

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ระบบระบุลักษณะของวัตถุด้วยคลื่นความถี่วิทยุหรือระบบอาร์เอฟไอดี (RFID: Radio Frequency Identification System) เป็นเทคโนโลยีที่กำลังเข้ามามีบทบาทในระบบหลายระบบ เพราะนอกจากจะมีประสิทธิภาพในหลายๆด้าน เช่น สามารถอ่านค่าข้อมูลจากป้ายข้อมูลหรือแท็กได้หลายๆ ตัวพร้อมกัน สามารถอ่านจากระยะไกลและไม่ต้องอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันกับเครื่องอ่านข้อมูล การอ่านข้อมูลมีความเร็วสูงและยังทนทานต่อสภาพแวดล้อมกว่าระบบรหัสแท่งหรือบาร์โค้ด (Barcode) แบบเดิม ดังนั้นระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุจึงนำมาประยุกต์ใช้ในงานหลากหลายประเภท [1] ตัวอย่างเช่น การรักษาความปลอดภัย ที่มีการใช้บัตรสำหรับผ่านเข้าออกพื้นที่ การคมนาคม เช่น การเก็บค่าบริการทางด่วนหรือในด้านการปศุสัตว์ที่มีการติดหรือฝังอุปกรณ์ระบุระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุกับตัวสัตว์ เพื่อบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับตัวสัตว์และสามารถระบุหรือติดตามตัวสัตว์นั้นได้

ปัจจุบันคลื่นความถี่พาหะสำหรับใช้งานในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ [1]-[2] จะอยู่ในช่วงความถี่ ISM (Industrial Scientific and Medical) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดใช้ในงานเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์และการแพทย์ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้โดยไม่รบกวนกับความถี่ที่ใช้ในระบบสื่อสาร สามารถแบ่งออกเป็นย่านความถี่หลักๆ ได้ 4 ย่าน คือ

ย่านความถี่ต่ำ (LF: Low Frequency) 125/ 134.2/ 135 kHz

ย่านความถี่สูง (HF: High Frequency) 13.56 MHz

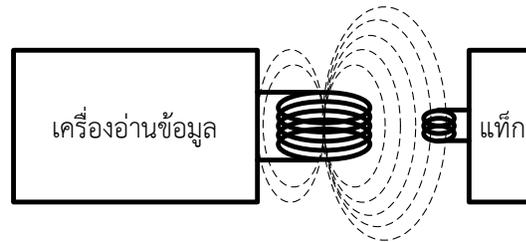
ย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF: Ultra High Frequency) 433/ 860/ 920 ถึง 925/ 960 MHz

ย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave) 2.4/ 5.8 GHz

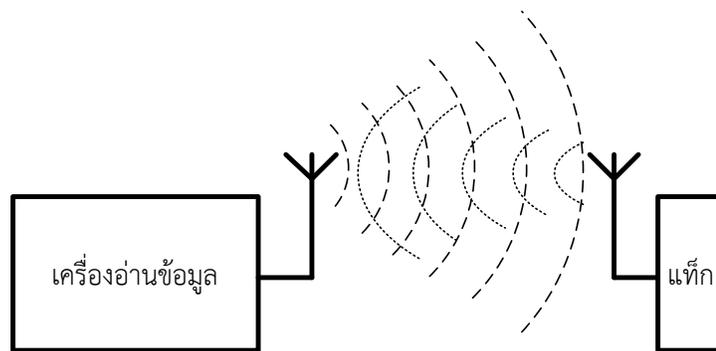
ซึ่งแต่ละย่านความถี่ก็จะมีลักษณะ คุณสมบัติและราคาของอุปกรณ์ที่ต่างกัน จึงทำให้แต่ละย่านความถี่เหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันด้วย สำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในย่านความถี่สูงยิ่งนั้น แต่ละประเทศก็จะอนุญาตให้ใช้ความถี่แตกต่างกัน [3] เช่น ยุโรป กำหนดให้ใช้ในช่วง 866 MHz ถึง 869 MHz อเมริกาเหนือและใต้กำหนดให้ใช้ในช่วง 902 MHz ถึง 928 MHz ญี่ปุ่นกำหนดให้ใช้ในช่วง 950 MHz ถึง 956 MHz ส่วนในประเทศไทยนั้นกำหนดให้ใช้ในช่วง 920 MHz ถึง 925 MHz [4]

ในการสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูล (Reader) กับป้ายข้อมูลหรือแท็ก (Tag) นั้นเป็นการสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless Communication) จะมีหลักการอยู่สองหลักการดังแสดงในรูปที่ 1.1 คือ วิธีแรกเป็นการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Inductive Coupling หรือ Proximity Electromagnetic) เป็นหลักการที่ใช้ใน

ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง ซึ่งมีระยะการอ่านแท็กที่สั้น และความเร็วในการอ่านข้อมูลต่ำ ส่วนวิธีการที่สองเป็นการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Propagation Coupling) เป็นหลักการที่ใช้ในย่านความถี่สูงยิ่งและย่านความถี่ไมโครเวฟ ระยะในการอ่านแท็กจะมีระยะไกลและความเร็วในการอ่านข้อมูลสูงกว่าวิธีการแรก



(ก) วิธีเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



(ข) วิธีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

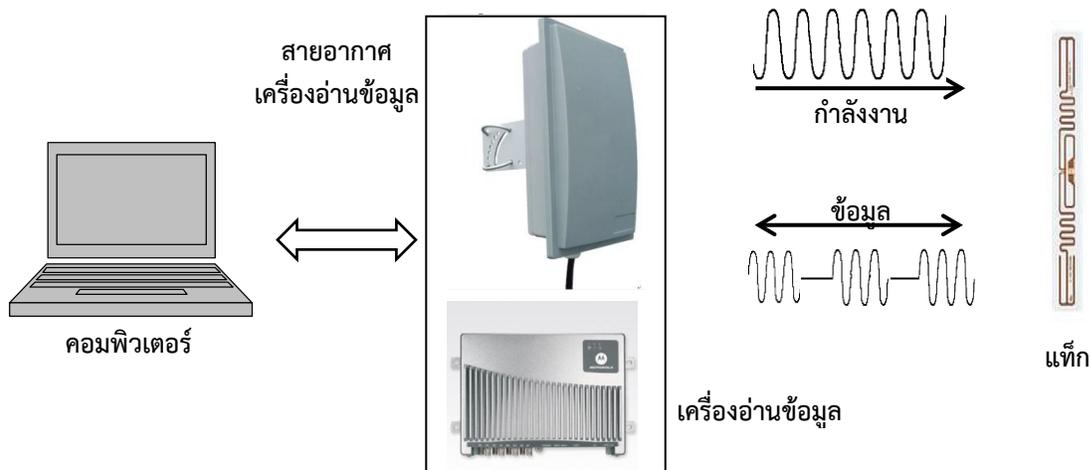
รูปที่ 1.1 ลักษณะการสื่อสารข้อมูลระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก [2]

ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุสิ่งหนึ่งที่สำคัญมากต่อประสิทธิภาพของระบบคือ สายอากาศ เพราะสายอากาศเป็นส่วนที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและแท็ก ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานสำหรับบางระบบ สายอากาศจึงมีความต้องการความเร็วในการอ่านข้อมูลที่สูง ระยะทางในการสื่อสารที่ไกล มีขนาดเล็ก รวมทั้งโครงสร้างของสายอากาศต้องไม่ซับซ้อนและราคาถูก ดังนั้นย่านความถี่สูงยิ่งจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้กับระบบดังกล่าวและเนื่องจากสายอากาศโดยทั่วไปมีโครงสร้างที่ทำให้การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กสามารถติดต่อได้ในบางลักษณะการวางตัวของแท็กเท่านั้นซึ่งเป็นโพลาริซแบบเชิงเส้นหรือแบบวงรี ดังนั้นหากแท็กไม่ได้วางตัวในลักษณะที่เหมาะสม จะทำ

ให้ในการติดต่อสื่อสารมีระยะใกล้มากหรือไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้เลย โครงการวิจัยนี้จึงเสนอสายอากาศสำหรับย่านความถี่สูงยิ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสบนแผ่นระนาบกราวด์ โดยที่แผ่นบนเป็นแผ่นตัวนำตัดมุมแบบขั้นทั้งสองด้านที่ตรงข้ามกันและเจาะร่องเอียงคู่ สายอากาศป้อนสัญญาณด้วยโพรบแพร่กระจายคลื่น โพลาริซวงกลมและสายอากาศที่นำเสนอมีคุณลักษณะที่เหมาะสมดังนี้คือ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว มีการโพลาริซแบบวงกลมและมีอัตราขยายที่สูง เป็นต้น

1.2 ความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุกำลังได้รับความสนใจเพื่อนำไปใช้ในระบบหลายๆระบบ ซึ่งได้ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็วเพื่อนำไปแทนระบบบาร์โค้ดแบบเดิม ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุจะมีองค์ประกอบหลักๆ อยู่ 2 ส่วน ส่วนแรกคือ แท็กใช้ติดกับวัตถุต่างๆ ที่เราต้องการ โดยที่แท็กจะบันทึกข้อมูลของวัตถุนั้นเอาไว้ ส่วนที่สองคือ เครื่องอ่านข้อมูล มีหน้าที่ในการอ่านหรือเขียนข้อมูลภายในแท็กด้วยคลื่นความถี่วิทยุ หลักการทำงานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ คือ เครื่องอ่านข้อมูลจะทำการส่งสัญญาณวิทยุอย่างต่อเนื่องหรือเป็นจังหวะ หากมีแท็กเข้ามาในระยะการทำงานของเครื่องอ่านข้อมูล กล่าวคือแท็กได้รับสัญญาณคลื่นวิทยุที่ส่งมาจากเครื่องอ่านข้อมูลในระดับที่เพียงพอ แท็กก็จะทำงานและส่งข้อมูลกลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

เนื่องจากระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุเป็นระบบการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สายอากาศจึงมีความสำคัญต่อระบบ ดังนั้นสายอากาศที่จะนำมาใช้กับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุนั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบมีสมรรถนะในการใช้งานสูงสุด ซึ่งรูปแบบโครงสร้างแต่ละรูปแบบของสายอากาศก็จะเหมาะสมกับการทำงานที่แตกต่างออกไปและเนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศโดยทั่วไปนั้นสามารถติดต่อกับแท็กได้ในบางลักษณะการวางตัวเท่านั้น ดังนั้นการออกแบบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูล จึงมีความสำคัญมากเพื่อให้ได้ระยะการติดต่อสื่อสารที่ไกลขึ้นและสามารถติดต่อกับแท็กได้ทุกลักษณะการจัดวาง

ในประเทศไทยระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งนั้นมีการใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น ตามมาตรฐานและข้อกำหนดการจัดสรรช่วงความถี่ใช้งานนั้น จัดสรรให้ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งมีความถี่ใช้งานในช่วง 920 MHz ถึง 925 MHz ดังนั้นโครงการวิจัยนี้ฉบับนี้ได้นำเสนอสายอากาศที่จะนำมาใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งตามมาตรฐานประเทศไทย มีการโพลาริซ์เป็นแบบวงกลม อัตราขยายสูงและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยสายอากาศนั้นสามารถพัฒนาและใช้งานจริงได้ในอนาคต

1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตโครงการวิจัยนี้

โครงการวิจัยนี้ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบสายอากาศแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสป้อนสัญญาณด้วยโพรบเดี่ยวบนแผ่นระนาบกราวนด์สี่เหลี่ยมจัตุรัสและใช้เทคนิคการตัดมุมของตัวแพร่กระจายคลื่นร่วมกับการเจาะร่องเอียงคู่เพื่อแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบโพลาริซ์วงกลม เพื่อใช้สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่ต้องการคือ มีอัตราขยายที่สูง มีการแพร่กระจายคลื่นเป็นโพลาริซ์วงกลมที่ดี เพื่อใช้ในการติดต่อกับแท็กที่มีการวางตัวในลักษณะต่างๆ กัน และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทางที่เหมาะสมกับการใช้งาน นอกจากนี้รูปแบบและขนาดของสายอากาศต้องมีความเหมาะสมกับการใช้งานด้วย ในการศึกษาและวิจัยโครงการวิจัยนี้ฉบับนี้จะทำการศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ เช่น ขนาดของตัวแพร่กระจายคลื่น ขนาดของมุมตัดแบบขั้น ขนาดและมุมเอียงของร่องคู่บนตัวแพร่กระจายคลื่น เป็นต้น ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบสายอากาศให้มีคุณลักษณะและคุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยการวิเคราะห์จะอาศัยโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ปัญหาทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบสามมิติและผลที่ได้จากการจำลองจะนำไปสู่การสร้างสายอากาศต้นแบบที่นำเสนอ ดังนั้นโครงการวิจัยนี้ฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักในการพัฒนาสายอากาศแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสบนแผ่นระนาบกราวนด์ ให้มีระยะการสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและแท็กที่ไกลที่สุดและมีการแพร่กระจายคลื่นเป็นโพลาริซ์วงกลม

1.4 เนื้อหาของโครงการวิจัยนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัยและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของการศึกษา และขอบเขตงานวิจัย รวมถึงเนื้อหาของโครงการวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงพื้นฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ เช่น อุปกรณ์และคุณลักษณะของ อุปกรณ์ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ยานความถี่ใช้งานและมาตรฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ เป็นต้น และในบทนี้จะกล่าวถึงการทฤษฎีพื้นฐานออกแบบสายอากาศ ไมโครสตริป รวมถึงงานวิจัยที่มีมาก่อน

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ ซึ่งจะเริ่มด้วยการกำหนดรูปแบบของสายอากาศโดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานจากบทที่ 2 จากนั้นจึงจำลองแบบสายอากาศ ทำการปรับปรุงคุณลักษณะของสายอากาศด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์ของการตัดมุมและร่องคู่เพื่อหาค่าที่เหมาะสม และได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะตรงกับความต้องการของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศที่มีค่าพารามิเตอร์ตามที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 และดูผลกระทบของสมรรถนะของสายอากาศ เช่น $|S_{11}|$ อัตราส่วนแกน อัตราขยายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เป็นต้น จากนั้นเปรียบเทียบผลจากการทดสอบกับผลจากการจำลองที่นำเสนอในบทที่ 3

บทที่ 5 ในบทนี้อธิบายถึงการประเมินสมรรถนะและการประยุกต์ใช้งาน เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสายอากาศในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านกับแท็ก จากนั้นทำการวิเคราะห์ความสามารถของสายอากาศในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กในกรณีแท็กวางตัวอยู่นอกเหนือจากทิศ x y และ z

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวมทั้งหมดของโครงการวิจัยนี้ฉบับนี้ ข้อเสนอแนะต่างๆ สรุปข้อดีข้อเสียของสายอากาศ รวมถึงแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้กล่าวถึงความเป็นมา ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการทั่วไปของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ซึ่งประกอบด้วย [1]-[2] เครื่องอ่านข้อมูลและแท็กแบบต่างๆ หลักการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุกับแท็ก หลักการสื่อสารที่อาศัยหลักการกระจัดกระจายย้อนกลับ (Backscattering Communication) การเลือกใช้อุปกรณ์ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ และทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ [5]-[7]

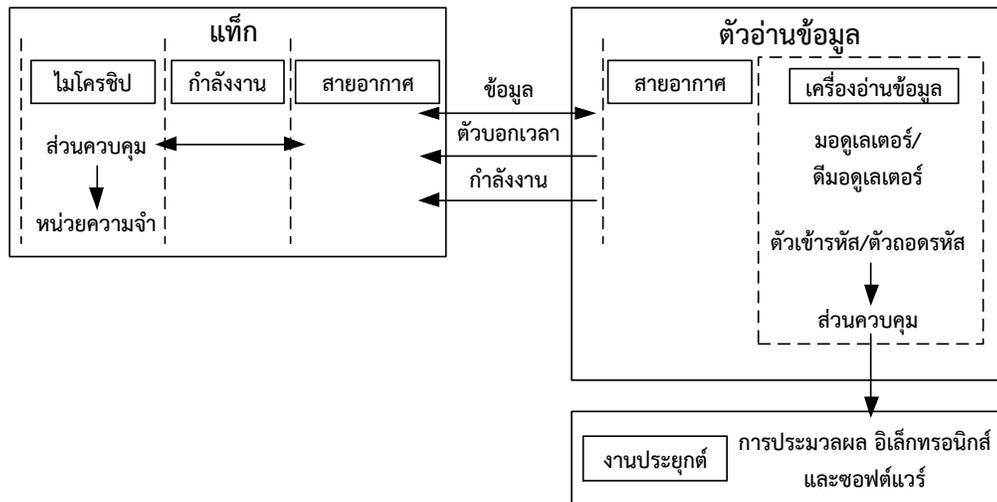
2.2 ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

ราวต้นศตวรรษที่ 20 หรือประมาณปี ค.ศ. 1922 ได้มีการทำเทคโนโลยีเรดาร์มาใช้ทางทหาร เพื่อระบุตำแหน่งและความเร็วของเครื่องบิน โดยใช้เครื่องรับส่งคลื่นวิทยุ (Radio Frequency) และนำข้อมูลมาวิเคราะห์ว่าเครื่องบินดังกล่าวเป็นของฝ่ายเดียวกันหรือของฝ่ายศัตรู นับได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการนำเทคโนโลยีระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุหรือระบบอาร์เอฟไอดี (Radio Frequency Identification: RFID) มาใช้งาน หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาศักยภาพของเทคโนโลยีระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นจนเริ่มเป็นที่ยอมรับจากองค์กรทั่วไปโดยในปี ค.ศ. 1970 ได้เริ่มมีการนำเทคโนโลยีระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุมาใช้ในการเก็บข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการติดตามและตรวจสอบวัตถุโดยใช้ป้ายอิเล็กทรอนิกส์ฝังไมโครชิปเก็บข้อมูลโดยติดไว้กับวัตถุ และใช้เครื่องอ่านแบบไร้สายที่สื่อสารกันด้วยคลื่นวิทยุในการอ่านและเขียนข้อมูล เช่น ประวัติ วันเวลาในการผลิต วันหมดอายุ หรือราคาสินค้า เป็นต้น

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมาได้มีการพัฒนาระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุอย่างต่อเนื่อง โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการนำไปใช้งานแทนระบบรหัสแท่งหรือบาร์โค้ด (Barcode) โดยจุดเด่นของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุอยู่ที่การอ่านข้อมูลจากแท็กได้พร้อมกันหลายๆแท็กแบบไร้สัมผัส สามารถอ่านค่าได้แม้อยู่ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี ทนต่อความเปียกชื้น การกระทบกระแทก แรงสั่นสะเทือน และยังอ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูง โดยข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในไมโครชิปที่อยู่ในแท็ก

ปัจจุบันระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุนอกจากจะนำไปแทนระบบบาร์โค้ดแบบเดิมแล้ว ยังถูกนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆอีกมากมาย เช่น ใช้ในบัตรชนิดต่างๆ เช่น บัตรจอดรถ บัตรผ่านเข้าออกสถานที่ต่างๆ เป็นต้น ใช้ในการติดตามสินค้าเพื่อสะดวกต่อการตรวจสอบและป้องกันการสูญหาย ซึ่งรูปแบบแท็กสินค้านี้จะมีขนาดเล็กจนสามารถแทรกลงระหว่างชั้นของเนื้อกระดาษได้ หรือเป็นแคปซูลขนาดเล็กฝังไว้ในตัวสัตว์เพื่อบันทึกประวัติต่างๆและใช้ติดตาม เป็นต้น

เทคโนโลยีระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุเป็นระบบที่นำคลื่นวิทยุมาเป็นคลื่นพาห้ในการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สายระหว่างอุปกรณ์สองชนิด คือ แท็กและเครื่องอ่านข้อมูล โดยการนำข้อมูลที่ต้องการส่งมาผสมสัญญาณ (Modulation) กับคลื่นวิทยุแล้วส่งออกผ่านทางสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล



รูปที่ 2.1 แผนผังการทำงานของเทคโนโลยีระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ [8]

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าการทำงานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ นั้น เครื่องอ่านข้อมูลจะทำหน้าที่จ่ายกำลังงานรูปคลื่นความถี่วิทยุผ่านทางสายอากาศให้กับแท็ก ทำให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในแท็กทำงานและสามารถส่งข้อมูลจำเพาะกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูลเพื่อประมวลผลได้ เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนจึงขอเปรียบเทียบกับระบบบาร์โค้ด แท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุก็คือตัวบาร์โค้ดที่ติดกับฉลากสินค้า และเครื่องอ่านข้อมูลในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุก็คือเครื่องอ่านบาร์โค้ด โดยทั้งสองระบบจะแตกต่างกันตรงที่ ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุใช้คลื่นความถี่วิทยุในการอ่านและเขียนข้อมูล ส่วนระบบบาร์โค้ดจะใช้แสงเลเซอร์ในการอ่านข้อมูลที่เป็นรหัสแท่ง ซึ่งข้อเสียของระบบบาร์โค้ดคือ เครื่องอ่านจะต้อง

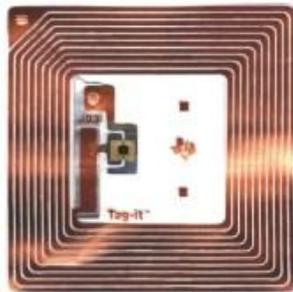
อ่านรหัสแท่งโดยไม่มีอะไรมาบังทัศนวิสัยในการอ่าน รหัสแท่งจะต้องอยู่ในเส้นตรงเดียวกันกับลำแสงที่ยิงจากเครื่องอ่าน ระยะการอ่านใกล้ และอ่านวัตถุได้ทีละชั้นเท่านั้น ซึ่งในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุสามารถแก้ไขปัญหาในระบบบาร์โค้ดได้ ดังนั้นระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุจึงเข้ามาแทนที่ระบบบาร์โค้ดในปัจจุบัน

2.2.1 แท็ก

แท็กหรือทรานสปอนเดอร์ (Transponder) ซึ่งมาจากคำว่าทรานสมิตเตอร์ (Transmitter) กับคำว่าเรสปอนเดอร์ (Responder) โครงสร้างภายในของแท็กจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ สายอากาศซึ่งเป็นขดลวดขนาดเล็กสำหรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและส่งพลังงานป้อนให้ส่วนของไมโครชิปทำหน้าที่เก็บข้อมูลของวัตถุ เช่น รหัสสินค้า ประวัติ วันเดือนปีที่ผลิต เป็นต้น แท็กที่มีอยู่โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด เช่น ชนิดกระดาษ แผ่นฟิล์ม และพลาสติก ขนาดและรูปร่างต่างๆของแท็กก็แตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำไปติด เช่น บัตร กระดุม เหรียญ ฉลากสินค้า และแคลปซูล เป็นต้น แต่โดยหลักการอาจแบ่งชนิดของแท็กตามกำลังงานของแท็กได้ 3 แบบ คือ แท็กแบบพาสซีฟ (Passive Tag) แท็กแบบแอ็กทีฟ (Active Tag) และแท็กแบบกึ่งแอ็กทีฟ (Semi-active Tag) ซึ่งแต่ละชนิดก็จะมี ความแตกต่างกันไปในเรื่องของการใช้งาน ราคา โครงสร้างและหลักการทํางาน ซึ่งจะอธิบายแยกเป็นหัวข้อดังนี้

2.2.1.1 แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบพาสซีฟ

แท็กชนิดนี้สามารถทำงานโดยไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากภายนอกใดๆ แสดงดังรูปที่ 2.2 เพราะภายในแท็กมีวงจรกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเล็ก ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟในตัวอยู่ทำให้การอ่านข้อมูลทำได้ไม่ไกลมากนัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแรงของเครื่องส่งและคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ ขนาดและรูปร่างของแท็กเป็นได้ตั้งแต่แท่งหรือมีขนาดเล็กจนแทบไม่สามารถมองเห็นได้ ไปจนถึงขนาดใหญ่สะดุดตา ซึ่งแต่ละแบบจะมีความเหมาะสมกับชนิดงานที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.2 แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบพาสซีฟ [9]

2.2.1.2 แท้กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบแอ็กทีฟ

แท้กชนิดนี้จะทำงานได้ ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ภายนอก เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรตัวส่งภายในแท้กและส่งข้อมูลไปยังเครื่องอ่านข้อมูล แท้กแบบแอ็กทีฟนี้จะมีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ ส่งสัญญาณได้ไกล แต่มีอายุการใช้งานที่สั้นและราคาสูง นิยมใช้กับเครื่องอ่านย่านความถี่สูงยิ่งหรือความถี่ไมโครเวฟแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แท้กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบแอ็กทีฟ [10]

2.2.1.3 แท้กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบกึ่งแอ็กทีฟ

แท้กชนิดนี้ทำงานจะทำงานได้ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรตัวส่งภายในแท้ก แต่อย่างไรก็ตามแท้กชนิดนี้ยังต้องอาศัยกำลังงานที่ได้รับจากเครื่องอ่านข้อมูลในการส่งข้อมูลกลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล แท้กแบบกึ่งแอ็กทีฟนี้มีระยะเวลาในการติดต่อสื่อสารที่ไกลกว่าแท้กแบบพาสซีฟแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แท้กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบกึ่งแอ็กทีฟ [11]

2.2.2 ประเภทของแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

อุปกรณ์แท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ประเภทต่างๆที่มีการผลิตใช้งานในกิจการต่างๆในปัจจุบัน โดยแยกกล่าวตามความแตกต่างของ โครงสร้างและการออกแบบเป็นสำคัญตามด้วยตัวอย่างประเภทของการประยุกต์ใช้งาน

2.2.2.1 แท็กแบบจานและเหรียญ (Disk and Coin)

แท็กจะถูกบรรจุอยู่ใน โครงสร้างวงกลมคล้ายจานหรือเหรียญและมีการเคลือบป้องกัน ไว้เป็นอย่างดี ดังรูปที่ 2.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท็กชนิดนี้มีตั้งแต่ไม่กี่มิลลิเมตรไปจนถึง 10 เซนติเมตร



รูปที่ 2.5 แท็กแบบจานและเหรียญ [12]

2.2.2.2 แท็กแบบกระเปาะแก้ว (Glass Housing)

แท็กชนิดนี้ได้รับการพัฒนาและผลิตขึ้นสำหรับใช้ฝังใต้ผิวหนังของสัตว์เพื่อใช้ในการติดตามข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแวดวงปศุสัตว์และการสาธารณสุข ตัวกระเปาะแก้วนั้นจะมีขนาดความยาวในช่วง 12 ถึง 32 มิลลิเมตร ดังในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แท็กแบบกระเปาะแก้ว [13]

2.2.2.3 แท็กแบบหุ้มพลาสติก (Plastic Housing)

นิยมเรียกกันในชื่อย่อว่า PP (Plastic Package) ได้รับการคิดค้นและพัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในกิจการอุตสาหกรรมบางประเภทที่มีความต้องการเฉพาะรูปแบบ แท็กแบบนี้มีขนาดบางและสามารถนำไปติดตั้งประกอบกับผลิตภัณฑ์หลายๆประเภท แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แท็กแบบหุ้มพลาสติก [14]

2.2.2.4 แท็กแบบพวงกุญแจ (Key and Key Fob)

แท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ สามารถได้รับการพัฒนาให้อยู่ในรูปของกุญแจพิเศษที่ใช้ในการเปิดปิดประตู หรือใช้กับระบบรักษาความปลอดภัยต่างๆ ซึ่งพวงกุญแจอิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้ไม่มีกุญแจ แต่กลับทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณข้อมูลต่างๆ ดังในรูปที่ 2.8 ซึ่งอาจมีการนำเข้ารหัสเพื่อใช้ในการยืนยันตัวบุคคล



รูปที่ 2.8 แท็กแบบพวงกุญแจ [15]

2.2.2.5 แท็กแบบนาฬิกา

แท็กแบบนาฬิกาได้รับการคิดค้นและพัฒนาตั้งแต่ ค.ศ. 1990 ถึง 1992 โดยบริษัทที่มีชื่อว่า Sky-Data ซึ่งเป็นบริษัทสัญชาติออสเตรีย โดยผลิตขึ้นเพื่อใช้เป็นนาฬิกาสวมใส่ข้อมือและใช้เป็นอุปกรณ์ระบุตัวตนใน

ลักษณะช่องเซ็นเซอร์แบบไร้การสัมผัส (Contactless Sensor) ซึ่งใช้ในกีฬาสกี โดยนักสกีจะใช้สำหรับระบุเมื่อผ่านเข้าสู่ลู่อื่นสกี รูปแบบของแท็กแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แท็กแบบนาฬิกา [16]

2.2.2.6 แท็กมาตรฐาน ID-1 และสมาร์ทการ์ดแบบไร้การสัมผัส

แท็กแบบ ID-1 ดังรูปที่ 2.10 นั้นมีรูปลักษณ์ภายนอกไม่ต่างจากบัตรเครดิตหรือบัตรโทรศัพท์ทั่วไป โดยมีขนาดความยาวประมาณ 85.72 มิลลิเมตรและความกว้าง 54.03 มิลลิเมตร เป็นแท็กที่ได้รับการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ด้วยคุณสมบัติพิเศษคือมีระยะเวลารับส่งสัญญาณที่เหนือกว่าแท็กแบบอื่นๆ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากพื้นที่หน้าตัดที่กว้างมากของตัวบัตร ทำให้สามารถจัดวางระบบสายอากาศที่มีแกนขนาดใหญ่ช่วยเพิ่มรัศมีในการติดต่อสื่อสารขึ้นได้อีกมาก



รูปที่ 2.10 แท็กมาตรฐาน ID-1 และสมาร์ทการ์ดแบบไร้การสัมผัส [17]

2.2.2.7 แท็กแบบ Smart Label

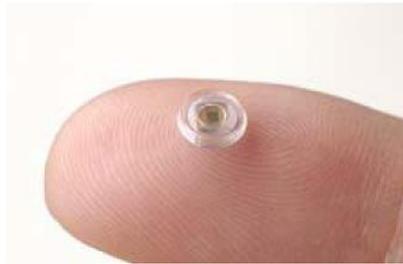
เป็นแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่บางที่สุดดังรูปที่ 2.11 ซึ่งออกแบบเป็นกระดาษบางๆ สามารถงอหรือทบได้ โดยขดลวดสำหรับรับส่งสัญญาณจะถูกออกแบบเป็นแถบพอยล์พลาสติกที่มีความหนาเพียง 0.1 มิลลิเมตร โดยใช้ขบวนการผลิตแบบพิมพ์สกรีน โดยทั่วไปแถบพอยล์เหล่านี้จะถูกเคลือบอีกชั้นหนึ่งโดยเยื่อกระดาษและทับอีกชั้นด้วยสารยึดเกาะเพื่อป้องกันการฉีกขาด



รูปที่ 2.11 แท็กแบบ Smart Label [18]

2.2.2.8 แท็กแบบขดลวดบนชิป (Coil-on-Chip)

