือการใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง เช่น สายอากาศโมโนโพลที่ถูกติดตั้งมากับอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ ที่จะส่งผลต่อความแรงของสัญญาณที่ได้รับต่ำ จึงทำให้การใช้งานของอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบขณะอุปกรณ์เคลื่อนที่มีข้อจำกัด

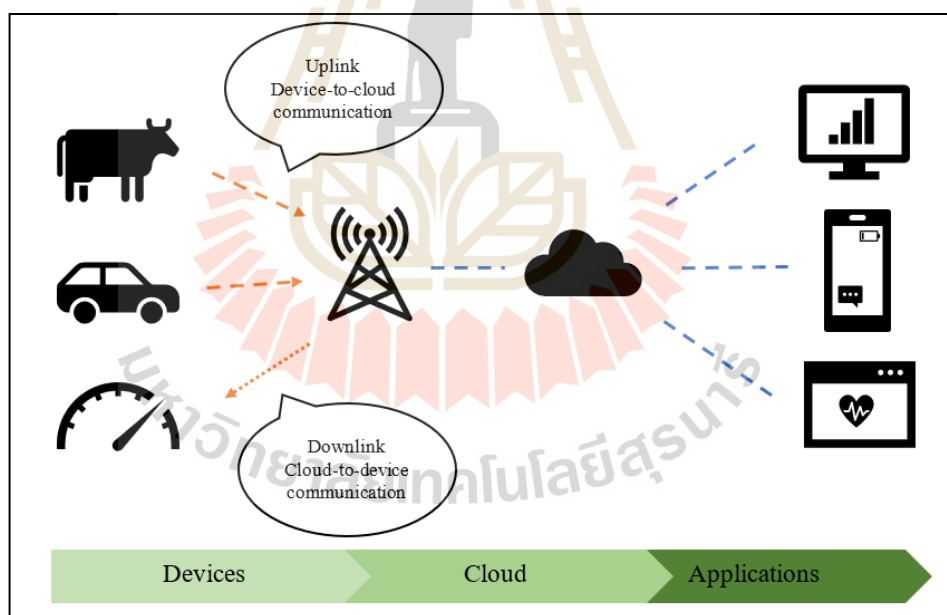
2.3 การเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้สาย

การเชื่อมต่อและการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งแบบไร้สายมีหลากหลายเทคโนโลยี ซึ่งแต่ละแบบจะมีมาตรฐานและคุณลักษณะที่แตกต่างกัน โดยแบ่งตามระยะรัศมีของโครงข่าย (range) และความเร็วของการรับส่งข้อมูล (throughput) ดังนี้

1) โครงข่ายเฉพาะที่ (Local Area Network: LAN) เป็นโครงข่ายรัศมีระยะสั้นถึงปานกลาง มีระยะรัศมีโครงข่ายไม่เกิน 100 เมตร เทคโนโลยีที่ใช้ เช่น บลูทูธ (Bluetooth) ซิกบี (Zigbee) และ ไวไฟ (Wi-Fi) เป็นต้น

2) โครงข่ายบริเวณกว้างที่ใช้พลังงานต่ำ (Low Power Wide Area: LPWAN) เป็นโครงข่ายรัศมีระยะไกล มีระยะรัศมีโครงข่ายประมาณ 5-15 กิโลเมตร ใช้คลื่นความถี่ต่ำกว่า 1 kHz มีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลต่ำ กินพลังงานต่ำ ซึ่งเหมาะกับการส่งข้อมูลเพื่อกิจกรรมขนาดเล็ก เช่น ซิกฟ็อก (SIGFOX) และ ลอรา (LoRA) เป็นต้น

3) โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ (cellular network) เป็นการเชื่อมต่อผ่านโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ มีระยะรัศมีครอบคลุมรัศมีประมาณ 5-10 กิโลเมตร โดยอาศัยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ลูกข่ายโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งเข้ากับโครงสร้างของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีอยู่แล้ว ตัวอย่างเช่น เทคโนโลยีแอลทีอีเอ็ม (LTE-M) และ โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ (NB-IoT) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง

ลักษณะของระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งดังแสดงในรูปที่ 2.1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งสามารถพิจารณาชั้นการเชื่อมต่ออย่างง่ายได้ 3 ชั้นคือ 1) ชั้นกายภาพ

และโครงข่าย 2) ชั้นอินเทอร์เน็ต 3) ชั้นแอปพลิเคชัน ซึ่งแต่ละชั้นจะมีเทคโนโลยีและมาตรฐานที่สามารถนำมาใช้ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์อินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งเข้ากับโครงข่ายได้ ดังนี้

1) ชั้นกายภาพและโครงข่าย

ชั้นกายภาพและโครงข่าย (physical and network layer) เป็นชั้นล่างสุดของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง เป็นชั้นที่กำหนดกระบวนการสื่อสารในระดับบิตของข้อมูล เทคนิคการกล้าสัญญาณ คลื่นความถี่และความกว้างแถบความถี่ที่ใช้ อุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่ใช้พลังงานต่ำส่วนมากจะมีระยะทางการสื่อสารไม่ไกลนัก เนื่องจากมีความไวในการรับในระดับที่จำกัด แต่ก็มีการพัฒนามาตรฐานการสื่อสารไร้สายเพื่อใช้กับระบบโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่เดิม ที่สามารถนำแถบความถี่ช่วงแถบความถี่คุมมาใช้ คือ มาตรฐานโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ

โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบถูกนำเสนอโดยมาตรฐานโทรคมนาคม (3GPP standard) โดยจะถูกออกแบบให้ใช้พลังงานต่ำ ความเร็วในการสื่อสารและความถี่ในการส่งข้อมูลต่ำ อุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบทำงานบนย่านความถี่เดียวกันกับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จีเอสเอ็ม (GSM) ระบบเทคโนโลยียุคที่สาม (3G) หรือเทคโนโลยีแอลทีอี (LTE) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่มีใบอนุญาต (licensed band) โดยใช้แถบความถี่อย่างน้อย 180 kHz ซึ่งสามารถทำได้สามลักษณะคือ ใช้อุปกรณ์คลื่นความถี่หนึ่งช่องของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จีเอสเอ็ม ใช้อุปกรณ์แถบความถี่คุมหรือใช้อุปกรณ์คลื่นความถี่เดียวกันกับเทคโนโลยีแอลทีอี มีความเร็วในการสื่อสาร 250 kbps และมีความไวการรับสัญญาณได้ในระดับมากกว่า -150 dBm จึงมีการสื่อสารที่ไกลมาก และการที่ผู้ให้บริการโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นผู้ดำเนินการสื่อสารข้อมูลกับอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบจึงไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์อินเทอร์เน็ตเกตเวย์ ข้อมูลจะถูกส่งจากอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบผ่านโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ได้โดยตรง

2) ชั้นอินเทอร์เน็ต

อุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งเป็นอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบให้ส่งผ่านข้อมูลเข้าสู่โครงข่ายอินเทอร์เน็ตได้จำเป็นต้องมีรูปแบบข้อมูลตามโพรโทคอลไอพี เพื่อให้สามารถสื่อสารระหว่างเซิร์ฟเวอร์ที่อยู่บนอินเทอร์เน็ตได้ ดังนั้นอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งจึงจำเป็นต้องส่งต่อข้อมูลต่อไปยังชั้นอินเทอร์เน็ต (Internet layer) ซึ่งเป็นชั้นที่รับข้อมูลมาจากชั้นกายภาพและโครงข่าย โดยชั้นอินเทอร์เน็ตจะทำหน้าที่ระบุและจัดการเส้นทางของแพ็กเกจข้อมูล ทั้งยังทำหน้าที่แปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบโพรโทคอลมาตรฐาน ที่สามารถสื่อสารในโครงข่ายอินเทอร์เน็ตได้

3) ชั้นแอปพลิเคชัน

ชั้นแอปพลิเคชัน (application layer) ได้รับความข้อมูลมาจากชั้นอินเทอร์เน็ตหรือในลักษณะอุปกรณ์จะเป็นแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ (application server) เพื่อทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลจากอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งต่าง ๆ ที่ส่งเข้ามาและรองรับการร้องขอและดูข้อมูลจากผู้ใช้หรือจากอุปกรณ์ โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งตัวอื่น ๆ โดยทั่วไปบนอินเทอร์เน็ตจะใช้เอชทีทีพี (Hyper Text Transport Protocol: HTTP) แต่ในเทคโนโลยีโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ โพลโทคอลที่ถูกนำมาใช้งานคือซีโอเอพี (Constrained Application Protocol: CoAP) โดยถูกออกแบบให้คล้ายกับเอชทีทีพี ซึ่งเป็นโพรโทคอลการถ่ายโอนข้อมูล (document transfer protocol) แต่มีขนาดเล็กกว่ามาก (มีส่วนหัวแบบคงที่ขนาด 4 ไบต์) เพราะตัดส่วนที่ไม่จำเป็นและดำเนินงานบนยูดีพี (User Datagram Protocol: UDP) ซึ่งเป็นโพรโทคอลที่ไม่มีการสร้างการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ปลายทาง จึงส่งข้อมูลได้เร็วมากแต่ไม่การันตีว่าข้อมูลจะถูกส่งไปยังปลายทางอย่างแน่นอนและถูกต้องตามลำดับ การส่งซ้ำและเรียงลำดับข้อมูลต้องไปทำบนระดับแอปพลิเคชัน

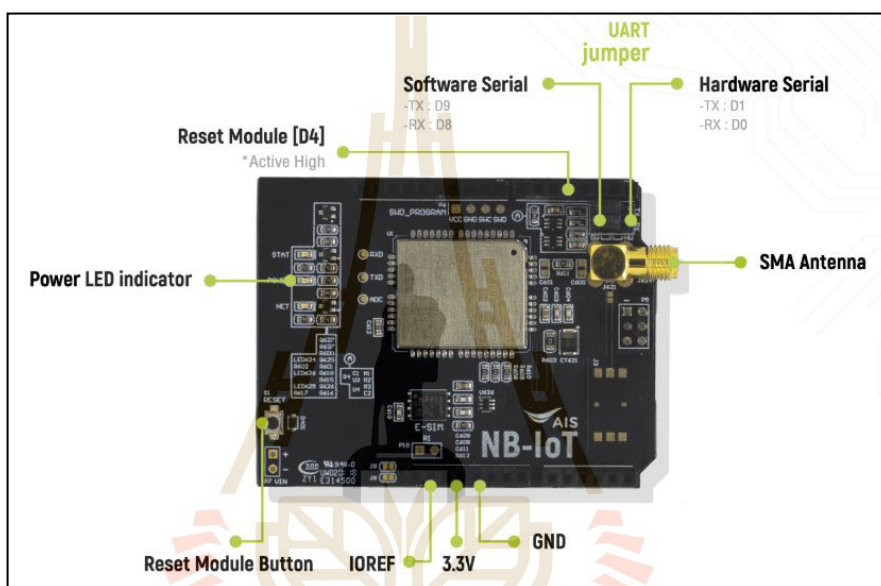
ซีโอเอพี เป็นสถาปัตยกรรมแบบรับ-ให้บริการ (client/server) โดยลูกค้าจะทำการร้องขอทรัพยากรไปที่แม่ข่ายโดยตรง จากนั้นแม่ข่ายจะทำการตอบกลับคำร้องพร้อมทั้งตัวเลือกประเภทของข้อมูล (content-type) เพื่อบอกลูกค้าที่กำลังจะได้รับข้อมูลในรูปแบบไหนกลับไป เช่น JSON, XML, CBOR เป็นต้น โดยลูกค้าสามารถ GET, PUT, POST และ DELETE ทรัพยากรบนแม่ข่ายด้วยยูอาร์แอล (Universal Resource Locator: URL) และการถามข้อมูลเพิ่มเติมที่เราต้องการให้แม่ข่ายส่งกลับมาให้ลูกค้า (query string)

2.4 การสื่อสารผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ โดยใช้บอร์ดและบริการของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบของผู้ให้บริการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่เอไอเอส ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ที่ให้นำอุปกรณ์ดังกล่าวมาใช้ในงานวิจัยและการศึกษา โดยบอร์ดที่ใช้เป็นอะคูโนชิลด์ (Arduino shield) ซึ่งหมายถึงบอร์ดเสริมที่สามารถต่อกับบอร์ดอะคูโนได้อย่างสะดวก แต่อย่างไรก็ตามบอร์ดดังกล่าวยังสามารถใช้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นอื่นได้ แต่ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการใช้กับอะคูโนเท่านั้น

2.4.1 โมดูลโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ

เพื่อให้การพัฒนาโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งเป็นเรื่องง่าย ผู้ให้บริการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ทำการออกแบบและผลิตชุดอุปกรณ์เพื่อการพัฒนา โดยเป็นบอร์ดสื่อสารซึ่งใช้โมดูลสื่อสารผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ (NB-IoT module) ดังรูปที่ 2.2 ทำงานร่วมกับบอร์ดทดลองอะดูโนเพื่อให้เหล่านักพัฒนาสามารถเรียนรู้ พัฒนาและประยุกต์ใช้โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบได้อย่างรวดเร็วและง่ายดาย



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมดูลโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ
(ที่มา: <https://aiap.ais.co.th/iotdevcenter/IoTDevice/DevioNBShield,2563>)

2.4.2 คุณลักษณะของโมดูลโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ

2.4.2.1 โมดูลโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบเป็นโมดูลสื่อสารผ่านเทคโนโลยีโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบที่ใช้พลังงานต่ำสื่อสารด้วยคลื่นความถี่ 900 MHz ของผู้ให้บริการสื่อสารทางโทรศัพท์เอไอเอส

2.4.2.2 เทคโนโลยีถูกพัฒนาตามมาตรฐานสากลทางโทรคมนาคม มั่นใจได้ถึงความปลอดภัยของข้อมูลที่ถูกส่งผ่านโครงข่าย รวมถึงสามารถส่งข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.4.2.3 สามารถใช้งานร่วมกับบอร์ดทดลองอะดูโนเพื่อให้ง่ายสำหรับการพัฒนางานในด้านโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง

2.4.2.4 ผู้ให้บริการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่เอไอเอสพัฒนาเอไอเอสไลบรารี (AIS library) สำหรับนักพัฒนา เพื่อให้เชื่อมต่ออุปกรณ์ผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบได้ง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น

2.5 สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าสายอากาศเป็นหนึ่งในข้อจำกัดของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบขณะที่อุปกรณ์เคลื่อนที่เนื่องจากสายอากาศเดิมของโครงข่ายนี้คือสายอากาศโมนโพลที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางทำให้สามารถรับความแรงของสัญญาณได้น้อย ผู้วิจัยจึงศึกษาสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบเจาะจงทิศทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการรับความแรงของสัญญาณ นั่นคือสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เนื่องจากสายอากาศนี้มีข้อดีคือสร้างได้ง่าย ต้นทุนต่ำสามารถเข้ากับวงจรได้ง่าย สามารถกำหนดลักษณะการเดินทางของคลื่นได้ สามารถป้องกันสัญญาณและปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้ง่าย

2.5.1 โครงสร้างและคุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป

โครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปมีหลายรูปแบบ ซึ่งรูปแบบที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางคือสายอากาศแผ่นพิมพ์แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยที่โครงสร้างของสายอากาศนี้จะประกอบด้วยแผ่นโลหะมีหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าวางอยู่บนชั้นวัสดุฐานรองที่เป็นฉนวน ในขณะที่ด้านล่างนั้นจะเป็นชั้นโลหะบางๆเช่นกัน ซึ่งโลหะดังกล่าวมีหน้าที่เป็นระนาบกราวด์ของสายอากาศ (Tamilselvan et al., 2012 และ Lee et al., 2017)

2.5.1.1 แผ่นตัวนำสายอากาศ

แผ่นตัวนำสายอากาศ เป็นแผ่นโลหะแบบบางทำหน้าที่เป็นตัวแผ่พลังงานและมีค่าความต้านทานต่ำ ทนต่อสภาวะแวดล้อม สามารถยึดติดกับผิวของชั้นวัสดุฐานรองได้เป็นอย่างดีโดยทั่วไป ทำจากทองแดง ทองคำ หรือ อลูมิเนียม แผ่นตัวนำอาจมีรูปร่างต่าง ๆ เช่น สี่เหลี่ยมผืนผ้าสี่เหลี่ยม จัตุรัส วงกลม วงรี ฯลฯ วัสดุที่นำมาใช้ทำแผ่นตัวนำสายอากาศนี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศและความซับซ้อนในการผลิต นอกจากนี้แล้วขนาดและรูปร่างของแผ่นตัวนำสายอากาศยังเป็นปัจจัยต่อการกำหนดความถี่ใช้งาน รูปแบบการแผ่พลังงานและอิมพีแดนซ์ขาเข้า ปัจจุบันแผ่นตัวนำสายอากาศที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นแผ่นตัวนำรูปสี่เหลี่ยมและวงกลม เนื่องจากการออกแบบและการผลิตสามารถทำได้ง่าย

2.5.1.2 ชั้นวัสดุฐานรอง

ชนิดและขนาดของชั้นวัสดุฐานรองเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบสายอากาศและเป็นองค์ประกอบสำคัญที่กำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริป การแผ่พลังงานของสายอากาศจะลดลง เมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองเพิ่มมากขึ้น โดยที่ความหนาของชั้นวัสดุฐานรองมีค่าคงที่ การแผ่พลังงานของสายอากาศจะเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาของชั้นวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้นและการแผ่พลังงานนี้จะมีปริมาณลดลง เมื่อความหนาต่อความยาวคลื่นมีค่าประมาณ 0.05

2.5.1.3 ระบายกราวด์

ระบายกราวด์ เป็นแผ่นโลหะขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับแผ่นตัวนำสายอากาศ ซึ่งส่วนใหญ่ทำจาก โลหะชนิดเดียวกันกับสายอากาศโดยขนาดของระบายกราวด์นี้ส่งผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น เนื่องจากคลื่นเดี่ยวเบนที่บริเวณขอบของระบายกราวด์ นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการ วิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศอีกด้วย เนื่องจากการวิเคราะห์สายอากาศส่วนใหญ่มีข้อสมมติว่าแผ่นระบายกราวด์มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นตัวนำสายอากาศมากจนสามารถประมาณได้ว่าเป็นอนันต์ ขนาดที่จำกัดของระบายกราวด์จะมีผลต่อลำคลื่นหลัก (main lobe) น้อยมากแต่จะทำให้เกิดลำคลื่นด้านหลังของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป

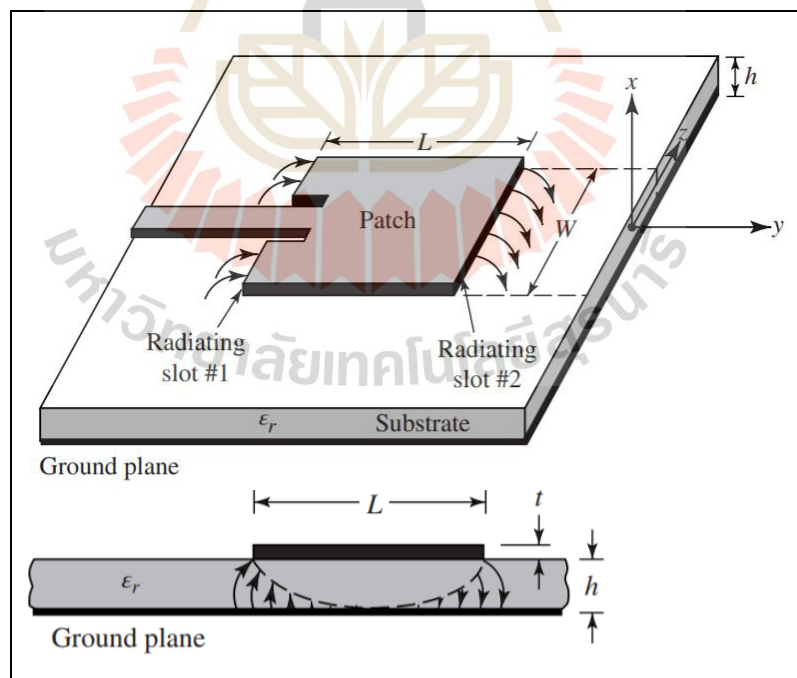
ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> - มีขนาดเล็ก - น้ำหนักเบา แข็งแรงทนทาน - สร้างได้ง่าย ราคาถูก - ต่อเข้ากับวงจรได้ง่าย - สามารถกำหนดลักษณะการเดินทางของคลื่นได้ทั้งเชิงเส้นและแบบวงกลม และ โดยการเลื่อนตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณรูปร่างของแผ่นแผ่พลังงานที่ใช้ - สามารถป้อนสัญญาณและปรับอิมพีแดนซ์ได้พร้อมๆกับการสร้างสายอากาศ 	<ul style="list-style-type: none"> - มีความกว้างแถบความถี่แคบมาก - มีการสูญเสียมาก โดยมักเกิดจากการสูญเสียที่จุดต่อและจุดป้อนสัญญาณ จึงทำให้มีอัตราการใช้ต่ำ - การแผ่คลื่นได้ไม่กว้างไกลและไม่สมบูรณ์ คือมีการแผ่พลังงานได้เพียงครึ่งระนาบ - สายอากาศอาจเกิดออกไซด์บริเวณผิว ทำให้มีการสูญเสียมากขึ้น

นอกจากนี้การออกแบบสายอากาศจะต้องพิจารณาคูสมบัตินของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานดังตารางที่ 2.1 และเนื่องจากความหนาของไมโครสตริปบางมาก คลื่นที่เกิดขึ้นภายในสารไดอิเล็กทริก สามารถพิจารณาได้จากการสะท้อนกลับของคลื่น เมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาถึงขอบของสตริป ซึ่งเป็นเพียงกลุ่มเล็ก ๆ ที่แสดงถึงพลังงานที่ถูกแพร่กระจาย (fringing field) ดังนั้นสายอากาศที่พิจารณาจึงมีประสิทธิภาพต่ำ

2.5.2 การป้อนสัญญาณของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป

การป้อนสัญญาณของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป มีด้วยกันหลายรูปแบบ เช่น การย้ายจุดป้อนสัญญาณแบบออฟเซต การย้ายจุดป้อนสัญญาณแบบอินเซต การป้อนสัญญาณที่เป็นการโพลาริซ์แบบวงกลม และการป้อนสัญญาณโดยใช้ควอเตอร์เวฟทรานสฟอร์มเมอร์

จากการศึกษาผู้วิจัยได้ศึกษาการย้ายจุดป้อนสัญญาณแบบอินเซตดังรูปที่ 2.3 โดยจะทำการเจาะร่องเพิ่มความยาวของไมโครสตริป ซึ่งการป้อนสัญญาณแบบนี้มีข้อดีคือสามารถแมทซ์อินพีแดนซ์ได้ง่าย เพื่อเพิ่มความกว้างแถบความถี่และอัตราขยายของสายอากาศ



รูปที่ 2.3 สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการป้อนสัญญาณแบบอินเซต

2.6 คุณลักษณะและพารามิเตอร์ของสายอากาศ

สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปมีคุณลักษณะและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องพิจารณาประกอบการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน

2.6.1 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง

อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) เป็นค่าของอัตราส่วนระหว่างแรงดันค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดในคลื่นนิ่ง ดังสมการที่ 2.1

$$\text{VSWR} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2.1)$$

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.2)$$

โดยที่ Γ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน

V_r คือ แรงดันสะท้อนกลับ

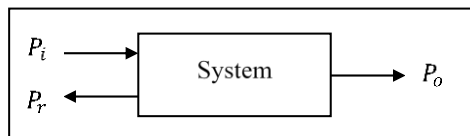
V_i คือ แรงดันตกกระทบ

Z_L คือ โหลดอิมพีแดนซ์

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณในกรณีที่ต้องไว้ด้วย
แมทซ์ชิงโหลดนั้นค่า VSWR เป็น 1 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด

2.6.2 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ

ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss: RL) คือการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแสดงค่ากำลังที่สูญเสียที่โหลดดังแสดงในรูปที่ 2.4 เมื่ออิมพีแดนซ์ของสายส่งและสายอากาศไม่แมตซ์กัน การสูญเสียย้อนกลับสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การสะท้อน ซึ่งเป็นการแสดงการแมตซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งสัญญาณกับสายอากาศดังสมการที่ 2.3



รูปที่ 2.4 การเกิดการย้อนกลับของกำลังงาน

$$\text{Return Loss} = -10 \log \left(\frac{P_r}{P_i} \right) \quad (2.3)$$

โดยที่ P_r คือ กำลังงานของสัญญาณที่สะท้อนกลับ

P_i คือ กำลังงานของสัญญาณขาเข้า

P_o คือ กำลังงานของสัญญาณขาออก

จะเห็นว่าค่าการสูญเสียย้อนกลับ คืออัตราส่วนของกำลังงานของสัญญาณที่สะท้อนกลับกับกำลังงานของสัญญาณขาเข้า ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของการส่งผ่าน แสดงว่าถ้าค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่ามากจะทำให้มีประสิทธิภาพการส่งผ่านที่ต่ำ เมื่อพิจารณาช่วงความถี่ที่ใช้งานของสายอากาศนั้นจะต้องมีค่าการสูญเสียย้อนกลับน้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งเป็นค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณที่ยอมรับได้ ต้องมีค่าไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของกำลังงานที่ส่งเข้ามายังสายอากาศจะแสดงให้เห็นว่าสายอากาศสามารถแปลงกำลังงานจากสายนำสัญญาณเป็นกำลังงานที่แผ่คลื่นออกไปได้มากหรือน้อย

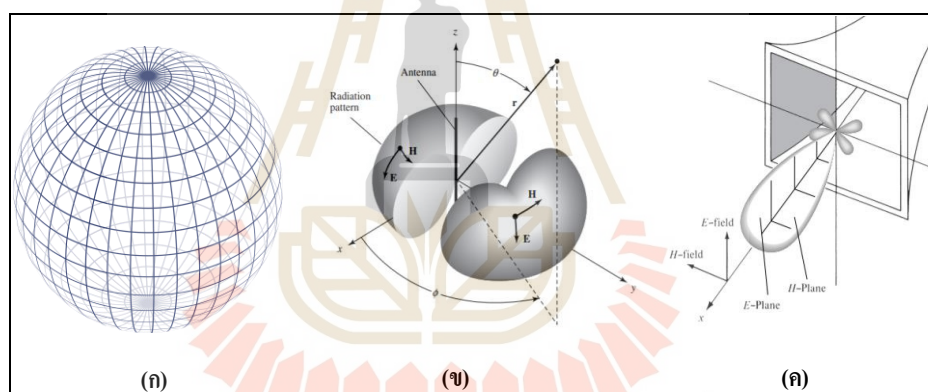
2.6.3 แบบรูปการแผ่พลังงาน

แบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) หรือแบบรูปของสายอากาศ เป็นการบอกคุณสมบัติในการแผ่พลังงานของสายอากาศ ซึ่งแบ่งออกได้ดังนี้

2.6.3.1 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบไอโซทรอปิก (isotropic pattern) ดังรูปที่ 2.5 (ก) เป็นสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานออกไปในทุกทิศทุกทางเท่ากันทั้งหมด ซึ่งเป็นแบบรูปการแผ่พลังงานที่มีลักษณะเป็นอุดมคติในความเป็นจริงนั้น ไม่มีสายอากาศใดเลยที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานเช่นนี้ ทั้งในทางทฤษฎีและในทางปฏิบัติแต่จะใช้ในการเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบอื่น เพื่อคุณลักษณะการแสดงทิศทางของสายอากาศนั้น ๆ

2.6.3.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบรอบทิศทาง (omnidirectional pattern) ดังรูปที่ 2.5 (ข) เป็นสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานออกไปรอบตัวในระนาบใดระนาบหนึ่ง ส่วนระนาบอื่นที่ตั้งฉากกันจะมีการแผ่แบบมีทิศทาง เหมาะกับการใช้งานที่การสื่อสารกันมีตำแหน่งและทิศทางที่ไม่แน่นอน โดยสายอากาศที่นิยมนำมาใช้งานคือสายอากาศโมโนโพล (monopole antenna) และสายอากาศไดโพล (dipole antenna) เป็นต้น

2.6.3.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบมีทิศทาง (directional pattern) ดังรูปที่ 2.5 (ค) เป็นสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานหรือรับพลังงานเข้ามาในทิศทางใดทิศทางหนึ่งอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าทิศทางอื่น มีการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่ชัดเจน เหมาะกับการใช้งานแบบจุดต่อจุดที่ต้องการความแรงของสัญญาณสูงมาก สายอากาศที่นิยมนำมาใช้งาน คือสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป (microstrip patch antenna) สายอากาศแบบยาจิก (Yagi antenna) และสายอากาศแบบจานสะท้อน (dish antenna) เป็นต้น



รูปที่ 2.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของคลื่น (ก) แบบไอโซทรอปิก (ข) แบบรอบทิศทาง (ค) แบบมีทิศทาง (ที่มา: Antenna Lecture two, 2563)