แท็กชนิดนี้มีความแตกต่างจากแท็กชนิดอื่นๆ ตรงที่แท็กทั่วไปจะมีการแยกส่วนระหว่างแท็กกับขดลวดหรือสายอากาศอย่างชัดเจน แต่สำหรับแท็กแบบขดลวดบนชิปนั้นจะรวมส่วนที่เป็นขดลวดสายอากาศและตัววงจรประมวลผลเข้าด้วยกันดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แท็กแบบขดลวดบนชิป [19]

2.2.2.9 แท็กสำหรับใช้เฉพาะกิจ

เป็นแท็กอีกประเภทหนึ่งที่ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษ สำหรับใช้งานในกรณีเฉพาะกิจ ดังเช่นการนำไปประยุกต์ใช้กับคอนเทนเนอร์หรือวัสดุที่เป็นโลหะ โดยมีการคิดค้นและพัฒนาเพื่อบรรจุแท็กลงในโครงสร้างและหน้าสัมผัสที่เป็นโลหะ

2.2.3 เครื่องอ่านข้อมูล

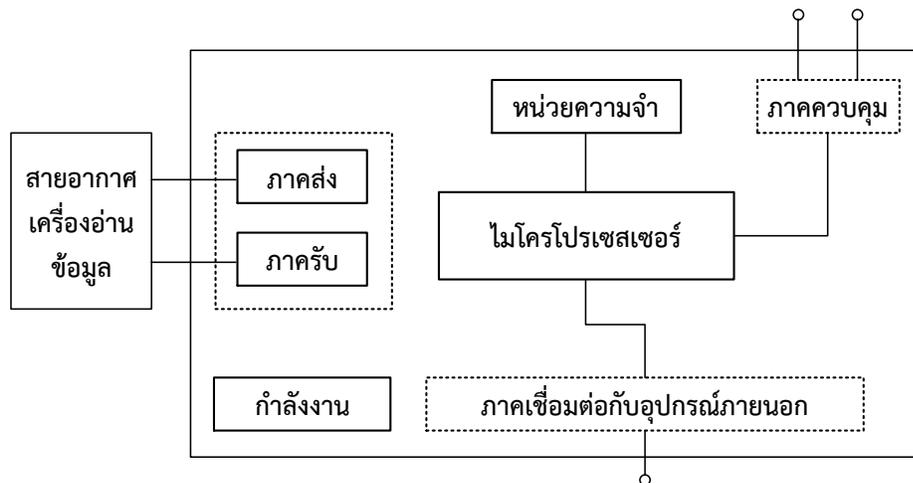
เครื่องอ่านข้อมูลจะสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้โดยผ่านทางสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลแต่ละเครื่องสามารถรองรับแท็กได้หลายตัวโดยใช้ตัวมัลติเพล็กซ์ (Multiplexer) โดยสายอากาศทำหน้าที่ในการแพร่กระจายสัญญาณความถี่วิทยุจากภาคส่งของเครื่องอ่านข้อมูลออกมารอบๆ และรับการตอบสนองของแท็ก ดังนั้นตำแหน่งที่เหมาะสมของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลจึงเป็น

สิ่งจำเป็นสำหรับความแม่นยำและถูกต้องในการอ่านข้อมูล อย่างไรก็ตามสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลควรจะถูกยึดกับเครื่องอ่านข้อมูลเพื่อลดผลกระทบการสูญเสียอันเนื่องมาจากสายเคเบิลความถี่วิทยุ (RF Cable) โดยเฉพาะเครื่องอ่านข้อมูลชนิดพกพา (Portable) จะรวมสายอากาศเข้าไปในตัวเครื่องอ่านข้อมูล

หน้าที่ของเครื่องอ่านข้อมูลก็คือ การเชื่อมต่อสื่อสารกับแท็กเพื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลภายในแท็กด้วยสัญญาณความถี่วิทยุ ส่วนประกอบหลักของเครื่องอ่านข้อมูลจะประกอบด้วย

- ภาคล่ง (Transmitter) และภาครับ (Receiver) สัญญาณวิทยุ
- ไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor)
- หน่วยความจำ (Memory)
- เซ็นเซอร์ (Sensor)
- ภาควัดคุม (Controller)
- ภาคเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (In/Out Interface)
- แหล่งจ่ายพลังงาน (Power Supply)
- สายอากาศ (Antenna)

โดยทั่วไปหน่วยประมวลผลข้อมูลที่อยู่ภายในเครื่องอ่านข้อมูลมักใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังในรูปที่ 2.13 ซึ่งอัลกอริทึมที่อยู่ภายในโปรแกรมจะทำหน้าที่ถอดรหัสข้อมูล (Decoding) ที่ได้รับและทำหน้าที่ติดต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยลักษณะขนาดและรูปร่างของเครื่องอ่านข้อมูลจะแตกต่างกันไปตามประเภทของการใช้งาน เช่น แบบมือถือขนาดเล็กหรือติดผนัง หรือมีขนาดใหญ่เท่าประตู (Gate Size) เป็นต้น



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของเครื่องอ่านข้อมูล

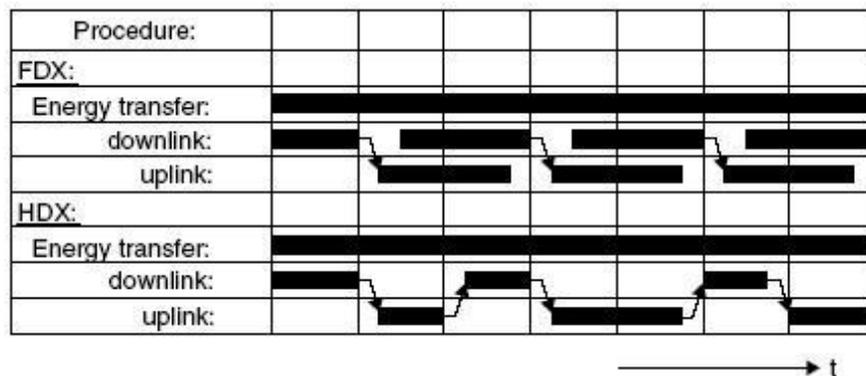
2.3 คุณลักษณะของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

2.3.1 ลักษณะการทำงาน (Operation Type)

อุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ทั้งแท็ก หรือเครื่องอ่านข้อมูล จะมีรูปแบบการทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งระหว่างการรับส่งข้อมูลแบบ Full Duplex (FDX) หรือ Half Duplex (HDX)

2.3.1.1 การรับส่งข้อมูลแบบ Full Duplex

เครื่องอ่านข้อมูลจะทำการส่งสัญญาณข้อมูลออกมาตลอดเวลา ซึ่งเท่ากับว่าเป็นการส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านทางคลื่นวิทยุไปจ่ายให้กับแท็กที่อยู่ในบริเวณการใช้งานด้วย และเนื่องจากความแรงของคลื่นสัญญาณความถี่วิทยุที่แท็กส่งออกมามีกำลังส่งต่ำ ทำให้มีแนวโน้มว่าสัญญาณอาจส่งไปไม่ถึงเครื่องอ่าน หรืออาจส่งไปถึงแต่มีระดับสัญญาณรบกวนปะปนอยู่ด้วย เมื่อเทียบกับสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นของตัวเองทำให้ส่งสัญญาณออกมาได้สูงกว่า ดังนั้นจึงมีมาตรการในการสร้างความแตกต่างของสัญญาณคลื่นวิทยุที่มีการส่งออกมาจากแท็กแต่ละตัวให้มีเอกลักษณ์ (Identity) ที่แตกต่างกัน เพื่อให้เครื่องอ่านข้อมูลสามารถแยกแยะแหล่งที่มาได้อย่างถูกต้อง โดยใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ Load Modulation ซึ่งการสื่อสารแบบ Full Duplex เครื่องอ่านจะทำการส่งสัญญาณที่สามารถตรวจจับและแปลงเป็นกำลังงานไฟฟ้าให้กับแท็กได้ตลอดเวลา การส่งสัญญาณจากเครื่องอ่านไปยังแท็ก (Downlink) และการส่งข้อมูลจากแท็กกับมายังเครื่องอ่าน (Uplink) สามารถกระทำขึ้นเมื่อใดก็ได้ไม่จำเป็นต้องรอจังหวะในการส่งไปกลับแต่อย่างใด ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ความแตกต่างของการสื่อสารแบบ Full duplex และ Half duplex [2]

2.3.1.2 การรับส่งข้อมูลแบบ Half Duplex (HDX)

การสื่อสารแบบ Half Duplex เครื่องอ่านข้อมูลจะทำการส่งพลังงานไฟฟ้าไปที่แท็กตลอดเวลา ซึ่งการส่งสัญญาณจากเครื่องอ่านข้อมูลไปยังแท็ก และการส่งข้อมูลจากแท็กมายังเครื่องอ่านข้อมูล จะต้องมีการกำหนดจังหวะผลัดการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและแท็ก ดังรูปที่ 2.14

2.3.2 ขนาดข้อมูล (Data Quantity)

โดยทั่วไปอุปกรณ์แท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จะมีขนาดของหน่วยความจำหรือที่นิยมเรียกกันว่าขนาดความจุข้อมูล (Data Capacity) ได้ขนาดตั้งแต่ไม่กี่ไบต์ไปจนถึงหลายๆ กิโลไบต์ ตัวอย่างแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ อีกกลุ่มหนึ่งที่ได้รับการออกแบบมาให้มีขนาดความจุเพียง 1 บิต (1-bit Transponder) ซึ่งแท็กแบบนี้มักมีราคาประหยัดและมีจุดประสงค์ในการนำไปใช้งานเพียงเพื่อการแจ้งสถานภาพเท่านั้น

2.3.3 ความสามารถในการโปรแกรม (Programmable)

การจำแนกประเภทของแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ตามขีดความสามารถในการโปรแกรมข้อมูล สามารถแบ่งออกได้เป็นแท็กที่ไม่สามารถโปรแกรมได้ ซึ่งภายในจะมีการเขียนข้อมูลที่อาจเป็นรหัสเลขหมายใดๆ ตามที่ได้รับคำสั่งข้างทำมาตั้งแต่สายการผลิตและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้ อีกประเภทหนึ่งเป็นแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ที่สามารถทำการโปรแกรมข้อมูลผ่านทางเครื่องอ่านข้อมูลได้ การจัดการลำดับคำสั่ง (Sequence) ในกรณีของแท็กที่สามารถโปรแกรมได้นั้น ก็มีเทคนิคที่ใช้ในการจัดการประมวลผลข้อมูลให้เล็อกพิจารณาเป็นเรื่องทางเทคนิค

2.3.4 แหล่งพลังงาน (Power Supply)

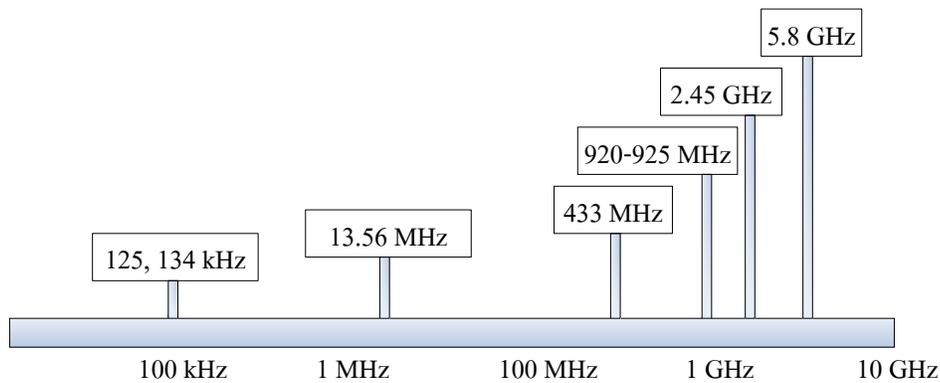
เป็นคุณสมบัติทางเทคนิคที่มีความสำคัญมากในการพิจารณาเลือกใช้แท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ทั้งนี้สามารถจำแนกประเภทของแท็กออกเป็น 2 กลุ่ม คือ แบบพาสซีฟ ซึ่งเป็นแท็กที่ไม่ต้องการแหล่งจ่ายไฟบรรจุไว้ภายในตัว แต่จะอาศัยการแปลงสัญญาณพลังงานไฟฟ้าที่ส่งมาจากเครื่องอ่านข้อมูลมาเป็นไฟเลี้ยงเพียงอย่างเดียว กับอีกประเภทหนึ่ง คือ แบบแอ็กทีฟ ซึ่งต้องการระบบจ่ายไฟภายในแท็กเพื่อใช้ป้อนจ่ายให้กับชิปประมวลผลที่ติดตั้งอยู่ภายใน

2.3.5 ย่านความถี่ใช้งาน (Frequency Range)

ความหมายของความถี่ใช้งาน (Operating frequency) ในมาตรฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ นั้นจะหมายถึงคลื่นความถี่วิทยุที่เครื่องอ่านข้อมูลทำการส่งออกไปเท่านั้น โดยจะไม่สนใจว่าแท็กจะส่งคลื่นความถี่ในย่านใดตอบกลับมา ยิ่งในบางกรณีแท็กอาจมีการส่งคลื่นความถี่กลับมาเป็นค่าความถี่

เดี๋ยวก่อนที่เครื่องอ่านข้อมูลส่งออกไป โดยแยกแยะความแตกต่างกันด้วยเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบ Load modulation ประเด็นของคลื่นความถี่จากแท่งจึงไม่ใช่สาระสำคัญในการนำมาพิจารณา ในปัจจุบันคลื่นพาหะที่ใช้งานกันในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จะอยู่ในย่านความถี่ไอเอสเอ็ม (Industrial, Scientific and Medical: ISM) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดในการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์สามารถใช้งานได้โดยไม่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้งานในการสื่อสาร โดยทั่วไปย่านความถี่ใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 สำหรับคลื่นพาหะที่ใช้กันในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบ่งออกได้เป็น 4 ย่านหลัก ได้แก่

- ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency: LF) 135/125/134.2 kHz
- ย่านความถี่สูง (High Frequency: HF) 13.56 MHz
- ย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra-High Frequency: UHF) 433/860/960/920 MHz - 925 MHz
- ย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave) 2.4/5.8 GHz



รูปที่ 2.15 ย่านความถี่ที่ใช้งานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ [4]

ในแง่การใช้งาน 2 ย่านความถี่แรกจะเหมาะสำหรับใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะใกล้ ที่ย่านความถี่ต่ำ ระยะการอ่านประมาณ 10 เซนติเมตร ถึง 20 เซนติเมตร และย่านความถี่สูง ระยะการอ่านประมาณ 1 เมตร เช่น การตรวจสอบการผ่านเข้าออกพื้นที่ การตรวจหาและเก็บประวัติในสัตว์ ส่วนย่านความถี่สูงยิ่งจะถูกใช้ในงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะไกล มีระยะการอ่านประมาณ 1 ถึง 10 เมตร เช่นระบบเก็บค่าบริการทางด่วน ในแต่ละประเทศมีการอนุญาตให้ใช้ความถี่ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในย่านความถี่สูงยิ่งแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 เช่น ยุโรป คือ 866 MHz ถึง 869 MHz อเมริกาเหนือและใต้ คือ 902 MHz ถึง 928 MHz ญี่ปุ่น คือ 950 MHz ถึง 956 MHz ส่วนในประเทศไทย คือ 920 MHz ถึง 925 MHz และสุดท้ายคือ ย่านความถี่ไมโครเวฟมีระยะการอ่านไกลกว่า 10 เมตร ซึ่งใช้ใน ระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) ในส่วนของการใช้งานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในประเทศไทย เช่น การขนส่งที่ใช้บัตรทางด่วนและบัตรโดยสารรถไฟฟ้ามหานคร ห้องสมุดฉลาด การควบคุม

การเข้าออกสถานที่ที่ใช้บัตรพนักงานและบัตรจอดรถ การจัดการสายการผลิตและการขนส่ง ปศุสัตว์ใช้ในการให้อาหารและการติดตาม โรค เอกสารราชการใช้สำหรับหนังสือเดินทางอิเล็กทรอนิกส์และบัตรประชาชน เป็นต้น

ในแง่ของราคาและความเร็วในการสื่อสารข้อมูล เมื่อเทียบกันแล้วระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุซึ่งใช้คลื่นพาหะในย่านความถี่สูงเป็นระบบที่มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูงสุดและมีราคาแพงที่สุดด้วยเช่นกัน ส่วนระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้คลื่นพาหะในอีก 2 ย่านความถี่แรกจะมีระดับราคาและความเร็วลดหลั่นกันไป

เนื่องจากระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุมีความต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่สูง ระยะทางในการส่งไกลและโครงสร้างของสายอากาศที่มีไม่ซับซ้อน ขนาดเล็กและราคาถูก ดังนั้นย่านความถี่สูงจึงจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน โครงการวิจัยนี้ฉบับนี้จึงเสนอสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงซึ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสคดมุมแบบขึ้นร่วมกับร่องเอียงคู่

2.3.6 มาตรฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ

การนำมาตรฐานมาใช้กับระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบนี้ถือว่าเป็นสิ่งที่ซับซ้อน แต่ก็มีพยายามนำมาใช้อย่างต่อเนื่อง มาตรฐานที่มีอยู่นั้นครอบคลุมใน 4 เรื่อง ของการประยุกต์ใช้งานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ คือมาตรฐานการติดต่อสื่อสารในอากาศ (Air interface standard) มาตรฐานปริมาณความจุของข้อมูลและการเข้ารหัส (Data content and Encoding) มาตรฐานความเข้ากันได้ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (Conformance) มาตรฐานการทำงานร่วมกันระหว่างการประยุกต์ใช้งานกับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

มาตรฐานหลักๆ ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ในปัจจุบันมี 2 ค่ายด้วยกันคือ ISO และ EPC Global ซึ่ง ISO ก็จะมีมาตรฐานการติดต่อสื่อสารในอากาศ ในย่านความถี่สูงยิ่ง คือ 18000-6A กับ 18000-6B ส่วนทางด้าน EPC Global ก็จะมีมาตรฐานออกมาสองรุ่น รุ่นแรกคือ EPC Global gen 1 ซึ่งประกอบไปด้วย Class 0 กับ Class 1 แต่ก็มีอีกรุ่นหนึ่งคือ EPC Global gen 2 ซึ่งเตรียมไว้สำหรับ Class 1 ขึ้นไป แต่ตอนนี้ใช้กันหลักๆ ก็จะมีแต่เฉพาะ Class 1 เท่านั้น โดยถ้าจำแนกตาม Class ของแท็ก ก็จะมีตั้งแต่ Class 0, Class 1, Class 2 ไปจนถึง Class 3 โดยจะแบ่งตามความสามารถในการเขียนข้อมูลลงไปบนแท็กแบบพาสซีฟและแบบแอ็กทีฟ ถ้า Class 0 ก็จะเป็นแบบพาสซีฟและเขียนไม่ได้ Tag ID ถูกกำหนดมาตั้งแต่โรงงาน Class 1 ก็ยังคงเป็นแบบพาสซีฟอยู่ แต่จะอ่านหรือเขียนข้อมูลได้ ส่วน Class 2 ก็จะเป็นแบบกึ่งแอ็กทีฟ คือ ในขณะที่รับข้อมูลจากเครื่องอ่านข้อมูลเป็นแบบพาสซีฟ แต่พอจะส่งข้อมูลจะใช้กำลังงานจากแบตเตอรี่ช่วยในการส่ง สุดท้ายคือ Class 3 ก็จะเป็นแบบแอ็กทีฟ

มาตรฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุข้างขึ้นมาใช้ในสาขาต่างๆ ตัวอย่างเช่น มาตรฐานการระบุตัวสัตว์ (Animal identification) มาตรฐานการจัดการวัตถุ (Item management) เป็นต้น

มาตรฐานการระบุตัวสัตว์ (Animal identification) เช่น มาตรฐาน ISO 11784 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการระบุตัวสัตว์ด้วยความถี่วิทยุซึ่งเป็นมาตรฐานเกี่ยวกับโครงสร้างรหัส ISO 11785 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับทางด้านเทคนิค และ ISO 14223/1 จะเกี่ยวกับแท็ก

มาตรฐานการจัดการวัตถุ (Item management) เช่น ISO 18000 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการระบุวัตถุด้วยความถี่วิทยุโดยเฉพาะพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการติดต่อสื่อสารกันผ่านอากาศ

ตารางที่ 2.1 ความถี่และข้อจำกัดของกำลังงานในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งในประเทศต่างๆ

ประเทศ/ทวีป	สถานะ	ความถี่ (MHz)	กำลัง	เทคนิค	หมายเหตุ
แอฟริกา					
แอฟริกาเหนือ	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ออกกฎบังคับใช้ในปี ค. ศ. 2006
แอฟริกาใต้		917-921	4 W EIRP	FHSS	ภายในอาคาร
ตุนิเซีย	IP	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	วางแผนที่จะนำมาใช้งาน
เอเชียแปซิฟิก					
ออสเตรเลีย	OK	920-926	4 W EIRP		4W EIRP เหมาะจะใช้กับGS1
จีน	IP	917-922	2 W ERP		อนุญาตชั่วคราว
ฮ่องกง, จีน	OK	865-868	2 W ERP		-
		920-925	4 W EIRP		
ไทย	OK	920-925	4 W EIRP		กำลังงานไม่เกิน 0.5 W EIRP ไม่ต้องขออนุญาต
อินเดีย	OK	865-868	4 W ERP		อนุญาตให้ใช้ในเดือน พฤษภาคม ปี ค. ศ. 2005
อินโดนีเซีย	IP				พิจารณาในช่วง 923-925 MHz
ญี่ปุ่น	OK	952-954	4 W EIRP	LBT	ในช่วง 952-954 MHz อนุญาต ให้ใช้ 4 W EIRP และสำหรับ 20 mW EIRP ไม่ต้องมี ใบอนุญาต

แอฟริกาใต้		917-921	4 W EIRP	FHSS	ภายในอาคาร
ตูนิเซีย	IP	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	วางแผนที่จะนำมาใช้งาน
เอเชียแปซิฟิก					
ออสเตรเลีย	OK	920-926	4 W EIRP		4W EIRP เหมาะจะ ใช้กับGS1
จีน	IP	917-922	2 W ERP		อนุญาตชั่วคราว
ฮ่องกง, จีน	OK	865-868	2 W ERP		-
		920-925	4 W EIRP		
อินเดีย	OK	865-868	4 W ERP		อนุญาตให้ใช้ในเดือน พฤษภาคม ปี ค. ศ. 2005
อินโดนีเซีย	IP				พิจารณาในช่วง 923-925 MHz
ญี่ปุ่น	OK	952-954	4 W EIRP	LBT	ในช่วง 952-954 MHz อนุญาต ให้ใช้ 4 W EIRP และสำหรับ 20 mW EIRP ไม่ต้องมี ใบอนุญาต
เกาหลี	OK	908.5-910	4 W EIRP	LBT	อนุญาตให้ใช้ในเดือน กรกฎาคม ปี ค. ศ. 2004
		910-914	4 W EIRP	FHSS	อนุญาตให้ใช้ในเดือน กรกฎาคม ปี ค. ศ. 2004
มาเลเซีย	OK	866-869			กำลังอยู่ในการพิจารณา และที่ ความถี่ 868 MHz อนุญาตให้ใช้ 50 mW
		919-923	2 W ERP		กำลังงาน 2 W ERP ไม่ต้องมี ใบอนุญาต แต่กำลังงานตั้งแต่ 2 ถึง 4 W ต้องมีใบอนุญาต
สิงคโปร์	OK	866-869	0.5 W ERP		
ไต้หวัน	OK	922-928	1 W ERP	FHSS	ภายในอาคาร
		922-928	0.5 W ERP	FHSS	ภายนอกอาคาร
นิวซีแลนด์	OK	864-868	4 W EIRP		
ยุโรป					
ฟินแลนด์	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ออกกฎบังคับใช้ตั้งแต่ 3 กุมภาพันธ์ ปี ค. ศ. 2005

หมายเหตุ

OK แสดงถึง ได้มีการออกกฎข้อบังคับใช้แล้วหรือกำลังจะนำมาใช้ในอนาคตอันใกล้

IP แสดงถึง คาดการณ์ว่าจะออกกฎข้อบังคับภายใน 6-12 เดือนข้างหน้า

FHSS แสดงถึง Frequency Hopping Spread Spectrum

LBT แสดงถึง Listen Before Talk

2.4 ข้อพิจารณาการเลือกใช้อุปกรณ์ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

2.4.1 ความถี่ใช้งาน

หลักการของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ที่ใช้ย่านความถี่ในช่วง 100 kHz ถึง 30 MHz จะใช้รูปแบบส่งถ่ายสัญญาณข้อมูลระหว่างแท็กกับเครื่องรับเป็นแบบเหนี่ยวนำ (Inductive coupling) ในขณะที่หลักการของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ที่มีการสื่อสารโดยใช้ความถี่ย่านความถี่ไมโครเวฟซึ่งอยู่ในช่วง 2.45 GHz ถึง 5.8 GHz จะใช้การส่งถ่ายสัญญาณข้อมูลในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การดูดซับคลื่นสัญญาณของตัวนำที่เป็นน้ำ ที่ความถี่ใช้งาน 100 kHz จะมีค่าต่ำกว่าการใช้งานที่ความถี่ 1 GHz ถึง 100,000 เท่า การเลือกใช้งานอุปกรณ์ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ที่ความถี่สูงระดับ 1 GHz ในกรณีที่มีฝนตกย่อมจะเกิดปัญหาการลดทอนสัญญาณระหว่างแท็กและเครื่องอ่านข้อมูลซึ่งอยู่กลางแจ้งมากกว่าการใช้งานแบบเดียวกันที่ความถี่ 100 kHz การเลือกใช้อุปกรณ์ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ทำงานที่ความถี่ในย่านความถี่สูงยิ่งน่าจะทำให้ผลดีในการแพร่กระจายคลื่นในระยะทางไกล

ส่วนการเลือกใช้อ่านความถี่ไมโครเวฟนั้น โดยทั่วไปจะทำให้ผลดีในเรื่องของระยะทางที่ไกลกว่าการเหนี่ยวนำโดยใช้คลื่นความถี่ต่ำ แต่อุปกรณ์แท็กที่ทำงานในย่านความถี่ไมโครเวฟนั้นจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟสำรองไฟฟ้าทำให้ต้องมีขนาดใหญ่และมีข้อจำกัดในการพกพาหลายๆ ประการ สิ่งที่ควรพิจารณาประการหนึ่งสำหรับการใช้งานอุปกรณ์ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ในย่านความถี่สูง ก็คือการที่ระบบอาจถูกรบกวนจากการเดินเครื่องมอเตอร์ที่อยู่ใกล้เคียงได้ เนื่องจากการรับส่งข้อมูลที่ใช้การเหนี่ยวนำ ทำให้มีความนิยมใช้งานการสื่อสารโดยใช้คลื่นไมโครเวฟแทนในกรณีของการใช้งานภายในโรงงานอุตสาหกรรม

2.4.2 ระยะทำการ

ปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องโดยตรงต่อระยะทำการในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและแท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประการคือ ตำแหน่งของแท็กหรือ

ระยะห่างขั้นต่ำระหว่างแท็กแต่ละตัวกับเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไปแล้วแต่ประเภทของการใช้งาน ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท็ก และความเร็วในการอ่านหรือเขียนข้อมูลของแท็ก

2.4.3 ข้อกำหนดด้านการรักษาความปลอดภัย

2.4.3.1 การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล

การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล ซึ่งประกอบไปด้วยการตรวจยืนยันแท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ และการเข้ารหัสข้อมูลที่จะถูกส่งผ่านทางคลื่นวิทยุ กระบวนการหรือความต้องการใช้งานในกรณีนั้นๆ จำเป็นต้องใช้มาตรการรักษาความปลอดภัยหรือไม่ หรือหากต้องการใช้จะเป็นเพียงระดับใด เพื่อให้การลงทุนเป็นไปอย่างเหมาะสมที่สุด

2.4.3.2 การรักษาความปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อมนุษย์

การรักษาความปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อมนุษย์ ที่ความถี่ 0.1 MHz ถึง 3.0 MHz จะต้องมีค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric Field Strength: E) ไม่เกิน 614 V/m ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field strength: H) ไม่เกิน $16.3/f$ A/m ค่าความหนาแน่นกำลัง (Power Density: S) ไม่เกิน $10,000/f^2$ mW/cm² โดยคิดที่เวลาเฉลี่ย (Averaging Time) 6 นาที ซึ่ง f มีหน่วยเป็น MHz [2] และในส่วนของมาตรฐานการลดทอนของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะ 10 เมตร จะต้องมีค่าไม่เกิน 72 dB μ A/m ซึ่งเป็นมาตรฐานยุโรป EN300 [2]

2.4.4 ขนาดของหน่วยความจำ

ต้นทุนของแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ย่อมมีความสัมพันธ์กับลักษณะและขนาดของหน่วยความจำที่บรรจุอยู่ภายใน การใช้งานในระดับสาธารณะ เช่น ระบบขนส่งจึงนิยมใช้แท็กที่มีหน่วยความจำน้อย หรือในบางกรณีอาจใช้แท็กแบบโปรแกรมไม่ได้ เพื่อควบคุมต้นทุนของบัตร โดยอาจใช้บัตรหรือแท็กทำหน้าที่ส่งข้อมูลแสดงหมายเลข แล้วให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นใช้งานภายในระบบ หรือเครื่องอ่านขนส่งทำหน้าที่ตรวจสอบแทน โดยไม่ต้องเก็บข้อมูลไว้ในบัตร

2.5 ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศ

ในปัจจุบันระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุถูกนำมาประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวกับห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain) อย่างแพร่หลายเพื่อรองรับภาคอุตสาหกรรมการผลิตแห่งอนาคตไม่ว่าจะเป็นระบบการค้าปลีก คำสั่ง ระบบการผลิตรวมถึงการขับเคลื่อนทางโลจิสติกส์ โดยสามารถนำระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุมาประยุกต์ใช้ในระบบสายการผลิตอัตโนมัติ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงข้อมูลการผลิตและการควบคุม

คุณภาพได้ตลอดเวลา ซึ่งสินค้าที่ติดแท็กนั้นเมื่อผ่านสายพานลำเลียงของระบบการผลิตในโรงงานและส่งต่อให้กับหน่วยงานต่างๆ ก็จะผ่านเครื่องรับที่มีสายอากาศที่ทำหน้าที่ติดต่อกับแท็ก ซึ่งทำให้หน่วยงานนั้นๆ ทราบว่าจะต้องทำอะไรต่อกับสินค้านั้น สินค้านั้นคืออะไร จำนวนเท่าไร เป็นต้น จากที่มานี้ทำให้ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบการลำเลียงหลายอย่าง เช่น ระบบสายพานลำเลียงกระเป๋าสัมภาระในสนามบิน ซึ่งเป็นการนำมาใช้แทนระบบบาร์โค้ดแบบเดิมที่มีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น การอ่านบาร์โค้ดจำเป็นอย่างยิ่งที่เครื่องอ่านบาร์โค้ดจะต้องเห็นแถบบาร์โค้ด หากแถบถูกปิดบังจะทำให้ไม่สามารถอ่านข้อมูลได้จึงทำให้ต้องติดแถบบาร์โค้ดไว้ที่วัตถุหลายตำแหน่งเพื่อให้เครื่องอ่านบาร์โค้ดสามารถอ่านข้อมูลได้ ความเร็วของเครื่องอ่านบาร์โค้ดไม่สามารถอ่านแถบที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วได้ ซึ่งหากวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วจะทำให้ความแม่นยำในการอ่านลดลง ระบบบาร์โค้ดจึงไม่เหมาะสมสำหรับระบบสายพานที่ต้องการความเร็วและมีวัตถุบนสายพานจำนวนมากได้