2.6.4 บริเวณการแผ่พลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

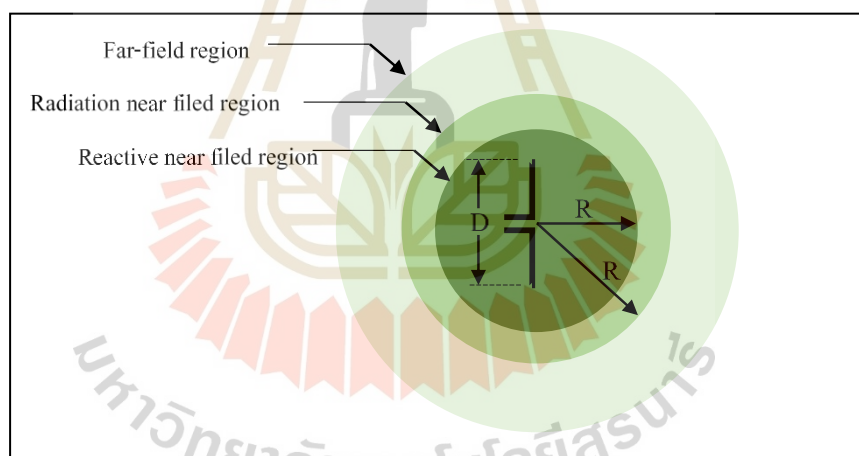
บริเวณการแผ่พลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าพิจารณาจากระยะทางที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 บริเวณดังนี้

2.6.4.1 บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (reactive near-field region) เป็นบริเวณที่สนามที่ล้อมรอบอยู่ใกล้สายอากาศมากที่สุด และส่วนใหญ่เป็นสนามแบบรีแอกทีฟ บริเวณนี้จะมีระยะทาง $R < 0.62\sqrt{D^2/\lambda}$ จากผิวของสายอากาศ เมื่อความยาวคลื่นคือ λ และความยาวของสายอากาศส่วนที่ยาวที่สุดคือ D

2.6.4.2 บริเวณสนามแผ่พลังงานระยะใกล้ (radiating near-field region) เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณสนามรีแอกทีฟที่ระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่แผ่พลังงานอยู่เป็นส่วนใหญ่ และการแผ่พลังงานของสนามตามมุมต่าง ๆ นั้นแปรผันตามระยะทางจาก สายอากาศ เมื่อสายอากาศมีขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นสนามบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้นใน บริเวณนี้จะมีระยะทาง $0.62\sqrt{D^2/\lambda} \leq R \leq 2D^2/\lambda$

2.6.4.3 บริเวณสนามระยะไกล (far-field region) เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางของสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีขนาดสายอากาศใหญ่ที่สุดเท่ากับ D บริเวณสนามไกลจะเกิดขึ้นเมื่อระยะทาง $R \geq 2D^2/\lambda$ จากสายอากาศ

สำหรับการพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศนั้นจะต้องวัดผลที่บริเวณสนามไกล ซึ่งในรูปที่ 2.6 จะแสดงบริเวณการแผ่พลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 บริเวณ



รูปที่ 2.6 การแบ่งบริเวณการแผ่พลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
(ที่มา: รังสรรค์ วงศ์สรณ์, วิศวกรรมสายอากาศ (2555))

2.6.5 อัตราขยายของสายอากาศ

ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบการสื่อสารแบบไร้สาย สมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission equation) เป็นสมการที่ใช้ในการวัดอัตราขยายของสายอากาศ (antenna gain) โดยจะใช้ค่าจากผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังงาน เพื่อคำนวณหาอัตราขยาย ดังสมการที่ 2.4

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (2.4)$$

ทำการแปลงเป็นหน่วย dB และกำหนดค่า เพื่อหาอัตราขยายของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป ดังสมการที่ 2.5

$$G_{r\text{dB}} = P_{r\text{dB}} - P_{t\text{dB}} - G_{t\text{dB}} + 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (2.5)$$

- โดยที่ P_r คือ กำลังงานจากสายอากาศภาครับ (วัตต์)
 P_t คือ กำลังงานจากสายอากาศภาคส่ง (วัตต์)
 G_r คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับ
 G_t คือ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง
 R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ (เมตร)
 λ คือ ความยาวคลื่น (เมตร)

2.7 กล่าวสรุป

จากเนื้อหาที่กล่าวมาข้างต้นในบทนี้ จะเห็นว่าโครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบนั้น มักถูกติดตั้งในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดและอุปกรณ์ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการเคลื่อนที่ โดยในการส่งข้อมูลนั้นระบบนี้ต้องการการสื่อสารที่มีความน่าเชื่อถือและมีเสถียรภาพ จึงมีการวิเคราะห์และทดสอบประสิทธิภาพของระบบในหลากหลายลักษณะ ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณระหว่างอุปกรณ์กับสถานีฐานนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึง เพื่อรองรับการใช้งานที่เพิ่มขึ้นของจำนวนผู้ใช้งานทั้งประสิทธิภาพการใช้งาน ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ โดยใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางและเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการลดต้นทุนและพลังงาน จึงเลือกใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป ที่มีต้นทุนต่ำและง่ายต่อการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานในแถบความถี่แคบ

บทที่ 3

การออกแบบ

3.1 บทนำ

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ผ่านมา พบว่าปัญหาของโครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ คือการรับสัญญาณในพื้นที่ที่มีข้อจำกัด ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเสนอการเปลี่ยนแปลงสายอากาศที่ใช้รับส่งสัญญาณ โดยที่สายอากาศเดิมคือสายอากาศโมโนโพลเป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ทำให้สามารถรับส่งสัญญาณได้ต่ำ จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับสายอากาศที่จะใช้ในการรับส่งสัญญาณ ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง จะทำให้การรับส่งสัญญาณมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและการจำลองแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป รวมถึงการปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศ ด้วยการป้อนสัญญาณแบบอินเซตเจาะร่องและเพิ่มตัวสะท้อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศและเหมาะสมกับการใช้งาน โดยพิจารณาจากค่าการสูญเสียย้อนกลับและแบบรูปการแผ่พลังงาน

3.2 การออกแบบสายอากาศ

สายอากาศ (antenna) คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแผ่กระจายกำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปหรือในทางกลับกันใช้สำหรับรับกำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้ามา ซึ่งการออกแบบสายอากาศให้มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้น จะต้องคำนึงถึงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งจะต้องเท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งและอิมพีแดนซ์ที่เอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยทั้งสามค่านี้จะต้องมีค่าใกล้เคียงกันให้ได้มากที่สุด หรือเกิดการแมตซ์อิมพีแดนซ์ (impedance matching) นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงการลดค่าการสูญเสียของตัวนำ การสูญเสียของไดอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างของสายอากาศและการเลือกวัสดุที่ใช้ออกแบบและสร้างให้เหมาะสม ซึ่งวัสดุฐานรองที่สามารถใช้ในการออกแบบสายอากาศมีอยู่เป็นจำนวนมาก โดยจะมีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 2.2 ถึง 12 ซึ่งวัสดุฐานรองที่จะทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพที่ดึ้นนั้นจะต้องเป็นวัสดุฐานรองที่มีความหนาและมีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกที่ต่ำ เพราะจะทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพดีกว่าและมีความกว้างแถบความถี่กว้างแต่สายอากาศจะมีขนาดใหญ่

ถ้าวัสดุฐานรองมีความบาง ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กทริกจะมีค่ามากและเป็นที่ต้องการสำหรับ วงจรไมโครเวฟ เนื่องจากต้องการสนามที่มีความหนาแน่นสูงเพื่อลดการแผ่พลังงานที่ไม่ต้องการ โดยจะนำไปสู่ขนาดที่เล็กลงแต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากเกิดการสูญเสียมากขึ้นจึงลดประสิทธิภาพ และทำให้ความกว้างแถบความถี่ที่แคบลง ดังนั้นในการเลือกวัสดุฐานรองจึงจะต้องพิจารณา ค่าสภาพยอม (permittivity) ซึ่งเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์พื้นฐานที่มีผลต่อการแผ่กระจายของ สนามไฟฟ้า ไดอิเล็กทริกจะสามารถอธิบายได้จากพฤติกรรมภายใต้การใช้งานคลื่นที่มีความถี่ต่าง ๆ ซึ่งจะเป็นค่าสภาพยอมเชิงซ้อน (complex permittivity: ϵ) ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ 3.1 (Balanis, C. A., 2016)

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3.1)$$

เมื่อ ϵ'' คือปัจจัยในการสูญเสียยังผล (dielectric loss factor) โดยพิจารณาค่าการสูญเสียจาก ส่วนที่เป็นจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่และอุณหภูมิที่ใช้งานและค่า สภาพยอมของตัวกลางเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับค่าสภาพยอมในอากาศว่าง (free space permittivity: ϵ_0) ดังสมการที่ 3.2

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (3.2)$$

โดยที่ ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์หรือค่าคงตัวไดอิเล็กทริก
(relative permittivity, dielectric constant)

ในงานวิจัยของ Ali E.M. et al. (2017) ได้ออกแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์เพื่อใช้งานที่ความถี่ 900 MHz สำหรับแอปพลิเคชัน โทรศัพท์เคลื่อนที่โดยมีการเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุฐานรอง ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกซึ่งต่างกันนั้น พบว่าการออกแบบและสร้างสายอากาศด้วยวัสดุที่มี ไดอิเล็กทริกเป็น FR-4 ทำให้คุณสมบัติของสายอากาศเป็นไปในทางที่ดีทั้งความถี่เรโซแนนซ์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับและอัตราขยาย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สาย ส่งแบบไมโครสตริป เพื่อใช้งานที่ความถี่ 900 MHz โดยเลือกใช้วัสดุฐานรองแบบ FR-4 มีคุณสมบัติ ดังตารางที่ 3.1 และ โครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปแสดงดังรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุฐานรองที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์เพื่อใช้งานที่ความถี่ 900 MHz (Ali E.M. et al., 2017)

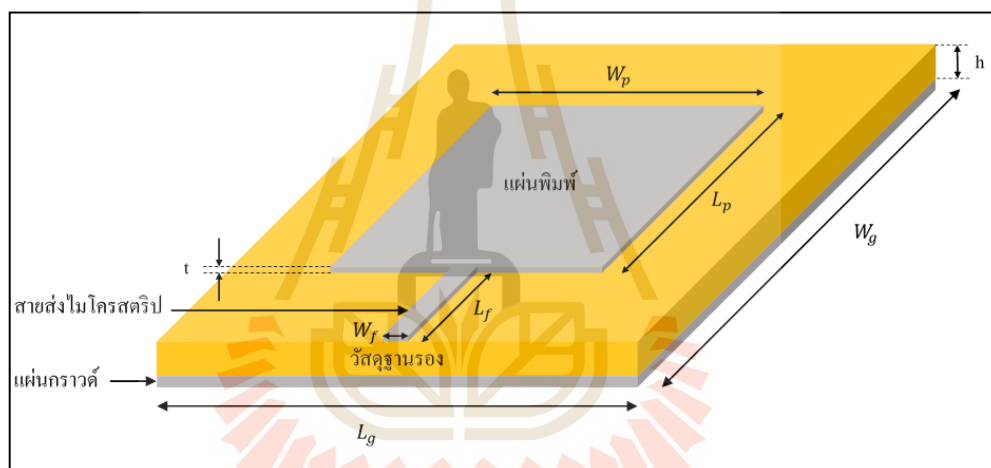
วัสดุ	ϵ_r	h (mm)	t (mm)	$\tan \delta$
FR-4	4.3	1.6	0.035	0.025

โดยที่ ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant)

h คือ ค่าความหนาของวัสดุฐานรอง

t คือ ค่าความหนาของวัสดุตัวนำ

$\tan \delta$ คือ ค่ามุมสัมพัทธ์การสูญเสีย (loss tangent)



รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป

โครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป จะประกอบด้วยโครงสร้างพื้นฐานสายส่งแบบไมโครสตริป โดยความกว้างของสายส่งจะส่งผลต่อความถี่ใช้งาน ซึ่งการคำนวณความกว้างของสายส่งไมโครสตริป (W_f) โดยขึ้นอยู่กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant: ϵ_r) ความหนาของวัสดุฐานรอง (h) และความหนาของวัสดุตัวนำ (thickness: t) และออกแบบให้แมทซ์อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ (Z_0) เท่ากับ 50 โอห์ม สามารถคำนวณได้จากสมการการออกแบบสายส่งไมโครสตริปคือสมการ 3.3 ดังนี้ (Islam M. S. et al., 2018)

สมการการออกแบบสายส่งไมโครสตริป คือ

$$W_f = \frac{7.48 \times h}{e^{\left(\frac{Z_0 \sqrt{\epsilon_r + 1.41}}{87}\right)}} - (1.25 \times t) \quad (3.3)$$

นำค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุฐานรองในตารางที่ 3.1 แทนค่าการคำนวณในสมการที่ 3.3

$$W_f = \frac{7.48 \times 1.6}{e^{\left(\frac{50 \sqrt{4.3 + 1.41}}{87}\right)}} - (1.25 \times 0.035) = 2.98$$

นอกจากนี้โครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปประกอบด้วยแผ่นพิมพ์ (patch) ซึ่งเป็นแผ่นตัวนำสัญญาณ โดยความกว้างของแผ่นพิมพ์ (W_p) จะขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กทริกและความถี่ใช้งาน (resonance frequency: f_0) ซึ่งเป็นความถี่ที่เกิดจากความต้านทานจินตภาพของความจุและความเหนี่ยวนำในวงจรของสายอากาศหักล้างซึ่งกันและกัน และทำให้ความต้านทานเป็นจริงทั้งหมด จึงเกิดกระแสไฟฟ้าและคลื่นสามารถแผ่กระจายได้สูงสุด ซึ่งถ้าความถี่เรโซแนนซ์ต่ำลงจะทำให้ความกว้างของสายอากาศยังมีขนาดใหญ่ ดังแสดงในสมการที่ 3.4 (Balanis, C. A., 2016)

$$W_p = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (3.4)$$

โดยที่ f_0 คือความถี่เรโซแนนซ์

c ความเร็วของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในอวกาศว่าง คือ

แทนค่าการคำนวณในสมการที่ 3.2 ได้ดังนี้

$$W_p = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 3 \times 10^8 \sqrt{\frac{4.3 + 1}{2}}} = 102.38 \text{ mm}$$

จากที่กล่าวมาข้างต้นสายอากาศจะแผ่คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แต่เนื่องจากแผ่นพิมพ์มีขนาดที่จำกัด สนามที่ขอบของแผ่นพิมพ์จะเกิดริ้วของสนาม (fringing field) ซึ่งจะมีการแผ่พลังงานตลอดแนวความยาวทั้ง 2 ฝั่งของแผ่นพิมพ์ โดยจำนวนริ้วของสนามเป็นฟังก์ชันของขนาดแผ่นพิมพ์กับความสูงของวัสดุฐานรอง สำหรับระนาบสนามไฟฟ้าจะเป็นอัตราส่วนของความยาวของแผ่นพิมพ์ (L) กับความสูงของวัสดุฐานรองและค่าคงตัวไดอิเล็กทริก ซึ่งถ้าสายอากาศไมโครสตริปมี $L/h \gg 1$ จะทำให้ริ้วของสนามจะลดลง แต่อย่างไรก็ตามจะขึ้นอยู่กับความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศด้วย โดยเส้นแรงแสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นเส้นแรงที่ไม่เป็นเอกพันธ์ของสองไดอิเล็กทริกคือวัสดุฐานรองและอากาศ โดยเส้นแรงแสนามไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอยู่ในบริเวณวัสดุฐานรองและมีบางส่วนอยู่ในอากาศ เมื่อ $W/h \gg 1$ และ $\epsilon_r \gg 1$ เส้นแรงแสนามไฟฟ้าจะอยู่ในวัสดุฐานรองมากกว่าในอากาศและริ้วของสนามเหล่านี้จะทำให้ไมโครสตริปกว้างกว่าไมโครสตริปขนาดจริง ดังนั้นคลื่นที่เดินทางในวัสดุฐานรองและในอากาศจะทำให้เกิดค่าคงตัวไดอิเล็กทริกประสิทธิผล (effective dielectric constant : ϵ_{eff}) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญเพื่ออธิบายถึงการเกิดริ้วสนามและการแพร่กระจายคลื่นในสายไมโครสตริป

นอกจากนี้ผลกระทบของริ้วสนามยังทำให้แผ่นพิมพ์ของสายอากาศมีขนาดใหญ่กว่าขนาดจริงของแผ่นพิมพ์ โดยในระนาบสนามไฟฟ้า ความยาวของแผ่นพิมพ์มีการขยายออกไปแต่ละข้างเป็นระยะทาง ΔL ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าคงตัวไดอิเล็กทริกประสิทธิผลและอัตราส่วนความกว้างของแผ่นพิมพ์กับความสูงของวัสดุฐานรอง ดังนั้นความยาวประสิทธิผลของแผ่นพิมพ์จึงเท่ากับ ความยาวของแผ่นพิมพ์ที่ขยายออกไปเนื่องจากผลกระทบของริ้วกับความยาวจริงของแผ่นพิมพ์ (Balanis, C. A., 2016)

จากการศึกษาข้างต้นจะเริ่มจากการคำนวณค่าคงตัวไดอิเล็กทริกประสิทธิผล ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ ความกว้างของสายส่งและความหนาของไดอิเล็กทริก ดังสมการที่ 3.5 จากนั้นแทนค่าลงในสมการที่ 3.6 เพื่อหาความยาวประสิทธิผล (effective length: L_{eff}) และคำนวณหาความยาวประสิทธิผลขยาย (extended effective length: ΔL) ในสมการที่ 3.7 ดังนี้ (Balanis, C. A., 2016)

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W_p}}} \quad (3.5)$$

แทนค่าการคำนวณในสมการที่ 3.5

$$\varepsilon_{eff} = \frac{4.3+1}{2} + \frac{4.3-1}{2} \left(1 + 12 \frac{1.6}{102.38} \right)^{\frac{1}{2}} = 4.164$$

จากนั้นนำค่าคงตัวไดอิเล็กทริกประสิทธิภาพแทนค่าในสมการที่ 3.6 และ 3.7 เพื่อหาความยาวประสิทธิภาพซึ่งจะขึ้นอยู่กับความถี่ใช้งาน ถ้าความถี่ต่ำจะทำให้ความยาวประสิทธิภาพจะยาวมากขึ้นและส่งผลกระทบต่อความยาวของแผ่นพิมพ์ และความยาวประสิทธิภาพขยายจะขึ้นอยู่กับความสูงของวัสดุฐานรองและความกว้างของแผ่นพิมพ์ (Islam M. S. et al., 2018)

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \quad (3.6)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\varepsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W_p}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W_p}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.7)$$

แทนค่าการคำนวณในสมการที่ 3.6 และ 3.7

$$L_{eff} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 900 \times 10^6 \sqrt{4.164}} = 0.0816$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(4.164 + 0.3) \left(\frac{102.38}{1.6} + 0.264 \right)}{(4.164 - 0.258) \left(\frac{102.38}{1.6} + 0.8 \right)} = 0.747$$

ต่อมานำค่าความยาวประสิทธิภาพและความยาวประสิทธิภาพขยายแทนค่าในสมการที่ 3.8 เพื่อหาความยาวของแผ่นพิมพ์ (L_p) จะได้ดังนี้ (Islam M. S. et al., 2018)

$$L_p = L_{eff} - 2\Delta L \quad (3.8)$$

$$L_p = 80.18 \text{ mm}$$

จากที่กล่าวมาข้างต้นคุณสมบัติพื้นฐานของสายส่งมีความสำคัญมากในการออกแบบสายอากาศ ซึ่งสำหรับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งที่มีความยาว L เท่ากับ Z_0 และเชื่อมต่อกับสายอากาศที่มีอิมพีแดนซ์ Z_A เมื่อให้ความยาวของสายส่งเท่ากับ $1/4$ ของความยาวคลื่น ถ้าเครื่องส่งสัญญาณมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์มและส่งกำลังไฟฟ้าไปยังสายอากาศจะทำให้ไม่เกิดการสะท้อนกลับไปยังเครื่องส่งหรือเกิดการแมตช์อิมพีแดนซ์ ดังนั้นการคำนวณหาความยาวของสายส่งแบบไมโครสตริป (L_f) ในสมการที่ 3.9 จะสัมพันธ์กับค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ในวัสดุฐานรอง (λ_g) และความถี่ใช้งาน ซึ่งโดยปกติแล้วสายส่งไมโครสตริปมีคุณสมบัติในการทำให้คลื่นกระจัดกระจาย (Dispersive) นั่นคือการที่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ประสิทธิผลแปรตามค่าความถี่และค่าโครงสร้างของสายส่งไมโครสตริปเป็นลักษณะกึ่ง TEM ดังนั้นสมการพื้นฐานเกี่ยวกับความยาวคลื่นสัมพันธ์ในวัสดุฐานรองสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.10 ดังนี้ (Al-Khaffaf, D. A. J. et al.)

$$L_f = \frac{\lambda_g}{4} \quad (3.9)$$

เมื่อ

$$\lambda_g = \frac{c}{f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.10)$$

โดยเริ่มคำนวณจากค่าความยาวสัมพันธ์ในวัสดุฐานรอง จากนั้นแทนค่าในสมการที่ 3.9 จึงจะได้ความยาวของสายส่งแบบไมโครสตริปเท่ากับ

$$\lambda_g = \frac{3 \times 10^8}{900 \times 10^6 \sqrt{4.164}} = 163.349 \text{ mm}$$

แทนค่าการคำนวณในสมการที่ 3.10 ดังนั้นจะได้ความยาวของสายส่งแบบไมโครสตริปดังนี้

$$L_f = \frac{\lambda_g}{4} = \frac{163.349}{4} = 40.83 \text{ mm}$$

นอกจากนี้ในการออกแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป มีอีกหนึ่งส่วนประกอบที่สำคัญคือระนาบกราวด์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

โดยขอบเขตสั้นของระนาบกราวด์ (short edges) จะสัมพันธ์กับความกว้างและความยาวของแผ่นพิมพ์ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ (Islam M. S. et al., 2018)

$$W_g = 6h + W_p \quad (3.11)$$

$$L_g = 6h + L_p \quad (3.12)$$

แทนค่าการคำนวณในสมการที่ 3.11 และ 3.12 จะได้

$$W_g = 6 \times 1.6 + 102.38 = 111.98 \text{ mm}$$

$$L_g = 6 \times 1.6 + 80.18 = 90.76 \text{ mm}$$

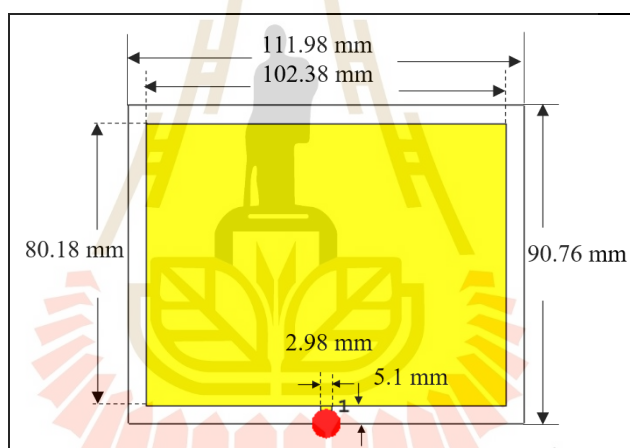
ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 คือค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการดังกล่าวข้างต้น จะถูกนำไปใช้ในการจำลองแบบต่อไป

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ถูกออกแบบที่ความถี่ใช้งาน 900 MHz และใช้วัสดุฐานรองคือ FR-4 ซึ่งมีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกเท่ากับ 4.3

พารามิเตอร์ของสายอากาศแผ่นพิมพ์ ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป	ขนาดของพารามิเตอร์ (มิลลิเมตร)
ความกว้างของแผ่นพิมพ์ (W_p)	102.38
ความยาวของแผ่นพิมพ์ (L_p)	80.18
ความกว้างของสายส่งไมโครสตริป (W_f)	2.98
ความยาวของสายส่งไมโครสตริป (L_f)	40.83
ความกว้างของระนาบกราวด์ (W_g)	111.98
ความยาวของระนาบกราวด์ (L_g)	90.76

3.3 การจำลองแบบสายอากาศ

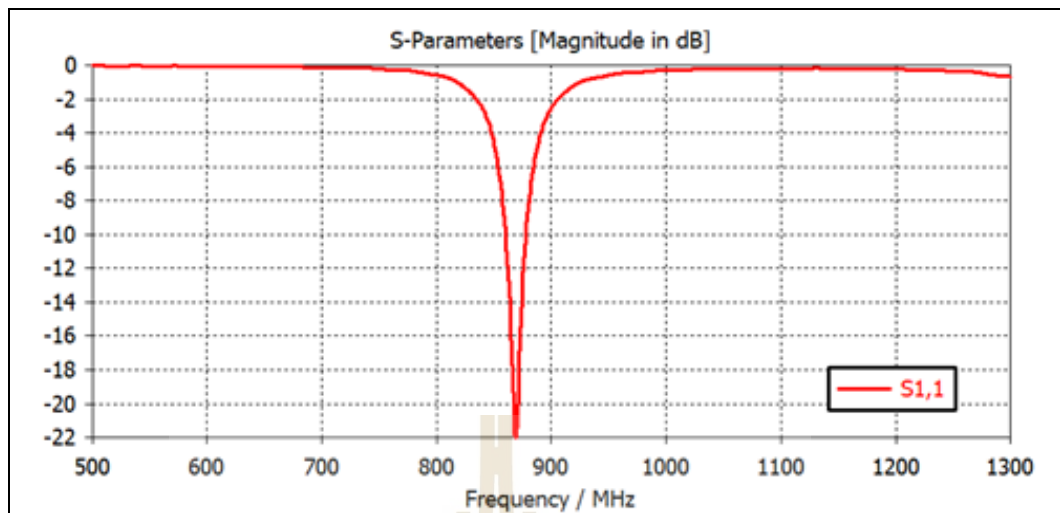
จากการคำนวณเพื่อออกแบบสายอากาศในหัวข้อที่ 3.2 จะได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปดังตารางที่ 3.2 โดยค่าพารามิเตอร์นี้จะถูกนำไปจำลองแบบสายอากาศด้วยโปรแกรม CST Microwave studio เมื่อจำลองแบบสายอากาศแล้ว พบว่าความยาวของความยาวของสายส่งไมโครสตริปรวมกับความยาวของแผ่นพิมพ์มีขนาดยาวกว่าความยาวของระนาบกราวด์ จึงได้มีการปรับความยาวของสายส่งแบบไมโครสตริปเพื่อให้เหมาะสมกับขนาดของสายอากาศ โดยลดขนาดของสายส่งแบบไมโครสตริปลงเหลือ $\lambda_g/8$ เท่ากับ 5.1 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงได้แบบจำลองของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่ได้จากการคำนวณและการปรับความยาวของสายส่งไมโครสตริปดังแสดงในรูปที่ 3.2 จากนั้นทำการวัดผลค่าการสูญเสียย้อนกลับและแบบรูปการแผ่พลังงานต่อไป



รูปที่ 3.2 แบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ได้จากการคำนวณโดยถูกออกแบบที่ความถี่ใช้งาน 900 MHz

3.3.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ

เมื่อจำลองแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปและวัดผลค่าการสูญเสียย้อนกลับ พบว่าเกิดความถี่เรโซแนนซ์ทำงานที่ความถี่ 868 MHz ซึ่งมีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -22.55 dB เมื่อพิจารณาช่วงความถี่ที่ใช้งานของสายอากาศนั้นจะต้องมีค่าการสูญเสียย้อนกลับน้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งเป็นค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณที่ยอมรับได้ ต้องมีค่าไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของกำลังงานที่ส่งเข้ามายังสายอากาศ ดังนั้นค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ 860 ถึง 878 MHz ดังแสดงในรูปที่ 3.3

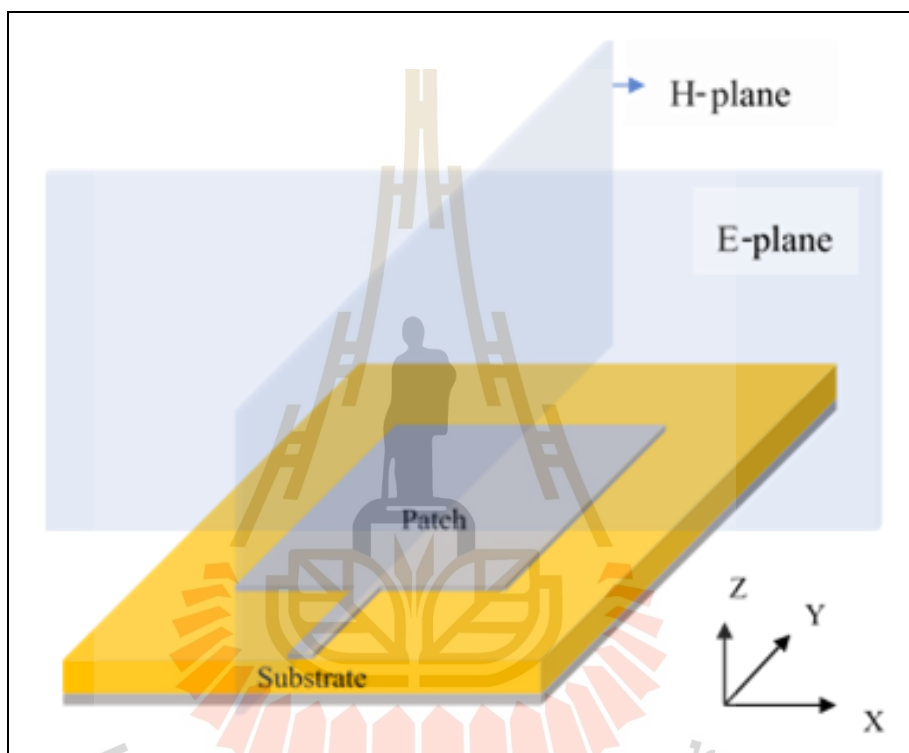


รูปที่ 3.3 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของแบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ได้จากการคำนวณ โดยถูกออกแบบที่ความถี่ใช้งาน 900 MHz

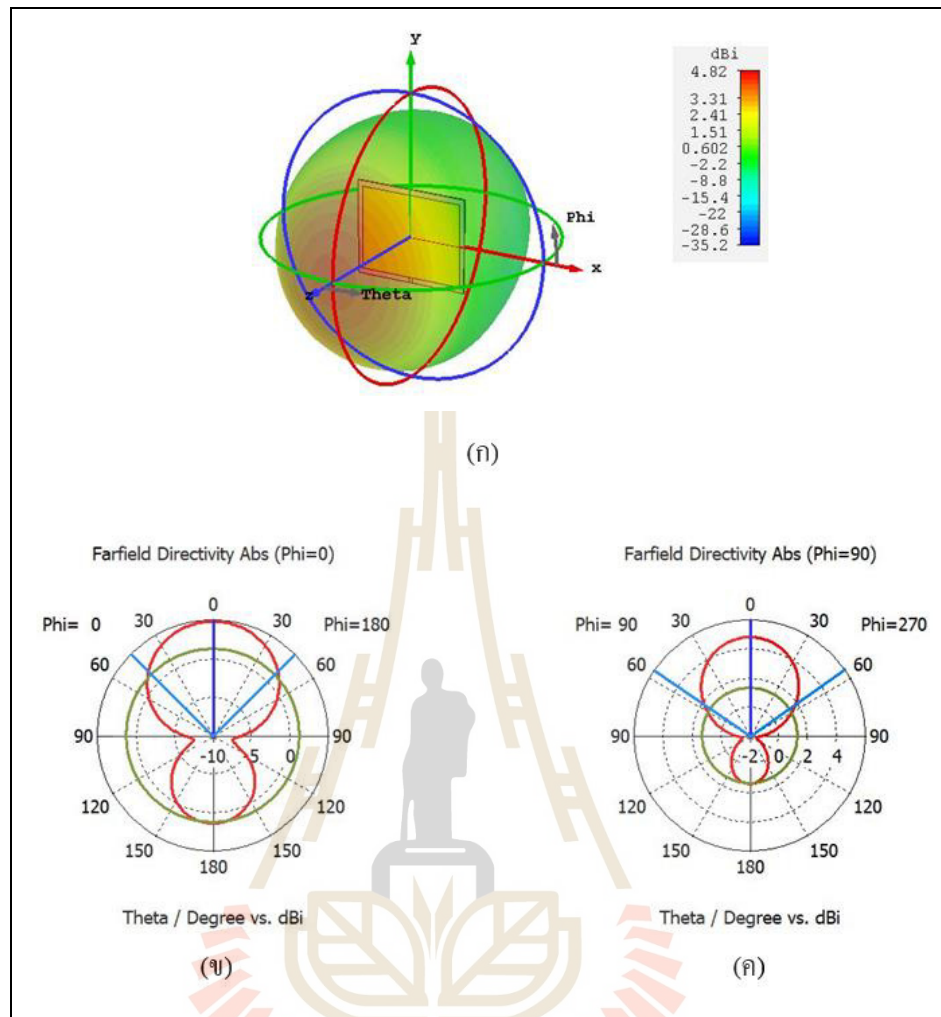
3.3.2 แบบรูปการแผ่พลังงาน

เมื่อออกแบบโครงสร้างสายอากาศในระนาบ $x-y$ ซึ่งสายอากาศจะมีการแผ่พลังงานในทิศทาง z ในการพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศจะต้องวัดผลในบริเวณสนามไกล โดยการแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานมักจะทำการนอร์มัลไลซ์ค่าที่วัดได้ทั้งหมดในทุกทิศทางด้วยค่าสูงสุดที่วัดได้และพล็อตแบบรูปในหน่วย dBi จะได้แบบรูปที่อยู่ในลักษณะสองมิติหรือสามมิติ ซึ่งแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติเกิดจากการพล็อตค่าของกำลังที่สายอากาศรับได้ในแต่ละระนาบที่กำหนดแล้วนำมาพล็อตรวมกัน และแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 2 มิติของกำลังที่สายอากาศรับได้ใน 2 ระนาบคือระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ซึ่งเป็นระนาบที่ขนานกับเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่กำหนดให้คงที่มุม θ ไว้ที่ 90 องศาแล้วเปลี่ยนค่ามุม θ ตั้งแต่ 0-180 องศา โดยอยู่ในระนาบ $x-z$ อีกระนาบหนึ่งคือระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ซึ่งเป็นระนาบที่ขนานกับเวกเตอร์สนามแม่เหล็กที่กำหนดให้คงที่มุม θ ไว้ที่ 90 องศาแล้วเปลี่ยนค่ามุม θ ตั้งแต่ 0-360 องศา โดยอยู่ในระนาบ $y-z$ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

เมื่อจำลองแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปและวัสดุแบบรูปการแผ่พลังงาน พบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติที่มีอัตราขยายเท่ากับ 4.82 dBi ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ก) และแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 2 มิติที่ประกอบด้วยแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ข) และแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ค)



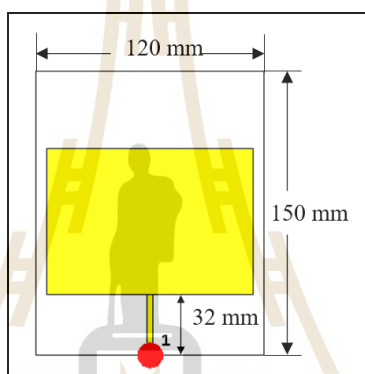
รูปที่ 3.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก



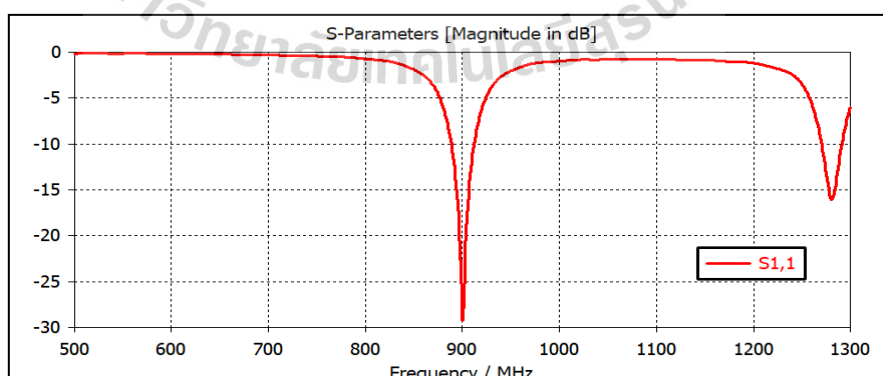
รูปที่ 3.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ได้จากการคำนวณ โดยดูจากแบบที่ความถี่ใช้งาน 900 MHz
 (ก) แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ
 (ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า
 (ค) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

จะเห็นว่า เมื่อจำลองแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 3.2 สายอากาศไม่ได้ทำงานที่ความถี่ใช้งาน 900 MHz และมีอัตราขยายเท่ากับ 4.82 dBi ซึ่งมีอัตราขยายมากกว่าสายอากาศโมโนโพลที่มีอัตราขยาย 2 dBi และเป็นสายอากาศเดิมที่ใช้งานร่วมกับระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้แถบความถี่แคบ แต่แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กมีระดับของพูหลัง

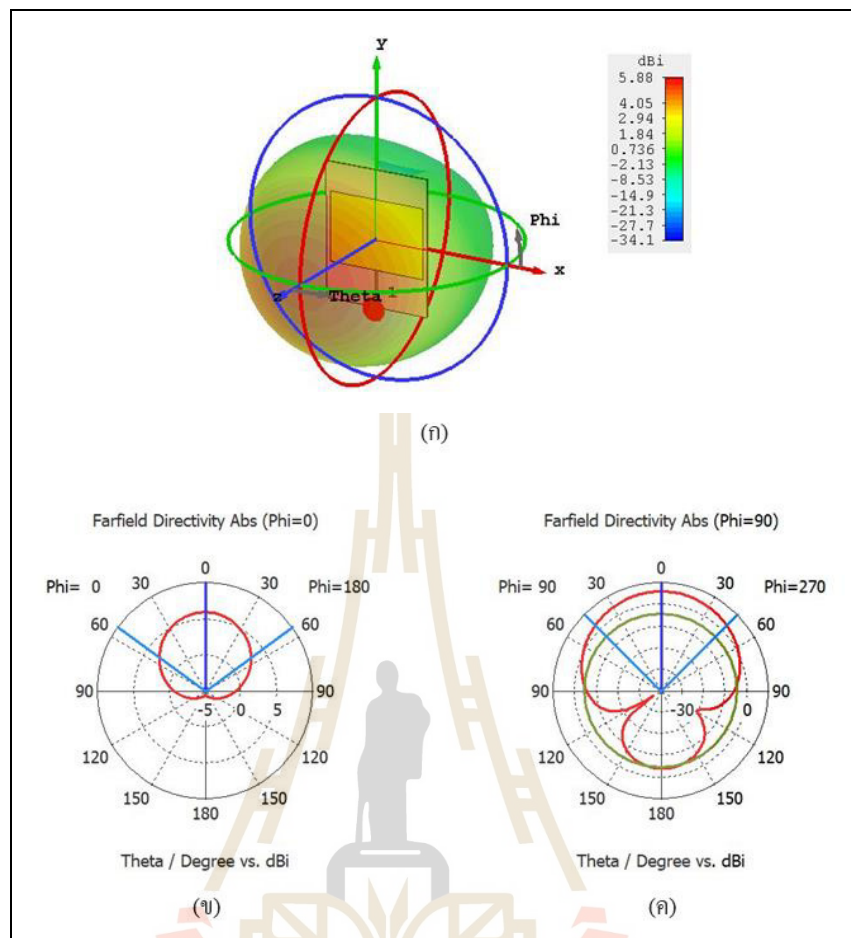
ที่สูง ซึ่งไม่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ที่ต้องการสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานที่มีทิศทางที่ชัดเจนจึงต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์และจำลองแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป โดยศึกษาการปรับขนาดของระนาบกราวด์ ซึ่งส่งผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ รวมถึงการปรับความยาวของสายส่งไมโครสตริป ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ โดยมีการปรับขนาดความกว้างและความยาวของระนาบกราวด์เป็น 120 และ 150 มิลลิเมตรตามลำดับและปรับความยาวของสายส่งไมโครสตริปเป็น 32 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 3.6 จากนั้นทำการวัดผลค่าการสูญเสียย้อนกลับและแบบรูปการแผ่พลังงาน เพื่อให้สายอากาศทำงานที่ความถี่ใช้งาน 900 MHz และสามารถแผ่พลังงานได้



รูปที่ 3.6 แบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่ปรับระนาบกราวด์และสายส่งไมโครสตริป ทำงานที่ความถี่ 900 MHz



รูปที่ 3.7 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของแบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่ปรับระนาบกราวด์และสายส่งไมโครสตริปทำงานที่ความถี่ 900 MHz



รูปที่ 3.8 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป
 ที่ปรับระนาบกราด์และสายส่งไมโครสตริป ทำงานที่ความถี่ 900 MHz
 (ก) แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ
 (ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า
 (ค) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

เมื่อปรับความยาวของสายส่ง ทำให้การสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการไม่แมตซ์กันระหว่างสายส่งและสายอากาศมีค่าลดลง กล่าวคือเมื่อจำลองแบบและวัดผลการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศพบว่าเกิดการแมตซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งและสายอากาศทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ 900 MHz โดยมีค่าการสูญเสียย้อนกลับประมาณ -29 dB ซึ่งกระแสไฟฟ้าสามารถไหลได้สูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ทำให้พลังงานถูกแผ่ออกมาดังนั้นอัตราขยายจึงเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ 892 ถึง 908 MHz ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งไม่

เพียงพอต่อการใช้งานในระบบ โครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบที่ครอบคลุม ช่วงความถี่ 880 ถึง 915 MHz และเมื่อปรับขนาดของระนาบกราวด์จะส่งผลต่อทิศทางของลำคลื่นหลักให้มีทิศทางที่แน่นอนดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ก) ซึ่งเป็นแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติที่มี อัตราขยายเท่ากับ 5.88 dBi นอกจากนี้ในรูปที่ 3.8 (ข) และ 3.8 (ค) จะแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 2 มิติที่ประกอบด้วยแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก จะเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้ามีระดับพหุหลังที่ลดลง แต่แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กยังมีระดับพหุหลังที่สูง เนื่องจากการปรับขนาดระนาบกราวด์ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับพารามิเตอร์อื่น ๆ เพื่อศึกษาการเพิ่มอัตราขยายให้เพียงพอต่อการใช้งานและลดกำลังของพหุหลังในหัวข้อถัดไป

3.4 การปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศ

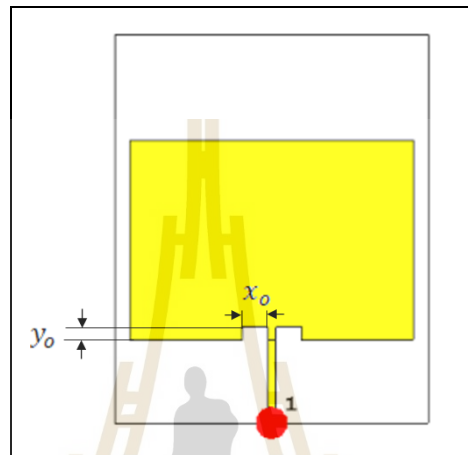
จากการคำนวณเพื่อออกแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปและทำการปรับขนาดของระนาบกราวด์รวมถึงความยาวของสายส่งแบบไมโครสตริปดังแสดงในหัวข้อ 3.3 จะเห็นว่าสายอากาศทำงานที่ความถี่ใช้งาน 900 MHz แต่ยังมีอัตราขยายต่ำ จึงมีการศึกษาวิธีการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศและความกว้างแถบความถี่ โดยจะศึกษาผลกระทบจากการป้อนสัญญาณแบบอินเซต การเจาะร่องและการเพิ่มตัวสะท้อน

3.4.1 การศึกษาผลกระทบจากการป้อนสัญญาณแบบอินเซต

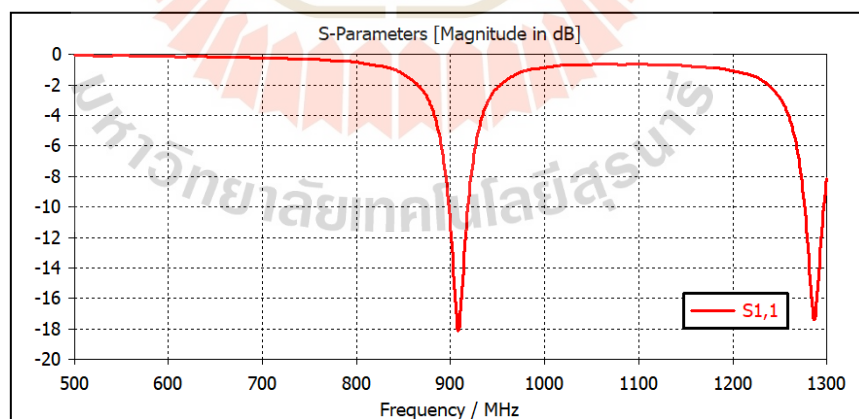
การย้ายจุดป้อนสัญญาณแบบอินเซต (inset feed) เป็นวิธีการแมตซ์อินพีแดนซ์เพื่อเพิ่มความกว้างแถบความถี่และอัตราขยายของสายอากาศ โดยความกว้างของจุดป้อนสัญญาณ (x_0) จะประมาณค่าโดยใช้ขั้นตอนใน Balanis, C. A., 2016 ซึ่งความกว้างของจุดป้อนสัญญาณนั้น จะถูกกำหนดผ่านการจำลองเชิงตัวเลข โดยจะเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนของความกว้างของสายส่งไมโครสตริป ดังเช่น $0.1W_f, 0.2W_f, 0.5W_f, 2W_f, 3W_f, 4W_f$ เป็นต้น (Matin, M. S. et al., 2010) และความยาวของจุดป้อนสัญญาณแบบอินเซตจะขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ลักษณะของสายส่งสัญญาณ สามารถคำนวณจากสมการที่ 3.13 (Islam M. S. et al., 2018)

$$y_0 = \frac{L_p}{\pi} \cos^{-1} \sqrt{\frac{Z_0}{R_{in}}} \quad (3.13)$$

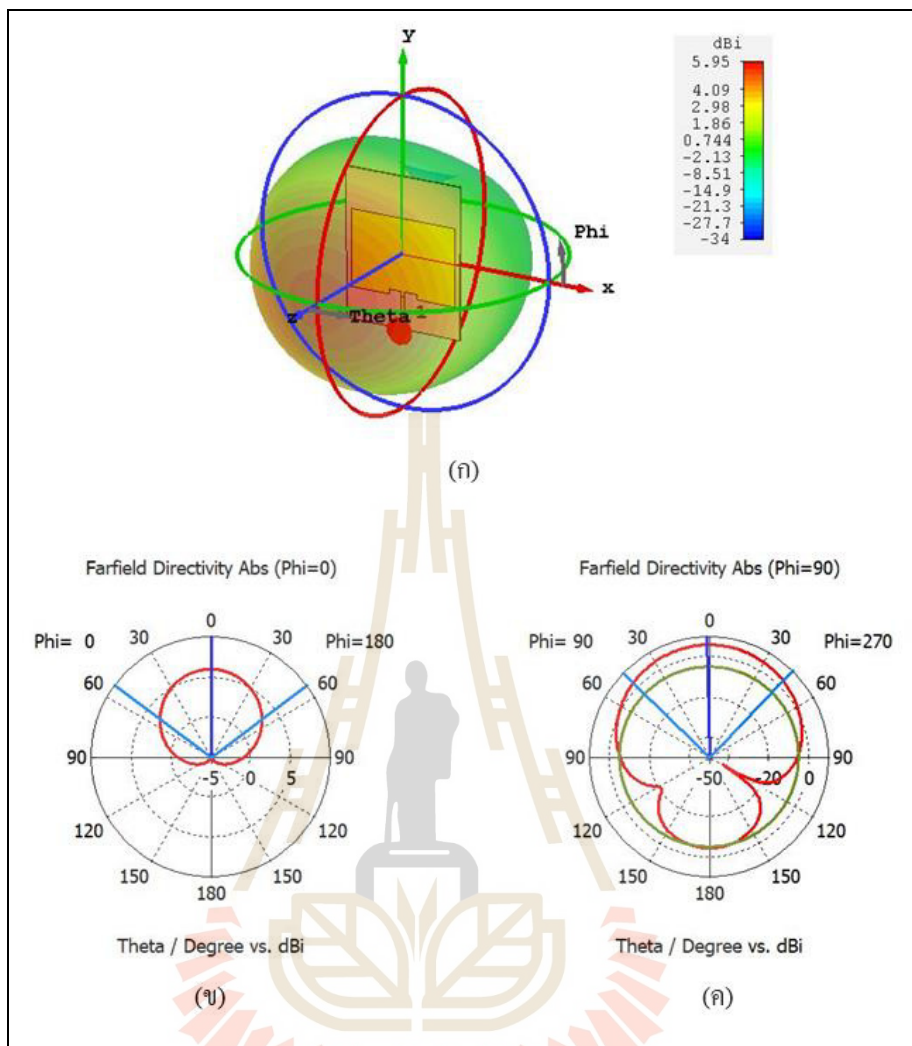
- โดยที่ y_0 คือ ความยาวของจุดป้อนสัญญาณอินเซต
 L_p คือ ความยาวของแผ่นพิมพ์
 Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ
 R_m คือ ความต้านทานของสัญญาณขาเข้า



รูปที่ 3.9 แบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป
เมื่อป้อนสัญญาณแบบอินเซต



รูปที่ 3.10 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของแบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบ
ไมโครสตริป เมื่อป้อนสัญญาณแบบอินเซต



รูปที่ 3.11 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เมื่อป้อนสัญญาณแบบอินเซต

(ก) แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ

(ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

(ค) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

เมื่อจำลองแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปซึ่งป้อนสัญญาณแบบอินเซต โดยปรับความกว้างของจุดป้อนสัญญาณแบบอินเซต (x_0) 10 มิลลิเมตรและความยาวของจุดป้อนสัญญาณแบบอินเซต (y_0) เป็น 5 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าการย้ายจุดป้อนสัญญาณแบบอินเซตจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนไปอยู่ที่ 908 MHz

ซึ่งมีค่าการสูญเสียย้อนกลับประมาณ -18 dB ซึ่งค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ 898 ถึง 918 MHz ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นเป็น 5.95 dBi เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปก่อนการปรับพารามิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ก) แต่ยังไม่เพียงพอต่อการใช้งานจึงต้องมีการศึกษาผลกระทบจากการเจาะร่องในหัวข้อถัดไป และจะเห็นว่าเมื่อป้อนสัญญาณแบบอินเซตจะทำให้ส่งผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2 ที่เกิดขึ้น

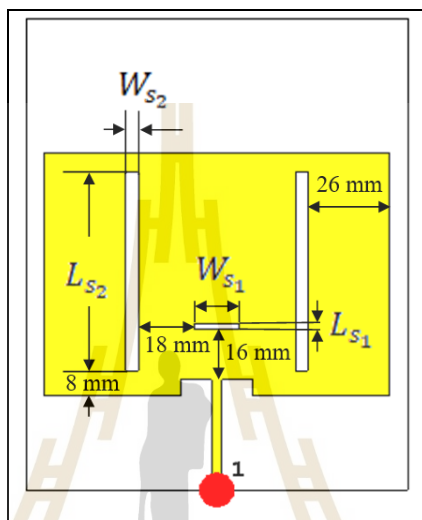
3.4.2 การศึกษาผลกระทบจากการเจาะร่อง

การเจาะร่อง (slot) บนแผ่นพิมพ์ มีข้อดีคือทำให้ความกว้างแถบความถี่ใช้งานค่อนข้างกว้างขึ้น มีความกว้างลำคลื่นกว้างขึ้น ระดับโวลทิจที่ต่ำ รวมถึงสามารถออกแบบและสร้างได้ง่ายบนแผ่นพิมพ์ (Samah, K. et al., 2015)

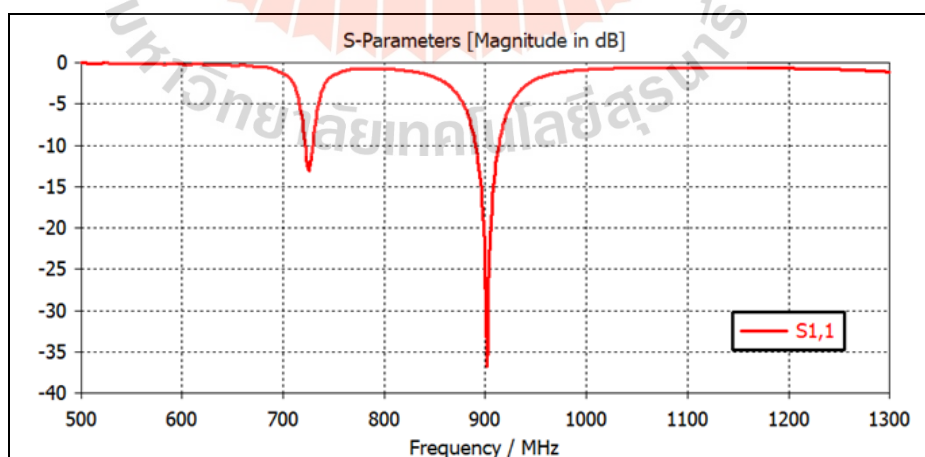
โดยศึกษาการเจาะร่องในแนวนอนบนแผ่นพิมพ์ พบว่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ 1 จะเลื่อนไปใกล้เคียงกับความถี่ที่ต้องการใช้งานและความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2 อยู่ในระดับที่ไม่ส่งผลต่อการใช้งาน แต่การเจาะร่องในแนวนอนนั้นทำให้อัตราขยายของสายอากาศลดลง จึงต้องทำการศึกษาการเจาะร่องในแนวตั้ง ซึ่งพบว่าสายอากาศยังทำงานที่ความถี่ใช้งาน 900 MHz และมีอัตราขยายเพิ่มขึ้น และเมื่อนำการศึกษาการเจาะร่องทั้งสองลักษณะมาจำลองแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปโดยมีการเจาะร่องบนแผ่นพิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยปรับความกว้างและความยาวของการเจาะร่องดังแสดงในตารางที่ 3.3 จะเห็นว่าเกิดความถี่เรโซแนนซ์ทำงานที่ความถี่ 901 MHz ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ที่ต้องการใช้งาน โดยมีค่าการสูญเสียย้อนกลับประมาณ -36.8 dB และค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ 890 ถึง 913 MHz ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสามมิติ ซึ่งมีอัตราขยายใกล้เคียงกับการจำลองแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปก่อนการเจาะร่องดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ก) ดังนั้นการเจาะร่องบนแผ่นพิมพ์ทำให้สายอากาศทำงานที่ความถี่ใช้งานและลดผลกระทบของความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2 ต่อความถี่การใช้งาน แต่ระดับพูลังของแบบรูปการแผ่พลังงานมีค่าสูง ไม่เหมาะสมต่อการใช้งานที่ต้องการสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบทิศทาง โดยแผ่ไปในทิศทางเดียวจึงต้องมีการเพิ่มตัวสะท้อน ซึ่งจะศึกษาในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ขนาดการเจาะร่องบนแผ่นพิมพ์ของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป

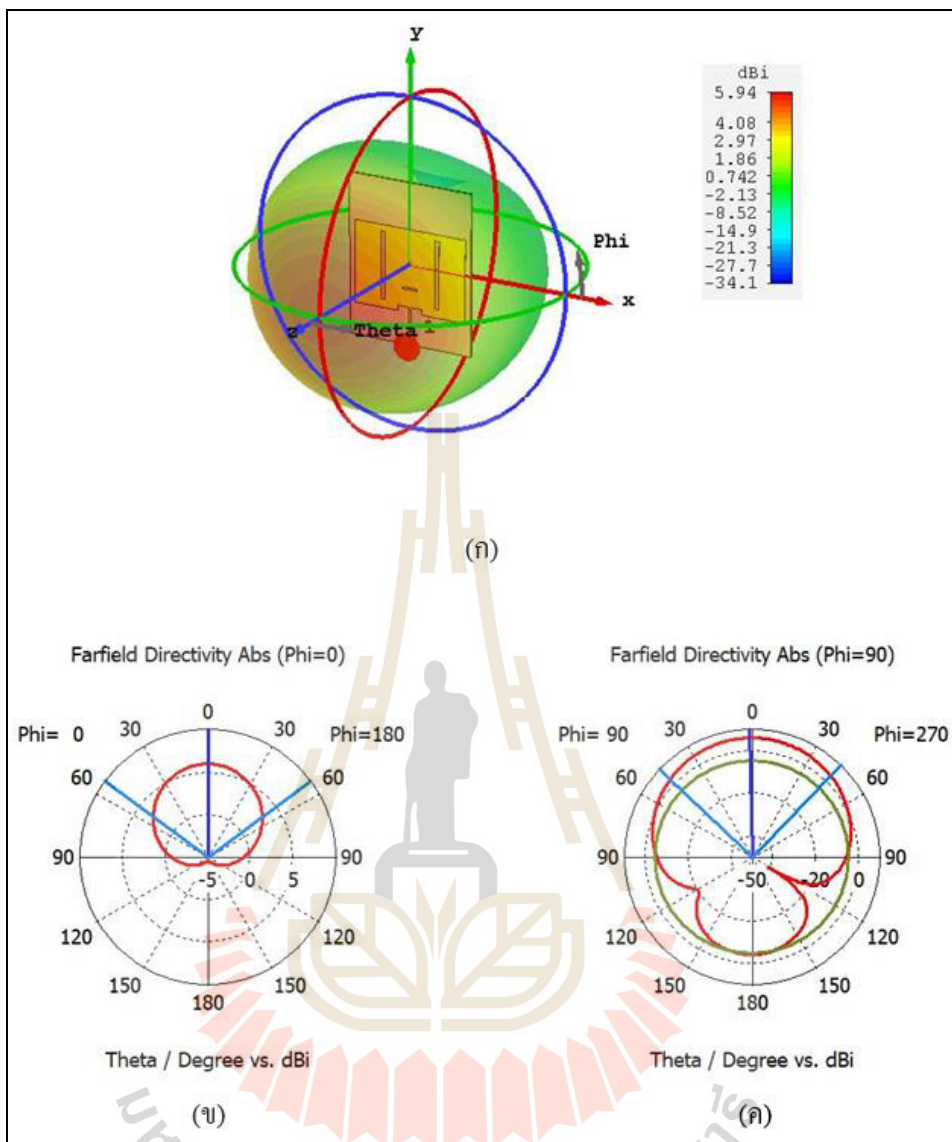
พารามิเตอร์	W_{S_1}	L_{S_1}	W_{S_2}	L_{S_2}
ขนาด (mm)	14	2	4	63