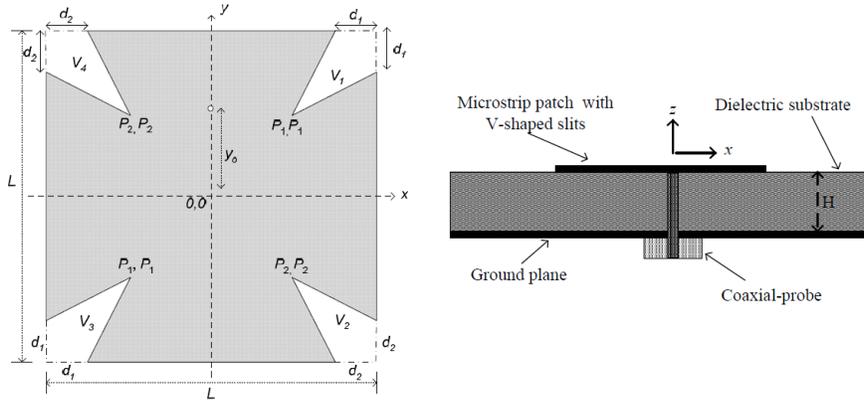
รูปที่ 2.16 สายอากาศเครื่องอ่านระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ประยุกต์ใช้กับระบบสายพานลำเลียง [20]

สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งที่ประยุกต์ใช้กับระบบสายพานลำเลียงนั้นจะใช้สายอากาศที่มีขนาดเหมาะสมและมีรูปแบบที่บาง เพื่อให้ง่ายต่อการติดตั้งดังรูปที่ 2.16 สายอากาศจะต้องมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวซึ่งไปยังแท็กที่ติดกับวัตถุบนสายพาน สายอากาศต้องมีการ โพลาริซแบบวงกลมเพื่อให้สามารถอ่านแท็กได้ในทุกลักษณะการวางตัวของแท็ก และสายอากาศต้องมีอัตราขยายที่สูงเพื่อให้สามารถอ่านแท็กได้ในระยะไกล ซึ่งจะทำให้เครื่องอ่านข้อมูลสามารถอ่านแท็กที่เคลื่อนที่อย่างรวดเร็วและมีจำนวนมากบนสายพานได้

2.5.1 งานวิจัยที่มีมาก่อน

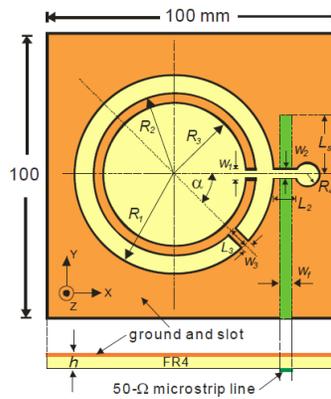
งานวิจัยแรกเป็นสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับสลิตสำหรับใช้ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งของ Nasimuddin และคณะดังรูปที่ 2.17 สร้างขึ้นในปี ค.ศ.2009 สายอากาศมีโพลาริซเป็นแบบวงกลม และ $|S_{11}|$ ที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 915 MHz ถึง 934 MHz มี

อัตราขยายสูงสุดที่ความถี่ 921 MHz เท่ากับ 3.6 dBic ซึ่งเป็นค่าอัตราขยายที่ต่ำ และมีช่วงกว้างแถบความถี่ที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมโดยคิดที่อัตราส่วนแกนไม่เกิน 3 dB เท่ากับ 0.3% ซึ่งเป็นช่วงที่แคบ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ขนาดความยาวและกว้างของสายอากาศเท่ากับ 90 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.17 สายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสร่วมกับสลิต [21]

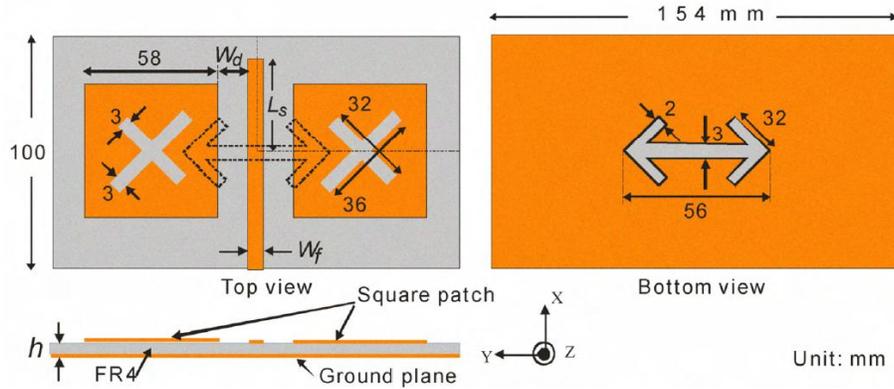
สายอากาศไมโครสตริปเจาะร่องแบบวงแหวนของ Shu-An Yeh และคณะดังรูปที่ 2.18 สร้างขึ้นในปี ค.ศ.2010 สายอากาศมีโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม และ $|S_{11}|$ ที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 867 MHz ถึง 1083 MHz มีอัตราขยายสูงสุดที่ความถี่ 925 MHz เท่ากับ 3 dBic ซึ่งเป็นค่าอัตราขยายที่ต่ำ และมีช่วงกว้างแถบความถี่ที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมโดยคิดที่อัตราส่วนแกนไม่เกิน 3 dB เท่ากับ 2.49% มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางด้านหน้าและหลัง ขนาดความยาวและกว้างของสายอากาศเท่ากับ 100 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.18 สายอากาศไมโครสตริปเจาะร่องแบบวงแหวน [22]

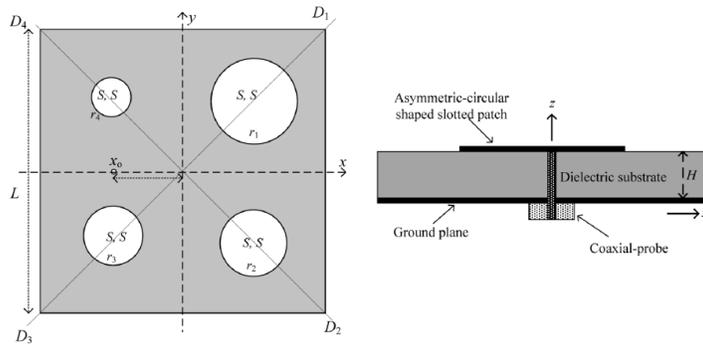
สายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมจัตุรัสคู่เจาะร่องป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริปของ Hua-Ming Chen และคณะดังรูปที่ 2.19 สร้างขึ้นในปี ค.ศ.2009 สายอากาศมีโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม และ $|S_{11}|$ ที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 918 MHz ถึง 953 MHz มีอัตราขยายสูงสุดที่ความถี่ 925 MHz เท่ากับ

1 dBic ซึ่งเป็นค่าอัตราขยายที่ต่ำ และมีช่วงกว้างแถบความถี่ที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมโดยคิดที่อัตราส่วนแแกนไม่เกิน 3 dB เท่ากับ 1.62% มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ขนาดความยาวและกว้างของสายอากาศเท่ากับ 154 และ 100 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 2.19 สายอากาศไมโครสตริปลี่เหลี่ยมจัตุรัสคู่เจาะร่องป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริป [23]

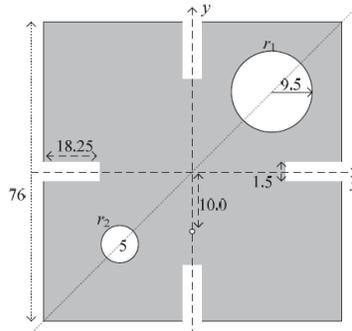
รูปที่ 2.20 แสดงสายอากาศไมโครสตริปเจาะร่องวงกลมของ Nasimuddin และคณะ สร้างขึ้นในปี ค.ศ.2010 สายอากาศมีโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม และ $|S_{11}|$ ที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 904 MHz ถึง 941 MHz มีอัตราขยายที่ความถี่ใช้งานเท่ากับ 3.8 dBic ซึ่งเป็นค่าอัตราขยายที่ต่ำ และมีช่วงกว้างแถบความถี่ที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมโดยคิดที่อัตราส่วนแแกนไม่เกิน 3 dB เท่ากับ 1.2% มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ขนาดความยาวและกว้างของสายอากาศเท่ากับ 90 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.20 สายอากาศไมโครสตริปเจาะร่องวงกลม [24]

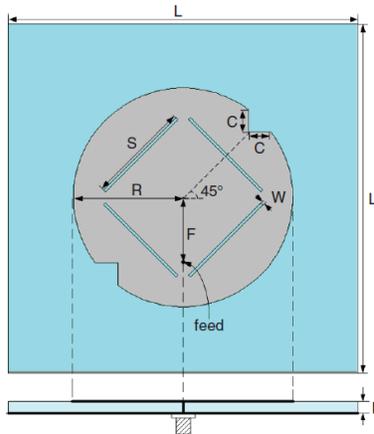
รูปที่ 2.21 แสดงสายอากาศไมโครสตริปเจาะร่องวงกลมร่วมกับสลิตของ Nasimuddin และคณะ สร้างขึ้นในปี ค.ศ.2011 สายอากาศมีโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม และ $|S_{11}|$ ที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 907 MHz ถึง 919 MHz มีอัตราขยายที่ความถี่ใช้งานเท่ากับ 3.7 dBic ซึ่งเป็นค่าอัตราขยายที่ต่ำ

และมีช่วงกว้างแถบความถี่ที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม โดยคิตที่อัตราส่วนแกนไม่เกิน 3 dB เท่ากับ 0.5% ซึ่งเป็นช่วงที่แคบ สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ขนาดความยาวและกว้างของสายอากาศเท่ากับ 76 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.21 สายอากาศไมโครสตริปเจาะร่องวงกลมร่วมกับสลิต [25]

สายอากาศไมโครสตริปวงกลมเจาะร่องร่วมกับการตัดขอบของ Cheng Yang และคณะดังรูปที่ 2.22 สร้างขึ้นในปี ค.ศ.2011 สายอากาศมีโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม และ $|S_{11}|$ ที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 910 MHz ถึง 943 MHz อัตราขยายที่ความถี่ใช้งานเท่ากับ 1.88 dBic ซึ่งเป็นค่าอัตราขยายที่ต่ำ และมีช่วงกว้างแถบความถี่ที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม โดยคิตที่อัตราส่วนแกนไม่เกิน 3 dB เท่ากับ 0.97% ซึ่งเป็นช่วงที่แคบ สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ขนาดความยาวและกว้างของสายอากาศเท่ากับ 169.4 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.22 สายอากาศไมโครสตริปวงกลมเจาะร่องร่วมกับการตัดขอบ [26]

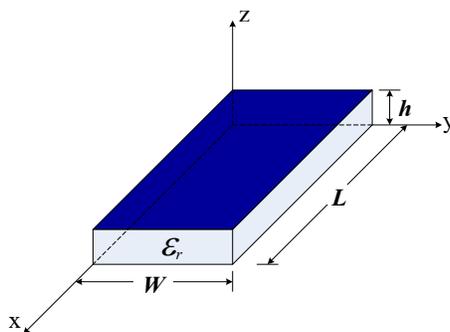
จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาขึ้นต้น พบว่าสายอากาศส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กและใช้วัสดุฐานรองเป็นสารไดอิเล็กตริกจึงมีอัตราขยายที่ต่ำ และมีช่วงกว้างแถบความถี่ที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมที่แคบ

ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้ฉบับนี้จะเสนอสายอากาศที่ใช้วัสดุฐานรองเป็นอากาศ อัตรายายสูง มีโพลาไรซ์ เป็นแบบวงกลม และมีขนาดที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

2.5.2 ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปได้เริ่มมีการใช้งานตั้งแต่ในทศวรรษที่ 50 โครงสร้างของสายอากาศ ไมโครสตริปนั้นมีอยู่หลายแบบด้วยกันซึ่งแบ่งตามลักษณะของแผ่นไมโครสตริปและลักษณะการป้อนสัญญาณ โครงสร้างของไมโครสตริปจะประกอบด้วยตัวนำอยู่สองด้าน ด้านหนึ่งเรียกว่า แผ่นระนาบกราวด์และด้านที่สองใช้สำหรับการสร้างตัวป้อนสัญญาณลายวงจรหรือสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นลงไป โดยส่วนใหญ่จะมีสารไดอิเล็กตริกซึ่งเรียกว่า วัสดุฐานรองที่เป็นสารไดอิเล็กตริก (Dielectric Substrate) อยู่ตรงกลางมีความหนาของวัสดุฐานรอง (h) ส่วนคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุฐานรองแสดงด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant: ϵ_r) และค่าของความสูญเสียเชิงมุม (Loss tangent: δ) โดยทั่วไปสายอากาศแบบไมโครสตริปจะมีโครงสร้างเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น เพื่อที่จะสามารถทำงานที่โหมดหลัก (Fundamental mode) คือ TM_{010} หรือ TM_{100} ที่ความถี่เรโซแนนซ์ได้ ซึ่งสายอากาศไมโครสตริปมีคุณสมบัติที่เป็นข้อได้เปรียบกว่าสายอากาศชนิดอื่นๆ เช่น มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีลักษณะแบนราบ น้ำหนักเบา ต้นทุนการผลิตต่ำ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศไมโครสตริปโดยทั่วไปจะมีข้อเสีย คือ มีประสิทธิภาพต่ำ ค่า Q สูงทนกำลังงานได้ต่ำ ความบริสุทธิ์โพลาไรซ์ไม่ดี (Poor Polarization Purity) และช่วงกว้างแถบความถี่แคบ เป็นต้น

ความถี่เรโซแนนซ์สำหรับโพรง (Cavity Resonance)



รูปที่ 2.23 โครงสร้างไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ความถี่เรโซแนนซ์สำหรับโพรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามรูปที่ 2.23 สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$(f_r)_{mnp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{W}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2} \quad (2.1)$$

โดยที่

h คือ ความสูงของตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

L คือ ความยาวของตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

W คือ ความกว้างของตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

μ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก

ϵ คือ ค่าสภาพยอมไฟฟ้า

m คือ จำนวนของการเปลี่ยนแปลงครึ่งรอบสนามในทิศทาง x

n คือ จำนวนของการเปลี่ยนแปลงครึ่งรอบสนามในทิศทาง y

p คือ จำนวนของการเปลี่ยนแปลงครึ่งรอบสนามในทิศทาง z

สำหรับสายอากาศไมโครสตริปที่มี $h \ll L$ และ $h \ll W$ สามารถหาความถี่เรโซแนนซ์ได้ตามสมการต่อไปนี้ คือ

เมื่อ $h < W < L$

จะทำให้เกิดโหมดเป็นใหญ่ (Dominant mode) เป็น TM_{10}^x และความถี่เรโซแนนซ์หาได้ดังนี้ คือ

$$(f_r)_{100} = \frac{1}{2L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_o}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.2)$$

โดยที่

v_o คือ ความเร็วของแสง

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง

เมื่อ $h < \frac{L}{2} < W < L$

จะทำให้เกิดโหมดที่สอง (Second mode) เป็น TM_{010}^x และความถี่เรโซแนนซ์หาได้ดังนี้

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2W\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_o}{2W\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.3)$$

แต่ในกรณี $h < W < \frac{L}{2}$

จะทำให้เกิดโหมดที่สองเป็น TM_{200}^x แทนโหมด TM_{010}^x และสามารถหาความถี่เรโซแนนซ์ ได้ดังนี้

$$(f_r)_{200} = \frac{1}{L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_o}{L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.4)$$

และในกรณี $h < L < W$

จะทำให้เกิดโหมดเป็นใหญ่เป็น TM_{010}^x ซึ่งสามารถหาความถี่เรโซแนนซ์ได้จากสมการที่ 2.3

นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ในกรณี $h < L < \frac{W}{2} < W$ จะทำให้เกิดโหมดที่สองเป็น TM_{020}^x

2.5.3 เทคโนโลยีของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้หลักการสื่อสารแบบการเชื่อมต่อที่ระยะสนามระยะไกล

ระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุในสนามระยะไกล จะใช้หลักการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โครงสร้างของแท่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ แผงวงจรหรือชิป ที่เก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ และสายอากาศสำหรับรับและส่งสัญญาณ

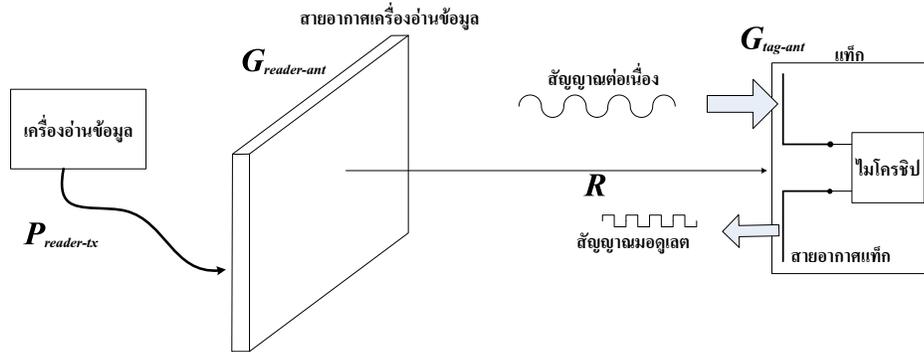
2.5.3.1 การออกแบบสายอากาศของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

หลักเกณฑ์ที่สำคัญที่สุดสำหรับสมรรถนะของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ คือ ระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่ง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าแท่งประกอบด้วยสายอากาศและชิป ซึ่งคุณลักษณะของชิปจะถูกกำหนดจากทางผู้ผลิตโดยที่ผู้ใช้ไม่สามารถแก้ไขได้ ในการออกแบบสายอากาศเพื่อที่จะให้ได้ระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุดโดยที่ได้ทำการเลือกชิปไว้แล้ว รวมทั้งอยู่ภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ เช่น ขนาดของสายอากาศ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และราคา เป็นต้น

2.5.3.2 หลักการทำงาน

สำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุในสนามระยะไกลนั้น สายอากาศมีความสำคัญต่อสมรรถนะและความน่าเชื่อถือของระบบ เนื่องมาจากหลักการทำงานนี้จะอาศัยการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางสายอากาศ ในรูปที่ 2.24 แสดงหลักการทำงานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุแบบพาสซีฟในสนามระยะไกล เครื่องอ่านข้อมูลจะส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่มีความต่อเนื่องซึ่งบรรจุกำลังงานและสัญญาณนาฬิกาออกไปยังแท่ง หลังจากนั้นสายอากาศของแท่งจะเหนี่ยวนำแรงดัน RF แล้วแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนให้กับชิป โดยทั่วไปแรงดันที่ชิปใช้ในการอ่านข้อมูลมีค่าประมาณ

1.2 โวลต์ ส่วนการเขียนข้อมูลแรงดันที่ชิปใช้ประมาณ 2.2 โวลต์ เมื่อชิปได้รับกำลังงานที่เพียงพอจะทำการส่งข้อมูลโดยการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้ากลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล โดยทั่วไปอิมพีแดนซ์จะมีอยู่ 2 สถานะ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นคอนจุกต์แมตซ์และค่าอิมพีแดนซ์ค่าอื่นบางค่า เพื่อไว้สำหรับมอดูเลตกับสัญญาณที่เกิดการกระจัดกระจายย้อนกลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล



รูปที่ 2.24 กำลังงานและกลไกของการติดต่อสื่อสารสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุในสนามระยะไกล

2.5.3.3 การติดต่อสื่อสารของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในสนามระยะไกล

ระยะทางการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ นั้นจะขึ้นอยู่กับข้อจำกัด 2 อย่าง คือ ระยะทางที่มากที่สุดที่แท็กสามารถรับกำลังงานเพียงพอสำหรับการทำงานของชิปและการกระจัดกระจายย้อนกลับ (Backscattering) สัญญาณและระยะทางที่มากที่สุดที่เครื่องอ่านข้อมูลสามารถรับสัญญาณที่เกิดการกระจัดกระจายย้อนกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูลได้ แต่โดยทั่วไปแล้วเครื่องอ่านข้อมูลจะมีความไวมากเพียงพอที่จะรับสัญญาณที่กระจัดกระจายย้อนกลับมาได้ ดังนั้นระยะทางในการติดต่อสื่อสารกันระหว่างแท็กกับเครื่องอ่านข้อมูลจึงขึ้นอยู่กับแท็ก เช่น ลักษณะการวางตัวของแท็ก คุณสมบัติของวัตถุที่นำแท็กไปติด และสิ่งแวดล้อมในการแพร่กระจายคลื่น

1. การติดต่อสื่อสารจากเครื่องอ่านข้อมูลไปยังแท็ก

เนื่องจากการทำงานของแท็กนั้นเป็นแบบพาสซีฟ คือไม่มีแหล่งกำลังงานภายในเป็นของตัวเอง จึงจำเป็นต้องรับกำลังงานมาจากเครื่องอ่านข้อมูลโดยตรง ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีการออกแบบระบบสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล (ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่งทั้งข้อมูลและกำลังงานไปในตัว) ให้สามารถส่งกำลังงานที่มีค่าสูงพอให้สามารถแพร่กระจายไปในพื้นที่ใช้งาน และสามารถทำให้สายอากาศของแท็กได้รับกำลังงานที่เพียงพอในการสั่งให้ชิปภายในแท็กทำงาน

เทคโนโลยีของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุแบบการเชื่อมต่อระยะสนามระยะไกลนั้น เป็นหลักการที่ใช้งานที่ความถี่สูง เช่น ย่านความถี่สูงยิ่งและย่านความถี่ไมโครเวฟ เป็นต้น

ในรูปที่ 2.24 แสดงระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้หลักการการเชื่อมต่อระยะสนามระยะไกล ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ได้ เช่น กำลังที่ส่งออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูล อัตราขยายของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล เป็นต้น

จากสมการการส่งสัญญาณในช่องว่างอิสระของฟรีส (Friis's Transmission Formular) สามารถหาค่ากำลังงานที่สายอากาศของแท็กรับได้ ดังนี้

$$P_{tag-ant} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 P_{reader-ant} G_{reader-ant} G_{tag-ant} \chi \quad (2.5)$$

โดยที่

$P_{reader-ant}$	คือ กำลังงานที่ส่งออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูล
$G_{reader-ant}$	คือ อัตราขยายของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล
R	คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก
$G_{tag-ant}$	คือ อัตราขยายของสายอากาศของแท็ก
λ	คือ ความยาวคลื่นในช่องว่างที่ความถี่ใช้งาน
χ	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแมตซ์ซิ่งของการโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศของแท็ก

ถ้าสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศของแท็กมีการโพลาไรซ์ที่ตรงกันจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแมตซ์ซิ่งของการโพลาไรซ์เท่ากับ 1 หรือ 0 dB แต่ในการติดต่อสื่อสารของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในสนามระยะไกลโดยทั่วไปสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลจะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมและสายอากาศของแท็กจะมีโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแมตซ์ซิ่งของการโพลาไรซ์มีค่าเท่ากับ 0.5 หรือ -3 dB

กำลังงานบางส่วนที่สายอากาศของแท็กรับมาได้จะถูกส่งต่อไปยังชิป ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$P_{tag-chip} = \tau P_{tag-ant} \quad (2.6)$$

โดยที่

τ คือ สัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่าน (Transmission Power Coefficient)

ดังนั้นระยะทางที่เครื่องอ่านข้อมูลสามารถอ่านได้ไกลที่สุด คือ เมื่อ $P_{tag-chip}$ มีค่าเท่ากับกำลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้ชิปทำงานได้ ($P_{tag-threshold}$) และสามารถหาระยะทางที่มากที่สุดแสดงดังสมการนี้คือ

$$R_{\max(reader)} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{reader-tx} G_{reader-ant} G_{tag-ant} \chi \tau}{P_{tag-threshold}}} \quad (2.7)$$

หรือ

$$R_{\max(reader)} = 10^\alpha \quad (\text{m}) \quad (2.8)$$

โดยที่

$$\alpha = 27.6 - 20 \log[f(\text{MHz})] + P_{reader-tx}(\text{dBm}) + G_{reader-ant}(\text{dBic}) + \frac{G_{tag-ant}(\text{dBi}) + \chi(\text{dB}) + \tau(\text{dB}) - P_{tag-threshold}(\text{dBm})}{20} \quad (2.9)$$

2. การติดต่อสื่อสารจากแท็กกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูล

มาตรฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุแบบการเชื่อมต่อระยะสนามระยะไกล กำหนดรูปแบบการส่งข้อมูลจากแท็กมายังเครื่องอ่านข้อมูล โดยอาศัยเทคโนโลยีที่เป็นการแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูล คือ การกระจัดกระจายย้อนกลับ การติดต่อสื่อสารจากแท็กไปยังเครื่องอ่านข้อมูลด้วยวิธีการกระจัดกระจายย้อนกลับนี้จะขึ้นอยู่กับความแรงของสนามที่เกิดการกระจัดกระจายย้อนกลับของแท็ก บนพื้นฐานของสมการ Monostatic หรือ Backscatter Radar สามารถหาค่ากำลังงานของสัญญาณมอดูเลตที่เครื่องอ่านข้อมูลรับได้ คือ

$$P_{reader-rx} = \frac{\lambda}{(4\pi)^3 R^4} P_{reader-tx} G_{reader-ant}^2 \chi \sigma \quad (2.10)$$

โดยที่

σ คือ หน้าตัดขวางเรดาร์ (Radar Cross-section: RCS) ของแท็ก

เมื่อกำลังงานที่รับได้มีค่าเท่ากับความไวในการตอบสนองของเครื่องอ่านข้อมูล ($P_{tag-threshold}$) จะทำให้ได้ระยะทางที่มากที่สุดสำหรับการติดต่อสื่อสารด้วยการกระจายย้อนกลับและสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$R_{\max(\text{Backscatter})} = \sqrt[4]{\frac{\lambda P_{\text{reader-tx}} G_{\text{reader-ant}}^2 \chi \sigma}{(4\pi)^3 P_{\text{reader-threshold}}}} \quad (2.11)$$

หรือ

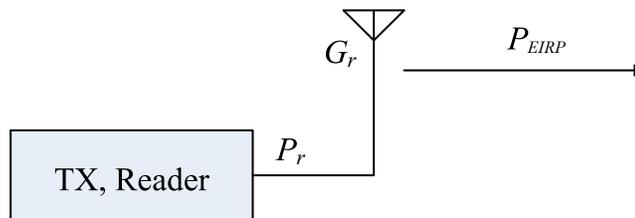
$$R_{\max(\text{Backscatter})} = 10^\beta \quad (\text{m}) \quad (2.12)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \beta = & 16.6 - 20 \log[f(\text{MHz})] + P_{\text{reader-tx}}(\text{dBm}) + 2G_{\text{reader-ant}}(\text{dBic}) \\ & + \frac{\chi(\text{dB}) + \sigma(\text{dBsm}) - P_{\text{reader-threshold}}(\text{dBm})}{40} \end{aligned} \quad (2.13)$$

จากสมการที่ได้กล่าวมาข้างต้น พบว่าระยะทางในการอ่านของเครื่องอ่านข้อมูลขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แต่มีพารามิเตอร์อยู่ 2 ตัว ที่สามารถทราบค่าได้ก่อนจากการเลือกเครื่องอ่านข้อมูลและตัวชิป คือ ค่ากำลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้ชิปทำงานได้ ($P_{tag-threshold}$) และค่าความไวในการตอบสนองของเครื่องอ่านข้อมูล ($P_{reader-threshold}$)

1.5.3.4 ค่ากำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิภาพไอโซทรอปิก (Effective Isotropic Radiated Power: EIRP) และค่ากำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิภาพ (Effective Radiated Power: ERP)



รูปที่ 2.25 กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิภาพไอโซทรอปิก

รูปที่ 2.25 แสดงกำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิผลไอโซทรอปิก ซึ่งได้มาจากกำลังงานด้านออกของเครื่องอ่านข้อมูลและอัตราขยายของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล โดยที่สายอากาศตัวส่งเป็นไอโซทรอปิกส์

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ระยะทางในการอ่านที่มากที่สุดเป็นส่วนหนึ่งกับกำลังงานด้านออกของเครื่องอ่านข้อมูลและอัตราขยายของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล นั่นคือ ถ้ากำลังงานและอัตราขยายของเครื่องอ่านข้อมูลมีค่าสูงจะทำให้ระยะทางการอ่านสูงขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามในการส่งกำลังงานด้านออกของเครื่องอ่านข้อมูลต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อบังคับของแต่ละประเทศ เช่น

ค่า EIRP คือ การทดสอบกำลังงานที่แพร่กระจายจากสายอากาศตัวส่งที่เป็นไอโซทรอปิก (Isotropic) นั่นคือ มีอัตราขยายเท่ากับ 1 หรือ 0 dBi หาได้ดังนี้

$$P_{EIRP} = P_{reader-tx} G_{reader-ant} \quad (2.14)$$

โดยทั่วไปมีการอ้างถึงค่า EIRP และค่า ERP ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสายอากาศไดโพลมากกว่าสายอากาศแบบไอโซทรอปิก และมีอัตราขยายเท่ากับ 1.64 หรือ 2.15 dBi ความสัมพันธ์ระหว่างค่า EIRP และค่า ERP คือ

$$P_{EIRP} = 1.64 P_{ERP} \quad (2.15)$$

2.5.3.5 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่าน

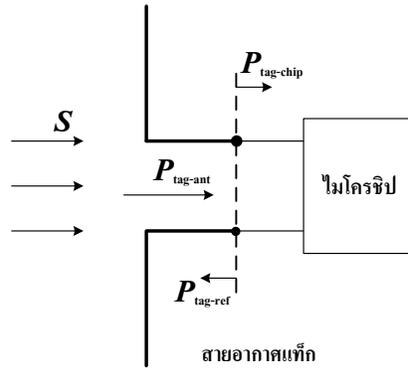
พิจารณาพื้นที่ประสิทธิผล (A_{e-max}) ของสายอากาศของแท่งที่วางอยู่ในสนามของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลซึ่งมีความหนาแน่นกำลังงาน (S : W/m^2) แท่งจะได้รับกำลังงานและส่งต่อไปยังรอยต่อระหว่างสายอากาศและชิปที่มีอิมพีแดนซ์เป็น Z_T กำลังงานส่วนหนึ่งจะส่งผ่านไปยังชิป ในขณะที่บางส่วนจะถูกสะท้อนกลับและแพร่กระจายอีกครั้งหนึ่งที่สายอากาศ กำลังงานที่แท่งรับได้และกำลังงานที่ส่งต่อไปยังชิป คือ

$$P_{tag-ant} = S A_{e-max} \quad (2.16)$$

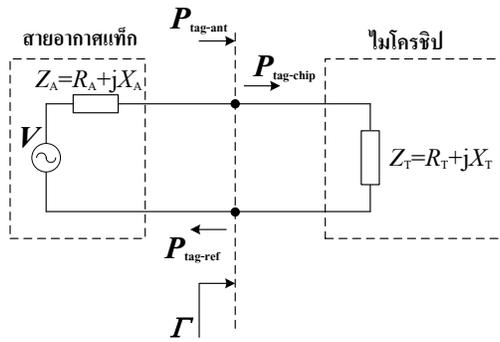
และ

$$P_{tag-chip} = \tau P_{tag-ant} \tag{2.17}$$

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่านจะถูกกำหนดโดยค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ Z_A ของแท็ก และอิมพีแดนซ์ของชิป Z_T ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่และกำลังงานที่จ่ายให้ชิป