รูปที่ 3.12 แบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เมื่อมีการเจาะร่องบนแผ่นพิมพ์



รูปที่ 3.13 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของแบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เมื่อมีการเจาะร่องบนแผ่นพิมพ์



รูปที่ 3.14 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป

เมื่อมีการเจาะร่องบนแผ่นพิมพ์

(ก) แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ

(ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

(ค) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

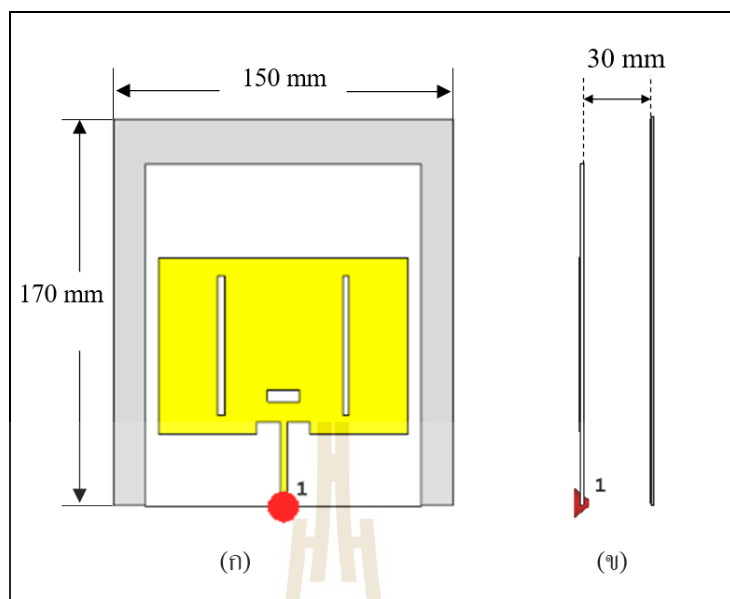
3.4.3 การศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มตัวสะท้อน

วิทยานิพนธ์นี้ต้องการสร้างสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง ซึ่งการศึกษาที่ผ่านมาในระดับพหุหลังของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางมีค่าสูง ทำให้ไม่สามารถรู้ทิศทางที่สายอากาศแผ่คลื่นไปได้มากที่สุด จึงมีการเพิ่มตัวสะท้อน (reflector) เพื่อให้แบบรูปการแผ่พลังงานแผ่ไปในทิศทางที่ต้องการเพียงทิศทางเดียว

โดยศึกษาผลกระทบของขนาดตัวสะท้อน และระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนที่มีผลต่อระดับพหุหลังและอัตราขยายของสายอากาศ จากนั้นทำการจำลองแบบและวัดผลสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่มีตัวสะท้อน ซึ่งตัวสะท้อนมีขนาดเริ่มต้นเท่ากับขนาดของสายอากาศแผ่นพิมพ์ โดยวัสดุที่ใช้เป็นตัวสะท้อนคือแผ่นอะลูมิเนียมหนา 1 มิลลิเมตร พบว่าระดับพหุหลังยังอยู่ในระดับที่สูง จึงทำการปรับขนาดตัวสะท้อนจนมีความกว้างและความยาวเท่ากับ 150 และ 170 มิลลิเมตรตามลำดับ และมีระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนประมาณ 30 มิลลิเมตร พบว่ามีระดับพหุหลังลดลงแต่ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนตำแหน่ง จึงทำการปรับการเจาะร่องบนแผ่นพิมพ์เพื่อแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โดยปรับความกว้างและความยาวของการเจาะร่องดังแสดงในตารางที่ 3.4 และจำลองแบบและวัดผลสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.15 จะเห็นว่าเกิดความถี่เรโซแนนซ์ทำงานที่ความถี่ประมาณ 900 MHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -28 dB และค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ 893 ถึง 916 MHz ดังแสดงในรูปที่ 3.16 โดยมีแบบรูปการแผ่พลังงานไปในทิศทางเดียวโดยมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นเป็น 7.23 dBi ดังแสดงในรูปที่ 3.17 (ก) และแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 2 มิติที่ประกอบด้วยแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.17 (ข) และแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 3.17 (ค) ดังนั้นการเพิ่มตัวสะท้อนทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศมีทิศทางชัดเจนและมีระดับพหุหลังที่ต่ำลง รวมไปถึงมีอัตราขยายสูงขึ้น

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์การปรับขนาดการเจาะร่องบนแผ่นพิมพ์ของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปเมื่อเพิ่มตัวสะท้อน

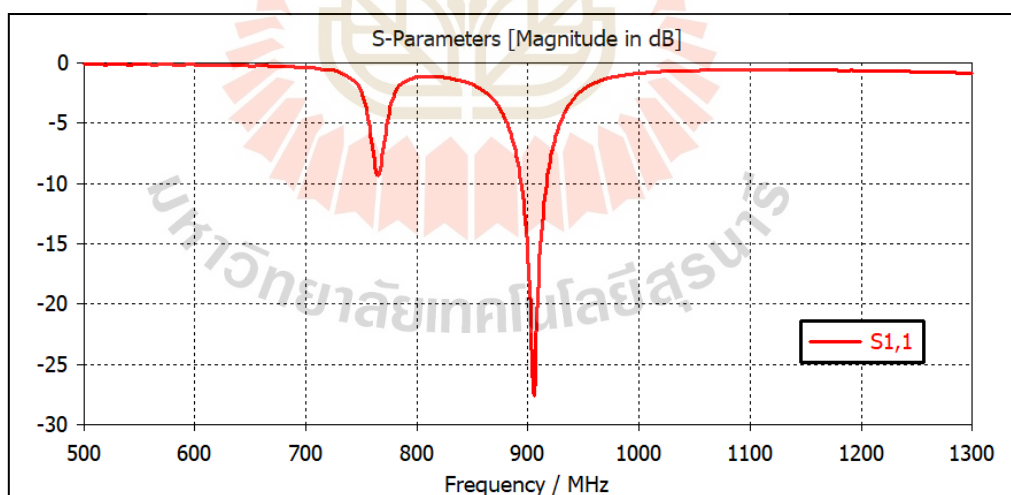
พารามิเตอร์	W_{S_1}	L_{S_1}	W_{S_2}	L_{S_2}
ขนาด (mm)	14	5	3	61



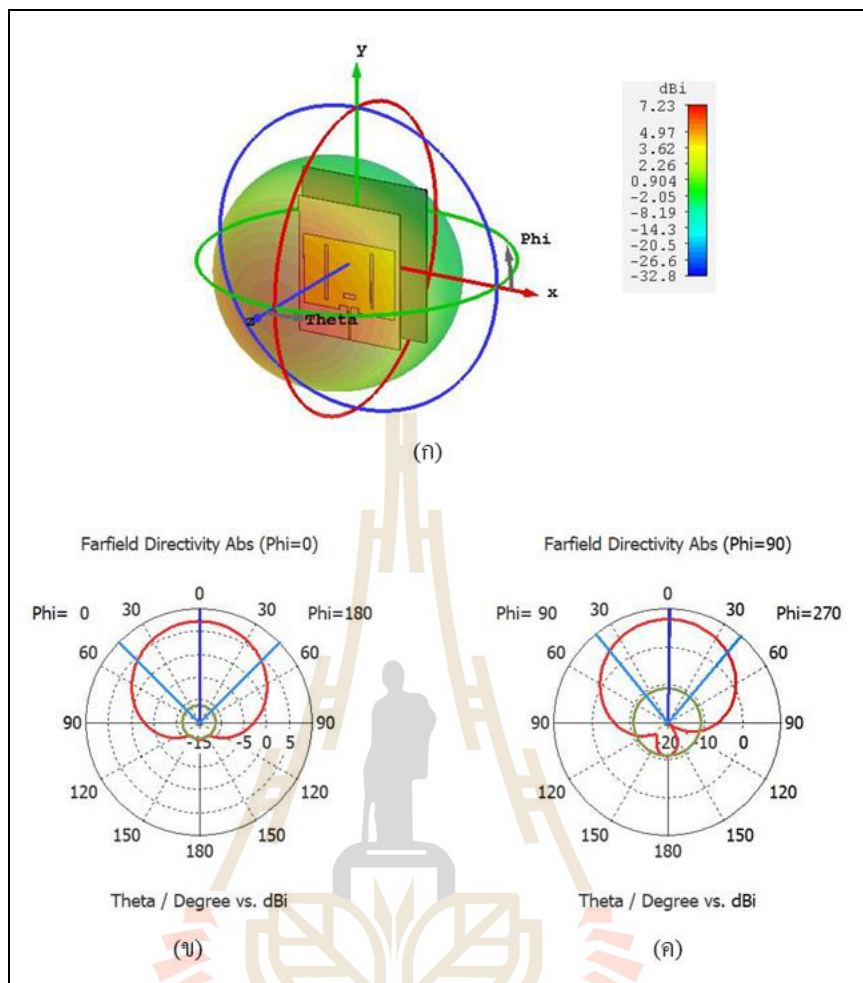
รูปที่ 3.15 แบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เมื่อเพิ่มตัวสะท้อน

(ก) แบบจำลองสายอากาศด้านหน้า

(ข) แบบจำลองสายอากาศด้านข้าง



รูปที่ 3.16 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของแบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เมื่อเพิ่มตัวสะท้อน



รูปที่ 3.17 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เมื่อเพิ่มตัวสะท้อน

(ก) แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ

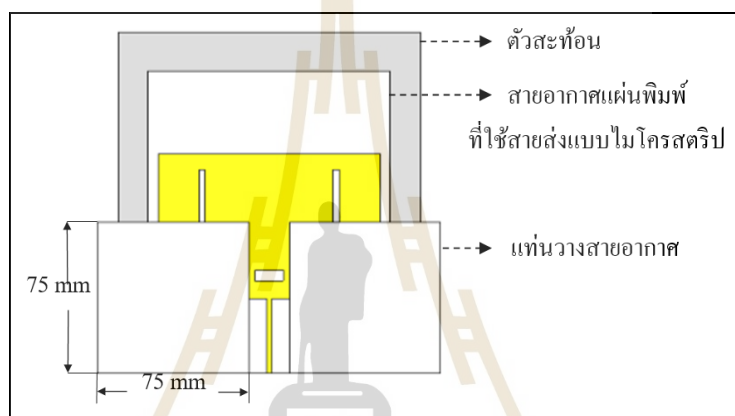
(ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า

(ค) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

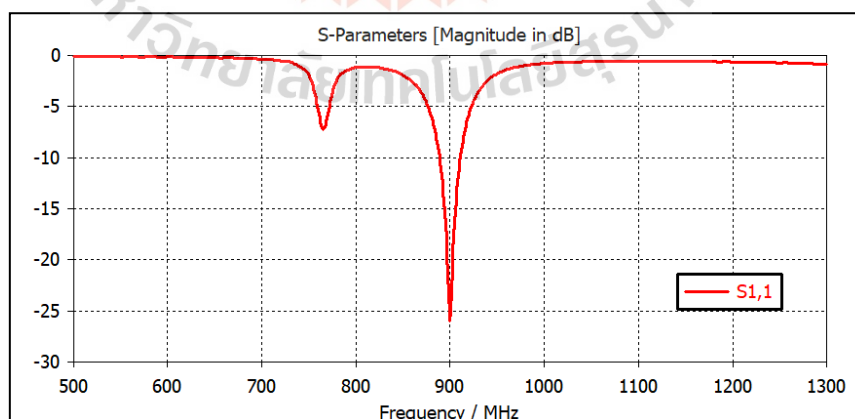
3.5 การจำลองแบบการใช้งานสายอากาศร่วมกับแท่นวางสายอากาศ

การออกแบบสายอากาศต้องคำนึงถึงการนำไปใช้งาน ซึ่งสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปนี้จะนำไปใช้งานร่วมกับมอดูลโครงข่ายสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ จึงต้องมีแท่นวางสายอากาศเพื่อความสะดวกในการใช้งาน ดังนั้นจะทำการจำลองแบบสายอากาศร่วมกับแท่นวางสายอากาศ เพื่อดูผลกระทบของวัสดุที่ใช้ในการทำแท่นวางที่มีต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับและแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

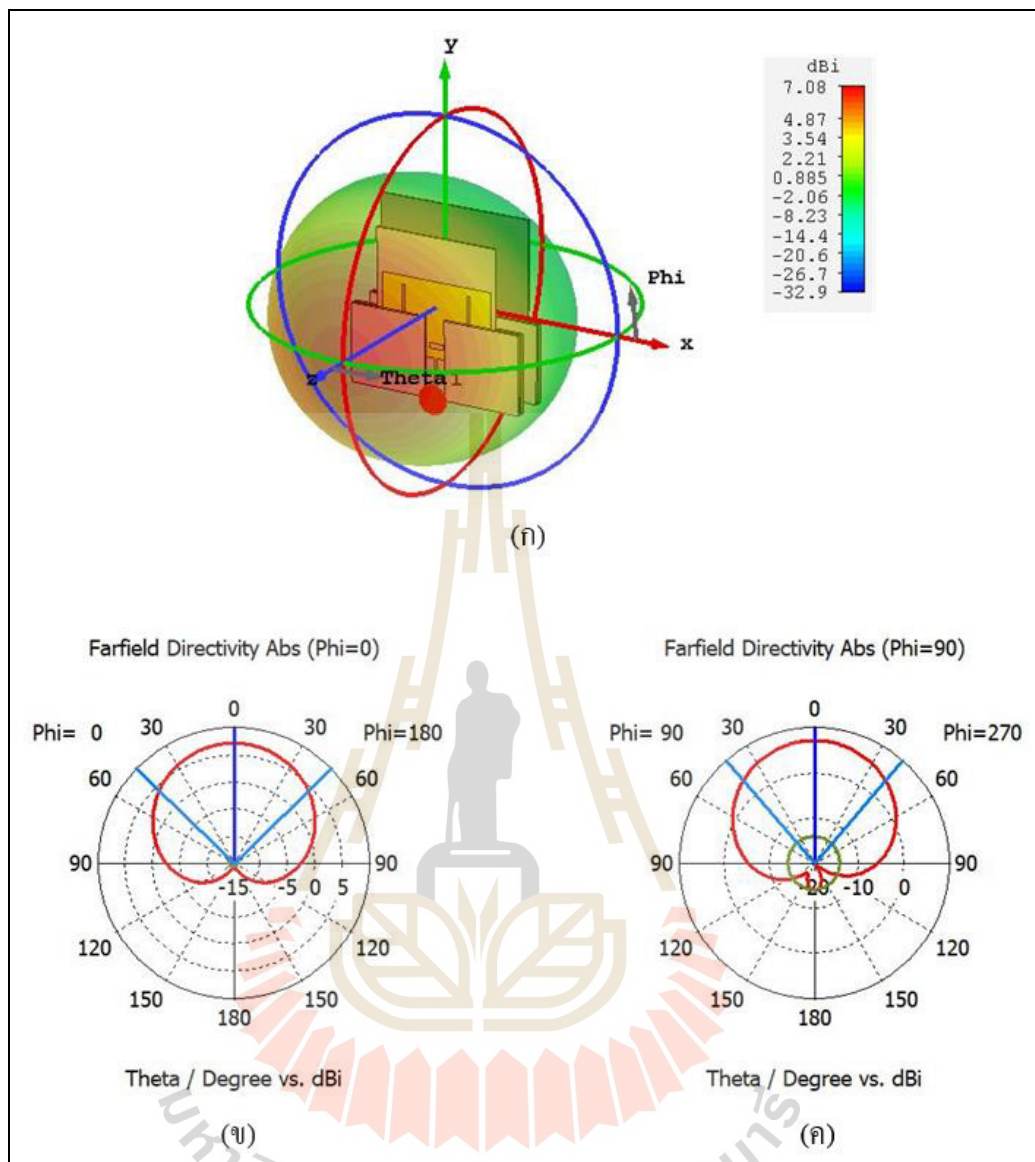
โดยศึกษาวัสดุที่ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับและแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ซึ่งวัสดุนั้นจะต้องมีคุณสมบัติเป็นวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า แข็งแรง ทนทาน ง่ายต่อการนำไปใช้งานและมีราคาถูก โดยวัสดุที่ใช้เป็นแท่นวางสายอากาศคือแผ่นอะคริลิกที่มีความหนา 3 มิลลิเมตรและออกแบบให้มีความกว้าง 75 มิลลิเมตรและความยาว 75 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถรองรับขนาดและน้ำหนักของสายอากาศได้ และไม่กระทบต่อการป้อนสัญญาณของสายอากาศต่อมาทำการจำลองแบบและวัดผลสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่มีตัวสะท้อนและแท่นวางสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่มีตัวสะท้อนและแท่นวางสายอากาศ



รูปที่ 3.19 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของแบบจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่มีตัวสะท้อนและแท่นวางสายอากาศ



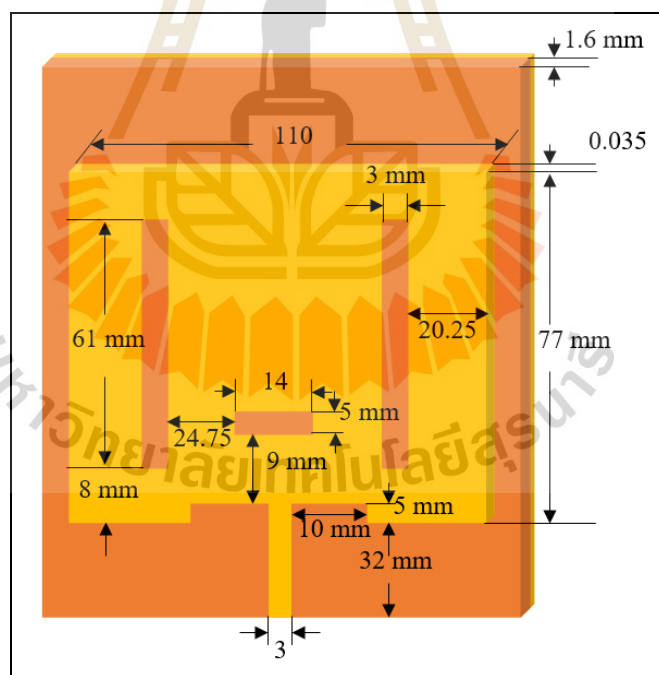
รูปที่ 3.20 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป ที่มีตัวสะท้อนและแทนวงสายอากาศ
 (ก) แบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 3 มิติ
 (ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า
 (ค) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

จะเห็นว่าสายอากาศยังคงทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ประมาณ 900 MHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -26 dB และค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ 880 ถึง 915 MHz ดังแสดงในรูปที่ 3.19 รวมทั้งมีแบบรูปการแผ่พลังงานไปในทิศทางเดียวโดยมีอัตราขยาย

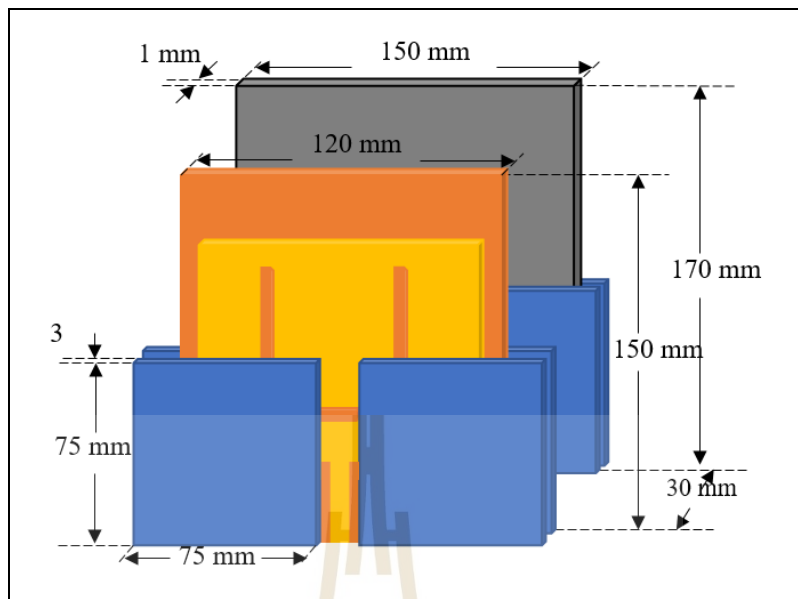
เป็น 7.08 dBi ดังแสดงในรูปที่ 3.20 (ก) และแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ 2 มิติที่ประกอบด้วยแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 3.20 (ข) และ 3.20 (ค) ตามลำดับ ดังนั้นการจำลองแบบสายอากาศที่ใช้แทนวงสายอากาศทำให้มีอัตราขยายลดลงเมื่อเทียบกับอัตราขยายก่อนการจำลองแบบร่วมกับแทนวงสายอากาศ แต่เหมาะสมกับการใช้งานในงานวิจัย

3.6 ภาพรวมของสายอากาศที่ออกแบบ

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปทำงานที่ความถี่ 900 MHz เพื่อใช้งานร่วมกับระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ จึงได้ทำการจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป รวมถึงศึกษาผลกระทบจากการป้อนสัญญาณแบบอินเซต การเจาะร่อง การเพิ่มตัวสะท้อนและการใส่แทนวงสายอากาศโดยแบบจำลองสายอากาศจะจำลองและวัดผลด้วยโปรแกรม CST Microwave studio



รูปที่ 3.21 ขนาดของโครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป โดยมีการป้อนสัญญาณแบบอินเซตและการเจาะร่อง



รูปที่ 3.22 ขนาดของ โครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป
โดยมีการเพิ่มตัวสะท้อนและแทนวางสายอากาศ

รูปที่ 3.21 แสดง โครงสร้างของสายอากาศที่ประกอบด้วยแผ่นพิมพ์โดยใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่มีวัสดุฐานรอง FR-4 และระนาบกราวด์ โดยมีการป้อนสัญญาณแบบอินเซตเพื่อทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และทำการเจาะร่องทั้งแบบแนวนอนและแนวตั้งเพื่อทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศรวมถึงเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ ซึ่งจากการจำลองแบบสายอากาศจะพบว่าสายอากาศเกิดความถี่เรโซแนนซ์ทำงานที่ความถี่ 900 MHz มีอัตราขยายประมาณ 5.95 dBi และมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางแต่มีกำลังของพูหลังที่มีค่ามาก จึงทำให้ไม่สามารถระบุทิศทางการแผ่พลังงานที่ชัดเจนได้ ดังนั้นจึงมีการเพิ่มตัวสะท้อนเพื่อแก้ปัญหาระดับกำลังของพูหลัง

ต่อมาในรูปที่ 3.22 แสดง โครงสร้างสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป โดยมีการเพิ่มตัวสะท้อนซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่นด้านหลัง ทำจากวัสดุที่เป็นอะลูมิเนียมมีความหนา 1 มิลลิเมตร และได้ทำการปรับขนาดและศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างสายอากาศกับตัวสะท้อนซึ่งจะห่างกัน 30 มิลลิเมตรเพื่อให้สามารถใช้งานกับสายอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะกับการใช้งาน ซึ่งจากการจำลองแบบพบว่าสายอากาศเกิดความถี่เรโซแนนซ์ทำงานที่ความถี่ 900 MHz มีอัตราขยายเพิ่มขึ้นเป็น 7.23 dBi และมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางที่ชัดเจน

นอกจากนี้ยังออกแบบ โครงสร้างของแท่นวางสายอากาศเพื่อจำลองสายอากาศโดยรวมที่จะใช้งานร่วมกับ โครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ โดยแท่นวางสายอากาศ ทำจากแผ่นอะคริลิกที่มีความหนา 3 มิลลิเมตรและมีการจัดวางที่สมมาตรเพื่อให้สายอากาศทำงาน ได้สะดวกมากขึ้นและไม่ส่งผลกระทบต่อ การป้อนสัญญาณและการแผ่พลังงาน โดยเมื่อทำการ จำลองแบบสายอากาศที่มีทั้งตัวสะท้อนและแท่นวางสายอากาศจะพบว่าสายอากาศทำงานที่ความถี่ 900 MHz ครอบคลุมช่วงความถี่ 880 ถึง 915 MHz โดยมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางที่ ชัดเจนและมีอัตราขยาย 7.08 dBi ซึ่งมากกว่าสายอากาศแบบ โมโนโพลและเหมาะสมกับการใช้งาน ร่วมกับระบบ โครงข่ายสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ

3.7 กล่าวสรุป

จากเนื้อหาที่กล่าวมาข้างต้นในบทนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอนการออกแบบ การจำลองแบบและการปรับพารามิเตอร์ของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป โดยใช้โปรแกรม CST Microwave studio ซึ่งผลการจำลองจะเห็นว่าสายอากาศสามารถทำงานที่ความถี่ใช้งาน 900 MHz ครอบคลุมช่วงความถี่ 880 ถึง 915 MHz และมีอัตราขยาย 7.08 dBiโดยมีการใช้จุดป้อน สัญญาณแบบอินเซต การเจาะร่องและเพิ่มตัวสะท้อน โดยผลที่ได้จากการออกแบบนี้จะถูกนำไป สร้างและวัดทดสอบสายอากาศในบทถัดไป

บทที่ 4

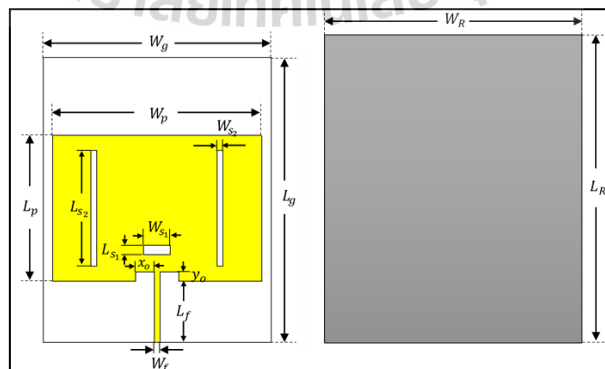
ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

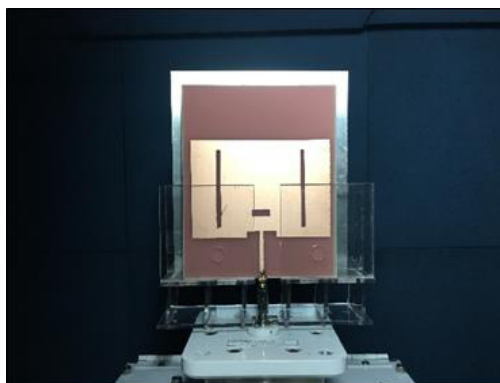
จากการออกแบบและจำลองแบบสายอากาศในบทที่ผ่านมา เนื้อหาในบทนี้จะนำผลการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio มาทำการสร้างสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปตันแบบขึ้น ต่อมาวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ค่าการสูญเสียย้อนกลับแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก และอัตราขยาย โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) จากนั้นเปรียบเทียบผลการจำลองแบบกับผลการวัดทดสอบวิเคราะห์และอภิปรายผล

4.2 การสร้างสายอากาศ

ขั้นตอนในการสร้างสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปจะกัคล้ายวงจรตามแบบจำลองสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยมีโครงสร้างและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดขนาดของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 4.1 และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สร้างสายอากาศแสดงในตารางที่ 4.1 โดยที่สายอากาศสร้างจากแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board: PCB) ใช้วัสดุฐานรองชนิด FR-4 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกเท่ากับ 4.3 และมีความหนา 1.6 มิลลิเมตร และวัสดุที่ใช้เป็นตัวสะท้อนคือแผ่นอะลูมิเนียมหนา 1 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป



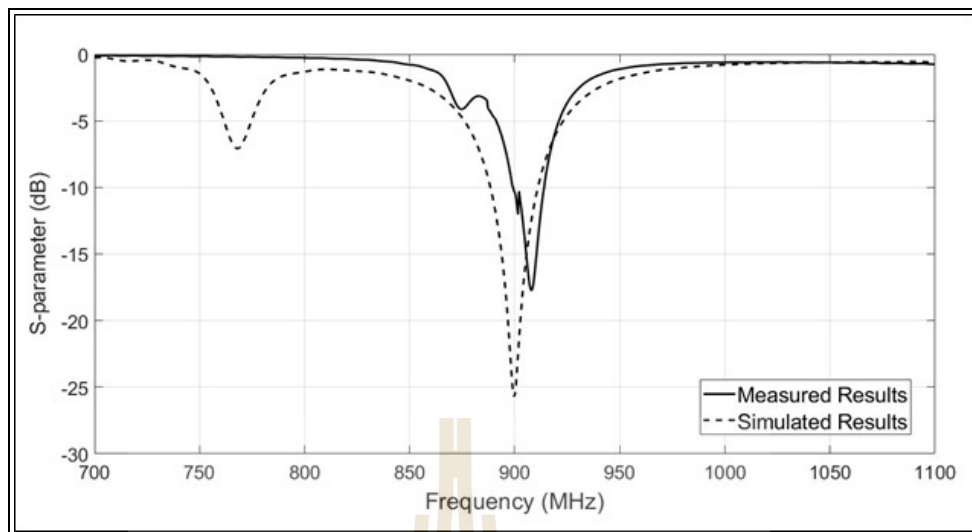
รูปที่ 4.2 ต้นแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สร้างสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป

พารามิเตอร์ของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป	ขนาดของพารามิเตอร์ (มิลลิเมตร)
ความกว้างของแผ่นพิมพ์ (W_p)	110
ความยาวของแผ่นพิมพ์ (L_p)	77
ความกว้างของสายส่งไมโครสตริป (W_f)	3
ความยาวของสายส่งไมโครสตริป (L_f)	32
ความกว้างของระนาบกราวด์ (W_g)	120
ความยาวของระนาบกราวด์ (L_g)	150
ความกว้างของจุดป้อนสัญญาณแบบอินเซต (x_o)	10
ความยาวของจุดป้อนสัญญาณแบบอินเซต (y_o)	5
ความกว้างของการเจาะร่องในแนวนอน (W_{s_1})	14
ความยาวของการเจาะร่องในแนวนอน (L_{s_1})	5
ความกว้างของการเจาะร่องในแนวตั้ง (W_{s_2})	3
ความยาวของการเจาะร่องในแนวตั้ง (L_{s_2})	61
ความกว้างของตัวสะท้อน (W_R)	150
ความยาวของตัวสะท้อน (L_R)	170
ระยะห่างระหว่างแผ่นพิมพ์กับตัวสะท้อน	30

4.3 ผลการวัดทดสอบค่าสูญเสียย้อนกลับ

จากการออกแบบสายอากาศต้นแบบโดยการจำลองแบบสายอากาศในบทที่ 3 ได้ทำการสร้างสายอากาศขึ้นเพื่อใช้งานที่ความถี่ 900 MHz โดยการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริประหว่างผลการจำลองแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio กับผลการวัดทดสอบของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย พบว่าค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากผลการจำลองแบบของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปเกิดความถี่เรโซแนนซ์ทำงานที่ความถี่ 900 MHz ซึ่งมีค่าการสูญเสียย้อนกลับประมาณ -26 dB โดยค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB ทำงานครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 880 ถึง 915 MHz และค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากผลการวัดทดสอบของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปเกิดความถี่เรโซแนนซ์ทำงานที่ความถี่ 908 MHz ซึ่งมีค่าการสูญเสียย้อนกลับประมาณ -17 dB โดยค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB ทำงานครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 898 ถึง 923 MHz ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริประหว่างผลการจำลองแบบกับผลการวัดทดสอบของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่สร้างขึ้น จะเห็นว่าผลการวัดทั้งสองมีผลใกล้เคียงกันซึ่งสามารถทำงานร่วมกับระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบดังแสดงในรูปที่ 4.3 กล่าวคือความกว้างแถบความถี่ของผู้ให้บริการที่สามารถใช้งานได้ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 898 ถึง 915 MHz ซึ่งในระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบจะใช้งานความกว้างแถบความถี่เท่ากับ 180 kHz ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) ของสายอากาศต้นแบบจึงเพียงพอต่อการใช้งาน (สำนักงาน กสทช., แผนความถี่โทรคมนาคม [ออนไลน์]. 2016. แหล่งที่มา: http://nbt.go.th/telecomlaw/telecomlaw_13.aspx?page=3)



รูปที่ 4.3 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป
เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองแบบและผลการวัดทดสอบที่ 900 MHz

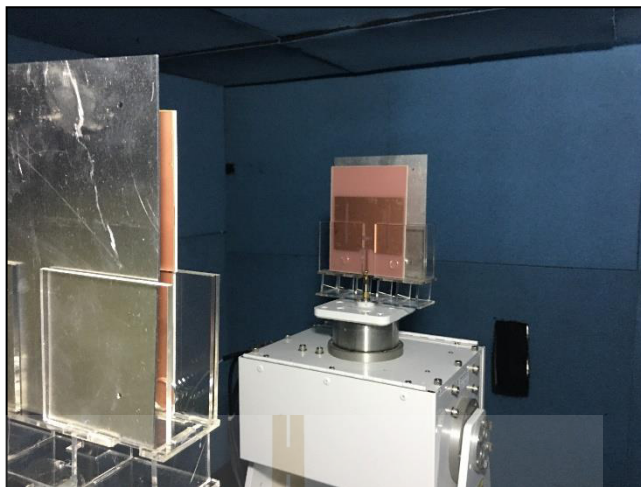
4.4 ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานทำการวัดทดสอบในห้องปฏิบัติการวิเคราะห์โครงข่าย ซึ่งภายในห้องปฏิบัติการจะมีห้องที่มีวัสดุปิดกั้นคลื่นจากภายนอกและลดการสะท้อนของคลื่นภายในห้องได้ โดยในการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานจะวัดทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศในการรับและส่งสัญญาณ ดังนั้นจึงทำการติดตั้งสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปไว้ฝั่งรับและสายอากาศอ้างอิงไว้ฝั่งส่ง จะกำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศภาครับและภาคส่งให้อยู่ในบริเวณสนามไกล สามารถคำนวณได้จาก $R > 2D^2/\lambda$ เมื่อ D คือความยาวของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่ใช้ในการวัดทดสอบผล ซึ่งจะได้ระยะสนามไกลของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปเท่ากับ 0.22 เมตร ในการวัดทดสอบเพื่อให้สะดวกในการติดตั้งสายอากาศจึงกำหนดให้ระยะสนามไกลของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปเท่ากับ 0.3 เมตร ซึ่งในรูปที่ 4.4 แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและในรูปที่ 4.5 แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก ในการวัดทดสอบจะใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่ใช้งานที่ความถี่ 900 MHz เป็นสายอากาศภาคส่ง และจะติดตั้งสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปต้นแบบบนแท่นหมุนที่จะทำการหมุนเพื่อวัดแบบรูปการแผ่พลังงานตั้งแต่มุม 0 องศาถึง 360 องศา โดยจะหมุนวัดค่าทีละ 5 องศา จากนั้นจะนำค่าที่วัดได้มาพล็อตแบบรูปการแผ่

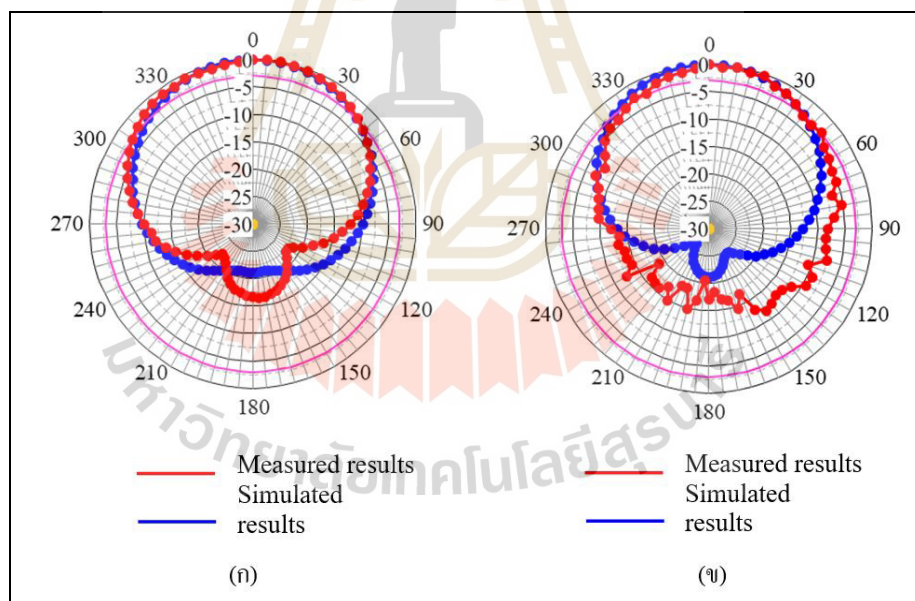
พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยจะเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานจากการจำลองแบบสายอากาศกับแบบรูปการแผ่พลังงานจากการวัดทดสอบ ซึ่งผลการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า จะเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานจากการวัดทดสอบมีพวกลิ้นใหญ่เป็นพู่ของแบบรูปการแผ่พลังงานสูงสุดอยู่ที่มุม 5 องศาหรือด้านหน้าของแผ่นพิมพ์ สำหรับพู่หลังเป็นพู่ของแบบรูปการแผ่พลังงานตรงข้ามกับพวกลิ้นใหญ่อยู่ที่ประมาณ 180 องศา มีลักษณะต่างจากแบบจำลองซึ่งระดับพลังงานของพู่หลังในการวัดทดสอบมีค่ามากกว่าแบบจำลองเนื่องจากขณะวัดทดสอบอาจมีคลื่นสะท้อนภายในห้อง แต่ระดับพู่หลังนี้ไม่มีผลต่อทิศทางกรแผ่พลังงานของคลื่น นอกจากนี้ในระนาบสนามแม่เหล็กจะเห็นว่าผลการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานจากการจำลองแบบกับการวัดทดสอบสายอากาศมีลักษณะใกล้เคียงกัน ซึ่งมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่มีพวกลิ้นใหญ่อยู่ที่มุม 0 องศาไปทางด้านหน้าของแผ่นพิมพ์ โดยที่พู่หลังจะเป็นพวกลิ้นเล็กของแบบรูปที่มีทิศทางกรแผ่พลังงานตรงข้ามกับพวกลิ้นใหญ่ 180 องศา ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านต่ำสุด ดังนั้นเมื่อพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งสองระนาบแล้วจะเห็นว่าสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานมีทิศทางที่ชัดเจนไปทางด้านหน้าของแผ่นพิมพ์ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้งานร่วมกับระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ



รูปที่ 4.4 การติดตั้งสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เพื่อวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.5 การติดตั้งสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เพื่อวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.6 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป ทำงานที่ความถี่ 900 MHz
 (ก) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า
 (ข) แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก

4.5 ผลการวัดทดสอบอัตรายาย

การทดสอบการวัดอัตรายายของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป เป็นวิธีการวัดเพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะและประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยจะใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้งานที่ความถี่ 900 MHz เป็นสายอากาศภาคส่งและสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปซึ่งเป็นสายอากาศต้นแบบเป็นสายอากาศภาครับ แล้วต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับจะอยู่ในบริเวณสนามไกลและสามารถคำนวณหาค่าอัตรายายได้จากสมการพื้นฐานการส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission equation) ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2

$$P_{r,dB} = P_{t,dB} + G_{t,dB} + G_{r,dB} - 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (4.1)$$

หรือ

$$G_{r,dB} = P_{r,dB} - P_{t,dB} - G_{t,dB} + 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (4.2)$$

โดยที่	P_r	คือ กำลังงานจากสายอากาศภาครับ (วัตต์)
	P_t	คือ กำลังงานจากสายอากาศภาคส่ง (วัตต์)
	G_r	คือ อัตรายายของสายอากาศภาครับ
	G_t	คือ อัตรายายของสายอากาศภาคส่ง
	R	คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ (เมตร)
	λ	คือ ความยาวคลื่น (เมตร)

สำหรับสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปนั้นสามารถหาค่าอัตรายายโดยคำนวณจากสมการที่ 4.2 ซึ่งในเทอม $S_{21} = P_{r,dB} - P_{t,dB}$ หมายถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นซึ่งหาได้จากการวัดทดสอบจากการติดตั้งสายอากาศภาครับและด้านหน้าของสายอากาศตรงกับสายอากาศภาคส่งที่มุม 0 องศา โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับจะอยู่ในบริเวณสนามไกลเป็นระยะ 0.3 เมตรและเทอม $20 \log(4\pi R/\lambda)$ หมายถึงตัวประกอบการสูญเสียที่เกิดจากการส่งกำลังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอวกาศว่าง ซึ่งระยะทาง R ส่งผลต่อกำลังที่สายอากาศได้รับซึ่งจะได้ค่าอัตรายายของสายอากาศต้นแบบมากกว่าสายอากาศโมโนโพลที่เป็นสายอากาศเดิมของระบบ โครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ กล่าวคือสายอากาศต้นแบบเป็นสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางที่ชัดเจน จึงมีอัตรายายของสายอากาศที่มากกว่า

สายอากาศโมโนโพลที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ดังนั้นสามารถสรุปคุณสมบัติของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปคุณลักษณะของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป

พารามิเตอร์	ความถี่ 90MHz
ย่านความถี่ใช้งาน (MHz)	898-923
อัตรายขยาย (dBi)	2.3
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (degree)	80
อิมพีแดนซ์ (ohm)	49

4.6 กล่าวสรุป

ในบทนี้อธิบายถึงการสร้างและการวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่มีการป้อนสัญญาณแบบอินเซต การเจาะร่องและการเพิ่มตัวสะท้อน โดยจะเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบกับการจำลองแบบสายอากาศ โดยพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับ แบบรูปการแผ่พลังงานและอัตรายขยาย ซึ่งผลการจำลองแบบและการวัดทดสอบมีความสอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เหมาะกับการนำไปใช้งานร่วมกับระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ

บทที่ 5

การทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ

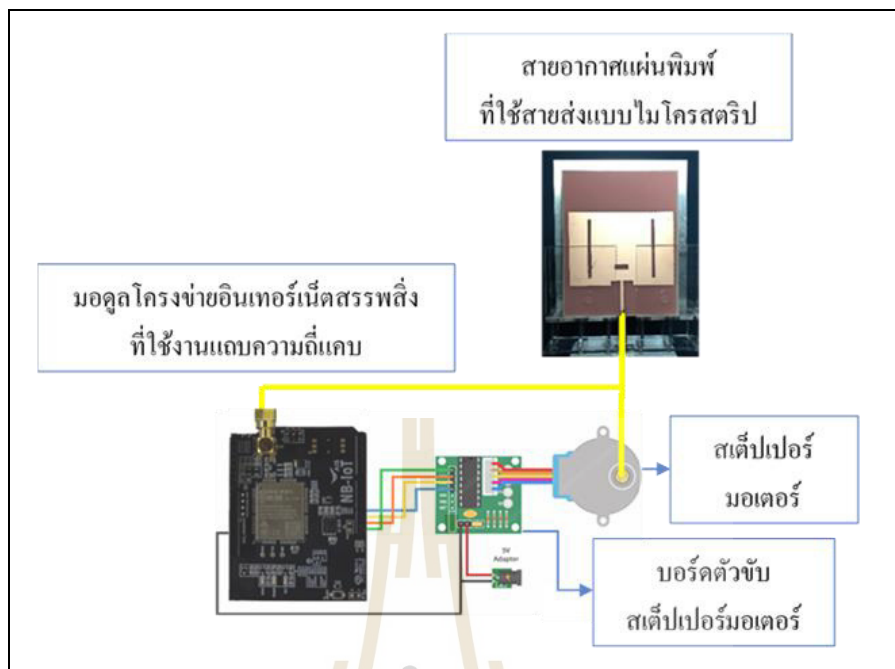
5.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของมอเตอร์โครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับส่งข้อมูลและส่งค่าข้อมูลไปยังผู้ให้บริการ รวมถึงอธิบายการเชื่อมต่อมอเตอร์โครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบกับสายอากาศและสเต็ปเปอร์มอเตอร์ จากนั้นทำการวัดทดสอบประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบและเปรียบเทียบการใช้งานสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปกับสายอากาศโมโนโพลที่ใช้งานร่วมกับระบบโครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ โดยวิเคราะห์ประสิทธิภาพจากความแรงของสัญญาณที่ได้รับ

5.2 อุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ

การวัดทดสอบประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบโดยประเมินจากความแรงของสัญญาณที่ได้รับซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเพื่อให้สามารถรับสัญญาณได้มากที่สุด จึงต้องใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางที่แน่นอน ดังนั้นเพื่อให้สายอากาศสามารถหมุนหาสัญญาณได้รอบตัวจึงต้องใช้สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (stepper motor) ในการหมุนสายอากาศ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ประกอบด้วยมอเตอร์โครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ ซึ่งทำงานร่วมกับบอร์ดอะคูโน สเต็ปเปอร์มอเตอร์ บอร์ดตัวขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ (stepper motor driver board) และสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

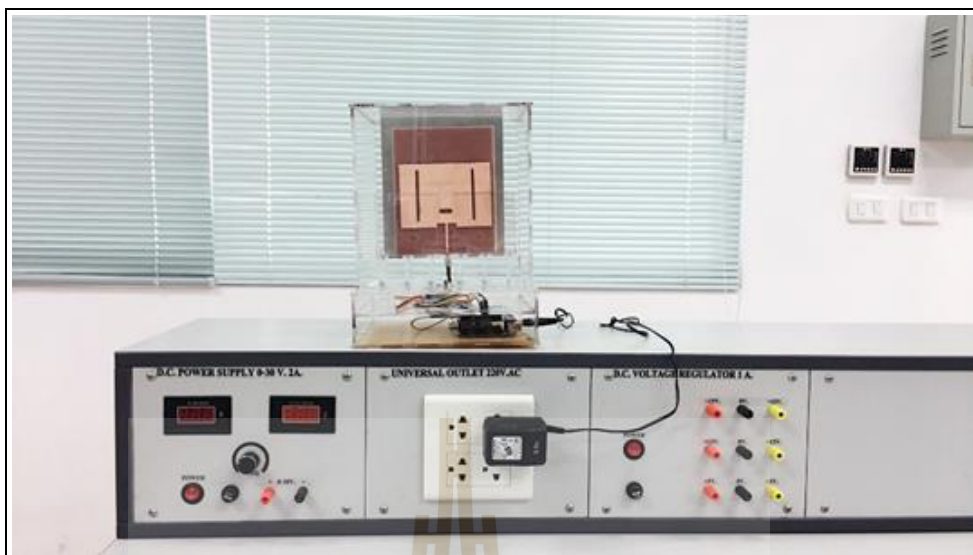
จากรูปที่ 5.1 แสดงการเชื่อมต่อมอเตอร์โครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบกับบอร์ดอะคูโน ซึ่งสามารถเชื่อมต่อจากขาเข้าด้วยกัน จากนั้นเชื่อมต่อสเต็ปเปอร์มอเตอร์พร้อมบอร์ดตัวขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ต่อเข้ากับมอเตอร์โครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ ต่อมาเชื่อมต่อตัวเชื่อมต่อสัญญาณกับสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป และติดตั้งสายอากาศบนสเต็ปเปอร์มอเตอร์



รูปที่ 5.1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ

5.3 การวัดทดสอบอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบสถิต

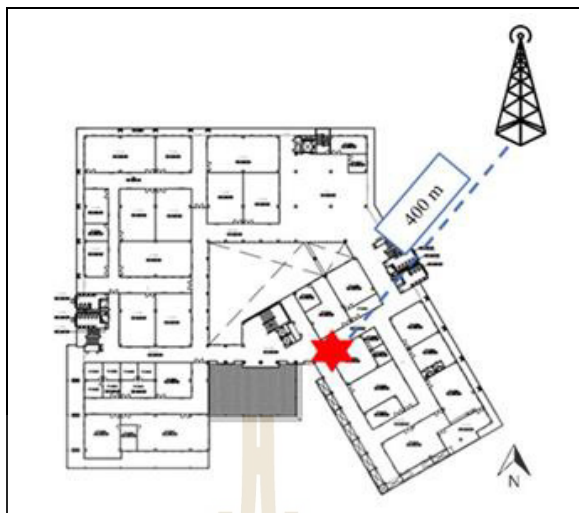
การวัดทดสอบโครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบสถิต (static measurement) คือการวัดค่าความแรงของสัญญาณ โดยที่อุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบถูกติดตั้งอยู่ในตำแหน่งคงที่ ซึ่งการวัดทดสอบนี้ อุปกรณ์จะถูกติดตั้งภายในอาคารดังแสดงในรูปที่ 5.2 โดยจะแบ่งการทดสอบเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ การทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของระดับความสูงที่มีต่อความแรงของสัญญาณ โดยสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบคืออาคารสิรินธรวิศวะพัฒนาซึ่งมีระดับความสูง 5 ชั้นดังแสดงในรูปที่ 5.3 (ก) และห่างจากสถานีฐานประมาณ 400 เมตรดังแสดงในรูปที่ 5.3 (ข) และการทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างอุปกรณ์กับสถานีฐานที่มีต่อความแรงของสัญญาณ โดยจะวัดทดสอบ ณ สถานที่ซึ่งมีระยะห่างจากสถานีฐานในระยะทางที่ต่างกันคือ 600 1000 1500 2000 และ 2500 เมตร ซึ่งทั้ง 2 การทดสอบจะเปรียบเทียบค่าความแรงของสัญญาณที่วัดได้จากการใช้สายอากาศโมโนโพลกับค่าความแรงของสัญญาณที่วัดได้จากการใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปร่วมกับอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เนตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ



รูปที่ 5.2 การติดตั้งอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ
ภายในห้องปฏิบัติการ



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.3 สถานที่ที่ใช้ทำการทดสอบอุปกรณ์แบบสถิต

(ก) อาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

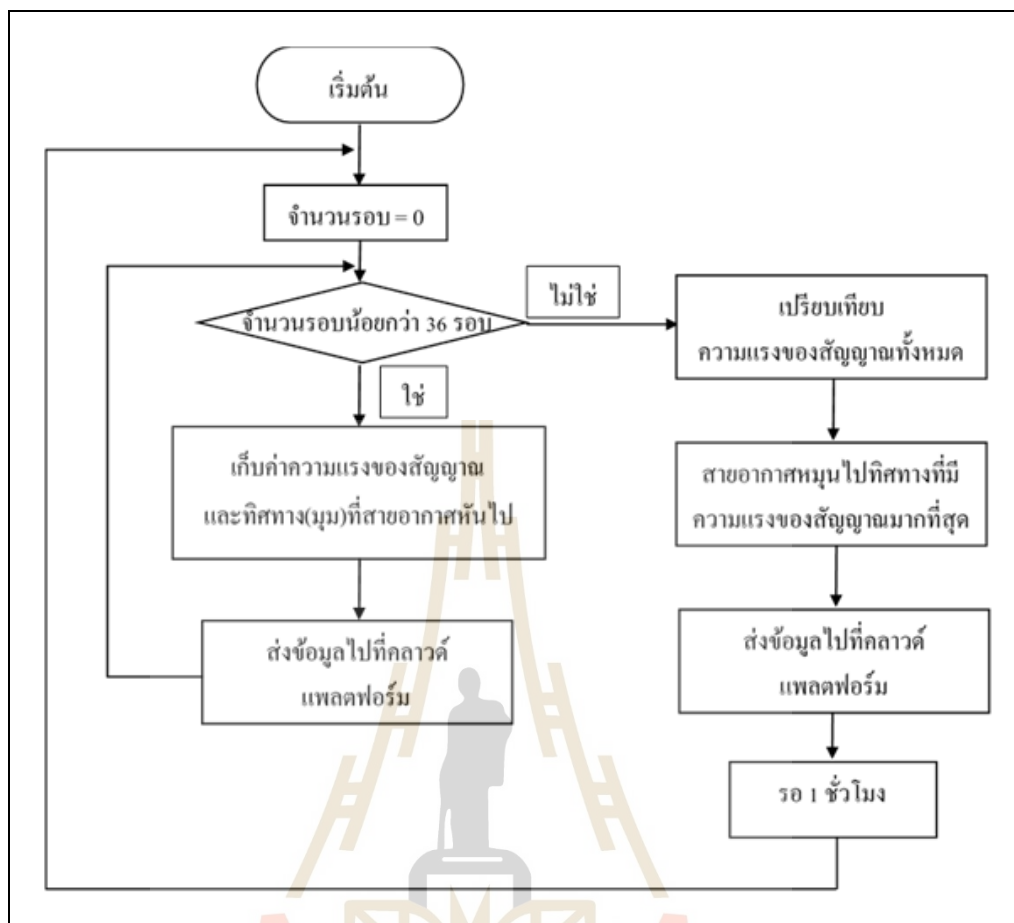
(ข) แผนผังอาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีซึ่งกำหนดตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์โครงข่ายสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ

5.3.1 วิธีการตั้งค่าอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบสถิต

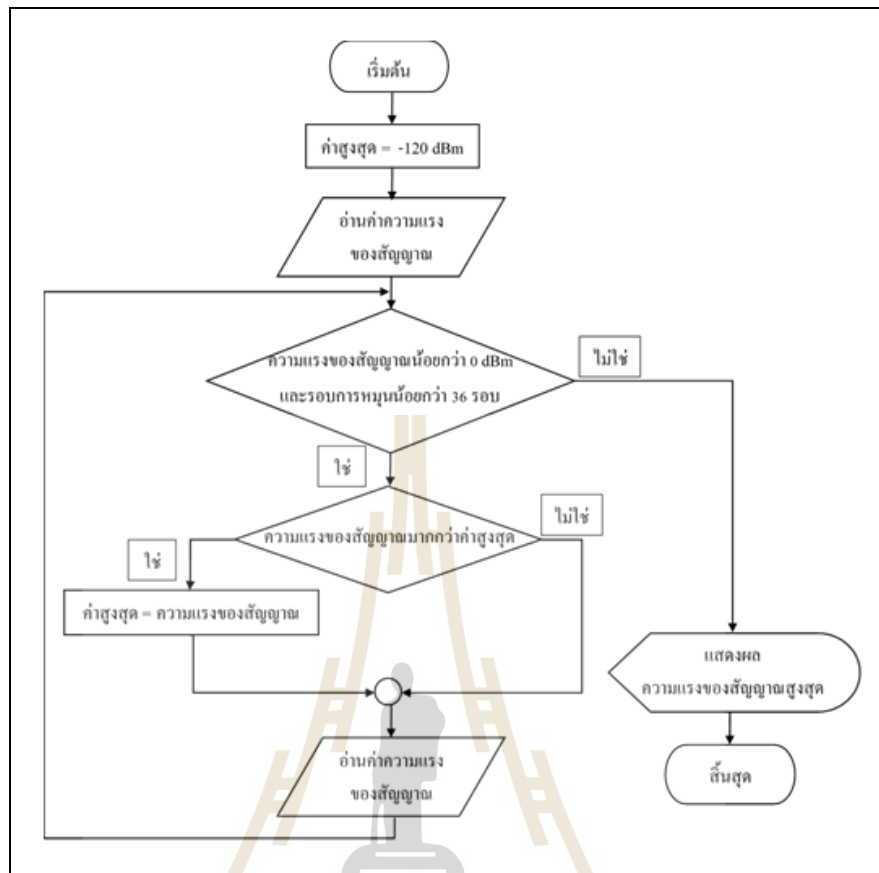
วิธีการวัดทดสอบความแรงของสัญญาณของระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบทำได้โดยการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของมอดูลโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับส่งข้อมูลและส่งค่าข้อมูลไปยังผู้ให้บริการ ซึ่งมอดูลโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบจะเชื่อมต่อกับสายอากาศและสแต็ปเปอร์มอเตอร์ โดยจะมีการแบ่งวิธีการวัดทดสอบตามการใช้งานของสายอากาศเป็น 2 วิธีดังนี้

1) วิธีการทำงานของระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งสำหรับใช้งานแถบความถี่แคบโดยใช้งานกับสายอากาศโมโนโพลซึ่งเป็นสายอากาศเดิมของมอดูลนี้ ในงานวิจัยนี้จะใช้ในการรับและส่งความแรงของสัญญาณ บอร์ดจะเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์และจะแสดงผลไปที่แพลตฟอร์ม เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเห็นค่าความแรงของสัญญาณได้ โดยสายอากาศโมโนโพลจะรับความแรงของสัญญาณและส่งค่าไปตลอดเวลา ขณะที่อุปกรณ์อยู่ในตำแหน่งคงที่

2) วิธีการทำงานของระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ โดยใช้งานกับสายอากาศต้นแบบที่เป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปและทำการหมุน โดยใช้สเต็ปเปอร์มอเตอร์ เพื่อหาทิศทางที่สามารถรับความแรงของสัญญาณได้มากที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ เริ่มจากเชื่อมต่อสายอากาศต้นแบบกับมอดูเลเตอร์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ จากนั้นเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 5.4 โดยจะสั่งการให้สเต็ปเปอร์มอเตอร์หมุนสายอากาศต้นแบบครั้งละ 1 รอบคือตั้งแต่ 0 องศาถึง 360 องศา ซึ่งค่าความแรงของสัญญาณและมุมมองเสาที่หมุนจะถูกบันทึกทุกๆ 10 องศา แล้วส่งค่าความแรงของสัญญาณไปยังคลาวด์ หลังจากที่สายอากาศต้นแบบหมุนครบ 1 รอบแล้ว ข้อมูลที่ถูกบันทึกไว้จะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาทิศทางที่สายอากาศสามารถรับความแรงของสัญญาณได้มากที่สุด โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณ คือค่าความแรงของสัญญาณปัจจุบันจะถูกเปรียบเทียบกับค่าความแรงของสัญญาณก่อนหน้า ค่าความแรงของสัญญาณที่มากกว่าจะบันทึกไว้ที่ค่าความแรงสัญญาณมากที่สุด (maximum signal strength) จากนั้นเมื่อเปรียบเทียบครบทุกค่าแล้ว จึงส่งข้อมูลนี้ไปยังแพลตฟอร์มและแสดงผลที่หน้าจอแสดงผลของผู้ใช้งานดังแสดงในรูปที่ 5.5 ต่อมาสเต็ปเปอร์มอเตอร์จะทำหน้าที่หมุนสายอากาศต้นแบบไปยังทิศทางที่สายอากาศสามารถรับความแรงของสัญญาณได้มากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ในสถานที่ที่สิ่งแวดล้อมสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา จึงต้องมีการปรับทิศทางของสายอากาศใหม่ทุกๆ 1 ชั่วโมง เพื่อให้สามารถรับความแรงของสัญญาณที่มากที่สุดได้ตลอดเวลา นั้นหมายความว่าระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบสามารถรับส่งข้อมูลได้ตลอดเวลา



รูปที่ 5.4 แผนผังวิธีการวัดทดสอบความแรงของสัญญาณของระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง
ที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบสถิตโดยใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบ
ไมโครสตริป



รูปที่ 5.5 แผนผังการเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณของระบบ โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง ที่ใช้งานแถบความถี่แคบ

5.3.2 การวัดและวิเคราะห์ผลการทดสอบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง ที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบสถิต

การวัดความแรงของสัญญาณ โดยที่อุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง ที่ใช้งานแถบความถี่แคบถูกติดตั้งในตำแหน่งคงที่ ซึ่งอยู่ในพื้นที่ที่สัญญาณเข้าถึงได้ยาก (indoor coverage) เช่นการติดตั้งอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ โดยประเมินประสิทธิภาพจากค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (received signal strength) ซึ่งจะใช้ความแรงของสัญญาณในการอ้างอิงของระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง ที่ใช้งานแถบความถี่แคบดังแสดงในตารางที่ 5.1 โดยเปรียบเทียบผลความแรงของสัญญาณที่ใช้อุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง ที่ใช้งานแถบความถี่แคบร่วมกับสายอากาศต้นแบบที่สามารถหมุนได้อัตโนมัติกับผลความแรงของสัญญาณที่ใช้อุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง ที่ใช้งานแถบความถี่แคบร่วมกับสายอากาศโมโนโพลซึ่งเป็นสายอากาศเดิมที่ใช้งานร่วมกับระบบนี้

ตารางที่ 5.1 ความแรงของสัญญาณในการอ้างอิงของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ (Teltonika, 2019).

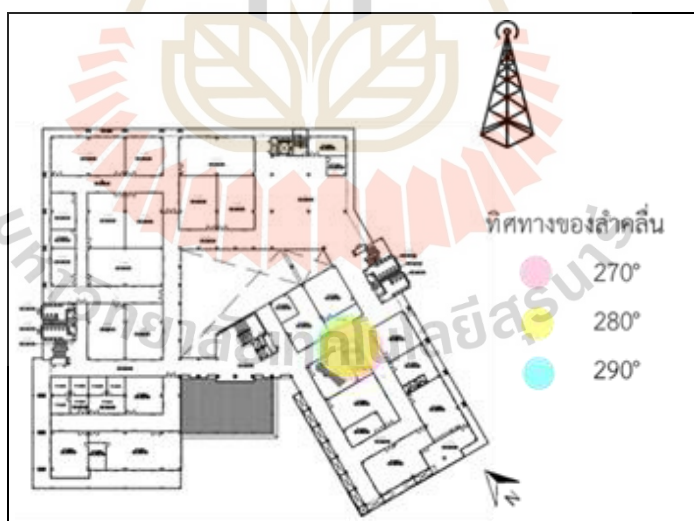
LTE	NB-IoT	ระดับความแรงของสัญญาณ
> -65 dBm	> -60 dBm	ดีมาก
-65 to -75 dBm	-60 to -80 dBm	ดี
-75 to -85 dBm	-80 to -95 dBm	พอใช้
-85 to -95 dBm	-95 to -110 dBm	แย่
< -95 dBm	< -110 dBm	ไม่สามารถเชื่อมต่อได้

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการวัดทดสอบความแรงของสัญญาณ ณ ตำแหน่งที่อุปกรณ์อยู่ในระดับความสูงที่ต่างกัน โดยที่ตำแหน่งการทดสอบอยู่ห่างจากสถานีฐานประมาณ 400 เมตร พบว่าระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบโดยใช้สายอากาศโมโนโพลที่ระดับความสูงในชั้นที่ 1, 2, 3 และ 4 ความแรงของสัญญาณเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ -63 ถึง -67 dBm ซึ่งความแรงของสัญญาณอยู่ในระดับดี และที่ระดับความสูงในชั้น 5 ความแรงของสัญญาณเฉลี่ยมีค่าประมาณ -60 dBm ซึ่งความแรงของสัญญาณอยู่ในระดับดีมาก จะเห็นว่าอุปกรณ์ที่อยู่ในระดับความสูงที่ต่ำกว่าจะรับความแรงของสัญญาณได้แย่กว่า เนื่องจากสัญญาณต้องผ่านวัสดุโครงสร้างของอาคารที่มีความหนา จึงทำให้เกิดการจางหายของสัญญาณ ต่อมาเปลี่ยนมาใช้สายอากาศแพทช์ไมโครสตริปที่สามารถหมุนล้าคลื่นรับความแรงของสัญญาณที่ดีที่สุดได้อัตโนมัติ พบว่าที่ระดับความสูงในชั้นที่ 1, 2 และ 3 ความแรงของสัญญาณเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ -61 ถึง -63 dBm ซึ่งระดับความแรงของสัญญาณอยู่ในระดับดี และที่ระดับความสูงชั้น 4 และ 5 ความแรงของสัญญาณเฉลี่ยมีค่าประมาณ -57 ถึง -59 dBm ซึ่งระดับความแรงของสัญญาณอยู่ในระดับดีมาก โดยที่สายอากาศต้นแบบหันด้านหน้าของสายอากาศ ซึ่งเป็นทิศทางที่คลื่นแผ่ออกไปหันไปยังทิศทางของสถานีฐาน ซึ่งบ่งบอกว่าเป็นทิศทางที่สายอากาศจะมาสารรับความแรงของสัญญาณได้มากที่สุด โดยที่ในแต่ละชั้นจะทำการวัดในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นสายอากาศจะมีล้าคลื่นหันไปในทิศทางที่ใกล้เคียงกันซึ่งทำมุม 270 องศาถึง 290 องศาเมื่อให้ทิศเหนือคือศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 5.6 นอกจากนี้ระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบที่ใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริป ยังสามารถรับสัญญาณได้ดีกว่าการใช้สายอากาศโมโนโพล เนื่องจากสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางที่ชัดเจนและมีอัตราขยายมากกว่าสายอากาศโมโนโพลซึ่งเป็น

สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง อีกทั้งยังสามารถหมุนหาทิศทางที่สามารถรับสัญญาณได้มากที่สุดได้อัตโนมัติ

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบความแรงของสัญญาณ ณ ตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ระดับความสูงต่างกัน

ระดับ ความ สูง	ตำแหน่งการวัดทดสอบที่ห่างจากสถานีฐาน เมตร 400				
	สายอากาศโมโนโพล		สายอากาศต้นแบบ		
	ความแรงของ สัญญาณเฉลี่ย (dBm)	ระดับความ แรงของ สัญญาณ	ความแรงของ สัญญาณเฉลี่ย (dBm)	ทิศทางของ ลำคลื่น (องศา)	ระดับความ แรงของ สัญญาณ
ชั้นที่ 1	-65.19	ดี	-61.83	280	ดี
ชั้นที่ 2	-67.76	ดี	-63.05	290	ดี
ชั้นที่ 3	-67.54	ดี	-63.12	290	ดี
ชั้นที่ 4	-63.15	ดี	-59.51	280	ดีมาก
ชั้นที่ 5	-59.99	ดีมาก	-57.15	270	ดีมาก



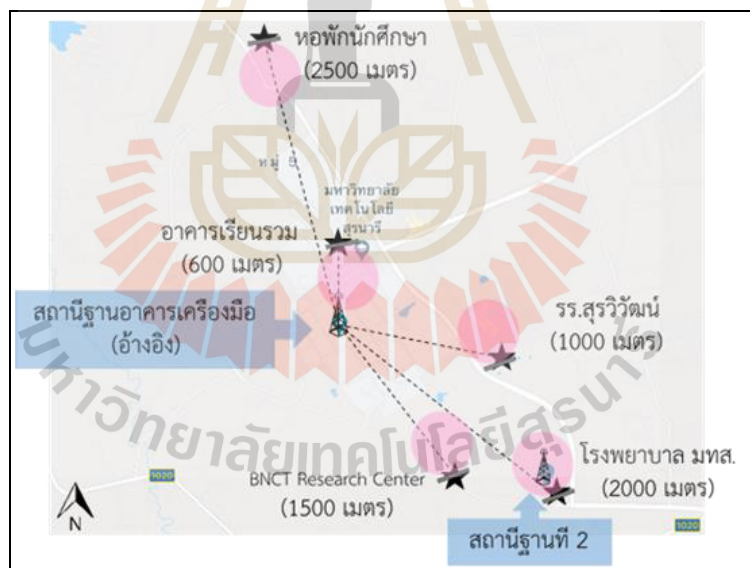
รูปที่ 5.6 ทิศทางของลำคลื่นของสายอากาศที่มีความแรงของสัญญาณที่ได้รับมากที่สุด ณ ตำแหน่งของอุปกรณ์ที่อยู่ในระดับความสูงต่างกัน

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการวัดทดสอบความแรงของสัญญาณ ณ ตำแหน่งที่อุปกรณ์ อยู่ห่างจากสถานีฐานในระยะทางที่ต่างกัน โดยใช้สถานีฐานอาคารเครื่องมือเป็นสถานีฐานอ้างอิง นอกจากนี้ยังมีสถานีฐานที่ 2 ที่อยู่ภายในอาคารโรงพยาบาลมหาวิทยาลัย โดยห่างจากสถานีฐานอ้างอิงประมาณ 2000 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.7 พบว่าระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งาน แลบบความถี่แคบที่ใช้สายอากาศโมโนโพลติดตั้งห่างจากสถานีฐานเป็นระยะทาง 600 และ 1000 เมตร ความแรงของสัญญาณเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ -70 dBm ซึ่งความแรงของสัญญาณอยู่ในระดับดี ในขณะที่ที่อยู่ห่างจากสถานีฐานอ้างอิงเป็นระยะทาง 1500 และ 2000 เมตร ความแรงของสัญญาณเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ -51 dBm ซึ่งความแรงของสัญญาณอยู่ในระดับดีมาก เนื่องจากการวัดผลที่ระยะห่างนี้ ได้ทำการวัดผล ณ สถานที่ที่ใกล้กับสถานีฐานที่ 2 มากกว่าสถานีฐานอ้างอิง สายอากาศจึงหันไปทางสถานีฐานที่ 2 ทำให้สามารถรับสัญญาณได้ดีกว่าและที่ระยะห่างจากสถานีฐาน 2500 เมตร ความแรงของสัญญาณเฉลี่ยมีค่าประมาณ -78 dBm ซึ่งความแรงของสัญญาณอยู่ในระดับดี จะเห็นว่าอุปกรณ์ที่อยู่ห่างจากสถานีฐานในระยะทางที่มากกว่าจะรับความแรงของสัญญาณได้แย่กว่า เนื่องจากเกิดการสูญเสียกำลัง (path loss) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อระยะทางระหว่างสายอากาศและสถานีฐานเพิ่มขึ้น ถ้าไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างสายอากาศและสถานีฐานจะมีเพียงการสูญเสียของสัญญาณในอากาศว่าง (free space loss)

เมื่อใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปพร้อมกับระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแลบบความถี่แคบ โดยวัดผลที่ระยะทางห่างจากสถานีฐาน 600 และ 1000 เมตร ความแรงของสัญญาณเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ -65 dBm ซึ่งความแรงของสัญญาณอยู่ในระดับดี ต่อมาในระยะทางห่างจากสถานีฐาน 1500 และ 2000 เมตร ความแรงของสัญญาณเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ -51 dBm ซึ่งความแรงของสัญญาณอยู่ในระดับดีมาก และที่ระยะห่างจากสถานีฐาน 2500 เมตร ความแรงของสัญญาณเฉลี่ยมีค่าประมาณ -75 dBm ซึ่งความแรงของสัญญาณอยู่ในระดับดี และหันลำคลื่นไปในทิศทางของสถานีฐานดังแสดงในรูปที่ 5.7 โดยจะเห็นว่าเมื่ออุปกรณ์อยู่ห่างจากสถานีฐานเป็นระยะที่มากขึ้น ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจะต่ำลง เนื่องจากการสูญเสียกำลังและผลกระทบจากสภาพแวดล้อม เช่น ตำแหน่งที่วัดทดสอบอยู่ในบริเวณที่สัญญาณสามารถเข้าถึงยาก หรืออยู่บริเวณที่มีปากรกบ ทำให้เกิดการจางหายของสัญญาณ (fading) โดยสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่สามารถหันทิศทางของสายอากาศให้รับสัญญาณได้ดีนั้น สามารถรับสัญญาณได้ดีกว่าสายอากาศโมโนโพล

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบความแรงของสัญญาณ ณ ระยะทางที่ห่างจากสถานีฐานที่ต่างกัน

ระยะทางที่ห่างจากสถานีฐาน (เมตร)	ตำแหน่งการทดสอบ				
	สายอากาศโมโนโพล		สายอากาศต้นแบบ		
	ความแรงของสัญญาณเฉลี่ย (dBm)	ระดับความแรงของสัญญาณ	ความแรงของสัญญาณเฉลี่ย (dBm)	ทิศทางของลำคลื่น (องศา)	ระดับความแรงของสัญญาณ
600	-69.32	ดี	-64.92	190	ดี
1000	-70	ดี	-65.58	10	ดี
1500	-51.59	ดีมาก	-51	10	ดีมาก
2000	-51	ดีมาก	-51	10	ดีมาก
2500	-78.13	ดี	-75.24	190	ดี



รูปที่ 5.7 ทิศทางของลำคลื่นของสายอากาศที่มีความแรงของสัญญาณที่ได้รับมากที่สุด ณ ระยะทางที่ห่างจากสถานีฐานต่างกัน

5.4 การวัดทดสอบอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบพลวัต

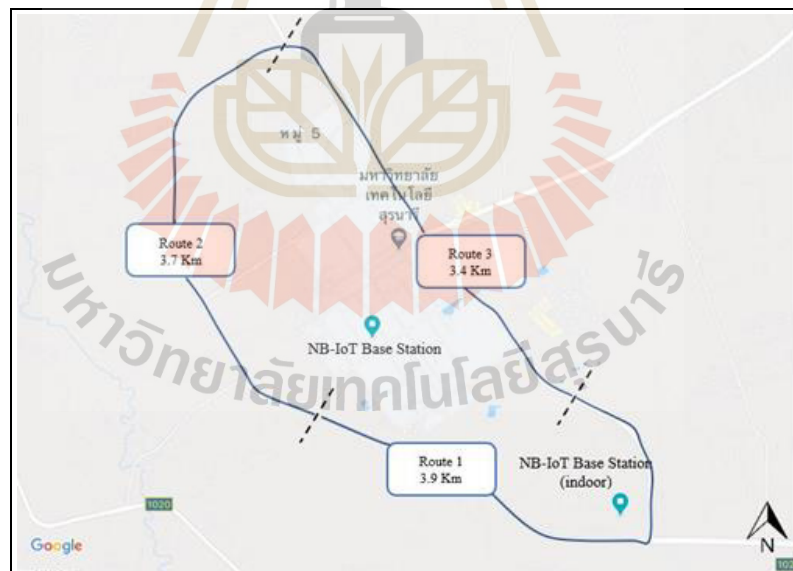
การวัดทดสอบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบพลวัต (dynamic measurement) คือการวัดค่าความแรงของสัญญาณ โดยที่อุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบถูกติดตั้งในยานพาหนะที่มีการเคลื่อนที่ โดยจะแบ่งการทดสอบเป็น 3 เส้นทางซึ่งแต่ละเส้นทางจะทดสอบด้วยความเร็ว 3 ระดับ จากนั้นเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณที่วัดได้จากสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปและที่วัดได้จากสายอากาศโมโนโพล เพื่อประเมินผลว่าอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบสามารถเชื่อมต่อกับสถานีฐานได้ตลอดเวลาขณะมีการเคลื่อนที่ (Mobility Performance) โดยมีกระบวนการหมุนสายอากาศเพื่อหาความแรงของสัญญาณที่มากที่สุดทำงานอัตโนมัติ

5.4.1 วิธีการตั้งค่าอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบพลวัต

การทดสอบอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบพลวัตจะวัดผลขณะยานพาหนะเคลื่อนที่บนถนนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยที่อุปกรณ์จะถูกติดตั้งภายในรถบริเวณที่นั่งด้านหลัง ซึ่งเป็นบริเวณที่เหมาะสมในการวัดทดสอบเนื่องจากสามารถวัดความแรงของสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพดังแสดงในรูปที่ 5.8 โดยจะแบ่งการทดสอบเป็น 3 เส้นทางซึ่งแต่ละเส้นทางมีสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน โดยเส้นทางที่ 1 มีระยะทาง 3900 เมตรซึ่งเป็นเส้นทางที่ผ่านที่โล่งแจ้ง เส้นทางที่ 2 มีระยะทาง 3700 เมตรซึ่งเป็นเส้นทางที่ผ่านสถานที่ที่มีตึกคบบังและเส้นทางที่ 3 มีระยะทาง 3400 เมตรซึ่งจะเดินทางผ่านบริเวณที่มีป่าทึบดังแสดงในรูปที่ 5.9 ทำให้ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับในแต่ละเส้นทางมีความแตกต่างกัน



รูปที่ 5.8 การติดตั้งอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบภายในยานพาหนะ ขณะทำการวัดทดสอบ



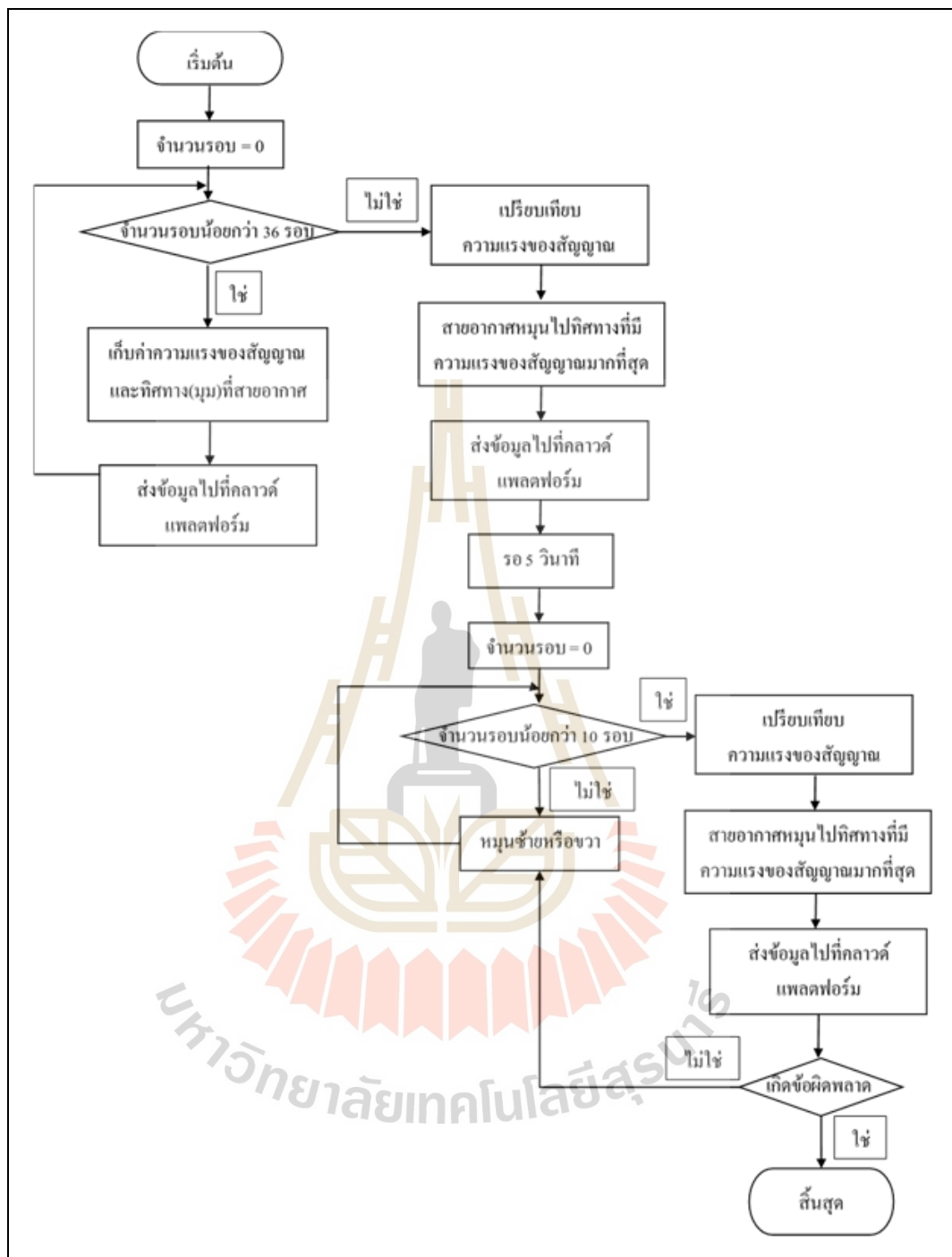
รูปที่ 5.9 เส้นทางรอบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ใช้ในการวัดทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบพลวัต

ในแต่ละเส้นทางจะทำการทดสอบโดยเปลี่ยนแปลงความเร็วของยานพาหนะ แบ่งเป็น 3 ความเร็วคือ 60, 80 และ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อทดสอบผลกระทบของความเร็วของยานพาหนะต่อค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ ซึ่งจะเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากการใช้สายอากาศโมโนโพลและการใช้สายอากาศต้นแบบในการวัดผลและแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ลักษณะดังนี้

1) ลักษณะที่ 1 ระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบใช้งานร่วมกับสายอากาศโมโนโพลและวัดค่าความแรงของสัญญาณตลอดการเดินทาง

2) ลักษณะที่ 2 ระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบใช้งานร่วมกับสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่หมุนล้าคลื่นอัดโนมัติ โดยสายอากาศหมุนอัดโนมัติทีละ 10 องศาเป็นจำนวน 1 รอบ (360 องศา) เมื่อสายอากาศหมุนไปในทิศทางที่รับค่าความแรงของสัญญาณมากที่สุดแล้วจึงหยุดหมุน จากนั้นระบบยังคงวัดผลความแรงของสัญญาณตลอดการเดินทาง

3) ลักษณะที่ 3 ระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบใช้งานร่วมกับสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปที่หมุนล้าคลื่นอัดโนมัติ โดยสายอากาศหมุนอัดโนมัติทีละ 10 องศาเป็นจำนวน 1 รอบ (360 องศา) เมื่อสายอากาศหมุนไปในทิศทางที่รับค่าความแรงของสัญญาณมากที่สุดแล้วจึงหยุดหมุน ต่อมาระบบจะวัดค่าความแรงของสัญญาณทุก ๆ 5 วินาที โดยวิธีการหมุนไปทางขวาทีละ 1 องศาเป็นจำนวน 10 องศาและหมุนไปทางซ้ายทีละ 1 องศาเป็นจำนวน 10 องศาแล้วนำค่าความแรงของสัญญาณมาเปรียบเทียบหาความแรงของสัญญาณมากที่สุด จากนั้นระบบจึงสั่งการให้สเต็ปเปอร์มอเตอร์หมุนสายอากาศต้นแบบไปยังทิศทางที่มีความแรงของสัญญาณมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 แผนผังวิธีการวัดทดสอบความแรงของสัญญาณของระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ต
สรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบพลวัตโดยใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่ง
แบบไมโครสตริป

5.4.2 การวัดและวิเคราะห์ผลการทดสอบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบพลวัต

การวัดความแรงของสัญญาณ โดยที่อุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบมีการเคลื่อนที่ ซึ่งอุปกรณ์จะถูกติดตั้งในยานพาหนะ เช่น รถยนต์ เพื่อประเมินผลว่าประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบสามารถเชื่อมต่อกับสถานีฐานได้ตลอดเวลาขณะเคลื่อนที่ โดยจะประเมินประสิทธิภาพจากค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (received signal strength) ซึ่งจะใช้ความแรงของสัญญาณอ้างอิงของระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งที่ใช้งานในแถบความถี่แคบดังแสดงในตารางที่ 5.1 โดยเปรียบเทียบผลความแรงของสัญญาณที่ใช้อุปกรณ์อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งที่ใช้งานในแถบความถี่แคบร่วมกับสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริซึ่งสามารถหมุนได้อัตโนมัติกับผลความแรงของสัญญาณที่ใช้สายอากาศโมโนโพล ซึ่งเป็นสายอากาศเดิมที่ใช้งานร่วมกับระบบนี้

จากรูปที่ 5.11 แสดงผลการทดสอบการวัดความแรงของสัญญาณที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงใช้เวลาในการทำการทดสอบในแต่ละเส้นทางประมาณ 200 วินาที พบว่ากรณีที่ 1 เมื่อใช้สายอากาศโมโนโพลในการวัดความแรงของสัญญาณทั้ง 3 เส้นทาง (Case 1: RSSI of monopole) จะได้ค่าความแรงของสัญญาณเฉลี่ยประมาณ -72.9, -68.88 และ -77 dBm ตามลำดับ ในกรณีถัดไปเปลี่ยนมาใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปีก่อนการเคลื่อนที่ จะให้สายอากาศหมุน 1 รอบเพื่อหาความแรงของสัญญาณที่มากที่สุด (Case 2: RSSI of proposed antenna-1) ซึ่งจะได้ความแรงของสัญญาณของ 3 เส้นทางเท่ากับ -57, -63 และ -57 dBm ตามลำดับ หลังจากนั้นยานพาหนะจะเริ่มเคลื่อนที่โดยที่สายอากาศไม่หมุนอีกตลอดระยะเวลา นอกจากนี้ในกรณีที่ 3 จะให้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริหมุน 1 รอบเพื่อหาความแรงของสัญญาณที่มากที่สุดก่อนการเคลื่อนที่ หลังจากนั้นเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่กล่าวคืออุปกรณ์จะเริ่มเคลื่อนที่ สายอากาศจะหมุนหาทิศทางที่สามารถรับความแรงของสัญญาณที่มากที่สุดโดยอัตโนมัติตลอดการเดินทาง (Case 3: RSSI of proposed antenna-2) ซึ่งตลอดระยะเวลาที่ทำการทดสอบจะเห็นว่าสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริสามารถรับสัญญาณได้ดีกว่าสายอากาศโมโนโพล

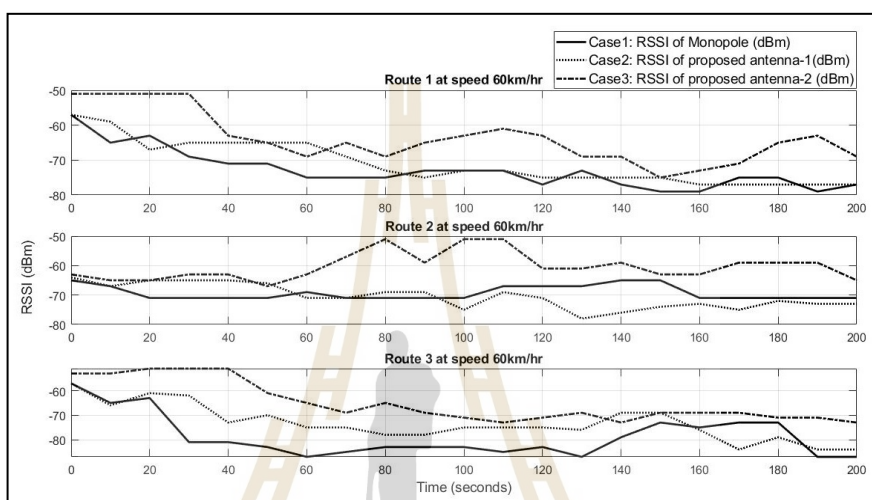
จากรูปที่ 5.12 แสดงผลการทดสอบการวัดความแรงของสัญญาณที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงจะใช้เวลาในการทำการทดสอบประมาณ 120 วินาที พบว่าวัดความแรงของสัญญาณเฉลี่ยโดยใช้สายอากาศโมโนโพลตลอดเส้นทางทั้ง 3 เส้นทางจะได้ -65.66, -67.76 และ -77.46 dBm ตามลำดับ ต่อมาเมื่อวัดความแรงของสัญญาณโดยเปลี่ยนมาใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริแล้วสายอากาศหมุน 1 รอบเพื่อวัดความแรงของสัญญาณที่มากที่สุด

จะได้รับความแรงของสัญญาณเท่ากับ -57, -69 และ -57 dBm ตามลำดับจากนั้นยานพาหนะจะเริ่มเคลื่อนที่โดยที่สายอากาศไม่หมุนอีกตลอดการเดินทาง ในกรณีถัดมาใช้สายอากาศวัดความแรงของสัญญาณที่มากที่สุดก่อนการเคลื่อนที่ จากนั้นยานพาหนะจึงเริ่มเคลื่อนที่ สายอากาศจะทำงานต่อเนื่องเพื่อหมุนหาทิศทางที่สามารถรับความแรงของสัญญาณที่มากที่สุดโดยอัตโนมัติ จะเห็นว่าสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปสามารถหันทิศทางของสายอากาศให้รับสัญญาณได้ดีกว่าสายอากาศโมโนโพลตลอดการเดินทาง