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.26 กำลังงานที่ส่งมายังแท็กและวงจรสมมูล

(ก) กำลังงานที่ส่งมายังโครงสร้างของแท็ก (ข) วงจรสมมูล

จากรูปที่ 2.26 แสดงวงจรสมมูล อิมพีแดนซ์ของชิป Z_T จะรวมผลของตัวกล่องที่ใส่ชิปด้วย โดยที่อิมพีแดนซ์ของทั้งสายอากาศและชิปจะขึ้นอยู่กับความถี่

จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) คือ

$$\Gamma = \frac{Z_T - Z_A^*}{Z_T + Z_A}, \quad 0 \leq |\Gamma| \leq 1 \tag{2.18}$$

โดยที่

$$Z_T = R_T + jX_T \quad (2.19)$$

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.20)$$

Z_A^* คือ ค่าสังยุคของ Z_A

กำลังงานที่ส่งไปยังชิป คือ

$$P_{tag-chip} = (1 - |\Gamma|^2) P_{tag-ant} \quad (2.21)$$

สัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่านสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\tau = \frac{P_{tag-chip}}{P_{tag-ant}} = 1 - |\Gamma|^2 = \frac{4R_A R_T}{(R_A + R_T)^2 + (X_A + X_T)^2}, \quad 0 \leq \tau \leq 1 \quad (2.22)$$

เมื่อสายอากาศเป็นคอนจูเกตแมตซ์กับชิป นั่นคือ $R_T = R_A$ และ $X_T = -X_A$ จะทำให้ $|\Gamma| = 0$, $\tau = 1$ จะได้กำลังงานที่ส่งผ่านจากสายอากาศแท้ไปยังชิปมากที่สุด และแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$P_{tag-chip-max} = P_{tag-ant} = S A_{e-max} \quad (2.23)$$

ในขณะที่สายอากาศถูกทำให้ลัดวงจร นั่นคือ อิมพีแดนซ์ของชิปมีค่าเท่ากับ 0 ($R_T = 0$) และ $X_T = -X_A$ ส่งผลให้ $|\Gamma| = 1$ และ $\tau = 0$ ดังนั้นจะไม่มีกำลังงานส่งไปยังชิป

ในการจำลองหรือการทดสอบสายอากาศโดยส่วนใหญ่จะได้ผลออกมาในรูปของค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss: RL) มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ซึ่งใช้เพื่ออธิบายคุณลักษณะของการเข้ากันได้ของอิมพีแดนซ์ กำหนดได้ดังนี้

$$RL(\text{dB}) = -20 \log_{10}(|\Gamma|) \quad (2.24)$$

2.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุความถี่สูง ยิ่ง ตัวอย่างเช่น ลักษณะและประเภทของลูกข่าย การทำงานของเครื่องอ่าน ข้อพิจารณาในการเลือกใช้อุปกรณ์ การสื่อสารแบบการกระจายย้อนกลับ นอกจากนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่นิยมใช้กันทั่วไป รวมทั้งหลักการงานและหลักการการสื่อสารของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุด้วย

บทที่ 3

ผลการวิเคราะห์สายอากาศ

3.1 กล่าวนำ

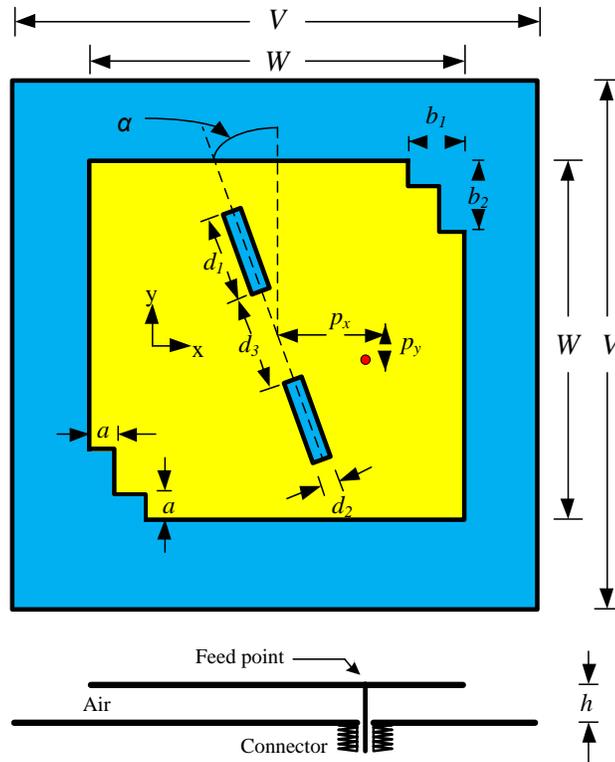
ในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ย่านความถี่สูงยิ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอนี้ จะมีการโพลาริซเป็นแบบวงกลมเพื่อให้สามารถสื่อสารกับแท่งที่มีลักษณะการวางตัวแบบต่างๆ ได้ และในบทนี้ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ โดยพิจารณาอัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ ในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งจะเริ่มด้วยการกำหนดรูปแบบของสายอากาศ โดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานและสมการคำนวณในบทที่ 2 จากนั้นจึงจำลองผลสายอากาศและปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศด้วยโปรแกรม CST[®] Microwave Studio [27] เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อสมรรถนะของสายอากาศ รวมทั้งหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้สายอากาศนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งได้ ซึ่งระบบนี้มีความต้องการสายอากาศที่ให้การโพลาริซเป็นแบบวงกลม มีอัตราขยายสูง และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสม รายละเอียดต่างๆ จะนำเสนอด้งหัวข้อต่อไปนี้

3.2 สายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

3.2.1 โครงสร้างสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

โครงสร้างของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ประกอบไปด้วยแผ่นระนาบสองแผ่น คือ แผ่นล่างเป็นแผ่นระนาบกราวนด์ และแผ่นบนเป็นแผ่นระนาบตัวแพร่กระจายคลื่น โดยที่แผ่นระนาบกราวนด์มีลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความยาวและความกว้างเป็น V ซึ่งทำหน้าที่เป็นแผ่นกราวนด์ของสายอากาศ ส่วนชั้นบนเป็นแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีความยาวและความกว้างเป็น W แผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสนี้จะถูกตัดมุมเป็นแบบขั้นทั้งสองมุมที่อยู่ตรงข้ามกัน ซึ่งการตัดมุมแบบขั้นนี้มีความกว้างเป็น a และความยาวของขั้นมีขนาดเป็น b_1 และ b_2 ตามลำดับ และมีร่องเอียงคู่ที่มีความยาวและความกว้างเป็น d_1 และ d_2 ตามลำดับ ซึ่งร่องเอียงคู่นี้ทำมุมกับแนวแกน y เป็นมุมขนาด α และมีระยะห่างระหว่างร่องเอียงของทั้งสองร่องเป็น d_3 ซึ่งแผ่นระนาบกราวนด์และแผ่นระนาบตัวแพร่กระจายคลื่นทั้งสองแผ่นจะวางตัวในระนาบ xy มีระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบกราวนด์และแผ่นระนาบตัวแพร่กระจายคลื่นเป็น h และป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่วางตัวในแนวแกน z ดังแสดงในรูปที่ 3.1 สายอากาศที่นำเสนอนี้มีการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบโพลาริซวงกลมสำหรับประยุกต์ใช้กับเครื่องอ่าน

ข้อมูลระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งตามมาตรฐานของประเทศไทย ซึ่งในการออกแบบสายอากาศให้มีแบบโพลาริซวงกลมนี้ทำได้โดยอาศัยการตัดมุมของแผ่นระนาบตัวแพร่กระจายคลื่นร่วมกับเทคนิคเจาะร่อง และการวิเคราะห์สายอากาศทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดโครงสร้างสายอากาศ รวมทั้งทำการสร้างสายอากาศต้นแบบและทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบ



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

3.2.2 การออกแบบสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

สำหรับการออกแบบสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ นั้น เริ่มจากการออกแบบสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสก่อน โดยการกำหนดขนาดของแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นและแผ่นระนาบกราวด์ จากนั้นปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศโดยการตัดมุมของสายอากาศสองมุมที่อยู่ตรงข้ามกันเป็นแบบขั้นเพื่อให้ได้อัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ที่มุมใช้งาน และจากนั้นจะทำการเพิ่มร่องคู่บนสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้น เพื่อให้ได้อัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ ที่ดีขึ้น ในย่านความถี่ใช้งาน สายอากาศที่นำเสนอในโครงการวิจัยนี้ใช้วัสดุฐานรองเป็นอากาศในการออกแบบเพื่อหลีกเลี่ยงค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก จากนั้นทำการวิเคราะห์สายอากาศ

3.3 คุณลักษณะของสายอากาศ

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศ จะเริ่มด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นให้กับสายอากาศก่อน โดยการคำนวณพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศซึ่งได้มาจากทฤษฎีในบทที่ 2 ซึ่งจะได้รูปแบบสายอากาศเริ่มต้นดังรูปที่ 3.2 หลังจากนั้นจะทำการปรับปรุงคุณลักษณะของสายอากาศให้ดีขึ้นด้วยการตัดมุมและเพิ่มร่องบนแผ่นตัวแปรกระจายคลื่น ตามลำดับ

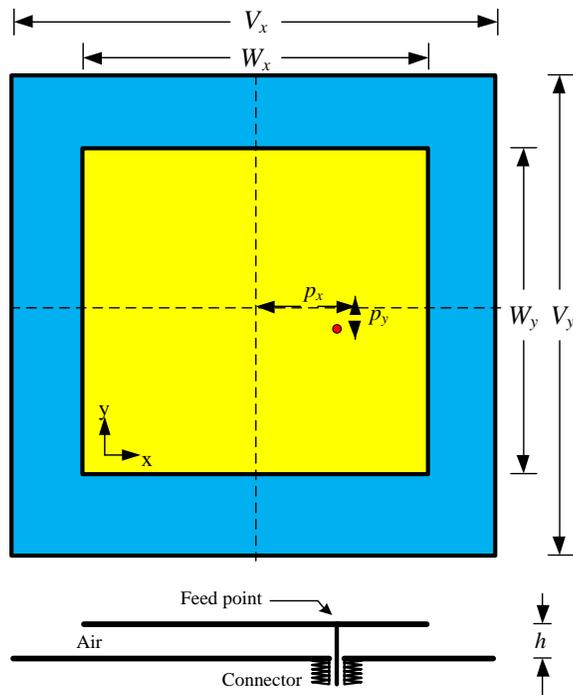
ในส่วนของการคำนวณหาขนาดของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความกว้างเป็น W มีวัสดุฐานรองเป็นอากาศ และต้องการให้เกิดโหมด TM_{010} นั้นหาได้จากสมการที่ 2.3 ซึ่งเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ 3.1 โดยที่ v_0 คือความเร็วของแสง ϵ_r คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง

$$W = \frac{1}{2(f_r)_{010} \sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{2(f_r)_{010} \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.5)$$

$$W = \frac{(3 \times 10^8)}{2(922.5 \times 10^6) \sqrt{1}}$$

$$= 162.6 \text{ mm}$$

ดังนั้นขนาดเริ่มต้นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส W มีค่าเท่ากับ 162.6 มิลลิเมตร ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสแสดงดังรูปที่ 3.2 และค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสแสดงดังตารางที่ 3.1

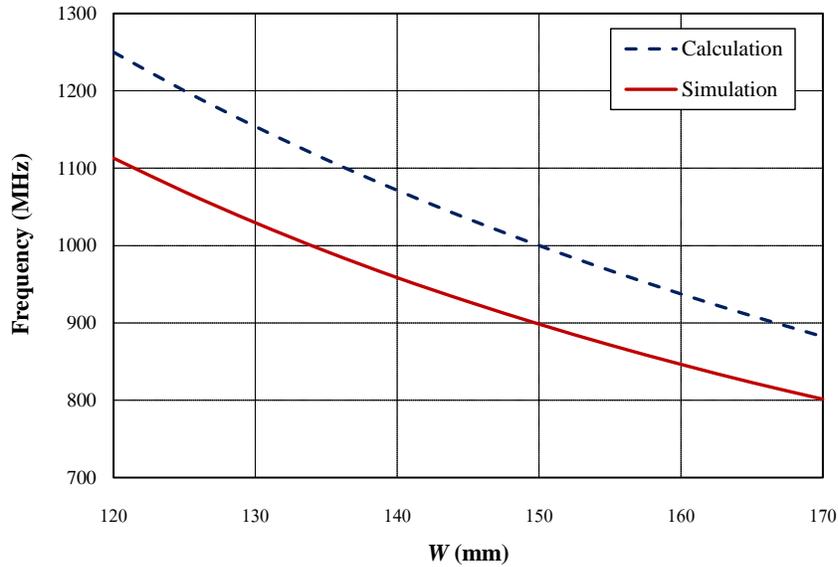


รูปที่ 3.3 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 922.5 MHz (mm)
V	200
W	162.6
h	8
p_x	33
p_y	0

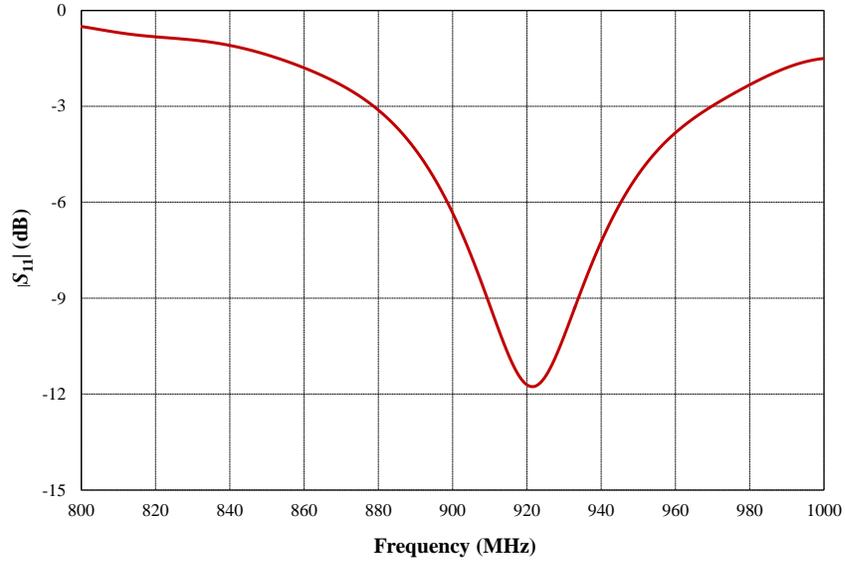
เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังที่แสดงในตารางที่ 3.1 ไปจำลองเป็นสายอากาศเริ่มต้น ซึ่งทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสายอากาศ (W) ของสายอากาศกับความถี่เรโซแนนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาด (W) ของสายอากาศกับความถี่เรโซแนนซ์

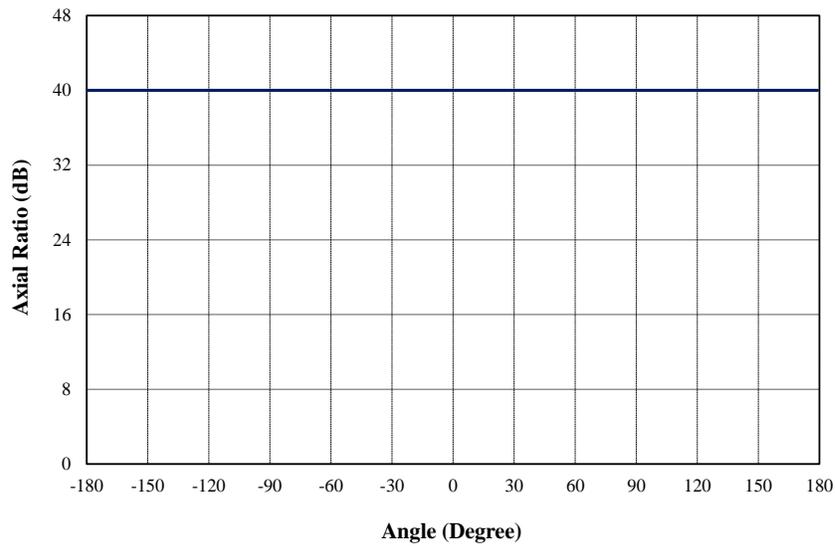
จากรูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาด (W) ของสายอากาศกับความถี่เรโซแนนซ์ โดยในการจำลองสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสกำหนดให้ระนาบกราวด์มีขนาดความยาวและความกว้าง (V) เท่ากับ 200 มิลลิเมตร และมีจุดป้อนสัญญาณที่ p_x เท่ากับ 3.3 มิลลิเมตร และ p_y เท่ากับ 0 มิลลิเมตร พบว่าขนาด (W) ของสายอากาศ ส่งผลต่อค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศเป็นอย่างมาก จากผลการจำลองที่ความถี่เรโซแนนซ์เป็น 922.5 MHz ขนาดของสายอากาศจะมีค่าเท่ากับ 145.8 มิลลิเมตร และจะสังเกตได้ว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีแนวโน้มเดียวกันกับค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST[®] Microwave Studio ดังนั้นในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศจึงใช้การจำลองผลเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของสายอากาศ

เมื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสแสดงดังรูปที่ 3.2 จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 3.1 และเมื่อนำไปจำลองสายอากาศเพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของสายอากาศจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศแผ่นระนาบ พบว่าผลที่ได้จากการจำลองคือ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนแสดงดังรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 ตามลำดับ

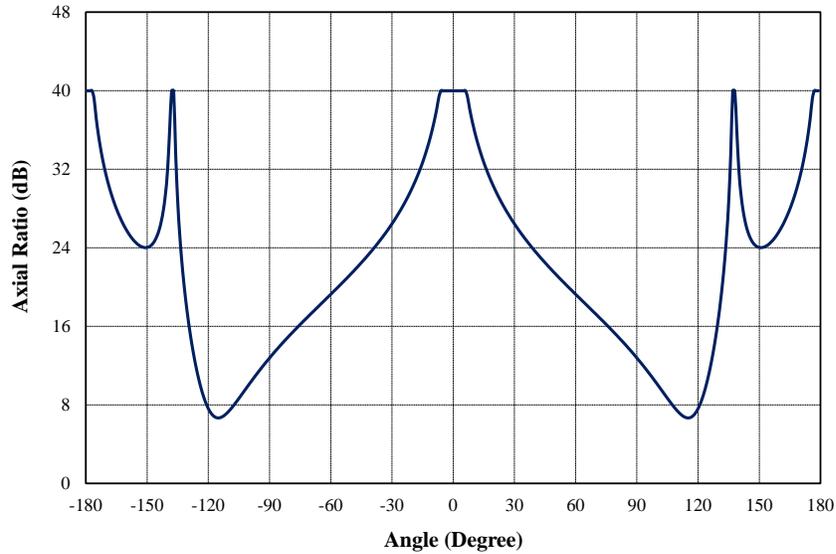


รูปที่ 3.5 $|S_{11}|$ ของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

จากรูปที่ 3.4 พบว่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศแผ่นระนาบในช่วงที่ความถี่ใช้งานมีค่าประมาณ -10 dB ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุง $|S_{11}|$ ให้มีค่าดีกว่า -10 dB



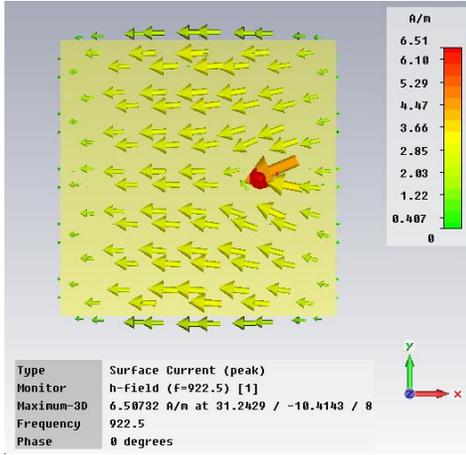
(ก) ระนาบ xz



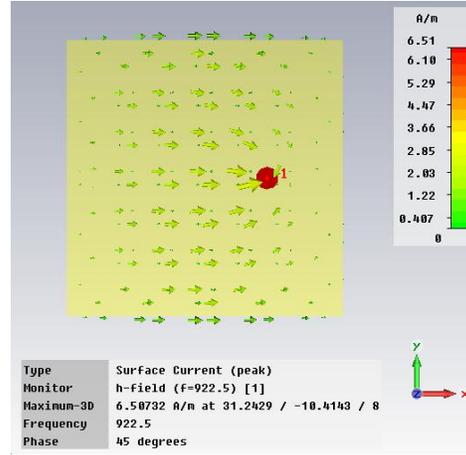
(ข) ระนาบ yz

รูปที่ 3.6 อัตราส่วนแกนของสายอากาศแผ่นระนาบที่มุมต่างๆ

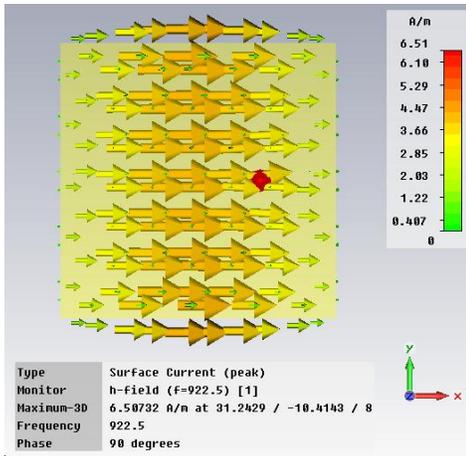
จากรูปที่ 3.5(ก) และ (ข) เมื่อพิจารณาอัตราส่วนแกนของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ความถี่กลางของความถี่ใช้งานที่ 922.5 MHz พบว่าอัตราส่วนแกนที่มุมต่างๆ มีค่าสูงกว่า 3 dB ทุกมุม ส่งผลให้สายอากาศไม่เกิดการโพลาไรซ์วงกลม ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงอัตราส่วนแกนให้มีค่าต่ำกว่า 3 dB โดยเฉพาะที่มุม 0 องศา ซึ่งเป็นมุมที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร โดยทำการดัดแปลงโครงสร้างของสายอากาศโดยอาศัยเทคนิคการตัดมุม โดยจะตัดมุมของแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งจะทำให้กระแสที่ไหลบริเวณผิวของแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากันแต่มีเฟสต่างกันเป็นจำนวนเท่าของ $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน ซึ่งสายอากาศเริ่มต้นที่จะทำการปรับโครงสร้างเพื่อให้ได้อัตราส่วนแกนให้มีค่าต่ำกว่า 3 dB ที่ความถี่ใช้งาน โดยจะดูทิศทางการไหลของกระแสที่คาบเวลา (Period: T) ต่างๆ บนผิวแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพื่อที่จะทำการปรับโครงสร้างต่อไป แสดงดังรูปที่ 3.6



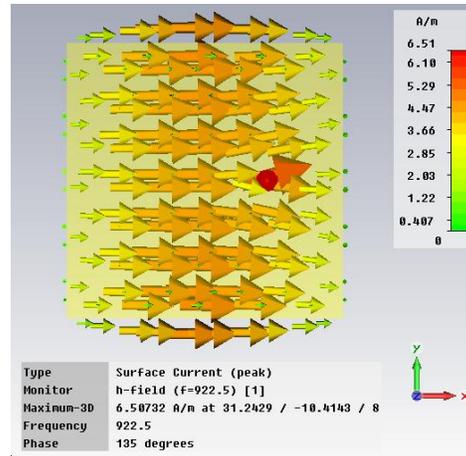
(h) $t = 0$



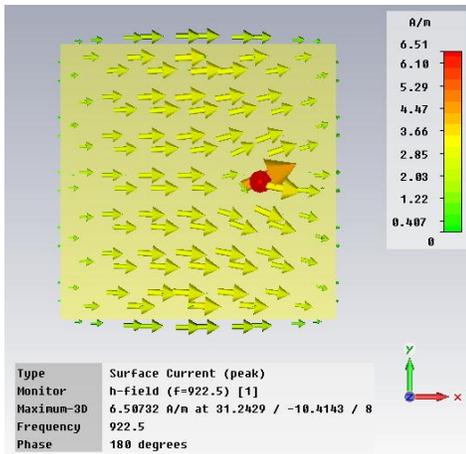
(i) $t = \frac{T}{8}$



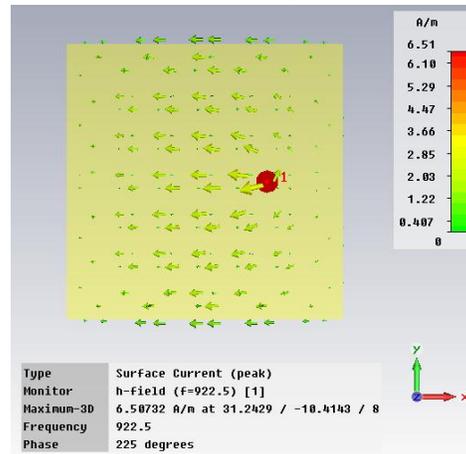
(j) $t = \frac{T}{4}$



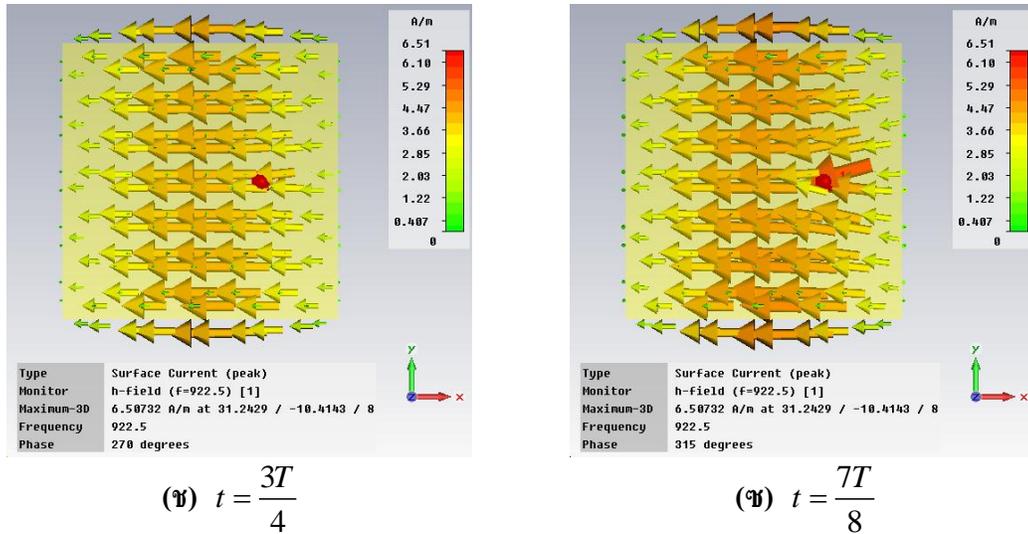
(k) $t = \frac{3T}{8}$



(l) $t = \frac{T}{2}$



(m) $t = \frac{5T}{8}$



รูปที่ 3.7 กระแสที่ไหลบนผิวแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่เวลา (t)

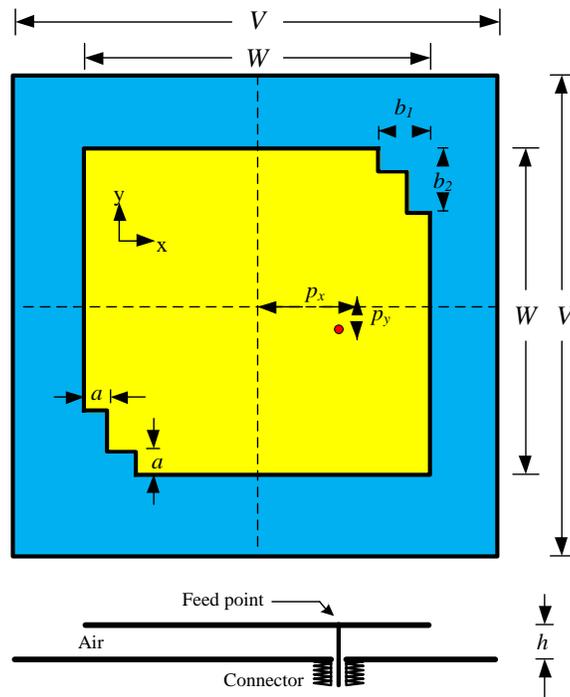
- ต่างๆ (ก) $t=0$ (ข) $t = \frac{T}{8}$ (ค) $t = \frac{T}{4}$ (ง) $t = \frac{3T}{8}$ (จ) $t = \frac{T}{2}$
 (ฉ) $t = \frac{5T}{8}$ (ช) $t = \frac{3T}{4}$ (ฅ) $t = \frac{7T}{8}$

จากรูปที่ 3.6 แสดงกระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่เวลา (t) ต่างๆ พบว่ากระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นที่เวลาเท่ากับ 0 มีทิศทางการไหลของกระแสไปในทิศทาง $-x$ ต่อมาที่เวลาเท่ากับ $\frac{T}{8}$ จะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของกระแสไปในทิศทาง $+x$ และจะมีทิศทางการไหลของกระแสไปในทิศทาง $+x$ อย่างต่อเนื่องในเวลาเท่ากับ $\frac{T}{4}$, $\frac{3T}{8}$ และ $\frac{T}{2}$ จากนั้นที่เวลาเท่ากับ $\frac{5T}{8}$ จะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของกระแสอีกครั้งไปในทิศทาง $-x$ ต่อเนื่องไปที่เวลาเท่ากับ $\frac{3T}{4}$, $\frac{7T}{8}$ และ T จะมีทิศทางการไหลของกระแสไปในทิศทาง $-x$ ดังนั้นสามารถคาดเดาได้ว่าการไหลของกระแสในทิศทาง $-x$ และ $+x$ อย่างต่อเนื่อง จะไม่สามารถทำให้เกิดการโพลาไรซ์แบบวงกลม

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมเพื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบ สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรมจำลองการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะพิจารณาจากอัตราส่วนแอมพลิจูดและ $|S_{11}|$ โดยที่สายอากาศจะต้องมีอัตราส่วนแอมพลิจูดที่น้อยกว่า 3 dB และมี $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ตลอดจนความถี่ที่ต้องการใช้งาน รวมทั้งขนาดของสายอากาศต้องเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งในขั้นตอนแรกจะทำการตัดมุมของแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสเพื่อให้ได้อัตราส่วนแอมพลิจูดที่น้อยกว่า 3 dB และเมื่อได้อัตราส่วนแอมพลิจูดที่น้อยกว่า 3 dB แล้วจึงเพิ่มร่องบนสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสสำหรับปรับปรุง $|S_{11}|$ ให้ได้ค่าที่ต่ำกว่า -10 dB

3.3.1 สายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้น

ในขั้นตอนแรกจะทำการตัดมุมสองมุมบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบขั้น มีขนาดความยาวของขั้นในแกน x และ y เป็น b_1 และ b_2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร ตามลำดับ และมีความกว้างเป็น a ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.8 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้น

จากรูปที่ 3.7 การตัดมุมแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส จะทำให้กระแสที่ไหลบนผิวตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้ามีขนาดเท่ากันแต่มีเฟสต่างกันเป็นจำนวนเท่าของ $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นแสดงดังตารางที่ 3.2 โดยสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบนี้จะดูผลของอัตราส่วนแกนให้มีค่าต่ำกว่า 3 dB เป็นหลัก

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้น

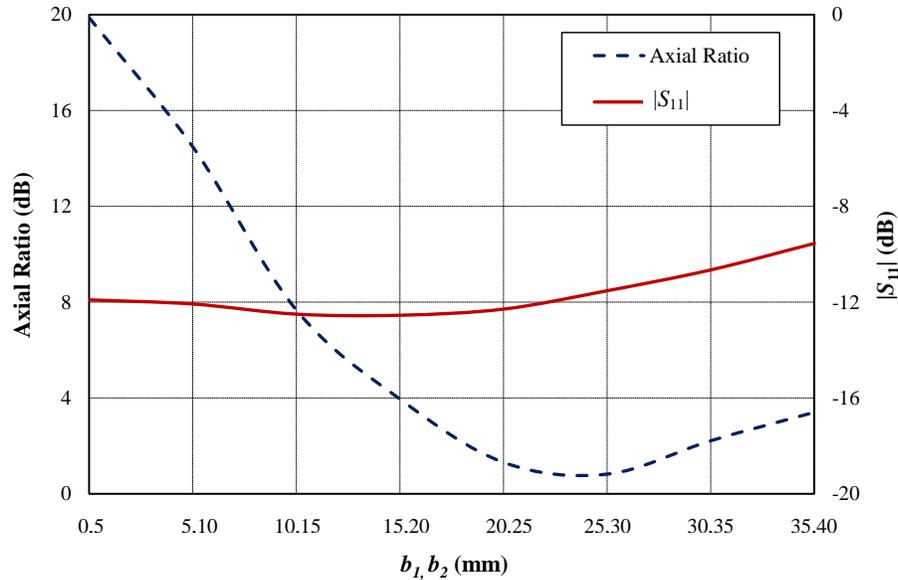
พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 922.5 MHz (mm)
V	200
W	145.8
b_1	25
b_2	30
a	5
h	8
p_x	33
p_y	0

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมเพื่อที่จะให้สายอากาศมีแบบโพลาริซวงกลมที่ความถี่ใช้งาน สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรมจำลองการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะพิจารณาจากอัตราส่วนเกินน้อยกว่า 3 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน (920 MHz ถึง 925 MHz)

3.3.1.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของการตัดมุมแบบขั้นใน

แนวแกน x และ y (b_1, b_2)

ในหัวข้อนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของการตัดมุมแบบขั้นในแนวแกน x (b_1) และ y (b_2) โดยในการตัดมุมจะตัดมุมด้านบนขวาและล่างซ้ายของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งกำหนดให้ขั้นมีความกว้าง (a) เท่ากับ 5 มิลลิเมตร และค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของความยาวขั้นในแนวแกน x และ y มีค่าเท่ากับ 0 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของการตัดมุมแบบขั้นที่ความถี่กลาง (922.5 MHz) ของย่านความถี่ใช้งาน จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.8

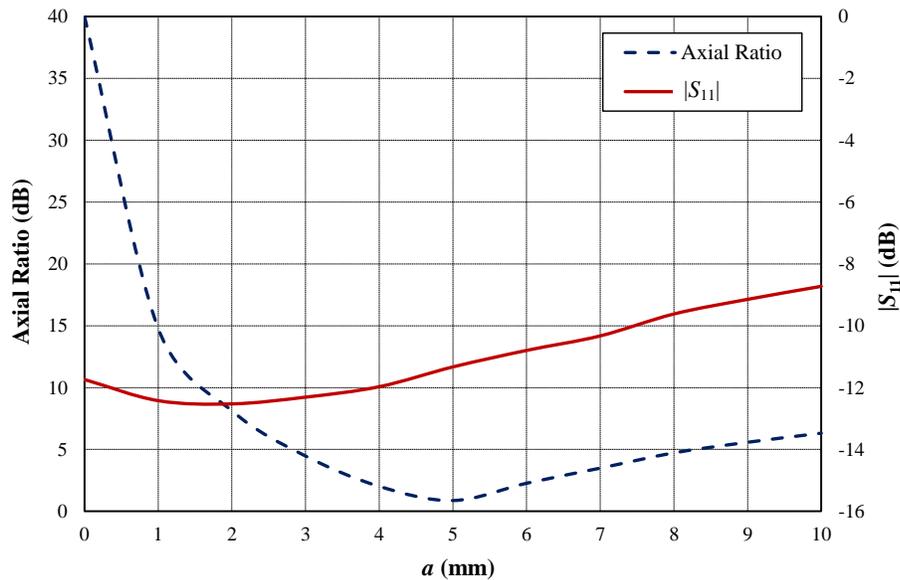


รูปที่ 3.9 อัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของการตัดมุมแบบขั้นในแนวแกน x (b_1) และ y (b_2)

จากรูปที่ 3.8 พบว่าการตัดมุมแบบขั้นที่มุมทั้งสองด้านของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ทำให้อัตราส่วนแกนต่ำกว่า 3 dB และ $|S_{11}|$ มีค่าต่ำกว่า -10 dB เล็กน้อย เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของการตัดมุมแบบขั้น ในแนวแกน x (b_1) และในแนวแกน y (b_2) โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้น พบว่าจะส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนแกนมากกว่าค่าอัตราการสูญเสียย้อนกลับอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือจากกราฟเมื่อเพิ่มความยาวขั้นในแนวแกน x (b_1) เท่ากับ 0 มิลลิเมตร และความยาวขั้นในแนวแกน y (b_2) เท่ากับ 5 มิลลิเมตร จนถึงค่าความยาวขั้นในแนวแกน x (b_1) เท่ากับ 25 มิลลิเมตร และความยาวขั้นในแนวแกน y (b_2) เท่ากับ 30 มิลลิเมตร จะส่งผลให้อัตราส่วนแกนมีค่าที่ลดลง ส่วนในช่วงที่ค่าความยาวในแนวแกน x (b_1) เท่ากับ 25 มิลลิเมตร และความยาวในแนวแกน y (b_2) เท่ากับ 30 มิลลิเมตร จนถึงค่าความยาวในแนวแกน x (b_1) เท่ากับ 35 มิลลิเมตร และความยาวในแนวแกน y (b_2) เท่ากับ 40 มิลลิเมตร อัตราส่วนแกนจะมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลของอัตราส่วนแกนที่ได้จากการจำลองจะได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดคือความยาวในแนวแกน x (b_1) เท่ากับ 25 มิลลิเมตร และความยาวในแนวแกน y (b_2) เท่ากับ 30 มิลลิเมตร เนื่องจากค่านี้ให้อัตราส่วนแกนที่ต่ำที่สุด แต่อย่างไรก็ตามในส่วนของค่าอัตราการสูญเสียย้อนกลับนั้นค่าที่ได้ยังไม่ดี ซึ่งจะทำให้การปรับเพื่อให้ได้ค่าตามต้องการต่อไป โดย ซึ่งในหัวนี้จะดูผลของอัตราส่วนแกนให้มีค่าต่ำกว่า 3 dB เป็นหลัก ซึ่งจะนำค่าที่ได้ไปใช้จำลองผลในหัวข้อต่อไป

3.3.1.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้าง (a) ของการตัดมุมแบบขั้น

ในหัวข้อนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของความกว้าง (a) ของการตัดมุมแบบขั้น โดยใช้ค่าที่ได้จากการจำลองให้หัวข้อที่ 3.3.1.1 ซึ่งจะใช้ค่าพารามิเตอร์ความยาวในแนวแกน x (b_1) และแกน y (b_2) เท่ากับ 25 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร ตามลำดับ และความกว้างเริ่มต้น (a) เป็น 5 มิลลิเมตร จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้าง (a) โดยลดและเพิ่มขนาด ผลของอัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของความกว้าง (a) ของการตัดมุมแบบขั้นที่ความถี่กลาง (922.5 MHz) ของย่านความถี่ใช้งาน แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.10 อัตราส่วนแกนและค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้าง (a) ของการตัดมุมแบบขั้น

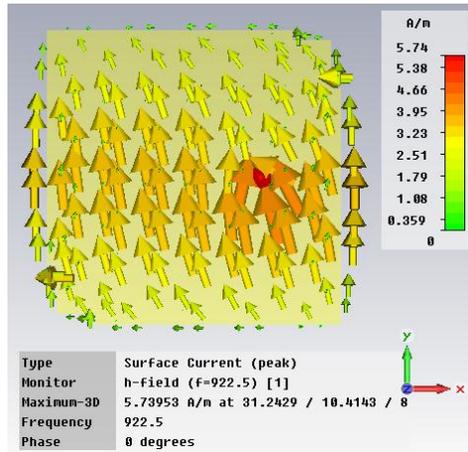
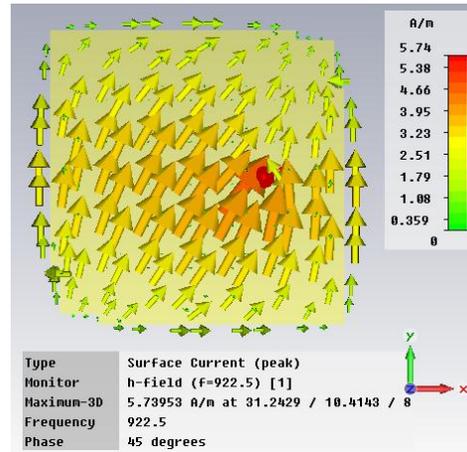
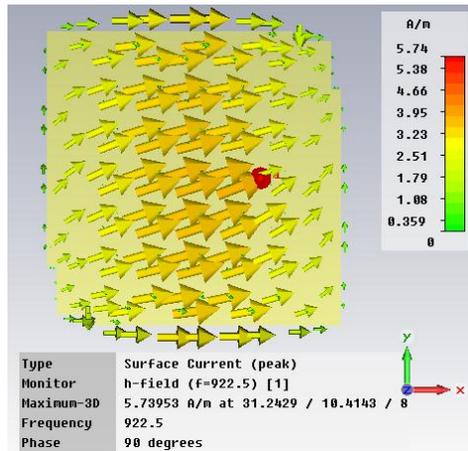
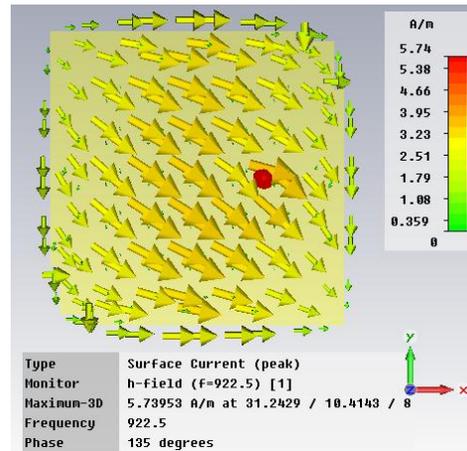
จากรูปที่ 3.9 และเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้าง (a) ของการตัดมุมแบบขั้น พบว่าส่งผลต่ออัตราส่วนแกนเป็นอย่างมาก และจะเห็นได้ว่าเมื่อความกว้าง (a) ของการตัดมุมแบบขั้นเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 3 มิลลิเมตร ถึง 8 มิลลิเมตร อัตราส่วนแกนที่ได้จะต่ำกว่า 3 dB โดยค่าความกว้าง (a) ที่ให้อัตราส่วนแกนต่ำที่สุดเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ซึ่งจะใช้ค่านี้ในหัวข้อถัดไป แต่อย่างไรก็ตามในส่วน of ค่าอัตราส่วนสูญเสียย้อนกลับนั้นยังมีค่าที่ไม่ดี จึงต้องทำการปรับเพื่อให้ได้ค่าตามต้องการต่อไป

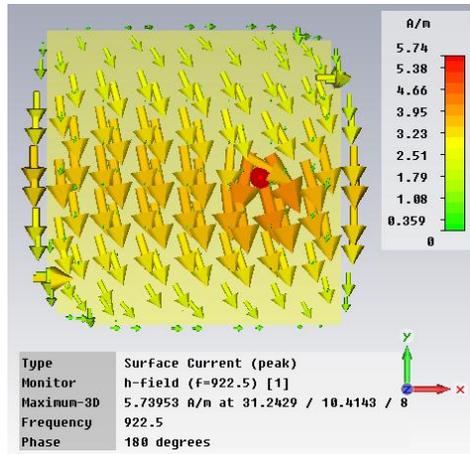
3.3.1.3 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแผ่น

ระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้น

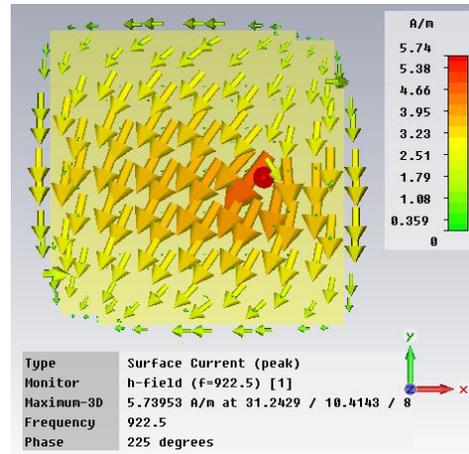
ในหัวข้อนี้เป็นการนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้น มาจำลองสายอากาศเพื่อดูกระแสที่ไหลบนผิวของแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่น โดยการกำหนดความยาวของขั้นในแนวแกน x (b_1) และแกน y (b_2) เท่ากับ 25 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร ตามลำดับ และ

ความกว้างของชั้น (a) เท่ากับ 5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการพิจารณาผลการจำลองในหัวข้อข้างต้น ดังที่กล่าวมาแล้ว พบว่าผลของกระแสที่ไหลบนผิวตัวนำของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุม แบบชั้นที่ความถี่กลาง (922.5 MHz) ของย่านความถี่ใช้งานเป็นดังรูปที่ 3.10

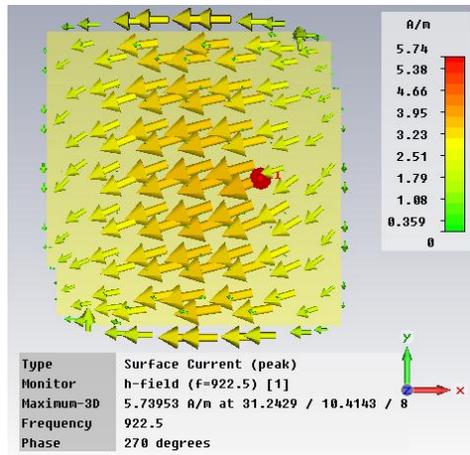
(ก) $t = 0$ (ข) $t = \frac{T}{8}$ (ค) $t = \frac{T}{4}$ (ง) $t = \frac{3T}{8}$



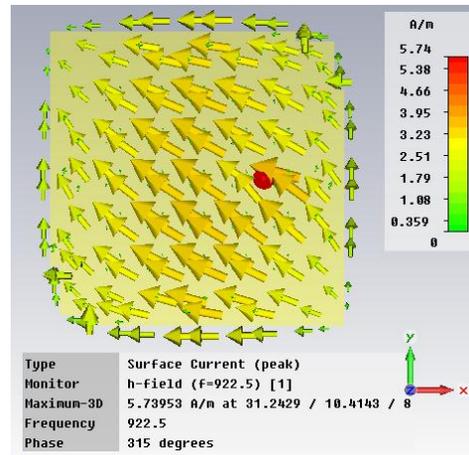
(จ) $t = \frac{T}{2}$



(ฉ) $t = \frac{5T}{8}$



(ช) $t = \frac{3T}{4}$



(ซ) $t = \frac{7T}{8}$

รูปที่ 3.10 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุม

แบบชั้นที่เวลา (t) ต่างๆ (ก) $t = 0$ (ข) $t = \frac{T}{8}$ (ค) $t = \frac{T}{4}$ (ง) $t = \frac{3T}{8}$ (จ) $t = \frac{T}{2}$

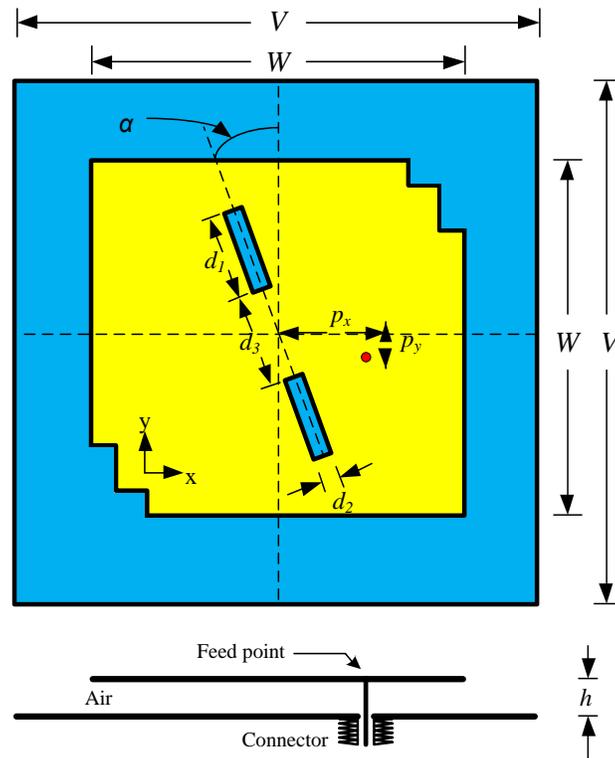
(ฉ) $t = \frac{5T}{8}$ (ช) $t = \frac{3T}{4}$ (ซ) $t = \frac{7T}{8}$

จากรูปที่ 3.10 แสดงกระแสที่ไหลบนแผ่นตัวนำที่เวลา (t) ต่างๆ ของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบชั้น ที่ความยาวของชั้นในแนวแกน x (b_1) และแกน y (b_2) เท่ากับ 25 มิลลิเมตร และ 30 มิลลิเมตร ตามลำดับ และความกว้างของชั้น (a) เท่ากับ 5 มิลลิเมตร พบว่ากระแสที่ไหลบนแผ่นตัวนำที่เวลา (t) ต่างๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของกระแสตลอดเวลา กล่าวคือเวลา (t) ต่างๆ จะมีทิศทางการไหลของกระแสนบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปมีทิศทางโดยประมาณได้ดังนี้ ที่เวลา (t) เท่ากับ 0 มีทิศของกระแส \uparrow ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{8}$ มีทิศของกระแส \nearrow ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{4}$ มีทิศของ

กระแส \rightarrow ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{3T}{8}$ มีทิศของกระแส \searrow ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{2}$ มีทิศของกระแส \downarrow ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{5T}{8}$ มีทิศของกระแส \swarrow ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{3T}{4}$ มีทิศของกระแส \leftarrow ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{7T}{8}$ มีทิศของกระแส \nwarrow และที่เวลา (t) เท่ากับ T มีทิศของกระแส \uparrow ดังนั้นสามารถคาดเดาได้ว่าการไหลของกระแสบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงไปทุกช่วงเวลานั้นสามารถทำให้เกิดการโพลาไรซ์แบบวงกลมได้ โดยจากค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ข้างต้นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นนั้นให้อัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB แต่อย่างไรก็ตาม $|S_{11}|$ ที่ได้มีค่าต่ำกว่า -10 dB เพียงเล็กน้อย คุณสมบัติของสายอากาศจึงยังไม่ดีตามที่ต้องการ จึงต้องทำการปรับปรุงโครงสร้าง โดยสังเกตจากกระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นจะพบว่ากระแสไหลไปทั่วแผ่น จึงคาดว่า การเพิ่มร่องคู่ลงไปบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นตรงกลางแผ่นเพื่อปรับ $|S_{11}|$ จะมีผลกระทบต่อกระแสที่ไหลน้อยที่สุด กล่าวคือ ปรับ $|S_{11}|$ ให้ต่ำกว่า -10 dB และคงอัตราส่วนแกนที่ได้ให้ต่ำกว่า 3 dB ดังหัวข้อที่ 3.3.2

3.3.2 สายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

ในขั้นตอนที่สองเป็นการเพิ่มร่องลงบนสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้น มีลักษณะเป็นร่องคู่อยู่ตรงกลางของแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่น ซึ่งมีขนาดความยาวของแต่ละร่องเป็น d_1 ความกว้างของร่องเป็น d_2 ระยะห่างระหว่างร่องคู่เป็น d_3 และมุมที่ร่องทำกับแนวแกน y เป็น α โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นจากการจำลองในหัวข้อที่ 3.3.1 ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

จากรูปที่ 3.11 การเพิ่มร่องคู่บนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นระนาบเพื่อให้ได้ผลของ $|S_{11}|$ ที่ดีขึ้นและส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนแอมพลิจูดจากที่ได้จำลองสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นมาแล้วในหัวข้อที่ 3.3.1 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศเมื่อเพิ่มร่องคู่บนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นระนาบแสดงดังตารางที่ 3.3 โดยการเพิ่มร่องคู่นี้ต้องการเพื่อปรับ $|S_{11}|$ ให้มีค่าที่ดีขึ้น ดังนั้นในส่วนนี้จะพิจารณา $|S_{11}|$ เป็นหลักและต้องมีอัตราส่วนแอมพลิจูดต่ำกว่า 3 dB

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

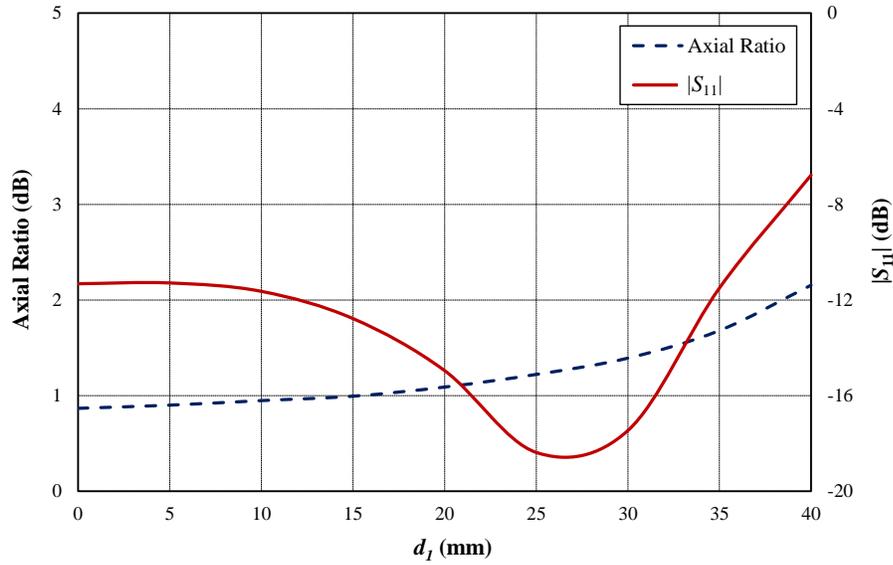
พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 922.5 MHz (mm)
V	200
W	145.8
d_1	27
d_2	11
d_3	60
h	8
α	13 (degree)
p_x	33
p_y	0

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมเพื่อที่จะให้ร่องคู่สามารถปรับ $|S_{11}|$ ให้มีค่าต่ำกว่า -10 dB สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรมจำลองการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะพิจารณาจากอัตราส่วนแอมพลิจูดต่ำกว่า 3 dB และ $|S_{11}|$ ให้มีค่าต่ำกว่า -15 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน (920 MHz ถึง 925 MHz)

3.3.2.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความยาวของร่องคู่ (d_1) ของ

สายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของความยาวร่อง (d_1) ที่เพิ่มบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้น โดยการกำหนดค่าความยาวเริ่มต้นร่องคู่ (d_1) และความกว้าง (d_2) เท่ากับ 25 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระยะห่างระหว่างร่อง (d_3) เป็น 60 มิลลิเมตร และมุมที่ร่องคู่ทำกับแนวแกน y (α) มีค่าเท่ากับ 0 องศา จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงขนาด พบว่าผลของอัตราส่วนแอมพลิจูดและ $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวร่อง (d_1) ของสายอากาศ ที่ความถี่กลาง (922.5 MHz) ของย่านความถี่ใช้งาน แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 อัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวร่อง (d_1) ของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

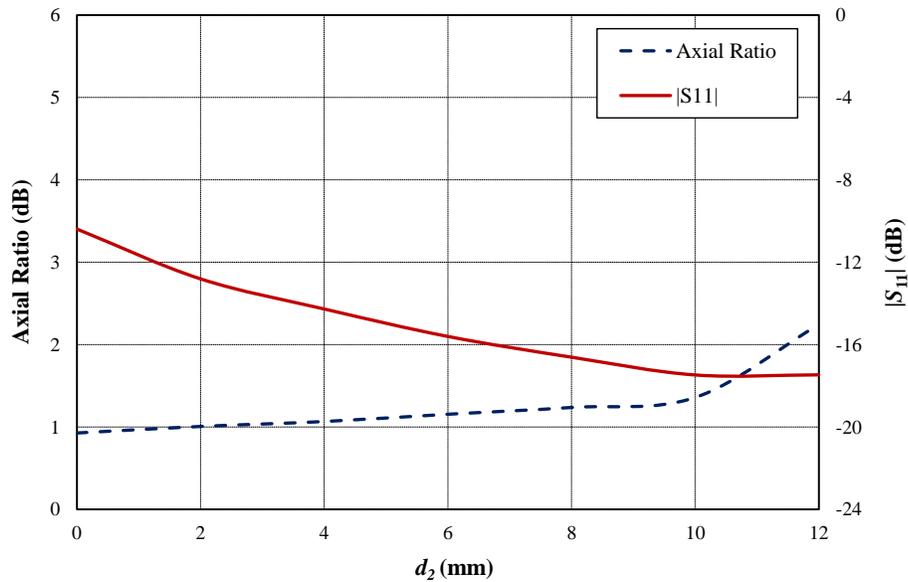
จากรูปที่ 3.12 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของร่อง (d_1) โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้น พบว่ามีผลกระทบต่อ $|S_{11}|$ เป็นอย่างมาก ส่วนอัตราส่วนแกนมีผลกระทบเล็กน้อย กล่าวคือจากกราฟเมื่อเพิ่มความยาวของร่อง (d_1) จากเท่ากับ 0 มิลลิเมตร ไปจนถึง 27 มิลลิเมตร จะได้ผลของอัตราส่วนแกนที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ยังมีค่าต่ำกว่า 3 dB ในส่วนของค่าอัตราการสูญเสียย้อนกลับนั้นจะลดลงและต่ำสุดที่ความยาวของร่อง (d_1) เป็น 27 มิลลิเมตร และเมื่อเพิ่มความยาวของร่อง (d_1) ต่อไปจนถึง 40 มิลลิเมตร พบว่าค่าทั้งอัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาทั้งอัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ ซึ่งในส่วนนี้จะพิจารณา $|S_{11}|$ เป็นหลัก โดยที่อัตราส่วนแกนจะต้องต่ำกว่า 3 dB พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดคือความยาวของร่อง (d_1) มีค่าเท่ากับ 27 มิลลิเมตร จะให้อัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB และ $|S_{11}|$ ต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าต่ำกว่า -16 dB

3.3.2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ความกว้างของร่องคู่ (d_2) ของ

สายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของความกว้างร่อง (d_2) ที่เพิ่มบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้น โดยการกำหนดค่าความกว้างเริ่มต้นร่อง (d_2) เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และให้ความยาวของร่อง (d_1) มีค่าเท่ากับ 27 มิลลิเมตร ซึ่งได้จากการพิจารณาในหัวข้อที่ 3.3.2.1 และกำหนดให้ระยะห่างระหว่างร่อง (d_3) เป็น 60 มิลลิเมตร โดยที่มุมที่ร่องคู่ทำกับแนวแกน y (α) มีค่าเท่ากับ 0 องศา จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้าง (d_2) พบว่าผลของ

อัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างร่อง (d_2) ของสายอากาศ ที่ความถี่กลาง (922.5 MHz) ของย่านความถี่ใช้งาน แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 อัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างร่อง (d_2) ของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

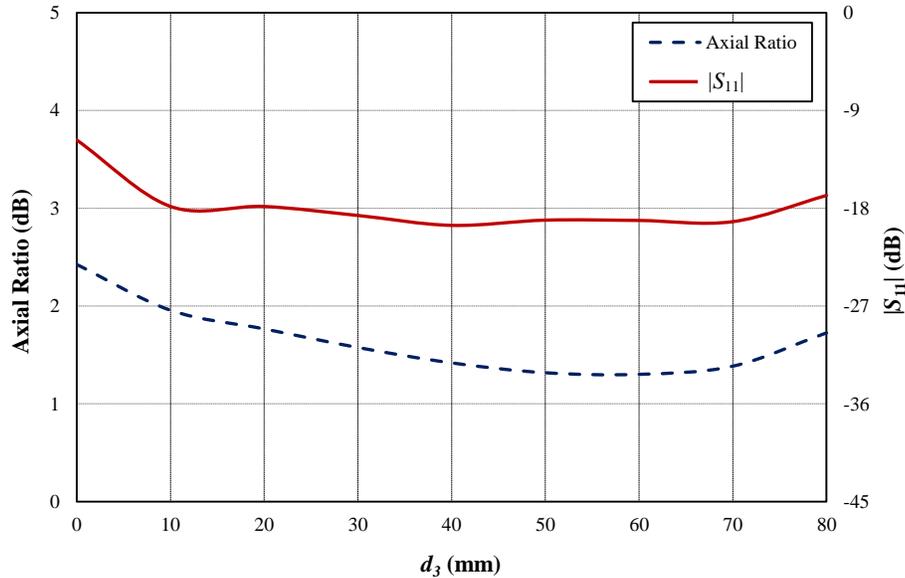
จากรูปที่ 3.13 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของร่อง (d_2) โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้น พบว่ามีผลกระทบต่อ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือจากกราฟเมื่อเพิ่มความกว้างของร่อง (d_2) จากค่าเริ่มต้นไปเรื่อยๆ อัตราส่วนแกนจะค่อยๆ เพิ่มจนกระทั่งความกว้างของร่อง (d_2) เป็น 10 มิลลิเมตร อัตราส่วนแกนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อพิจารณาในส่วนของค่าอัตราการสูญเสียย้อนกลับ เมื่อเพิ่มความกว้าง (d_2) จากที่ 0 มิลลิเมตร $|S_{11}|$ จะลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าต่ำสุดที่ความกว้างของร่อง (d_2) เป็น 11 มิลลิเมตร ดังนั้นเมื่อพิจารณาทั้งอัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ ซึ่งในส่วนนี้จะพิจารณา $|S_{11}|$ เป็นหลัก โดยที่อัตราส่วนแกนจะต้องต่ำกว่า 3 dB พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดคือความกว้างของร่อง (d_2) มีค่าเท่ากับ 11 มิลลิเมตร เพราะให้อัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 1.5 dB และ $|S_{11}|$ ดีที่สุด ซึ่งมีค่าต่ำกว่า -16 dB

3.3.2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างร่องคู่ (d_3) ของ

สายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างร่องคู่ (d_3) ที่เพิ่มบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้น โดยการกำหนดระยะห่างระหว่างร่อง (d_3) มีค่าเริ่มต้นที่เท่ากับ 60 มิลลิเมตร ให้ความยาวของร่อง (d_1) และความกว้างของร่อง (d_2) มีค่าเท่ากับ 27 มิลลิเมตร และ 11 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งได้จากการพิจารณาในหัวข้อที่ 3.3.2.1 และ 3.3.2.2 โดย

ที่มุมที่ร่องคู่ทำกับแนวแกน y (α) มีค่าเท่ากับ 0 องศา จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างร่อง (d_3) พบว่าผลของอัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างร่อง (d_3) ของสายอากาศที่มีความถี่กลาง (922.5 MHz) ของย่านความถี่ใช้งาน แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 อัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างร่อง (d_3) ของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

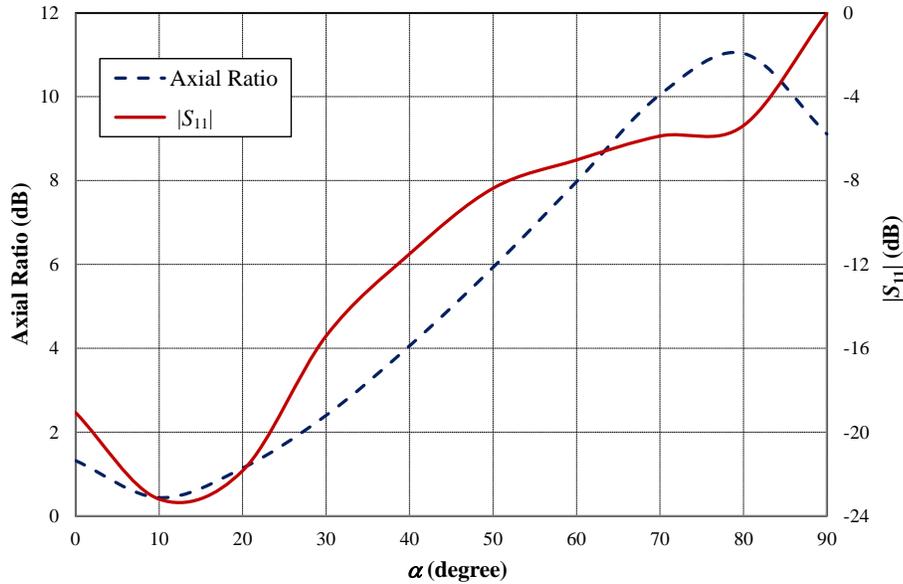
จากรูปที่ 3.14 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างร่อง (d_3) โดยเริ่มจากรยะห่างระหว่างร่อง (d_3) มีค่าเท่ากับ 0 มิลลิเมตร พบว่ามีผลกระทบต่อ $|S_{11}|$ เล็กน้อย แต่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนแกนอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือจากกราฟเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างร่อง (d_3) จาก 0 มิลลิเมตร ไปเรื่อยๆ จะพบว่าอัตราส่วนแกนจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งระยะห่างระหว่างร่อง (d_3) เท่ากับ 60 มิลลิเมตร อัตราส่วนแกนจะต่ำที่สุด และเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างร่อง (d_3) ต่อไป อัตราส่วนแกนก็จะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาในส่วนของค่าอัตราส่วนสูญเสียย้อนกลับนั้น เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างร่อง (d_3) จากระยะห่างมีค่าเท่ากับ 0 มิลลิเมตร $|S_{11}|$ จะลดลงจนกระทั่งระยะห่างระหว่างร่อง (d_3) มีค่าเท่ากับ 10 มิลลิเมตร เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างร่อง (d_3) ต่อไป $|S_{11}|$ จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นเมื่อพิจารณาทั้งอัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดคือระยะห่างระหว่างร่อง (d_3) มีค่าเท่ากับ 60 มิลลิเมตร เพราะให้อัตราส่วนแกนที่ต่ำที่สุดคือมีค่าต่ำกว่า 1.5 dB และ $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -18 dB

3.3.2.4 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์มุมที่ร่องคู่ทำกับแนวแกน y (α) ของ

สายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

ในขั้นตอนนี้เป็นารเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์มุมที่ร่องคู่ทำกับแนวแกน y (α) ที่เพิ่มบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้น โดยการกำหนดค่ามุมเริ่มต้นที่ร่อง

คู่ทำกับแนวแกน y (α) มีค่าเท่ากับ 0 องศา ให้ความยาวของร่อง (d_1) ความกว้างของร่อง (d_2) และ ระยะห่างระหว่างร่อง (d_3) มีค่าเท่ากับ 27 มิลลิเมตร, 11 มิลลิเมตร และ 60 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งได้จากการพิจารณาในหัวข้อที่ 3.3.2.1, 3.3.2.2 และ 3.3.2.3 จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงมุมที่ร่องคู่ทำกับแนวแกน y (α) พบว่าผลของอัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงมุมที่ร่องคู่ทำกับแนวแกน y (α) ของสายอากาศที่ความถี่กลาง (922.5 MHz) ของย่านความถี่ใช้งาน แสดงดังรูปที่ 3.15

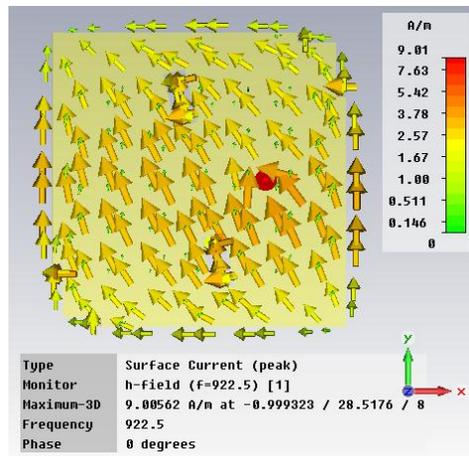
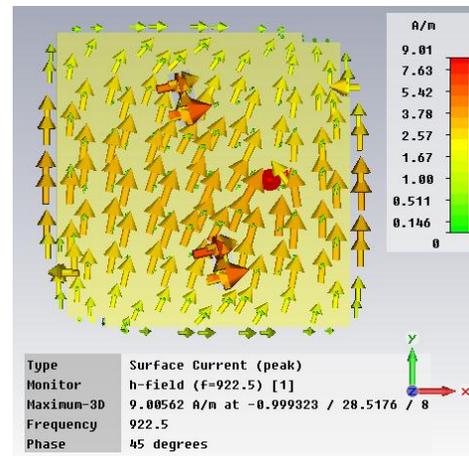
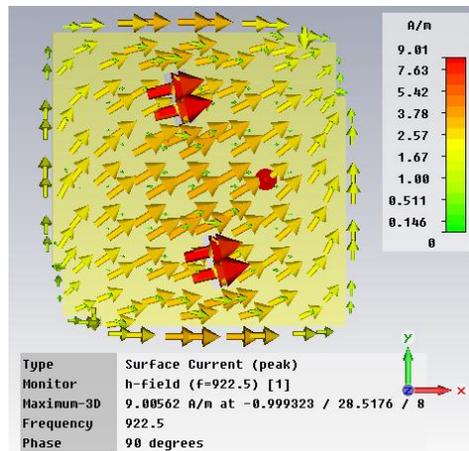
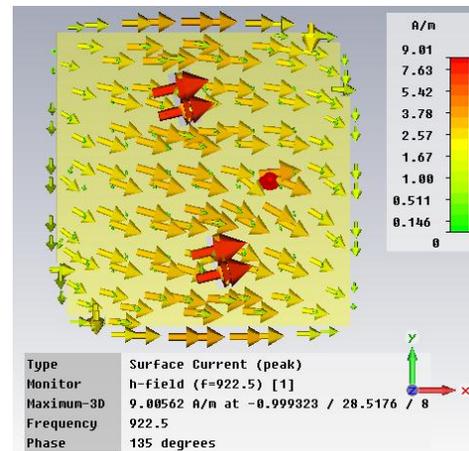


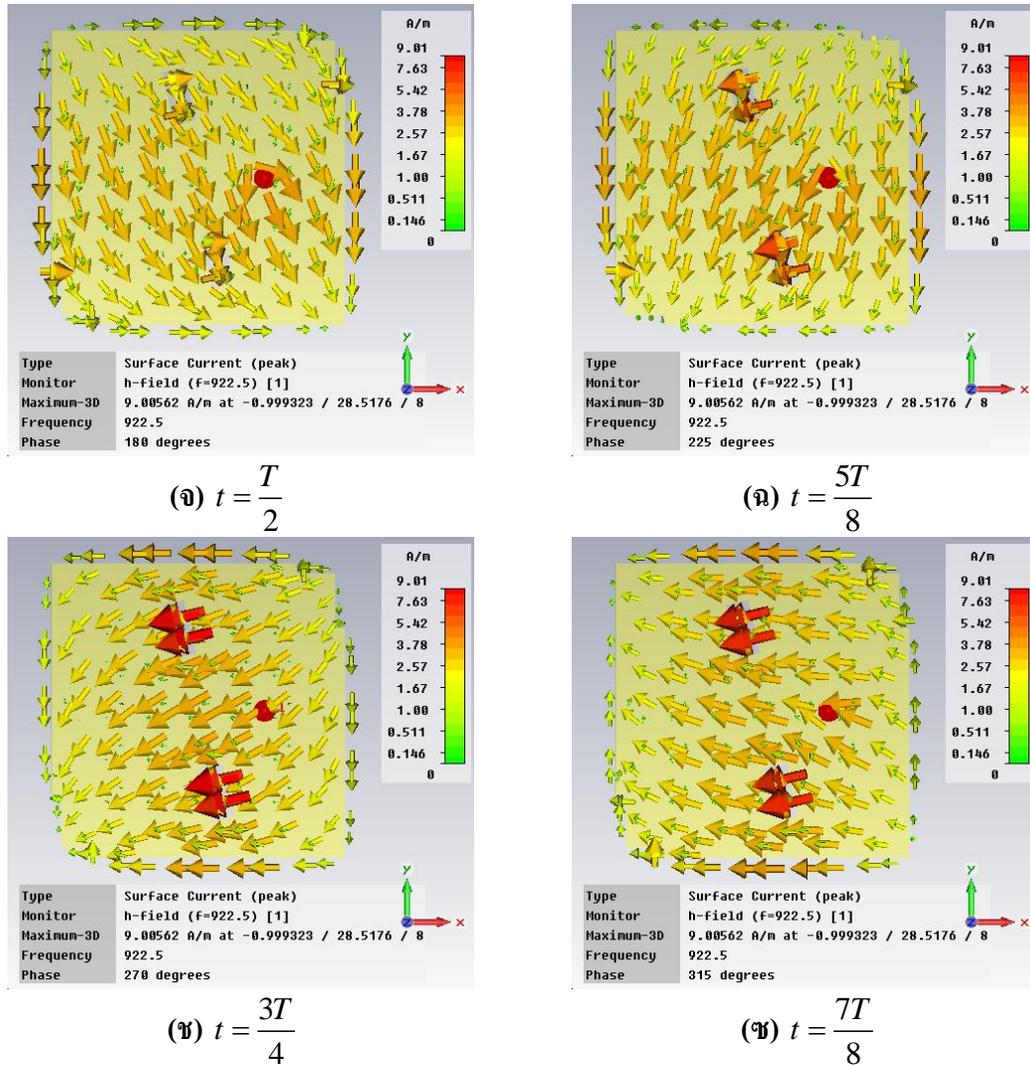
รูปที่ 3.15 อัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงมุมที่ร่องคู่ทำกับแนวแกน y (α) ของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

จากรูปที่ 3.15 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงมุมที่ร่องคู่ทำกับแนวแกน y (α) โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้น พบว่ามีผลกระทบต่ออัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ เป็นอย่างมาก กล่าวคือจากกราฟเมื่อเพิ่มขนาดมุมที่ร่องคู่ทำกับแนวแกน y (α) จากค่าเริ่มต้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 องศา ไปจนกระทั่งถึง 10 องศา อัตราส่วนแกนจะลดต่ำลงจนมีค่าต่ำกว่า 1 dB และเมื่อเพิ่มขนาดมุมที่ร่องคู่ทำกับแนวแกน y (α) ต่อไป อัตราส่วนแกนจะเพิ่มสูงขึ้นจนเกิน 3 dB ที่มุม (α) เท่ากับ 35 องศา ในส่วนของค่าอัตราการสูญเสียย้อนกลับนั้น เมื่อเพิ่มขนาดมุมที่ร่องคู่ทำกับแนวแกน y (α) จากค่าเริ่มต้นที่ 0 องศา $|S_{11}|$ จะลดลงจนกระทั่งต่ำสุดที่มุม (α) มีค่าเป็น 13 องศา และขนาดมุมที่ร่องคู่ทำกับแนวแกน y (α) ต่อไป $|S_{11}|$ จะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากจนกระทั่งสูงกว่า -10 dB ที่มุม (α) เท่ากับ 45 องศา ดังนั้นเมื่อพิจารณาทั้งอัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ พบว่าค่าขนาดมุมที่ร่องคู่ทำกับแนวแกน y (α) ที่เหมาะสมที่สุดมีค่าเท่ากับ 13 องศา เพราะทำให้ $|S_{11}|$ น้อยที่สุด ซึ่งมีค่าต่ำกว่า -20 dB และให้อัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 1 dB

3.3.2.5 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแผ่น ระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

ในหัวข้อนี้เป็นการนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแบบระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่มาจำลองสายอากาศเพื่อดูกระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่น โดยการกำหนดร่องคู่ให้มีความยาว (d_1) และความกว้าง (d_2) ของแต่ละร่องเท่ากับ 27 มิลลิเมตร และ 11 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระยะห่างระหว่างร่อง (d_3) มีค่าเท่ากับ 56 มิลลิเมตร และมุมที่ร่องคู่ทำกับแนวแกน y (α) มีค่าเท่ากับ 13.12 องศา ซึ่งเป็นผลการจำลองที่ได้พิจารณาและปรับปรุงแล้วจากหัวข้อข้างต้น พบว่าผลของกระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีความถี่กลาง (922.5 MHz) ของย่านความถี่ใช้งาน แสดงดังรูปที่ 3.16

(ก) $t = 0$ (ข) $t = \frac{T}{8}$ (ค) $t = \frac{T}{4}$ (ง) $t = \frac{3T}{8}$



รูปที่ 3.16 กระแสที่ไหลบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้น

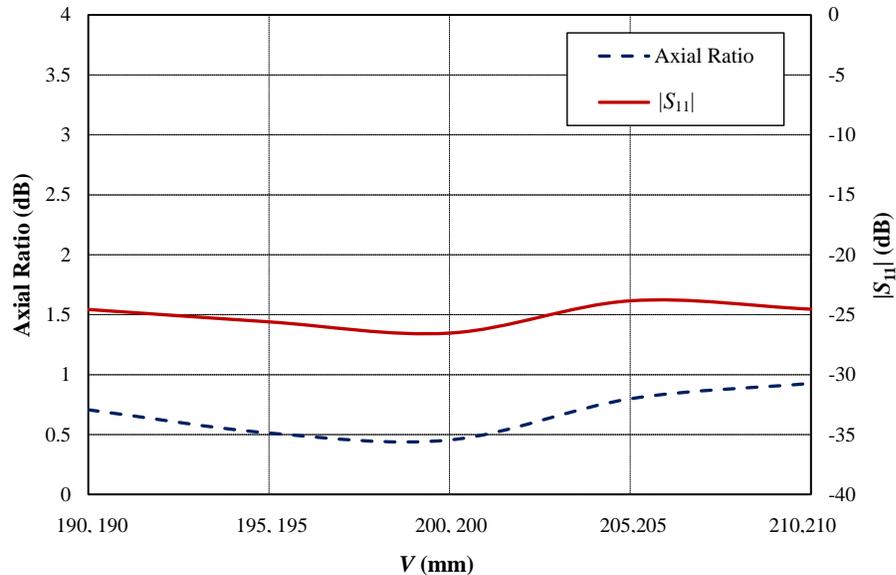
ร่วมกับร่องเอียงคู่ที่เวลา (t) ต่างๆ (ก) $t = 0$ (ข) $t = \frac{T}{8}$ (ค) $t = \frac{T}{4}$ (ง) $t = \frac{3T}{8}$ (จ) $t = \frac{T}{2}$ (ฉ) $t = \frac{5T}{8}$ (ช) $t = \frac{3T}{4}$ (ซ) $t = \frac{7T}{8}$

จากรูปที่ 3.16 แสดงกระแสที่ไหลบนแผ่นตัวนำที่เวลา (t) ต่างๆ ของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ พบว่ากระแสที่ไหลบนแผ่นตัวนำที่ที่เวลา (t) ต่างๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของกระแสตลอดเวลา กล่าวคือที่เวลา (t) ต่างๆ จะมีทิศทางการไหลของกระแสนบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปมีทิศทางโดยประมาณได้ดังนี้ ที่เวลา (t) เท่ากับ 0 มีทิศของกระแส \leftarrow ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{8}$ มีทิศของกระแส \uparrow ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{4}$ มีทิศของกระแส \nearrow ที่เวลา (t)

เท่ากับ $\frac{3T}{8}$ มีทิศของกระแส \rightarrow ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{T}{2}$ มีทิศของกระแส \searrow ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{5T}{8}$ มีทิศของกระแส \downarrow ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{3T}{4}$ มีทิศของกระแส \swarrow ที่เวลา (t) เท่ากับ $\frac{7T}{8}$ มีทิศของกระแส \leftarrow และที่เวลา (t) เท่ากับ T มีทิศของกระแส \nwarrow ดังนั้นสามารถคาดเดาได้ว่าการไหลของกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงไปทุกเวลา (t) บนแผ่นตัวแปรกระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ นั้น สามารถทำให้เกิดการโพลาไรซ์แบบวงกลมได้ โดยจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ข้างต้นของการตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ จะให้อัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 1 dB และการเพิ่มร่องเอียงคู่ก็ยังทำให้ $|S_{11}|$ ที่ได้มีค่าที่ต่ำกว่า -20 dB อีกด้วย ซึ่งค่าที่ได้มีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

3.3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ขนาดของระนาบกราวนด์ (V) ของสายอากาศ

ในขั้นตอนสุดท้ายของการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่คือ การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ขนาดของระนาบกราวนด์ (V) ของสายอากาศ โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ผลของอัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ขนาดของระนาบกราวนด์ (V) ของสายอากาศ เมื่อพิจารณาที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของย่านความถี่ที่ใช้งาน แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 อัตราส่วนแกนและค่า $|S_{11}|$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของระนาบกราวนด์ (V) ของสายอากาศ

จากรูปที่ 3.17 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ขนาดของแผ่นระนาบกราวนด์ (V) พบว่าค่าขนาดของแผ่นระนาบกราวนด์ (V) ของสายอากาศ ส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ ในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือเมื่อทำการเพิ่มขนาดของแผ่นระนาบกราวนด์ (V) ของสายอากาศ จะส่งผลให้ทั้งอัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ มีค่าลดลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งขนาดของแผ่นระนาบกราวนด์ (V) ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีอัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ ดีที่สุด ดังนั้นค่าที่เหมาะสมของขนาดของแผ่นระนาบกราวนด์ (V) ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ซึ่งจะนำไปใช้จำลองผลเพื่อทำการวิเคราะห์สมรรถนะของสายอากาศต่อไป

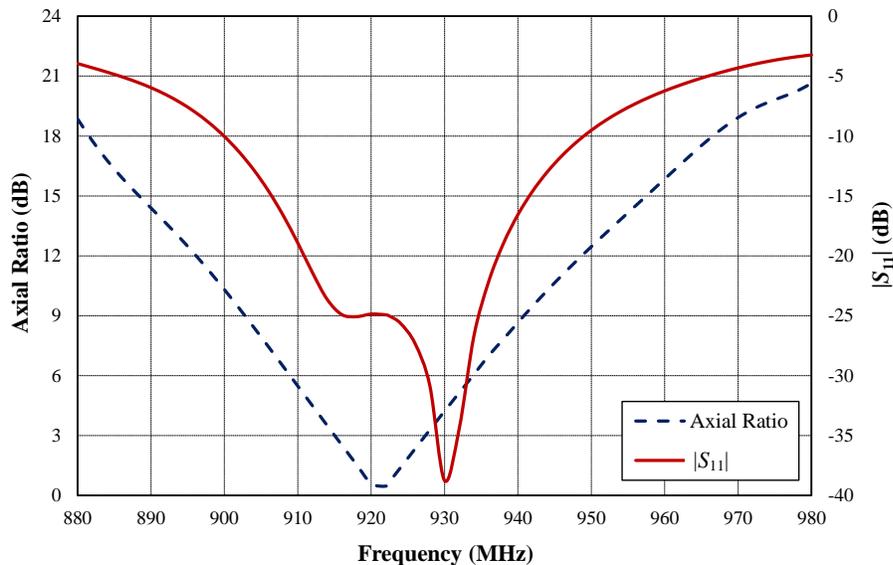
ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้น ร่วมกับร่องเอียงคู่

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 922.5 MHz (mm)
V	200
W	145.8
b_1	24
b_2	31.5
a	5
d_1	27
d_2	11
d_3	56
h	8
p_x	33
p_y	0
α	13.12 (degree)

จากขั้นตอนทั้งหมดของการจำลองผลของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้น ร่วมกับร่องเอียงคู่ จะนำมาทำการปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้สายอากาศมีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้ทำการปรับปรุงให้เหมาะสมแล้วแสดงดังในตารางที่ 3.4 และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองผลของสายอากาศนี้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของสายอากาศที่นำเสนอต่อไป

3.3.4 อัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ ของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาอัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ ที่ได้จากการจำลองผลของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสคดมุมแบบขั้นและร่องเอียงคู่ โดยทำการพิจารณาอัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน อัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ ของสายอากาศตลอดย่านความถี่ใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 3.17



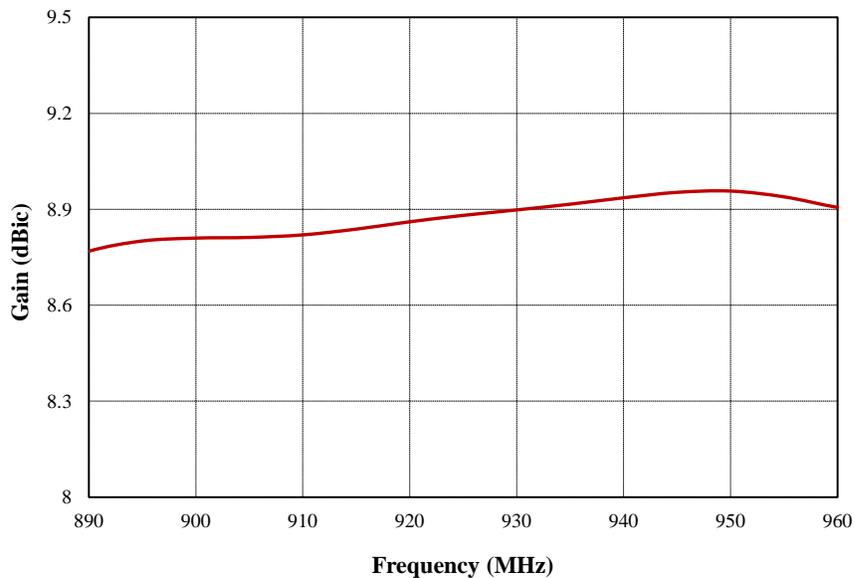
รูปที่ 3.18 อัตราส่วนแกนและ $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

จากรูปที่ 3.18 พบว่าช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 49 MHz หรือครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ 900 MHz ถึง 949 MHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานทั้งหมดและที่ความถี่กลางที่ 922.5 MHz ของย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานมี $|S_{11}|$ เท่ากับ -25 dB ดังนั้นสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสคดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่สามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน และเมื่อทำการพิจารณาอัตราส่วนแกนในย่านความถี่ที่ใช้งานคือ 920 MHz ถึง 925 MHz พบว่ามีอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ทุกช่วงความถี่ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนแกนที่มีค่าต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ประมาณ 916 MHz ถึง 927 MHz หรือคิดเป็นช่วงกว้างแถบความถี่ที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม โดยคิดที่อัตราส่วนแกนไม่เกิน 3 dB เท่ากับ 1.19% ซึ่งเพียงพอสำหรับใช้ในงานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งตามมาตรฐานประเทศไทย

3.3.5 อัตราขยายของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาอัตราขยายที่ได้จากการจำลองผลการออกแบบสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสคดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ โดยทำการพิจารณาอัตราขยายที่ด้านหน้าของสายอากาศที่มุม

0 องศา ซึ่งเป็นมุมที่ใช้ในการติดต่อกับเสา อัตราขยายของสายอากาศในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน แสดงดังรูปที่ 3.18

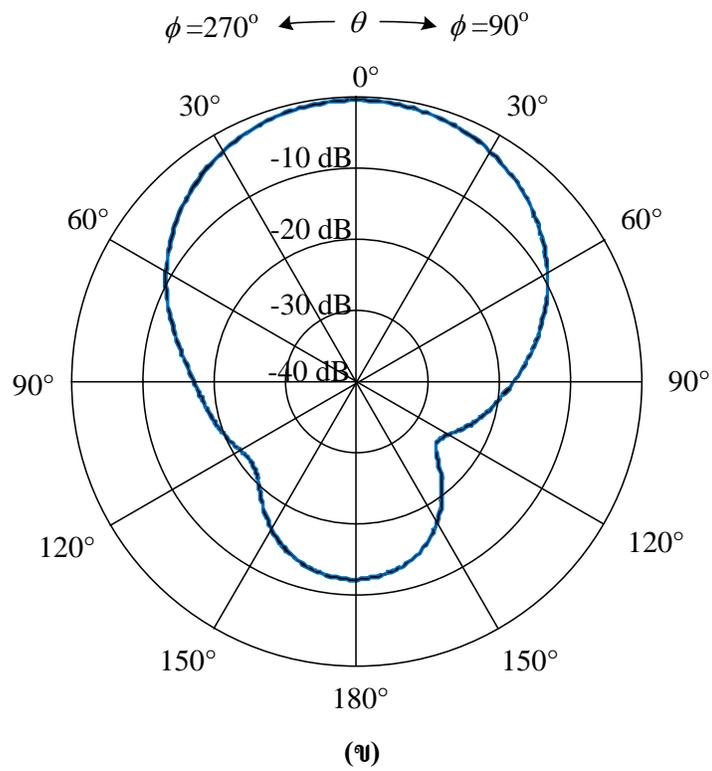
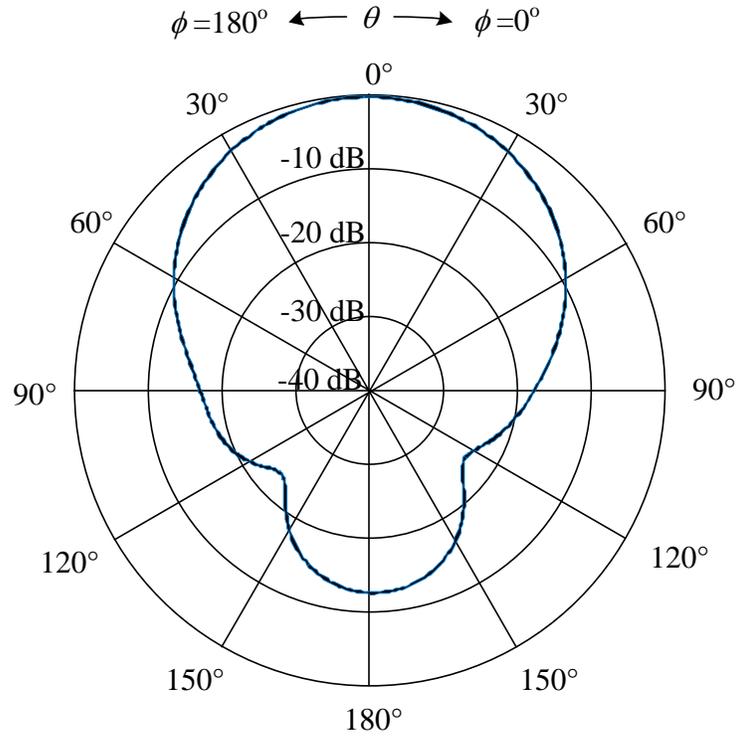


รูปที่ 3.19 อัตราขยายของสายอากาศ

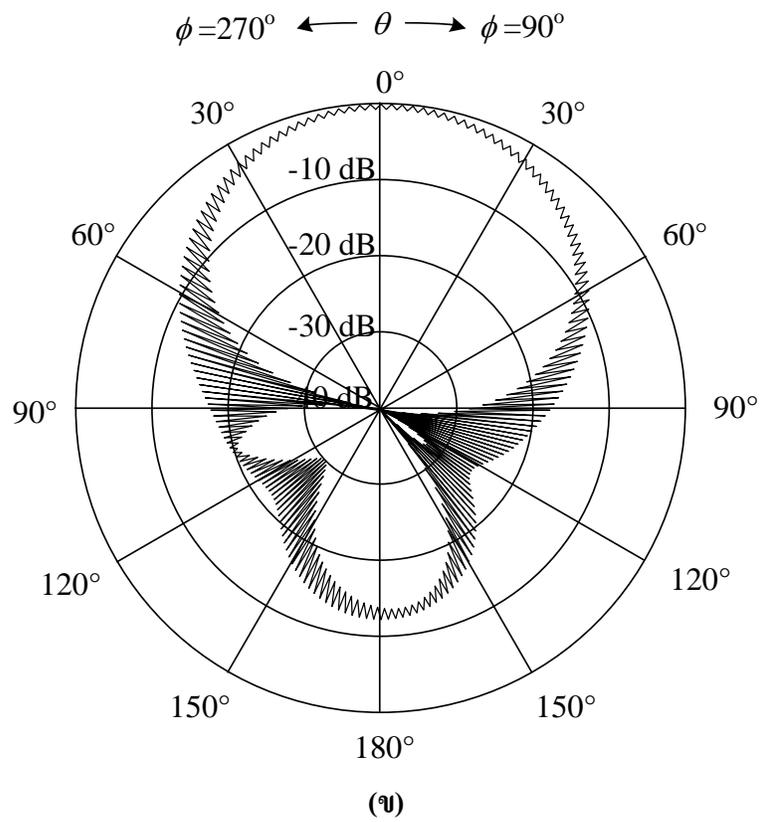
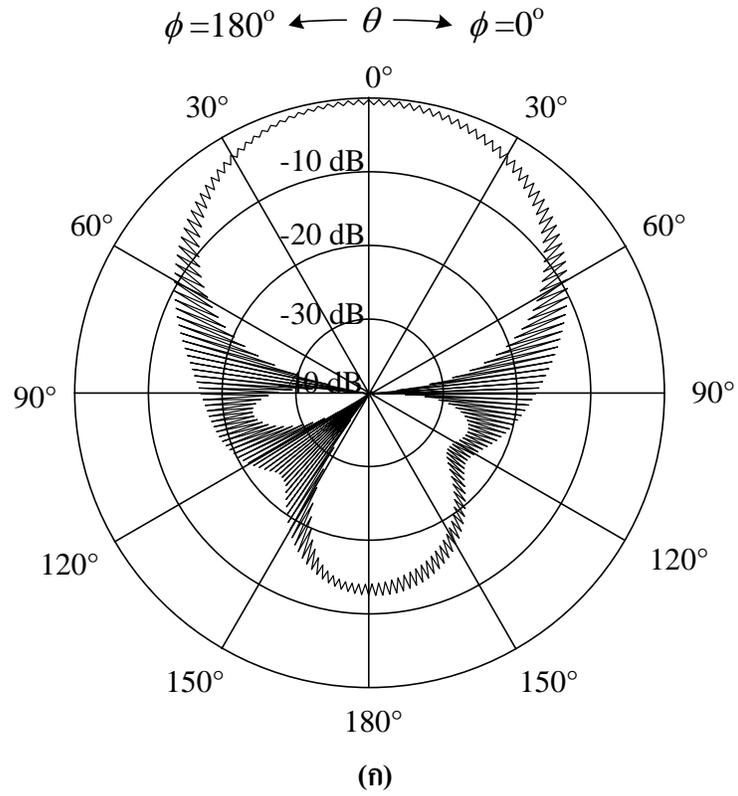
จากรูปที่ 3.19 แสดงอัตราขยายของสายอากาศ พบว่าสายอากาศมีอัตราขยายที่มีค่าสูงสุดที่ความถี่ 950 MHz มีค่าเท่ากับ 8.95 dBic ส่วนในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน (920 MHz ถึง 925 MHz) มีอัตราขยายอยู่ในช่วงตั้งแต่ 8.86 dBic ถึง 8.88 dBic และที่ความถี่กลาง (922.5 MHz) มีค่าเท่ากับ 8.87 dBic ซึ่งถือว่าเป็นอัตราขยายที่สูง

3.3.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกน

จากการนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทั้งหมดของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขึ้นร่วมกับร่องเอียงกลุ่มจำลองผลเพื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของย่านความถี่ใช้งาน โดยจะทำการพิจารณาทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz โดยที่สายอากาศวางตัวตั้งฉากกับทิศทางแกน z ดังแสดงในรูปที่ 3.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนของสายอากาศในระนาบ xz และระนาบ yz ของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขึ้นร่วมกับร่องเอียงกลุ่มแสดงดังรูปที่ 3.20 และ 3.21 ตามลำดับ



รูปที่ 3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (ก)ระนาบ xz (ข)ระนาบ yz



รูปที่ 3.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนของสายอากาศ (ก)ระนาบ xz (ข)ระนาบ yz

จากรูปที่ 3.20(ก) และรูปที่ 3.20(ข) พบว่ามีลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวเนื่องจากสายอากาศที่นำเสนอมีลักษณะเป็นไมโครสตริปซึ่งมีระนาบกราวด์ด้านล่าง และยังพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไม่สมมาตรกันอันเนื่องมาจากโครงสร้างของสายอากาศและตำแหน่งการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไม่สมมาตร แต่อย่างไรก็ตามแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในทั้งสองระนาบมีความแรงที่สุดที่ด้านหน้าของสายอากาศ ซึ่งเป็นทิศทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และระนาบ yz มีความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 67.1 องศา และ 67.4 องศา ตามลำดับ และมีอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังเท่ากับ 12.5 dB และจากรูปที่ 3.21(ก) และ 3.21(ข) แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนของสายอากาศ พบว่าสายอากาศมีกรโพลาริซเป็นแบบวงกลมครอบคลุมบริเวณมุมที่ใช้งาน (บริเวณด้านหน้าของสายอากาศ) ตามที่ต้องการ

ตารางที่ 3.5 สรุปสมรรถนะของสายอากาศที่ได้จากการจำลองสายอากาศ

สมรรถนะของสายอากาศ	ค่าที่ได้จากการจำลองที่ความถี่ 922.5 MHz
$ S_{11} $	-25 dB
อัตราขยาย	8.87 dBic
อัตราส่วนแกน	0.46 dB
ความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz	67.1 องศา
ความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ yz	67.4 องศา

3.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอขั้นตอนในการออกแบบและการจำลองผลของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง โดยเริ่มจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นให้กับสายอากาศก่อน แล้วทำการออกแบบสายอากาศแผ่นระนาบ และทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสายอากาศเพื่อให้ได้อัตราส่วนแกนตามต้องการ คือสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้น โดยนำมาจำลองสายอากาศเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศซึ่งได้ทำการพิจารณาอัตราส่วนแกน โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตคือค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศจะต้องทำให้อัตราส่วนแกนมีค่าต่ำกว่า 3 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน แล้วจึงปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสายอากาศเป็นสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่เพื่อให้ได้ $|S_{11}|$ ของสายอากาศมีค่าต่ำกว่า -15 dB และยังคงอัตราส่วนแกนมีค่าต่ำกว่า 3 dB โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตคือค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศจะต้องทำให้ $|S_{11}|$ ต่ำกว่า

-15 dB โดยที่อัตราส่วนแถมยังคงมีค่าต่ำกว่า 3 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้ว หลังจากนั้นทำการพิจารณาสมรรถนะของสายอากาศ โดยพิจารณาค่าต่างๆ คือ อัตราส่วนแถม $|S_{11}|$ อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ พบว่าสายอากาศมีอัตราส่วนแถมที่ต่ำกว่า 3 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานที่ 920 MHz ถึง 925 MHz ซึ่งส่งผลให้สายอากาศมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม และที่ความถี่กลางของย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน (922.5 MHz) มีอัตราส่วนแถมเท่ากับ 0.46 dB เมื่อพิจารณา $|S_{11}|$ พบว่ามีค่าต่ำกว่า -15 dB ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน มีอัตราขยายประมาณ 8 dBic ตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นแบบทิศทางเดียว ดังนั้นเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลจากการจำลอง โดยจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองสายอากาศนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป

บทที่ 4

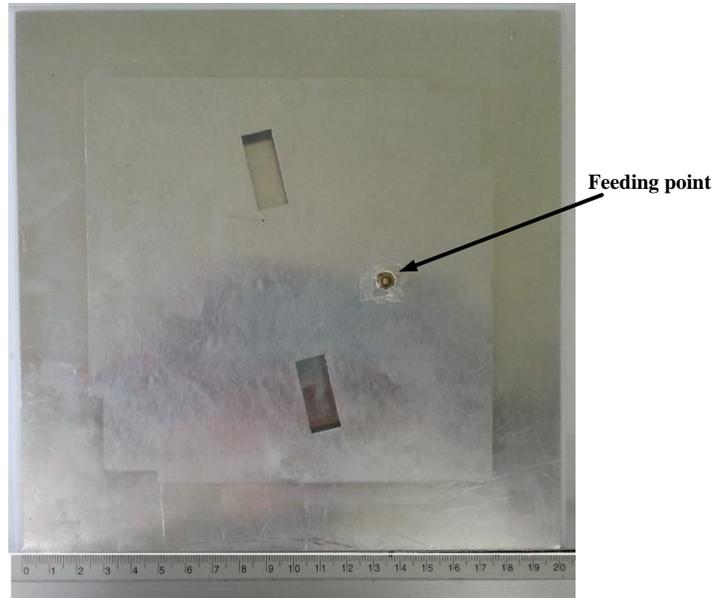
ผลการทดสอบสายอากาศ

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการทดสอบและผลการทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ ซึ่งจะพิจารณาถึงผล $|S_{11}|$ อัตราขยาย อัตราส่วนแกน และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยจะนำผลที่ได้จากการทดสอบมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองซึ่งได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 3 เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลอง ในส่วนรายละเอียดต่างๆ จะได้กล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป

4.2 สายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอต้นแบบของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ สำหรับใช้ในการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยสายอากาศที่นำเสนอนี้ใช้งานที่ความถี่ 920 MHz ถึง 925 MHz ซึ่งเป็นมาตรฐานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งของประเทศไทย วัสดุที่นำมาใช้สร้างสายอากาศต้นแบบเป็นวัสดุที่เป็นอลูมิเนียม เนื่องจากไม่เป็นสนิม มีความแข็งแรงทนทาน น้ำหนักเบา และมีราคาถูก ลักษณะของสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 4.1 ส่วนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้สร้างสายอากาศต้นแบบ แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งได้มาจากการจำลองผลในบทที่ 3



รูปที่ 4.11 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 922.5 MHz (mm)
V	0.615λ	200
W	0.456λ	145.8
b_1	0.073λ	24
b_2	0.096λ	31.5
a	0.015λ	5
d_1	0.083λ	27
d_2	0.033λ	11
d_3	0.172λ	56
h	0.024λ	8
α		13.12 (degree)

4.3 การทดสอบสายอากาศ

การทดสอบสายอากาศจะทำการสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมา และนำสายอากาศต้นแบบนี้มาทำการทดสอบสมรรถนะต่างๆ เช่น $|S_{11}|$ อัตราขยาย อัตราส่วนแกน และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลจากการจำลอง ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 3

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดสอบสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบมีดังต่อไปนี้

1. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP 8720C
2. สายนำสัญญาณ
3. มัลติมิเตอร์
4. สายอากาศแบบเกลียว

การทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่เพื่อหา $|S_{11}|$ ทำได้โดยนำสายอากาศที่จะทดสอบผลมาทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP 8720C ในการหา $|S_{11}|$ ของสายอากาศ

การทดสอบเพื่อหาอัตราขยายของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ ซึ่งในการทดสอบเพื่อหาอัตราขยายนั้นจะใช้สายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านรับและใช้สายอากาศแบบไดโพลมาตรฐานทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านส่ง โดยที่การทดสอบสายอากาศจะต้องทำภายในสนามระยะไกล เพราะฉะนั้นระยะห่างระหว่างสายอากาศของตัวส่งและสายอากาศของตัวรับ (d) ต้องเป็นไปตามเงื่อนไข $d \geq \frac{2D^2}{\lambda_0}$ โดยที่ D คือ ขนาดของสายอากาศที่มีความยาวที่สุดและ λ_0 คือความยาวคลื่นในอากาศโดยพิจารณาที่ความถี่ใช้งาน ดังนั้นจึงกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศของตัวส่งและสายอากาศของตัวรับมีค่าเท่ากับ 1.2 เมตร

การทดสอบอัตราส่วนแอมพลิจูดและการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ ซึ่งในการทดสอบนั้นจะใช้สายอากาศแบบเกลียวที่มีจำนวนรอบเท่ากับ 7 รอบ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9 cm มาใช้ทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านส่ง และใช้สายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศด้านรับ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศของตัวส่งและสายอากาศของตัวรับมีค่าเท่ากับ 1.2 เมตร ซึ่งผลจากการทดสอบที่ได้สามารถคำนวณหาอัตราส่วนแอมพลิจูดได้จากสมการที่ 4.1

$$\text{Axial Ratio} = 20 \log \left[\frac{|E_{co}| + |E_{xp}|}{|E_{co}| - |E_{xp}|} \right] \quad (4.6)$$

โดยที่

$|E_{co}|$ คือขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์แบบเดียวกับโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับ

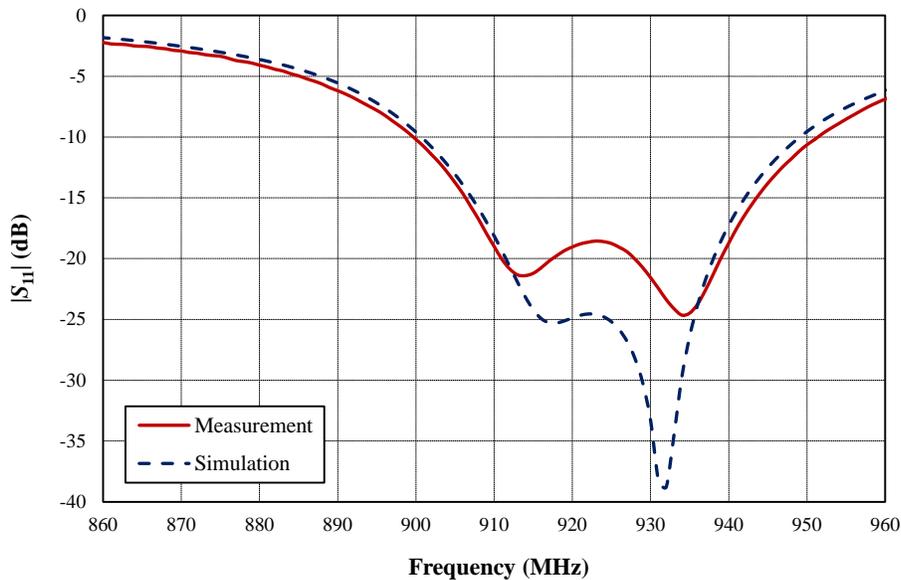
$|E_{xp}|$ คือขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีการ โพลาริซ์ตรงกันข้ามกับ โพลาริซ์ของสายอากาศตัวรับ

4.4 ผลการทดสอบสายอากาศ

เมื่อทำการสร้างสายอากาศตัวต้นแบบซึ่งเป็นสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นเป็นการนำสายอากาศต้นแบบที่ได้มาทำการทดสอบสมรรถนะต่างๆ ของสายอากาศแล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองในบทที่ 3 โดยมีการเปรียบเทียบผลที่ได้ของ $|S_{11}|$ อัตราขยาย อัตราส่วนแกน และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

4.4.1 ผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของ $|S_{11}|$ ระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลอง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2 ผลของ $|S_{11}|$ ทั้งสองจะทำการเปรียบเทียบกับย่านความถี่สูงยิ่ง



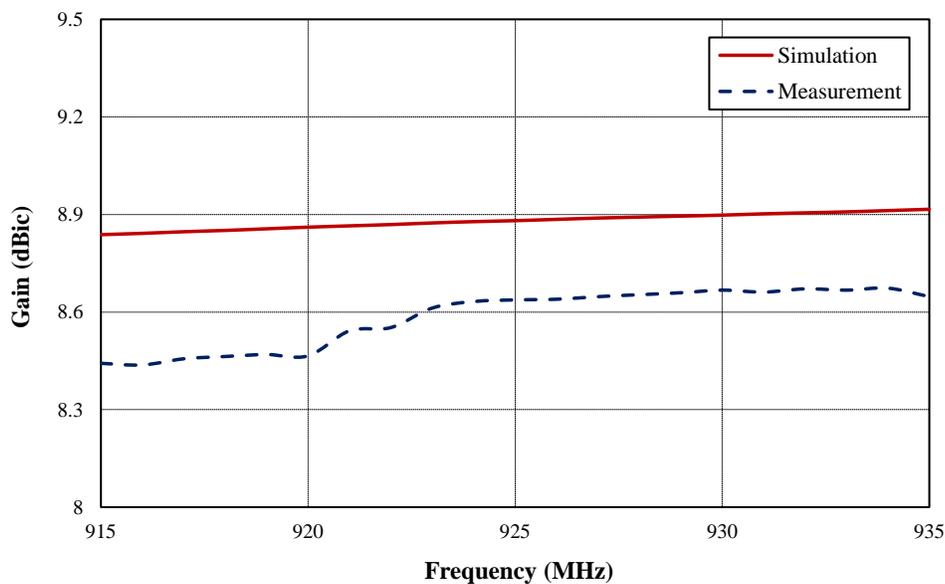
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบผลของ $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง

จากรูปที่ 4.2 พบว่าผลของ $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองมีความสอดคล้องกัน โดยที่ $|S_{11}|$ ได้จากการทดสอบจะมีช่วงกว้างความถี่ 51 MHz ที่ 900 MHz ถึง 951 MHz ในขณะที่ $|S_{11}|$ ได้จากการจำลองจะมีช่วงกว้างความถี่ 49 MHz ที่ 900 MHz ถึง 949 MHz ซึ่งจากการทดสอบ $|S_{11}|$ ที่ได้จะมีช่วงกว้างความถี่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลอง และผลระดับของ $|S_{11}|$ ที่ความถี่กลาง 922.5

MHz ที่ได้จากการทดสอบมีค่าที่สูงกว่าการจำลอง สาเหตุน่าจะเกิดจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศต้นแบบที่มีการสร้างขึ้นมามีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองผล รวมทั้งผลของวัสดุที่นำมาใช้สร้างสายอากาศ อย่างไรก็ตาม $|S_{11}|$ ในช่วงย่านความถี่ใช้งานของสายอากาศต้นแบบของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่มิค่าต่ำกว่า -10 dB ตลอดทั้งย่านและที่ความถี่กลางผลของ $|S_{11}|$ เท่ากับ -18 dB ดังนั้นสายอากาศที่นำเสนอนี้จึงสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ใช้งานที่ต้องการ

4.4.2 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของอัตราขยายตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานย่านความถี่สูงยิ่ง (920 MHz ถึง 925 MHz) ระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้จากการจำลอง ผลการเปรียบเทียบของอัตราขยายของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 4.3



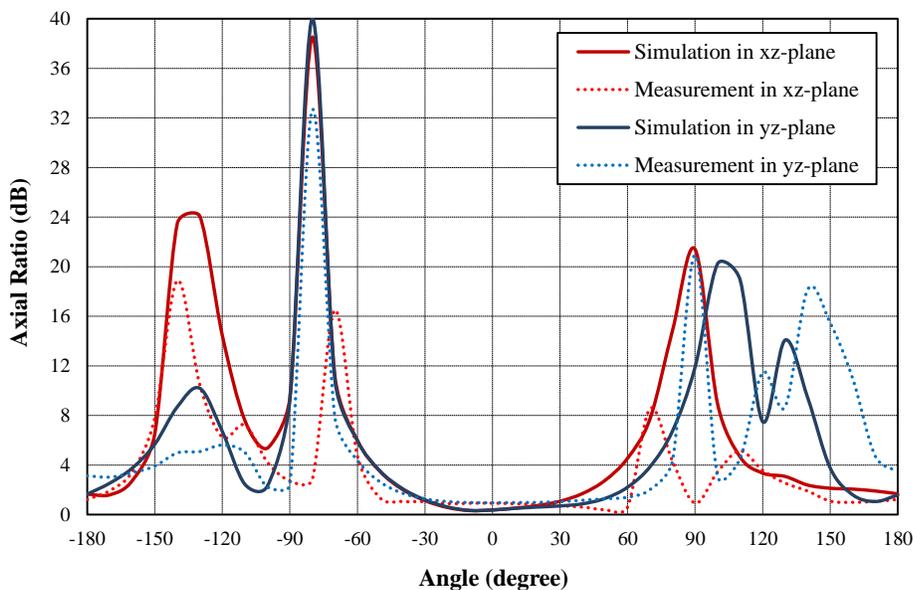
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบผลของอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง

จากรูปที่ 4.3 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของอัตราขยายระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน โดยที่อัตราขยายของผลที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่กลางของความถี่ใช้งาน 922.5 MHz มีค่าเท่ากับ 8.58 dBic แต่จะสังเกตว่าตลอดช่วงความถี่ใช้งานมีความคลาดเคลื่อนที่สูงพอสมควร คือผลของอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำกว่าผลที่ได้จากการจำลองตลอดช่วงความถี่ สาเหตุน่าจะเกิดมาจากการทดสอบสายอากาศต้นแบบนั้น อาจมีผลของสภาพแวดล้อมเข้ามาเกี่ยวข้อง

ในขณะที่การจำลองผลอัตราขยายของสายอากาศจะไม่รวมผลของสภาพแวดล้อม ดังนั้นจึงทำให้ผลของอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนไปจากอัตราขยายที่ได้จากการจำลองผล

4.4.3 การทดสอบอัตราส่วนแกนของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับ ร่องเอียงคู่

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของอัตราขยายส่วนแกนของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยพิจารณาที่ความถี่กลาง (922.5 MHz) ในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานย่านความถี่สูงยิ่ง ผลของการเปรียบเทียบอัตราส่วนแกนของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 4.4



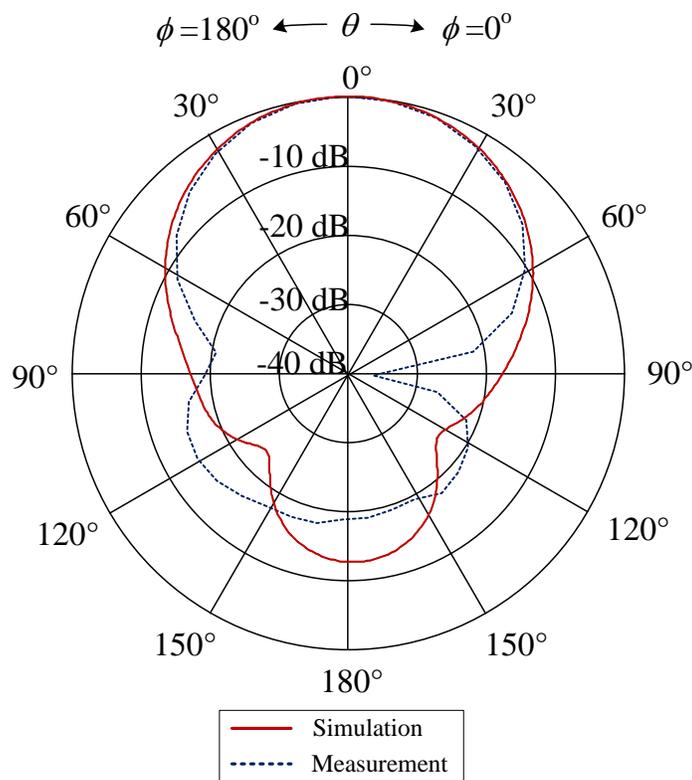
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่ความถี่กลาง (922.5 MHz) ของย่านความถี่ใช้งานที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง

จากรูปที่ 4.4 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองนั้นผลทั้งสองมีแนวโน้มที่สอดคล้อง จะเห็นว่าอัตราส่วนแกนที่มุมต่างๆ ของผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลอง แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากหลายๆ สาเหตุ เช่น การตำแหน่งการติดตั้งสายอากาศทดสอบที่ไม่แม่นยำ การสูญเสียจากวัสดุที่นำมาทำสายอากาศต้นแบบที่ใช้อลูมิเนียมเป็นตัวนำ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศต้นแบบมีความคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองผล เป็นต้น อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่มุม 0 องศา หรือบริเวณด้านหน้าของสายอากาศ ซึ่งเป็นทิศทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารมีอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า

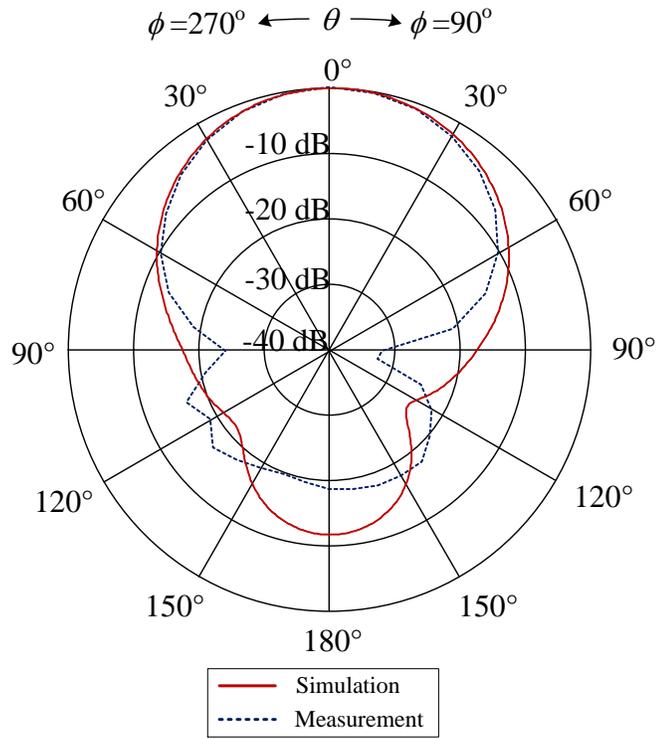
3 dB และจากการทดสอบความกว้างของมุมที่อัตราส่วนแอมพลิจูดต่ำกว่า 3 dB ในระนาบ xz และ yz มีค่าเท่ากับ 115 องศา และ 125 องศา ตามลำดับ ส่วนที่ได้จากการจำลองความกว้างของมุมที่อัตราส่วนแอมพลิจูดต่ำกว่า 3 dB ในระนาบ xz และ yz มีค่าเท่ากับ 97 องศา และ 108 องศา ตามลำดับ และที่มุม 0 องศา นั้นมีอัตราส่วนแอมพลิจูดจากการทดสอบเท่ากับ 0.92 dB และผลที่ได้จากการจำลองที่มุม 0 องศา มีอัตราส่วนแอมพลิจูดเท่ากับ 0.46 dB ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม

4.4.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

ในหัวข้อนี้เปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่กลาง (922.5MHz) ของย่านความถี่ใช้งาน ซึ่งผลที่นำมาเปรียบเทียบจะมีผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบไฟฟ้าซึ่งอยู่ในระนาบ xz และระนาบสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในระนาบ yz ตามลำดับ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.5

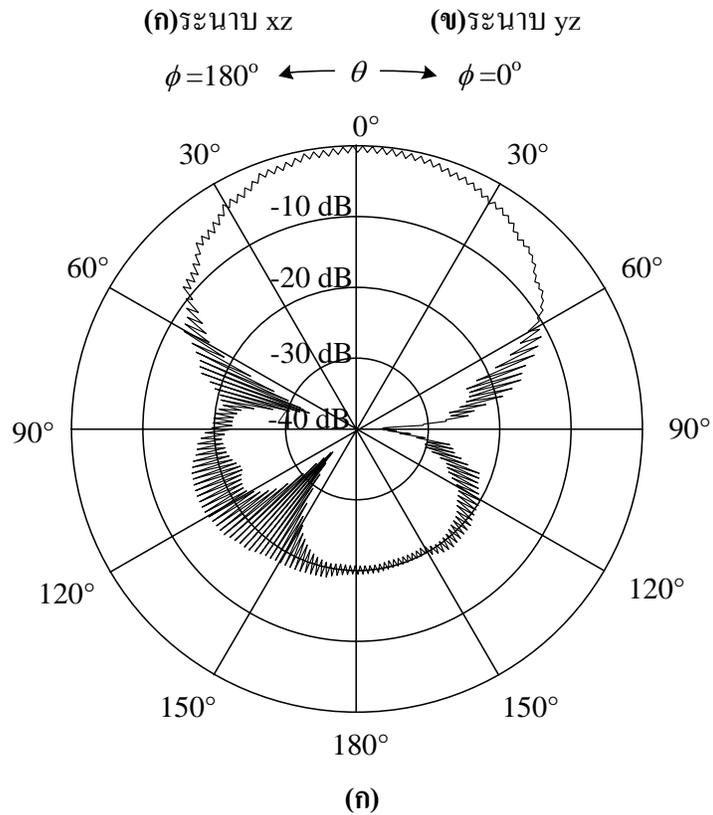


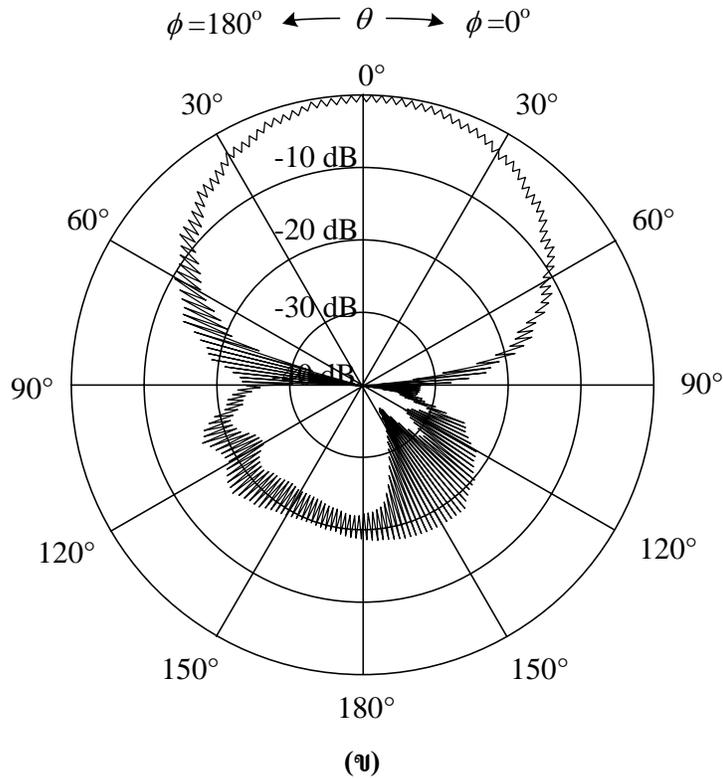
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง





รูปที่ 4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบ

(ก) ระนาบ xz

(ข) ระนาบ yz

จากรูปที่ 4.5(ก) และ 4.8(ข) เป็นการเปรียบเทียบผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ ที่ความถี่กลาง (922.5 MHz) ของย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน จะพบว่าจากการทดสอบได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยมีความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และระนาบ yz มีค่าเท่ากับ 60 องศา ทั้งสองระนาบ โดยที่มุม 0 องศา เป็นทิศทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร และมีอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังของระนาบ xz จากการจำลองและการทดสอบมีค่าเท่ากับ 12.5 dB และ 19.25 dB ตามลำดับ ส่วนระนาบ yz จากการจำลองและการทดสอบมีค่าเท่ากับเท่ากับ 12.5 dB และ 18.98 dB ตามลำดับ ซึ่งพบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มสอดคล้องกัน แต่ก็ยังมีความผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมและการติดตั้งสายอากาศในการทดสอบ และจากรูปที่ 4.6(ก) และ 4.6(ข) แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบ พบว่าสายอากาศมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมครอบคลุมบริเวณมุมที่ใช้งานหรือบริเวณด้านหน้าของสายอากาศ ซึ่งเป็นไปตามที่ต้องการ

ตารางที่ 4.6 สรุปสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบ

สมรรถนะของสายอากาศ	ค่าที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 922.5 MHz
$ S_{11} $	-18 dB
อัตราขยาย	8.58 dBic
อัตราส่วนแกน	0.92 dB
ความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz	60 องศา
ความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ yz	60 องศา

4.5 สรุป

ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ย่านความถี่สูงยิ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ พบว่ามีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นทิศทางเดียว มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบมุมยกและระนาบมุมกวาดเท่ากับ 60 องศา ทั้งสองระนาบ และสายอากาศมี $|S_{11}|$ ที่สามารถรับการใช้งานในย่านความถี่สูงยิ่งของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุได้ มีอัตราขยายที่ 8.58 dBic มีแบบโพลาไรซ์วงกลม เมื่อเปรียบเทียบกับ $|S_{11}|$ ระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองนั้นมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน แต่ผลที่ได้จากการทดสอบจะมี $|S_{11}|$ ที่สูงกว่า ซึ่งอาจจะเกิดจากการสร้างสายอากาศต้นแบบมีความคลาดเคลื่อนไปจากสายอากาศในการจำลอง และเมื่อทำการพิจารณาผลของอัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มเดียวกับผลการจำลองแต่ก็มีค่าที่ได้จากผลการทดลองต่ำกว่าตลอดย่าน อาจมาจากการสร้างสายอากาศและผลของสภาพแวดล้อมในการทดสอบ ในส่วนของอัตราส่วนแกนที่ได้พบว่ามีแนวโน้มเดียวกันกับการจำลอง ซึ่งอัตราส่วนแกนที่มุมใช้งานมีค่าต่ำกว่า 3 dB แต่ก็มีความคลาดเคลื่อนไปจากผลการจำลองเนื่องมาจากหลายสาเหตุคือ สายอากาศที่ทำหน้าที่เป็นตัวส่งมีการโพลาไรซ์แบบวงกลมที่ไม่ดีพอ ขนาดของสายอากาศที่คลาดเคลื่อนไปจากผลการจำลอง วัสดุที่เป็นอลูมิเนียมที่นำมาใช้เป็นตัวนำที่ไม่ดีพอ เป็นต้น และเมื่อทำการพิจารณาผลของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่กลางของย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานพบว่ามีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลอง จากผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถภาพของสายอากาศ แสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่นำเสนอขึ้นมานั้นสามารถประยุกต์ใช้งานกับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งได้

บทที่ 5

การทดสอบประยุกต์ใช้งานและการประเมินสมรรถนะ

5.1 กล่าวนำ

จากในบทที่ 4 ซึ่งได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศ และได้ทำการทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่เพื่อหาค่าสมรรถนะของสายอากาศมาแล้ว ในบทนี้เป็นกรนำสายอากาศที่ได้ทำการทดสอบมาประยุกต์ใช้งานกับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุความถี่สูงยิ่งและจะใช้งานร่วมกับแท็ก เพื่อทำการทดสอบหาระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก โดยจะทำการทดสอบหาระยะที่สามารถติดต่อสื่อสารได้ไกลที่สุดระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มีการวางตัวในทิศทางต่างๆ กัน ในการทดสอบประยุกต์ใช้งานสายอากาศต้นแบบมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

5.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบประยุกต์ใช้งานของสายอากาศแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังต่อไปนี้

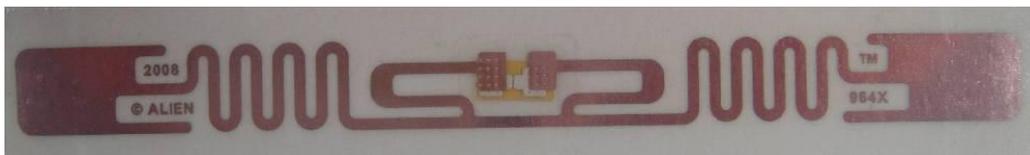
1. เครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง ของบริษัท Motorola รุ่น XR480 [28] จำนวน 1 เครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 5.1
2. แท็กชนิดไดโพลแบบขดลวด ของบริษัท Alien รุ่น ALN-9640 [29] จำนวน 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.2
3. สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ แสดงดังรูปที่ 5.3
4. มัลติมิเตอร์
5. คอมพิวเตอร์
6. สายนำสัญญาณ

รูปที่ 5.1 แสดงเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง ของบริษัท Motorola รุ่น XR480 มี 4 แชนแนล มีกำลังส่งสูงสุด 30 dBm รองรับมาตรฐาน EPC Gen 2 ซึ่งจะนำมาต่อกับสายอากาศต้นแบบที่ได้จากบทที่ 4 เพื่อทำการทดสอบต่อไป



รูปที่ 5.16 เครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง [29]

รูปที่ 5.2 แสดงแท็กชนิดไดโพลแบบขด ของบริษัท Alien รุ่น ALN-9640 โดยการนำแท็กชนิดไดโพลแบบขดมาใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งรูปแบบแท็กดังกล่าวรองรับตามมาตรฐานของ EPC Global Class 1 Gen 2 ที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น มีการเรโซแนนซ์ที่ช่วงความถี่ตั้งแต่ 860 MHz ถึง 960 MHz ขนาดความกว้างและความยาวของแท็กมีค่าเท่ากับ 94.8 มิลลิเมตร และ 8.1 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งในการทดสอบการประยุกต์ใช้งานของสายอากาศต้นแบบนั้นจะใช้แท็กตัวเดียวกันในการทดสอบทุกรูปแบบ ดังนั้นจึงไม่ต้องพิจารณาถึงผลของความแตกต่างของแท็ก



รูปที่ 5.17 แท็กชนิดไดโพลแบบขด Alien รุ่น ALN-9640 [30]

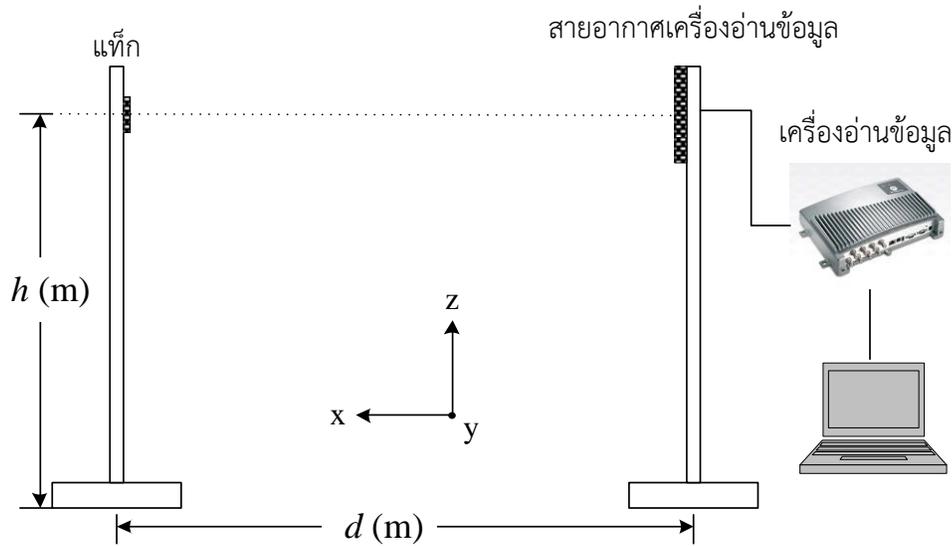
รูปที่ 5.3 แสดงสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ มีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 900 MHz ถึง 951 MHz มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว และอัตราการขยายที่ความถี่กลางของความถี่ใช้งานมีค่าเท่ากับ 8.58 dBic



รูปที่ 5.3 สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่

5.3 การทดสอบประยุกต์ใช้งาน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง การทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่โดยใช้งานร่วมกับแท็กพิจารณาในย่านความถี่สูงยิ่ง สำหรับการทดสอบการประยุกต์ใช้งานนี้จะทำการทดสอบสายอากาศไดโพลที่มีโพลาริซเซชันเส้นตรงร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลใช้งานร่วมกับแท็ก และทดสอบสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ที่มีโพลาริซเซชันวงกลมร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลโดยใช้งานร่วมกับแท็ก ในส่วนรายละเอียดจะแสดงในหัวข้อถัดไป

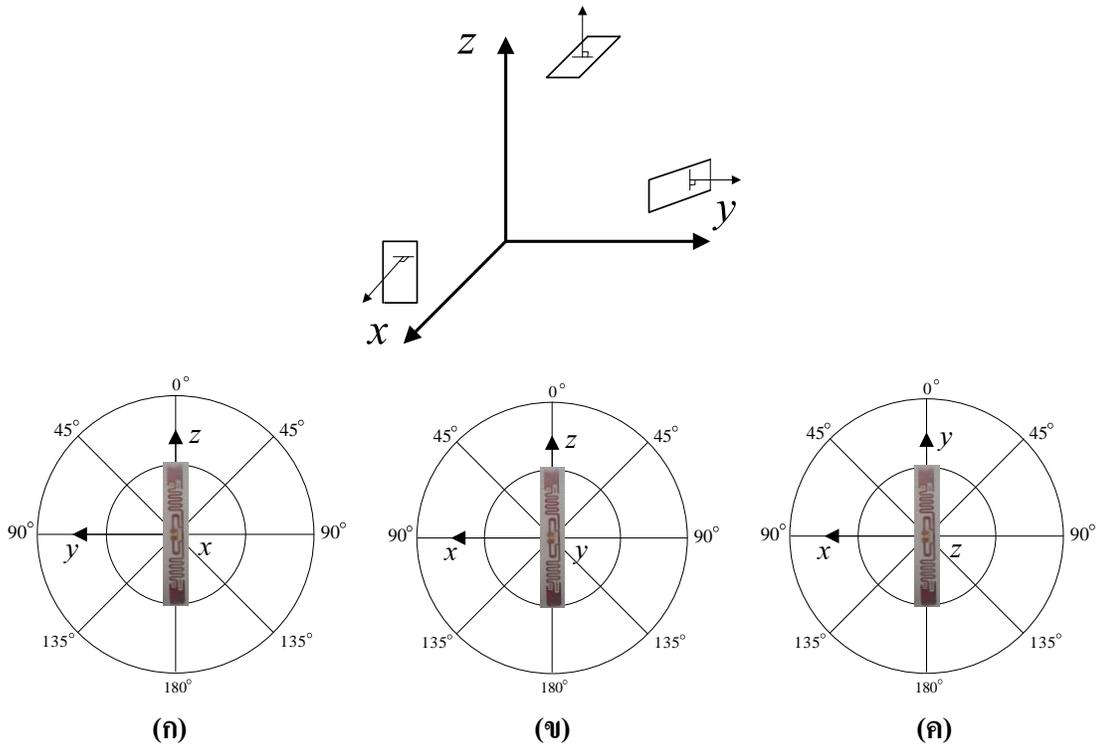


รูปที่ 5.4 การติดตั้งการทดสอบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลใช้งานร่วมกับแท็ก

ตารางที่ 5.7 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการติดตั้งทดสอบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลใช้งานร่วมกับแท็ก

พารามิเตอร์	ขนาด
h	1.1 m
d	1 m – 10 m
กำลังงาน	500 mW

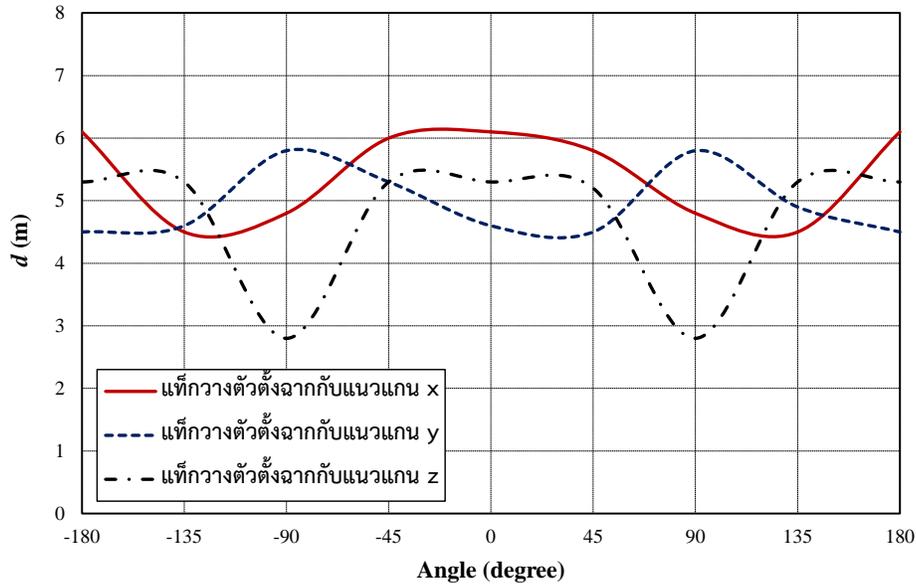
จากรูปที่ 5.4 แสดงการติดตั้งการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งใช้งานร่วมกับแท็ก โดยสายอากาศทดสอบและแท็กมีระยะห่าง (d) เริ่มต้นเท่ากับ 1-10 เมตร และความสูง (h) ของสายอากาศทดสอบกับแท็กให้เท่ากันที่ความสูงเท่ากับ 1.1 เมตร โดยการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง จะการทดสอบสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสดัดมุมแบบขึ้นร่วมกับร่องเฉียงคู่กับแท็กที่มีโพลาริเซชันเชิงเส้น โดยทำการหาระยะทางสูงสุดในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กด้วยวิธีการเคลื่อนตำแหน่งของแท็กออกจากสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลจนกระทั่งเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ โดยการวางตัวของแท็กจะอ้างอิงโดยใช้แกนที่ตั้งฉากกับระนาบของแท็กแสดงดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 การวางตัวของแท็กแต่ละแนวแกน (ก) แนวแกน x (ข) แนวแกน y (ค) แนวแกน z

5.3.1 ผลการทดสอบสายอากาศโดยใช้งานร่วมกับแท็ก โดยสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่เป็นโพลาริซั่มแบบวงกลมและแท็กมีการโพลาริซั่มแบบเชิงเส้น

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง ประกอบด้วยการทดสอบสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ที่มีการโพลาริซั่มแบบวงกลมร่วมกับแท็กที่มีการโพลาริซั่มแบบเชิงเส้น โดยการทดสอบในหัวข้อนี้จะทำการหมุนแท็กเป็นมุมครึ่งละ 45 องศาในแนวตั้งฉากกับการวางตัวของแท็ก ดังรูปที่ 5.5 เพื่อที่จะหาระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กในแต่ละมุมเมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน x y และ z ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ เมื่อสายอากาศแผ่นระนาบที่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่มิการโพลาริซ์แบบวงกลมและแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน x y และ z

5.3.1.1 กรณีที่แท็กมีการวางตัวในแนวตั้งฉากกับแนวแกน x

ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่วางตัวในแนวตั้งฉากกับแนวแกน x ดังรูปที่ 5.5(ก) ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 5.6 พบว่าระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่วางตัวตั้งฉากกับแนวแกน x จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อวางในมุมที่แตกต่างกัน จะเห็นว่าที่มุม -135 องศา และ 135 องศา จะมีระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กน้อยที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 4.5 เมตร และมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุดอยู่ที่มุม 0 องศา และ 180 องศา ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.1 เมตร สาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมต่างๆ จะส่งผลให้การโพลาริซ์ของแท็กที่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการไม่แมตชิงกันของการโพลาริซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศแท็ก ดังนั้นเมื่อใช้สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลที่มีโพลาริซ์เป็นแบบวงกลม จึงทำให้ได้ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ มีความแตกต่างกันน้อยกว่าในกรณีของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลมีการโพลาริซ์เป็นแบบเชิงเส้น

5.3.1.2 กรณีที่แท็กมีการวางตัวในแนวตั้งฉากกับแนวแกน y

ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน y ดังแสดงในรูปที่ 5.5(ข) ซึ่งผลทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 พบว่าระยะการ

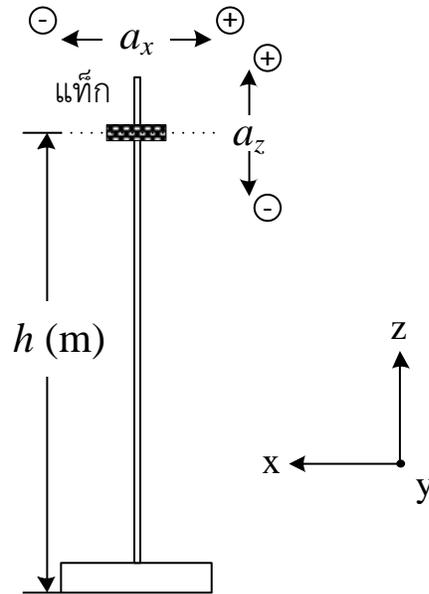
ติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กจะมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อแท็กวางตัวในมุมที่ต่างกัน และจะเห็นว่าที่มุม 45 องศา และมุม 180 องศา หรือ -180 องศา จะมีระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่น้อยที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 4.5 เมตร และจะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุดอยู่ที่มุม 90 องศา และ -90 องศา ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.8 เมตร สาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมต่างๆ จะส่งผลให้การโพลาริซซ์ของแท็กที่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการไม่แมตซ์กันของการโพลาริซซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศแท็ก และผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กที่วางตัวในระนาบแกน y จึงส่งผลต่อระยะการอ่านข้อมูลของแท็ก

5.3.1.3 กรณีที่แท็กมีการวางตัวในแนวตั้งฉากกับแนวแกน z

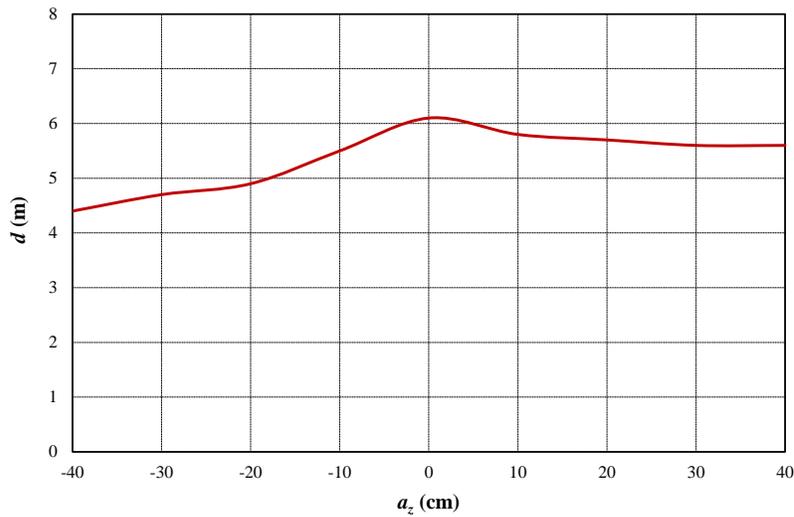
ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก เมื่อแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน z ดังแสดงในรูปที่ 5.5(ค) ซึ่งผลทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 พบว่าระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กจะมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อแท็กวางตัวในมุมที่ต่างกัน และจะเห็นว่าที่มุม 90 องศา และ -90 องศา จะมีการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่น้อยที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 2.8 เมตร และจะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะการติดต่อสื่อสารที่มากที่สุดอยู่ที่มุม 0 องศา -45 องศา 135 องศา -135 องศา และ 180 องศา หรือ -180 องศา มีค่าเท่ากับ 5.3 เมตร สาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมต่างๆ จะส่งผลให้การโพลาริซซ์ของแท็กที่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการไม่แมตซ์กันของการโพลาริซซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศแท็ก และผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กที่วางตัวในระนาบ แกน z

5.3.2 เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งความสูงในแนวแกน z (a_z) และตำแหน่งในแนวแกน x (a_x) ของแท็ก ในกรณีที่แท็กวางตัวในแนวตั้งฉากกับแนวแกน y

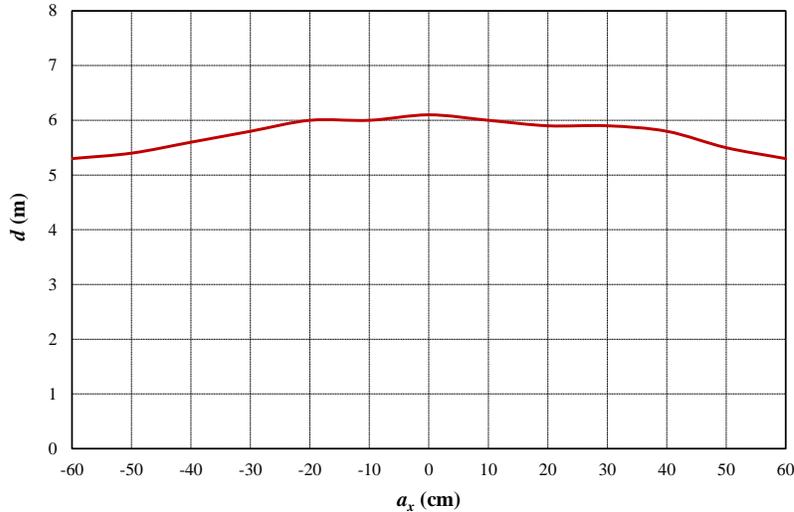
ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง ประกอบด้วย การทดสอบสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ที่มีการโพลาริซซ์แบบวงกลมร่วมกับแท็กที่มีการโพลาริซซ์แบบเชิงเส้น การติดตั้งสายอากาศเพื่อทำการทดสอบในหัวข้อนี้แสดงตามรูปที่ 5.7 จะทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งความสูงของสายอากาศแท็กในแนวแกน z (a_z) และตำแหน่งในแนวแกน x (a_x) ของสายอากาศแท็ก โดยกำหนดให้สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลมีความสูงคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 5.7 และการวางตัวของแท็กจะอ้างอิงโดยใช้แกนที่ตั้งฉากกับระนาบของแท็กหรือแนวแกน y ดังรูปที่ 5.5(ก) ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.8 และ รูปที่ 5.9



รูปที่ 5.7 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งความสูงในแนวแกน z (a_z) และ ตำแหน่งในแนวแกน x (a_x) ของสายอากาศแท่ง



รูปที่ 5.8 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งที่ตำแหน่งความสูงในแนวแกน z (a_z) เมื่อสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมและแท่งวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน y



รูปที่ 5.9 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่ตำแหน่งในแนวแกน x (a_x) เมื่อสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมและแท็กวางตัวตั้งฉากกับแนวแกน y

จากรูปที่ 5.8 ระยะติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่ตำแหน่งความสูงในแนวแกน z (a_z) ต่างๆ โดยที่ตำแหน่งความสูงในแนวแกน z (a_z) มีค่าเท่ากับ 0 เซนติเมตร คือมีความสูงของจากพื้นเท่ากับ 1.1 เมตร มีระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลและแท็กที่ไกลที่สุด คือ 6.1 เมตร เนื่องจากแท็กมีความสูงเท่ากับตัวสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล จากนั้นระยะการติดต่อสื่อสารจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งความสูงในแนวแกน z (a_z) และในรูปที่ 5.9 แสดงระยะติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่ตำแหน่งในแนวแกน x (a_x) ต่างๆ ซึ่งมีความใกล้เคียงกัน โดยที่ตำแหน่งของแท็กมีความสูงในแนวแกน z (a_z) มีค่าเท่ากับ 0 เซนติเมตร คือมีความสูงของจากพื้นเท่ากับ 1.1 เมตร ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลและแท็กที่ไกลที่สุด คือ 6.1 เมตร

5.4 สรุป

จากผลการทดสอบสายอากาศเพื่อหาระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กพบว่าสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมที่ดี คือมีความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท็กที่มีการโพลาไรซ์แบบต่างๆ ได้ใกล้เคียงกัน และบริเวณด้านหน้าของสายอากาศสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ระยะทางที่ไกลที่สุด ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองและผลที่ได้จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า สายอากาศที่พัฒนาขึ้นมานั้นสามารถปรับปรุงความสามารถในการ

ติดต่อสื่อสารเมื่อแท็กมีการโพลาริซ์เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นสายอากาศที่นำเสนอในโครงการวิจัยนี้ฉบับนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งและแท็กได้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยนี้แนะนำเสนอสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขึ้นร่วมกับร่องเอียงคู่สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งที่ใช้ในประเทศไทย ซึ่งมีช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 920 MHz ถึง 925 MHz โดยมีจุดประสงค์เพื่อสร้างสายอากาศที่มีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดซึ่งทำให้มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว และมีอัตราขยายที่สูง พร้อมทั้งสามารถนำสายอากาศมาประยุกต์ใช้กับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุร่วมกับแท็กได้หลากหลายลักษณะการจัดวางตัวของแท็ก

ในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ในหัวข้อ 6.1 จะกล่าวถึงผลสรุปโดยรวมของโครงการวิจัยนี้ซึ่งประกอบไปด้วยผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขึ้นร่วมกับร่องเอียงคู่ ผลที่ได้จากการจำลองแบบสายอากาศ ผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศ และผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้งานสายอากาศกับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุกับแท็ก ในหัวข้อ 6.2 จะกล่าวถึงข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

6.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม

ในโครงการวิจัยฉบับนี้ได้อธิบายถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ในการออกแบบสายอากาศ ทฤษฎีและหลักการของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป และทำการศึกษารายละเอียดที่ได้จากการคำนวณจำลองแบบ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขึ้นร่วมกับร่องเอียงคู่ รวมทั้งผลการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบ

จากผลการศึกษาเกี่ยวกับการจำลองแบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขึ้นร่วมกับร่องเอียงคู่ เพื่อให้ได้คุณสมบัติของสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว มีอัตราขยายสูง และมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม โดยกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์นี้จะใช้โปรแกรมในการจำลองแบบของสายอากาศ แล้ววิเคราะห์คุณสมบัติในด้านต่างๆ พบว่าสายอากาศมีคุณลักษณะครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานและความถี่กลางที่ 922.5 MHz มีอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ต่ำกว่า 3 dB ตลอดย่านใช้งานและมีอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ความถี่กลางมีค่าเท่ากับ 0.46 dB มี $|S_{11}|$ ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 900 MHz ถึง 949 MHz มี

ช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 49 MHz ที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB และที่ความถี่ใช้งานครอบคลุมอัตราส่วนแคนที่ต่ำกว่า 3 dB มี $|S_{11}|$ ที่ความถี่กลางเท่ากับ -25 dB ดังนั้นผลจากการจำลองแบบสายอากาศจึงสามารถทำงานภายในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งานได้โดยมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมตลอดทั้งย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน โดยมีอัตราขยายในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานมีค่าในช่วง 8.86 dBic ถึง 8.88 dBic และที่ความถี่กลางมีค่าเท่ากับ 8.87 dBic ซึ่งถือว่าเป็นอัตราขยายที่สูง ซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวตลอดย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน

จากนั้นได้นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสดัดมุมแบบขั้นร่วมกับร่องเอียงคู่ที่ได้จากการจำลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแสดงในตารางที่ 6.1 และนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้นี้มาสร้างสายอากาศต้นแบบ

ตารางที่ 6.8 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 922.5 MHz
V	0.615λ	200 mm
W	0.456λ	145.8 mm
b_1	0.073λ	24 mm
b_2	0.096λ	31.5 mm
a	0.015λ	5 mm
d_1	0.083λ	27 mm
d_2	0.033λ	11 mm
d_3	0.172λ	56 mm
h	0.024λ	8 mm
α		13.12 (degree)

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้สร้างสายอากาศต้นแบบและทำการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลการจำลอง พบว่าสายอากาศมีคุณลักษณะครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานและความถี่กลางที่ 922.5 MHz มีอัตราส่วนแคนที่ต่ำกว่า 3 dB ตลอดย่านใช้งานและมีอัตราส่วนแคนที่ความถี่กลางมีค่าเท่ากับ 0.92 dB มี $|S_{11}|$ ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 900 MHz ถึง 951 MHz มีช่วงกว้างความถี่

เท่ากับ 51 MHz ที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB ซึ่ง $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองมีความสอดคล้องกัน แต่การทดสอบ $|S_{11}|$ ที่ได้จะมีค่าที่สูงกว่าผลที่ได้จากการจำลอง สาเหตุน่าจะเกิดจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศต้นแบบที่มีการสร้างขึ้นมามีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองผล รวมทั้งผลของวัสดุที่นำมาใช้สร้างสายอากาศ นอกจากนี้อัตราขยายในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งานมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลอง แต่มีค่าที่ต่ำกว่าและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลอง

สุดท้ายคือ นำสายอากาศที่ได้ทำการทดสอบสมรรถนะเบื้องต้นแล้ว ไปประยุกต์ใช้กับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งโดยทำงานร่วมกับแท็ก ซึ่งผลที่ได้จากการนำสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขึ้น ไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับแท็ก พบว่าเครื่องอ่านสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ ดังนั้นสายอากาศที่นำเสนอในโครงการวิจัยนี้ฉบับนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับแท็กได้จริง

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากผลการวิเคราะห์และทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ย่านความถี่สูงยิ่งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขึ้นร่วมกับร่องเอียงคู่สำหรับประยุกต์ใช้งานกับเครื่องอ่านข้อมูลร่วมกับแท็ก จะเห็นว่าการตัดมุมของแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสเพื่อให้กระแสที่ไหลบริเวณผิวมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากันแต่มีเฟสต่างกันเป็นจำนวนเท่าของ $\frac{\pi}{2}$ ซึ่งส่งผลให้สายอากาศมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมหมุนซ้าย และสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมแบบขึ้นที่มีการเพิ่มร่องคู่เพื่อปรับ $|S_{11}|$ ในทางกลับกันหากทำการตัดมุมแบบขึ้นเปลี่ยนไปในมุมตรงกันข้าม กล่าวคือตัดมุมบนซ้ายและล่างขวา และให้ร่องเอียงทำมุมตรงกันข้ามจะส่งผลต่อการโพลาไรซ์ทำให้สายอากาศมีการโพลาไรซ์เป็นแบบหมุนขวา แต่เมื่อทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะสังเกตเห็นว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นยังคงมีอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังที่สูงอยู่ ดังนั้นในการปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสามารถทำได้โดยการดัดแปลงในส่วนของระนาบกราดค่าให้มีลักษณะที่มีมิติความสูงเพื่อปรับปรุงอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง โครงการวิจัยนี้ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศและได้ทำการทดสอบสายอากาศเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ที่สนใจสามารถนำไปพัฒนาสายอากาศและปรับปรุงโครงสร้างให้มีรูปแบบที่ง่ายขึ้นและหลากหลายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ต่อไปในอนาคต