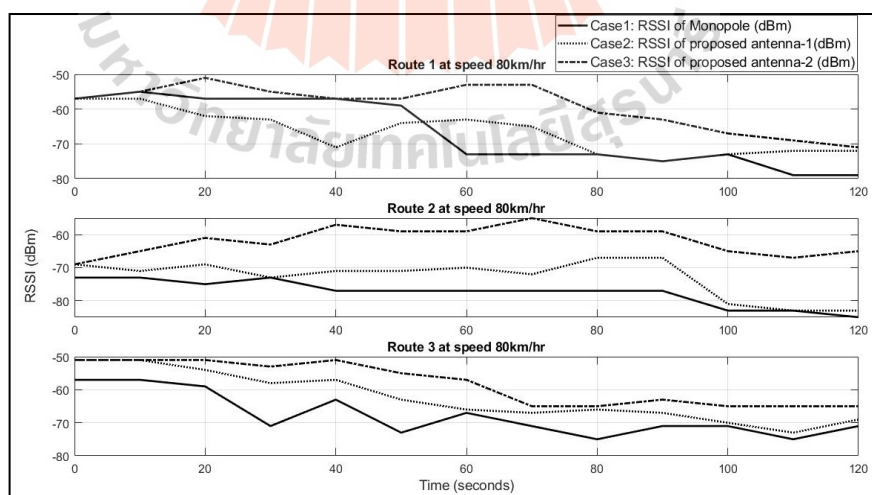
จากรูปที่ 5 13. แสดงผลการทดสอบการวัดความแรงของสัญญาณที่ความเร็ว 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมงซึ่งจะใช้เวลาในการทำการทดสอบน้อยที่สุดประมาณ 100 วินาที พบว่าเมื่อใช้สายอากาศโมโนโพลสามารถวัดความแรงของสัญญาณเฉลี่ยตลอดเส้นทางทั้ง 3 เส้นทางได้ประมาณ -73-, 73 และ -67.1 dBm ตามลำดับและเมื่อวัดความแรงของสัญญาณที่มากที่สุดโดยเปลี่ยนมาใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปหมุน 1 รอบจะได้รับความแรงของสัญญาณเท่ากับ -57-, 63 และ -57 dBm ตามลำดับ ต่อมาเมื่อยานพาหนะเริ่มเคลื่อนที่ สายอากาศสามารถหมุนหาทิศทางที่สามารถรับความแรงของสัญญาณที่มากที่สุดได้อัตโนมัติตลอดเส้นทาง นอกจากนี้การใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปยังรับสัญญาณได้ดีกว่าสายอากาศโมโนโพล

ดังนั้นการวัดความแรงของสัญญาณโดยที่อุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบมีการเคลื่อนที่ พบว่าเมื่อใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปวัดความแรงของสัญญาณก่อนการเคลื่อนที่ สัญญาณที่วัดได้อยู่ในระดับดี เมื่อเดินทางต่อไปเรื่อยๆ เมื่อสายอากาศไม่มีการหมุนเพื่อหาทิศทางที่ดีที่สุด ก็จะทำให้ความแรงของสัญญาณในช่วงมีค่าต่ำกว่าความแรงของสัญญาณที่สามารถรับได้จากสายอากาศโมโนโพล จึงต้องมีการปรับปรุงระบบให้มีการหมุนสายอากาศแผ่นพิมพ์ได้ตลอดเวลาเพื่อให้สามารถรับสัญญาณได้ดีตลอดการเดินทาง จึงได้ทำการทดสอบในลักษณะที่ 3 โดยที่สายอากาศแผ่นพิมพ์สามารถหมุนหาความแรงของสัญญาณทุก ๆ 5 วินาทีขณะเคลื่อนที่ แล้วพบว่าสามารถรับสัญญาณได้ดีกว่าโมโนโพลตลอดการเดินทาง กล่าวคือยานพาหนะที่ติดตั้งอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบจะเคลื่อนที่ออกจากสถานีฐานเรื่อยๆ ทำให้การสูญเสียกำลังเพิ่มขึ้นเนื่องจากสัญญาณที่ได้รับจะแปรผันกับระยะทางระหว่างสถานีฐานที่เป็นภาคส่งกับอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ เป็นภาครับ ถ้าระยะยิ่งไกลการสูญเสียกำลังจะยิ่งมาก นอกจากนี้ยังเกิดการจางหายของสัญญาณ เนื่องจากสัญญาณที่มาจากสถานีฐานมาถึงสายอากาศภาครับจะเข้ามาหลายทิศทาง โดยอาจจะเกิดการสะท้อน เลี้ยวเบนหรือหักเห โดยที่การจางหายที่เกิดจากสิ่งกีดขวางเหล่านี้ เช่นตึก อาคารหรือป่าทึบ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ซาโดว์อิง (shadowing) ซึ่งส่งผลทำให้ลด

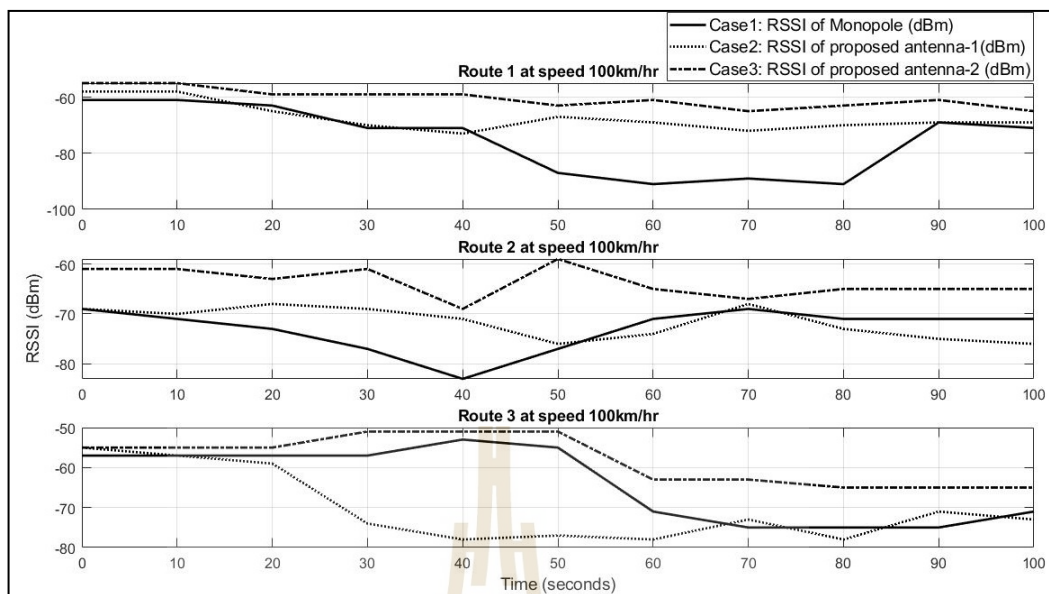
ความแรงของสัญญาณที่รับลงได้ ถ้าใช้สายอากาศโมโนโพลที่สามารถรับคลื่นได้ทุกทิศทางจะ
 ทำให้ความแรงสัญญาณที่รับยิ่งลดลงไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเพิ่มการรับความแรงของสัญญาณโดย
 ใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ
 มีทิศทางและมีอัตราขยายมากกว่าสายอากาศโมโนโพล ทำให้สามารถรับสัญญาณได้ดีกว่า จึงทำให้
 เพิ่มประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ



รูปที่ 5.11 การวัดทดสอบความแรงของสัญญาณของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งาน
 แถบความถี่แคบแบบพลวัตทั้ง 3 เส้นทางขณะที่ยานพาหนะใช้ความเร็ว 60 กม./ชม.



รูปที่ 5.12 การวัดทดสอบความแรงของสัญญาณของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งาน
 แถบความถี่แคบแบบพลวัตทั้ง 3 เส้นทางขณะที่ยานพาหนะใช้ความเร็ว 80 กม./ชม.



รูปที่ 5.13 การวัดทดสอบความแรงของสัญญาณของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งาน
แถบความถี่แคบแบบพลวัตทั้ง 3 เส้นทางขณะที่ยานพาหนะใช้ความเร็ว 100 กม./ชม.

5.5 กล่าวสรุป

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานในแถบความถี่แคบ โดยประเมินจากความแรงของสัญญาณที่ได้รับ พบว่าระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบสามารถใช้งานได้ในพื้นที่ที่สัญญาณสามารถเข้าถึงยากและสามารถใช้งานได้ขณะอุปกรณ์มีการเคลื่อนที่โดยสามารถเชื่อมต่อกับสถานีฐานได้ตลอดเวลา และเมื่อเปรียบเทียบการใช้งานสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปและสายอากาศโมโนโพล พบว่าสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปสามารถรับสัญญาณได้ดีกว่าสายอากาศโมโนโพล เนื่องจากสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางที่ชัดเจนและสามารถหมุนหาทิศทางที่สามารถรับสัญญาณได้มากที่สุดได้อัตโนมัติตลอดเวลา

บทที่ 6

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ปัจจุบันโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งเป็นเรื่องที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างกันเป็นเครือข่าย สามารถสื่อสารและรับส่งข้อมูลกันได้อัตโนมัติหรือสามารถทำงานได้เองโดยไม่ต้องอาศัยมนุษย์ ซึ่งโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็วซึ่งสามารถเชื่อมต่อกันผ่านโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ เน้นใช้งานครอบคลุมพื้นที่กว้าง ประหยัดพลังงาน เหมาะกับการส่งข้อมูลที่มีขนาดไม่ใหญ่และถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ทุกที่ทุกเวลา โดยโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบมักจะถูกนำมาติดตั้งภายในพื้นที่ที่จำกัดและไกลจากสถานีฐาน รวมถึงมีข้อจำกัดในการเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงมีการวิเคราะห์และทดสอบประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบในหลากหลายลักษณะ ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณระหว่างอุปกรณ์กับสถานีฐานนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึง

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ โดยใช้สายอากาศที่หมุนลำคลื่นอัตโนมัติเพื่อรับความแรงของสัญญาณสูงสุด โดยสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้งานร่วมกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ โดยที่สายอากาศต้นแบบถูกออกแบบและจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ต่อมาทำการสร้างและวัดผลทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศคือค่าการสูญเสียย้อนกลับ แบบรูปการแผ่พลังงาน และอัตราขยาย พบว่าสายอากาศสามารถทำงานที่ความถี่ใช้งาน 908 MHz ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ 898 ถึง 923 MHz และมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางที่ชัดเจนซึ่งมีอัตราขยาย 2.3 dB โดยมีการใช้จุดบ่อนสัญญาณแบบอินเซต การเจาะร่องและเพิ่มตัวสะท้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ จากนั้นสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปจะถูกใช้งานร่วมกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบและเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของสายอากาศที่นำเสนอนี้กับสายอากาศโมโนโพล ซึ่งเป็นสายอากาศเดิมของอุปกรณ์ที่ทดสอบในสถานการณ์จริงทั้งหมดสองลักษณะ ได้แก่ การวัดทดสอบอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ

แบบสถิต ซึ่งอุปกรณ์ถูกติดตั้งอยู่ในตำแหน่งคงที่ โดยจะวิเคราะห์ผลกระทบของระดับความสูงและผลกระทบของระยะห่างระหว่างอุปกรณ์กับสถานีฐานที่มีต่อความแรงของสัญญาณที่ได้รับ พบว่าในระดับความสูงที่ต่ำกว่าจะสามารถรับสัญญาณได้น้อยกว่าระดับความสูงที่สูงกว่า เนื่องจากผลกระทบของสิ่งแวดล้อมภายในตึกที่ส่งผลต่อการจางหายของสัญญาณ นอกจากนี้เมื่ออุปกรณ์ถูกติดตั้งห่างจากสถานีฐานจะทำให้ได้รับสัญญาณที่ต่ำ แต่ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมรอบอาคารจะมีผลต่อการจางหายของสัญญาณ อีกหนึ่งการวัดทดสอบคือการทดสอบอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบแบบพลวัต ซึ่งอุปกรณ์มีการเคลื่อนที่และสายอากาศต้นแบบหมุนอัตโนมัติ เพื่อให้ได้ความแรงของสัญญาณสูงสุดตลอดเวลาขณะวัดทดสอบ พบว่าสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปสามารถรับสัญญาณได้ดีกว่าสายอากาศโมโนโพล เนื่องจากสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ใช้สายส่งแบบไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางที่ชัดเจนและสามารถหมุนหาทิศทางที่สามารถรับสัญญาณได้มากที่สุดได้อัตโนมัติตลอดเวลา ดังนั้นสายอากาศที่สามารถหมุนลำคลื่นได้อัตโนมัติเพื่อหาทิศทางที่สามารถรับความแรงของสัญญาณได้สูงสุด จะเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบได้ทั้งในสภาพแวดล้อมภายในอาคารและเงื่อนไขสภาพการเคลื่อนที่

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

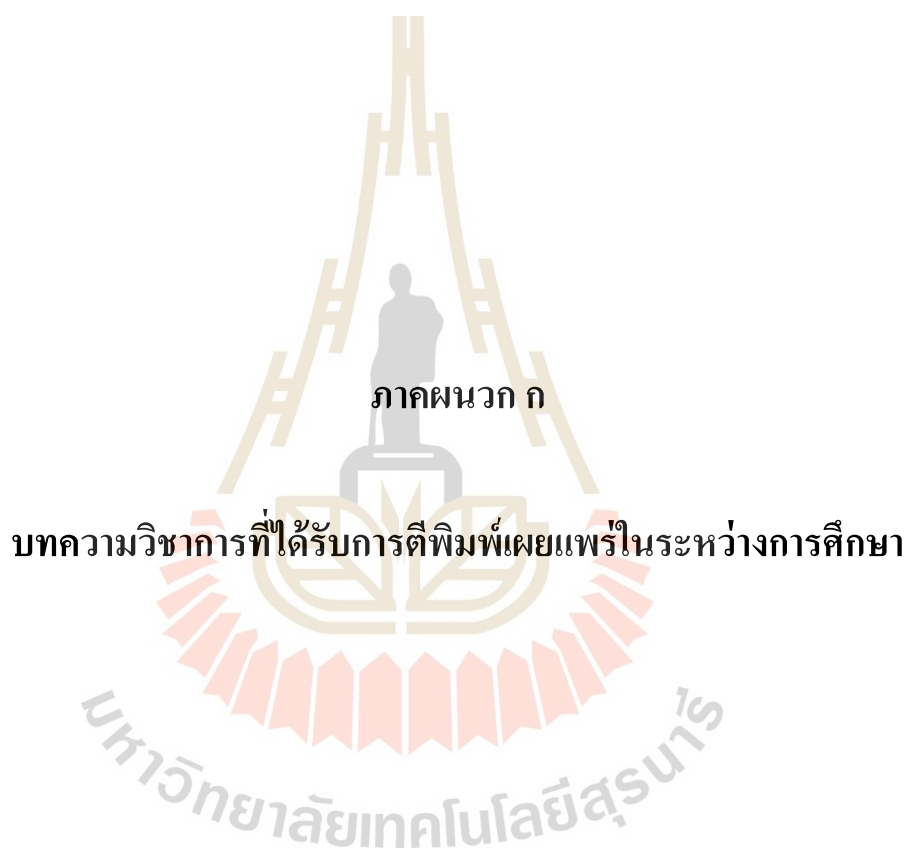
สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นต้นแบบการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ โดยใช้สายอากาศที่หมุนลำคลื่นอัตโนมัติ ดังนั้นสำหรับการพัฒนาในอนาคตนั้นจะสามารถพิจารณาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในลักษณะอื่น ๆ เช่น การพัฒนาโครงสร้างและคุณสมบัติของสายอากาศที่ใช้งานร่วมกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ การพัฒนามอดูลโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบ เป็นต้น นอกจากนี้อาจจะมีการทดสอบอุปกรณ์โครงข่ายอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่งที่ใช้งานแถบความถี่แคบในพื้นที่การใช้งานอื่น ๆ เช่น ในเมือง พื้นที่การเกษตรหรือในจังหวัดต่าง ๆ เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- การตะ เพ็ชศรี.การวิเคราะห์คุณภาพสัญญาณเพื่อการประเมินจุดบกพร่องของเครือข่าย (Doctoral dissertation), มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์).
- รังสรรค์ วงศ์สวรรค์, วิศวกรรมสายอากาศ (พิมพ์ครั้งที่ 4), ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีการศึกษา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2556.
- สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ . เทคโนโลยี Internet of Things และนโยบาย Thailand 4.0, 2560.
- สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ . แผนความถี่โทรคมนาคม, 2558.
- Ali, E. M., Yahaya, N. Z., Perumal, N., & Zakariya, M. A. (2017). **Design of microstrip patch antenna at 900 MHz for charging mobile applications.** Journal of Engineering and Applied Sciences, 12(4), 988-993.
- Al-Khaffaf, D. A. J., & Alsahlany, A. M. **A RETURN LOSS IMPROVEMENT OF SLOTTED SQUARE MICROSTRIP INSET-FEED PATCH ANTENNA.**
- Ayoub, W., Samhat, A. E., Nouvel, F., Mroue, M., & Prévotet, J. C. (2018). **Internet of mobile things: Overview of lorawan, dash7, and nb-iot in lpwans standards and supported mobility.** IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21(2), 1561-1581.
- Balanis, C. A. (2016). **Antenna theory: analysis and design.** John wiley & sons.
- Beyene, Y. D., Jantti, R., Ruttik, K., & Iraj, S. (2017, March). **On the performance of narrow-band Internet of Things (NB-IoT).** In 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) (pp. 1-6). IEEE.
- Chen, J., Hu, K., Wang, Q., Sun, Y., Shi, Z., & He, S. (2017). **Narrowband internet of things: Implementations and applications.** IEEE Internet of Things Journal, 4(6), 2309-2314.
- Hoglund, A., Lin, X., Liberg, O., Behravan, A., Yavuz, E. A., Van Der Zee, M., ... & Eriksson, D. (2017). **Overview of 3GPP release 14 enhanced NB-IoT.** IEEE network, 31(6), 16-22.
- Identify as “**Thailand IoT Industry White Paper, IoT Technologies, Ecosystem and Application Development Guide**”, Thailand, August 2019.

- Islam, M. S., Ibrahimy, M. I., Motakabber, S. M. A., & Hossain, A. Z. (2018, September). **A Rectangular Inset-Fed Patch Antenna with Defected Ground Structure for ISM Band**. In 2018 7th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE) (pp. 104-108). IEEE.
- Kamolklang, T., Junlasat, A., & Uthansakul, M. (2019, October). **NB-IoT System Performance Enhancement using Directional Antenna**. In 2019 11th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE) (pp. 1-6). IEEE.
- Khan, S., Malik, H., Alam, M., & Le Moullec, Y. (2019, January). **DORM: Narrowband IoT Development Platform and Indoor Deployment Coverage Analysis**. In Proceedings of the 2nd International Workshop on Recent Advances in Cellular Technologies and 5G for IoT Environments (RACT-5G-IoT 2019), Leuven, Belgium (Vol. 29).
- Kim, Y., & Lee, T. J. (2019). **V2IoT Communication Systems for Road Safety**. IEEE Wireless Communications Letters, 8(5), 1460-1463.
- Lauridsen, M., Kovács, I. Z., Mogensen, P., Sorensen, M., & Holst, S. (2016, September). **Coverage and capacity analysis of LTE-M and NB-IoT in a rural area**. In 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall) (pp. 1-5). IEEE.
- Lee, K. F., Luk, K. M., & Lai, H. W. (2017). **Microstrip patch antennas**. World Scientific.
- Malik, H., Khan, S. Z., Sarmiento, J. L. R., Kuusik, A., Alam, M. M., Le Moullec, Y., & Päränd, S. (2019, June). **NB-IoT Network Field Trial: Indoor, Outdoor and Underground Coverage Campaign**. In 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC) (pp. 537-542). IEEE.
- Matin, M. A., & Sayeed, A. I. (2010). **A design rule for inset-fed rectangular microstrip patch antenna**. WSEAS Transactions on Communications, 9 (1), 63-72.
- Moon, Y., Ha, S., Park, M., Lee, D., & Jeong, J. (2018, June). **A methodology of NB-IoT mobility optimization**. In 2018 Global Internet of Things Summit (GIoTS) (pp. 1-5). IEEE.
- Nyunt, S. Z. (2018). **Implementation of Microstrip Patch Antenna for Wi-Fi Applications**. American Journal of Computer Science and Technology, 1(3), 63-73.
- Pennacchioni, M., Di Benedette, M. G., Pecorella, T., Carlini, C., & Obino, P. (2017, September). **NB-IoT system deployment for smart metering: Evaluation of coverage and capacity performances**. In 2017 AEIT International Annual Conference (pp. 1-6). IEEE.

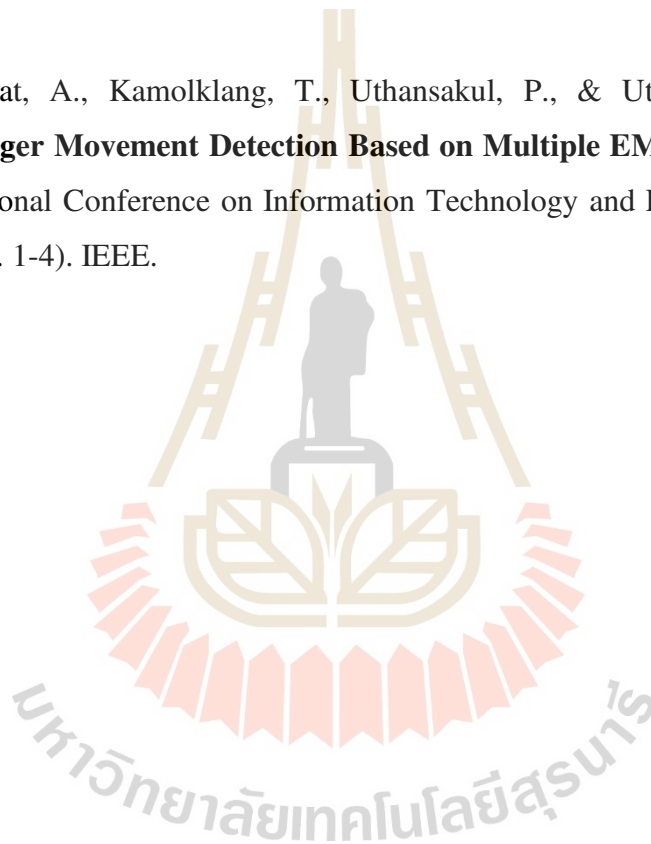
- Ratasuk, R., Mangalvedhe, N., Xiong, Z., Robert, M., & Bhatoolaul, D. (2017, September). **Enhancements of narrowband IoT in 3GPP Rel-14 and Rel-15**. In 2017 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN) (pp. 60-65). IEEE.
- Routray, S. K., & Hussein, H. M. (2019). **Narrowband IoT: An Appropriate Solution for Developing Countries**. arXiv preprint arXiv:1903.04850.
- Sarmah, K., Sarma, A., Sarma, K. K., & Baruah, S. (2015). **Dual-Band Microstrip Patch Antenna Loaded with Complementary Split Ring Resonator for WLAN Applications**. In Information Systems Design and Intelligent Applications (pp. 573-580). Springer, New Delhi.
- Tamilselvan, K. S. (2012). **Design of compact multiband microstrip patch antennas**. Journal of Global Research in Computer Science, 3(11).
- Teltonika (2019). **Mobile Signal Strength Recommendations**. [Online]. Available: <https://wiki.teltonika.lt/>
- Tong, F., Sun, Y., & He, S. (2018). **On positioning performance for the narrow-band Internet of Things: How participating eNBs impact**. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 15(1), 423-433.
- Wan, L., Zhang, Z., Huang, Y., Yan, Y., & Wang, J. (2017, December). **Performance Analysis of NB-IoT Technology for Indoor IoT Applications**. In 2017 International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication (ICCTEC) (pp. 1365-1369). IEEE.



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Kamolklang, T., Junlasat, A., & Uthansakul, M. (2019, October). **NB-IoT System Performance Enhancement using Directional Antenna**. In 2019 11th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE) (pp. 1-6). IEEE.

Junlasat, A., Kamolklang, T., Uthansakul, P., & Uthansakul, M. (2019, October). **Finger Movement Detection Based on Multiple EMG Positions**. In 2019 11th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE) (pp. 1-4). IEEE.



NB-IoT System Performance Enhancement using Directional Antenna

Tanatawan Kamolklang
School of Telecommunication
Engineering
Suranaree University of Technology
Muang, NakhonRatchasima, Thailand
30000
email: m6110536@g.sut.ac.th

Apiwat Junlasat
School of Telecommunication
Engineering
Suranaree University of Technology
Muang, NakhonRatchasima, Thailand
30000
email: m6110574@g.sut.ac.th

Monthippa Uthansakul
School of Telecommunication
Engineering
Suranaree University of Technology
Muang, NakhonRatchasima, Thailand
30000
email: mtp@sut.ac.th

Abstract - Nowadays NB-IoT has gained lots of attention from researcher so far as its many advantages. This paper shows an increase in NB-IoT performance when employing directional antenna. The designed microstrip antenna is fabricated for testing the NB-IoT performance in real circumstances. From experiment, the signal strength when employing the proposed antenna is higher comparing to the case of omni-directional antenna.

Keyword - NB-IoT, Directional Antenna, Improving signal strength.

I. INTRODUCTION

So far, Internet of Things (IoT) drives the future wireless communications and extends the boundaries of the Internet from computers operated by people to highly intelligent devices. Often, these devices are connected to Internet for remote diagnosis and control. In many cases, business users and private users can control their IoT applications via smart phones and tablets through mobile applications interacting with web servers. This new application is often referred to Low Power Wide Area Networks (LPWAN). It is a wireless technology which is designed for improving IoT devices in terms of coverage, battery life, and device complexity. One of the new standards is Narrow Band IoT (NB-IoT) [1].

NB-IoT is wireless network standard for LPWAN devices developed by the 3rd Generation partnership project (3GPP) to allow devices to be connected to each other through a mobile network. The NB-IoT is specially designed for IoT devices and solutions. It supports devices designed to work for using up to 10 years without changing batteries. Also, the network coverage radius per base station can be distributed longer than 10 kilometers [2].

For some cases in which the IoT devices are placed indoors or places where are difficult to access, the signal attenuation is pronounced. Moreover, if the centralized server is unable to determine the location of devices, the information transmitted from those devices is lost and power consumption is wasted. Hence, technologies with high efficiency and coverage, as well as the ability to manage the connection of many devices at the same time, must be deployed [3].

Therefore, the issue of antenna used for the IoT devices is very important to be considered for NB-IoT systems.

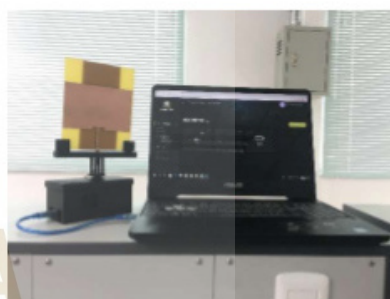


Fig.1 The architecture of NB-IoT system with proposed antenna.

Normally, wireless communication system needs a simple operation with small-sized, light weight and high gain equipment. The drawback of using omni-directional antenna for example dipole antenna connected to NB-IoT module is low of gain which causes a low system throughput. Furthermore, as the omni-directional antenna can radiate as well as receive signal in/from all directions, the co-channel inference from other directions become a major problem. In addition, as the IoT system is a point-to-point connection, an antenna which is able to spatially beam all signal to one destination is in focus in order to avoid lost in unused directions. Thus, directional antenna is an appropriate choice for NB-IoT system. One of interesting directional antennas is microstrip patch antenna which has an advantage of small size, low-profile, low-cost fabrication and light weight. The most popular microstrip patch antenna is a rectangular patch using transmission line method for improving the radiation performance [4].

In this paper, some experiments are set up to show the performance of utilizing microstrip patch antenna. The received signals are compared between employing the proposed antenna and omnidirectional antenna. The mechanical system is designed and implemented for controlling 360-degree rotation of directional antenna using stepping motor and microcontroller.

II. SYSTEM ARCHITECTURE

The system architecture is illustrated in Fig.1 which consists of 4 main parts. The first part is the microstrip patch antenna connected to the second part which is NB-IoT module and Arduino Uno. In addition, the third part used to control rotation of the directional antenna is stepper motor which is controlled by stepper motor driver board.

A. Antenna Design

This paper provides a procedure for designing microstrip patch antenna using transmission line method for improving the performance of NB-IoT. A microstrip patch antenna was chosen as it is low of size, profile, fabrication cost and weight. The microstrip patch antenna consists of a metallic patch above a ground plane and substrate placed between the patch and the ground plane [5]. In the antenna design, a substrate of FR-4 having the dielectric constant of $\epsilon_r = 4.3$ and thickness of 1.6 mm is applied. This design procedure is based on the empirical equations. The parameters of microstrip patch antenna are obtained from calculation as follows. The first step is to consider the width of patch (W_p). This dimension controls the input impedance in which the wider width gives a lower impedance [5]. The width and dimension of the designed antenna is determined using (1).

$$W_p = \frac{c}{2f\sqrt{(\epsilon_r+1)/2}} \quad (1)$$

Where:

- c - The speed of light, 3×10^8 m/s
- f - The operated frequency
- ϵ_r - The dielectric constant of substrate

Considering transmission line in terms of the wave propagation in the line, an effective dielectric constant (ϵ_{eff}) is obtained using (2).

$$\epsilon_{eff} = \frac{(\epsilon_r+1)}{2} + \frac{(\epsilon_r-1)}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1+12h_p/W_p}} \right) \quad (2)$$

Where:

- h_p - The height of patch (mm)
- W_p - The width of patch (mm)

After we calculate the effective dielectric constant, we get the efficient length of patch. The thicker substrate increases efficiency and provides larger width of strip. The effective length of patch (L_{eff}) is calculated using (3) effecting to the patch size.

$$L_{eff} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3)$$

The length extension (ΔL) is determined as shown in (4).

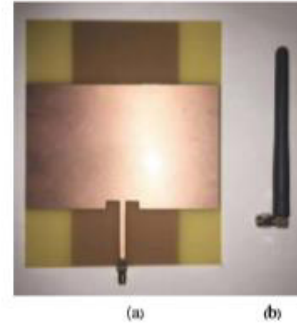


Fig.2 The proposed antenna used with NB-IoT module: (a) fabricated microstrip patch antenna (b) monopole antenna



Fig.3 measured return loss (S_{11}) of proposed microstrip antenna.

$$\Delta L = 0.412h_p \times \frac{(\epsilon_{eff}+0.3) \times \left(\frac{W_p}{h_p} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff}-0.258) \times \left(\frac{W_p}{h_p} + 0.813\right)} \quad (4)$$

So, the actual length of patch (L_p) is determined using (5).

$$L_p = L_{eff} - 2\Delta L \quad (5)$$

The designed structure of microstrip patch antenna in [6] is adopted. However, the antenna gain is relatively low therefore several parameters is herein adjusted for improving the performance of proposed antenna. Thus, the final height and width of substrate is 150 mm and 120 mm, respectively. Also, the height and width of patch is 102 mm and 120 mm, respectively. Note that the antenna structure is designed at 900 MHz.

After the microstrip antenna was designed, the prototype of designed antenna was fabricated using FR-4 printed circuit board with dielectric constant of 4.3 and substrate thickness of 1.6 mm as shown in Fig.2. The measured result for return loss (S_{11}) is shown in Fig. 3 in which the proposed antenna gives a return loss of -23.29 dB at 900 MHz. Fig. 4 also

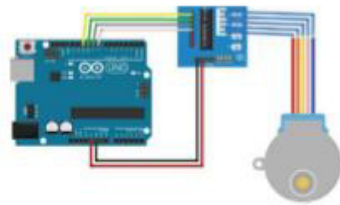


Fig.5 28BJY-48 stepper motor with ULN2003 driver and Arduino Uno.

presents the measured radiation patterns compared with the simulated ones. As we can see, both simulated and measured radiation patterns have a good agreement. However, radiation pattern cannot completely indicated the system performance. Therefore, the additional checks from the existing NB-IoT system have be performed. Considering the comparison between the proposed antennas and the omnidirectional antenna, signal strength representing both signal quality and throughput is an indicator to show system performance, which will be detailed in next section.

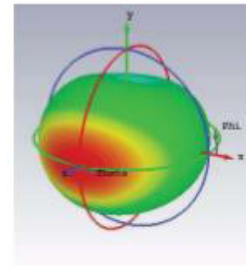
B. Stepper Motor and Driver Board

The stepper motors are used in various types of equipment for accurately rotation angle and speed control using pulse signals. The stepper motors generate high torque with a compact body and hold their position. For the application in this paper, we chose 28BJY-48 stepper motor with ULN2003 driver for rotation of the antenna seen in Fig.5.

A stepper motor is an electromechanical device which transforms electrical pulses to mechanical movements. The rotation of the motor is directly related to the used input pulse. The sequence of the used pulses is directly related to the direction of motor shafts rotation. The speed of the motor shafts rotation is directly related to the frequency of the input pulses and the period of rotation is directly related to the number of applied input pulses. One of the most advantages of a stepper motor is ability to be accurately controlled in an open loop system which means no feedback information about position making the motor simpler and less costly to control.

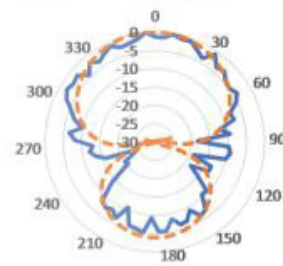
The stepper motor used in this paper is the 28BJY-48 stepper motor. The motor has a 4-coil unipolar arrangement and each coil is fed for 5 V. So, it is easy to control with microcontrollers. These motors have a stride angle of $5.625^\circ/64$ which means the motor use 64 steps to complete one rotation and every step cover 5.625 degrees. It is a stepper motor with decent torque. So, it is suitable for using in this paper. (7)

The ULN2003 stepper motor driver board provides a direct drive interface between microcontroller and the stepper motor. This board has several parts that has five wire sockets where the cable from the stepper motor is connected and four step indicator LEDs to indicate the light which coil is currently powered. On the other part, it has a motor on / off



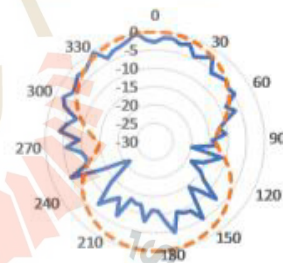
(a) simulated 3D radiation pattern.

— Experiment — Simulation



(b) H-plane pattern.

— Experiment — Simulation



(c) E-plane pattern.

Fig.4 Radiation pattern of proposed microstrip antenna.

jumper keeping it on to enable power to the stepper. There are two pins below the four resistors where power is provided to the stepper. The board can supply between 5V to 12V to the motor from an independent power supply. In the middle of the board, there is the ULN2003 chip. And there are the four control inputs connected to four Arduino digital pins. (8)



Fig.6 The DEVIO NB-SHIELD connected on Arduino Board

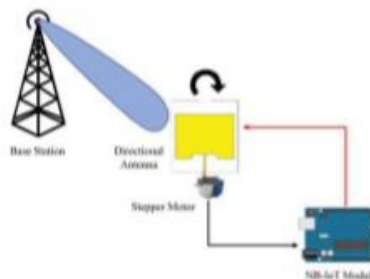


Fig.8 Block Diagram of NB-IoT system with Directional Antenna

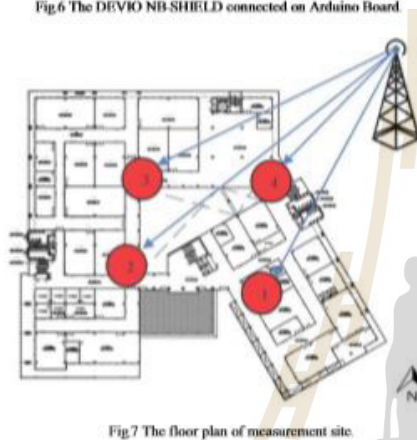


Fig.7 The floor plan of measurement site.

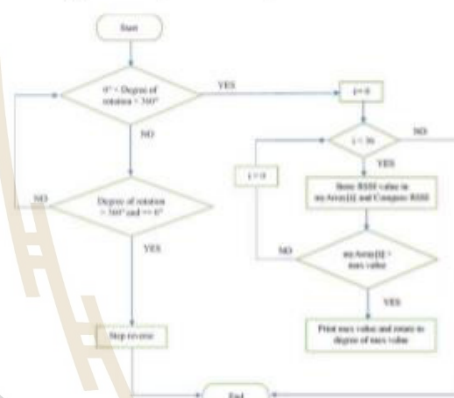


Fig.9 Flowchart of algorithm used to determine the best received signal direction.

C. Arduino Uno Board

The Arduino Uno is a microcontroller board based on the ATmega328. It has 14 digital input/output pins which are 6 pins can be used as PWM outputs, 6 analog inputs, a 16 MHz crystal oscillator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller connecting it to a computer with a USB cable or power it with an AC-to-DC adapter or battery to get started. The Uno differs from others that it does not use the FTDI USB-to-serial driver chip. Instead, it features the Atmega8U2 programmed as a USB-to-serial converter [9].

D. NB-IoT Module

NB-IoT module is used in this paper which is a DEVIO NB-Shield I with the Quectel BC95 chip on the LTE Cat NB1 (NB-IoT) network, operated at 900MHz which transmits data in single tone, 24kbps downlink and uplink 15.625 kbps. The utilized protocol is UDP and CoAP which have SIM on board and use Serial Command via UART.

III. MEASUREMENT AND RESULTS

A. Measurement Setup

The proposed antenna is connected to NB-IoT module as seen in Fig. 6. The signal strength is recorded and analyzed by algorithm. Considering the comparison between the designed antenna and an omnidirectional antenna which is 3 dB_i dipole antenna. Furthermore, the advantage of directional antenna for the proposed antenna can determine the best received signal direction. The proposed antenna connected to NB-IoT system are tested at the 3rd level of Sirindhorn Witsawaphat building, Suranaree university of technology, Thailand. The floor plan of the building and the measurement points are shown in Fig. 7. The first point (#1) is a lab-office surrounded by many thick walls, which was chosen to show the case of weak signal. Next point (#2) is located in indoor pathway which consists of three thick walls. The third point (#3) is an open pathway and two thick walls. Finally, the last point (#4) is an open space in the building, which was chosen

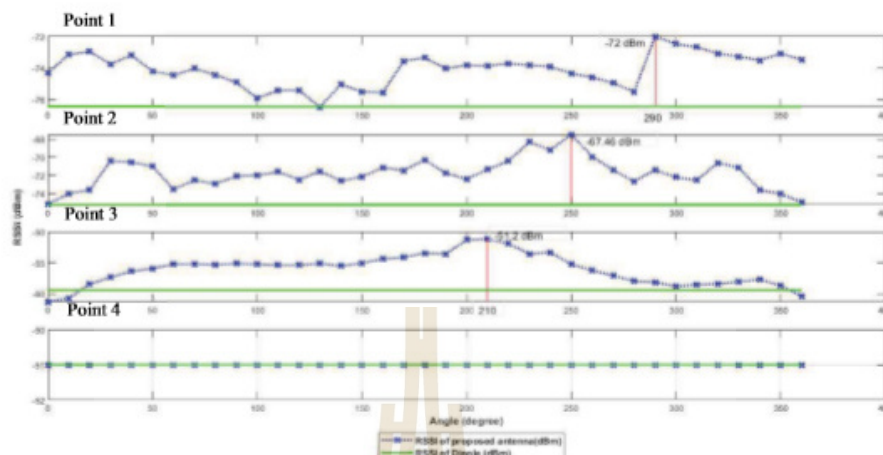


Fig. 10 The result of signal strength for changing of desired signal direction at each point.

to show the case of strong signal. At each point, the antenna is rotated for 360 degrees using stepper motor for measuring the signal strength value. These data will be analyzed to find the best received signal direction.

B. Algorithm to Control Stepper Motor with NB-IoT and Arduino Uno

As seen in Fig. 8 (block diagram), the antenna receives signal from the base station and conveys the signal to microcontroller which contains Arduino and NB-IoT module. Then, the microcontroller stores the signal strength value and degree of rotation every 10 degrees, which means that we can store 36 values in one round. The signal strength values which are RSSI are compared by the algorithm implemented in the microcontroller. The main program makes an infinite loop which decides the maximum signal strength as the flowchart is shown in Fig. 9. These values are compared with previously stored values and when we give the maximum signal strength values, the stepper motor will rotate to the direction that antenna can receive maximum signal strength. The result of signal strength for changing of desired signal direction is shown in Fig. 10.

C. Measured Results

At point #1 which is a lab office surrounded by thick walls, the maximum signal strength is 72 dBm when employing the proposed antenna while the monopole antenna provides the received signal of 77.4 dBm. Obviously, the signal strength improvement of 5.4 dB is obtained when employing the proposed antenna design. For the case of point #2 where is indoor pathway, the received signal strength is higher comparing to point #1. The signal strength improvement of approximately 7.8 dB is achieved. The proposed antenna provides the maximum signal strength of 67.46 dBm in

direction of 250 degrees while the monopole antenna provides the signal strength of only 75.25 dBm. For the case of point #3 where is indoor pathway but there are lesser walls than point #2, the signal strength is higher than the signal received at point #2. The maximum signal strength is 51.2 dBm in direction of 210 degrees employing the proposed antenna while the monopole antenna provides the signal strength of 59.4 dBm. For this case, the signal strength improvement of 8.2 dB is achieved. In case of the desired point #4 which is open space in building, the maximum signal strength is 51 dBm in all direction of presented antenna including the monopole antenna. It is obvious that although the devices are moved to other places, stepper motor still rotate to find the best received signal direction. And signal strength of the proposed antenna equipped to NB-IoT module at any point where is not open space is higher than the ones from monopole antenna. The average value indicates that we can improve signal strength up to 7 dB over the use of omnidirectional antenna. So, the proposed method to control the direction of beam can improve the performance of the antenna for NB-IoT.

IV. CONCLUSION

This paper has reported the comparison between the proposed antennas and omnidirectional antenna which is employed in NB-IoT module. The received signal strength of proposed antenna is higher than the signal strength from monopole antenna as the property of directional radiation for proposed antenna. We can improve signal strength up to 7 dB over the use of omnidirectional antenna. So, using directional antenna can improve the performance of NB-IoT system.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by Kittibundit Scholarship from Suranaree University of Technology.

REFERENCE

- [1] L. Feltrin, M. Condoluci, T. Mahmoodi, M. Dohler, and R. Verdone. "NB-IoT: Performance Estimation and Optimal Configuration". *European wireless 2018*; 2-4 May 2018; Catania, Italy; 2018. p.50-55.
- [2] A. Höglund, X. Lin, O. Liberg, A. Behravan, E.A. Yavuz, M. V. D. Zee, Y. Sui, T. Tirronen, A. Ratilainen, and D. Eriksson. "Overview of 3GPP Release 14 Enhanced NB-IoT". *IEEE network*; November-December 2017; 2017. p.16-22.
- [3] S. Ruepp, A. C. Mateo, K. M. Malarski, J. Thrane, and M. N. Petersen. "Internet of Things Connectivity in Deep Indoor Environments". *The 9th International Conference on Networks of the Future (NoF 2018)*; November 19-21, 2018; Poznań, Poland; 2018. p.96-100.
- [4] T. Suganthi, Dr. S. Robinson, G. Kanimolhi, and T. Nagamoorthy. "Design and Analysis of Rectangular Microstrip Patch Antenna for GSM Application". *IJSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol. 1 Issue 2, April 2014. p.245-249.
- [5] E. M. Ali, N. Z. Yahaya, N. Perumal and M. A. Zakariya. "Design of Microstrip Patch Antenna at 900 MHz for Charging Mobile Applications". *Journal of Engineering and Applied Sciences* 12(4); 2017. p.988-993.
- [6] J. Grosinger and M. Fischer. "Evaluating On-Body RFID Systems at 900 MHz and 2.45 GHz". *Fourth International EURASIP Workshop on RFID Technology*; 2012. p.52-58.
- [7] Stepper Motor 5V 4-Phase 5-Wire & ULN2003 Driver Board for Arduino [online]. Available from http://www.geeetech.com/wiki/index.php?title=Stepper_Motor_5V_4-Phase_5-Wire_%26_ULN2003_Driver_Board_for_Arduino&oldid=1999 [Accessed June 2019].
- [8] Four Phase ULN2003 Stepper Motor Driver PCB [online]. Available from <https://www.makerguides.com/wp-content/uploads/2019/04/ULN2003-Stepper-Motor-Driver-PCB.pdf> [Accessed June 2019].
- [9] S. Angalaeswari, D. Kumar, A. Kumar, and S. Bhadoriya. "Speed Control of Permanent Magnet (PM) DC Motor Using Arduino and LabVIEW". *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*; 2016.

Finger Movement Detection Based on Multiple EMG Positions

Apiwat Junlasat
School of Telecommunication
Engineering
Suranaree University of
Technology
Muang, NakhonRatchasima,
Thailand 30000
email: m6110574@g.sut.ac.th

Tanatawan Kamolklang
School of Telecommunication
Engineering
Suranaree University of
Technology
Muang, NakhonRatchasima,
Thailand 30000
email: m6110536@g.sut.ac.th

Pecrapong Uthansakul
School of Telecommunication
Engineering
Suranaree University of
Technology
Muang, NakhonRatchasima,
Thailand 30000
email: uthansakul@sut.ac.th

Monthippha Uthansakul
School of Telecommunication
Engineering
Suranaree University of
Technology
Muang, NakhonRatchasima,
Thailand 30000
email: mtp@sut.ac.th

Abstract— The use of ElectroMyoGraphy (EMG) has been widely applied to many applications. To further develop more sophisticated applications, the more advanced techniques of EMG detections have to be studied. So far there are a few works to study the detection of finger movements using EMG. However, they cannot provide the exact solution of finger detection using only one EMG position. Therefore, this paper presents the finger movement detection based on multiple EMG positions. The investigation is carried out by using Myoware muscle sensors to record EMG signals. The measured EMG signals are captured and processed in a low computational processing unit. The results indicate the successful finding of finger movement detection based on multiple EMG positions.

Keywords—EMG, Finger Movement, Detection

I. INTRODUCTION

So far, ElectroMyoGraphy (EMG) has been widely used in engineering filed as it can represent the response of muscle movement [1]. The signal strength of EMG signal can be measured by electrodes, which varies according to the position of muscle and movement. The EMG signal amplitude is in the range of $\pm 500\text{mV}$. Also, from literatures, the utilized frequency is from 6 to 500 Hz but the most effective one can be found between 20 to 150 Hz [2-3]. The work presented in [4] has indicated that the EMG signal is relatively sensitive to the muscle movement. So, the volunteers have to be relax their bodies before performing the signal recording in order to get the accurate EMG signal and also to avoid the interference from adjacent muscle. So far, Myoware Muscle Sensor has been used to record EMG signal. Then, the recorded signal is passed to the processing boards for performing some computational methods. The work presented in [5] has used Arduino employing Support Vector Machine (SVM) to monitor the muscle movement and also utilized Multi-Input and Multi-Output Nonlinear ARX model (MISO-NARX model) to analyze the angle of movement. From literatures, all detections of finger movement have been studied based on the one position of EMG sensor. This cannot provide the exact solution to detect each finger movement. For near future application, the use of finger movement detection will become more interesting to apply on bionic devices. Hence, the new finding on finger movement is still on focus.

In this paper, the EMG signal strengths measured with many positions have been studied according to each finger movement. Also, an algorithm with low signal processing is

proposed to decrease the burden and cost of processing boards. The experimental setup is described in next section which is followed by the section of results and discussion. Then, the conclusion of this paper is given in Section IV.

II. EXPERIMENTAL SETUP

A. Measurement Method

For this research work, a volunteer (male, 23 years old, 175 cm in height, 56 kg in weight) who does not have any problem involving the muscle and nerve in superficial flexors of the forearm. While performing the signal record, the volunteer has to relaxingly sit on insulated chair as there is no metal or conductor on the chair to avoid some error during the measurement.

EMG/ECG Foam Solid Gel Electrodes are safely used to stick the electrodes with the volunteer's arm. The 3 electrodes are connected to MyoWare Muscle Sensor to measure voltages from muscles when they stretch and shrink, as shown in Fig. 1. Note that these voltages represent the EMG signal strength.

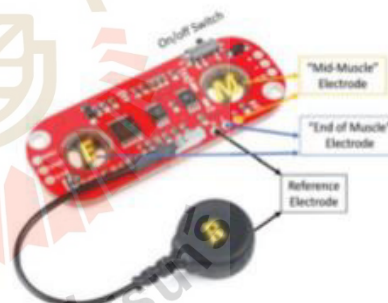


Fig. 1. MyoWare Muscle Sensor [6].

The MyoWare Muscle Sensor consists of Mid-Muscle Electrode and End of Muscle Electrode which are places at the position providing the highest voltage. Moreover, the Reference Electrode is used to refer the normal level of voltage from the volunteer.



Fig.3: Finger movement pattern.

The received EMG signal from MyoWare Muscle Sensor is passed to Arduino UNO via Jumper. Arduino UNO needs DC 3.3V supply from MyoWare Muscle Sensor and receives EMG signal from 'SIG' port at MyoWare Muscle Sensor as shown in Fig. 2. The received EMG signal is possibly valued between 0-675 which needs the (1) to convert to readable amplitude as follows.

$$Amplitude(V) = \frac{Value}{675} \times 3.3 \quad (1)$$

B. Finger Movement Pattern

This research work focuses on individual finger which separately stretches and shrinks in every 1-2 seconds. The finger movement pattern is shown in Fig 3. All EMG signals will be recorded. Then, the off-line processing will be performed afterwards. Fig. 4 shows the position, called Metacarpophalangeal joint, which is focuses on this research work. This joint is between metacarpal and phalanges which has a main function for picking up things.



Fig. 4: The area of finger movement study [7].

The positions for attaching the electrodes have been selects for 5 position on superficial flexors of the forearm as shown in

Fig. 5. Actually, there are more than 100 positions that were studied in this work but only 5 positions present the best combination for finger movement detection.

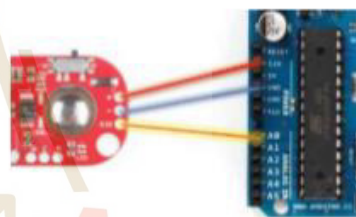


Fig. 2. MyoWare Muscle Sensor connected to Arduino UNO.

C. EMG Recording

Software named as Processing 3.4 is used to record EMG signal given from MyoWare Muscle Sensor and Arduino UNO. The recorded data contains date/month/year, EMG signal strength and the EMG signal number. Fig.6 shows the photograph of an example of measurement using MyoWare Muscle Sensor.



Fig. 5. Selected 5 positions for attaching EMG sensors.



Fig. 6: photograph of an example of measurement using MyoWare Muscle Sensor.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

MATLAB programming is used to evaluate the recorded data (EMG signals) showing the max value and average value between 1 – 160 milliseconds. The average value can be calculated using (2) as follows.

$$\text{Average Value} = \frac{\sum_{t=1}^{160} \text{EMG signal}}{t} \quad (2)$$

Considering the change between max value and average value obviously indicates that the movement of fingers. This change can be calculated using (3) as follows.

$$\text{Peak to Average} = \text{Max Value} - \text{Average Value} \quad (3)$$

Also, the change of EMG signal with respect to average value can be shown as it is creasing or decreasing using (4).

$$\text{Increasing and Decreasing} = \frac{\text{Emg Signal} - \text{Value Average}}{\text{Value Average}} \times 100 \quad (4)$$

Fig. 7 shows the example results after all calculation with those above 4 equations for the use of moving a ring finger when EMG sensors are placed at position 1 and 2. It can be seen that in the first interval (10-30 ms) the signal amplitude is suddenly high. This is because the ring finger is moving. However, in the second interval (30-120 ms) the signal amplitude is low but not stable. For the last interval (120-140 ms), the signal amplitude is temporarily a bit high and then suddenly lower than the case of the second interval. This occurs when the volunteer unfurl the finger.

When comparing between Position 1 and 2, the amplitude of EMG signal at Position 1 is much lower than Position 2. Then,

it can be seen that both signals are different in level. In order to make a fair judgement, then the use of Increasing and Decreasing percentage is applied. After a whole measurement, it has to be noted that the threshold for detecting should address on the judgment criteria including with the peak to average level at more than 700 mV and the level of Increasing and Decreasing more than 150 %.

After the judging criteria has been given for peak to average and Increasing/ Decreasing, the comparison between all EMG signals from each finger movement versus 5 positions is illustrated as shown in Fig. 8. It is simply implied that the detection is occurred if the signal is higher than criteria for both parameters. From the results in Fig. 8, there are some data which can pass the Judging Criteria (straight line). The overall results are shown in Table 1. In this table, 'Yes' means that Peak to Average and Increasing/Decreasing are both Yes. On the other hands, 'No' means that Peak to Average or Increasing/Decreasing is both No.

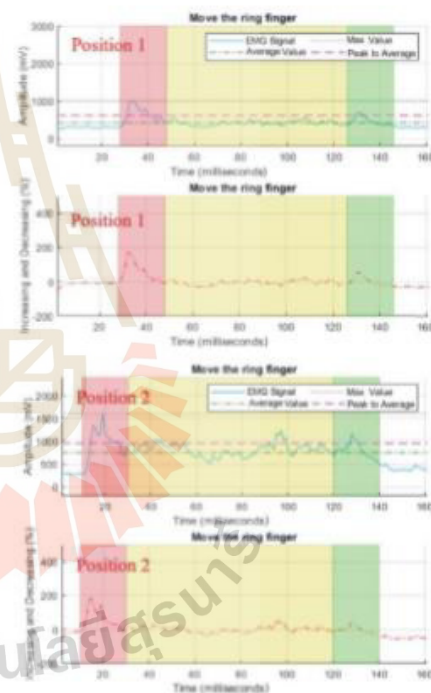


Fig. 7: Example of measured EMG signals at Position 1 and 2.

TABLE 1. Analysis of the response between EMG positions and finger movement.

Data Type	Peak to Average					Increasing and Decreasing					Overall Judging Criteria				
Finger Movement	Little	Ring	Middle	Index	Thumb	Little	Ring	Middle	Index	Thumb	Little	Ring	Middle	Index	Thumb
Position 1	No	No	Yes	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	No	Yes	No	No
Position 2	No	Yes	No	No	No	No	Yes	No	No	No	No	Yes	No	No	No
Position 3	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No
Position 4	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	Yes	No
Position 5	No	No	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	No	Yes

As seen in Table 1, it can be used for detecting a finger movement by 5 EMG positions. For example, if Position 2 responds with "Yes" and the rests are "No", then it is the movement of middle finger. Also, it is very easy to implement by using overall judging criteria into a low processing unit. Then it can be applied to any devices using this finding to detect the movement of each finger.

IV. CONCLUSION

This paper has shown the judging criteria for detecting finger movement by using multiple EMG signal analysis. This new finding is able to apply to a low processing unit to reduce the system cost. However, the experiment focuses only individual finger movement. For the future works, simultaneous finger movement is interesting to be considered.

REFERENCES

- [1] M. A. Osaka and H. Hu, "Myoelectric control system-A survey," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 2, no. 4, pp. 275-294, 2007.
- [2] P. Konrad, "ABC of EMG – A Practical Introduction to Kinesiological Electromyography," Noraxon U.S.A. Inc., Version 1.4, March 2006.
- [3] E. Huijgen, "Noise in biopotential recording using surface electrodes," University of Amsterdam, Section Medical Physics, S-915, 2000.
- [4] L. Marchal-Crespo and D. Reinkensmeyer, "Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury," *J. Neuroeng. Rehabil.*, 6:20, 2009.
- [5] Hiroki, R., & Iwase, M. (2017, December). Hand and finger control of myo-prosthesis based on motion discriminator and voluntary control. In 2017 11th Asian Control Conference (ASCC) (pp. 1361-1366). IEEE.
- [6] Walter Lee (2018) An Unofficial Introductory Tutorial to MyoWare Muscle Sensor Development Kit [online]. Available from: <https://medium.com/@tecx5202/an-unofficial-introductory-tutorial-to-myoware-muscle-sensor-development-kit-c2169948ef3> [Accessed June 2019]
- [7] Len Lapore (2012) Kinds of joints [online]. Available from: https://www.slideshare.net/Len_Lapore/kinds-of-joints [Accessed June 2019].

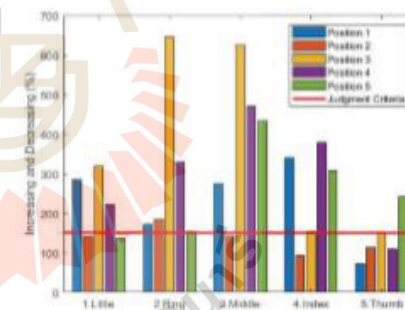
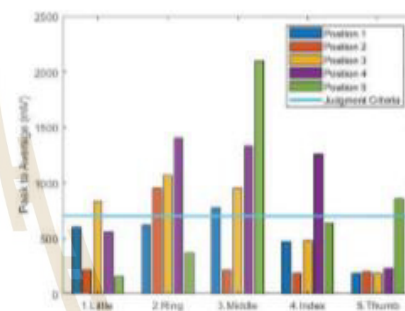


Fig. 8. Comparison between all EMG signals from each finger movement versus 5 positions

ประวัติผู้เขียน

นางสาวชนตวรรณ กมลกลาง เกิดเมื่อวันที่ 23 ตุลาคม พุทธศักราช 2538 ภูมิลำเนาอยู่ที่ จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจาก โรงเรียนเมืองนครราชสีมา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนสุรนารีวิทยา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากนั้นได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้รับทุนสนับสนุน จากทุนกิตติบัณฑิต

ระหว่างการศึกษาได้นำเสนอบทความเข้าร่วมประชุมในงานประชุมนานาชาติ 11th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE) ณ โรงแรมพัทยอินน์ จังหวัดชลบุรี วันที่ 10-11 พฤศจิกายน 2562



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี