การพัฒนาชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการสอนวิศวกรรมสายอากาศ ตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา

รุ่งอรุณ พรเจริญ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายจ่าย
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๐
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

Development of Programmed Instruction Laboratory in the Teaching on Telecommunication Engineering of Thai Qualifications Framework for Higher Education

Rungaroon Porncharoen

This Report is Funded by Rajamangala University of Technology Phra Nakhon,
Fiscal Year 2017

ชื่อเรื่อง : การพัฒนาชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการสอนวิศวกรรมสายอากาศตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา
ผู้วิจัย : ผู้ช่วยศาตราจารย์ ดร.รุ่งอรุณ พรเจริญ
พ.ศ. : 2560

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้ 1) เพื่อหาประสิทธิภาพชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป 2) เพื่อหาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป และ 3) เพื่อศึกษาความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ นักเรียนระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 แขนงวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ลงทะเบียนเรียนรายวิชาวิศวกรรมสายอากาศ ภาคการเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2559 จำนวน 15 คน ทำการสุ่มกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย คือ ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพล และแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรายวิชาวิศวกรรมสายอากาศ สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าร้อยละ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสถิติ t-test และค่าความคงทนในการเรียนรู้ ผลการวิจัยพบว่า

1. ผลการหาประสิทธิภาพชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา พบว่า ผลการหาประสิทธิภาพชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปที่พัฒนาขึ้น พบว่า นักศึกษาทำคะแนนระหว่างเรียนได้เฉลี่ยเท่ากับ 256 คิดเป็นร้อยละ 85.33 และคะแนนหลังเรียนได้คะแนนเท่ากับ 393 คิดเป็นร้อยละ 87.33 แสดงให้เห็นว่าชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพล มีประสิทธิภาพเท่ากับ 85.33/87.33 สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ 80/80

2. ผลการหาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา พบว่า การเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาระหว่างก่อนเรียนและหลังเรียน มีคะแนนเฉลี่ยก่อนเรียนมีค่าเท่ากับ 10.20 และคะแนนเฉลี่ยหลังเรียนมีค่าเท่ากับ 26.20 และเมื่อทำการทดสอบค่า t-test มีค่าเท่ากับ 1.70 แสดงให้เห็นว่า คะแนนหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

3. ผลการศึกษาความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา พบว่า ร้อยละของความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพลหลังเรียนเป็นเวลา 7 วัน และ 30 วัน มีความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติสำเร็จรูปหลังเรียนแล้ว 7 วัน มีค่าเท่ากับ 90.08 และความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุด

เรียนปฏิบัติสำเร็จรูปหลังเรียนแล้ว 30 วัน มีค่าเท่ากับ 77.10 แสดงให้เห็นว่า ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปที่พัฒนาขึ้น ทำให้นักศึกษามีความคงทนในการเรียนรู้ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้

กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความกรุณาช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายฝ่ายที่ให้การสนับสนุนช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ดังนี้

ขอขอบพระคุณ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อย่างยิ่ง ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญตรวจเครื่องมือวิจัยที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไข ปรับปรุงเครื่องมือการวิจัยให้ถูกต้องสมบูรณ์

นอกจากนี้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณ นักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครทุกท่านที่เสียสละเวลาในการทดสอบเครื่องมือวิจัยจนสามารถนำเสนอผลงานวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้ได้

ผู้วิจัย

สารบัญ

เรื่อง **หน้า**

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
3. ขอบเขตของการวิจัย	2
4. นิยามศัพท์เฉพาะ	3
5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
6. กรอบแนวคิด	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
1. ทฤษฎีการเรียนรู้แบบรอบรู้	5
2. ทฤษฎีการเรียนรู้จากประสบการณ์	6
3. แนวคิดเกี่ยวกับชุดการเรียนรู้	8
4. การสอนโดยใช้บทเรียนโปรแกรม	11
5. การสอนแบบปฏิบัติการ	14
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	20
1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง	20
2. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	20
3. การสร้างและหาคุณภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	20
4. วิธีดำเนินการทดลอง	23
5. การวิเคราะห์ข้อมูล	23
6. สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล	24
บทที่ 4 ผลการวิจัย	28
1. ผลการหาประสิทธิภาพชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา	28

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2. ผลการหาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา	31
3. ผลการศึกษาความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา	32
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	34
1. สรุปผลการวิจัย	34
2. อภิปรายผล	35
3. ข้อเสนอแนะ	37
บรรณานุกรม	38
ภาคผนวก	40
ภาคผนวก ก	41
รายชื่อผู้เชี่ยวชาญในการตรวจเครื่องมือที่การวิจัย	42
ภาคผนวก ข	43
ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อสอบกับวัตถุประสงค์	44
ผลการวิเคราะห์ค่าความยากง่าย และค่าอำนาจจำแนกของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน	46
ภาคผนวก ค	48
ผลการทดลองใช้กับนักศึกษา	49
ภาคผนวก ง	53
แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนพร้อมเฉลย	54
ภาคผนวก จ	61
	62
ประวัติผู้วิจัย	115

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1	คะแนนจากการทำแบบฝึกหัดระหว่างเรียน	28
2	คะแนนจากการทำแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนในแต่ละบทเรียน	29
3	คะแนนจากการทำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียน	31
4	การเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาระหว่างก่อนเรียนและหลังเรียน	32
5	ร้อยละของความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพลหลังเรียนเป็นเวลา 7 วัน และ 30 วัน	32

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

ภาพที่		หน้า
1	วงจรการเรียนรู้จากประสบการณ์	8
2	บทเรียนแบบเส้นตรง	12
3	บทเรียนแบบสาขา	12
4	บทเรียนแบบไม่แยกกรอบ	14

บทที่ 1
บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความก้าวหน้าอย่างต่อเนื่องของเทคโนโลยีสมัยใหม่ในยุคของเทคโนโลยีดิจิตอลที่นำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาส่งผลให้การเรียนกาสอนจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนกระบวนการในการจัดสภาพแวดล้อมของการเรียนรู้ให้มีลักษณะและหรือบรรยากาศที่ส่งเสริมให้ผู้เรียนมีส่วนร่วมในกิจกรรมการเรียนการสอน ช่วยสนับสนุนให้ผู้เรียนมีโอกาสเรียนรู้ได้ตามอัตราความก้าวหน้าของตนเอง (ดุสิต ขาวเหลือง, 2549) จากการรายงานการปฏิรูปการเรียนรู้ในระดับอุดมศึกษา พบว่าการเรียนรู้ช่วยให้คนเราสามารถปรับตัวให้เข้ากับสถานการณ์ที่เกิดขึ้นในชีวิตหรือสามารถปรับสิ่งแวดล้อมให้เข้ากับตนเองได้อย่างเหมาะสม การเรียนรู้จึงนับเป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยเพิ่มศักยภาพของมนุษย์ซึ่งเป็นทรัพยากรบุคคลของประเทศ ดังนั้นการจัดการศึกษาของประเทศไทยสามารถแบ่งออกได้ 3 รูปแบบ คือ การศึกษาแบบในระบบ แบบนอกระบบ และแบบตามอัธยาศัยเพื่อให้เหมาะสมกับโอกาส สภาพปัญหา และความต้องการของแต่ละบุคคล (สำนักงานปฏิรูปการศึกษา, 2545 อ้างถึงใน จงรัก สามารถ และคณะ, 2556) ดังนั้นวงการศึกษาไทยจึงมีความตื่นตัวเกี่ยวกับการพัฒนารูปแบบการเรียนการสอนและนำนวัตกรรมรูปแบบต่าง ๆ มาช่วยพัฒนาการเรียนการสอนให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับเนื้อหาเวลา และศักยภาพของผู้เรียนในด้านต่าง ๆ ทั้งด้านพุทธิพิสัย จิตพิสัย และทักษะพิสัย ซึ่งทำให้สอดคล้องกับกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษาที่ได้ดำเนินการปรับปรุงหลักสูตรและจัดการเรียนการสอนเพื่อพัฒนาบัณฑิตให้มีผลการเรียนรู้อย่างน้อย 5 ด้าน รวมทั้งมีคุณลักษณะที่พึงประสงค์ที่ได้กำหนดไว้ จึงจำเป็นต้องพัฒนาคณาจารย์และบุคลากรให้มีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับการจัดการเรียนรู้เพื่อพัฒนาบัณฑิตให้บรรลุผลการเรียนรู้ทั้ง 5 ด้าน ซึ่งแต่ละด้านมีธรรมชาติที่แตกต่างกันและต้องอาศัยกระบวนการเรียนรู้และการสอนที่ต่างกัน (ทิศนา แขมมณี, 2553)

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารและโทรคมนาคมที่ทันสมัยถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในประเทศส่งผลให้บุคลากรที่มีความรู้ความสามารถในด้านดังกล่าวจึงเป็นที่ต้องการของผู้ประกอบการ ดังนั้นสถาบันการศึกษาระดับอุดมศึกษาทั้งภาครัฐบาลและเอกชนจึงเปิดหลักสูตรการเรียนการสอนในสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคมเพื่อจะผลิตบุคลกรเข้าสู่ตลาดแรงงาน แต่ด้วยรายวิชาในหลักสูตรส่วนใหญ่มีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ การคำนวณ การออกแบบ และการสังเคราะห์ ที่ยากต่อความเข้าใจ และจากการสัมภาษณ์อาจารย์ผู้สอนในสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคมระดับปริญญาตรีพบว่า การสอนส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นให้ผู้เรียนศึกษาทฤษฎีเป็นหลัก ขาดการนำทฤษฎีไปประยุกต์ใช้งานจริง ขาดสื่อหรือเครื่องมือประกอบการเรียนการสอนที่จำเป็น และงบประมาณของสถาบันการศึกษามีอย่างจำกัด (จงรัก สามารถ และคณะ, 2556) สอดคล้องกับการสำรวจสภาพการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม พบว่า เนื้อหา

รายวิชาส่วนใหญ่มีความซับซ้อน ใช้จินตนาการสูง ประกอบกับสมการสำหรับการคำนวณมีเป็นจำนวนมาก และค่อนข้างยาก ส่งผลให้ผู้เรียนเกิดความเบื่อหน่ายและขาดกำลังใจในการศึกษาต่อในระดับที่สูงขึ้น จึงควรมีการพัฒนารูปแบบการเรียนรู้และพัฒนาสื่อการสอนให้มีความหลากหลายเพื่อช่วยส่งเสริมการจินตนาการของผู้เรียน (อนุรักษ์ เมฆะโยม และคณะ, 2553)

ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปเป็นสื่อนวัตกรรมและเทคโนโลยีทางการศึกษาประเภทหนึ่งที่อำนวยความสะดวกแก่ผู้เรียน เน้นกระบวนการเรียนรู้ด้วยตนเองโดยให้ผู้เรียนได้เรียนจากการปฏิบัติจริง ได้รับประสบการณ์จริง ได้สังเกต เสาะหาข้อมูล จัดระเบียบข้อมูล พิจารณาหาข้อสรุป ค้นคว้าหาวิธีการต่าง ๆ ซึ่งช่วยให้ผู้เรียนเกิดความคิด จินตนาการ คิดสร้างสรรค์ มีกระบวนการต่าง ๆ ที่จะแก้ไขปัญหา รวมทั้งสื่อชุดเรียนปฏิบัติการช่วยให้ผู้เรียนเกิดความคิดรวบยอดในเรื่องต่าง ๆ เกิดมโนมติ (Concept) ความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ ในการหากระบวนการและวิธีการต่าง ๆ รวมทั้งสามารถถ่ายโยงความรู้นั้นไปใช้ในสถานต่าง ๆ ได้อย่างเต็มตามศักยภาพ

ด้วยเหตุดังกล่าว ผู้วิจัยจึงเห็นความสำคัญที่จะนำนวัตกรรมชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการสอนวิศวกรรมสายอากาศตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษามาช่วยพัฒนาผู้เรียนให้สามารถมีจินตนาการ สามารถนำทฤษฎีไปประยุกต์ใช้งานจริง ผู้เรียนเกิดความกระตือรือร้นสนุกสนานในการทำกิจกรรม มีเจตคติที่ดีต่อวิชาทางด้านโทรคมนาคม ตลอดจนส่งเสริมนักเรียนให้มีโอกาสพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและเกิดการเรียนรู้ได้อย่างเต็มตามศักยภาพ และนำความรู้ไปเชื่อมโยงการเรียนทางด้านโทรคมนาคมในชั้นสูงต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาประสิทธิภาพชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา
2. เพื่อหาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา
3. เพื่อศึกษาความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา

3. ขอบเขตของการวิจัย

1. ด้านประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

1.1 ประชากร คือ นักเรียนระดับปริญญาตรี หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1.2 กลุ่มตัวอย่าง คือ นักเรียนระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 แขนงวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ลงทะเบียนเรียนรายวิชาวิศวกรรมสายอากาศ ภาคการเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2559 จำนวน 15 คน ทำการสุ่มกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง

2. ด้านเนื้อหาที่ใช้ในการวิจัย

เนื้อหาที่ใช้ในการวิจัยเป็นเนื้อหารายวิชาวิศวกรรมสายอากาศ หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต และหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพล แบ่งออกเป็น 3 บทเรียน ได้แก่ 1) การเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ 2) การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศแบบไดโพล และ 3) การวิเคราะห์คุณสมบัติสู่การออกแบบสายอากาศแบบไดโพล

3. ด้านตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย

3.1 ตัวแปรต้น ได้แก่ การสอนโดยใช้ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพล

3.2 ตัวแปรตาม ได้แก่ ผลการเรียนของนักศึกษาและความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปการวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพล

4. นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ชุดการเรียน หมายถึง ชุดการเรียนรู้ที่จัดขึ้นสำหรับหน่วยการเรียนตามหัวข้อ เนื้อหาและประสบการณ์ของแต่ละหน่วยที่ต้องการจะให้ผู้เรียนได้รับ

2. ชุดการเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป หมายถึง ชุดการเรียนปฏิบัติการที่สร้างเป็นกรอบย่อย ๆ มีการนำเสนอความรู้ การทดสอบ การเฉลยคำตอบทันทีในแต่ละกรอบ

3. กรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา หมายถึง กรอบที่แสดงระบบคุณวุฒิการศึกษาระดับอุดมศึกษาของประเทศที่เน้นคุณภาพของบัณฑิตต้องเป็นไปตามมาตรฐานผลการเรียนรู้ที่คณะกรรมการการอุดมศึกษากำหนดและต้องครอบคลุมอย่างน้อย 5 ด้าน คือ ด้านคุณธรรมจริยธรรม ด้านความรู้ ด้านทักษะทางปัญญา ด้านทักษะความสัมพันธ์ระหว่างบุคคลและความรับผิดชอบ และด้านทักษะ การวิเคราะห์เชิงตัวเลขการสื่อสารและการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ

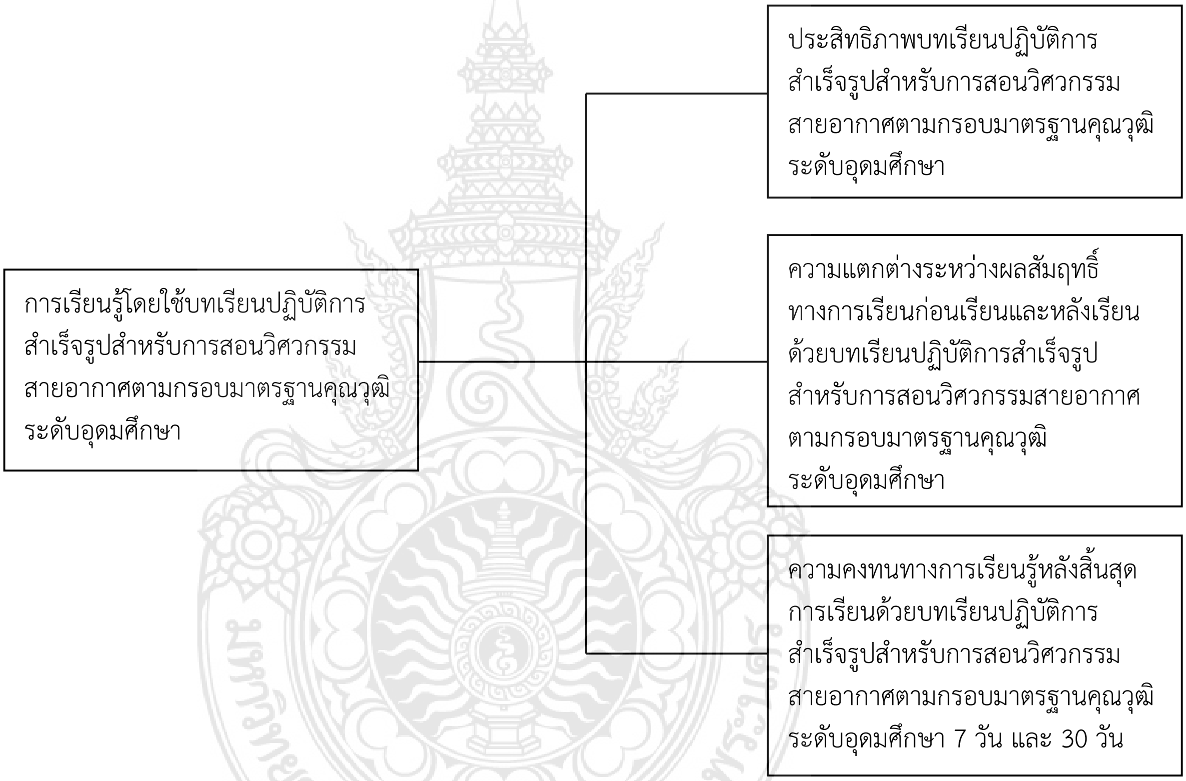
4. รายวิชาวิศวกรรมสายอากาศ หมายถึง รายวิชาของหมวดวิชาชีพเฉพาะ วิชาชีพบังคับ กลุ่มวิชาวิศวกรรม หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2556) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้นักศึกษามีความรู้เข้าใจเกี่ยวกับหลักการเบื้องต้นของสายอากาศ สายอากาศแบบไดโพลและลิเนียร์ การออกแบบสายอากาศ และการวัดคุณสมบัติของสายอากาศ กระจายคลื่นวิทยุ การกระจายคลื่นวิทยุตามผิวพื้นดินในชั้นบรรยากาศต่าง ๆ เช่น ชั้นโทรโปสเฟียร์ ชั้นแอทโมสเฟียร์ และชั้นไอโอโนสเฟียร์ เป็นต้น

5. ความคงทนในการเรียนรู้ หมายถึง ความสามารถของผู้เรียนในการระลึกหรือจดจำ ความรู้ที่เคยเรียนรู้หรือเคยมีประสบการณ์ หรือความสามารถด้านความจำ

5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษามาช่วยพัฒนาผู้เรียนให้สามารถจินตนาการ นำทฤษฎีไปประยุกต์ใช้งานจริง เกิดความกระตือรือร้น สนุกสนานในการทำกิจกรรม มีเจตคติที่ดีต่อวิชาทางด้านโทรคมนาคม ตลอดจนส่งเสริมให้มีโอกาสพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและเกิดการเรียนรู้ได้อย่างเต็มตามศักยภาพ และนำความรู้ไปเชื่อมโยงการเรียนทางด้านโทรคมนาคมในชั้นสูงต่อไป

6. กรอบแนวคิดในการวิจัย



บทที่ 2
ทฤษฎี เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการสอนวิศวกรรมสายอากาศตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. ทฤษฎีการเรียนรู้แบบรอบรู้
2. ทฤษฎีการเรียนรู้จากประสบการณ์
3. แนวคิดเกี่ยวกับชุดการเรียนรู้
4. การสอนโดยใช้บทเรียนโปรแกรม
5. การสอนแบบปฏิบัติการ
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการสอนวิศวกรรมสายอากาศตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎีและแนวคิดของ รองศาสตราจารย์ฉวีวรรณ แก้วไทรฮะ เกี่ยวกับการพัฒนาชุดเรียนปฏิบัติการในการบูรณาการแนวคิดของการจัดกิจกรรมการเรียนการสอน 2 รูปแบบคือ การสอนโดยใช้บทเรียนโปรแกรม (Programmed Instruction) และการสอนแบบปฏิบัติการ (Laboratory Method) ดังนี้

1. ทฤษฎีการเรียนรู้แบบรอบรู้

เป็นวิธีการสอนที่ผู้สอนกำหนดวัตถุประสงค์อย่างละเอียด วางแผนการเรียนรู้สำหรับผู้เรียนแต่ละบุคคลและแต่ละกลุ่มชี้แจงให้ผู้เรียนเข้าใจถึงจุดมุ่งหมายในการเรียนรู้และกฎระเบียบต่างๆ ผู้เรียนดำเนินการเรียนรู้ตามแผนที่ผู้สอนจัดไว้และมีการประเมินผลตามวัตถุประสงค์โดยผู้สอนให้คำปรึกษาและชี้แนะ ถ้าผู้เรียนบรรลุวัตถุประสงค์ตามที่กำหนดไว้แล้ว ให้ผู้เรียนไปเรียนรู้ในเรื่อง หรือวัตถุประสงค์ถัดไป หากผู้เรียนไม่บรรลุวัตถุประสงค์ ให้จัดสอนซ่อมเสริมจนกระทั่งนักเรียนบรรลุวัตถุประสงค์ ระยะเวลาในการเรียนรู้ของผู้เรียนแตกต่างกันตามศักยภาพของแต่ละบุคคล ผู้สอนต้องมีการติดตามความก้าวหน้าของผู้เรียน โดยเก็บข้อมูลผู้เรียนเป็นรายบุคคล เพื่อที่จะนำข้อมูลไปวางแผนในการสอนครั้งต่อไป (พงศ์ธารา วิจิตเวชไพศาล, 2551)

แนวคิดของ Hotchkis การพัฒนาการเรียนรู้ตามเส้นโค้งของความถี่สะสม ซึ่งมีความสอดคล้องและเหมาะสมกับหลักการเรียนเพื่อรอบรู้มาพัฒนาขั้นตอนการสอน แบ่งออกเป็น 5 ขั้น ดังนี้ (ทิศนา แขมมณี, 2554)

ขั้นการรับรู้ (Acquisition) ในขั้นนี้ ครูเริ่มเสนอเนื้อหาใหม่ให้แก่ผู้เรียน ผู้เรียนเริ่มเรียนรู้และจะได้รับปัจจัยสำคัญด้านต่างๆ ได้แก่ เจตคติ ความคิดรวบยอด ความรู้ ความเข้าใจ ผู้เรียนจะเริ่มลอง

ผิดลองถูกกับสิ่งที่เรียนรู้ ความถูกต้องและความแม่นยำในการเรียนรู้จะมีน้อย ในขั้นนี้ ครูผู้สอนควรดำเนินการดังนี้

- จัดเรียงเนื้อหาในหลักสูตรตามลำดับความยากง่าย ให้เนื้อหามีความสัมพันธ์กัน
- กำหนดเวลาที่เหมาะสมในการเรียนแต่ละบทเรียน
- เตรียมแบบทดสอบซึ่งประกอบด้วยแบบทดสอบย่อยและแบบทดสอบรวม
- กำหนดแผนการสอน โดยเน้นการสอนให้เกิดความคิดรวบยอดแก่ผู้เรียนเป็นสำคัญ เมื่อทำการสอน ครูควรสังเกตในเรื่องต่อไปนี้
    - ความเหมาะสมของเวลาที่ให้ผู้เรียนแต่ละคน และแต่ละบทเรียน
    - ความยากง่ายเหมาะสมกับทักษะพื้นฐานของผู้เรียน
    - ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการเรียนรู้ของนักเรียน

ขั้นเกิดความคล่องตัว (Fluency) ในขั้นนี้ ผู้เรียนจะได้รับการฝึกฝนทักษะ จนเกิดความคล่องแคล่ว ในเนื้อหา หลังจากผู้เรียนได้เรียนรู้และเกิดความคิดรวบยอดที่ถูกต้องแล้ว การปฏิบัติของผู้เรียนจะเพิ่มความถูกต้องมากขึ้น ดังนั้น ผู้สอนต้องเตรียมกิจกรรมการสอนให้มากพอ เพื่อฝึกให้ผู้เรียนเกิดความคล่องแคล่ว แม่นยำ และรวดเร็วในบทเรียน

ขั้นเกิดความคงทน (Maintenance) ขั้นนี้สืบเนื่องมาจากความคล่องตัวในเนื้อหา อันเนื่องมาจากการฝึกปฏิบัติของผู้เรียนในขั้นที่ 2 ความคงทนของความรู้ที่ได้รับจะอยู่ได้นานและไม่ลืม เนื่องจากมีความแม่นยำในสิ่งที่เรียนจากการปฏิบัติและประสบการณ์ในการลองผิดลองถูกมาหลายครั้งแล้ว วิธีการที่จะพิจารณาว่าผู้เรียนจำได้นานและถาวรในส่วนที่มีความจำเป็นต่อการเรียนในบทเรียนต่อไป คือ การทดสอบอย่างสม่ำเสมอ อีกทั้งมอบหมายงานที่ทำ เพื่อให้รู้ว่าเป็นเรื่องสำคัญ

ขั้นนำไปประยุกต์ใช้ (Application) ในขั้นนี้ เมื่อผู้เรียนมีความชำนาญในความรู้ที่เรียนมา การนำไปใช้ในที่นี้ เป็นการเพิ่มประสบการณ์ของผู้เรียน โดยเน้นที่การแก้ปัญหาจากเหตุการณ์สมมติในห้องเรียน ทั้งนี้ เป็นความจำเป็นของครูที่ต้องพิจารณาว่า การนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ของผู้เรียน ถ้ามีเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมเป็นประจำ ครูอาจนำเหตุการณ์ทั้งหมดมากำหนดเป็นภาพการแก้ปัญหาเพียงเล็กน้อย สำหรับเหตุการณ์ที่ไม่มีโอกาสเห็น ครูควรจัดสอนหรือให้เป็นข้อแก้ปัญหาให้มากและบ่อยครั้ง เพื่อให้ผู้เรียนได้มีโอกาสในการแก้ปัญหาให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ และเป็นการเพิ่มความชำนาญในการแก้ปัญหาให้แก่ผู้เรียนด้วย

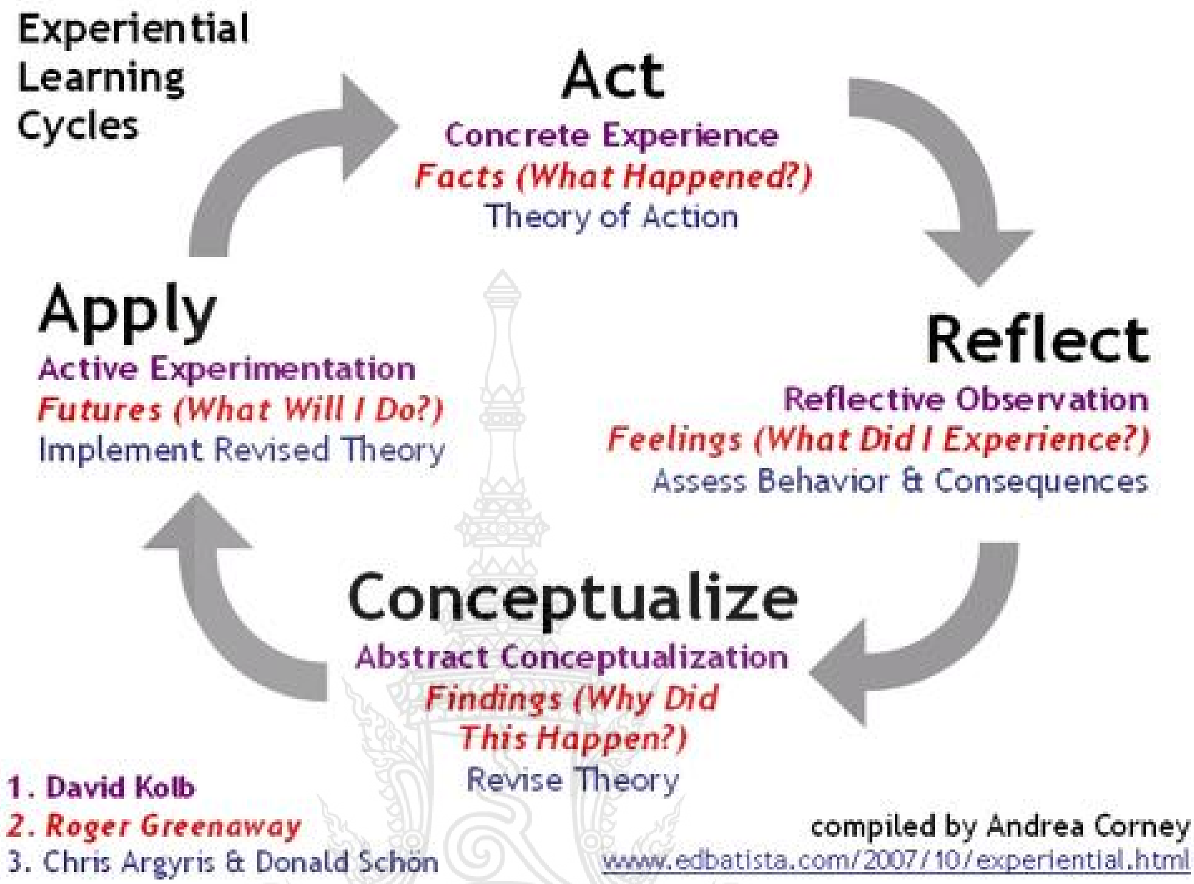
ขั้นปรับใช้ให้ถูกกับสถานการณ์ (Adaptation) ในขั้นนี้ ผู้เรียนจะสามารถนำความรู้มาดัดแปลงหรือปรับใช้ได้ทุกๆ สถานการณ์ที่ผู้เรียนมีโอกาสในการแก้ปัญหาจริงในชีวิตประจำวัน ซึ่งอาจจัดเป็นเหตุการณ์สมมติ เพื่อให้ผู้เรียนเห็นแนวทาง โดยมีครูเป็นผู้แนะนำ ถ้าผู้เรียนไม่สามารถแก้ปัญหาเองได้ถูกต้องในชั้นเรียน ผู้เรียนต้องคิดตัดสินใจและลงมือกระทำด้วยตนเอง หากเกิดข้อผิดพลาด ผู้เรียนจะพยายามทบทวนและหาแนวทางแก้ไขต่อไปด้วยตนเองตัวบ่งชี้ของการเรียนเพื่อรอบรู้

2. ทฤษฎีการเรียนรู้จากประสบการณ์

เป็นการดำเนินการเพื่อช่วยให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ตามเป้าหมายโดยให้ผู้เรียนได้รับประสบการณ์ที่จำเป็นต่อการเรียนรู้ก่อน และให้ผู้เรียนสังเกต ทบทวนสิ่งที่เกิดขึ้นและนำสิ่งนั้นมา

พิจารณาไตร่ตรองจนเกิดความคิดรวบยอดหรือสมมติฐาน แล้วนำไปทดลองหรือประยุกต์ใช้ในสถานการณ์ใหม่ต่อไปได้ (ทิศนา แขมมณี, 2554) มีขั้นตอนทั้งหมด 4 ขั้นตอนคือ ดังภาพที่ 1

1. Concrete Experience (Act) การสร้างประสบการณ์
    - การเรียนการสอนในห้องเรียน
    - การอ่านหนังสือ
    - การดูวีดีทัศน์
    - การทดลอง
    - การพูดคุยและการประชุม
2. Reflective Observation (Reflect) การสะท้อนการเรียนรู้ / ทบทวนการเรียนรู้
    - การเขียนสรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้
    - การบันทึกการเรียนรู้
    - การทำการบ้าน
    - การแลกเปลี่ยนเรียนรู้ระหว่างผู้เรียน (Dialogue / Discussion)
3. Abstract Conceptualization (Conceptualize) การสรุปองค์ความรู้
    - การเขียนแผนภาพมโนทัศน์ (Mind Mapping)
    - การสรุปการเรียนรู้ออกมาเป็น Model หรือ Framework
    - การนำเสนอผลการเรียนรู้ของผู้เรียน
4. Active Experimentation (Apply) การประยุกต์ใช้ความรู้
    - สิ่งที่จะต้องเรียนรู้ต่อไป
    - แนวทางในการพัฒนาต่อ / ศึกษาต่อ
    - รวบรวมสิ่งที่เรียนรู้ถูกต้องหรือผิดพลาดเพื่อการดำเนินการเรียนรู้ในขั้นตอนที่ 1



ภาพที่ 1 วงจรการเรียนรู้จากประสบการณ์

3. แนวคิดเกี่ยวกับชุดการเรียนรู้

ชุดการเรียนรู้หรือชุดการเรียนรู้มาจากคำว่า Instructional Package หรือ Learning Package จัดเป็นสื่อการสอนชนิดหนึ่งซึ่งเป็นชุดของสื่อประสม (Multi-media) ที่จัดขึ้นสำหรับหน่วยการเรียนตามหัวข้อ เนื้อหาและประสบการณ์ของแต่ละหน่วยที่ต้องการจะให้ผู้เรียนได้รับ โดยจัดเอาไว้เป็นชุด ๆบรรจุอยู่ในซอง กล่อง หรือกระเป๋า ซึ่งแล้วแต่ผู้สร้างจะจัดทำขึ้นในการสร้างชุดการเรียนรู้จะใช้วิธีระบบเป็นหลักสำคัญด้วยจึงทำให้มั่นใจได้ว่าชุดการเรียนรู้จะสามารถช่วยให้ผู้เรียนได้รับความรู้อย่างมีประสิทธิภาพและยังช่วยให้ผู้สอนเกิดความมั่นใจพร้อมที่จะสอนอีกด้วย

แนวคิดและหลักการของชุดการเรียนรู้

1. การประยุกต์ทฤษฎีความแตกต่างระหว่างบุคคลการเรียนการสอนจะต้องคำนึงถึงความต้องการ ความถนัดและความสนใจของผู้เรียนเป็นสำคัญครูจะเปิดโอกาสให้ผู้เรียนมีอิสระในการเรียนตามระดับสติปัญญา ความสามารถและความสนใจโดยมีครูคอยแนะนำช่วยเหลือตามความเหมาะสม

2. ความพยายามที่จะเปลี่ยนแนวการเรียนการสอนไปจากเดิมจากการยึดครูเป็นหลักมาเป็นการจัดประสบการณ์ให้ผู้เรียนเรียนเองโดยการใช้แหล่งความรู้จากสื่อหรือวิธีการต่าง ๆการนำสื่อการสอนมาใช้จะต้องจัดให้ตรงกับเนื้อหาและประสบการณ์ตามหน่วยการสอนของวิชาต่างๆ การเรียนในลักษณะนี้ผู้เรียนจะเรียนจากครูเพียง 1 ใน 4 ส่วน ส่วนที่เหลือผู้เรียนจะเรียนจากสื่อด้วยตนเอง

3. การใช้สื่อการสอนได้เปลี่ยนแปลงและขยายตัวออกไปโดยปัจจุบันการใช้สื่อได้คลุมไปถึงการใช้วัสดุสิ้นเปลืองเครื่องมือต่าง ๆ รวมทั้งกระบวนการและกิจกรรมต่าง ๆ ตลอดจนการปรับเปลี่ยนรูปแบบการใช้สื่อจากการใช้สื่อเพื่อช่วยครูสอนมาเป็นเพื่อช่วยผู้เรียนเรียน

4. ปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้สอนกับผู้เรียน ผู้เรียนกับผู้เรียนและผู้เรียนกับสภาพแวดล้อมโดยในการจัดกระบวนการเรียนรู้มีการนำเอากระบวนการกลุ่มสัมพันธ์มาใช้ในการเปิดโอกาสให้ผู้เรียนประกอบกิจกรรมร่วมกัน ทฤษฎีกระบวนการกลุ่มจึงเป็นแนวคิดทางพฤติกรรมศาสตร์ซึ่งนำมาสู่การจัดระบบการผลิตสื่อออกมาในรูปของ "ชุดการเรียนรู้"

5. การจัดสภาพสิ่งแวดล้อมการเรียนรู้ได้ยึดหลักจิตวิทยาการเรียนรู้มาใช้ โดยจัดสภาพการณ์ออกมาเป็นการสอนแบบโปรแกรมหมายถึงระบบการเรียนการสอนที่เปิดโอกาสให้ผู้เรียนได้มีโอกาสร่วมในกิจกรรมการเรียนด้วยตนเองมีทางทราบว่าการตัดสินใจ หรือการทำงานของตนถูกหรือผิดอย่างไรมีการเสริมแรงบวกที่ทำให้ผู้เรียนภาคภูมิใจที่ได้ทำถูกหรือคิดถูกและค่อยเรียนรู้ไปทีละขั้นตอนตามความสามารถและความสนใจการจัดสภาพการณ์ที่จะเอื้ออำนวยต่อการเรียนรู้ตามนัยดังกล่าวข้างต้นจะมีเครื่องมือช่วยให้บรรลุจุดมุ่งหมายปลายทางโดยการจัดสอนแบบโปรแกรมและใช้ชุดการเรียนรู้เป็นเครื่องมือสำคัญ

ประเภทของชุดการเรียนรู้

1. ชุดการเรียนรู้ประกอบคำบรรยายเป็นชุดการเรียนรู้สำหรับผู้สอนใช้สอนผู้เรียนเป็นกลุ่มใหญ่หรือเป็นการสอนที่ต้องการปูพื้นฐานให้ผู้เรียนส่วนใหญ่รู้และเข้าในในเวลาเดียวกันมุ่งในการขยายเนื้อหาสาระให้ชัดเจนยิ่งขึ้นชุดการเรียนรู้แบบนี้จะช่วยให้ผู้สอนลดการพูดให้น้อยลงและใช้สื่อการสอนที่มีพร้อมอยู่ในชุดการเรียนรู้สื่อที่ใช้อาจได้แก่ รูปภาพ แผนภูมิ สไลด์ วิดีโอ เทปบันทึกเสียง หรือกิจกรรมที่กำหนดไว้ เป็นต้น ข้อสำคัญก็คือสื่อที่จะนำมาใช้นี้จะต้องให้ผู้เรียนได้เห็นอย่างชัดเจนทุกคน

2. ชุดการเรียนรู้แบบกลุ่มกิจกรรมเป็นชุดการเรียนรู้สำหรับให้ผู้เรียนเรียนร่วมกันเป็นกลุ่มเล็ก ๆประมาณ 5 - 7 คน โดยใช้สื่อการสอนที่บรรจุไว้ในชุดการเรียนรู้แต่ละชุดมุ่งที่จะฝึกทักษะในเนื้อหาวิชาที่เรียน และให้ผู้เรียนมีโอกาสทำงานร่วมกันชุดการเรียนรู้ชนิดนี้มักจะใช้ในการสอนแบบกิจกรรมกลุ่ม

3. ชุดการเรียนรู้แบบรายบุคคลหรือชุดการเรียนรู้ตามเอกัตภาพเป็นชุดการเรียนรู้สำหรับเรียนด้วยตนเองเป็นรายบุคคล คือผู้เรียนจะต้องศึกษาหาความรู้ตามความสามารถ และความสนใจของตนเองอาจจะเรียนที่โรงเรียนหรือที่บ้านก็ได้ส่วนมากมักจะมุ่งให้ผู้เรียนได้ทำความเข้าใจในเนื้อหาวิชาที่เรียนเพิ่มเติมผู้เรียนสามารถประเมินผลการเรียนด้วยตนเอง

องค์ประกอบของชุดการเรียนรู้ (ระพินทร์ โพธิ์ศรี, 2550)

1. คู่มือครูเป็นคู่มือและแผนการสอนสำหรับผู้สอนหรือผู้เรียน ตามแต่ชนิดของชุดการเรียนรู้ภายในคู่มือจะชี้แจงถึงวิธีการใช้ชุดการเรียนรู้อาจจะทำเป็นเล่มหรือแผ่นพับก็ได้

2. บัตรคำสั่งหรือคำแนะนำจะเป็นส่วนที่บอกให้ผู้เรียนดำเนินการเรียนหรือประกอบกิจกรรมแต่ละอย่างตามขั้นตอนที่กำหนดไว้ มักอยู่ในรูปของกระดาษแข็งขนาด 6 x 8 นิ้วบัตรคำสั่งจะมีอยู่ในชุดการเรียนรู้แบบกลุ่มและรายบุคคลซึ่งจะประกอบด้วย

2.1 คำอธิบายในเรื่องที่จะศึกษา

2.2 คำสั่งให้ผู้เรียนดำเนินกิจกรรม

2.3 การสรุปบทเรียน

3. เนื้อหาสาระและสื่อจะบรรจุไว้ในรูปของสื่อการสอนต่างๆ อาจจะประกอบด้วยบทเรียนโปรแกรม สไลด์ เทปบันทึกเสียง วิดีโอ แผ่นภาพโปร่งใสวัสดุกราฟิก หุ่นจำลอง ของตัวอย่าง รูปภาพ เป็นต้นผู้เรียนจะศึกษาจากสื่อการสอนต่าง ๆที่บรรจุอยู่ในชุดการเรียนรู้ตามบัตรคำที่กำหนดไว้ให้

4. แบบประเมินผลผู้เรียนจะทำการประเมินผลความรู้ด้วยตนเองก่อนและหลังเรียนแบบประเมินผลที่อยู่ในชุดการเรียนรู้อาจจะเป็นแบบฝึกหัดให้เติมคำในช่องว่างเลือกคำตอบที่ถูก จับคู่ ดูผลจากการทดลอง หรือให้ทำกิจกรรมเป็นต้น

ส่วนประกอบข้างต้นนี้จะบรรจุในกล่องหรือซองจัดเอาไว้เป็นหมวดหมู่เพื่อสะดวกแก่การใช้นิยมแยกออกเป็นส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. กล่อง

2. สื่อการสอนและบัตรบอกชนิดของสื่อการสอนเรียงตามการใช้

3. บันทึกการสอน ประกอบด้วยรายละเอียดดังนี้

3.1 รายละเอียดเกี่ยวกับวิชาและหน่วยการสอน

3.2 รายละเอียดเกี่ยวกับผู้เรียน

3.3 เวลาจำนวนชั่วโมง

3.4 วัตถุประสงค์ทั่วไป

3.5 วัตถุประสงค์เฉพาะ

3.6 เนื้อหาวิชาและประสบการณ์

3.7 กิจกรรมและสื่อการสอนประกอบวิธีสอน

3.8 การประเมินผล วัดผล การทดสอบก่อนและหลังเรียน

4. อุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ

ขั้นตอนการผลิตชุดการเรียนรู้

1. กำหนดหมวดหมู่เนื้อหาและประสบการณ์อาจจะกำหนดเป็นหมวดวิชาหรือบูรณาการเป็นแบบสหวิทยาการตามที่เห็นเหมาะสม

2. กำหนดหน่วยการสอนโดยแบ่งเนื้อหาวิชาออกมาเป็นหน่วยการสอนโดยประมาณเนื้อหาวิชาที่จะให้ครูสามารถถ่ายทอดความรู้แก่นักเรียนได้ใน 1 ครั้ง หรือ 1 สัปดาห์

3. กำหนดหัวเรื่องผู้สอนจะต้องถามตนเองว่าในการสอนแต่ละหน่วยควรจะแบ่งประสบ-การณ์ออกมาเป็นกี่หัวข้อเรื่อง

4. กำหนดความคิดรวบยอดและหลักการโดยจะต้องสอดคล้องกับหน่วยและหัวข้อเรื่อง โดยสรุปรวมแนวคิดสาระและหลักเกณฑ์สำคัญไว้เพื่อเป็นแนวทางในการจัดเนื้อหาที่สอนให้สอดคล้องกัน

5. กำหนดวัตถุประสงค์โดยให้สอดคล้องกับหัวข้อเรื่องเป็นจุดประสงค์ทั่วไปก่อนจากนั้นจึงเปลี่ยนเป็นวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมที่ต้องมีเงื่อนไขและเกณฑ์พฤติกรรมไว้ทุกครั้ง

6. กำหนดกิจกรรมการเรียนโดยให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมซึ่งจะเป็นแนวทางในการเลือกและการผลิตสื่อการสอน กิจกรรมการเรียน หมายถึงกิจกรรมทุกอย่างที่ผู้เรียนปฏิบัติ เช่น การอ่านบัตรคำสั่ง การตอบคำถามการเขียนภาพการทดลองทางวิทยาศาสตร์ การเล่นเกมส์ เป็นต้น

7. กำหนดแบบประเมินผลโดยต้องออกแบบการประเมินผลให้ตรงกับวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมโดยใช้การสอบแบบอิงเกณฑ์ เพื่อให้ผู้สอนทราบว่า หลังจากผ่านกิจกรรมมาเรียบร้อยแล้ว ผู้เรียนได้เปลี่ยนพฤติกรรมการเรียนรู้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้หรือไม่

8. เลือกและผลิตสื่อการสอนวัสดุอุปกรณ์และวิธีการที่ครูใช้ถือเป็นสื่อการสอนทั้งสิ้นเมื่อผลิตสื่อการสอนของแต่ละหัวข้อเรื่องแล้วก็จัดสื่อการสอนเหล่านั้นไว้เป็นหมวดหมู่ในกล่องที่เตรียมไว้ก่อนนำไปทดลองหาประสิทธิภาพ เรียกว่า "ชุดการเรียนรู้"

9. หาประสิทธิภาพชุดการเรียนรู้เพื่อเป็นการประกันว่าชุดการเรียนรู้ที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพในการสอน ผู้สร้างจำต้องกำหนดเกณฑ์ขึ้นล่วงหน้าโดยคำนึงถึงหลักการที่ว่าการเรียนรู้เป็นการช่วยให้การเปลี่ยนพฤติกรรมของผู้เรียนบรรลุผล

10. การใช้ชุดการเรียนรู้ชุดการเรียนรู้ที่ได้ปรับปรุงและมีประสิทธิภาพตามเกณฑ์ที่ตั้งไว้แล้วสามารถนำไปสอนผู้เรียนได้ตามประเภทของชุดการเรียนรู้และระดับการศึกษาโดยกำหนดขั้นตอนการใช้ ดังนี้

10.1 ให้ผู้เรียนทำแบบทดสอบก่อนเรียนเพื่อพิจารณาพื้นความรู้เดิมของผู้เรียน

10.2 ขั้นนำเข้าสู่บทเรียน

10.3 ขั้นประกอบกิจกรรมการเรียน (ขั้นสอน) ผู้สอนบรรยายหรือแบ่งกลุ่มประกอบกิจกรรมการเรียน

10.4 ขั้นสรุปผลการสอน เพื่อสรุปคามคิดรวบยอดและหลักการที่สำคัญ

10.5 ทำแบบทดสอบหลังเรียนเพื่อดูพฤติกรรมการเรียนรู้ที่เปลี่ยนไปแล้ว

4. การสอนโดยใช้บทเรียนโปรแกรม

ผู้สอนต้องวิเคราะห์ปัญหาและความต้องการของผู้เรียนในการเรียนรู้ส่วนต่างๆสร้างบทเรียนสำเร็จรูปที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้เรียน และชี้แจงวัตถุประสงค์ เนื้อหาสาระ และวิธีใช้บทเรียนให้ผู้เรียนเข้าใจผู้เรียนดำเนินการศึกษาบทเรียนด้วยตนเอง โดยครูให้คำปรึกษาแนะนำตามความเหมาะสมทำแบบทดสอบประเมินผลการเรียนรู้ด้วยตนเอง ผู้สอนเก็บข้อมูลของผู้เรียนเพื่อการประเมิน

1. ขั้นตอนการสอนโดยใช้บทเรียนโปรแกรม

1.1 ผู้สอนศึกษาปัญหา ความต้องการและความสนใจของผู้เรียน

1.2 ผู้สอนเลือก แสวงหา หรือสร้างบทเรียนแบบโปรแกรมในเรื่องที่ตรงกับปัญหาความต้องการหรือความสนใจของผู้เรียน

1.3 ผู้สอนแนะนำการใช้บทเรียนแบบโปรแกรมให้ผู้เรียนเข้าใจ

1.4 ผู้สอนให้ผู้เรียนศึกษาบทเรียนด้วยตนเอง

1.5 ผู้เรียนทดสอบการเรียนรู้ด้วยตนเอง หรือมารับการทดสอบจากผู้สอน

2. เทคนิคและข้อเสนอแนะต่างๆ ในการใช้วิธีสอนโดยใช้บทเรียนแบบโปรแกรม

2.1 การเตรียมการ

- ผู้สอนศึกษาความต้องการและความสนใจของผู้เรียนรายบุคคล

- บทเรียนแบบโปรแกรมมี 2 ลักษณะ คือ สอนเนื้อหาสาระใดสาระหนึ่ง โดยผู้เรียนๆ ด้วยตนเอง และการสอนซ่อมเสริมการเรียนตามปกติ

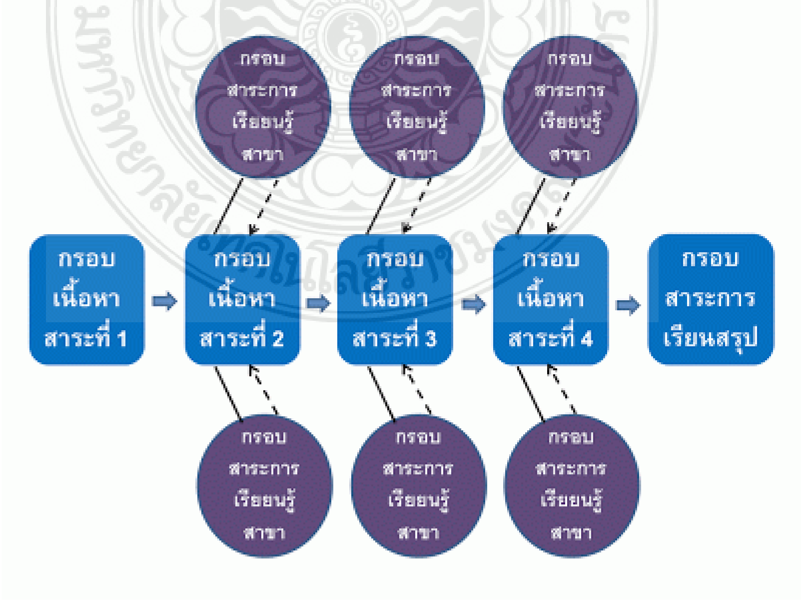
- บทเรียนแบบโปรแกรมจะนำเสนอเนื้อหาทีละน้อย ในรูปของเฟรม (Frame) หลังจากนำเสนอเนื้อหาแล้ว จะมีคำถามทดสอบความรู้ของผู้เรียน

- บทเรียนแบบโปรแกรมมี 3 ลักษณะ คือ

บทเรียนแบบเส้นตรง (Linear Program) คือ บทเรียนที่นำเสนอเนื้อหาไปตามลำดับ ผู้เรียนจะต้องศึกษาเนื้อหาตามลำดับที่ให้ไว้ ดังภาพที่ 2

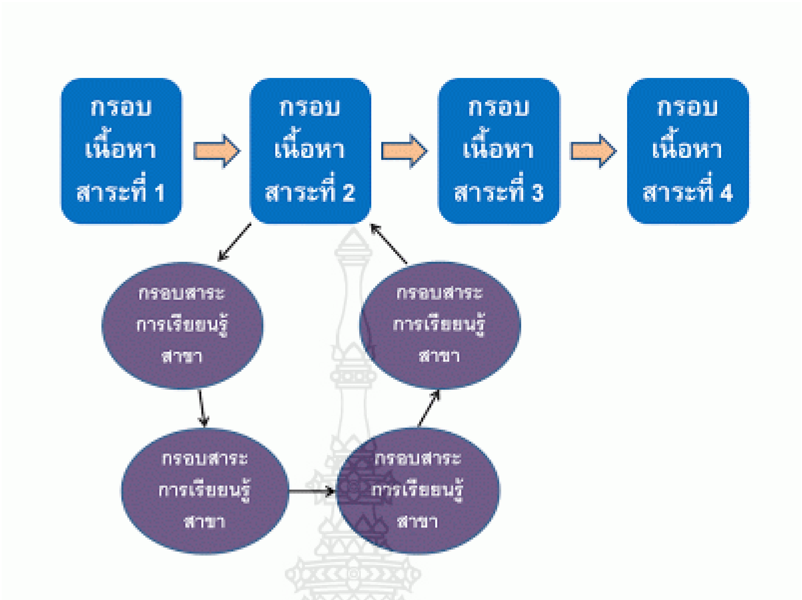
ภาพที่ 2 บทเรียนแบบเส้นตรง

บทเรียนแบบสาขา (Branching Program) คือ บทเรียนที่การตอบสนองของผู้เรียนจะมีผลต่อการศึกษาบทเรียนของผู้เรียนแต่ละคน เช่น การเลือกตอบคำถาม ก ข ค ง... ที่แตกต่างกัน ซึ่งบางข้อถูก บางข้อผิด จะส่งผลให้ผู้เรียนต้องศึกษาเนื้อหาเพิ่มเติมแตกต่างกันด้วย ลำดับการเรียนของผู้เรียนแต่ละคนจึงไม่เหมือนกัน ดังภาพที่ 3

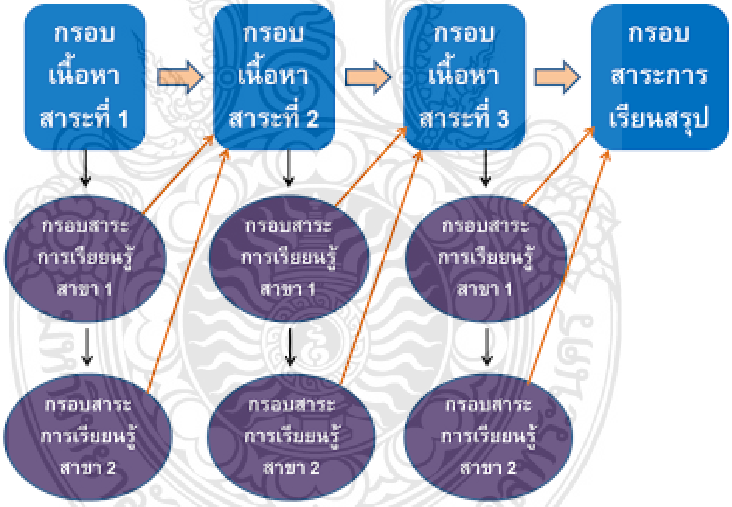


บทเรียนแบบสาขา (ก)

ภาพที่ 3 บทเรียนแบบสาขา

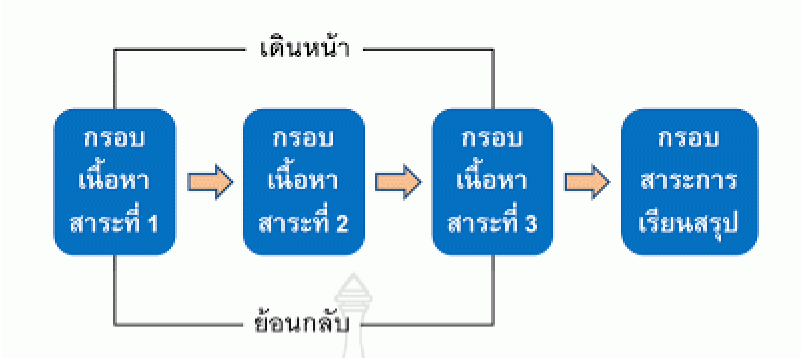


บทเรียนแบบสาขา (ข)



บทเรียนแบบสาขา (ค)

ภาพที่ 3 บทเรียนแบบสาขา (ต่อ)



ภาพที่ 4 บทเรียนแบบไม่แยกกรอบ

บทเรียนแบบไม่แยกกรอบ เหมือนบทเรียนแบบเส้นตรง แต่ไม่นำเสนอเนื้อหาในรูปของกรอบ แต่จะนำเสนอเนื้อหาเป็นความเรียงต่อกันไปเรื่อยๆ ดังภาพที่ 4

- การสร้างบทเรียนฯ ผู้สอนจะต้องวิเคราะห์เนื้อหาที่จะสอนและนำเนื้อหาสาระมาแตกย่อยเรียงลำดับให้เหมาะสม เพื่อง่ายต่อการเรียนรู้ จากนั้นจึงนำเสนอเนื้อหาทีละน้อย มีข้อคำถามท้าทายความคิดและมีเฉลย จากนั้น นำบทเรียนไปทดลองใช้ และปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

5. การสอนแบบปฏิบัติการ

การสอนแบบให้ผู้เรียนลงมือปฏิบัติ โดยผู้เรียนจะลงมือปฏิบัติหลังจากที่ได้ดูการสาธิตจากอาจารย์ผู้สอนหรือได้ทำการศึกษาในห้องเรียนมาแล้ว โดยมีอาจารย์ผู้สอนคอยดูแลให้การศึกษาอย่างใกล้ชิด การสอนแบบนี้ เรียกว่า S.M.P. ส่วนมากจะใช้ในห้องปฏิบัติการหรือโรงฝึกงาน ถ้านำไปเปรียบเทียบกันวิทยาการศึกษา จะเข้าหลักการ ของ Psychomotor Domain ซึ่ง Domain นี้จะเน้นให้ผู้เรียนปฏิบัติได้เช่นกัน ทำให้การเรียนรู้เป็นไปด้วยความรวดเร็วยิ่งขึ้น เพราะว่าผู้เรียนนั้นได้โอกาสทดสอบความสามารถเฉพาะตัวเองต่อหน้าผู้สอน

1. ประเภทของการสอนแบบปฏิบัติการ

1.1 Independent Practice หรือ Individual Learning ประเภทนี้ผู้เรียนจะฝึกปฏิบัติงานแต่เพียงลำพังเพื่อทดสอบความสามารถของตนเอง

1.2 Group Performance of controlled practice หรือ Group learning ประเภทนี้จะแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ (Task group) ทำงานด้วยกันตามคำสั่งของผู้สอน และผู้เรียนแต่ละคนจะมีทักษะแตกต่างกัน

1.3 Instructor and pupil ประเภทนี้ให้ผู้เรียนสองคนจับคู่กัน โดยที่ผู้เรียนจะทำงานสลับกันไป ผลัดกันเป็นผู้สอน และผลัดกันเป็นผู้เรียน

1.4 Team performance ประเภทนี้ผู้เรียนทั้งหมดจะทำงานกันเป็นทีม แต่กลุ่มผู้เรียนแต่ละกลุ่มอาจจะทำงานต่างกัน แต่สุดท้ายนำงานที่ได้มาประกอบกัน จะเป็นชิ้นงานเดียวกัน

2. สิ่งจำเป็นอย่างมากในการสอนแบบปฏิบัติการ ได้แก่

2.1 สถานที่ฝึกปฏิบัติ

- สถานที่ฝึกปฏิบัตินั้นจะต้องเหมาะกับจุดมุ่งหมายและวิธีการ

- ต้องเป็นสถานที่ที่มีความพร้อมและยืดหยุ่นได้ตามสมควร เพราะในการปฏิบัติบางครั้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแผนการเดิมที่ตั้งไว้ได้ ทำให้การฝึกปฏิบัติจะต้องเปลี่ยนไปด้วย

2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- จะต้องมีจำนวนพอเพียงกับจำนวนผู้เรียน

- ต้องมีสภาพพร้อมที่จะทำงานได้

- เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ นั้นไม่ควรจำกัดเวลาเพราะการฝึกปฏิบัติบางครั้งอาจจะกินเวลามากกว่าที่ตั้งไว้

2.3 เอกสารการฝึกปฏิบัติ

- คู่มือฝึกปฏิบัติ

- Job sheet

- Operation sheet

- Lab sheet

- เอกสารแนะนำประกอบการฝึก เช่น เอกสารเรื่องความปลอดภัย

2.4 การเตรียมตัวของผู้เรียนผู้สอน

- ผู้สอนจะต้องจัดกิจกรรมของผู้สอนที่จะต้องทำเป็นขั้น ๆ ไป รวมทั้งเนื้อหาในวิชาการที่จะสอนด้วย หรือจะเรียกว่าการ เตรียมการสอนก็ได้

- ผู้สอนต้องเตรียม Pre – test (ข้อทดสอบก่อนเรียน) ข้อสอบนี้เพื่อที่จะสำรวจความพร้อมของผู้เรียน

- เตรียมกิจกรรมให้ผู้เรียนร่วมเพื่อให้บรรลุจุดมุ่งหมายเชิงพฤติกรรมของการเรียนกิจกรรมนั้นผู้เรียนจะต้องทำได้เมื่อ ผู้สอนอธิบายเสร็จ

2.5 การประเมินผล

- เตรียมข้อสอบ Post – test ไว้อีกชุดหนึ่ง เพื่อเป็นการประเมินผลของผู้เรียน เมื่อได้ผ่าน การเรียนรู้ บทเรียนนั้น ไป แล้วว่ามีความรู้ตรงตามจุดมุ่งหมายเชิงพฤติกรรมนั้นหรือไม่ แต่ถ้ายังไม่รู้ถึงจุดที่เราต้องการ ก็ต้องหาทางเพิ่มเติมให้ กับผู้เรียนอีก

3. เปรียบเทียบถึงผลดีผลเสียของการสอนแบบให้ผู้เรียนปฏิบัติ

3.1 ผลดี

- การสอนแบบฝึกปฏิบัตินี้ จะสร้างความเชื่อมั่นให้กับตัวผู้เรียนให้โอกาสที่จะนำความรู้ไปใช้ในสภาพที่เป็นจริง

- เป็นการพัฒนาความสามารถของตัวผู้เรียนในเรื่องความเชื่อมั่นและทัศนคติที่ดีต่อการศึกษาของชาติ

- ตามหลักปรัชญาการศึกษา จะสามารถพัฒนาความรู้ความสามารถได้จนถึงจุดสูงสุด ข้อนี้เป็นความจริงเพราะผู้เรียนจะ สามารถทฤษฎีมาประยุกต์เข้ากับการปฏิบัติซึ่งเป็น การ

เพิ่มทั้งความรู้ในวิชาการและความสามารถในทางฝึกปฏิบัติ ซึ่งตรงกับหลักของปรัชญาการศึกษา (Psychomotor Domain)

- ผู้สอนสามารถที่จะประเมินผลของการเรียนการสอนได้ เพราะการสอนแบบฝึกปฏิบัติ ผู้สอนจะสามารถสังเกตความตั้งใจทัศนคติของผู้เรียนในการศึกษาของแต่ละคนได้โดยง่าย

- เป็นการลดความเสียหายลงได้ เพราะเนื่องจากว่าการสอนแบบฝึกปฏิบัติผู้เรียนจะปฏิบัติ งานผิดพลาดน้อยลง ซึ่งจะมีผลทำให้เครื่องมือไม่ค่อยเสียหายและอีกอย่างหนึ่งวัสดุฝึกก็ จะไม่เสียเปล่าด้วย

- เป็นการเพิ่มและป้องกันความปลอดภัยให้กับผู้เรียน เพราะการสอนปฏิบัติผู้เรียนจะมีความรู้ในการใช้อุปกรณ์ก็จะลดอุบัติเหตุลงได้

3.2 ผลเสีย

- ต้องใช้เวลามากกว่า เพราะต้องให้ผู้เรียนฝึกจนเกิดความชำนาญ และฝึกฝนได้เต็มที่

- ต้องใช้ผู้สอนหลายคน บางครั้งการฝึกจะต้องมีผู้สอนคอยควบคุมดูแลอย่างใกล้ชิด เพราะถ้ามีผู้เรียนจำนวนมาก ผู้สอนจะต้องคอยตรวจสอบผู้เรียนทุกระยะ และต้องคอยให้คำแนะนำแก่ผู้เรียนด้วย

4. กิจกรรมของผู้สอน

1. ก่อนอื่นต้องแจก Hand out sheet ของวิธีการสอนแบบ Student Performance Method ให้กับผู้เรียนทุกคน

2. ต้องอธิบายวิธีการสอนแบบ Student Performance Method ให้ผู้เรียนทุกคนเกิดความเข้าใจโดยถ่องแท้กิจกรรมของผู้สอน

3. แจกตัวอย่างบทเรียนที่จะใช้กับวิธีสอน แบบ Student Performance Method โดยจะต้องมีข้อมูลดังต่อไปนี้

3.1 ข้อมูลทดสอบเพื่อสำรวจความรู้เบื้องหลัง (Back ground) ของผู้เรียนก่อนทำการสอน หรือที่เรียกกันว่า Pre-test

3.2 เนื้อหาที่จะสอนส่วนใหญ่จะเป็นหลักการหรือกฎเกณฑ์ต้องให้ผู้เรียนสามารถจับใจความได้ และควรมีตัวอย่างในการอย่างน้อย 1 ตัวอย่าง

3.3 ปัญหาที่จะให้ผู้เรียนทำการแก้ปัญหาProblem solving ร่วมกันแต่ละปัญหาต้องมีวิธีแก้โดยอาศัยหลักการที่ผู้สอนได้อธิบาย

4. แบ่งผู้เรียนออกเป็นกลุ่มย่อย (Task group) ไม่เกินกลุ่มละ 4 คน

5. แจกปัญหาที่เตรียมไว้ให้กับผู้เรียนแต่ละกลุ่ม

6. ให้แต่ละกลุ่มศึกษา Hand-out sheet แล้วผลัดกันสอน หรือให้การแนะนำซึ่งกันและกันอย่างทั่วถึง

5. กิจกรรมของผู้เรียน

1. รับ Hand out sheet จากผู้สอน

2. ฟังผู้สอนอธิบายและซักถามจนเกิดความเข้าใจ

3. ศึกษารายละเอียดจากตัวอย่างใน Hand out sheet ให้เข้าใจ ถ้าไม่เข้าใจให้

ซักถามผู้สอนจนเกิดความเข้าใจ

4. แบ่งกลุ่มตามที่ผู้สอนจัด และปฏิบัติงานอย่างเต็มความสามารถ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พิสิฐ สอนละ และคณะ (2559) ได้ทำการวิจัยเรื่องการพัฒนาชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม มีวัตถุประสงค์ของการวิจัยดังนี้ 1) เพื่อพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม 2) เพื่อเปรียบเทียบผลการเรียนของผู้เรียนก่อนเรียนและหลังเรียนด้วยชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น และ 3) เพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ ผู้เรียนระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์เทเวศร์ ที่ลงทะเบียนเรียนรายวิชาวิศวกรรมไมโครเวฟ ภาคการเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2558 จำนวน 15 คน ทำการสุ่มแบบเจาะจง (Purposive Sampling) เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริป แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน และแบบสอบถามความพึงพอใจของผู้เรียน ผลการวิจัยพบว่า

1. ผลการพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม พบว่า ชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมีทั้งหมด 3 บทเรียน ประกอบด้วย วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม จำนวน 13 ข้อ ใบเนื้อหา จำนวน 91 หน้า การนำเสนอเนื้อหาด้วยเพาเวอร์พอยต์ จำนวน 178 เฟรม การนำเสนอเนื้อหาด้วยชุดสาธิต จำนวน 3 ชุด แบบทดสอบท้ายบทเรียน จำนวน 45 ข้อ และแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน จำนวน 30 ข้อ

ผลการหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสมที่พัฒนาขึ้น พบว่า ผู้เรียนสามารถทำคะแนนแบบทดสอบท้ายบทเรียนเฉลี่ย 12.07 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 80.44 ซึ่งเท่ากับเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ร้อยละ 80 และการทำคะแนนแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน 24.00 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 80.00 ซึ่งเท่ากับเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ร้อยละ 80 จึงสามารถสรุปได้ว่าชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพเท่ากับ 80.44/80.00 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ร้อยละ 80/80

2. ผลเปรียบเทียบผลการเรียนของผู้เรียนก่อนเรียนและหลังเรียนด้วยชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น พบว่า ผู้เรียนสามารถทำคะแนนเฉลี่ยจากแบบทดสอบหลังเรียนคิดเป็นร้อยละ 80.00 สูงกว่าคะแนนเฉลี่ยจากแบบทดสอบก่อนเรียนคิดเป็นร้อยละ 20.89 จึงสามารถสรุปได้ว่า ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของผู้เรียนสูงขึ้นหลังจากได้เรียนกับชุดสื่อประสมที่พัฒนาขึ้น

3. ผลศึกษาความพึงพอใจของผู้เรียนที่มีต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้น พบว่า ผู้เรียนมีความคิดเห็นต่อชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปด้านต่าง ๆ มีค่าเฉลี่ยของระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 3.93$, $S.D. = 0.84$)

ฉวีวรรณ แก้วไทรฮะ (2555) ได้ทำการวิจัยเรื่องการใช้ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab ในการศึกษาภาษาอังกฤษ เพื่อการสื่อความหมายทางเรขาคณิต มีวัตถุประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้เพื่อสร้างชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab โดยใช้ประกอบการอบรมครูคณิตศาสตร์ในสาระที่เกี่ยวกับเรขาคณิตระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab ที่สร้างขึ้นนี้ได้นาไปทดลองกับกลุ่มตัวอย่างที่เข้ารับการอบรมโครงการบริการวิชาการ เรื่องการใช้ภาษาอังกฤษเพื่อการเรียนการสอนคณิตศาสตร์ในภาคฤดูร้อน ปีการศึกษา 2555 ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างที่เป็นผู้สอนคณิตศาสตร์ในสังกัดสานักงานการศึกษาขั้นพื้นฐาน ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลและสังกัดสานักงานการศึกษา กรุงเทพมหานครที่สมัครลงทะเบียนเข้ารับการอบรม จานวน 54 คน และสุ่มแบบกลุ่มจานวน 40 คน ที่สอนระดับมัธยมศึกษาตอนต้น การทดลองครั้งนี้ เพื่อ 1) หาประสิทธิภาพของชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab ศึกษาภาษาอังกฤษเพื่อการเรียนรู้ การสื่อความหมายทางเรขาคณิตที่สร้างขึ้น 2) เพื่อศึกษาผลสัมฤทธิ์ของครู คณิตศาสตร์ที่ใช้ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab ศึกษาภาษาอังกฤษเพื่อการเรียนรู้ การสื่อความหมายทางเรขาคณิต ที่สร้างขึ้น 3) เพื่อศึกษาความคงทนในการเรียนรู้ของครูคณิตศาสตร์ที่ใช้ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab ศึกษาภาษาอังกฤษเพื่อการเรียนรู้ การสื่อความหมายทางเรขาคณิต ที่สร้างขึ้น ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นได้วิเคราะห์ประสิทธิภาพบทเรียนโดยใช้เกณฑ์ 90/90 วิเคราะห์ผลสัมฤทธิ์ก่อนและหลังเรียนบทเรียน โดยใช้ t-test และวิเคราะห์ความคงทนในการเรียนรู้ หลังสิ้นสุดการอบรม 7 วัน และ หลังสิ้นสุดการอบรม 30 วัน โดยใช้ค่าความคงทนระหว่างร้อยละ 75 และ 90 ผลการวิจัยพบว่า ประสิทธิภาพของชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab ในการศึกษาภาษาอังกฤษเพื่อการสื่อความหมายทางเรขาคณิต มีประสิทธิภาพ 90.9 / 92.5 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ ครูคณิตศาสตร์ที่เป็นกลุ่มตัวอย่างมีผลสัมฤทธิ์ทางการศึกษาภาษาอังกฤษเพื่อการเรียนรู้การสื่อความหมายทางเรขาคณิตสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ -0.05 และครูคณิตศาสตร์ที่เป็นกลุ่มตัวอย่างมีความคงทนในการเรียนรู้ ระหว่างร้อยละ 88.61 และร้อยละ 81.23

ฉวีวรรณ แก้วไทรฮะ (2553) ได้ทำวิจัยเรื่องการพัฒนาชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab เรื่อง การวิเคราะห์ข้อมูลในรายวิชาการคิดสร้างสรรค์และการตัดสินใจ สำหรับนักศึกษาชั้นปีที่ 1 วิทยาลัยนานาชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัยชั้นเรียนครั้งนี้เพื่อสร้างชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab โดยใช้ประกอบการเรียนรายวิชาการศึกษาทั่วไป ISM 1102 การคิดสร้างสรรค์และการตัดสินใจ สำหรับนักศึกษาชันปีที่ 1 วิทยาลัยนานาชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ในหัวข้อเรื่อง การวิเคราะห์ข้อมูล บทเรียน ปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab ที่สร้างขึ้นนี้ได้นำไปทดลองกับกลุ่มตัวอย่างที่ลงทะเบียนเรียนรายวิชา ISM 1102 การคิดสร้างสรรค์และการตัดสินใจ ในภาคเรียนที่ 1/2553 ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างที่ผู้วิจัยเลือกโดยใช้วิธีสุ่มแบบกลุ่ม จำนวน 1 กลุ่ม ได้นักศึกษาจำนวน 35 คน การทดลองครั้งนี้เพื่อ 1) ทดสอบหาประสิทธิภาพของชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab ที่สร้างขึ้น 2) ศึกษาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาที่เรียนชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab ที่สร้างขึ้น 3) วัดความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab ที่สร้างขึ้น ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้น ได้วิเคราะห์ประสิทธิภาพบทเรียนโดยใช้เกณฑ์ 90/90 วิเคราะห์ผลสัมฤทธิ์ก่อนและหลังเรียนบทเรียน โดยใช้t-test และวิเคราะห์ความคงทนในการเรียนรู้ หลังสิ้น สุดการเรียน 1 สัปดาห์ (7 วัน) และ หลังสิ้นสุดการเรียน 1

เดือน (30 วัน) โดยใช้ค่าความคงทนระหว่างร้อยละ 75 และ 90 ผลการวิจัยพบว่า ประสิทธิภาพของชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab เรื่อง การวิเคราะห์ข้อมูล มีประสิทธิภาพ 90.3 / 91.4 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ นักศึกษามีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนสูงขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ a = 0.05 และนักศึกษามีความคงทนในการเรียนรู้ ระหว่างร้อยละ 84.36 และ ร้อยละ 89.9

คฑาวุธ ชุมขวัญ (2552 : บทคัดย่อ) ได้ทำการสร้างและทดสอบประสิทธิภาพชุดการสอนโดยใช้สื่อประสม และทำการเปรียบเทียบความก้าวหน้าทางการเรียนของนักเรียนก่อนเรียนและหลังเรียน ซึ่งชุดการสอนประกอบด้วย คู่มือครู สื่อการสอน แบบทดสอบท้ายหน่วยเรียนและแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ผลการวิจัยพบว่า ชุดการสอนที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพร้อยละ 76.80/72.30 ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ร้อยละ 80/80 และจากการเปรียบเทียบคะแนนเฉลี่ยจากแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน พบว่านักเรียนมีความก้าวหน้าทางการเรียนเพิ่มขึ้นโดยที่นักเรียนกลุ่มสูงและกลุ่มต่ำมีคะแนนเฉลี่ยความก้าวหน้าทางการเรียนต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 จากการเรียนด้วยชุดการสอนแบบสื่อประสมที่สร้างขึ้น

วิมล อยู่พิพัฒน์ (2551) ได้ทำการพัฒนาชุดเรียนปฏิบัติการโดยใช้โปรแกรม GSP (GEOMETER'S SKETCHPAD) ที่เน้นทักษะการเชื่อมโยง เรื่องการวัด สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 มีการวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อสร้างชุดเรียนปฏิบัติการโดยใช้โปรแกรม GSP ที่เน้นทักษะการเชื่อมโยง เรื่องการวัด สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 และเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน คณิตศาสตร์ของนักเรียนที่ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 ก่อนกับหลังได้รับการสอนโดยใช้ชุดเรียนปฏิบัติการโดยใช้โปรแกรม GSP ที่เน้นทักษะการเชื่อมโยง เรื่องการวัด กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2550 โรงเรียนไทรโยคมณีกาญจน์วิทยา อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรีจำนวน 1 ห้องเรียน 30 คน ได้มาโดยการสุ่มอย่างง่าย (Simple Random Sampling) ดำเนินการสอนโดยใช้ชุดเรียนปฏิบัติการโดย ใช้โปรแกรม GSP ที่เน้นทักษะการเชื่อมโยง เรื่องการวัด โดยผู้วิจัยเป็นผู้ดำเนินการสอนด้วยตนเอง ใช้เวลาทั้งสิ้น 11 ชั่วโมง แบบแผนการทดลองครั้งนี้เป็นแบบ One-Group Pretest Posttest Design และวิเคราะห์ข้อมูลโดยการทดสอบค่าสถิติ t - test dependent ผลการศึกษาพบว่า ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนคณิตศาสตร์ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 ภายหลังได้รับ การสอนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการโดยใช้โปรแกรม GSP ที่เน้นทักษะการเชื่อมโยง เรื่องการวัด สูงกว่าก่อนได้รับการสอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการสอนวิศวกรรมสายอากาศตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีการดำเนินการเป็นขั้นตอนดังนี้

1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง
2. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
3. การสร้างและหาคุณภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
4. วิธีดำเนินการทดลอง
5. การเก็บรวบรวมข้อมูล
6. การวิเคราะห์ข้อมูล
7. สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

1.1ประชากร คือ นักเรียนระดับปริญญาตรี หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จำนวน 75 คน

1.2กลุ่มตัวอย่าง คือ นักเรียนระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 แขนงวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ลงทะเบียนเรียนรายวิชาวิศวกรรมสายอากาศ ภาคการเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2560 จำนวน 15 คน ทำการสุ่มกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง

2. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

2.1 แผนการสอนรายวิชาวิศวกรรมสายอากาศ เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพล

2.2 ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพล

2.3 แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรายวิชาวิศวกรรมสายอากาศ

3. การสร้างและหาคุณภาพของเครื่องมือ

3.1 แผนการสอนรายวิชาวิศวกรรมสายอากาศ เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพล มีลำดับขั้นตอนในการสร้างดังนี้

1. ศึกษาและวิเคราะห์หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต หลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2. ศึกษารายละเอียดมาตรฐานการเรียนรู้ตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา 5 ด้าน ได้แก่ 1) ด้านคุณธรรมจริยธรรม 2) ด้านความรู้ 3) ด้านทักษะทางปัญญา 4) ด้านทักษะความสัมพันธ์ระหว่างบุคคลและความรับผิดชอบ และ 5) ด้านทักษะ การวิเคราะห์เชิงตัวเลขการสื่อสารและการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ ที่เกี่ยวข้องกับรายวิชาวิศวกรรมสายอากาศ

3. วิเคราะห์จุดประสงค์การสอนที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพล

4. ศึกษาวิธีการจัดทำแผนการสอนจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาเป็นพื้นฐานในการสร้างแผนการสอนที่เหมาะสม

5. จัดทำแผนการสอนให้สอดคล้องกับพัฒนาการเรียนรู้ของนักศึกษา เรื่องการวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพล ซึ่งประกอบด้วย

5.1 แผนการสอน

1. วิธีสอนและกิจกรรม

2. สื่อการสอน/อุปกรณ์การสอน

3. การวัดผล

5.2 หัวข้อบรรยายและเนื้อหาสาระ

5.3 แบบฝึกหัด/งานที่มอบหมาย

6. นำแผนการสอนเสนอให้ผู้เชี่ยวชาญตรวจพิจารณาความเหมาะสม ในการกำหนดจุดประสงค์การสอน การแบ่งเนื้อหา และการจัดกิจกรรมการสอน

7. นำแผนการสอนมาปรับปรุงแก้ไข แล้วนำไปใช้กับกลุ่มตัวอย่าง

3.2 ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพล มีลำดับขั้นตอนในการสร้างดังนี้

1. ศึกษาหลักการออกแบบบทเรียนโปรแกรมหรือบทเรียนสำเร็จรูป ชุดเรียนปฏิบัติการ เพื่อนำลักษณะหรือองค์ประกอบของบทเรียนทั้งสองมาออกแบบบูรณาการเป็นชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป

2. นำหัวข้อต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์แผนการสอนมาสร้างชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป ซึ่งจากการวิเคราะห์รายวิชาวิศวกรรมสายอากาศ มาสร้างชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปดังต่อไปนี้

บทเรียนที่ 1 การเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ

บทเรียนที่ 2 การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศแบบไดโพล

บทเรียนที่ 3 การวิเคราะห์คุณสมบัติสู่การออกแบบสายอากาศแบบไดโพล

3. นำชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปที่พัฒนาขึ้น ไปให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน ตรวจพิจารณาเพื่อประเมินความเหมาะสมของบทเรียนในด้านเนื้อหาสาระและโครงสร้างของบทเรียนที่ใช้ในการทดลองและให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุง ดังนี้

3.1 ด้านเนื้อหาสาระ

3.2 ด้านโครงสร้างของบทเรียน

การประเมินความเหมาะสมของบทเรียนในด้านเนื้อหาสารและด้านโครงสร้างของบทเรียน ใช้แบบประเมินแบบลิเคิร์ท 5 ระดับ ซึ่งมีเกณฑ์การให้คะแนนดังนี้

ระดับ	5	หมายถึง มีความเหมาะสมมากที่สุด
ระดับ	4	หมายถึง มีความเหมาะสมมาก
ระดับ	3	หมายถึง มีความเหมาะสมปานกลาง
ระดับ	2	หมายถึง มีความเหมาะสมน้อย
ระดับ	1	หมายถึง มีความเหมาะสมน้อยที่สุด

สำหรับเกณฑ์การแปลความหมายแสดงความเหมาะสมของบทเรียน ดังนี้

4.51 – 5.00	หมายถึง มีความเหมาะสมอยู่ในระดับมากที่สุด
3.51 – 4.50	หมายถึง มีความเหมาะสมอยู่ในระดับมาก
2.51 – 3.50	หมายถึง มีความเหมาะสมอยู่ในระดับปานกลาง
1.51 – 2.50	หมายถึง มีความเหมาะสมอยู่ในระดับน้อย
1.00 – 1.50	หมายถึง มีความเหมาะสมอยู่ในระดับน้อยที่สุด

ผลการประเมินคุณภาพความเหมาะสมด้านเนื้อหาสาระและด้านโครงสร้างของชุดการเรียนปฏิบัติสำเร็จรูป พบว่า ผู้เชี่ยวชาญประเมินชุดการเรียนปฏิบัติสำเร็จรูป มีความเหมาะสมอยู่ในระดับมากที่สุด ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.57 และมีข้อเสนอแนะให้เพิ่มวิธีการคำนวณให้มากขึ้น เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจได้ชัดเจน

ซึ่งจากผลการประเมินผู้วิจัยได้นำข้อเสนอแนะมาปรับปรุงแก้ไขให้เหมาะสมตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ

4. นำชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปไปทดลองใช้ เพื่อหาข้อบกพร่องต่าง ๆ พร้อมทั้งหาประสิทธิภาพของชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป ดังนี้

ครั้งที่ 1 การทดลองรายบุคคล เป็นขั้นหาข้อบกพร่องของชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปโดยทดลองกับกลุ่มที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 3 คน เพื่อหาข้อบกพร่องของระบบฯ และนำข้อบกพร่องมาปรับปรุงแก้ไขก่อนนำไปทดลองใช้ขั้นต่อไป

ครั้งที่ 2 การทดลองกลุ่มเล็ก เป็นขั้นหาแนวโน้มของประสิทธิภาพของชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปโดยทดลองกับกลุ่มที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 9 คน เพื่อทดลองหาประสิทธิภาพของชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปโดยใช้แบบทดสอบของกระบวนการเรียนปฏิบัติ (E_1) และประสิทธิภาพของผลลัพธ์ (E_2) และหาข้อบกพร่องของระบบฯ และนำข้อบกพร่องมาปรับปรุงแก้ไขก่อนนำไปทดลองในขั้นตอนต่อไป

ครั้งที่ 3 การทดลองภาคสนาม เป็นขั้นหาประสิทธิภาพของชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปโดยทดลองกับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 1 ห้อง เพื่อทำการหาประสิทธิภาพของชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปโดยใช้แบบทดสอบของกระบวนการเรียนปฏิบัติ (E_1) และประสิทธิภาพของผลลัพธ์ (E_2)

3.3 แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรายวิชาวิศวกรรมสายอากาศ

1. วิเคราะห์จุดประสงค์การสอนและสร้างตารางวิเคราะห์ข้อสอบ
2. สร้างแบบทดสอบแบบปรนัยชนิด 4 ตัวเลือก จำนวน 30 ข้อ
3. นำแบบทดสอบเสนอผู้เชี่ยวชาญตรวจพิจารณาด้านเนื้อหาเพื่อประเมินความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity)
4. นำแบบทดสอบมาปรับปรุงแก้ไขตามที่ผู้เชี่ยวชาญเสนอแนะ
5. นำแบบทดสอบไปทดลองใช้กับผู้เรียนที่เคยเรียนเรื่องการวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศไดโพลมาแล้ว จำนวน 13 คน เพื่อประเมินค่าความยากง่าย ค่าอำนาจจำแนก และค่าความเชื่อมั่นของแบบทดสอบ

ผลการประเมินค่าความยากง่าย ค่าอำนาจจำแนก และค่าความเชื่อมั่นของแบบทดสอบ พบว่า ค่าความยากง่ายอยู่ระหว่าง 0.54 – 0.77 ค่าอำนาจจำแนกอยู่ระหว่าง 0.23 – 0.54 และค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 83.52 % แสดงให้เห็นว่าแบบทดสอบมีคุณภาพตามเกณฑ์ที่กำหนด

6. นำแบบทดสอบมาปรับปรุงแก้ไข แล้วไปทดลองใช้กับกลุ่มตัวอย่างต่อไป

4. การดำเนินการทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการทดลองกับกลุ่มตัวอย่างกลุ่มเดียวแบบ One –Group Pretest-Posttest Design ลักษณะการทดลองแบบนี้คือโดยการทำการทดสอบก่อนทำการทดลอง แล้วจึงเอากลุ่มตัวอย่างมาทำการทดลองกับการกระทำที่ต้องการศึกษา เมื่อทำการทดลองแล้วจึงทำการทดสอบอีกครั้ง แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลการทดลองซึ่งสามารถทำได้รวดเร็ว ควบคุมเวลาของกลุ่มได้แน่นอนและประหยัด สามารถอธิบายได้ดังนี้

4.1 ทดสอบพื้นฐานความรู้ (Pre-test) ใช้แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเป็นเครื่องมือในการทดสอบ

4.2 สอนด้วยแผนการสอนและชุดเรียนปฏิบัติการสอนสำเร็จรูปที่พัฒนาขึ้น ซึ่งชุดเรียนปฏิบัติการสอนสำเร็จรูปนี้ได้ผ่านการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญและปรับปรุงแก้ไขแล้วนำไปใช้กับกลุ่มตัวอย่างตามขั้นตอนที่กำหนดไว้

4.3 ทดสอบหลังเรียน (Post-test) เมื่อผู้เรียนผ่านการเรียนครบบทเรียนแล้ว ทำการทดสอบผลการเรียนอีกครั้งด้วยแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ซึ่งเป็นแบบทดสอบฉบับเดียวกับแบบทดสอบก่อนเรียน

4.4 ประเมินความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษา ใช้แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเดียวกับการทดสอบหลังเรียน ภายหลังเสร็จสิ้นการเรียนจากบทเรียน 7 วัน และ 30 วัน ตามลำดับ โดยใช้หลักเกณฑ์การวัดความคงทนของการสอนดังนี้

- ความคงทนหลังเรียนแล้ว 7 วัน มีความคงทน 90 %
- ความคงทนหลังเรียนแล้ว 30 วัน มีความคงทน 75 %

5. การวิเคราะห์ข้อมูลและสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

5.1 การหาค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างวัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมกับข้อสอบ (Index of Consistency)

$$IOC = \frac{\sum R}{N}$$

เมื่อ IOC = ดัชนีความสอดคล้อง

$\sum R$ = ผลรวมของการพิจารณาของผู้เชี่ยวชาญ

N = จำนวนผู้เชี่ยวชาญ

5.2 การหาค่าความยากง่าย (Difficulty) ของแบบทดสอบ

$$P = \frac{R}{N}$$

เมื่อ P แทน ค่าความยากง่ายของข้อสอบ

R แทน จำนวนนักเรียนที่ตอบถูก

N แทน จำนวนผู้ตอบข้อสอบทั้งหมด

5.3 การหาค่าอำนาจจำแนก (Discrimination) ของแบบทดสอบโดยใช้สูตรการหาค่าดัชนีอำนาจจำแนกของแบบทดสอบ

$$B = \frac{R_u - R_l}{N}$$

เมื่อ B แทน ค่าอำนาจจำแนก

R_u แทน จำนวนคนที่ทำข้อสอบข้อนั้นถูกของกลุ่มสูง

R_l แทน จำนวนคนที่ทำข้อสอบข้อนั้นถูกของกลุ่มต่ำ

N แทน จำนวนคนทั้งหมด

5.4 การหาค่าเฉลี่ย

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{N}$$

เมื่อ	$\bar{x}$	แทน	ค่าเฉลี่ย
	$\sum x$	แทน	ผลรวมคะแนนทั้งหมดในกลุ่ม
	N	แทน	จำนวนคะแนนในกลุ่ม

5.5 การหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$S.D. = \sqrt{\frac{N\sum x^2 - (\sum x)^2}{N(N-1)}}$$

เมื่อ	$S.D.$	แทน	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	x	แทน	คะแนนแต่ละตัว
	$\bar{x}$	แทน	ค่าเฉลี่ย
	N	แทน	จำนวนคะแนนในกลุ่ม
	Σ	แทน	ผลรวม

5.6 การหาค่าความเชื่อมั่น (Reliability) ของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนใช้สูตรของโลเวท (Lovett)

$$r_{\propto} = 1 - \frac{k\sum x_1 - \sum x_1^2}{(k-1)(x_1 - C)^2}$$

เมื่อ	$r_{\propto}$	แทน	ความเชื่อมั่นของแบบทดสอบ
	k	แทน	จำนวนข้อสอบ
	x_1	แทน	คะแนนของแต่ละคน
	C	แทน	คะแนนเกณฑ์หรือจุดตัดของแบบทดสอบ

5.7 สถิติ t-test สำหรับทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของคะแนนทดสอบก่อนเรียนและคะแนนทดสอบหลังเรียน

$$t = \frac{\sum D}{\sqrt{\frac{N\sum D^2 - (\sum D)^2}{N-1}}} ; df = N - 1$$

เมื่อ

t แทน ค่าสถิติที่ใช้

D แทน ค่าผลต่างระหว่างคู่คะแนน

N แทน จำนวนกลุ่มตัวอย่างหรือจำนวนคู่คะแนน

5.8 การหาประสิทธิภาพของชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป

$$E_1 = \frac{\frac{\sum x}{N}}{A} \times 100$$

เมื่อ E_1 แทน ประสิทธิภาพของกระบวนการ

$\sum x$ แทน คะแนนรวมของนักศึกษาทุกคนที่ตอบกิจกรรมในแต่ละบทเรียน

A แทน คะแนนเต็มของกิจกรรมในแต่ละบทเรียน

N แทน จำนวนผู้เรียนทั้งหมด

$$E_2 = \frac{\frac{\sum f}{N}}{B} \times 100$$

เมื่อ E_2 แทน ประสิทธิภาพของผลลัพธ์

$\sum f$ แทน คะแนนรวมของนักศึกษาทุกคนที่ตอบแบบทดสอบท้ายบทเรียน

B แทน คะแนนเต็มของแบบทดสอบท้ายบทเรียน

N แทน จำนวนผู้เรียนทั้งหมด

5.9 การประเมินความคงทนในการเรียนรู้ ใช้การวิเคราะห์ค่าร้อยละเฉลี่ยของคะแนนที่แตกต่างกันของแต่ละคนที่ได้จากการสอบหลังเรียนเมื่อสิ้นสุดการเรียนและการสอบหลังจากสิ้นสุดการเรียน 7 วัน และสิ้นสุดการเรียน 30 วัน ดังนี้

การประเมินความคงทนครั้งที่ 1 $$\left(\frac{\sum(x-x_1)}{n}\right) * 100 \geq 90\%$$

การประเมินความคงทนครั้งที่ 2 $$\left(\frac{\sum(x-x_1)}{n}\right) * 100 \geq 75\%$$

บทที่ 4
ผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อหาประสิทธิภาพชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป 2) เพื่อหาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป และ 3) เพื่อศึกษาความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา ผลการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

1. ผลการหาประสิทธิภาพชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา

2. ผลการหาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา

3. ผลการศึกษาความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา

1. ผลการหาประสิทธิภาพชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา

การหาประสิทธิภาพชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปที่พัฒนาขึ้นนี้ ทดลองใช้กับกลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ นักเรียนระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 แขนงวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ลงทะเบียนเรียนรายวิชาวิศวกรรมสายอากาศ ภาคการเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2560 จำนวน 15 คน ดังตารางที่ 1 – ตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คะแนนจากการทำแบบฝึกหัดระหว่างเรียน

คนที่	บทเรียนที่ 1 (เต็ม 20 คะแนน)	บทเรียนที่ 2 (เต็ม 20 คะแนน)	บทเรียนที่ 3 (เต็ม 20 คะแนน)
1	17	18	17
2	15	15	18
3	17	17	16
4	18	17	18
5	16	18	15
6	18	18	18
7	19	19	18

คนที่	บทเรียนที่ 1 (เต็ม 20 คะแนน)	บทเรียนที่ 2 (เต็ม 20 คะแนน)	บทเรียนที่ 3 (เต็ม 20 คะแนน)
8	15	16	16
9	18	18	15
10	17	18	18
11	16	15	17
12	18	18	16
13	18	16	18
14	15	18	15
15	17	19	19
รวม	254	260	254
ค่าเฉลี่ยร้อยละ	84.67	86.67	84.67
รวมค่าเฉลี่ยร้อยละ	85.33		

จากตารางที่ 1 คะแนนจากการทำแบบฝึกหัดระหว่างเรียนของนักศึกษาพบว่า มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 85.33 เมื่อพิจารณาคะแนนจากการทำแบบฝึกหัดระหว่างเรียนแต่ละบทเรียน พบว่า บทเรียนที่ 1 มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 84.67 บทเรียนที่ 2 มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 86.67 และบทเรียนที่ 3 มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 84.67 แสดงให้เห็นว่าแต่ละบทเรียนมีค่าเฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 80.00

ตารางที่ 2 คะแนนจากการทำแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนในแต่ละบทเรียน

คนที่	บทเรียนที่ 1		บทเรียนที่ 2		บทเรียนที่ 3	
	ก่อนเรียน	หลังเรียน	ก่อนเรียน	หลังเรียน	ก่อนเรียน	หลังเรียน
1	4	14	5	17	6	17
2	3	16	4	15	4	15
3	6	15	6	17	8	14
4	4	17	7	18	5	17
5	6	14	4	19	3	16
6	5	17	7	15	7	17
7	7	14	3	18	3	18
8	3	18	7	16	6	16
9	6	16	7	17	3	15
10	2	17	9	18	7	15
11	11	16	10	16	6	18

คนที่	บทเรียนที่ 1		บทเรียนที่ 2		บทเรียนที่ 3	
	ก่อนเรียน	หลังเรียน	ก่อนเรียน	หลังเรียน	ก่อนเรียน	หลังเรียน
12	10	16	12	18	8	15
13	6	17	7	14	9	15
14	8	17	8	15	4	17
15	6	15	4	17	5	17
รวม	**87**	**239**	**100**	**250**	**84**	**242**
t-test	4.18413E-14*		8.30671E-14*		1.14866E-16*	
P	0.45		0.71		0.17	

* P > 0.05

จากตารางที่ 2 คะแนนจากการทำแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนในแต่ละบทเรียน เมื่อทำการเปรียบเทียบคะแนนก่อนเรียนและหลังเรียนแต่ละบทเรียน พบว่า ทุกบทเรียนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 3 ผลการหาประสิทธิภาพชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปที่พัฒนาขึ้น

คะแนน	จำนวน (คน)	คะแนนเต็ม	คะแนนที่ทำได้	ค่าเฉลี่ยร้อยละ
ระหว่างเรียน	15	20	256	85.33
หลังเรียน	15	30	393	87.33

จากตารางที่ 3 ผลการหาประสิทธิภาพชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปที่พัฒนาขึ้น พบว่านักศึกษาทำคะแนนระหว่างเรียนได้เฉลี่ยเท่ากับ 256 คิดเป็นร้อยละ 85.33 และคะแนนหลังเรียนได้คะแนนเท่ากับ 393 คิดเป็นร้อยละ 87.33 แสดงให้เห็นว่า ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพล มีประสิทธิภาพเท่ากับ 85.33/87.33 สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ 80/80

2. ผลการหาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา

การหาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป วิเคราะห์จากคะแนนจากการทำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียนของนักศึกษาจากกลุ่มตัวอย่าง ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียนด้วยสถิติ t-test ดังตารางที่ 3 – ตารางที่ 4

ตารางที่ 3 คะแนนจากการทำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียน

คนที่	**ก่อนเรียน (เต็ม 30 คะแนน)**	**หลังเรียน (เต็ม 30 คะแนน)**
1	9	25
2	7	25
3	11	26
4	8	28
5	15	27
6	13	25
7	14	26
8	13	28
9	11	24
10	12	26
11	7	26
12	9	28
13	8	25
14	6	29
15	10	25
รวม	**153**	**393**
ค่าเฉลี่ยร้อยละ	**51.00**	**87.33**

จากตารางที่ 3 คะแนนจากการทำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนเรียนและหลังเรียน พบว่า คะแนนจากการทำแบบทดสอบก่อนเรียนมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 51.00 และคะแนนจากการทำแบบทดสอบหลังเรียมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 87.33

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาระหว่างก่อนเรียนและหลังเรียน

คะแนนทดสอบ	จำนวนกลุ่มตัวอย่าง	คะแนนเต็ม	คะแนนเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	t-test	p
ก่อนเรียน	15	30	10.20	7.74	1.70*	0.22
หลังเรียน	15	30	26.20	2.17		

* P > 0.05

จากตารางที่ 4 การเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาระหว่างก่อนเรียนและหลังเรียน พบว่า คะแนนเฉลี่ยก่อนเรียนมีค่าเท่ากับ 10.20 และคะแนนเฉลี่ยหลังเรียนมีค่าเท่ากับ 26.20 และเมื่อทำการทดสอบค่า t-test มีค่าเท่ากับ 1.70 แสดงให้เห็นว่า คะแนนหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

3. ผลการศึกษาความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา

การศึกษาความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป วิเคราะห์จากการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างร้อยละของผลสอบหลังเรียนเมื่อเสร็จสิ้นการเรียน 7 วัน และเมื่อเสร็จสิ้นการเรียน 30 วัน กับร้อยละของผลสัมฤทธิ์หลังเรียนของนักศึกษากลุ่มตัวอย่าง เพื่อทดสอบความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษา ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ร้อยละของความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพลหลังเรียนเป็นเวลา 7 วัน และ 30 วัน

คนที่	คะแนนแบบทดสอบหลังเรียน		
	คะแนนผลสัมฤทธิ์	7 วัน	30 วัน
1	25	25	19
2	25	24	18
3	26	23	15
4	28	21	21
5	27	25	17
6	25	25	24
7	26	25	20

คนที่	คะแนนแบบทดสอบหลังเรียน		
	คะแนนผลสัมฤทธิ์	**7 วัน**	**30 วัน**
8	28	20	19
9	24	24	17
10	26	27	21
11	26	19	21
12	28	25	21
13	25	27	25
14	29	24	25
15	25	20	20
รวม	**393**	**354**	**303**
ร้อยละ	**87.33**	**78.67**	**67.33**
ความคงทนในการเรียนรู้	**-**	**90.08**	**77.10**

จากตารางที่ 5 ร้อยละของความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพลหลังเรียนเป็นเวลา 7 วัน และ 30 วัน พบว่า ความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติสำเร็จรูปหลังเรียนแล้ว 7 วัน มีค่าเท่ากับ 90.08 และความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติสำเร็จรูปหลังเรียนแล้ว 30 วัน มีค่าเท่ากับ 77.10 แสดงให้เห็นว่า ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปที่พัฒนาขึ้น ทำให้นักศึกษามีความคงทนในการเรียนรู้ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การพัฒนาชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการสอนวิศวกรรมสายอากาศตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อหาประสิทธิภาพชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป 2) เพื่อหาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป และ 3) เพื่อศึกษาความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ นักเรียนระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 แขนงวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ลงทะเบียนเรียนรายวิชาวิศวกรรมสายอากาศ ภาคการเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2559 จำนวน 15 คน ทำการสุ่มกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย คือ ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพล และแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรายวิชาวิศวกรรมสายอากาศ สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าร้อยละ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสถิติ t-test และค่าความคงทนในการเรียนรู้

1. สรุปผลการวิจัย

ผู้วิจัยได้สรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย ดังนี้

1. ผลการหาประสิทธิภาพชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา พบว่า ผลการหาประสิทธิภาพชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปที่พัฒนาขึ้น พบว่า นักศึกษาทำคะแนนระหว่างเรียนได้เฉลี่ยเท่ากับ 256 คิดเป็นร้อยละ 85.33 และคะแนนหลังเรียนได้คะแนนเท่ากับ 393 คิดเป็นร้อยละ 87.33 แสดงให้เห็นว่าชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพล มีประสิทธิภาพเท่ากับ 85.33/87.33 สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ 80/80

2. ผลการหาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา พบว่า การเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาระหว่างก่อนเรียนและหลังเรียน มีคะแนนเฉลี่ยก่อนเรียนมีค่าเท่ากับ 10.20 และคะแนนเฉลี่ยหลังเรียนมีค่าเท่ากับ 26.20 และเมื่อทำการทดสอบค่า t-test มีค่าเท่ากับ 1.70 แสดงให้เห็นว่า คะแนนหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

3. ผลการศึกษาความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา พบว่า ร้อยละของความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียน

ปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพลหลังเรียนเป็นเวลา 7 วัน และ 30 วัน มีความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติสำเร็จรูปหลังเรียนแล้ว 7 วัน มีค่าเท่ากับ 90.08 และความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติสำเร็จรูปหลังเรียนแล้ว 30 วัน มีค่าเท่ากับ 77.10 แสดงให้เห็นว่า ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปที่พัฒนาขึ้น ทำให้นักศึกษามีความคงทนในการเรียนรู้ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้

2. อภิปรายผล

การวิจัยเรื่องชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการสอนวิศวกรรมสายอากาศตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา สามารถสรุปประเด็นสำคัญ ได้ดังนี้

1. การหาประสิทธิภาพชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา พบว่า ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพล มีประสิทธิภาพเท่ากับ 85.33/87.33 สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ 80/80 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปที่พัฒนาขึ้นมีการวิเคราะห์จากคำอธิบายรายวิชา มีกำหนดวัตถุประสงค์อย่างละเอียด วางแผนการเรียนรู้สำหรับผู้เรียนแต่ละบุคคลและแต่ละกลุ่มชี้แจงให้ผู้เรียนเข้าใจถึงจุดมุ่งหมายในการเรียนรู้และกฎระเบียบต่างๆ ผู้เรียนดำเนินการเรียนรู้ตามแผนที่จัดไว้และมีการประเมินผลตามวัตถุประสงค์ อีกทั้งยังมีการติดตามความก้าวหน้าของผู้เรียน (พงศ์ธารา วิจิตเวชไพศาล, 2551) สอดคล้องกับงานวิจัยของพิสิฐ สอนละ และคณะ (2559) ที่ได้ทำการวิจัยเรื่องการพัฒนาชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม มีวัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม ผลการวิจัยพบว่า ชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพเท่ากับ 80.44/80.00 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้ร้อยละ 80/80 แสดงให้เห็นว่า ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพล ที่พัฒนาขึ้น สอดคล้องกับหลักการเรียนเพื่อรอบรู้มาพัฒนาขั้นตอนการสอน 5 ขั้น ได้แก่ ขั้นการรับรู้ ขั้นเกิดความคล่องตัว ขั้นเกิดความคงทน ขั้นนำไปประยุกต์ใช้ ขั้นปรับใช้ให้ถูกกับสถานการณ์ (ทิศนา แขมมณี, 2554)

2. การหาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา พบว่า คะแนนหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปมีการเรียงลำดับจากง่ายไปหายาก และมีตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้งาน จึงทำให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ตามเป้าหมายโดยให้ผู้เรียนได้รับประสบการณ์ที่จำเป็นต่อการเรียนรู้ก่อน และให้ผู้เรียนสังเกต ทบทวนสิ่งที่เกิดขึ้นและนำสิ่งนั้นมาพิจารณาไตร่ตรองจนเกิดความคิดรวบยอดหรือสมมติฐาน แล้วนำไปทดลองหรือประยุกต์ใช้ในสถานการณ์ใหม่ต่อไปได้ (ทิศนา แขมมณี, 2554) สอดคล้องกับพระราชบัญญัติการศึกษาแห่งชาติ พ.ศ. 2542 และที่แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2545 และมาตราฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา ได้กำหนดแนวการจัดการศึกษาที่คาดหวังเกี่ยวกับ

การเรียนรู้ของผู้เรียน ครอบคลุมอย่างน้อย 5 ด้าน คือ ด้านคุณธรรมจริยธรรม ด้านความรู้ ด้านทักษะทางปัญญา ด้านทักษะความสัมพันธ์ระหว่างบุคคลและความรับผิดชอบ และด้านทักษะการวิเคราะห์เชิงตัวเลขการสื่อสารและการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ ต้องการเน้นให้ผู้เรียนเกิดคุณลักษณะที่พึงประสงค์ มีความคิดริเริ่มในการแก้ไขปัญหา และข้อโต้แย้งทั้งในสถานการณ์ส่วนบุคคลและของกลุ่มโดยการแสดงออกซึ่งภาวะผู้นำในการแสวงหาทางเลือกใหม่ที่เหมาะสมไปปฏิบัติได้ สามารถประยุกต์ความเข้าใจอันถ่องแท้ในทฤษฎีและระเบียบวิธีการศึกษาค้นคว้าในสาขาวิชาของตนเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาและข้อโต้แย้งในสถานการณ์อื่น ๆ (สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา, 2552) สอดคล้องกับงานวิจัยของ ฉวีวรรณ แก้วไทรฮะ (2555) ได้ทำการวิจัยเรื่องการใช้ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab ในการศึกษาภาษาอังกฤษ เพื่อการสื่อความหมายทางเรขาคณิต มีวัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อศึกษาผลสัมฤทธิ์ของครู คณิตศาสตร์ที่ใช้ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab ศึกษาภาษาอังกฤษเพื่อการเรียนรู้ การสื่อความหมายทางเรขาคณิต ที่สร้างขึ้น ผลการวิจัยพบว่า ครูคณิตศาสตร์ที่เป็นกลุ่มตัวอย่างมีผลสัมฤทธิ์ทางการศึกษาภาษาอังกฤษเพื่อการเรียนรู้การสื่อความหมายทางเรขาคณิตสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ 0.05

3. การศึกษาความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา พบว่า นักศึกษามีความคงทนในการเรียนรู้ที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การวิเคราะห์คุณสมบัติและออกแบบสายอากาศแบบไดโพลหลังเรียนเป็นเวลา 7 วัน และ 30 วัน และมีความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติสำเร็จรูปหลังเรียนแล้ว 7 วัน มีค่าเท่ากับ 90.08 และความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติสำเร็จรูปหลังเรียนแล้ว 30 วัน มีค่าเท่ากับ 77.10 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าชุดเรียนปฏิบัติสำเร็จรูปส่งเสริมให้ผู้เรียนพัฒนาตนเองตามความแตกต่างระหว่างบุคคลและเกิดการเรียนรู้จากการฝึกปฏิบัติ ผู้เรียนจึงมีโอกาสได้ใช้เทคโนโลยีในการเรียนรู้ทำให้เกิดความคงทนในการเรียนรู้เป็นไปตามทฤษฎีการเรียนรู้จากประสบการณ์ และสอดคล้องกับงานวิจัยของฉวีวรรณ แก้วไทรฮะ (2553) ได้ทำวิจัยเรื่องการพัฒนาชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab เรื่อง การวิเคราะห์ข้อมูลในรายวิชาการคิดสร้างสรรค์และการตัดสินใจ สำหรับนักศึกษาชั้นปีที่ 1 วิทยาลัยนานาชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อวัดความคงทนในการเรียนรู้ของนักศึกษาที่เรียนชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab ที่สร้างขึ้น ผลการวิจัยพบว่า นักศึกษามีความคงทนในการเรียนรู้ ระหว่างร้อยละ 84.36 และ ร้อยละ 89.9 และสอดคล้องกับงานวิจัยของฉวีวรรณ แก้วไทรฮะ (2555) ได้ทำการวิจัยเรื่องการใช้ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab ในการศึกษาภาษาอังกฤษ เพื่อการสื่อความหมายทางเรขาคณิต มีวัตถุประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาความคงทนในการเรียนรู้ของครูคณิตศาสตร์ที่ใช้ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab ศึกษาภาษาอังกฤษเพื่อการเรียนรู้ การสื่อความหมายทางเรขาคณิตที่สร้างขึ้น ผลการวิจัยพบว่า ครูคณิตศาสตร์ที่เป็นกลุ่มตัวอย่างมีความคงทนในการเรียนรู้ระหว่างร้อยละ 88.61 และร้อยละ 81.23

3. ข้อเสนอแนะ

3.1 ข้อเสนอแนะทั่วไป

1. ผู้สอนควรพัฒนาบทเรียนให้มีการประยุกต์ใช้งานเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้นักศึกษาสามารถเข้าใจได้อย่างชัดเจน

2. ควรชี้แจงและทำข้อตกลงของการเรียนให้ชัดเจน และไม่นำคะแนนจากการเรียนมาเป็นคะแนนตัดสินผลการเรียนของผู้เรียน

3. ควรมีการกำหนดวัตถุประสงค์ให้ครบทั้ง 3 ด้าน ได้แก่ ด้านพุทธิพิสัย ด้านทักษะพิสัย และด้านจิตพิสัย เพื่อสอดคล้องกับมาตรฐานคุณวุฒิอย่างชัดเจน

3.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนด้วยชุดเรียนปฏิบัติสำเร็จรูปกับการเรียนด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อเป็นการกระตุ้นสิ่งเร้าให้เกิดการเรียนรู้ต่อไป

2. ควรทำการพัฒนาบทเรียนผ่านเครือข่ายอินเตอร์เน็ตหรือสังคมออนไลน์ เพื่อติดตามความก้าวหน้าของผู้เรียนได้ด้วยทันที

3. ควรบูรณาการชุดเรียนปฏิบัติสำเร็จรูปกับวิธีการสอนแบบต่าง ๆ เพื่อเน้นผู้เรียนเป็นสำคัญและเน้นความแตกต่างระหว่างบุคคล

บรรณานุกรม

คฑาวุธ ชุมขวัญ. 2552. **การสร้างและทดสอบประสิทธิภาพชุดการสอนโดยใช้สื่อประสม เรื่องเครื่องส่งวิทยุ วิชาเครื่องส่งวิทยุและสายอากาศ หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ พุทธศักราช 2545 (ปรับปรุง พ.ศ. 2546) สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา.** วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

จงรัก สามารถ และคณะ. 2556. การพัฒนาโปรแกรมจำลองวงจรกรองความถี่สำหรับประยุกต์ใช้ในการศึกษาด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม. **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**. ฉบับที่ 3 ปีที่ 23 (ก.ย. – ธ.ค. 2556). หน้า 580-593.

ฉวีวรรณ แก้วไทรฮะ. 2555. **การใช้ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป PI_Lab ในการศึกษาภาษาอังกฤษ เพื่อการสื่อความหมายทางเรขาคณิต**. รายงานการวิจัย. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.

________. 2553. **การพัฒนาชุดเรียนปฏิบัติการสาเร็จรูป PI_Lab เรื่อง การวิเคราะห์ข้อมูลในรายวิชาการคิดสร้างสรรค์และการตัดสินใจ สาหรับนักศึกษาชั้นปีที่ 1 วิทยาลัยนานาชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา**. รายงานการวิจัย. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.

ดุสิต ขาวเหลือง. 2549. การบูรณาการใช้สื่อประสมและใช้สื่อหลายมิติเพื่อการสอนและการเรียนรู้. **วารสารศึกษาศาสตร์**. ฉบับที่ 1 ปีที่ 18 (มิ.ย. – ต.ค. 2549). หน้า 29-44.

ทิศนา แขมมณี. 2553. **กรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา : กลยุทธ์การสอน**. รายงานการประชุมสำนักธรรมศาสตร์และการเมือง. กรุงเทพมหานคร: ราชบัณฑิตยสถาน.

________. 2554. **ศาสตร์การสอนองค์ความรู้เพื่อการจัดกระบวนการเรียนรู้ที่มีประสิทธิภาพ.** กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า119-146.

พงศ์ธารา วิจิตเวชไพศาล. 2551. การเรียนแบบรอบรู้. **วารสารศึกษาศาสตร์**. ฉบับที่ 1 ปีที่ 19 (ต.ค. 2550 – ม.ค. 2551). หน้า 17-30.

วิมล อยู่พิพัฒน์. 2551. **การพัฒนาชุดเรียนปฏิบัติการโดยใช้โปรแกรม GSP (GEOMETER'S SKETCHPAD) ที่เน้นทักษะการเชื่อมโยง เรื่องการวัด สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2.** ปริญญานิพนธ์หลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาการมัธยมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

พิสิฐ สอนละ และคณะ. 2559. **การพัฒนาชุดสื่อประสมเรื่องสายอากาศไมโครสตริปสำหรับการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม**. รายงานการวิจัย งบประมาณเงินรายได้คณะ. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

บรรณานุกรม (ต่อ)

ระพินทร์ โพธิ์ศรี. 2550. **การสร้างชุดกิจกรรมการจัดการเรียนรู้.** อุตรดิตถ์: คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์.

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา. 2552. **กรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษาแห่งชาติ พ.ศ. 2552** (Thai Qualifications Framework for Higher Education). เอกสารประกอบการประชุมเชิงปฏิบัติ เรื่อง "กรอบมาตรฐานคุณวุฒิ : การพัฒนารายละเอียดของหลักสูตรและรายวิชาให้มีคุณภาพ" วันที่ 30 กันยายน – 2 ตุลาคม 2552 ณ โรงแรมเรดิสัน กรุงเทพมหานคร.

อนุรักษ์ เมฆะโยม และคณะ. 2553. **สภาพการเรียนการสอนด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม กรณีศึกษาเรื่องระบบการสื่อสารดิจิตอล หลักสูตรระดับปริญญาตรี.** การประชุมวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรมระดับชาติ ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

รายนามชื่อผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบเครื่องมือการวิจัย

รายนามชื่อผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบเครื่องมือการวิจัย

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัฒนา ผลทวี
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรวรรณ ชลวาสิน
3. ดร.ชยานิษฐ์ บุญสนิท

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อสอบกับวัตถุประสงค์

ผลการวิเคราะห์ค่าความยากง่าย และค่าอำนาจจำแนกของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

ตารางที่ ข.1 ค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อสอบกับวัตถุประสงค์

ข้อ	คนที่			รวม	IOC	แปลผล
	1	2	3			
1	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
2	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
3	1	1	0	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
4	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
5	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
6	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
7	-1	1	1	1	0.33	ปรับปรุง**
8	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
9	-1	1	1	1	0.33	ปรับปรุง**
10	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
11	-1	1	1	1	0.33	ปรับปรุง**
12	1	1	0	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
13	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
14	1	0	1	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
15	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
16	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
17	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
18	1	1	0	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
19	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
20	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
21	1	1	0	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
22	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
23	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
24	-1	1	1	1	0.33	ปรับปรุง**
25	1	1	0	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
26	-1	1	1	1	0.33	ปรับปรุง**
27	-1	1	1	1	0.33	ปรับปรุง**
28	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
29	-1	1	1	1	0.33	ปรับปรุง**
30	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
31	1	1	0	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
32	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้

ข้อ	คนที่			รวม	IOC	แปลผล
	1	2	3			
33	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
34	1	1	0	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
35	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
36	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
37	1	1	0	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
38	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
39	1	0	1	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
40	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
41	1	0	1	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
42	1	1	0	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
43	1	0	1	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
44	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
45	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
46	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
47	1	0	1	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
48	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้
49	1	1	0	2	0.66	ใช้ได้/ปรับปรุง*
50	1	1	1	3	1.00	ใช้ได้

หมายเหตุ

ใช้ได้/ปรับปรุง* หมายถึง ข้อคำถามนั้นใช้ได้และมีการปรับปรุงตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ เพื่อให้ข้อคำถามมีความสมบูรณ์มากขึ้น

ปรับปรุง** หมายถึง ข้อคำถามนั้นมีการปรับปรุงให้มีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์และทำการตรวจสอบอีกครั้งจากผู้เชี่ยวชาญ

ตารางที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความยากง่าย และค่าอำนาจจำแนกของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

ข้อ	ค่าความยากง่าย	ค่าอำนาจจำแนก
1	0.62	0.23
2	0.54	0.08
3	0.62	0.23
4	0.69	0.38
5	0.69	0.38
6	0.69	0.38
7	0.85	0.69
8	0.62	0.23
9	0.85	0.69
10	0.69	0.38
11	0.77	0.54
12	0.77	0.54
13	0.69	0.38
14	0.69	0.38
15	0.85	0.69
16	0.54	0.08
17	0.85	0.69
18	0.85	0.69
19	0.69	0.38
20	0.85	0.69
21	0.69	0.38
22	0.77	0.54
23	0.69	0.38
24	0.85	0.69
25	0.77	0.54
26	0.69	0.38
27	0.85	0.69
28	0.69	0.38
29	0.77	0.54
30	0.85	0.69
31	0.54	0.08
32	0.77	0.54

ข้อ	ค่าความยากง่าย	ค่าอำนาจจำแนก
33	0.85	0.69
34	0.85	0.69
35	0.69	0.38
36	0.85	0.69
37	0.69	0.38
38	0.77	0.54
39	0.85	0.69
40	0.46	-0.08
41	0.85	0.69
42	0.62	0.23
43	0.85	0.69
44	0.85	0.69
45	0.77	0.54
46	0.77	0.54
47	0.77	0.54
48	0.77	0.54
49	0.77	0.54
50	0.77	0.54

ผู้วิจัยต้องการแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน จำนวน 30 ข้อ จึงทำการตัดข้อที่ไม่ตรงเกณฑ์ที่กำหนด ได้แก่ ข้อ 2,5,9,15,17,18,20,24,27,30,31,33,34,36,39,41,43,44,49,50

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองใช้กับนักศึกษา

ตารางที่ ค.1 คะแนนการทำแบบฝึกหัดในแต่ละบทเรียน

คนที่	บทเรียนที่ 1 (เต็ม 20 คะแนน)	บทเรียนที่ 2 (เต็ม 20 คะแนน)	บทเรียนที่ 3 (เต็ม 20 คะแนน)
1	17	18	17
2	15	15	18
3	17	17	16
4	18	17	18
5	16	18	15
6	18	18	18
7	19	19	18
8	15	16	16
9	18	18	15
10	17	18	18
11	16	15	17
12	18	18	16
13	18	16	18
14	15	18	15
15	17	19	19
รวม	254	260	254
ค่าเฉลี่ยร้อยละ	84.67	86.67	84.67
รวมค่าเฉลี่ยร้อยละ	85.33		

ตารางที่ ค.2 คะแนนการทำแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนของแต่ละบทเรียน

คนที่	**บทเรียนที่ 1**		**บทเรียนที่ 2**		**บทเรียนที่ 3**	
	ก่อนเรียน	**หลังเรียน**	**ก่อนเรียน**	**หลังเรียน**	**ก่อนเรียน**	**หลังเรียน**
1	4	14	5	17	6	17
2	3	16	4	15	4	15
3	6	15	6	17	8	14
4	4	17	7	18	5	17
5	6	14	4	19	3	16
6	5	17	7	15	7	17
7	7	14	3	18	3	18
8	3	18	7	16	6	16
9	6	16	7	17	3	15
10	2	17	9	18	7	15
11	11	16	10	16	6	18
12	10	16	12	18	8	15
13	6	17	7	14	9	15
14	8	17	8	15	4	17
15	6	15	4	17	5	17
รวม	**87**	**239**	**100**	**250**	**84**	**242**
t-test	4.18413E-14		8.30671E-14		1.14866E-16	

ตารางที่ ค.3 คะแนนการทำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ก่อนเรียนและหลังเรียน

คนที่	ก่อนเรียน (เต็ม 30 คะแนน)	หลังเรียน (เต็ม 30 คะแนน)
1	9	25
2	7	25
3	11	26
4	8	28
5	15	27
6	13	25
7	14	26
8	13	28
9	11	24
10	12	26
11	7	26
12	9	28
13	8	25
14	6	29
15	10	25
รวม	**153**	**393**
ค่าเฉลี่ยร้อยละ	**51.00**	**87.33**
t-test	6.18663E-18	

ตารางที่ ค.4 คะแนนความคงทนในการเรียนรู้ หลัง 7 วัน และ 30 วัน

คนที่	**การทดสอบหลังเรียน**		
	ทันที	**7 วัน**	**30 วัน**
1	25	25	19
2	25	24	18
3	26	23	15
4	28	21	21
5	27	25	17
6	25	25	24
7	26	25	20
8	28	20	19
9	24	24	17
10	26	27	21
11	26	19	21
12	28	25	21
13	25	27	25
14	29	24	25
15	25	20	20
รวม	**393**	**354**	**303**
ร้อยละ	**87.33**	**78.67**	**67.33**
ความคงทน	**-**	**90.08**	**77.10**

ภาคผนวก ง

แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

<u>**คำชี้แจง**</u> **1. แบบทดสอบมีทั้งหมด 30 ข้อ**

2. จงเลือกคำตอบที่ถูกที่สุดเพียงข้อเดียวโดยทำเครื่องหมาย ✕ ลงในกระดาษคำตอบ

3. อนุญาตให้เปิดเอกสารและใช้เครื่องคำนวณได้

1. สนามในบริเวณสนามไกล (far-field region) มีลักษณะอย่างไร
   - ก. สนามไม่แผ่ออก
   - ข. แบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง
   - ค. แบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง
   - ง. สนามสะท้อนกลับหมด

2. ข้อใดไม่เป็นบริเวณสนามรอบสายอากาศ
   - ก. บริเวณสนามใกล้รีแอกทีฟ (reactive near-field region)
   - ข. บริเวณสนามใกล้แผ่คลื่น (radiating near-field region)
   - ค. บริเวณสนามไกล (far-field region)
   - ง. บริเวณสนามไกลรีแอกทีฟ (reactive far-field region)

3. สายอากาศในข้อใดเป็นสายอากาศที่ดีที่สุด
   - ก. สายอากาศซึ่งเหมาะสมกับงานที่ใช้
   - ข. สายอากาศราคาแพงมาก
   - ค. สายอากาศที่มีอัตราขยาย(gain)สูงมาก
   - ง. สายอากาศที่สร้างได้โดยง่าย

4. การเลือกใช้สายอากาศให้เหมาะกับงานต้องพิจารณาคุณสมบัติใดบ้าง
   - ก. แบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern)
   - ข. อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (input impedance)
   - ค. กำลังงานที่รองรับได้ (power handling capability)
   - ง. ถูกทุกข้อ

5. สายอากาศในข้อใดถือว่ามีขนาดทางไฟฟ้าใหญ่ที่สุด
   - ก. สายอากาศไดโพล (dipole antenna) ยาว 10 เมตร ใช้งานความถี่ 3 เมกะเฮิรตซ์
   - ข. สายอากาศไดโพล (dipole antenna) ยาว 10 เมตร ใช้งานความถี่ 1.5 เมกะเฮิรตซ์
   - ค. สายอากาศสะท้อนคลื่น(reflector antenna)เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เมตรใช้งานความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์
   - ง. สายอากาศสะท้อนคลื่น (reflector antenna) เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตรใช้งานความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์

6. ระบบสื่อสารไร้สายสำหรับความถี่ 2.3 กิกะเฮิรตซ์ มีเครื่องส่งจ่ายกำลังงาน 2 วัตต์ ส่งสัญญาณไปยังเครื่องรับซึ่งอยู่ห่างออกไป 1,300 เมตร ถ้าภาครับสัญญาณต้องการกำลังงานอย่างน้อย -60 dBm ในระบบนี้จะต้องใช้สายอากาศที่มีอัตราขยาย (gain) อย่างน้อยที่สุดกี่ dBi เมื่อใช้สายอากาศตัวส่ง

และรับไร้การสะท้อนเหมือนกัน และถือว่าไม่มีการสูญเสียในสายนำสัญญาณ กำหนดให้ตัวประกอบการสูญเสียการโพลาไรซ์(PLF) เท่ากับ 1

ก. 4.5 dBi

ข. 10.0 dBi

ค. 14.5 dBi

ง. 20.0 dBi

7. โดยปกติทฤษฎีบทภาวะย้อนกลับ (reciprocity theorem) เพื่อประโยชน์อะไร

ก. การวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน

ข. การออกแบบสายอากาศยากิ-อุดะ

ค. การออกแบบวงจรป้อนสายอากาศ

ง. ถูกทุกข้อ

8. โดยปกติถ้าสายอากาศมีอุณหภูมิสูงจะมีผลอย่างไร

ก. ส่งคลื่นได้มาก

ข. ความกว้างแถบกว้างขึ้น

ค. มีสัญญาณรบกวนสูง

ง. ไม่มีข้อใดถูก

9. พื้นที่ประสิทธิผล (effective area) มีค่ามากเมื่อ

ก. ความต้านทานมีค่าสูง

ข. ความต้านทานมีค่าต่ำ

ค. สภาพเจาะจงทิศทาง (directivity) มีค่าสูง

ง. สภาพเจาะจงทิศทาง (directivity) มีค่าต่ำ

10. สนามการแผ่พลังงาน (radiation field) ของสายอากาศจะหาได้ง่ายที่สุดจากข้อใด

ก. อิมพีแดนซ์ (impedance)

ข. ความหนาแน่นกระแส (current density)

ค. อัตราขยาย (gain)

ง. ประสิทธิภาพการแผ่พลังงาน (radiation efficiency)

11. สนามบริเวณสนามไกล (far-field region) ในข้อใดที่เกิดจากการแผ่พลังงานออกจากสายอากาศ

ก. $E_\theta = j\eta\frac{e^{-jkr}}{2\pi r}\sin\theta$ และ $H_\phi = j\frac{e^{-jkr}}{2\pi r}\sin\theta$

ข. $E_\theta = j\eta\frac{e^{-jkr}}{2\pi r}\sin\theta$ และ $H_\phi = \frac{e^{-jkr}}{2\pi r}\sin\theta$

ค. $E_\theta = \eta\frac{e^{-jkr}}{2\pi r}\sin\theta$ และ $H_\phi = j\frac{e^{-jkr}}{2\pi r}\sin\theta$

ง. ถูกมากกว่า 1 ข้อ

12. สายอากาศของเครื่องส่งและเครื่องรับซึ่งทำงานที่ความถี่ 3 กิกะเฮิรตซ์ มีอัตราขยาย (gain) เท่ากับ 20 dBi อยู่ห่างกันเป็นระยะทาง 1 กิโลเมตร ถ้าเครื่องส่งมีกำลังส่ง 21.76 dB ให้คำนวณหากำลังงานที่ เครื่องรับรับได้ สมมติให้ค่าตัวประกอบการสูญเสียการโพลาไรซ์ (polarization loss factor : *PLF*) เท่ากับ 1

ก. -19.03 dBm

ข. -17.99 dBm

ค. -10.22 dBm

ง. -3.98 dBm

13. จงหาความหนาแน่นกำลัง(power density: W_{av}) ที่ระยะห่างจากสายอากาศเป็นระยะทาง *r* เมื่อความเข้มการแผ่กำลังงาน(radiation intensity:*U*) เป็น $U = B_0 Sin\theta$

ก. $W_{av} = B_o r^2 \sin\theta$

ข. $W_{av} = B_o \dfrac{\sin\theta}{r^2}$

ค. $W_{av} = B_o r \sin\theta$

ง. $W_{av} = B_o \dfrac{\sin\theta}{r}$

14.กำลังงานการแผ่พลังงาน (radiated power) หาได้จากข้อใด

ก. $\frac{1}{2}\oiint_S \mathrm{Re}\left[\bar{E}\times\bar{H}\right]\cdot d\bar{s}$

ข. $\frac{1}{2}\oiint_S \mathrm{Re}\left[\bar{E}\times\bar{H}\right]^*\cdot d\bar{s}$

ค. $\frac{1}{2}\oiint_S \mathrm{Re}\left[\bar{E}^*\times\bar{H}\right]\cdot d\bar{s}$

ง. $\frac{1}{2}\oiint_S \mathrm{Re}\left[\bar{E}\times\bar{H}^*\right]\cdot d\bar{s}$

15. การวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) ของสายอากาศอย่างง่ายโดยให้ผลที่ถูกต้องจะต้องกำหนดระยะระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับอย่างน้อยที่สุดให้อยู่ในบริเวณสนามใด

ก. บริเวณสนามใกล้รีแอกทีฟ (reactive near-field region)

ข. บริเวณสนามใกล้แผ่คลื่น (radiating near-field region)

ค. บริเวณสนามกลาง (intermediate-field region)

ง. บริเวณสนามไกล (far-field region)

16. ในระบบสื่อสาร การเลือกสายอากาศที่เครื่องส่งและเครื่องรับที่มีอัตราขยาย (gain) สูงจะมีผลดีอย่างไร

ก. สามารถสื่อสารได้ระยะทางมากขึ้น

ข. คุณภาพสัญญาณดีขึ้น

ค. ถูกมากกว่า 1 ข้อ

ง. ไม่มีข้อใดถูก

17. สายอากาศไดโพล (dipole antenna) วางเป็นแถวลำดับแบบใด ให้แบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) เป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (omnidirectional)

ก. แถวลำดับด้านต่อด้าน (side by side array)

ข. แถวลำดับระนาบ (planar array)

ค. แถวลำดับร่วมแนว (collinear array)

ง. ไม่มีข้อใดถูก

18. สายอากาศแถวลำดับสม่ำเสมอเชิงเส้น (linear uniform array antenna) จัดเรียงแบบแถวลำดับด้านข้าง (broadside array) ที่ใช้ไดโพลครึ่งคลื่น (half-wave dipole) เป็นองค์ประกอบ (element) จำนวน 10 องค์ประกอบ วางห่างกันเท่ากับ $\lambda/4$ และ $\beta = 0$ เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น และ β เป็นความต่างเฟสระหว่างองค์ประกอบ และให้แบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) เป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (omnidirectional) ให้คำนวณหาสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (maximum directivity) ของสายอากาศนี้

ก. 5 dBi

ข. 7 dBi

ค. 10 dBi

ง. ไม่สามารถหาค่าได้

19. จงหาค่าความถี่ใช้งานที่เกิดการเรโซแนนซ์ของระบบ ที่ประกอบด้วยความจุ (capacitance) 0.5 พิโคฟารัด ซึ่งนำมาต่อขนานกับปลายด้านเข้า (input terminal) ของไดโพลที่ไม่มีการสูญเสีย ที่มีอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเท่ากับ 50+j25.5 โอห์ม

ก. 0.26 กิกะเฮิรตซ์

ข. 2.58 กิกะเฮิรตซ์

ค. 5.16 กิกะเฮิรตซ์

ง. 25.78 กิกะเฮิรตซ์

20. ไดโพลที่ไม่มีการสูญเสียชนิดใด ที่มีค่าอะเพอร์เจอร์ประสิทธิผลสูงสุด (maximum effective aperture) เท่ากับ $0.1307\lambda^2$ เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น โดยสมมติว่าค่าตัวประกอบการสูญเสียการโพลาไรซ์ (polarization loss factor, PLF) ของไดโพลเท่ากับหนึ่ง

ก. ไดโพลหนึ่งในส่วนแปดคลื่น

ข. ไดโพลหนึ่งในส่วนสี่คลื่น (quarter-wave dipole)

ค. ไดโพลครึ่งคลื่น (half-wave dipole)

ง. ไม่มีข้อใดถูก

21. ไดโพลชนิดใด มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (maximum directivity) 0 dBd

ก. ไดโพลหนึ่งในส่วนแปดคลื่น

ข. ไดโพลหนึ่งในส่วนสี่คลื่น (quarter-wave dipole)

ค. ไดโพลครึ่งคลื่น (half-wave dipole)

ง. ไม่มีข้อใดถูก

22. ในการทำสายอากาศแถวลำดับเฟส (phased array antenna) จะปรับเฟส (β)ด้วยสมการ β =*-kd* cos (θ_o)เมื่อ *k* เป็นค่าคงตัวการแพร่กระจาย (propagation constant) *d* เป็นระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ (element) ของแถวลำดับ และ θ_o เป็นทิศทางของลำคลื่นหลัก (main beam) ถ้า β มีค่า –45 องศา อยากทราบว่าควรจัดให้ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบมีค่าเท่าใด จึงจะทำให้ลำคลื่นหลักชี้ในทิศทาง 60 องศาจากแนวการจัดเรียงองค์ประกอบของแถวลำดับ

ก. 0.10λ

ข. 0.25λ

ค. 0.50λ

ง. 0.75λ

23. จงคำนวณหาความยาวประสิทธิผล (effective length) ของไดโพลครึ่งคลื่น (half-wave dipole) เมื่ออยู่ในตำแหน่งที่รับกำลังงานได้สูงสุด

ก. $0.5\lambda/\pi$

ข. λ/π

ค. $1.5\lambda/\pi$

ง. $2\lambda/\pi$

24. จงคำนวณหาความยาวประสิทธิผล (effective length) ของสายอากาศไดโพลขนาดเล็ก (small dipole antenna) ที่มีความยาว 0.1 λ โดยที่ λ เป็นความยาวคลื่น เมื่ออยู่ในตำแหน่งที่รับกำลังงานได้สูงสุด

ก. 0.05 λ

ข. 0.1 λ

ค. 0.5 λ

ง. λ 1

25. ถ้าไดโพลครึ่งคลื่น (half-wave dipole) มีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเท่ากับ 73+j42.5 โอห์ม จงหาค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศโมโนโพล (monopole antenna) ที่มีความยาวหนึ่งส่วนสี่คลื่นและวางเหนือแผ่นตัวนำที่มีขนาดอนันต์

ก. 18.25+j10.625 โอห์ม

ข. 36.50+j21.25 โอห์ม

ค. 73+j42.5 โอห์ม

ง. 146+j85 โอห์ม

26. ถ้าสัญญาณที่ต้องรับมีการโพลาไรซ์แนวนอน (horizontal polarization) ซึ่งขนานกับระนาบ xy เคลื่อนที่เข้ามาทางแกน y จะวางไดโพลครึ่งคลื่น (half-wave dipole) ที่จุดกำเนิด (origin) ให้ขนานกับแกนใดจึงจะรับพลังงานได้มากที่สุด

ก. y

ข. x

ค. z

ง. ถูกมากกว่า 1 ข้อ

27. ข้อใดถูกต้องสำหรับไดโพลครึ่งคลื่น (half-wave dipole)

ก. มีสภาพเจาะจงทิศทาง (directivity) ประมาณ 2dBi

ข. ค่ากระแสจะเกิดขึ้นสูงสุดที่ปลายทั้งสองของสายอากาศ

ค. รีแอกแตนซ์ (reactance) ของสายอากาศเป็นศูนย์ส่วนอิมพีแดนซ์ (impedance) ของสายอากาศเท่ากับ73 โอห์ม

ง. ถูกทุกข้อ

28. สายอากาศชนิดหนึ่งมีอัตราขยาย (gain) เท่ากับ 2.15 dBi ข้อใดคือค่าอัตราขยายที่ถูกต้องในหน่วย dBd

ก. 0

ข. 1.25

ค. 2.15

ง. 4.30

29. ไดโพลครึ่งคลื่น (half-wave dipole) มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (maximum directivity) เท่าใด

ก. -2.15 dBd

ข. 0 dBd

ค. 1.64 dBd

ง. 2.15 dBd

30. ข้อใดไม่ถูกต้องเกี่ยวกับสายอากาศไดโพล (dipole antenna) ที่วางในแนวยืน

ก. มีการโพลาไรซ์แนวยืน (vertical polarization)

ข. มีแบบรูปแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (omnidirectional pattern)

ค. สายอากาศไดโพล (dipole antenna) ที่สั้นกว่าครึ่งความยาวคลื่นมากๆ จะมีอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (input impedance) ต่ำเกินไป

ง. สายอากาศไดโพล (dipole antenna) ที่ยาวกว่าครึ่งความยาวคลื่น จะมีแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) ในแนวตั้งมากกว่าหนึ่งพู (lobe)

เฉลยแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน

ข้อ	ก	ข	ค	ง		ข้อ	ก	ข	ค	ง
1			x			16			x	
2				x		17			x	
3	x					18				x
4				x		19		x		
5				x		20			x	
6	x					21			x	
7	x					22		x		
8			x			23		x		
9			x			24	x			
10		x				25		x		
11	x					26		x		
12			x			27	x			
13		x				28	x			
14				x		29		x		
15				x		30				x

ภาคผนวก จ

ตัวอย่างแผนการสอน ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป

บทเรียนที่ 1 การเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ

แผนการสอน

หน่วยเรียนที่ 1 คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ จำนวน 3 ชั่วโมง
บทเรียน 11 การเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ

จุดประสงค์การสอน

1.1 เข้าใจหลักการเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ

1.1.1 อธิบายคุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศ

1.1.2 คำนวณความยาวทางไฟฟ้า

1.1.3 อธิบายปรากฏการณ์รูปแบบการแพร่คลื่น อัตราขยาย และไดเร็คติวิตี้

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. ขั้นกำหนดปัญหา

อาจารย์นำอภิปรายเรื่องการเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศนักศึกษาร่วมแสดงความรู้ประสบการณ์ และศึกษาใบความรู้เรื่องการเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศและสมาชิกในกลุ่มช่วยกันเลือกประเด็นความรู้ที่ยังคลุมเครือ

2. ขั้นทำความเข้าใจกับปัญหา

นักศึกษาแต่ละกลุ่มร่วมกันอภิปรายประเด็นปัญหาที่ตั้งขึ้น ว่ามีประเด็นใดบ้างที่น่าสนใจและจะหาคำตอบได้จากที่ใด โดยวิธีการใด โดยให้นักศึกษาร่วมกันวางแผนการดำเนินการศึกษาค้นคว้าตามประเด็นปัญหาที่ต้องการศึกษา

3. ขั้นดำเนินการศึกษาค้นคว้า

ประธานกลุ่มแบ่งหน้าที่การศึกษาค้นคว้าให้สมาชิกไปศึกษาค้นคว้าจากแหล่งเรียนรู้ต่าง ๆ ตามความถนัดและความสามารถ เช่น หนังสือจากห้องสมุด วารสาร เว็บไซต์ต่าง ๆ ซึ่งประธานกลุ่มต้องกำหนดเวลาในการค้นคว้าให้ชัดเจนเพื่อการรวบรวมงานได้เร็วขึ้น (ไม่ควรเกิน 1 ชั่วโมง) จากนั้นสมาชิกทุกคนนำความรู้ที่ได้จากแหล่งเรียนรู้ต่าง ๆ มาสรุปและส่งให้เลขานุการกลุ่มดำเนินการสรุปและประชุมเพื่อหาแนวทางเรียนรู้ประเด็นปัญหาให้ชัดเจนมากขึ้น

4. ขั้นสังเคราะห์ความรู้

สมาชิกในกลุ่มนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาค้นคว้ามาแลกเปลี่ยนเรียนรู้กันในกลุ่ม จากนั้นรวมกันพิจารณาความรู้ที่ได้มามีความถูกต้อง สมบูรณ์และครบถ้วนตามประเด็นที่ต้องการศึกษาแล้วหรือไม่ หากยังไม่เพียงพอให้ร่วมกันอภิปรายและศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม

เมื่อได้ข้อมูลที่เพียงพอแล้ว ให้นักศึกษาทำแบบฝึกหัดครั้งที่ 1 เรื่อง การเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ

5. ขั้นสรุปและประเมินค่าคำตอบ

นักศึกษาทุกกลุ่มร่วมกันนำเสนอข้อมูลที่สังเคราะห์ได้ และร่วมกันอภิปรายว่าข้อมูลของแต่ละกลุ่มที่ได้ศึกษาค้นคว้ามาครบถ้วน ถูกต้อง สมบูรณ์หรือไม่ โดยอาจารย์ช่วยตรวจสอบและแนะนำเพิ่มเติม จากนั้นนักศึกษาทุกคนช่วยกันสรุปองค์ความรู้ในภาพรวมของปัญหาอีกครั้ง

6. ขั้นนำเสนอและประเมินผลงาน

นักศึกษาแต่ละกลุ่มร่วมกันออกแบบการสรุปผลการดำเนินการศึกษาค้นคว้าของกลุ่ม เพื่อนำเสนอหน้าห้องเรียนตามรูปแบบที่นักศึกษาสนใจ โดยให้นักศึกษาส่งตัวแทนสมาชิกในกลุ่มออกมานำเสนอผลการดำเนินการศึกษาค้นคว้าและให้นักศึกษาทุกคนร่วมกันประเมินทั้งงานของกลุ่มตนเองและของเพื่อน

สื่อการสอน/อุปกรณ์การสอน

1. ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ
2. กระดานไวท์บอร์ด
3. เครื่องฉายโปรเจ็คเตอร์
4. ข้อมูล/ตัวอย่างจากอินเตอร์เน็ต
5. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น แท็ปเล็ต สมาร์ทโฟน วิทยุ ฯลฯ

การวัดผล

1. การประเมินกระบวนการทำงาน/บทบาทในการทำกิจกรรม
2. การประเมินการบ้าน
3. การเข้าชั้นเรียน/การเข้าร่วมกิจกรรม

หัวข้อบรรยายและเนื้อหาสาระ

ตามชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ โดยมีหัวข้อบรรยาย ดังนี้

1. คุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศ
2. ความยาวทางไฟฟ้า
3. รูปแบบการแพร่คลื่น อัตราขยาย และไดเร็คติวิตี้

แบบฝึกหัด/งานที่ได้รับมอบหมาย

ตามแบบฝึกหัดครั้งที่ 1 เรื่อง การเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ

เฉลยแบบฝึกหัด

ตามเฉลยแบบฝึกหัดครั้งที่ 1 เรื่อง การเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสายอากาศ

2.1 กล่าวนำ

ในระบบสื่อสารวิทยุ หรือระบบกระจายเสียง และสัญญาณโทรทัศน์ มีหลักคล้ายกันอยู่ คือ การมอดดูเลทคลื่นพาหะเข้ากับสัญญาณเดิม เพื่อให้เกิดรูปแบบสัญญาณที่เหมาะในการส่งไปในชั้นบรรยากาศได้ (ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) โดยใช้**สายอากาศส่ง** และในการรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเราใช้**สายอากาศรับ**

ความแตกต่างที่เห็นได้ชัดระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับในการใช้งานจริง ๆ คือ ค่ากำลังคลื่นที่เกี่ยวข้องสายอากาศนั้นต่างกันมาก

ยกตัวอย่างเช่น สายอากาศส่งสามารถกระจายส่งกำลังคลื่นได้ถึงหลายร้อยกิโลวัตต์ในขณะที่สายอากาศรับมีกำลังคลื่นเพียงไม่กี่มิลลิวัตต์ไหลวนอยู่

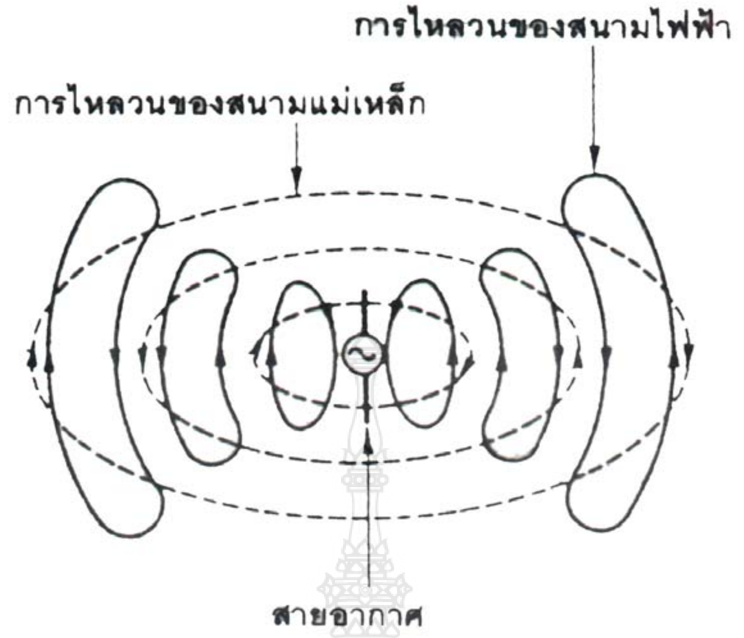
นอกจากนี้สายอากาศส่งต้องมีคุณสมบัติสำคัญคือ แม็ชท์กับสายนำสัญญาณเพื่อให้กำลังงานมากที่สุดผ่านเข้าสายอากาศ ส่วนในสายอากาศรับต้องมีค่าอัตราขยายให้มากที่สุด (รวมทั้งค่าไดเร็คติวิตี้) และมีไซด์โลบน้อยที่สุดด้วย

2.2 การแพร่กระจายสัญญาณจากสายอากาศ

เมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำ จะเกิดสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำที่มีทิศทางตามทิศทางของกระแส ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของกระแสเกิดขึ้น สนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนตามไปด้วยและจากการทดลองพบว่า สนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงจะสร้างสนามไฟฟ้าให้มีขึ้นมา (ซึ่งถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้าจะไม่เกิดขึ้น)

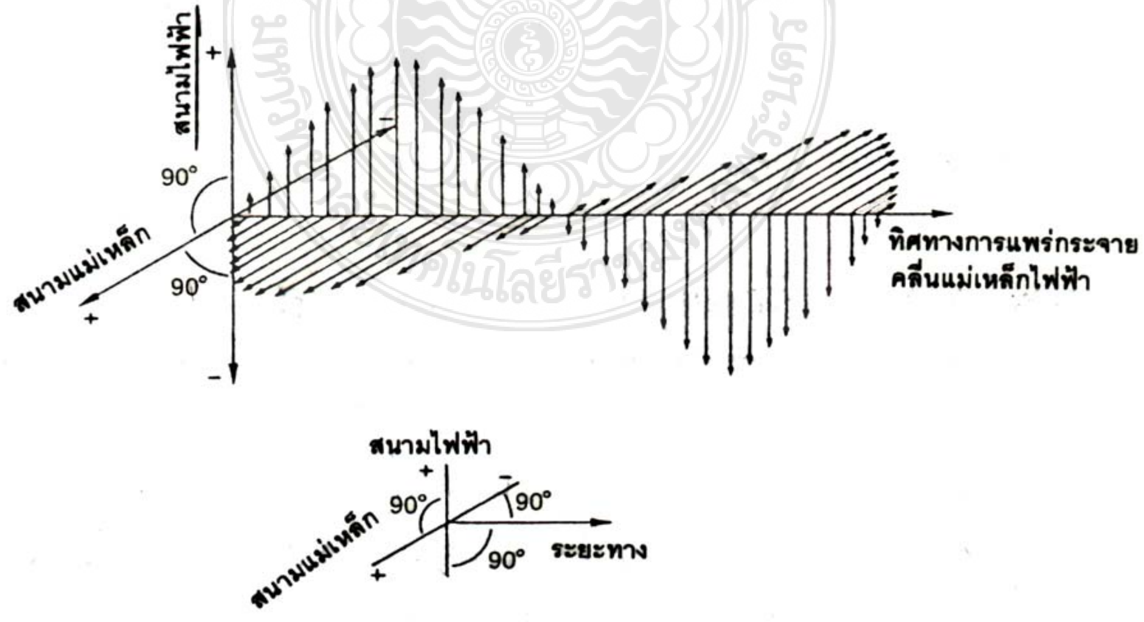
ส่วนทิศทางของสนามไฟฟ้า พิจารณาจากกฎของเลนซ์ (Lenz’s Law) หรือกฎมือขวานั่นเอง ทำนองเดียวกันการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ทำให้พิจารณาได้ว่า ถ้าป้อนกระแสไฟสลับ (A.C.) ผ่านลวดตัวนำจะทำให้เกิดทั้งสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กขึ้น

กำหนดให้ใช้กระแสรูปสัญญาณไซน์ผ่านเข้าลวดตัวนำ พบว่าทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามคลื่นไซน์ด้วย โดยทั้งสองสนามแพร่ออกมาจากลวดตัวนำด้วยความเร็วแสง (ประมาณ 3×10^8 เมตร/วินาที) ดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศ

พลังงานที่แพร่กระจายไปมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มในค่าความถี่ เราเรียกพลังงานส่วนนี้ว่า สนามพลังงานที่แพร่กระจาย ซึ่งอยู่ในรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อวิเคราะห์แล้วพบว่า สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าทำมุมฉากซึ่งกันและกัน รวมทั้งยังทำมุมฉากกับทิศทางการแพร่กระจายดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ระนาบที่มีสนามไฟฟ้าและมีทิศตามการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเรียกว่าระนาบโพลาไรเซชั่นของคลื่น

ตัวอย่างเช่น ถ้าสนามไฟฟ้าอยู่ในระนาบแนวดิ่ง (หรือแนวตั้ง) สนามแม่เหล็กอยู่ในระนาบแนวราบ กล่าวได้ว่าคลื่นมีโพลาไรเซชั่นในแนวดิ่ง

ส่วนคลื่นในโพลาไรเซชั่นแนวดิ่งจะเหนี่ยวนำให้ลวดตัวนำที่อยู่แนวดิ่งเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้น เพราะว่ามีสนามแม่เหล็กตัวผ่านลวดตัวนำ และไม่มีผลต่อลวดตัวนำในแนวราบ

เมื่อวิเคราะห์ถึงภายในสายอากาศพบว่ามีสนามพลังงานเกิดขึ้น 2 อย่างดังนี้

- **สนามพลังเหนี่ยวนำ** แทนพลังงานส่วนที่ไหลอยู่ภายในสายอากาศ และไม่แพร่กระจายออกไป

- **สนามพลังที่แพร่กระจาย** แทนส่วนที่แพร่จากสายอากาศไป ที่มีปริมาณเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ของคลื่น และเป็นสัดส่วนกลับกันของระยะทางที่ไกลจากสายอากาศออกไป พบว่า ในระยะใกล้กับสายอากาศมาก ๆ มีปริมาณของสนามพลังเหนี่ยวนำมากกว่า แต่ที่ระยะทางไกลกว่า $\frac{\lambda}{2\pi}$ จากสายอากาศนั้น ค่าสนามพลังที่แพร่กระจายมีมากกว่า (λ แทนความยาวคลื่นของสัญญาณจากสายอากาศ)

เราแทนขนาดหรือแอมปลิจูดของสนามไฟฟ้า โดยใช้อักษร E

ขนาดหรือแอมปลิจูดของสนามแม่เหล็ก โดยใช้อักษร H

และค่าอัตราส่วนระหว่างความเข้มของสนามไฟฟ้าต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กว่าค่าอิมพีแดนซ์ของภาวะสุญญากาศ คิดจากสูตรคำนวณนี้

$$\frac{E(V/m)}{H(At/m)} = 120\pi = 377\Omega$$

โดยทั่วไป เราหาขนาดของคลื่นวิทยุในเทอมของความเข้มสนามไฟฟ้า

ตัวอย่างการคำนวณ

ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ระยะ 10 กิโลเมตร จากสายอากาศส่งมีค่า 0.053 At/Km ให้คำนวณหาความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ระยะ 50 กิโลเมตร จากสายอากาศส่งในทิศทางเดียวกัน

คำตอบ

จากค่าคงที่ E/H = 377 โอห์ม

จะได้ $E = 377\,H = \frac{377 \times 0.053}{10^{3}} = 20 \quad mV/m$

ที่ 50 km จากสายอากาศ คำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าได้ว่า

E = 20/5 = 4 mV/m

2.3 หลักการของสายอากาศ

สายอากาศจัดเป็นวงจรไฟฟ้าแบบพิเศษได้

ในวงจรไฟฟ้าธรรมดา ขนาดของขดลวด, ตัวเก็บประจุไฟฟ้า และอุปกรณ์อื่น ๆ จะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของค่าความถี่ที่ใช้ และพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่ก็ยังคงอยู่ภายในวงจร เพื่อนำไปใช้งานให้มีประสิทธิภาพหรือแปลงออกมาในรูปความร้อน

แต่ถ้าขนาดของตัวนำหรืออุปกรณ์มีขนาดพอเหมาะ เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นพบว่ามีพลังงานบางส่วนออกไปจากวงจรในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และถ้าวงจรนั้นถูกออกแบบให้พลังงานส่วนใหญ่ของวงจรถูกแพร่ออกไป เราแทนวงจรชนิดนี้ว่าสายอากาศ (antenna)

โดยทั่วไปสายอากาศประกอบด้วยตัวนำในหลายรูปแบบ ส่วนใหญ่แล้วมักใช้ลวดตัวนำ (wire) มีบางแบบที่ใช้แท่งตัวนำ (rod) หรือท่อตัวนำ(rube)

ในบทนี้ความหมายของลวดตัวนำ “wire” หมายถึง ตัวนำชนิดที่มีขนาดของภาคตัดขวางเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาวของมัน

ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกจากลวดตัวนำ มีค่าขึ้นกับความยาวของลวดตัวนำกับขนาดของกระแสที่ไหลอยู่ภายใน นอกจากนี้ยังขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมลวดตัวนำด้วย แต่จะเป็นการสะดวกมากกว่าถ้าเราวัดในรูปของกระแส

อาจกล่าวได้ว่าความเข้มสนามเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของกระแส

ดังนั้นจึงต้องให้มีกระแสในขนาดมาก เท่าที่เป็นไปได้ผ่านลวดตัวนำเพื่อให้เกิดกำลังส่งปริมาณมากขึ้น

ในวงจรทั่วไปจะประกอบด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ ค่าความต้านทานและค่ารีแอ็กแตนซ์ (reactance) เป็นค่าทางเชิงซ้อนของอิมพีแดนซ์ในวงจรกระแสสลับ

พบว่าถ้าค่ารีแอ็กแตนซ์มีน้อยลงจนหมดไป ทำให้ปริมาณกระแสในวงจรมีค่ามากที่สุด หรือในอีกแง่หนึ่งเรียกว่า วงจรรีโซแนนซ์ (resonant) ที่ความถี่ใช้งาน เช่นเดียวกับกรณีของสายอากาศ เมื่อกระแสที่ไหลผ่านมีค่ามากที่สุดทำให้มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุด นั่นคือสายอากาศถูกรีโซแนนซ์

สำหรับวงจรธรรมดาแล้ว ค่าความเหนี่ยวนำ (inductance) มักมีอยู่ในขดลวดหรือคอยล์, ค่าประจุไฟฟ้า (capacitance) มีอยู่ในตัวเก็บประจุ และค่าความต้านทานมีอยู่ในตัวต้านทานเราเรียกวงจรลักษณะนี้ว่า มีค่าคงที่แบบเอกเทศ (lumped constant คือแยกกันไป)

แต่ในสายอากาศค่าความเหนี่ยวนำ, ค่าประจุไฟฟ้า และค่าความต้านทานมีอยู่กระจายผสมไปทั่วลวดตัวนำ เราเรียกวงจรลักษณะนี้ว่ามีค่าคงที่แบบกระจาย (distributed constant) ซึ่งวงจรที่มีค่าคงที่แบบนี้มักใช้ตัวนำที่เป็นเส้นตรง และมักนิยมเรียกกันว่า วงจรลิเนียร์ (linear circuits)

2.4 รีโซแนนซ์ในวงจรลิเนียร์

ขนาดสั้นที่สุดของลวดตัวนำที่รีโซแนนซ์ ที่ความถี่ใช้งานมีค่าเท่ากับความยาวที่เพียงพอให้สนามไฟฟ้า เดินทางจากปลายหนึ่งไปปลายอีกด้าน และกลับมาที่จุดเดิมภายในเวลาหนึ่งไซเคิล

ถ้าความเร็วที่เดินทางมีค่าเท่าความเร็วแสง คือ 299,793,077 เมตร/วินาที (หรือ 983,573,087 ฟุต/วินาที) จะได้ว่าระยะทางเดินทางไปภายในหนึ่งไซเคิลเท่ากับค่าความเร็วหารด้วยความถี่ ดังสูตรคำนวณอย่างประมาณดังนี้

$$\lambda = \frac{299{,}800{,}000}{f(Hz)} \quad \text{(เมตร)}$$

λ (แลมด้า) คือ ความยาวคลื่น

เนื่องจากคลื่นเดินทางในลวดตัวนำ**สองครั้ง** (ไป-กลับ)

ดังนั้นขนาดความยาวของลวดตัวนำ ที่เดินทางได้ระยะทางเท่ากับ λ ในหนึ่งไซเคิล มีค่าเท่ากับ $\lambda/2$ หรือครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

กล่าวได้ว่า ลวดตัวนำรีโซแนนซ์ขนาดสั้นที่สุด มีค่าความยาวเท่ากับ $\frac{1}{2}\lambda$ ในกรณีของสายอากาศ เมื่อพิจารณาอย่างถี่ถ้วนจะพบว่าความเร็วแสงเป็นค่าคงที่แน่นอน

ดังนั้นจึงมีทางเลือก 2 วิธี คือ

- ปรับค่าความถี่ให้เข้ากับความยาวของลวดตัวนำที่กำหนดมา
- ปรับความยาวของลวดตัวนำให้เข้ากับความถี่ที่ใช้งานในทางปฏิบัติแล้ว การปรับความยาวลวดตัวนำนิยมใช้กันมากกว่า

ดังนั้นสูตรคำนวณหาขนาดความยาวลวดตัวนำ คิดจากการหาร 2 กับสมการข้างต้น

จะได้ $$1 = \frac{491.8}{f(MHz)} \quad \text{(ฟุต)}$$

หรือ $$1 = \frac{149.9}{f(MHz)} \quad \text{(เมตร)}$$

สมการเหล่านี้เป็นพื้นฐานสำคัญในงานหาขนาดความยาวต่าง ๆ ของสายอากาศ ซึ่งมันแทนครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

2.5 การแพร่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในลวดตัวนำ

สมมุติกำหนดให้ความยาวของลวดตัวนำในสายอากาศมีค่าอนันต์ พบว่าขนาดของแรงดันไฟฟ้า และกระแสมีค่าน้อยลงเรื่อย ๆ ตามระยะที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการจางหายของพลังงานจากการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รวมทั้งเปลี่ยนเป็นความร้อนภายในลวดตัวนำ เพราะเกิดจากความต้านทานภายในของตัวนำ

แต่ถ้าลวดตัวนำมีขนาดสั้น พบว่าคลื่นมีสะท้อนกลับที่ปลายแต่ละด้าน เช่นเดียวกับลูกบอลกระทบกำแพงกลับมา

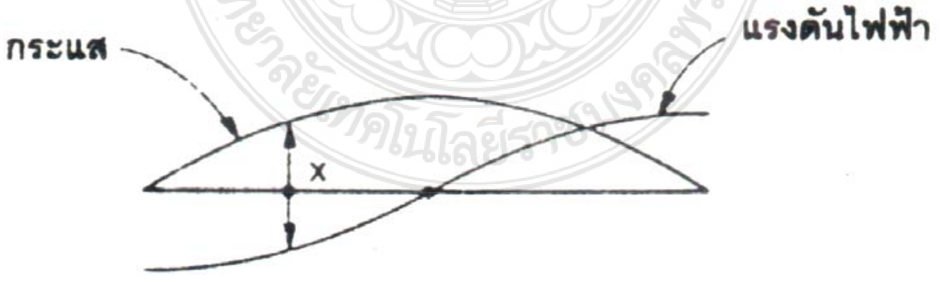
เมื่อผ่านคลื่นวิทยุในสายอากาศแบบ $\frac{1}{2}\lambda$ และแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นป้อนในแบบคลื่นรูปไซน์ ทำให้เราวิเคราะห์ได้ว่า

เมื่อคลื่นลูกแรกเดินทางมาถึงปลายด้านหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับ ทำให้ทิศทางการไหลของกระแสเปลี่ยนไปในทิศตรงกันข้าม ขณะเดียวกับที่คลื่นลูกถัดมาเดินทางมาถึงที่ปลายลวดตัวนำพอดี ดังนั้นเราพบว่ามีเหตุการณ์น่าสนใจเกิดขึ้นคือ

- กระแสของคลื่นทั้งสองมีขนาดเท่ากัน แต่มีทิศทางตรงข้ามกันที่จุดปลายของลวดตัวนำ ดังนั้นผลลัพธ์ของกระแสที่จุดปลายลวดตัวนำเท่ากับ**ศูนย์**

ถ้าพิจารณาจุดถัดมาจากปลายลวดตัวนำ พบว่าขนาดของคลื่นที่เดินทางไปกับสะท้อนกลับมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการเสริมและหักล้างของกระแสขึ้น จนพิจารณาผลลัพธ์ของกระแสได้ว่าที่ระยะ $\frac{1}{4}\lambda$ จากปลายลวดตัวนำจะมีค่าขนาดกระแสมากที่สุด

สรุปได้ว่า ในสายอากาศแบบ $\frac{1}{2}\lambda$ ขนาดของกระแส เท่ากับศูนย์ที่จุดปลายของลวดตัวนำ และมีค่ามากที่สุดที่จุดตรงกลางของลวดตัวนำ ขอให้พิจารณาคำอธิบายข้างต้นได้จากรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการแพร่กระจายของกระแส และแรงดันไฟฟ้า

บนลวดตัวนำขนาด $\frac{1}{2}\lambda$ (ครึ่งความยาวคลื่น)

เส้นทึบแทนลวดตัวนำ

จากรูปเส้นโค้งที่ระบุเป็น “กระแส” เราเรียกว่าคลื่นนิ่ง หรือสแตนดิ้งเวฟ (standing wave) ของกระแสที่มีรูปร่างเป็นครึ่งหนึ่งของคลื่นไซน์

สำหรับแรงดันไฟฟ้า จะมีพฤติกรรมต่างจากกระแสไป คือ ที่ปลายทั้งสองของลวดตัวนำจะมีค่าแรงดันไฟฟ้ามากที่สุด แต่คนละขั้วและถัดมา $\frac{1}{4}\lambda$ จากปลายแต่ละด้าน พบว่ามีขนาดของแรงดันไฟฟ้าเท่ากันแต่ทิศทางตรงข้ามกัน ทำให้ผลลัพธ์ที่จุดนี้เท่ากันศูนย์

ทำให้สรุปทั้งหมดได้ว่า

- แรงดันไฟฟ้าจะมีค่ามากที่สุดในจุดที่กระแสมีค่าน้อยที่สุด
- ขั้วของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนทุก ๆ ความยาว $\frac{1}{2}\lambda$

ส่วนจุดที่คลื่นนิ่งมีค่ามากที่สุด เรียกว่า ลูป (Loop) หรือแอนตี้โนด (antinode) และจุดที่มีค่าน้อยที่สุดเรียกว่า โนด (node)

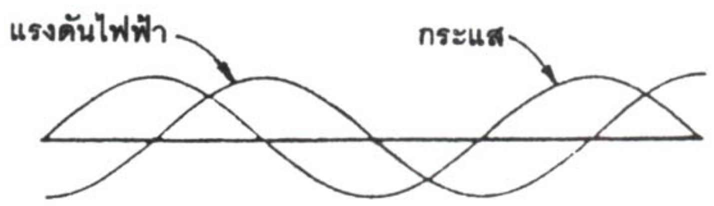
2.6 การเกิดฮาร์โมนิก

กรณีที่เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นที่ปลายลวดตัวนำ เราค้นพบว่าจำนวนของคลื่นนิ่งเท่ากับจำนวนเท่าของความยาวลวดตัวนำในหน่วยครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

อย่างเช่น ถ้าลวดตัวนำมีความยาวขนาด 2 เท่าของครึ่งความยาวคลื่น ($2 \times \frac{1}{2}\lambda$) จะมีจำนวนคลื่นนิ่งเท่ากับ 2 หรือ ลวดตัวนำมีความยาว 3 เท่าของครึ่งความยาวคลื่น ($3 \times \frac{1}{2}\lambda = \frac{3}{2}\lambda$) จะมีจำนวนคลื่นนิ่งเท่ากับ 3 (ดูได้จากรูป 2.4)

การที่มีลวดตัวนำยาวขึ้น (เป็นจำนวนเท่าของ $\frac{1}{2}\lambda$) พบว่าจะรีโซแนนซ์ที่ความถี่ค่าเดียวกับลวดตัวนำขนาด $\frac{1}{2}\lambda$ เหมือนเดิม และเรียกรีโซแนนซ์ที่เกิดกับสายอากาศขนาดยาว 2 เท่าหรือมากกว่าของครึ่งความยาวคลื่นว่า Harmonically resonant

การเกิดฮาร์โมนิกบนลวดตัวนำ แสดงได้ในรูป 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดฮาร์โมนิกบนลวดตัวนำที่ยาว 3 เท่าของครึ่งความยาวคลื่น

2.7 ความยาวทางไฟฟ้า (Electrical length)

ในงานสายอากาศ เราพิจารณาความยาวของสายอากาศออกเป็น 2 อย่างคือ

- ความยาวทางกายภาย (ความยาวจริง ๆ - physical length)

- ความยาวทางไฟฟ้า

เรามีหลักอยู่ว่า เมื่อค่าความถี่ในการใช้งานเปลี่ยนไป ค่าความยาวทางกายภาพของสายอากาศจะไม่เปลี่ยน แต่ค่าความยาวทางไฟฟ้าจะเปลี่ยน

ตัวอย่างเช่น ในการใช้งานที่ความถี่ 300 MHz ของสายอากาศแบบ $\frac{1}{2}\lambda$ พบว่ามีความยาวกายภาพเท่ากับ 50 cm $\frac{\lambda}{2}$ = 50 cm) แต่ถ้าความถี่ในการใช้งานเปลี่ยนเป็น 600 MHz พบว่า $\frac{\lambda}{2}$ = 25 cm นั่นคือความยาวทางไฟฟ้าเปลี่ยนเป็น λ (จากเดิมที่ค่าความยาวทางไฟฟ้าเท่ากับ $\frac{\lambda}{2}$)

ฉะนั้นวิธีแก้อาจตัดความยาวจริงให้เหลือ 25 cm ก็ได้ ขอยกตัวอย่างเพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น

ให้คำนวณจากสูตร $V = f\lambda$

โดย V = ความเร็วของคลื่นวิทยุ $\approx 3\times10^{8}$ m/S

กำหนดความถี่ใช้งานมี 200 MHz, 400 MHz, 800 MHz และ 100 MHz พิจารณาความยาวทางไฟฟ้าและความยาวทางกายภาพได้ดังนี้

จากข้างต้นเป็นสายอากาศต้นเดียวกัน แต่นำไปใช้ในความถี่ที่ต่างกัน เห็นได้ว่าในแต่ละความถี่จะให้ความยาวทางไฟฟ้าต่างกัน ส่วนความยาวทางกายภาพคงที่ เราสามารถกำหนดเงื่อนไขได้ 2 อย่าง คือ

- ให้ความยาวทางกายภาพคงที่ (75 cm) พบว่าความยาวทางไฟฟ้าเปลี่ยนตามความถี่
- ให้ความยาวทางไฟฟ้าคงที่ $\frac{\lambda}{2}$ พบว่าความยาวทางกายภาพเปลี่ยนได้โดยการตัดออกหรือต่อเพิ่ม

ในทางปฏิบัติแล้ว เราไม่นำค่าความยาวทางไฟฟ้าไปตัดท่อตัวนำเพื่อทำสายอากาศหรือนำไปตัดสายนำสัญญาณ เพราะว่าหากนำค่าตัวเลขนี้ไปตัดที่ค่าหนึ่งแล้ว ผลลัพธ์ที่ออกมาคือสายอากาศนั้นจะรีโซแนนซ์ที่มีค่าความถี่ต่ำกว่าที่เราคิด อย่างเช่น เราต้องการสร้างสายอากาศไดโพลแบบครึ่งความยาวคลื่น ที่ความถี่ 200 MHz จะพบว่าสายอากาศสามารถแพร่กระจายคลื่นได้ดีที่ความถี่น้อยกว่านี้เช่นที่ 193 MHz

ดังนั้นทางแก้ คือ ตัดให้สั้นกว่าค่าความยาวทางไฟฟ้าที่ 200 MHz ลงไปเล็กน้อยที่นี้เกิดคำถามขึ้นว่า “จะสั้นกว่าเดิมไปเท่าไร จึงให้ผลดี ?” มีการทดลองจนค้นพบว่า ต้องนำค่าคงที่ค่าหนึ่ง (สำหรับตัวนำแต่ละแบบ) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 เช่น 0.971 หรือ 0.88 เป็นต้น นำไปคูณกับค่าความยาวทางไฟฟ้า ทำให้ได้ค่าความยาวจริง ๆ ของสายอากาศออกมา คือความยาวทาง กายภาพ

ค่าคงที่นี้เรียกว่า ค่า k ซึ่งจะอธิบายถึงวิธีคำนวณในตอนต่อไป

หมายเหตุ ตัวอย่างคำนวณข้างต้นที่ผู้เขียนนำมาอธิบายไม่ได้คิดคำนึงถึงค่า k ด้วยมีจุดประสงค์ให้เกิดความเข้าใจในความแตกต่างของค่าความยาวทั้งสองแบบนี้

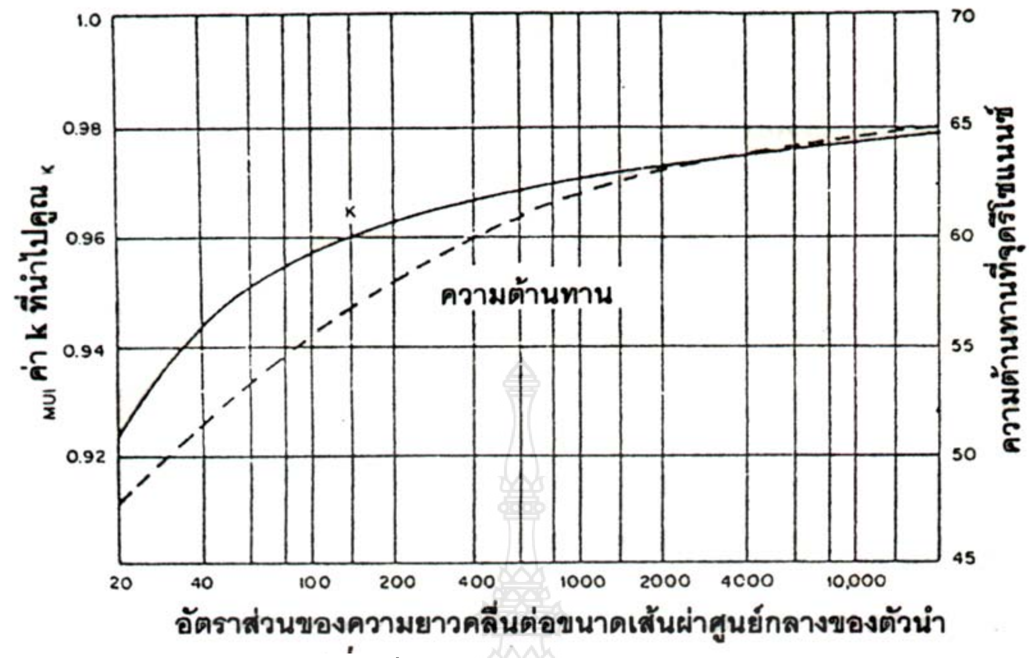
2.8 ความยาวจริงของสายอากาศแบบครึ่งความยาวคลื่น (Half – wave)

ในทางปฏิบัติ พบว่าความยาวจริงของสายอากาศมีค่าน้อยกว่าความยาวทางไฟฟ้าอยู่เล็กน้อย แสดงถึงสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟจะมีค่าความยาวจริงไม่เท่ากับค่าครึ่งความยาวคลื่น ($\lambda/2$)เพื่อให้สายอากาศสามารถแพร่กระจายคลื่นได้ดีที่สุด หรือเกิดรีโซแนนซ์

ความยาวจริงของสายอากาศที่ทำให้เกิดรีโซแนนซ์ที่ค่าความถี่ใช้งานพอดี จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความยาวของตัวนำต่อค่าเส้นผ่าศูนย์กลาง (diameter) ของตัวนำ

เห็นได้ว่าถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าน้อยลง (ใช้ตัวนำหนาขึ้น) มีผลให้ความยาวของสายอากาศจะลดลงที่ความถี่ใช้งาน

พิจารณาจากกราฟในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงกราฟของค่า k

จากรูป ค่า k นี้นำไปคูณกับความยาวทางไฟฟ้า เพื่อหาความยาวจริงของสายอากาศที่เกิดรีโซแนนซ์พอดี

โดยที่ค่า k คือ อัตราส่วนของหนึ่งความยาวคลื่น (ในภาวะสุญญากาศ) ต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ เขียนอักษรย่อว่า $\frac{\lambda}{dia}$

เส้นทึบโค้งในกราฟเป็นผลคำนวณจากทฤษฎีที่ช่วยให้เราหาความยาวจริงของสายอากาศได้ และต้องใช้กับท่อตัวนำที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากันตลอดด้วย

สำหรับค่า $\frac{\lambda}{dia}$ ที่ประมาณ 20,000 ขึ้นไป ค่า k เปลี่ยนไปน้อยมากมีการประมาณกันว่า สายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟ โดยใช้ลวดตัวนำทำขึ้นจะมีความยาวจริงสั้นกว่าอยู่ 2 % ของค่า $\lambda/2$ ที่ความถี่ใช้งาน

ผลของค่า k จะเห็นได้ชัดที่ค่าอัตราส่วนเท่ากับ 200 หรือน้อยกว่านั้น ตัวอย่างเช่น สายอากาศสร้างจากท่อโลหะกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว เพื่อใช้ในความถี่ 144 MHz จะมีค่า k ประมาณ 80 ทำให้ความยาวจริงของสายอากาศสั้นกว่าอยู่ 5 % ของค่า $\lambda/2$ ที่ความถี่นี้

ถ้าสายอากาศทำจากแท่งโลหะตันหรือท่อกลมที่ไม่มีการต่อฉนวนที่ปลายทั้งสองข้างแล้ว มีสูตรคำนวณหาความยาวจริงของสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟดังนี้

$$\text{ความยาวจริง (ฟุต)} = \frac{491.8 \times k}{f(MHz)}$$

หรือความยาวจริง (นิ้ว) $= \dfrac{5902 \times k}{f(MHz)}$

ค่า k ที่ใช้กันในปัจจุบันมีมาตรฐานอยู่หลายอย่าง แตกต่างกันไป สำหรับในหนังสือเล่มนี้ยึดแนวค่า k ของสมาคมนักวิทยุสมัครเล่นอเมริกัน (จาก ARRL) เป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีของสมาคมนักวิทยุสมัครเล่นอังกฤษ (RSGB) ที่ผู้เขียนเห็นว่าเป็นมาตรฐานที่เชื่อถือได้ดี

2.9 ปรากฏการณ์เอนด์ เอฟเฟ็กต์ (End Effect)

มีอยู่กรณีหนึ่งที่น่าสนใจ คือ ในสายอากาศแบบลวดตัวนำ ถ้ามีการใช้ฉนวน เช่นลูกยางกันน้ำ หรือจุกยางปิดที่ปลายทั้งสองข้างของลวดตัวนำ มีผลทำให้สายอากาศรีโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ที่ใช้งานลงมาเล็กน้อย อาจทำให้อัตราขยายของสายอากาศต่ำลงกว่าที่ควรเป็นทำให้บางครั้งผู้ใช้งานคิดว่าคำนวณความยาวของสายอากาศผิดไป

คำอธิบายของเรื่องนี้คือ ฉนวนที่ใส่เข้าไปเป็นการเพิ่มค่าประจุไฟฟ้าปริมาณเล็กน้อยให้กับระบบ มีผลช่วยจูนสายอากาศในรีโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำลงมาจากเดิม (เหมือนกับการเพิ่มค่า C ในวงจรจูนทั่วไป) เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เอนด์ เอฟเฟ็กต์ ซึ่งมีผลให้ค่ากระแสที่ปลายสายอากาศไม่ใกล้ศูนย์ (ในทางทฤษฎีต้องเท่ากับศูนย์) และจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ความถี่สูงขึ้นจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้ฉนวนในลักษณะนี้

2.10 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

จากคำอธิบายเบื้องต้นเกี่ยวกับการแพร่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้า ในสายอากาศในตอนแรกนั้นได้ระบุว่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟ (หรือในอีกแง่คือ กระแสมีค่ามากที่สุด)

แต่ถ้าเจาะลึกไปมากกว่านี้ กล่าวได้ว่าระดับแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุด (เข้าใกล้ศูนย์) เพราะถ้าค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์จริง แสดงถึงวงจรนั้นไม่มีค่าความต้านทานเลยแม้แต่น้อย นั่นคือจะไม่มีพลังงานแพร่กระจายมาจากสายอากาศได้ เพราะวงจรที่ไม่มีความต้านทานอยู่จะเป็นเพียงการส่งผ่านพลังงานเท่านั้น

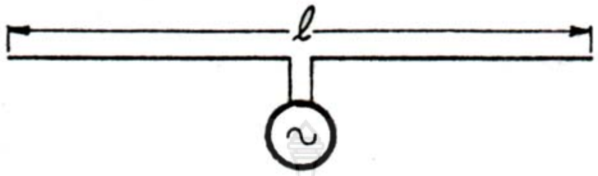
สายอากาศ เราสามารถ เราสามารถเปรียบเป็นวงจรไฟฟ้าได้ ที่มีคุณสมบัติคือต้องใช้พลังงานดังนั้นกระแสที่ไหลอยู่ภายในสายอากาศควรถูกจ่ายด้วยระดับแรงดันไฟฟ้าที่ค่าหนึ่ง

คิดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอย่างง่าย คือ เท่ากับระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายผ่านขั้วต่อหารด้วยปริมาณกระแสที่ไหลผ่านขั้วเช่นกัน

โดยถ้ากระแสและแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะเฟสเหมือนกันทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับค่าความต้านทาน จัดเป็นกรณีที่สายอากาศรีโซแนนซ์

แต่กรณีที่กระแสและแรงดันไฟฟ้ามีเฟสต่างกัน ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่ารีแอ็กแตนซ์เพิ่มขึ้นมาจากค่าความต้านทานด้วย ทำให้สายอากาศไม่รีโซแนนซ์

ลองสมมุติให้ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่นำบริเวณจุดกึ่งกลางของสายอากาศดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงสายอากาศที่มีจุดฟีด (feed point) ตรงกลาง

หมายเหตุ คำว่า ฟีด (feed) หมายถึง การจ่ายสัญญาณอินพุทให้วงจร, สายนำสัญญาณหรือสายอากาศ

ส่วนฟีดเดอร์ (feeder) หมายถึง สายนำสัญญาณที่ใช้ระหว่างเครื่องส่งกับสายอากาศการเลือกจุดต่อแหล่งจ่ายสัญญาณต่างกัน จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์แตกต่างกันด้วยพิจารณาได้จากรูป 2.3 ที่แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้ากับกระแส (คือค่าอิมพีแดนซ์) มีค่าแตกต่างกันตามจุดต่าง ๆ บนสายอากาศ

ดังนั้นเพื่อป้องกันมิให้สับสนมาก เราจึงเลือกจุดกึ่งกลางของสายอากาศเป็นการอ้างอิง

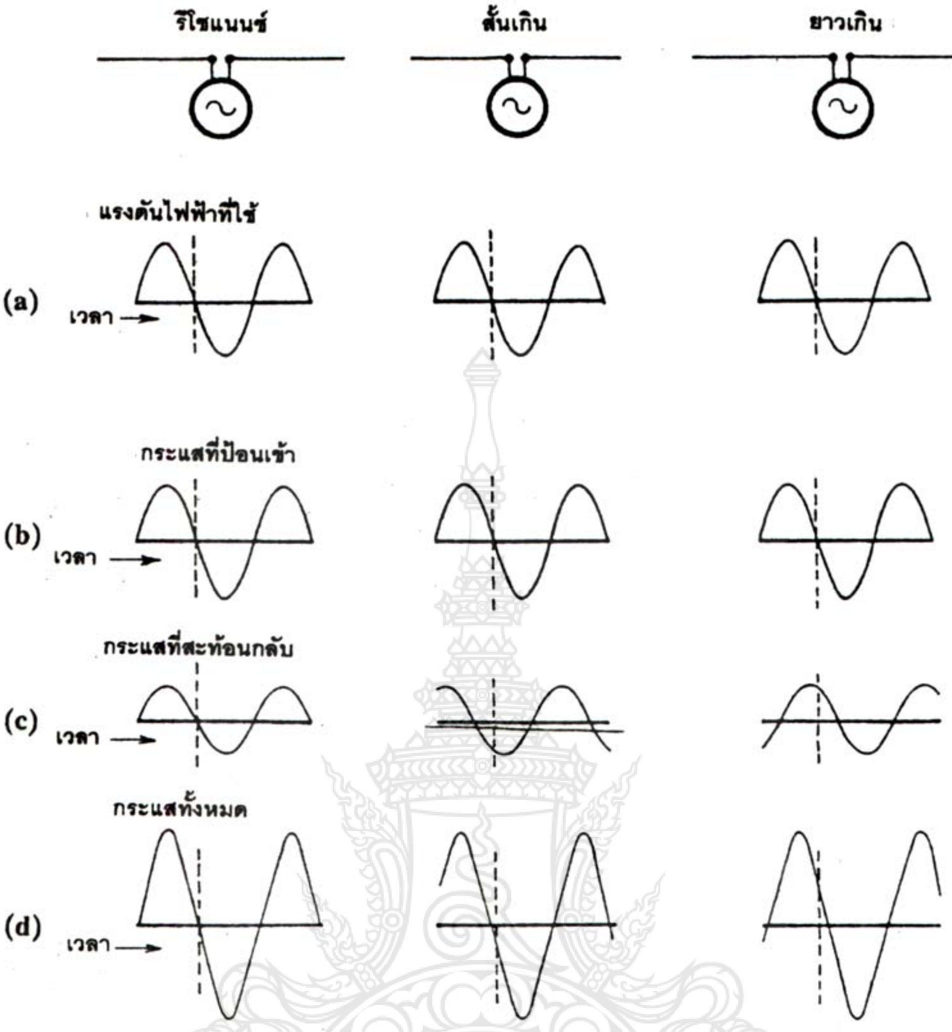
2.11 การพิจารณาสายอากาศเป็นวงจร

ถ้าค่าความถี่ที่ป้อนให้จุดตรงกลางของสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟมีค่ามากหรือน้อยกว่าความถี่รีโซแนนซ์ มีผลให้คุณสมบัติของสายอากาศมีลักษณะไม่เหมือนกัน

- อย่างกรณีเกิดรีโซแนนซ์ พบว่ากระแสมีเฟสเท่ากันกับแรงดันไฟฟ้า
- กรณีใช้ความถี่ต่ำกว่าค่ารีโซแนนซ์ พว่าเฟสของกระแสนำหน้าเฟสของแรงดันไฟฟ้า ทำให้ค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศเป็นค่าประจุไฟฟ้า (capacitance)
- กรณีใช้ความถี่สูงกว่าค่ารีโซแนนซ์ พบว่าเฟสของกระแสตามหลังเฟสของแรงดันไฟฟ้า ทำให้ค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศเป็นค่าเหนี่ยวนำไฟฟ้า(inductance)

ขอให้พิจารณาในรูป 2.7 ที่แสดงรูปแบบต่าง ๆ โดยให้มี 3 ลักษณะคือ

- ความยาวของสายอากาศเกิดรีโซแนนซ์พอดี
- ความยาวของสายอากาศสั้นเกินไป
- ความยาวของสายอากาศมากเกินไป



รูปที่ 2.7 แสดงกระแสในสภาวะรีโซแนนซ์และไม่รีโซแนนซ์

จากรูปแต่ละกรณี ป้อนแรงดันไฟฟ้าเหมือนกันหมด ดังรูป (A) และกระแสที่ป้อนเข้าสายอากาศมีลักษณะดังรูป (B) ให้สังเกตว่าทั้งกระแส (B) และแรงดันไฟฟ้ามีเฟสเหมือนกัน (ไม่ว่าความยาวของสายอากาศเป็นเท่าไหร่)

พิจารณาทีละกรณีได้ดังนี้

- กรณีสายอากาศรีโซแนนซ์

พบว่าเฟสของกระแสมีการเปลี่ยนแปลงดังต่อไปนี้

- กระแสเดินทางจากปลายข้างหนึ่งไปอีกปลาย เฟสเปลี่ยนไป 90^0 ($\lambda/2$)

- กระแสที่สะท้อนกลับมาจากปลายหนึ่งไปจนถึงอีกข้าง เฟสเปลี่ยนไป 90^0 (คิดเฉพาะตอนกลับ)

ผลรวมทางเฟสของกระแสที่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากเดินทางไป – กลับภายในสายอากาศเท่ากับ

และยังมีการเปลี่ยนเฟสไปอีก 180^0 เนื่องจากทิศทางของกระแสเปลี่ยนกลับตรงข้ามที่ปลายสายอากาศ

ทำให้ผลรวมทั้งหมดทางเฟสที่เปลี่ยนไปของกระแสในการเดินทางไป – กลับ คือ 360^0 แสดงว่ากระแสส่วนที่สะท้อนกลับกับกระแสอินพุทมีเฟสเหมือนกัน (ดังรูป (C) แสดงสัญญาณกระแสสะท้อนกลับ)

ผลรวมทั้งหมดของกระแสภายในสายอากาศ แสดงดังรูป (D)

สรุปได้ว่า กรณีสายอากาศรีโซแนนซ์ เป็น**การที่รูปสัญญาณของผลรวมกระแสทั้งหมดกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า มีเฟสเหมือนกันทุกประการ** และโหลด (สายอากาศ) ถูกพิจารณาจากแหล่งป้อนพลังงานว่าเป็นค่าความต้านทานอย่างเดียว

- กรณีสายสั้นเกินไป (ที่จะเกิดรีโซแนนซ์)

เฟสที่เปลี่ยนแปลงแตกต่างจากกรณีแรก เพราะว่ารูปสัญญาณของกระแสที่สะท้อนมาถึงจุดเดิม เร็วกว่าเดิม เนื่องจากระยะเฟสน้อยกว่า 90^0 ($\lambda/2$) ทำให้การเดินทางทั้งไป-กลับจะมีค่าเฟสที่เปลี่ยนไปน้อยกว่า 180^0 แสดงถึงค่าสูงสุดของกระแสที่สะท้อนมาเกิดก่อนค่าสูงสุดของกระแสที่เดินทางไป (ความจริงควรเกิดพร้อมกัน) และเมื่อรวมกับการกลับเฟสเนื่องจากเปลี่ยนทิศทางอีก แล้ว พบว่าผลรวมทั้งหมดของเฟสที่เปลี่ยนไปมีค่าน้อยกว่า 360^0 (ดังรูป (C)) และให้ผลรวมทั้งหมดของกระแสดังรูป (D)

สรุปได้ว่า ผลรวมของกระแสมีรูปสัญญาณนำหน้า (ทางเฟส) กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนทำให้โหลด (สายอากาศ) ถูกพิจารณาเป็นค่าความต้านทานต่ออนุกรมกับค่าประจุไฟฟ้า

- กรณีสายอากาศยาวเกินไป (ที่จะเกิดรีโซแนนซ์)

พบกระแสที่สะท้อนกลับมาถึงจุดเดิมช้ากว่ากรณีปกติ เพราะว่าระยะเฟสมากกว่า 180^0 (ไป-กลับ) ทำให้ค่ามากที่สุดของกระแสสะท้อน เกิดหลังค่ามากที่สุดของกระแสที่เดินทางไป ดังรูป (C)

ผลรวมทั้งหมดของกระแสมีรูปสัญญาณตามหลัง (ทางเฟส) กับแรงดันไฟฟ้าทำให้โหมด (สายอากาศ) ถูกพิจารณาเป็นค่าความต้านทานต่อขนานกับค่าเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ยังมีอีกประเด็นที่น่าสนใจ คือ ถ้าความยาวสายอากาศเพิ่มระยะเฟสเป็น 180^0 จะมีความยาวทางเฟสของการเดินทางไป-กลับเท่ากับ 360^0 บวกกับการเปลี่ยนทิศตรงข้ามอีก รวมการเปลี่ยนเฟสทั้งหมด 540^0 (มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนเฟสไป 180^0)

ในกรณีอย่างนี้ กระแสที่สะท้อนกลับกับกระแสเดิมเกิดเฟสต่างกันหมด ทำให้ผลรวมของกระแสเหลือน้อยมาก (หักล้างกัน) แต่ค่ากระแสที่เหลือนี้ยังมีเฟสเดียวกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน

นั่นคือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ กลับมาเป็นค่าความต้านทานอย่างเดียวอีกครั้งและความต้านทานในลักษณะแบบนี้มีค่าสูงมาก ทำให้เปรียบสายอากาศเป็นวงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน (parallel – resonant circuit) ได้

ส่วนขนาด (แอมปลิจูด) ของกระแสที่สะท้อนกลับ เมื่อเปรียบเทียบกับของเดิมแล้วพบว่ามีขนาดลดลง เนื่องจากสูญเสียพลังงานในการเดินทางไป - กลับภายในลวดตัวนำ

2.12 ค่าความต้านทาน

พลังงานที่เราป้อนเข้าสายอากาศ พบว่าถูกนำไปใช้ 2 อย่าง คือ

- การแพร่กระจายคลื่นวิทยุออกอากาศ
- การสูญเสียเป็นความร้อนภายในลวดตัวนำ

โดยพลังงานที่นำคลื่นวิทยุออกอากาศจัดเป็นการใช้ประโยชน์ แต่ส่วนที่เปลี่ยนเป็นความร้อนจดเป็นการสูญเปล่า

ถ้าเรากำหนดให้สูตรการใช้พลังงานจาก $P = I^2R$

ดังนั้นกรณีของการสูญเสียความร้อน ค่า R เป็นค่าความต้านทานจริง ส่วนกรณีของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ค่า R เป็นค่าความต้านทานสมมุติที่อาจแทนด้วยตัวต้านทานที่มีค่าเท่ากันได้ เราเรียกความต้านทานนี้ว่า ความต้านทานการแพร่คลื่น (radiation resistance)

เพื่อป้องกันการสับสน กำหนดสูตรให้ $P = I^2(R_O + R)$

โดย R_O แทนค่าความต้านทานจริง หรือ ohmic resistance

R แทนค่าความต้านทานสมมุติ หรือ radiation resistance

ในทางปฏิบัติสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟ ค่าพลังงานสูญเสีย เนื่องจากความร้อนภายในลวดตัวนำมีค่าที่น้อยมากเมื่อเทียบกับค่าทั้งหมดที่ป้อนให้สายอากาศ ทั้งนี้เกิดจากค่าความต้านทานจริงมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าความต้านทานการแพร่คลื่น

นอกจากนี้ถ้าสายอากาศไม่มีสิ่งกีดขวางรอบตัว และไม่ใกล้พื้นโลกเกินไป เราสามารถละค่าความต้านทานจริง (ohmic resistance) ได้ และค่าความต้านทานทั้งหมดของสายอากาศที่จุดฟีดเท่ากับค่าความต้านทานการแพร่คลื่นอย่างเดียว

การวัดค่าความต้านทานการแพร่คลื่นกระทำที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟโดยมีเงื่อนไขเกี่ยวข้องดังนี้

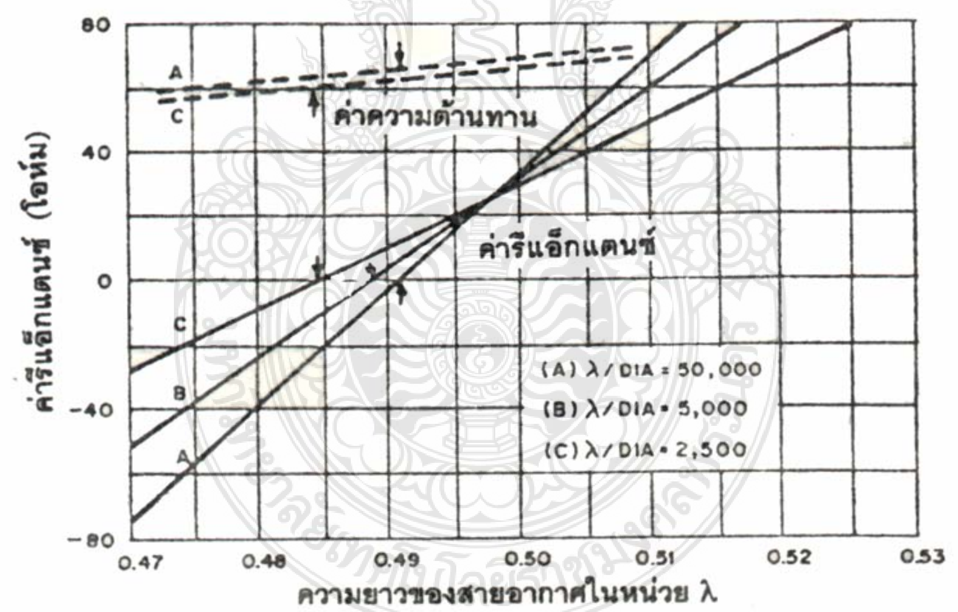
- ตำแหน่งของสายอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งของหรือวัตถุรอบตัว โดยเฉพาะพื้นโลก
- อัตราส่วนของหนึ่งความยาวคลื่นต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ $\frac{\lambda}{dia}$ ที่ใช้

เราพบว่าในสภาวะสุญญากาศ ค่าความต้านทานการแพร่คลื่นของตัวนำมีค่าประมาณ 73 โอห์ม และยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ λ / dia อีก ดังแสดงตามเส้นประในรูปที่ 2.5 ซึ่งพอสรุปได้ว่า ถ้าสายอากาศถูกสร้างให้มีขนาดหนาขึ้น จะทำให้ค่าความต้านานการแพร่คลื่นมีค่าลดลง

โดยทั่วไปสายอากาศที่ทำจากลวดตัวนำมีค่าต้านทานการแพร่คลื่นประมาณ 65 โอห์ม ส่วนที่ทำจากแท่งเหล็กหรือท่อตัวนำจะมีค่าระหว่าง 55 และ 60 โอห์ม

ค่าความต้านทานการแพร่คลื่นในกรใช้งานจริง (จากค่าประมาณ 50 โอห์ม หรือมากกว่า) จะมีผลอย่างชัดเจนต่อประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ทั้งนี้ส่วนหนึ่งมาจากค่า ohmic resistance มีค่าเพียง 1 โอห์มช่วงนี้ จนค่าความต้านทานการแพร่คลื่นลดลงต่ำกว่า 10 โอห์ม ค่าความต้านทานจากความร้อนจะมีผลกระทบขึ้นมาทันที อาจพบในกรณีที่สายอากาศต่อกันเป็นแผง หรืออาร์เรย์

จากที่กล่าวว่าค่าความต้านทานนี้ขึ้นกับความยาวของสายอากาศกับอัตราส่วน λ / dia ถ้าสายอากาศใช้ตามความยาวขนาด $\frac{1}{2}\lambda$ พบว่าความต้านทานนี้มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย ต่อความยาวที่เปลี่ยน ดังเส้นประในรูป 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงกราฟของค่าความต้านทานและรีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศที่มีจุดฟีดอยู่กึ่งกลาง

จากกราฟเห็นได้ว่า ค่าความต้านทานการแพร่คลื่นมีค่าลดลงเมื่อสายอากาศมีความยาวสั้นลง และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสายอากาศมีความยาวมากขึ้น

2.13 ค่ารีแอ็กแตนซ์

การเพิ่มของค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศในขณะที่ความยาวสายอากาศเพิ่มจากจุดรีโซแนนซ์ ยังขึ้นกับอัตราส่วน λ/dia ของตัวนำที่ใช้ด้วย และพบจากกราฟเส้นทึบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่านี้มีมากกว่าค่าความต้านทานการแพร่ขึ้น

กล่าวสรุปจากกราฟว่า ถ้าตัวนำมีขนาดหนาขึ้นทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอ็กแตนซ์เกิดน้อยลง เทียบกรณี (c) และ (a) ดูจุดที่เส้นทึบแต่ละกรณีตัดกับแกนศูนย์ (แสดงที่จุดมีลูกศรชี้) เราพิจารณาเป็นการที่สายอากาศในแต่ละค่าอัตราส่วน λ/dia เกิดรีโซแนนซ์ได้

ผลจากอัตราส่วน λ/dia ที่มีต่อค่ารีโซแนนซ์ คือ ค่า λ/dia มีน้อยลงเท่าใดมีผลให้ความยาวของสายอากาศที่เกิดรีแอ็กแตนซ์เท่ากับศูนย์ (รีโซแนนซ์) มีขนาดสั้นลง

คุณสมบัติของสายอากาศที่มีต่ออัตราส่วน λ/dia ที่มีค่าต่างกัน เราพออธิบายเทียบได้กับพฤติกรรมของวงจรรีโซแนนซ์ทั่วไปที่มีค่า Q แตกต่างกัน

กล่าวคือ เมื่อค่า Q ของวงจรมีค่าต่ำ ทำให้ค่ารีแอ็กแตนซ์มีค่าน้อย และมีช่วงการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างต่ำ ในกรณีค่า Q ของวงจรมีค่าสูง ผลที่ได้จะตรงข้ามกับข้างต้น

ดังนั้นพอวาดกราฟตอบสนองของวงจรกรณีค่า Q ต่ำ ได้มีลักษณะ “กว้าง” ส่วนกรณีค่า Q สูง จะมีลักษณะ “แคบ”

เช่นเดียวกันกับสายอากาศ ที่เราพบว่าสายอากาศที่มีขนาดหนา (ตัวนำ) จะสามารถทำงานตอบสนองต่อความถี่ได้ในแถบความถี่กว้าง ขณะที่ขนาดบางอย่างจะทำงานในช่วงแถบความถี่แคบ ทำให้เทียบค่า Q ของสายอากาศแบบหนาว่ามีค่าต่ำ และค่า Q ของสายอากาศแบบบางว่ามีค่าสูง

2.14 การคัปเปิลสายอากาศ

ความหมายของคัปเปิล (couple) ในทางไฟฟ้า คือ การต่อวงจร 2 ชุด เข้าด้วยกันเพื่อให้ส่งสัญญาณจากวงจรหนึ่งไปอีกวงจรได้ โดยอาจผ่านทางลวดตัวนำ, ตัวต้านทาน, ทรานฟอร์เมอร์, คาปาซิเตอร์ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ

ในทางไฟฟ้าเมื่อมีวงจรจูน (tuned circuit) เดี่ยว ๆ ค่า Q ของวงจร และค่าอิมพีแดนซ์จะคิดจาก ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า, ค่าประจุไฟฟ้า, และค่าความต้านทานภายในวงจรนั้น แต่ถ้าเรามีการต่อหรือคัปเปิลวงจรจูน 2 ชุด ด้วยกัน ค่า Q และค่าอิมพีแดนซ์จะเปลี่ยนไป

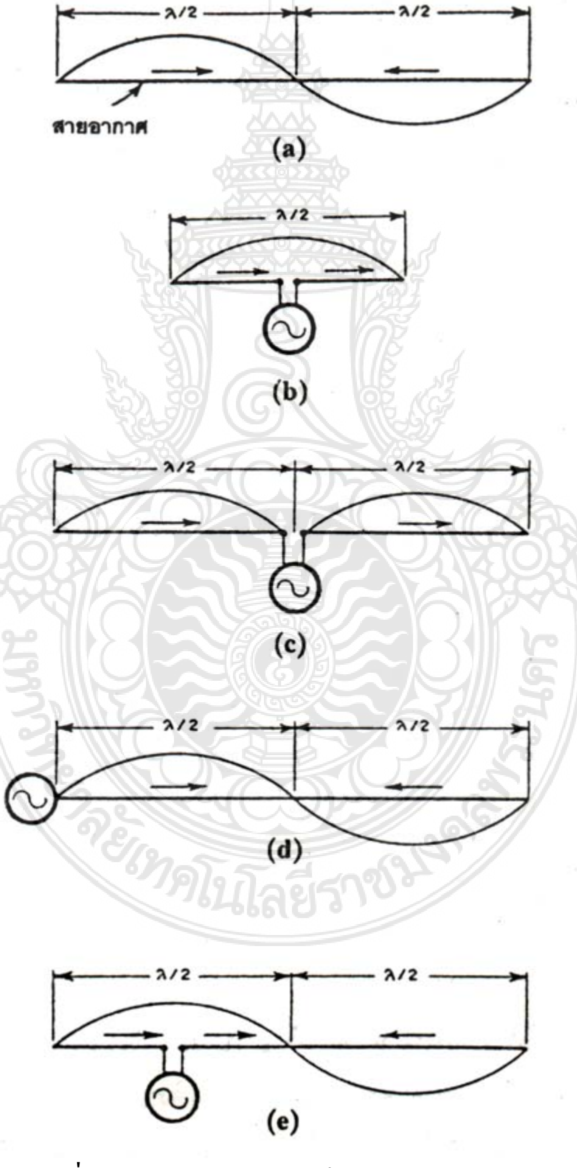
ในทำนองเดียวกับการคัปเปิลสายอากาศตั้งแต่ 2 หรือมากกว่านั้น โดยวงจรใกล้กันในระยะไม่กี่ความยาวคลื่น (หรือน้อยกว่านี้) สายอากาศแต่ละอันในกรณีนี้เราเรียกว่าอีลีเมนท์ (element) เราพบว่าค่ารีโซแนนซ์และความต้านทานการแพร่คลื่นของแต่ละอีลีเมนท์จะเปลี่ยนไป เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานที่เกิดขึ้นภายในทั้งหมด

ตัวอย่างของสายอากาศที่มีการคัปเปิลอีลีเมนท์ ได้แก่ แบบยากิ และแบบไดราเว่น อาร์เรย์ เป็นต้น การวิเคราะห์สายอากาศที่ถูกคัปเปิลอีลีเมนท์จะยากกว่าเดิม และอาจใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณด้วย

2.15 การใช้งานสายอากาศในช่วงฮาร์โมนิก

สายอากาศที่ถูกใช้งานในช่วงฮาร์โมนิกของความถี่พื้นฐาน จะมีคุณสมบัติต่าง ๆ ไม่เหมือนกับสายอากาศแบบ $\lambda/2$ ที่ได้อธิบายไปก่อนหน้าแล้ว

ประเด็นที่น่าสนใจในการใช้งานช่วงฮาร์โมนิก คือ มีการกลับทิศทางไหลของกระแสในทางระยะ $\lambda/2$ ของสายอากาศ ซึ่งพิจารณาได้จากรูป 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงการต่อจุดฟีดที่ระยะต่าง ๆ และทำให้การไหลของกระแสเปลี่ยนไปในสายอากาศ

จากรูป 2.9 (a) เส้นโค้งแสดงคลื่นนิ่งที่เกิดจากกระแสในลวดตัวนำโดยเส้นโค้งบนเส้นทึบ คือ กระแสที่ไหลในทิศทางหนึ่ง ส่วนเส้นโค้งใต้เส้นทึบแสดงกระแสที่ไหลในทิศตรงข้าม สรุปว่า ทิศทางการไหลของกระแสบนลวดตัวนำยาว $\lambda/2$ จะกลับทิศกันในช่วง $\lambda/2$ ต่อไป

สำหรับสายอากาศในรูป 2.9 (a) มีความยาวเท่ากับ 1λ และใช้งานในช่วงฮาร์โมนิก ลำดับที่สอง (second harmonic)

ขอให้พิจารณาสายอากาศแบบ $\lambda/2$ ที่แสดงในรูป 2.9 (b) มีการต่อจุดฟีดสัญญาณเข้าที่กึ่งกลางของสายอากาศ พบว่ากระแสไหลในทิศทางเดียวกันทั้งสองด้านของจุดฟีด ถ้าเพิ่มความยาวของลวดตัวนำแต่ละด้านของจุดฟีดให้เป็น $\lambda/2$ ดังแสดงในรูป 2.9 (c) พบว่ากระแสในส่วนด้านซ้ายและขวามือมีทิศทางเดียวกัน (เหมือนกับกรณีรูป 2.9 (b)) แต่การไหลของกระแสไม่เหมือนกับรูป 2.9 (a) ถึงแม้ว่าความยาวของลวดตัวนำทั้งในรูป 2.9 (a) และ (c) จะเท่ากันก็ตาม และสายอากาศในรูป 2.9 (a) ถูกใช้งานในช่วงฮาร์โมนิก ส่วนของรูป 2.9 (c) ไม่ใช่

ดังนั้นพอมีแนวคิดว่าการใช้งานช่วงฮาร์โมนิกให้ดีขึ้น จำเป็นต้องมีจุดฟีดสัญญาณที่จุดเหมาะสมบนลวดตัวนำ ซึ่งวิธีที่ติดจุดฟีดมี 2 แบบ ดังรูป (d) และ (e) ในรูป 2.9

กรณีที่เราจ่ายสัญญาณเข้าที่จุดปลายใดด้านหนึ่ง (ดังรูป 2.9 (e)) ทิศทางการไหลของกระแสจะกลับกันในแต่ละช่วงยาว $\lambda/2$ ส่วนกรณีจ่ายเข้าที่จุดกึ่งกลางของส่วนสายอากาศยาว $\lambda/2$ ส่วนใดส่วนหนึ่ง (ดังรูป 2.9 (e)) ทิศทางการไหลของกระแส เหมือนกับกรณีข้างต้น

สรุปได้ว่าการใช้งานช่วงฮาร์โมนิก เราควรจ่ายสัญญาณเข้าที่จุดปลายใดปลายหนึ่ง หรือจุดที่เป็นกระแสลูป (มีขนาดมากที่สุด)

2.16 ความยาวของสายอากาศในการใช้ช่วงฮาร์โมนิก

ความยาวกายภาพของสายอากาศในย่านฮาร์โมนิก จะมีขนาดไม่เท่ากับความยาวทางไฟฟ้า เป็นเนื่องจากเหตุผลเดียวกับที่อธิบามาแล้ว ในสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟ ความยาวจริงจะสั้นกว่าค่าความยาวที่คิดจากจำนวนเต็มคูณครึ่งความยาวคลื่น เนื่องมาจากเหตุ 2 อย่างคือ

- อัตราส่วน λ/dia ของตัวนำ
- ปรากฏการณ์ เอนด์เอฟเฟ็กต์ (end effect)

สำหรับผลจาก เอนด์ เอฟเฟ็กต์ เห็นได้ชัด เมื่อเพิ่มฉนวนที่ปลายตัวนำ (เป็นกรเพิ่มค่าประจุไฟฟ้า) และสายอากาศที่ใช้งานช่วงฮาร์โมนิกมักมีฉนวนเพิ่มที่ปลายสายอากาศเท่านั้น

ดังนั้นปรากฏการณ์ เอนด์ เอฟเฟ็กต์ มีผลเฉพาะส่วน $\lambda/2$ ที่อยู่ปลายสุดแต่ละด้านของสายอากาศ และสมการต่อไปนี้เป็นการหาความยาวของสายอากาศที่ใช้งานในช่วงฮาร์โมนิก ของความถี่พื้นฐาน (เป็นค่าที่ใช้ในทางปฏิบัติจริงได้)

$$\text{ความยาวของสายอากาศ (ฟุต)} = \frac{492(N-0.05)}{f(\text{MHz})}$$

ค่า N แทน จำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่น $\lambda/2$ ของสายอากาศ กรณีเรากำหนดความยาวกายภาพของสายอากาศมีค่าแน่นอนขึ้นมาก่อนจะหาค่าความถี่ เพื่อให้เกิดความยาวทางไฟฟ้าให้ทำงานในลำดับฮาร์โมนิกที่ต้องการได้จากสมการต่อไปนี้

$$\lambda = \frac{fL}{984} + 0.025$$

โดยที่ λ แทนความยาวของตัวนำในหน่วยความยาวคลื่น

f แทนความถี่ในหน่วยMHz

L แทนความยาวกายภาพ (จริง) ของสายอากาศในหน่วยฟุต

2.17 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ใช้งานช่วงฮาร์โมนิก

เราสามารถพิจารณาสายอากาศในย่านฮาร์โมนิกว่าเป็นส่วนขนาด $\lambda/2$ มาเรียงต่อกันและกระแสที่จ่ายให้ในแต่ละส่วนมีทิศทางกลับกัน (หรือมีเฟสต่างกัน 90^0)

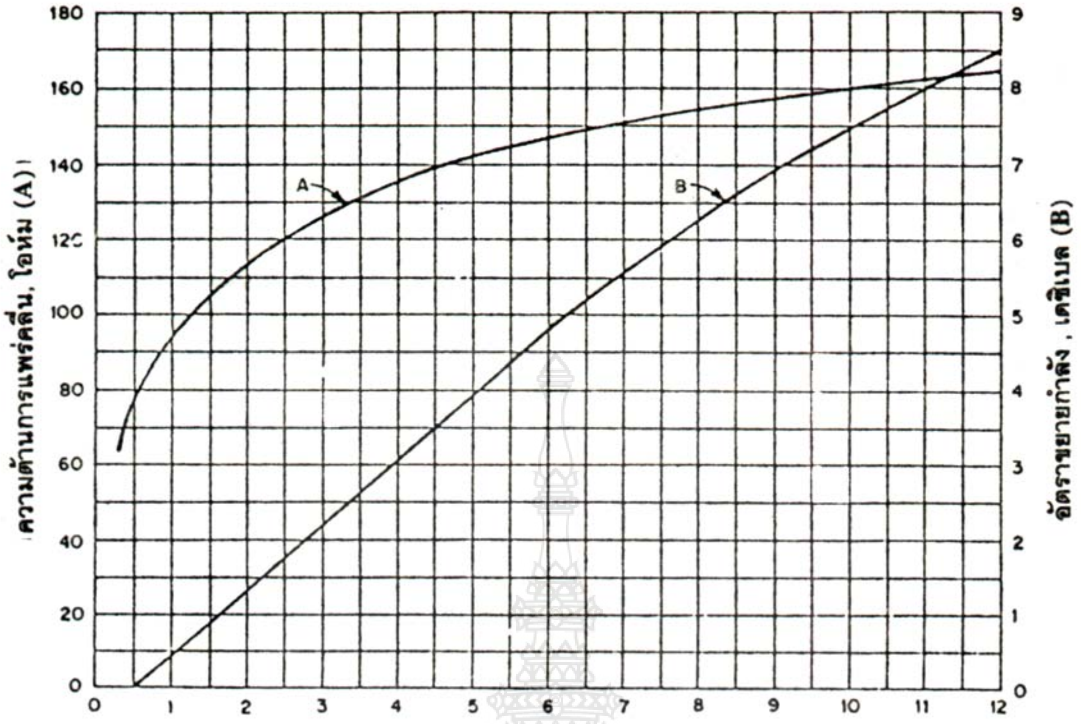
ถ้าพิจารณาในแง่นี้ ทำให้กล่าวได้ว่ามีการคัปเปิลระหว่างส่วน $\lambda/2$ ที่อยู่ติดกัน ด้วยเหตุนี้ กับผลกระทบจากการแพร่คลื่นของส่วนอื่น ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัด ณ จุดกระแสสูงบนส่วน $\lambda/2$ มีค่าไม่เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศแบบ $\lambda/2$ (เข้าใจด้วยว่าเป็นการเปรียบเทียบส่วน $\lambda/2$ ที่อยู่เดี่ยว ๆ คือสายอากาศกับอีกแบบที่ต่อกันอยู่)

ในกรณีของสายอากาศแบบ $\lambda/2$ ค่าอิมพีแดนซ์ประกอบด้วยค่า 2 ส่วน คือ ความต้านทานการแพร่คลื่น และรีแอ็กแตนซ์ สำหรับค่าความต้านทานจากความร้อนมีขนาดต่ำเกินไป (สามารถละทิ้งได้) โดยมีเงื่อนไขว่า ถ้าสายอากาศรีโซแนนซ์จะไม่มีค่ารีแอ็กแตนซ์ (เท่ากับศูนย์) ที่จุดฟีดคงเหลือเฉพาะค่าความต้านทานการแพร่คลื่นเท่านั้น และมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์

ค่าความต้านทานการแพร่คลื่นขึ้นกับจำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่น และอาจเปลี่ยนค่าได้จากผลของตัวนำและฉนวนที่อยู่ใกล้ รวมถึงพื้นดินด้วย

เนื้อหาต่อจากนี้จะมุ่งไปที่ขนาดของค่าความต้านทานนี้โดยใช้สายอากาศในทางทฤษฎีที่มีตัวนำขนาดบางมาก ๆ ในสภาวะสุญญากาศ และมีความยาวในช่วงฮาร์โมนิก (รีโซแนนซ์)

จากการทดสอบพบว่าถ้าสายอากาศยาว 1λ วัดค่าความต้านทานที่จุดกระแสสูงได้เท่ากับ 90 โอห์ม หากสายอากาศมีขนาดยาวขึ้น เช่นที่ 10λ จะมีค่าประมาณ 160 โอห์มแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานการแพร่คลื่นสัมพันธ์กับความยาวที่เพิ่มขึ้นของสายอากาศได้ดังกราฟ (A) ในรูป 2.10

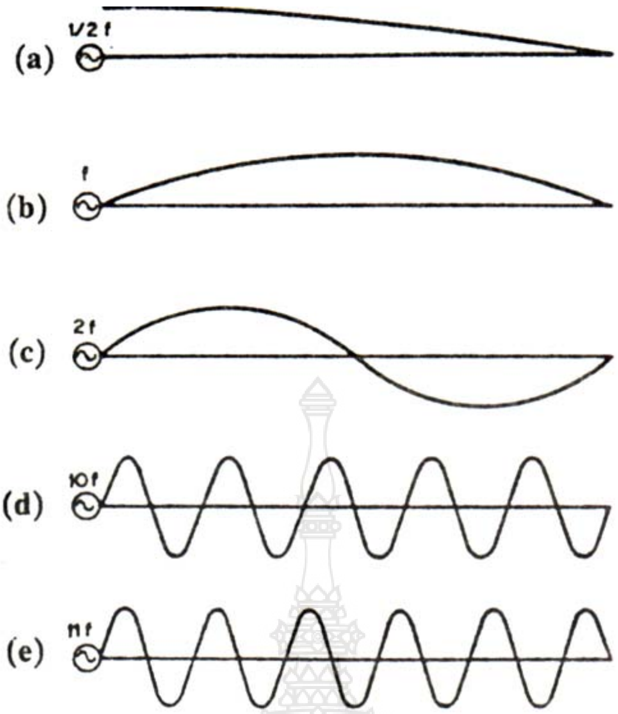


รูปที่ 2.10 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานการแพร่คลื่นและกำลังของสัญญาณโดย
กราฟ (A) แทนค่าความต้านทานตามขนาดความยาวสายอากาศ
กราฟ (B) แทนค่าอัตราขยายกำลังสายอากาศ

กรณีสายอากาศถูกใช้งานในช่วงความถี่คลาดไปจากความถี่รีโซแนนซ์พบว่าจุดฟีดมีทั้งค่ารีแอ็กแตนซ์และความต้านทานเกิดที่จุดฟีด

โดยทั่วไปค่ารีแอ็กแตนซ์จะเปลี่ยนตามความถี่ที่ใช้ดังได้กล่าวในสายอากาศสแบบฮาล์ฟเวฟ ส่วนกรณีสายอากาศที่ใช้ช่วงฮาร์โมนิกพบว่าอัตราการเปลี่ยนค่าของรีแอ็กแตนซ์ตามความถี่มีมากกว่า (เปรียบเทียบจากรูป 2.8 และ 2.10)

ลองพิจารณาในอีกแง่มุมอื่นในสายอากาศจากรูป 2.11 (a)



รูปที่ 2.11 แสดงผลจากการเปลี่ยนค่าความถี่

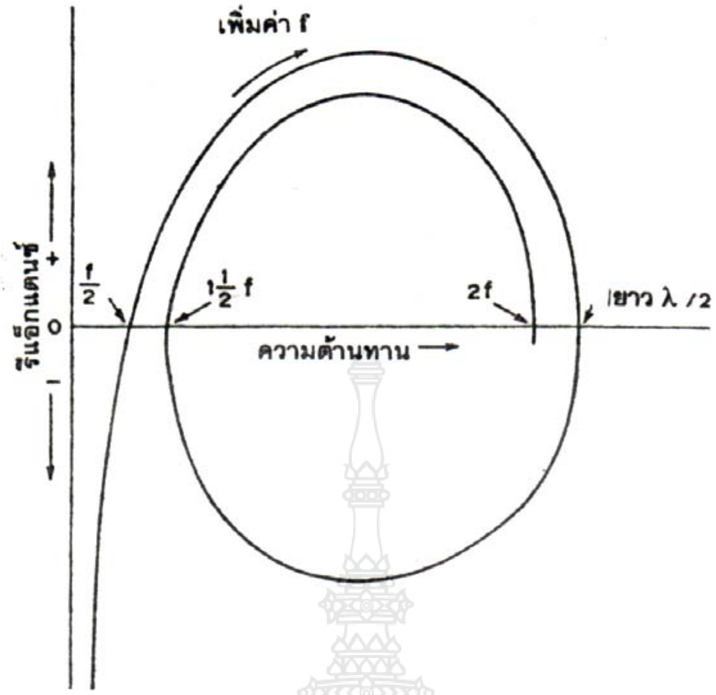
จากรูป 2.11 (a) มีการส่งสัญญาณผ่านจุดฟีดที่ปลายด้านหนึ่ง โดยใช้ความถี่เท่ากับ f/2 (ค่า f คือความถี่พื้นฐานสของสายอากาศแบบ $\lambda/2$)

เมื่อจ่ายสัญญาณความถี่ f/2 จะใช้ลวดตัวนำขนาดยาว $\lambda/4$ ทำให้เกิดรูปกระแสดังรูป และที่ค่านี้ถือว่าสายอากาศรีโซแนนซ์ และเกิดค่าความต้านทานต่ำเท่านั้นที่จุดฟีด

ถ้าความถี่ถูกเพิ่มค่าขึ้น ทำให้สายอากาศยาวเกินไปและกระแสที่จุดฟีดมีลักษณะตามหลัง (Lag) แรงดันไฟฟ้า (ดูจากรูป 2.7) มีผลให้สายอากาศเกิดค่ารีแอ็กแตนซ์เชิงเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductive reactance) ไปพร้อมกับค่าความต้านทานด้วย และถ้าความถี่ถูกเพิ่มมากขึ้นไปอีก ค่ารีแอ็กแตนซ์นี้จะเพิ่มจนถึงจุดค่ามากที่สุด จากนั้นลดลงจนเท่ากับศูนย์ที่ความถี่ f (ใช้ลวดตัวนำยาว $\lambda/2$ ดังแสดงในรูป 2.11 (b)

เมื่อเราเพิ่มความถี่มากขึ้น จากนี้จะเกิดค่ารีแอ็กแตนซ์เชิงประจุไฟฟ้า (capacitive reactance) ขึ้นและเพิ่มจนถึงค่ามากที่สุด จากนั้นลดลงเท่ากับศูนย์อีกครั้ง ถ้ายังมีการเพิ่มค่าความถี่ต่อไปจะเกิดค่ารีแอ็กแตนซ์เชิงเหนี่ยวนำไฟฟ้าใหม่ และมีค่ามากที่สุดจนเหลือศูนย์ ที่จุดความถี่ 2f ณ จุดนี้เกิดคลื่นนิ่งสมบูรณ์สองลูกของกระแส และลวดตัวนำเกิดรีโซแนนซ์อีกครั้งที่ฮาร์โมนิกลำดับที่สอง แสดงดังรูป 2.11 (c)

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอ็กแตนซ์ และค่าความต้านทานเมื่อความถี่เพิ่มจาก f/2 ถึง 2f แสดงได้ในกราฟรูป 2.12



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของรีแอ็กแตนซ์
และความต้านทานจากค่าความถี่

จากรูป อธิบายถึงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศว่ามีการเปลี่ยนค่าเป็นวัฏจักรเมื่อลำดับฮาร์โมนิกเพิ่มขึ้นอีกหนึ่ง โดยเริ่มจาก (คิดที่จุดฟีด) ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าความต้านทานอย่างเดียว (ค่าสูง) ที่ความถี่ f จากนั้นจะมีความรีแอ็กแตนซ์เชิงประจุไฟฟ้าเพิ่มเข้ามาจนมีค่ามากที่สุด และลดลงจนมีค่ามากที่สุด และลดลงจนได้ค่าความต้านทานอย่างเดียว (ค่าสูง) ที่ความถี่ 2f เห็นได้ว่าเกิดวัฏจักรเช่นนี้เสมอเมื่อลำดับฮาร์โมนิกเพิ่มขึ้นหนึ่ง

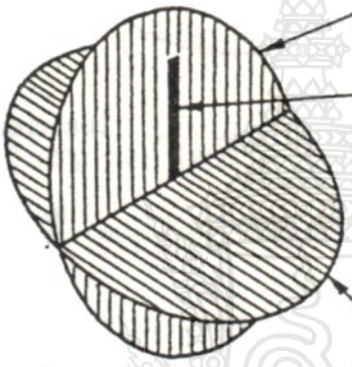
ลองพิจารณาจากรูป 2.11 (d) และ (e) ค่าความถี่ของรูป (d) คือ 10f (สิบเท่าจากความถี่พื้นฐาน) นั่นคือ สายอากาศใช้งานในช่วงฮาร์โมนิกลำดับที่สิบ จากนั้นในรูป (e) เพิ่มเป็น 11f ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไปอีกหนึ่งวัฏจักร

เห็นได้ว่า 11f มีค่ามากกว่า 10f อยู่ 10 เปอร์เซ็นต์ กล่าวได้คือการเปลี่ยนไป 10 % ของความถี่ทำให้วัฏจักรของอิมพีแดนซ์เกิดได้หนึ่งรอบ แต่ถ้าเปรียบเทียบการเปลี่ยนจาก f ไป 2f หรือ 100% ของความถี่เพิ่มขึ้น นั่นคือ ค่าอิมพีแดนซ์ไปเร็วกว่าอยู่ 10 เท่า แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์มีสูงขึ้นเมื่อความถี่ใช้ค่ามากขึ้น

2.18 รูปแบบการแพร่คลื่น, อัตราขยาย และไดเร็คติวิตี้

สายอากาศทุกแบบจะมีคุณสมบัติในการแพร่กระจายพลังงานไปได้มากในทิศทาง (เมื่อเทียบกับทิศทางรอบสายอากาศ) คุณสมบัติเช่นนี้เรียกว่า ไดเร็คติวิตี้ (DIRECTIVITY) จัดว่าสำคัญมากสำหรับ การส่งสัญญาณไปยังทิศทางที่ต้องการให้มีขนาดมากกว่าทิศทางที่ไม่ต้องการ ไดเร็คติวิตี้ของสายอากาศ แสดงโดยใช้รูปแบบการแพร่คลื่น (RADIATION PATTERN)

รูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศเป็นรูปกราฟที่แสดงความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายอากาศตามระยะทางที่ห่างออกไปรอบตัว และเนื่องจากมีการแพร่คลื่นไปทุกทิศทางรอบตัว จึงต้องกำหนดระนาบในการพิจารณารูปแบบคลื่นขึ้น โดยตกลงกันให้มีใช้อยู่ 2 ระนาบ ดังแสดงในรูป 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงระนาบเมอริเดียนและอิเควโทเรียลของสาอากาศ

จากรูป

- ระนาบเมอริเดียน (meridian) คือ ระนาบตามแนวแกนของสายอากาศ
- ระนาบอิเควโทเรียล (equatorial) คือ ระนาบตั้งฉากกับแนวสายอากาศ

ยกตัวอย่าง เช่น สายอากาศชนิดแนวตั้ง (vertical) อธิบายได้ว่า ระนาบเมอริเดียนมีทิศตั้งฉากกับพื้นโลก และระนาบอิเควโทเรียลมีทิศแนวนอน

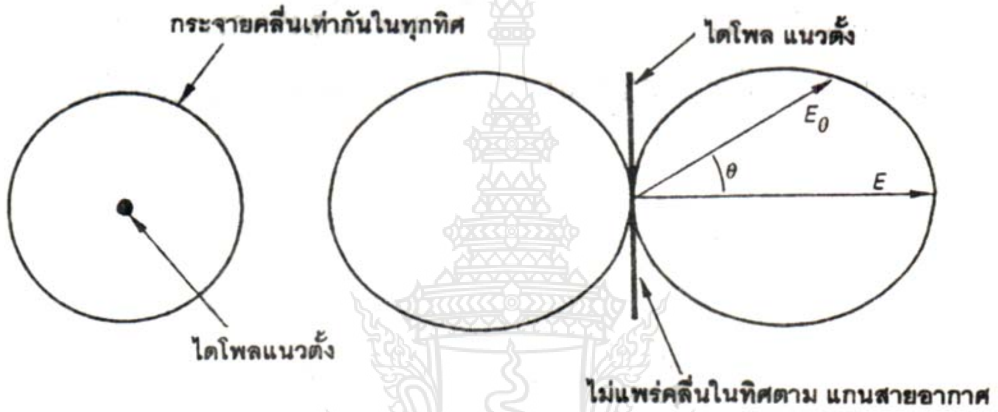
รูปแบบการแพร่คลื่นสามารถแสดงถึงประสิทธิภาพของสายอากาศได้ดี โดยต้องเป็นในสภาพที่ติดตั้งห่างจากวัสดุต่าง ๆ เช่น ตึก, อาคาร หรือพื้นดิน ที่อาจทำให้เกิดคลื่นสะท้อนขึ้นและมีผลต่อรูปแบบได้

แต่ในการใช้งานจริง สายอากาศถูกติดตั้งไว้ใกล้กับวัสดุต่าง ๆ ทำให้รูปแบบการแพร่คลื่นไม่อาจระบุถึงประสิทธิภาพแท้จริงของสายอากาศได้เต็มร้อยเปอร์เซนต์ ถึงกระนั้นรูปแบบการแพร่คลื่นใช้ประโยชน์ในแง่การเปรียบเทียบความแตกต่างกันของสายอากาศแต่ละชนิด

สายอากาศอาจถูกใช้ในการรับคลื่นได้ และเราสามารถใช้รูปแบบการแพร่คลื่นระบุถึงความสามารถในการรับของสายอากาศได้ โดยเฉพาะคุณสมบัติไดเร็คติวิตี้ที่ทำให้รู้ว่าควรหันเสาหรือติดตั้งในทิศทางใดจึงได้สัญญาณที่ต้องการ

สายอากาศไดโพลชนิดแนวตั้งจะแพร่/หรือรับคลื่นได้เท่ากันในทุกทิศตามระนาบแนวนอน ทำให้มีรูปแบบการแพร่คลื่นเป็นวงกลม ดังแสดงในรูป 2.14 (a)

ส่วนระนาบแนวตั้งของสายอากาศชนิดนี้จะไม่แพร่/หรือรับคลื่นตลอดตามแนวสายอากาศ ทำให้รูปแบบการแพร่คลื่นเป็นลักษณะเลขแปด ดังแสดงในรูป 2.14 (b)



รูปที่ 2.14 แสดงรูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแนวตั้ง (ขนาด

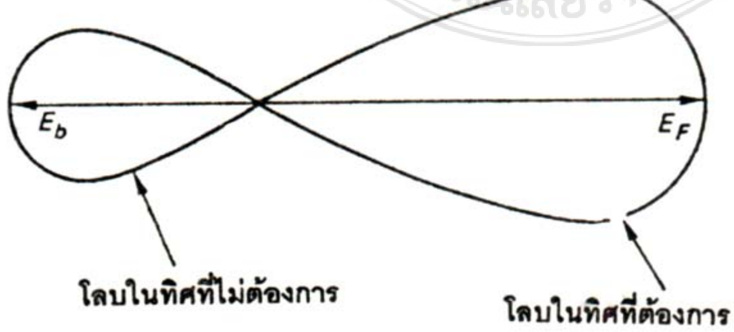
(a) รูปแบบระนาบแนวนอน

(b) รูปแบบระนาบแนวตั้ง

\# อัตราส่วนฟรอนต์ทูแบค (Front-to-Back Ratio)

รูปแบบการแพร่คลื่นส่วนใหญ่แล้วจะมีไดเร็คติวิตี้ไปในทิศทางใดทิศหนึ่งมากกว่าทิศอื่น

ดังนั้นอัตราส่วนฟรอนต์ทูแบคของสายอากาศ คือ อัตราส่วนของความเข้มสนามไฟฟ้า ที่เกิดจากสายอากาศโดยคิดจากทิศที่ต้องการกับทิศไม่ต้องการ (ตรงข้ามกัน) แสดงดังรูป 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงอัตราส่วนฟรอนต์ทูแบคของสายอากาศ

ตัวอย่างการคำนวณ

ค่าความเข้มสนามที่ระยะ X กิโลเมตร ตามทิศที่ต้องการจากสายอากาศเท่ากับ 10 mV/m และในระยะทางที่เท่ากันแต่ทิศตรงข้ามมีค่าเท่ากับ 1mV/m

จงคำนวณหาอัตราส่วนฟรอนด์ทูแบคของสายอากาศนี้

คำตอบ

อัตราส่วนฟรอนด์ทูแบค $= \frac{E_f}{E_b} = \frac{10\times10^{-3}}{1\times10^{-3}} = 10$

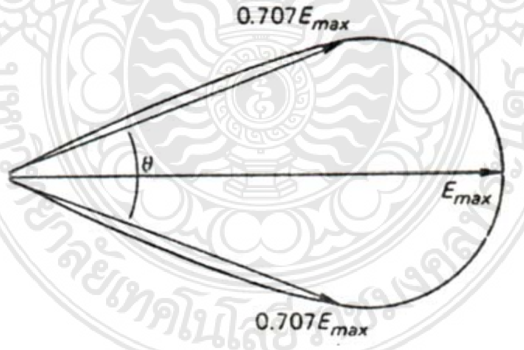
หรือในหน่วยเดซิเบล $= 20 \text{ Log } 10 = 20 \text{ dB}$

 # บีมวิดท์ (Beamwidth)

จัดเป็นการวัดความกว้างของลำคลื่น เพื่ออธิบายไดเร็คติวิตี้ของสายอากาศได้ดี โดยกำหนดให้มีหน่วยเป็นมุมที่คิดจากกรณีดังนี้ (มีความหมายเหมือนกันทุกกรณี)

- ที่จุดซึ่งค่าพลังงานในการแพร่คลื่นลดลงเหลือครึ่งหนึ่งจากค่าสูงสุด
- หรือจุดที่ค่าความเข้มสนามเหลือ $1/\sqrt{2}$ หรือ 0.707 เท่าของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด
- หรือจุด 3 dB บนรูปแบบการแพร่คลื่น

แสดงค่าบีมวิดท์ θ จากรูป 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงบีมวิดท์ของสายอากาศ

 # อัตราขยายของสายอากาศ

ค่านี้ไม่ใช่ค่าอัตราส่วนระหว่างพลังงานเอาท์พุทต่อด้านอินพุท แต่เป็นอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้วัดคุณสมบัติไดเร็คติวิตี้ และสามารถระบุถึงปริมาณของการแพร่คลื่นมีมากในทิศทางใด

การคิดค่าอัตราขยายของสายอากาศจะวัดเทียบกับสายอากาศอ้างอิง

โดยอัตราขยายของสายอากาศส่งคือ กำลังสองของค่าอัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามตามทิศที่มีการแพร่คลื่นมากที่สุด เทียบกับค่าความเข้มสนามที่จุดเดียวกันของสายอากาศอ้างอิง หรืออาจแสดงในรูปอัตราส่วนของค่าพลังงานที่ต้องใช้ส่งอากาศของสายอากาศทั้งสองเพื่อให้เกิดความเข้มสนามขนาดเท่ากัน (ณ จุดเดียวกัน) ในทิศทางที่มีการแพร่คลื่นมากที่สุด หรืออัตราขยายของสายอากาศรับ คือ อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มสนามของสายอากาศทดสอบกับสายอากาศอ้างอิง ณ จุดตั้งสายอากาศที่เดียวกัน

การใช้สายอากาศอ้างอิงมักเป็นแบบไดโพลขนาด $\lambda/2$ หรือแบบไอโซทรอปิก (isotropic) ซึ่งมีลักษณะพิเศษ คือ กระจายคลื่นได้รอบตัวทุกทิศในปริมาณเท่ากัน (ในความเป็นจริงเราไม่สามารถสร้างสายอากาศไอโซทรปิกได้ มีใช้เฉพาะเป็นหลักการในงานสายอากาศเท่านั้น) มีการทดลองจนได้ผลสรุปว่าอัตราขยายของสายอากาศไดโพลขนาด $\lambda/2$ เทียบค่ากับสายอากาศไอโซทรอปิกได้มากกว่าอยู่ 1.64 เท่า หรือ 2.15 dB

ตัวอย่างการคำนวณ #1

สายอากาศทดสอบถูกจ่ายหรือฟีดสัญญาณขนาด 10kW จะได้ขนาดความเข้มสนาม ณ จุดทดสอบเท่ากับที่สร้างจากสายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ ซึ่งถูกฟีดด้วยสัญญาณขนาด 20 kW

จงคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศทดสอบเมื่อ

(a) ใช้สายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ อ้างอิง

(b) ใช้สายอากาศไอโซทรอปิกอ้างอิง

ถ้ามีการปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศทดสอบที่ฟีดสัญญาณขนาด 10 kW ให้สร้างความเข้มสนาม ณ จุดเดิมมากเป็นสองเท่า ให้คำนวณอัตราขยายของสายอากาศหลังจากปรับปรุง (ใช้สายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ อ้างอิง)

คำตอบ

(a) ค่าอัตราขยายของสายอากาศทดสอบเทียบกับแบบ $\lambda/2$

$$= 10 \ \mathrm{Log}_{10} \frac{20\times10^{3}}{10\times10^{3}} = 3$$

(b) เนื่องจากอัตราขยายของไดโพลแบบ $\lambda/2$ เทียบกับไอโซทรอปิก = 2.15 **dB**

ดังนั้นอัตราขยายของสายอากาศทดสอบกับไอโซทรอปิก = 2.15 + 3 = 5.15 **dB** **(Ans.)**

สำหรับสายอากาศที่ปรับปรุงแล้วให้ค่าความเข้มสนามเป็น 2 เท่าจากเดิม

ดังนั้นค่าอัตราขยายใหม่ $= 20 \ \mathrm{Log}_{10} 2 = 6$ **dB**

และเทียบกับไดโพลแบบ $\lambda/2$ จะได้อัตราขยาย $= 3+6 = 9$ **dB** **(Ans.)**

ตัวอย่างการคำนวณ # 2

ในการทดสอบสายอากาศชนิดหนึ่งที่ไม่รู้ค่าอัตราขยายกับสายอากาศมาตรฐานแบบหนึ่งที่รู้ค่าอัตราขยาย

กำหนดให้วัดค่าพลังงานที่ถูกส่งมาถึงสายอากาศ และแม็ชท์ได้พอดีกับโหลดได้ดังนี้

สายอากาศทดสอบวัดได้ 2uW

สายอากาศมาตรฐานวัดได้ 8uW

ถ้าอัตราขยายของสายอากาศมาตรฐานเทียบกับแบบไอโซทรอปิกมีคา 30 **dB**

จงคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศที่ทดสอบนี้

คำตอบ

หาอัตราขยายของสายอากาศมาตรฐานเทียบกับสายอากาศที่ทดสอบได้

$$= 10 \ \mathrm{Log}_{10} \left(\frac{8 \times 10^{-6}}{2 \times 10^{-6}} \right) = 6\mathrm{dB}$$

ดังนั้นอัตราขยายของสายอากาศทดสอบเทียบกับไอโซทรอปิก = 30-6 = 24 **dB**

 # กำลังส่งประสิทธิผล (Effective Radiated Power)

ในทางทฤษฎีสายอากาศไอโซทรอปิก มีคุณสมบัติแพร่กระจายพลังงานได้ทุกทิศรอบตัว และมีขนาดความเข้มสนามเท่ากันหมดตามระยะทางรอบสายอากาศ

ส่วนสายอากาศที่ใช้งานจริง ทุกชนิดจะไม่มีคุณสมบัติเช่นนี้อยู่ โดยมีการ**อัดคลื่นวิทยุ** ไปในทิศใดทิศหนึ่งเท่านั้น

ดังนั้นสรุปได้ว่า สายอากาศที่ใช้งานจริงต้องการกำลังที่ป้อนให้สายอากาศน้อยกว่าแบบไอโซทรอปิก ในการสร้างความเข้มสนามค่าเท่ากัน ณ จุดเดียวกัน ตามทิศทางที่มีการแพร่คลื่นมากที่สุด

กำลังส่งประสิทธิผล หรือ **ERP** ของสายอากาศ หมายถึง ค่าพลังงานส่วนที่ไอโซทรอปิกใช้สร้างความเข้มสนามขนาดเท่ากับสายอากาศใช้งานจริง ณ จุดเดียวกัน หรือในอีกนัยคือ ถ้าเราใช้สายอากาศที่มีอัตราขยายกำลังของคลื่นวิทยุที่ออกอากาศจะถูกเพิ่มให้มากกว่ากำลังส่งของเครื่องส่ง ค่าที่มากขึ้นนี้เรียกว่า **ERP**

ในการคำนวณ ERP ของสายอากาศคิดจากกำลังส่งทั้งหมดที่ถูกส่งให้สายอากาศ (P_t) คูณกับอัตราขยายของสายอากาศ (G) ได้สูตรว่า

$$ERP = P_t G$$

ตัวอย่างการคำนวณ

สายอากาศที่มีอัตราขยายเท่ากับ 10dB (เมื่อเทียบกับแบบไอโซทรอปิก) จะแพร่คลื่นขนาด 100 วัตต์ จงคำนวณหากำลังส่งประสิทธิผลของสายอากาศ

คำตอบ

10 dB คือ พลังงานในอัตราส่วน 10:1

ดังนั้น คิดจากสูตรได้ว่า

ERP = 10 x 1000 = 10 กิโลวัตต์ **(Ans.)**

 # แถบความถี่ (Bandwidth)

จัดเป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศทำงานได้น่าพอใจ ซึ่งในหนังสือเล่มนี้พิจารณาโลบหลักของรูปแบบการแพร่คลื่น ซึ่งคิดจากกราฟว่าแถบความถี่คือ ช่วงความถี่ที่ค่าพลังงานของสายอากาศที่แพร่ออกอากาศในทิศทางโลบหลักมีค่าไม่ต่ำกว่า 3 **dB**

 # ความต้านทานการแพร่คลื่นและประสิทธิภาพสายอากาศ

กำหนดค่าพลังงานที่แพร่จากสายอากาศมีสูตร

$$P = I^2R$$

Rr คือ ความต้านทานการแพร่คลื่น และถ้าคิดความต้านทาน เนื่องจากการสูญเสียความร้อนด้วยให้แทนอักษร R_l

ดังนั้นประสิทธิภาพของสายอากาศ (เขียนแทนด้วยอักษร η) คืออัตราส่วนของพลังงานที่แพร่ออกอากาศต่อส่วนที่ป้อนให้สายอากาศ มีสูตรคำนวณดังนี้ (จะแสดงผลเป็นเปอร์เซนต์)

$$\eta = \frac{I^2R_r}{I^2R_L + I^2R_r} = \frac{R_r}{R_r + R_L} \times 100\%$$

ตัวอย่างการคำนวณ

สายอากาศส่งความถี่ค่าต่ำ มีความต้านทานการแพร่คลื่น 0.3 โอห์ม และความต้านทานจากการสูญเสียเป็นความร้อน 1.5 โอห์ม ถ้ากระแสที่จ่ายให้สายอากาศมีขนาด 50 แอมป์ ให้คำนวณหากำลังส่งออกอากาศ, กำลังสัญญาณที่จ่ายเข้า และประสิทธิภาพของสายอากาศ

คำตอบ

กำลังส่งที่ออกอากาศ $= I^2R_r = (50)^2 \times 0.3 = 750$ วัตต์

กำลังสัญญาณที่จ่ายเข้า $= I^2R_r + I^2R_L = (50^2 \times 0.3) + (50^2 \times 1.5)$

$= 4500$ วัตต์

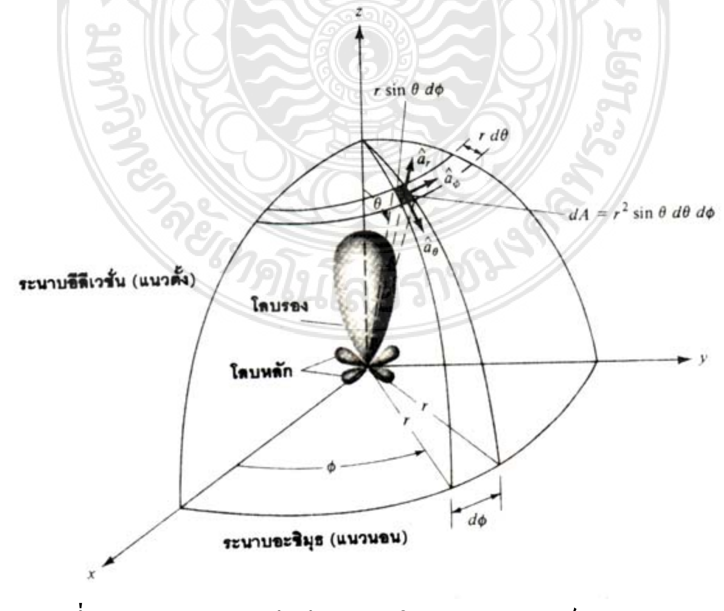
ประสิทธิภาพของสายอากาศ $= \dfrac{100R_2}{R_L + R_r} = \dfrac{100 \times 0.3}{0.3 + 1.5} = 16.67\%$

ที่ความถี่ค่าต่ำมาก พบว่าประสิทธิภาพของสายอากาศมีค่าน้อย แต่ที่ความถี่สูงอาจมีค่าเพิ่มมากกว่า 90 % ได้

2.19 รูปแบบการแพร่คลื่น

เป็นการเขียนคุณสมบัติต่าง ๆ ในการแพร่คลื่นลงเป็นภาพขึ้นมา ซึ่งสามารถแสดงถึงความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น, ความเข้มสนาม, เฟส หรือโพลาไรเซชั่นได้

คุณสมบัติเหล่านี้มีลักษณะการกระจายค่าแบบ 3 มิติ จึงใช้แกนโคโอดิเนตแบบ 3 มิติ (X,Y,Z) แทนได้ดังรูป 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงแกนโคโอดิเนตในการวิเคราะห์สายอากาศ

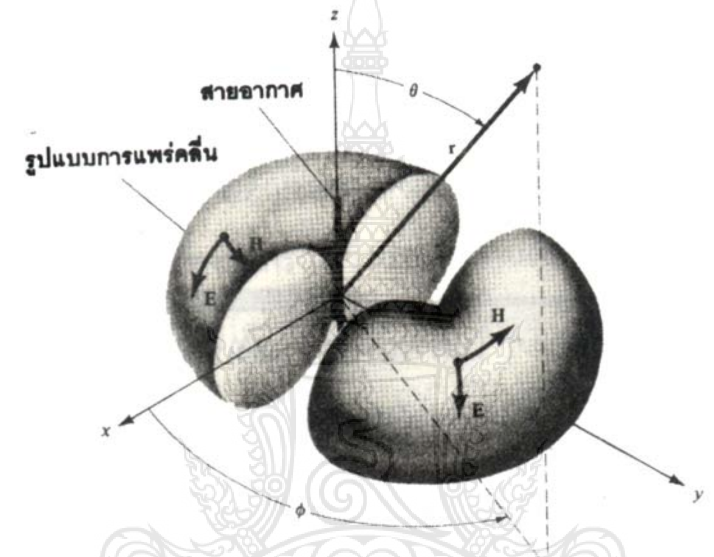
2.20 รูปแบบไอโซทรอปิก, ไดเร็คชั่นแนล และออมนิไดเร็คชั่นแนล

มีคำศัพท์อยู่ 3 คำที่น่าสนใจดังนี้

- ไอโซทรอปิก คือ สายอากาศในทางทฤษฎีที่สามารถแพร่คลื่นในทุกทิศทางด้วยความเข้มสนามเท่ากัน

- ไดเร็คชั่นแนล คือ คุณสมบัติในการแพร่คลื่นหรือรับคลื่นในทิศทางใดทิศหนึ่งได้ดีกว่าทิศทางอื่น

ยกตัวอย่างของสายอากาศแบบไดเร็คชั่นแนลได้ดังรูป 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงตัวอย่างของสายอากาศแบบไดเร็คชั่นแนล

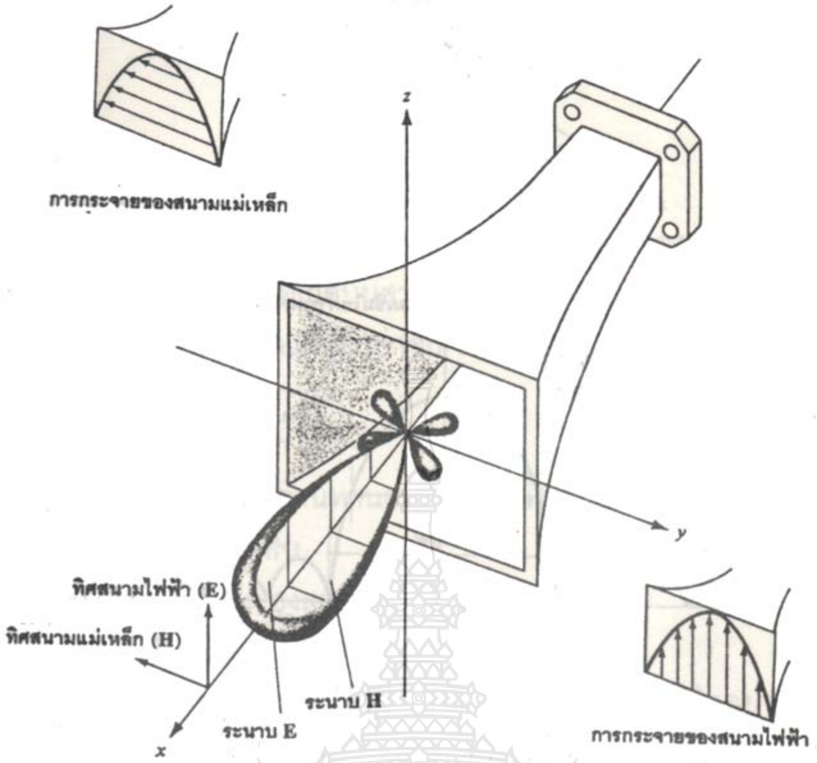
จากรูปวิเคราะห์ได้ว่า ไม่มีการไดเร็คชั่นแนลในระนาบแนวนอน [g(θ) , ϕ = ค่าคงที่] และมีไดเร็คชั่นแนลในระนาบแนวตั้ง [g(θ) , ϕ = ค่าคงที่] เราเรียกรูปแบบการแพร่คลื่นลักษณะว่าออมนิไดเร็คชั่นแนล (omnidirectional) ซึ่งหมายถึง “รอบตัว” ทำให้ครอบคลุมพื้นที่ใช้งานได้ดีตามแนวราบ

2.21 รูปแบบ E และ H

บางครั้งเราแสดงประสิทธิภาพของสายอากาศในรูปแบบระนาบ E และ H โดยถ้าสายอากาศมีโพลาไรเซชั่นแบบลิเนียร์แล้ว อธิบายความหมายได้ว่า

- รูปแบบระนาบ E คือ ระนาบที่มีเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า และทิศทางของการแพร่คลื่นมากที่สุด

- รูปแบบระนาบ H คือ ระนาบที่มีเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็ก และทิศทางของการแพร่คลื่นมากที่สุด ตัวอย่างแสดงดังรูป 2.19

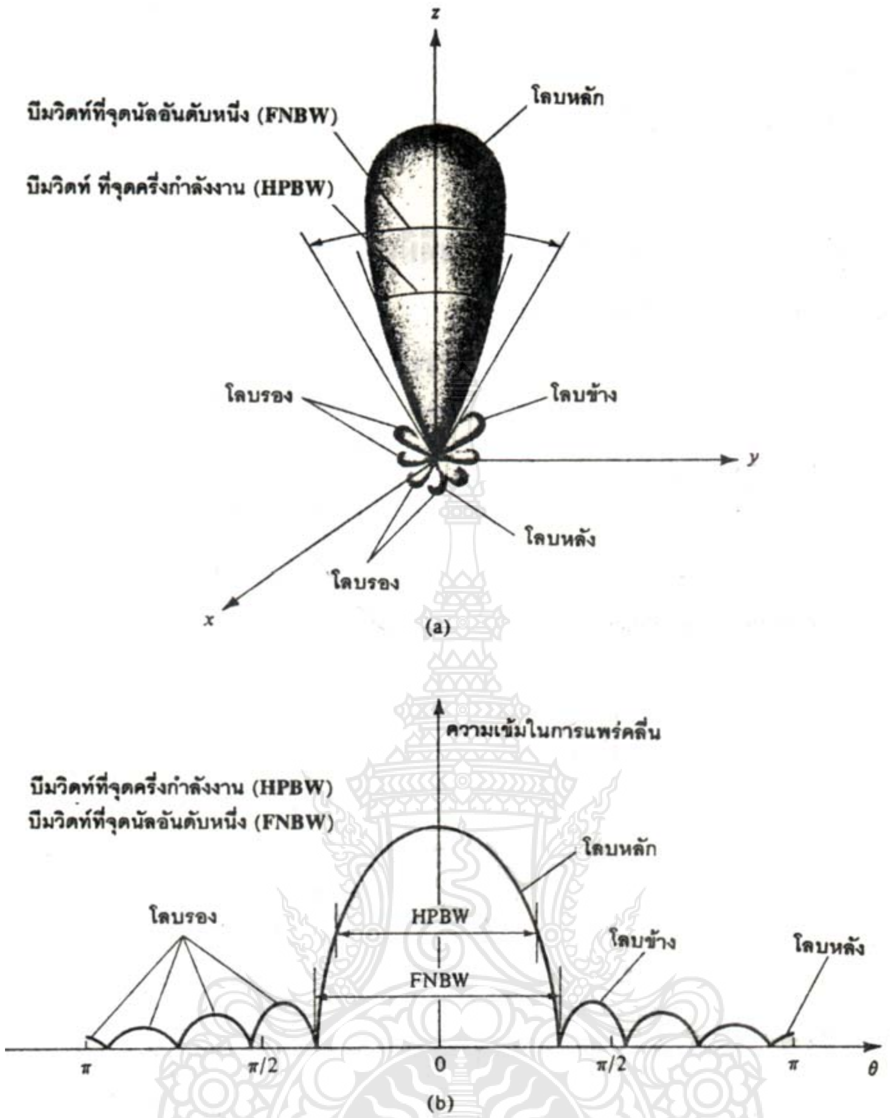


รูปที่ 2.19 แสดงรูปแบบระนาบ E และ H ของสายอากาศแบบ Pyramidal horn

จากรูประนาบ E คือ ระนาบ X-Z (แนวตั้ง ; $\phi = 0$) และระนาบ H คือ ระนาบ X-Y (แนวนอน ; $\theta = \pi/2$)

2.22 ส่วนต่าง ๆ ในรูปแบบการแพร่คลื่น

แต่ละส่วนของรูปแบบการแพร่เรียกว่า โลบ (Lobe) ซึ่งยังแบ่งย่อยเป็นโลบหลัก, โลบรอง, โลบข้าง และโลบหลังอีกด้วยพิจารณาในรูป 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงส่วนต่าง ๆ ของรูปแบบการแพร่คลื่น

(a) แสดงโลบและบีมวิดท์ (แบบ 3 มิติ)

(b) แสดงระดับกำลังคลื่น และโลบต่าง ๆ (แบบ 2 มิติ)

อธิบายจากรูปได้ว่า ความหมายของโลบ คือ ส่วนของรูปแบบการแพร่คลื่นที่มีความเข้มของกำลังคลื่นสูง (รอบ ๆ เป็นความเข้มต่ำ)

ในรูป 2.20 (a) เป็นการเขียนรูปบนแกนโพลาร์ 3 มิติ ที่มีโลบอยู่หลายขนาดส่วนรูป 2.20 (b) เป็นการเขียนในลักษณะแกน 2 มิติ

โลบหลัก (major lobe) หรืออาจเรียกบีมหลัก หมายถึง โลบที่มีการแพร่ไปในทิศทางที่มีการแพร่มากที่สกุด ในรูป 2.20 โลบหลักมีทิศตามจุด $\phi = 0$ สำหรับสายอากาศบางแบบบีมลำคลื่นมากกว่าหนึ่ง จะมีโลบหลักมากกว่าหนึ่งโลบได้

โลบรอง (minor lobe) คือ โลบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่โลบหลัก ในรูป 2.20 (a) และ (b) ทุกโลบยกเว้นโลบหลัก เราระบุเป็นโลบรองได้

โลบข้าง (side lobe) คือ โลบที่อยู่ในทิศทางอื่น นอกเหนือจากทิศทางของโลบหลัก (ทั่วไปแล้วโลบข้างจะอยู่ติดกับโลบหลัก และมีทิศรอบบีมหลัก)

โลบหลัง (back lobe) คือ โลบรองที่มีทิศตรงข้ามกับโลบหลัก (ต่างกัน 180°) เราพบว่าโลบรองจะเกิดในทิศที่ไม่ต้องการเสมอ จึงควรลดขนาดให้น้อยที่สุด สำหรับโลบข้างจัดเป็นโลบรองที่มีขนาดมากที่สุด (ต้องลดขนาดโลบข้างลง)

โดยทั่วไปถ้าระดับของโลกข้างมีค่าประมาณ -20 **dB** หรือน้อยกว่านี้ จะไม่มีผลต่อการใช้งานมากนัก จุดที่รับสัญญาณได้เท่ากับศูนย์ (ถึงแม้จะรีโซแนนซ์กับความถี่ในการส่ง) เรียกว่า นัล (null)

2.23 บทสรุป

เนื้อหาของบทที่ 2 ได้อธิบายถึงพื้นฐานการทำงานของสายอากาศ โดยเฉพาะรูปสัญญาณ (กระแส, แรงดันไฟฟ้า) ที่เกิดบนสายอากาศในขณะรีโซแนนซ์เป็นสำคัญ

ยังมีประเด็นที่น่าสนใจแก่ผู้ศึกษาอีก ได้แก่

- ความยาวทางกายภาพ
- ความยาวทางไฟฟ้า
- อิมพีแดนซ์, ความต้านทานการแพร่คลื่น
- รูปแบบการแพร่คลื่น
- อัตราขยายกำลังของสายอากาศ
- ไดเร็คติวิตี้ (directivity)

ซึ่งความหมายของสิ่งเหล่านี้ใคร่ขอให้ผู้อ่านทำความเข้าใจอย่างถ่องแท้ เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาสายอากาศต่อไป

การทดลองที่ 1

Radiation Pattern and Polarization Measurements

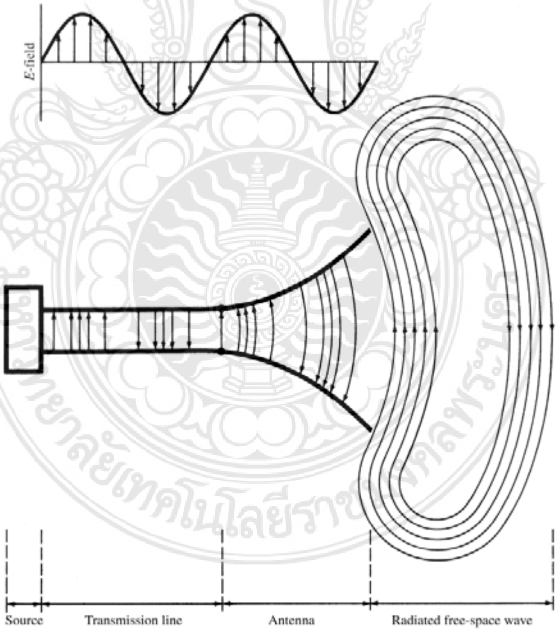
วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจหลักการทำงานของสายอากาศ
2. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจและสามารถใช้งานเครื่องมือทดสอบที่เกี่ยวข้องได้
3. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจและสามารถทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) และการโพลาไรซ์

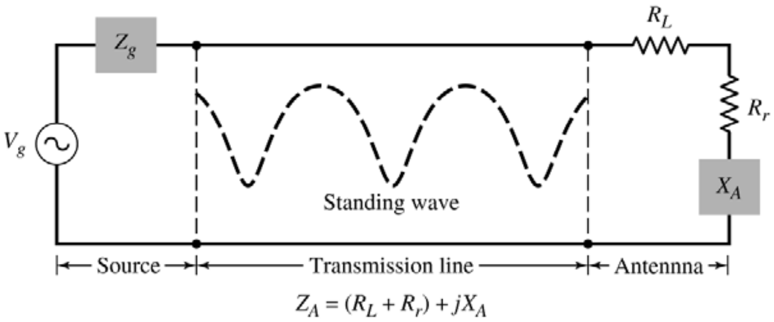
ทฤษฎีเบื้องต้น

สายอากาศ (Antenna)

สายอากาศ คืออุปกรณ์หรือโครงสร้างใดๆที่ใช้ในการการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิด หรือแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างสายนำสัญญาณและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางในอากาศ ดังแสดงใน รูปที่ 1



รูปที่ 1 หลักการของสายอากาศ

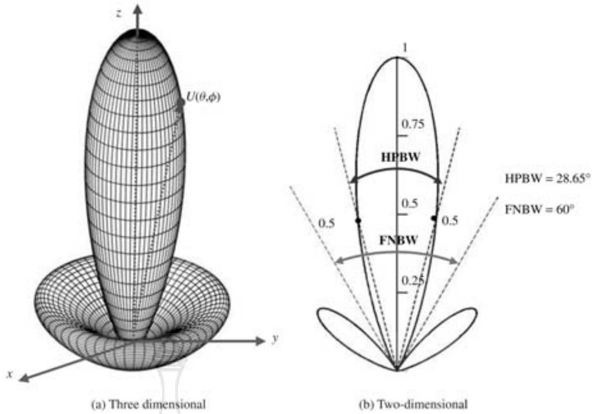
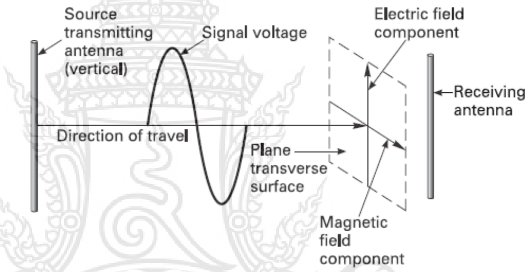
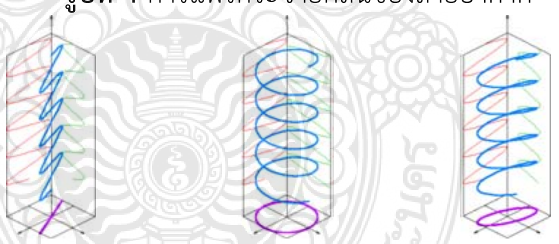


รูปที่ 2 วงจรสมมูลของสายอากาศที่ด้านส่ง (Transmitter)

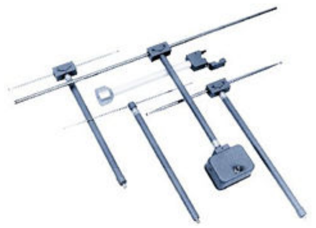
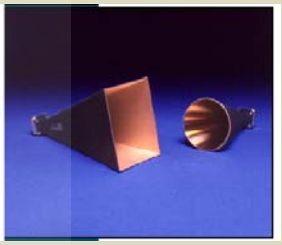
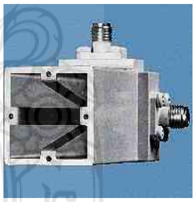
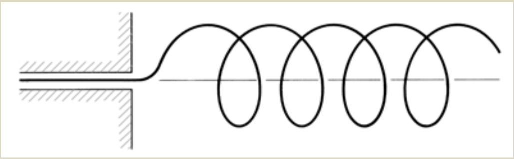
วงจรสมมูลของสายอากาศในด้านส่ง (Transmitter) แสดงในรูปที่ 2 เมื่อกำหนดให้แหล่งกำเนิดคลื่นในอุดมคติมีค่าอิมพีแดนซ์ Z_g ซึ่งต่อเชื่อมกับสายนำสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_o และสายอากาศส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์ Z_A โดยวงจรสมมูลของสายอากาศในอุดมคติประกอบด้วย $Z_A = (R_L + R_r) + jX_A$ เมื่อ R_L คือค่าความต้านทานโหลดของสายอากาศซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าการสูญเสียเนื่องจากความนำไฟฟ้า (Conduction loss) และค่าการสูญเสียจากวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric loss) ซึ่งทั้งสองเกี่ยวข้องโดยตรงกับโครงสร้างสายอากาศและวัสดุที่นำมาสร้างสายอากาศ ขณะที่ R_r คือความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation resistance) ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ขณะที่ X_A คือค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเช่นกัน พารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศแสดงในตารางที่ 1

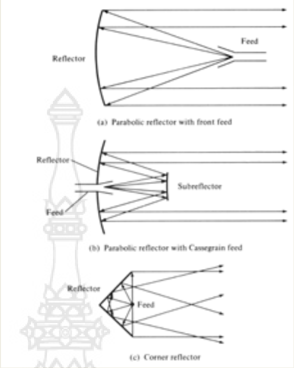
ตารางที่ 1 Antenna parameter

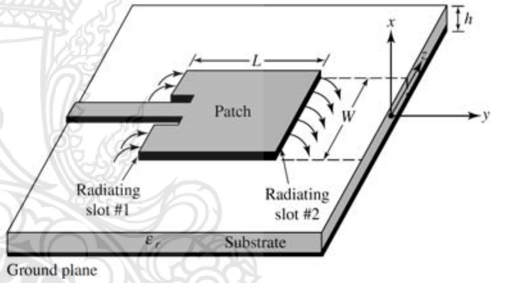
Antenna characteristics	Description
Radiation pattern	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ หรือคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันเปลี่ยนไปตามมุมรอบสายอากาศ
Beamwidth	คือความกว้างลำคลื่น หรือมุมระหว่างองศาที่อยู่ตรงข้ามกันเมื่ออ้างอิงจากจุดสูงสุดของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งความกว้างลำคลื่นที่นิยมใช้บอกคุณสมบัติของสายอากาศประกอบด้วย ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half power beamwidth: HPBW) และ ความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์ครั้งแรก (First null beamwidth: FNBW)

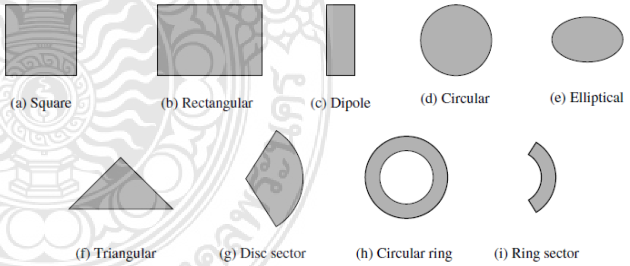
	 **รูปที่ 3** แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น
Polarization	คือทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามเวลา (ในรูปที่ 4) ที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศในทิศทางที่พิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 3 แบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ คือ 1. โพลาไรซ์เชิงเส้น (ก) 2. โพลาไรซ์วงกลม(ข) 3. โพลาไรซ์วงรี (ค)  **รูปที่ 4** การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ  (ก) โพลาไรซ์เชิงเส้น (ข) โพลาไรซ์วงกลม (ค) โพลาไรซ์วงรี **รูปที่ 5** การโพลาไรซ์ของสายอากาศ
Bandwidth	แบนวิดธ์ของสายอากาศคือช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศเมื่อพิจารณาร่วมกับคุณลักษณะบางอย่างของสายอากาศเช่น Impedance bandwidth จะคำนึงถึงค่า VSWR ที่ต้องการของระบบ (ระบบสื่อสารโดยทั่วไปแล้วค่ามีค่าอิมพิแดนซ์ของสายนำสัญญาณ $Z_o =$ 50 โอห์ม) โดยทั่วไปแล้วค่า VSWR < 2 หรือค่า$\|S_{11}\| \approx -10$ dB Polarization bandwidth จะคำนึงถึงค่า Polarization ของสายอากาศที่ต้องการของระบบ Gain bandwidth จะคำนึงถึงค่า gain ของสายอากาศที่ต้องการของระบบเป็นต้น
Side lobe level	คือระดับสูงสุดลำดับที่สองของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นหรือระดับสูงสุดของลำคลื่นข้างเคียง

ตารางที่ 2 ตัวอย่างสายอากาศชนิดต่างๆ

Half-Wavelength Dipoles		
Gain	~ 2.15 dBi	
Radiation pattern	Omnidirectional	
Impedance Bandwidth	Narrow	
Polarization	Linear polarization	
Standard Gain Horn		
Gain	10~25 dBi	
Radiation pattern	Unidirectional	
Impedance Bandwidth	Wideband	
Polarization	Linear polarization	
Ridge Horn		
Gain	0 to20 dBi	
Radiation pattern	Unidirectional	
Impedance Bandwidth	Broadband	
Polarization	Linear polarization	
Helical antenna		
Gain:	2 to 10 dBi	
Radiation pattern	Omnidirectional, Unidirectional	
Impedance Bandwidth	Wideband	
Polarization	Circular polarization	
Loop antenna		
Gain	~2.2 dBi	

<table>
<tr><td>Radiation pattern</td><td>Omnidirectional</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td>Impedance Bandwidth</td><td>Narrow band</td></tr>
<tr><td>Polarization</td><td>Linear polarization</td></tr>
<tr><td colspan="2">Reflector antenna</td><td rowspan="5">

</td></tr>
<tr><td>Gain</td><td>High Gain (>10dBi)</td></tr>
<tr><td>Radiation pattern</td><td>Unidirectional</td></tr>
<tr><td>Impedance Bandwidth</td><td>Wideband (depends on feed element)</td></tr>
<tr><td>Polarization</td><td>Linear, circular polarization</td></tr>
<tr><td colspan="2">Microstrip antenna</td><td rowspan="5">

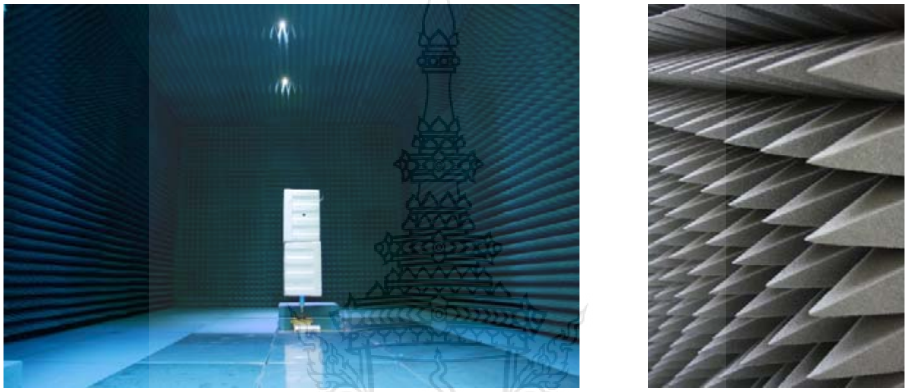

</td></tr>
<tr><td>Gain</td><td>~0-8 dBi</td></tr>
<tr><td>Radiation pattern</td><td>Unidirectional</td></tr>
<tr><td>Impedance Bandwidth</td><td>Narrow band or wideband</td></tr>
<tr><td>Polarization</td><td>Linear, circular, elliptical polarization</td></tr>
</table>

เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

1. Network analyzer 1 เครื่อง
2. Signal generator 1 เครื่อง
3. Spectrum analyzer 1 เครื่อง
4. ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Anechoic Microwave Chamber)

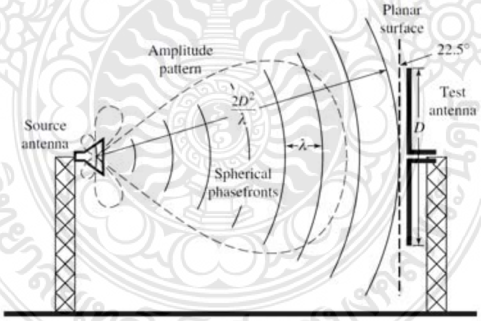
(ก) Network analyzer (ข) Signal generator (ค) Spectrum analyzer

รูปที่ 6 เครื่องมือทดสอบ

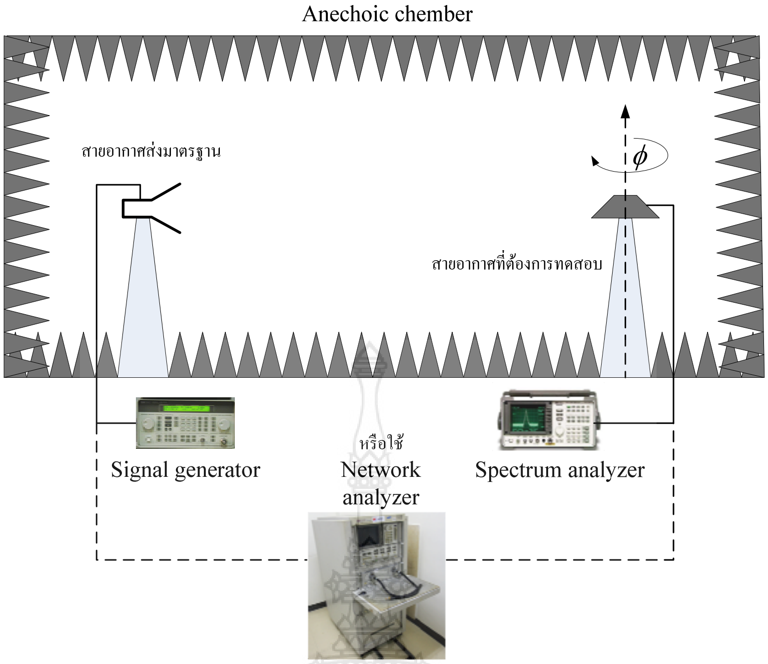


(ก) ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (ข) วัสดุดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปที่ 7 ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Anechoic Chamber) สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รูปที่ 8 ระยะทดสอบสายอากาศ $\frac{2D^2}{\lambda}$



รูปที่ 9 การทดสอบสายอากาศ

ลำดับขั้นการทดลอง

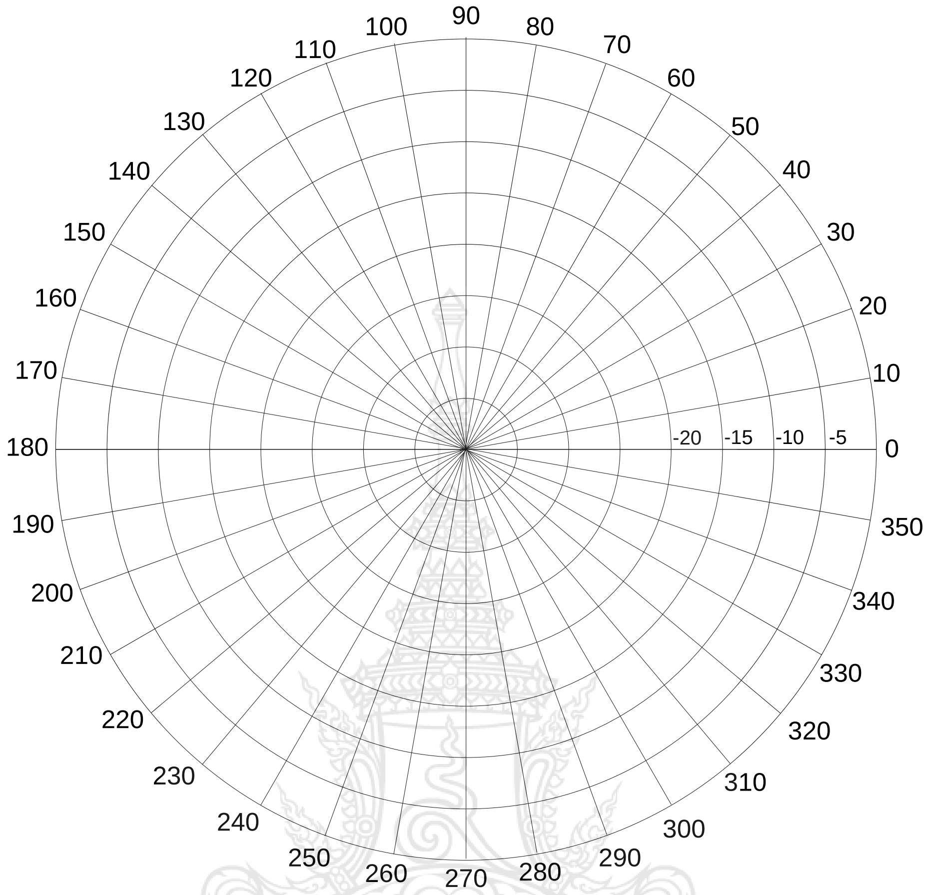
การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 9 ประกอบด้วยสายอากาศส่ง และสายอากาศรับซึ่งเป็นสายอากาศที่ต้องการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Antenna Under Test: AUT)
2. เชื่อมต่อสายนำสัญญาณจากสายอากาศส่งและสายอากาศรับเข้ากับเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณตามลำดับ กำหนดความถี่ทดสอบที่ 2.4GHz
3. บันทึกค่า amplitude ที่เครื่องรับสัญญาณทุกๆ องศาของการหมุนมุม ϕ ของสายอากาศรับ โดยระยะทดสอบสายอากาศต้องมีระยะไม่ต่ำกว่า $\frac{2D^2}{\lambda}$ เมื่อ D คือขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศที่ทำการทดสอบ บันทึกตามตารางที่ 3
4. วาดกราฟบน Polar graph ในรูปที่ 10

ตารางที่ 3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

Angle ϕ	Value
0	
10	
20	
30	
40	
50	

60	
70	
80	
90	
100	
110	
120	
130	
140	
150	
160	
170	
180	
190	
200	
210	
220	
230	
240	
250	
260	
270	
280	
Angle ϕ	Value
290	
300	
310	
320	
330	
340	
350	
360	

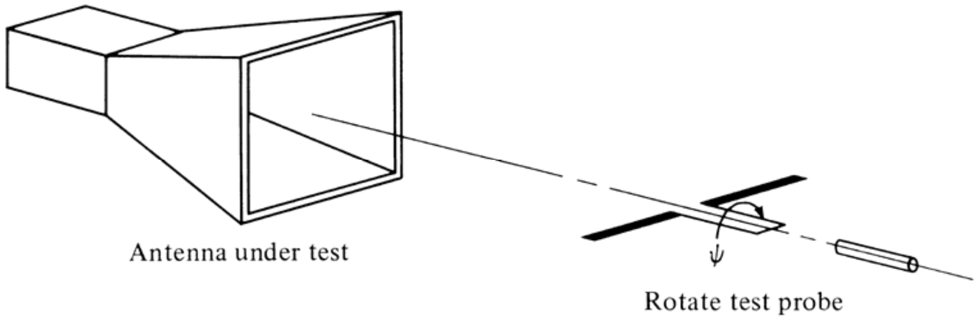


รูปที่ 10 Polar graph (Amplitude ที่เปลี่ยนไปตามมุม ϕ)

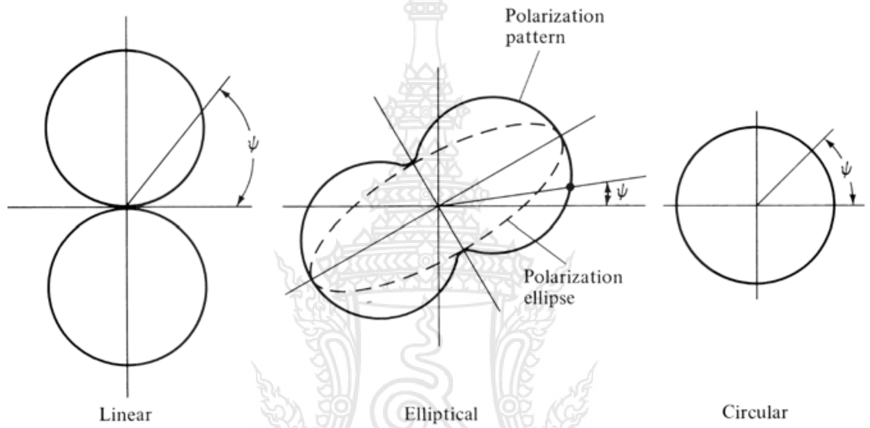
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ....

การทดสอบโพลาไรซ์ของสายอากาศ

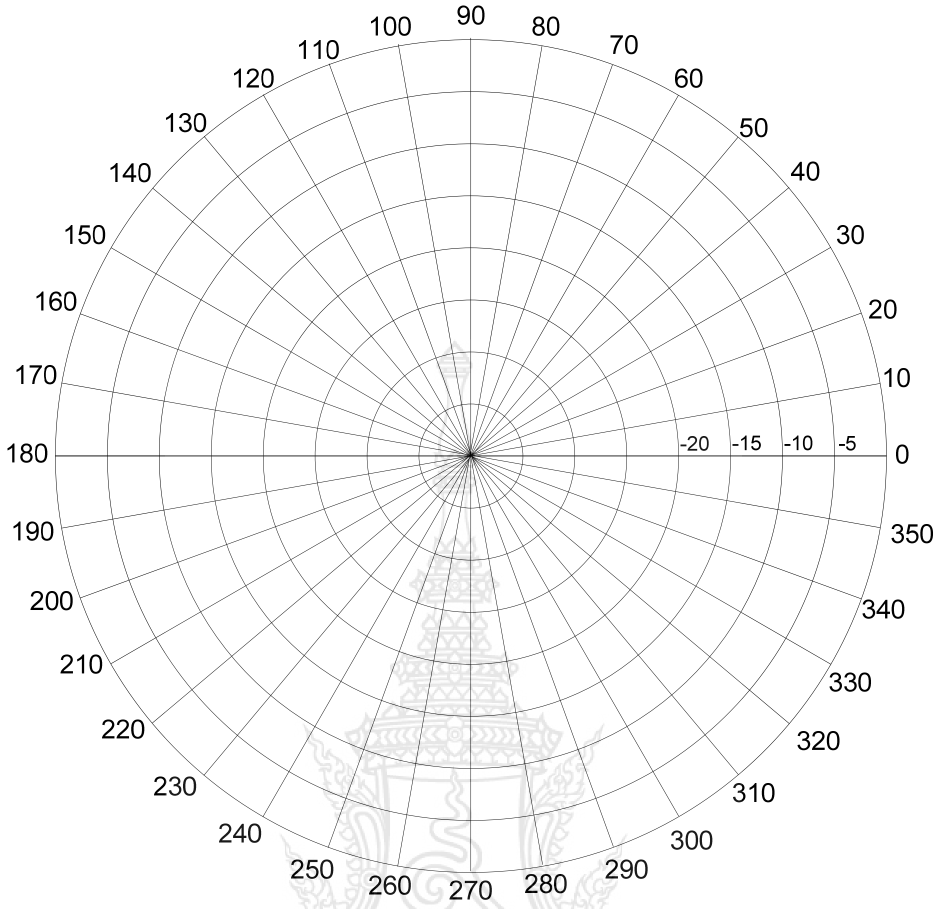
1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 11 ประกอบด้วยสายอากาศส่ง และสายอากาศรับซึ่งเป็นสายอากาศที่ต้องการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Antenna Under Test: AUT)
2. เชื่อมต่อสายนำสัญญาณจากสายอากาศส่งและสายอากาศรับเข้ากับเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณตามลำดับ
3. กำหนดความถี่ทดสอบที่ 2.4 GHz จากนั้นบันทึกค่า amplitude ที่เครื่องรับสัญญาณทุกๆ องศาของการหมุนมุม ψ ของสายอากาศส่ง บันทึกตามตารางที่ 4
4. จากนั้นเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับแบบรูป amplitude ที่เปลี่ยนไปตามมุม ψ ในรูปที่ 12
5. วาดกราฟบน Polar graph ในรูปที่ 13



รูปที่ 11 การทดสอบโพลาไรซ์ของสายอากาศ



รูปที่ 12 แบบรูป amplitude ที่เปลี่ยนไปตามมุม ψ



รูปที่ 13 Polar graph (Amplitude ที่เปลี่ยนไปตามมุม ψ)

ตารางที่ 4 การทดสอบโพลาไรซ์ของสายอากาศ

Angle ψ	Value
0	
45	
90	
135	
180	
225	
270	
315	
360	

สายอากาศที่ทำการทดสอบมีโพลาไรซ์แบบ ....

คำถามและบททดสอบ

1. จงอธิบายระนาบหลัก (Principal plane) ของสายอากาศ
2. จงอธิบายหลักการโพลาไรซ์ของสายอากาศ
3. ถ้าสายอากาศส่งมีโพลาไรซ์วงกลม สายอากาศรับโพลาไรซ์เชิงเส้นจะเกิดผลอย่างไร
4. จงอธิบายความหมายของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half- Power Beamwidth)

เอกสารอ้างอิง

1. C.A Balanis, “Antenna Theory Analysis and Design”, John Wiley&Sons, Inc., 2005.
2. C.A. Balanis, “Advanced Engineering Electromagnetics”, John Wiley&Sons, Inc., 2012.

การทดลองที่ 2

Antenna Gain Measurement

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจพารามิเตอร์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศ
2. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจและสามารถใช้งานเครื่องมือทดสอบที่เกี่ยวข้องได้
3. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจและสามารถทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ

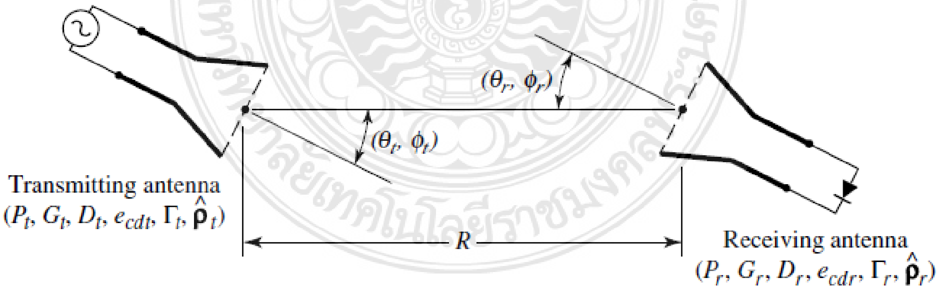
ทฤษฎีเบื้องต้น

5.1 อัตราขยายสายอากาศ (Antenna Gain)

อัตราขยายของสายอากาศหมายถึงความสามารถในการส่งหรือรับคลื่นของสายอากาศต้นแบบเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศมาตรฐาน โดยอัตราขยายของสายอากาศเป็นตัวกำหนดความเข้มการแพร่กระจายคลื่นที่ชี้ทิศทาง รวมไปถึงประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่น

5.2 ระบบสายอากาศ

ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบการติดต่อสื่อสารจำเป็นต้องใช้สมการการส่งผ่านของฟรีส สำหรับสมการการส่งผ่านของฟรีสจะเกี่ยวข้องกับกำลังงานภาครับไปถึงกำลังงานในการส่งผ่านระหว่างสายอากาศทั้งสอง ที่มีระยะห่างเป็น $R > 2D^2/\lambda$ โดยที่ D เป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งแสดงถึงการส่งผ่านของสายอากาศในช่องว่างอิสระ



รูปที่ 1 การส่งผ่านและการรับของระบบสายอากาศในช่องว่างอิสระสำหรับสมการการส่งผ่านฟรีส

สำหรับอัตราส่วนของกำลังงานด้านรับต่อกำลังด้านส่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1

$$\frac{P_r}{P_t} = e_t e_r \frac{\lambda^2 D_t(\theta_t,\phi_t) D_r(\theta_r,\phi_r)}{(4\pi R)^2} \quad (1)$$

e_t คือ ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศด้านส่ง

e_r คือ ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศด้านรับ

จากสมการที่ 1 เป็นการแสดงอัตราส่วนกำลังงานด้านรับต่อกำลังด้านส่งเมื่อกำหนดให้สายอากาศรับและสายอากาศส่งแมตช์กับโหลดที่นำมาต่อ (ประสิทธิภาพการสะท้อนมีค่าเท่ากับ 1) และมีการโพลาไรซ์เดียวกัน (องค์ประกอบการสูญเสียโพลาไรซ์ =1) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการพิจารณาถึงการสูญเสียที่เกิดจากการไม่แมตช์ระหว่างสายอากาศกับโหลดที่นำมาต่อและการโพลาไรซ์ที่แตกต่างกัน จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2

$$\frac{P_r}{P_t} = e_{cdt} e_{cdr} \left(1-|\Gamma_t|^2\right)\left(1-|\Gamma_r|^2\right)\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 D_t(\theta_t,\phi_t) D_r(\theta_r,\phi_r) |\hat{\rho}_t \cdot \hat{\rho}_r|^2 \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 เมื่อสายอากาศวางในแนวเดียวกันและมีโพลาไรซ์เดียวกันจะสามารถแสดงได้ในสมการที่ 3

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 G_{0t} G_{0r} \quad (3)$$

หรือ

$$(G_{0t})_{dB} + (G_{0r})_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_r}{P_t}\right) \quad (4)$$

ถ้ากำหนดให้สายอากาศตัวส่งและตัวรับเหมือนกันจะได้ดังสมการที่ 5

$$(G_{0t})_{dB} = (G_{0r})_{dB} = 0.5\left(20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_r}{P_t}\right)\right) \quad (5)$$

โดยที่

P_r คือ กำลังงานด้านรับ

P_t คือ กำลังงานด้านส่ง

$\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2$ คือ การสูญเสียในช่องว่างอิสระ (Free-space loss)

R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวรับและตัวส่ง

G_{0t} คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง

G_{0r} คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ

ตารางที่ 1 Antenna parameter

Antenna parameters	Description
Directivity	ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ (Directivity: $D(\theta,\phi)$) คือ อัตราส่วนความเข้มการแพร่กระจายคลื่น ($U(\theta,\phi)$) ในทิศทางที่พิจารณาหรือทิศทางที่กำหนดจากสายอากาศต่อความเข้มการแพร่กระจายคลื่นเฉลี่ยรวมทุกทิศทุกทาง (U_0) โดยที่ความเข้มการแพร่กระจายคลื่นเฉลี่ยรวมทุกทิศทุกทางคือกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดที่แพร่กระจายจากสายอากาศ ($P_{rad.}$) หารด้วย 4π $$D(\theta,\phi)=\frac{U(\theta,\phi)}{U_0}=\frac{4\pi U(\theta,\phi)}{P_{rad.}}$$
Gain and Efficiency	$G(\theta,\phi)=e_o D(\theta,\phi)$ เมื่อ $e_o=e_r e_c e_d$ โดยที่ e_o คือ ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (Total efficiency) e_r คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศเนื่องจากการสะท้อนที่ขั้ว (Reflection efficiency) หาได้จาก $e_r=(1-\lvert\Gamma\rvert^2)$ e_c คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศเนื่องจากความนำไฟฟ้า (Conduction efficiency) e_d คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศเนื่องจากความเป็นไดอิเล็กตริก (Dielectric efficiency)

เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

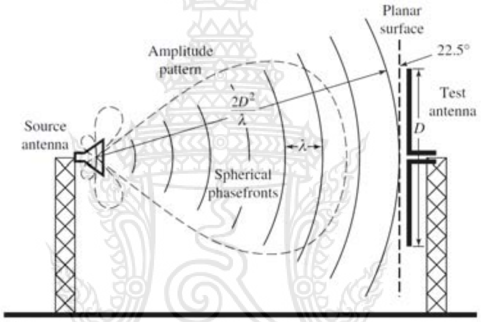
1. Network analyzer 1 เครื่อง
2. สายอากาศ 2 ตัว
3. ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Anechoic Microwave Chamber)

(ก) Network analyzer

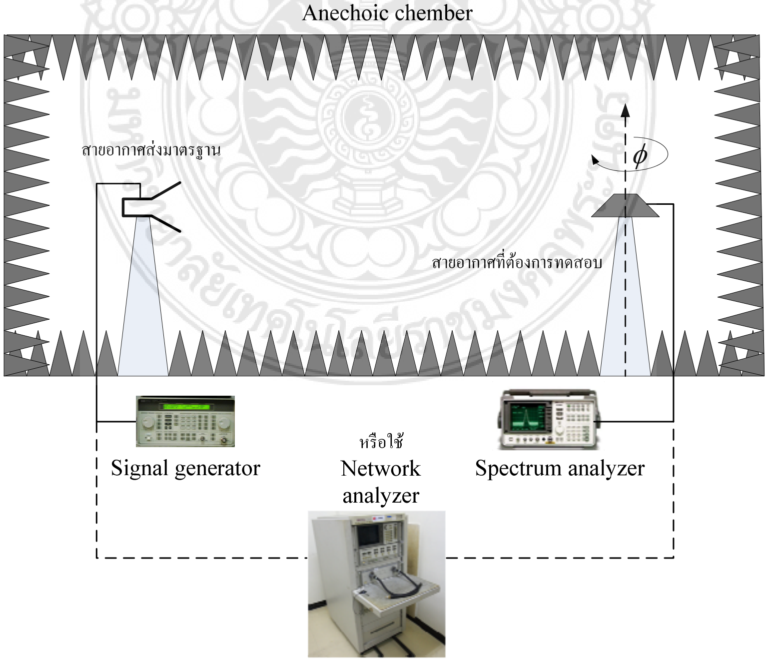
(ข) ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น

(ค) วัสดุดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปที่ 2 ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Anechoic Chamber) สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รูปที่ 3 ระยะทดสอบสายอากาศ $\frac{2D^2}{\lambda}$



รูปที่ 4 การทดสอบสายอากาศ

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ ๔ ประกอบด้วยสายอากาศส่ง และสายอากาศรับ ซึ่งทั้งสองเป็นสายอากาศที่ต้องการทดสอบและจะต้องเป็นแบบเดียวกัน (Identical)
2. เชื่อมต่อสายนำสัญญาณจากสายอากาศส่งและสายอากาศรับเข้ากับเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณตามลำดับ กำหนดความถี่ทดสอบที่ 2.4 GHz
3. บันทึกค่า amplitude ที่เครื่องรับสัญญาณที่มุมด้านหน้ามุมเดียว จากนั้นคำนวณตามสูตรด้านล่าง

$$G_{0t}(dB) = G_{0r}(dB) = 0.5\left[20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_r}{P_t}\right)\right]$$

เมื่อ R คือระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ

อัตราการขยายของสายอากาศ (Antenna Gain) มีค่า...

เอกสารอ้างอิง

1. C.A Balanis, “Antenna Theory Analysis and Design”, John Wiley&Sons, Inc., 2005.
2. C.A. Balanis, “Advanced Engineering Electromagnetics”, John Wiley&Sons, Inc., 2012.

ภาคผนวก จ

ตัวอย่างแผนการสอน ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป

บทเรียนที่ 1 การเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ

แผนการสอน

หน่วยเรียนที่ 1 คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ จำนวน 3 ชั่วโมง
บทเรียน 11 การเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ

จุดประสงค์การสอน

1.1 เข้าใจหลักการเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ

1.1.1 อธิบายคุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศ

1.1.2 คำนวณความยาวทางไฟฟ้า

1.1.3 อธิบายปรากฏการณ์รูปแบบการแพร่คลื่น อัตราขยาย และไดเร็คติวิตี้

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. ขั้นกำหนดปัญหา

อาจารย์นำอภิปรายเรื่องการเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศนักศึกษาร่วมแสดงความรู้ประสบการณ์ และศึกษาใบความรู้เรื่องการเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศและสมาชิกในกลุ่มช่วยกันเลือกประเด็นความรู้ที่ยังคลุมเครือ

2. ขั้นทำความเข้าใจกับปัญหา

นักศึกษาแต่ละกลุ่มร่วมกันอภิปรายประเด็นปัญหาที่ตั้งขึ้น ว่ามีประเด็นใดบ้างที่น่าสนใจและจะหาคำตอบได้จากที่ใด โดยวิธีการใด โดยให้นักศึกษาร่วมกันวางแผนการดำเนินการศึกษาค้นคว้าตามประเด็นปัญหาที่ต้องการศึกษา

3. ขั้นดำเนินการศึกษาค้นคว้า

ประธานกลุ่มแบ่งหน้าที่การศึกษาค้นคว้าให้สมาชิกไปศึกษาค้นคว้าจากแหล่งเรียนรู้ต่าง ๆ ตามความถนัดและความสามารถ เช่น หนังสือจากห้องสมุด วารสาร เว็บไซต์ต่าง ๆ ซึ่งประธานกลุ่มต้องกำหนดเวลาในการค้นคว้าให้ชัดเจนเพื่อการรวบรวมงานได้เร็วขึ้น (ไม่ควรเกิน 1 ชั่วโมง) จากนั้นสมาชิกทุกคนนำความรู้ที่ได้จากแหล่งเรียนรู้ต่าง ๆ มาสรุปและส่งให้เลขานุการกลุ่มดำเนินการสรุปและประชุมเพื่อหาแนวทางเรียนรู้ประเด็นปัญหาให้ชัดเจนมากขึ้น

4. ขั้นสังเคราะห์ความรู้

สมาชิกในกลุ่มนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาค้นคว้ามาแลกเปลี่ยนเรียนรู้กันในกลุ่ม จากนั้นรวมกันพิจารณาความรู้ที่ได้มามีความถูกต้อง สมบูรณ์และครบถ้วนตามประเด็นที่ต้องการศึกษาแล้วหรือไม่ หากยังไม่เพียงพอให้ร่วมกันอภิปรายและศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม

เมื่อได้ข้อมูลที่เพียงพอแล้ว ให้นักศึกษาทำแบบฝึกหัดครั้งที่ 1 เรื่อง การเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ

5. ขั้นสรุปและประเมินค่าคำตอบ

นักศึกษาทุกกลุ่มร่วมกันนำเสนอข้อมูลที่สังเคราะห์ได้ และร่วมกันอภิปรายว่าข้อมูลของแต่ละกลุ่มที่ได้ศึกษาค้นคว้ามาครบถ้วน ถูกต้อง สมบูรณ์หรือไม่ โดยอาจารย์ช่วยตรวจสอบและแนะนำเพิ่มเติม จากนั้นนักศึกษาทุกคนช่วยกันสรุปองค์ความรู้ในภาพรวมของปัญหาอีกครั้ง

6. ขั้นนำเสนอและประเมินผลงาน

นักศึกษาแต่ละกลุ่มร่วมกันออกแบบการสรุปผลการดำเนินการศึกษาค้นคว้าของกลุ่ม เพื่อนำเสนอหน้าห้องเรียนตามรูปแบบที่นักศึกษาสนใจ โดยให้นักศึกษาส่งตัวแทนสมาชิกในกลุ่มออกมานำเสนอผลการดำเนินการศึกษาค้นคว้าและให้นักศึกษาทุกคนร่วมกันประเมินทั้งงานของกลุ่มตนเองและของเพื่อน

สื่อการสอน/อุปกรณ์การสอน

1. ชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ
2. กระดานไวท์บอร์ด
3. เครื่องฉายโปรเจ็คเตอร์
4. ข้อมูล/ตัวอย่างจากอินเตร์เน็ต
5. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น แท็ปเล็ต สมาร์ทโฟน วิทยุ ฯลฯ

การวัดผล

1. การประเมินกระบวนการทำงาน/บทบาทในการทำกิจกรรม
2. การประเมินการบ้าน
3. การเข้าชั้นเรียน/การเข้าร่วมกิจกรรม

หัวข้อบรรยายและเนื้อหาสาระ

ตามชุดเรียนปฏิบัติการสำเร็จรูป เรื่อง การเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ โดยมีหัวข้อบรรยาย ดังนี้

1. คุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศ
2. ความยาวทางไฟฟ้า
3. รูปแบบการแพร่คลื่น อัตราขยาย และไดเร็คติวิตี้

แบบฝึกหัด/งานที่ได้รับมอบหมาย

ตามแบบฝึกหัดครั้งที่ 1 เรื่อง การเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ

เฉลยแบบฝึกหัด

ตามเฉลยแบบฝึกหัดครั้งที่ 1 เรื่อง การเรียนรู้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสายอากาศ

2.1 กล่าวนำ

ในระบบสื่อสารวิทยุ หรือระบบกระจายเสียง และสัญญาณโทรทัศน์ มีหลักคล้ายกันอยู่ คือ การมอดดูเลทคลื่นพาหะเข้ากับสัญญาณเดิม เพื่อให้เกิดรูปแบบสัญญาณที่เหมาะในการส่งไปในชั้นบรรยากาศได้ (ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) โดยใช้**สายอากาศส่ง** และในการรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเราใช้**สายอากาศรับ**

ความแตกต่างที่เห็นได้ชัดระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับในการใช้งานจริง ๆ คือ ค่ากำลังคลื่นที่เกี่ยวข้องสายอากาศนั้นต่างกันมาก

ยกตัวอย่างเช่น สายอากาศส่งสามารถกระจายส่งกำลังคลื่นได้ถึงหลายร้อยกิโลวัตต์ใน ขณะที่สายอากาศรับมีกำลังคลื่นเพียงไม่กี่มิลลิวัตต์ไหลวนอยู่

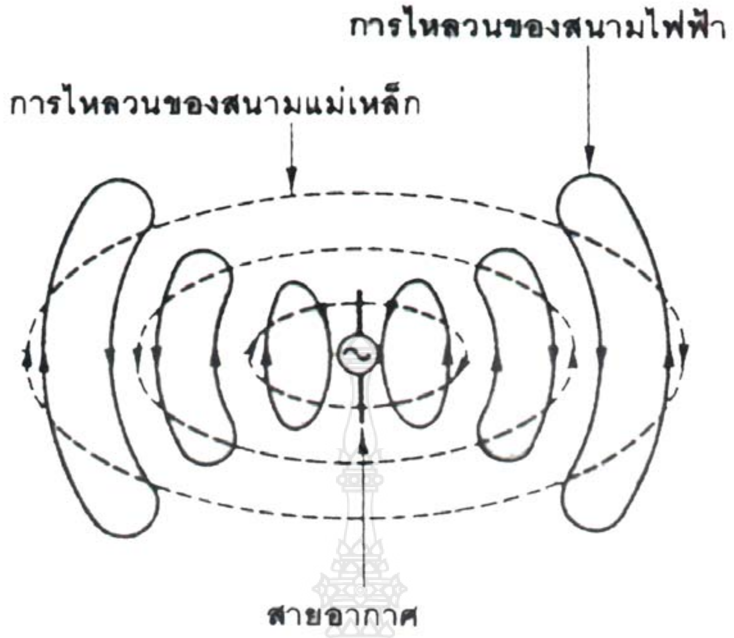
นอกจากนี้สายอากาศส่งต้องมีคุณสมบัติสำคัญคือ แม็ชท์กับสายนำสัญญาณเพื่อให้กำลังงานมากที่สุดผ่านเข้าสายอากาศ ส่วนในสายอากาศรับต้องมีค่าอัตราขยายให้มากที่สุด (รวมทั้งค่าไดเร็คติวิตี้) และมีไซด์โลบน้อยที่สุดด้วย

2.2 การแพร่กระจายสัญญาณจากสายอากาศ

เมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำ จะเกิดสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำที่มีทิศทางตามทิศทางของกระแส ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของกระแสเกิดขึ้น สนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนตามไปด้วยและจากการทดลองพบว่า สนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงจะสร้างสนามไฟฟ้าให้มีขึ้นมา (ซึ่งถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้าจะไม่เกิดขึ้น)

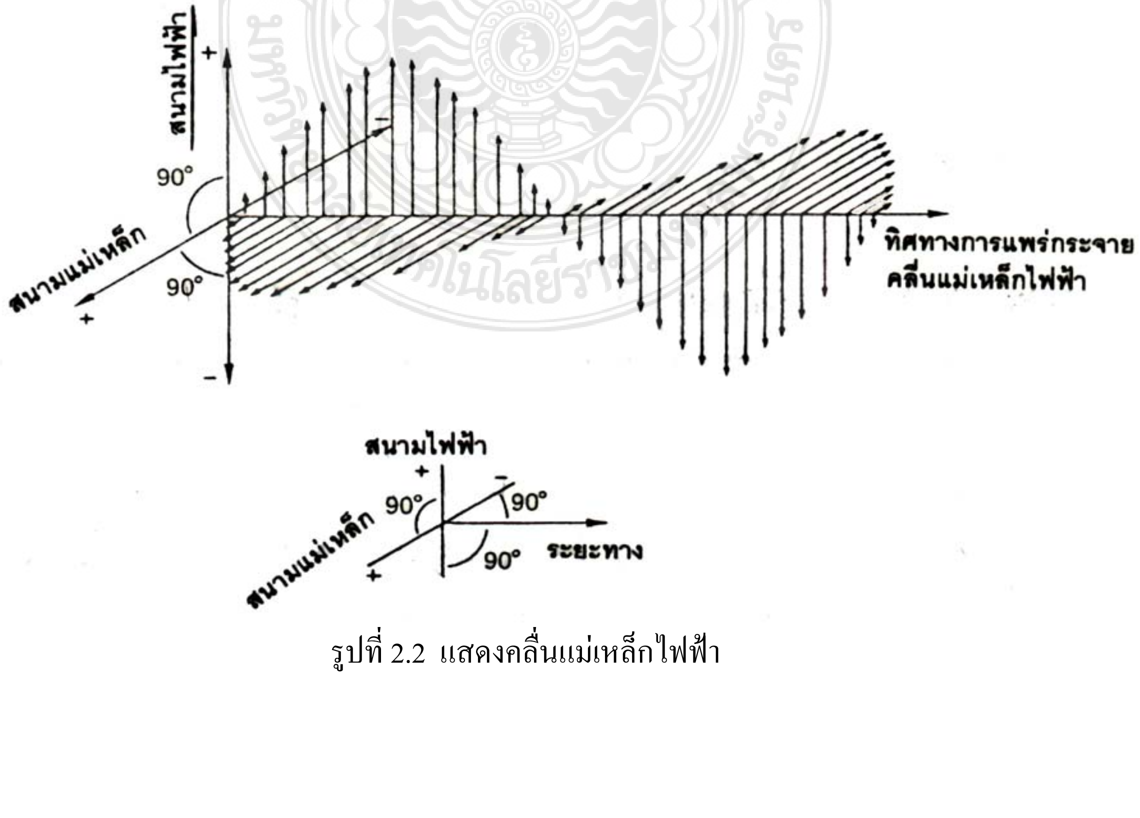
ส่วนทิศทางของสนามไฟฟ้า พิจารณาจากกฎของเลนซ์ (Lenz's Law) หรือกฎมือขวานั่นเอง ทำนองเดียวกันการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ทำให้พิจารณาได้ว่า ถ้าป้อนกระแสไฟสลับ (A.C.) ผ่านลวดตัวนำจะทำให้เกิดทั้งสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กขึ้น

กำหนดให้ใช้กระแสรูปสัญญาณไซน์ผ่านเข้าลวดตัวนำ พบว่าทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามคลื่นไซน์ด้วย โดยทั้งสองสนามแพร่ออกมาจากลวดตัวนำด้วยความเร็วแสง (ประมาณ 3×10^{8} เมตร/วินาที) ดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศ

พลังงานที่แพร่กระจายไปมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มในค่าความถี่ เราเรียกพลังงานส่วนนี้ว่า สนามพลังงานที่แพร่กระจาย ซึ่งอยู่ในรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อวิเคราะห์แล้วพบว่า สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าทำมุมฉากซึ่งกันและกัน รวมทั้งยังทำมุมฉากกับทิศทางการแพร่กระจายดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ระนาบที่มีสนามไฟฟ้าและมีทิศตามการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเรียกว่าระนาบโพลาไรเซชั่นของคลื่น

ตัวอย่างเช่น ถ้าสนามไฟฟ้าอยู่ในระนาบแนวดิ่ง (หรือแนวตั้ง) สนามแม่เหล็กอยู่ในระนาบแนวราบ กล่าวได้ว่าคลื่นมีโพลาไรเซชั่นในแนวดิ่ง

ส่วนคลื่นในโพลาไรเซชั่นแนวดิ่งจะเหนี่ยวนำให้ลวดตัวนำที่อยู่แนวดิ่งเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้น เพราะว่ามีสนามแม่เหล็กตัวผ่านลวดตัวนำ และไม่มีผลต่อลวดตัวนำในแนวราบ

เมื่อวิเคราะห์ถึงภายในสายอากาศพบว่ามีสนามพลังงานเกิดขึ้น 2 อย่างดังนี้

- **สนามพลังเหนี่ยวนำ** แทนพลังงานส่วนที่ไหลอยู่ภายในสายอากาศ และไม่แพร่กระจายออกไป

- **สนามพลังที่แพร่กระจาย** แทนส่วนที่แพร่จากสายอากาศไป ที่มีปริมาณเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ของคลื่น และเป็นสัดส่วนกลับกันของระยะทางที่ไกลจากสายอากาศออกไป พบว่า ในระยะใกล้กับสายอากาศมาก ๆ มีปริมาณของสนามพลังเหนี่ยวนำมากกว่า แต่ที่ระยะทางไกลกว่า $\frac{\lambda}{2\pi}$ จากสายอากาศนั้น ค่าสนามพลังที่แพร่กระจายมีมากกว่า (λ แทนความยาวคลื่นของสัญญาณจากสายอากาศ)

เราแทนขนาดหรือแอมปลิจูดของสนามไฟฟ้า โดยใช้อักษร E

ขนาดหรือแอมปลิจูดของสนามแม่เหล็ก โดยใช้อักษร H

และค่าอัตราส่วนระหว่างความเข้มของสนามไฟฟ้าต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กว่าค่าอิมพีแดนซ์ของภาวะสุญญากาศ คิดจากสูตรคำนวณนี้

$$\frac{E(V/m)}{H(At/m)} = 120\pi = 377\Omega$$

โดยทั่วไป เราหาขนาดของคลื่นวิทยุในเทอมของความเข้มสนามไฟฟ้า

ตัวอย่างการคำนวณ

ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ระยะ 10 กิโลเมตร จากสายอากาศส่งมีค่า 0.053 At/Km ให้คำนวณหาความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ระยะ 50 กิโลเมตร จากสายอากาศส่งในทิศทางเดียวกัน

คำตอบ

จากค่าคงที่ E/H = 377 โอห์ม

จะได้ $E = 377\,H = \frac{377 \times 0.053}{10^3} = 20 \quad mV/m$

ที่ 50 km จากสายอากาศ คำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าได้ว่า

E = 20/5 = 4 mV/m

2.3 หลักการของสายอากาศ

สายอากาศจัดเป็นวงจรไฟฟ้าแบบพิเศษได้

ในวงจรไฟฟ้าธรรมดา ขนาดของขดลวด, ตัวเก็บประจุไฟฟ้า และอุปกรณ์อื่น ๆ จะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของค่าความถี่ที่ใช้ และพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่ก็ยังคงอยู่ภายในวงจร เพื่อนำไปใช้งานให้มีประสิทธิภาพหรือแปลงออกมาในรูปความร้อน

แต่ถ้าขนาดของตัวนำหรืออุปกรณ์มีขนาดพอเหมาะ เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นพบว่ามีพลังงานบางส่วนออกไปจากวงจรในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และถ้าวงจรนั้นถูกออกแบบให้พลังงานส่วนใหญ่ของวงจรถูกแพร่ออกไป เราแทนวงจรชนิดนี้ว่าสายอากาศ (antenna)

โดยทั่วไปสายอากาศประกอบด้วยตัวนำในหลายรูปแบบ ส่วนใหญ่แล้วมักใช้ลวดตัวนำ (wire) มีบางแบบที่ใช้แท่งตัวนำ (rod) หรือท่อตัวนำ(rube)

ในบทนี้ความหมายของลวดตัวนำ “wire” หมายถึง ตัวนำชนิดที่มีขนาดของภาคตัดขวางเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาวของมัน

ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกจากลวดตัวนำ มีค่าขึ้นกับความยาวของลวดตัวนำกับขนาดของกระแสที่ไหลอยู่ภายใน นอกจากนี้ยังขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมลวดตัวนำด้วย แต่จะเป็นการสะดวกมากกว่าถ้าเราวัดในรูปของกระแส

อาจกล่าวได้ว่าความเข้มสนามเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของกระแส

ดังนั้นจึงต้องให้มีกระแสในขนาดมาก เท่าที่เป็นไปได้ผ่านลวดตัวนำเพื่อให้เกิดกำลังส่งปริมาณมากขึ้น

ในวงจรทั่วไปจะประกอบด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ ค่าความต้านทานและค่ารีแอ็กแตนซ์ (reactance) เป็นค่าทางเชิงซ้อนของอิมพีแดนซ์ในวงจรกระแสสลับ

พบว่าถ้าค่ารีแอ็กแตนซ์มีน้อยลงจนหมดไป ทำให้ปริมาณกระแสในวงจรมีค่ามากที่สุด หรือในอีกแง่หนึ่งเรียกว่า วงจรรีโซแนนซ์ (resonant) ที่ความถี่ใช้งาน เช่นเดียวกับกรณีของสายอากาศ เมื่อกระแสที่ไหลผ่านมีค่ามากที่สุดทำให้มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุด นั่นคือสายอากาศถูกรีโซแนนซ์

สำหรับวงจรธรรมดาแล้ว ค่าความเหนี่ยวนำ (inductance) มักมีอยู่ในขดลวดหรือคอยล์, ค่าประจุไฟฟ้า (capacitance) มีอยู่ในตัวเก็บประจุ และค่าความต้านทานมีอยู่ในตัวต้านทานเราเรียกวงจรลักษณะนี้ว่า มีค่าคงที่แบบเอกเทศ (lumped constant คือแยกกันไป)

แต่ในสายอากาศค่าความเหนี่ยวนำ, ค่าประจุไฟฟ้า และค่าความต้านทานมีอยู่กระจายผสมไปทั่วลวดตัวนำ เราเรียกวงจรลักษณะนี้ว่ามีค่าคงที่แบบกระจาย (distributed constant) ซึ่งวงจรที่มีค่าคงที่แบบนี้มักใช้ตัวนำที่เป็นเส้นตรง และมักนิยมเรียกกันว่า วงจรลิเนียร์ (linear circuits)

2.4 รีโซแนนซ์ในวงจรลิเนียร์

ขนาดสั้นที่สุดของลวดตัวนำที่รีโซแนนซ์ ที่ความถี่ใช้งานมีค่าเท่ากับความยาวที่เพียงพอให้สนามไฟฟ้า เดินทางจากปลายหนึ่งไปปลายอีกด้าน และกลับมาที่จุดเดิมภายในเวลาหนึ่งไซเคิล

ถ้าความเร็วที่เดินทางมีค่าเท่าความเร็วแสง คือ 299,793,077 เมตร/วินาที (หรือ 983,573,087 ฟุต/วินาที) จะได้ว่าระยะทางเดินทางไปภายในหนึ่งไซเคิลเท่ากับค่าความเร็วหารด้วยความถี่ ดังสูตรคำนวณอย่างประมาณดังนี้

$$\lambda = \frac{299{,}800{,}000}{f(Hz)} \quad \text{(เมตร)}$$

λ (แลมด้า) คือ ความยาวคลื่น

เนื่องจากคลื่นเดินทางในลวดตัวนำ**สองครั้ง** (ไป-กลับ)

ดังนั้นขนาดความยาวของลวดตัวนำ ที่เดินทางได้ระยะทางเท่ากับ λ ในหนึ่งไซเคิล มีค่าเท่ากับ $\lambda/2$ หรือครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

กล่าวได้ว่า ลวดตัวนำรีโซแนนซ์ขนาดสั้นที่สุด มีค่าความยาวเท่ากับ $\frac{1}{2}\lambda$ ในกรณีของสายอากาศ เมื่อพิจารณาอย่างถี่ถ้วนจะพบว่าความเร็วแสงเป็นค่าคงที่แน่นอน

ดังนั้นจึงมีทางเลือก 2 วิธี คือ

- ปรับค่าความถี่ให้เข้ากับความยาวของลวดตัวนำที่กำหนดมา
- ปรับความยาวของลวดตัวนำให้เข้ากับความถี่ที่ใช้งานในทางปฏิบัติแล้ว การปรับความยาวลวดตัวนำนิยมใช้กันมากกว่า

ดังนั้นสูตรคำนวณหาขนาดความยาวลวดตัวนำ คิดจากการหาร 2 กับสมการข้างต้น

จะได้ $$1 = \frac{491.8}{f(MHz)} \quad \text{(ฟุต)}$$

หรือ $$1 = \frac{149.9}{f(MHz)} \quad \text{(เมตร)}$$

สมการเหล่านี้เป็นพื้นฐานสำคัญในงานหาขนาดความยาวต่าง ๆ ของสายอากาศ ซึ่งมันแทนครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

2.5 การแพร่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในลวดตัวนำ

สมมุติกำหนดให้ความยาวของลวดตัวนำในสายอากาศมีค่าอนันต์ พบว่าขนาดของแรงดันไฟฟ้า และกระแสมีค่าน้อยลงเรื่อย ๆ ตามระยะที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการจางหายของพลังงานจากการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รวมทั้งเปลี่ยนเป็นความร้อนภายในลวดตัวนำ เพราะเกิดจากความต้านทานภายในของตัวนำ

แต่ถ้าลวดตัวนำมีขนาดสั้น พบว่าคลื่นมีสะท้อนกลับที่ปลายแต่ละด้าน เช่นเดียวกับลูกบอลกระทบกำแพงกลับมา

เมื่อผ่านคลื่นวิทยุในสายอากาศแบบ $\frac{1}{2}\lambda$ และแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นป้อนในแบบคลื่นรูปไซน์ ทำให้เราวิเคราะห์ได้ว่า

เมื่อคลื่นลูกแรกเดินทางมาถึงปลายด้านหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับ ทำให้ทิศทางการไหลของกระแสเปลี่ยนไปในทิศตรงกันข้าม ขณะเดียวกับที่คลื่นลูกถัดมาเดินทางมาถึงที่ปลายลวดตัวนำพอดี ดังนั้นเราพบว่ามีเหตุการณ์น่าสนใจเกิดขึ้นคือ

- กระแสของคลื่นทั้งสองมีขนาดเท่ากัน แต่มีทิศทางตรงข้ามกันที่จุดปลายของลวดตัวนำ ดังนั้นผลลัพธ์ของกระแสที่จุดปลายลวดตัวนำเท่ากับ**ศูนย์**

ถ้าพิจารณาจุดถัดมาจากปลายลวดตัวนำ พบว่าขนาดของคลื่นที่เดินทางไปกับสะท้อนกลับมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการเสริมและหักล้างของกระแสขึ้น จนพิจารณาผลลัพธ์ของกระแสได้ว่าที่ระยะ $\frac{1}{4}\lambda$ จากปลายลวดตัวนำจะมีค่าขนาดกระแสมากที่สุด

สรุปได้ว่า ในสายอากาศแบบ $\frac{1}{2}\lambda$ ขนาดของกระแส เท่ากับศูนย์ที่จุดปลายของลวดตัวนำ และมีค่ามากที่สุดที่จุดตรงกลางของลวดตัวนำ ขอให้พิจารณาคำอธิบายข้างต้นได้จากรูป 2.3

รูปที่ 2.3 แสดงการแพร่กระจายของกระแส และแรงดันไฟฟ้า

บนลวดตัวนำขนาด $\frac{1}{2}\lambda$ (ครึ่งความยาวคลื่น)

เส้นทึบแทนลวดตัวนำ

จากรูปเส้นโค้งที่ระบุเป็น “กระแส” เราเรียกว่าคลื่นนิ่ง หรือสแตนดิ้งเวฟ (standing wave) ของกระแสที่มีรูปร่างเป็นครึ่งหนึ่งของคลื่นไซน์

สำหรับแรงดันไฟฟ้า จะมีพฤติกรรมต่างจากกระแสไป คือ ที่ปลายทั้งสองของลวดตัวนำจะมีค่าแรงดันไฟฟ้ามากที่สุด แต่คนละขั้วและถัดมา $\frac{1}{4}\lambda$ จากปลายแต่ละด้าน พบว่ามีขนาดของแรงดันไฟฟ้าเท่ากันแต่ทิศทางตรงข้ามกัน ทำให้ผลลัพธ์ที่จุดนี้เท่ากันศูนย์

ทำให้สรุปทั้งหมดได้ว่า

- แรงดันไฟฟ้าจะมีค่ามากที่สุดในจุดที่กระแสมีค่าน้อยที่สุด
- ขั้วของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนทุก ๆ ความยาว $\frac{1}{2}\lambda$

ส่วนจุดที่คลื่นนิ่งมีค่ามากที่สุด เรียกว่า ลูป (Loop) หรือแอนตี้โนด (antinode) และจุดที่มีค่าน้อยที่สุดเรียกว่า โนด (node)

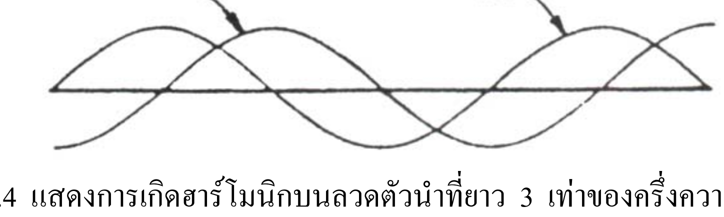
2.6 การเกิดฮาร์โมนิก

กรณีที่เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นที่ปลายลวดตัวนำ เราค้นพบว่าจำนวนของคลื่นนิ่งเท่ากับจำนวนเท่าของความยาวลวดตัวนำในหน่วยครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

อย่างเช่น ถ้าลวดตัวนำมีความยาวขนาด 2 เท่าของครึ่งความยาวคลื่น ($2 \times \frac{1}{2}\lambda$) จะมีจำนวนคลื่นนิ่งเท่ากับ 2 หรือ ลวดตัวนำมีความยาว 3 เท่าของครึ่งความยาวคลื่น ($3 \times \frac{1}{2}\lambda = \frac{3}{2}\lambda$) จะมีจำนวนคลื่นนิ่งเท่ากับ 3 (ดูได้จากรูป 2.4)

การที่มีลวดตัวนำยาวขึ้น (เป็นจำนวนเท่าของ $\frac{1}{2}\lambda$) พบว่าจะรีโซแนนซ์ที่ความถี่ค่าเดียวกับลวดตัวนำขนาด $\frac{1}{2}\lambda$ เหมือนเดิม และเรียกรีโซแนนซ์ที่เกิดกับสายอากาศขนาดยาว 2 เท่าหรือมากกว่าของครึ่งความยาวคลื่นว่า Harmonically resonant

การเกิดฮาร์โมนิกบนลวดตัวนำ แสดงได้ในรูป 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดฮาร์โมนิกบนลวดตัวนำที่ยาว 3 เท่าของครึ่งความยาวคลื่น

2.7 ความยาวทางไฟฟ้า (Electrical length)

ในงานสายอากาศ เราพิจารณาความยาวของสายอากาศออกเป็น 2 อย่างคือ

- ความยาวทางกายภาย (ความยาวจริง ๆ - physical length)
- ความยาวทางไฟฟ้า

เรามีหลักอยู่ว่า เมื่อค่าความถี่ในการใช้งานเปลี่ยนไป ค่าความยาวทางกายภาพของสายอากาศจะไม่เปลี่ยน แต่ค่าความยาวทางไฟฟ้าจะเปลี่ยน

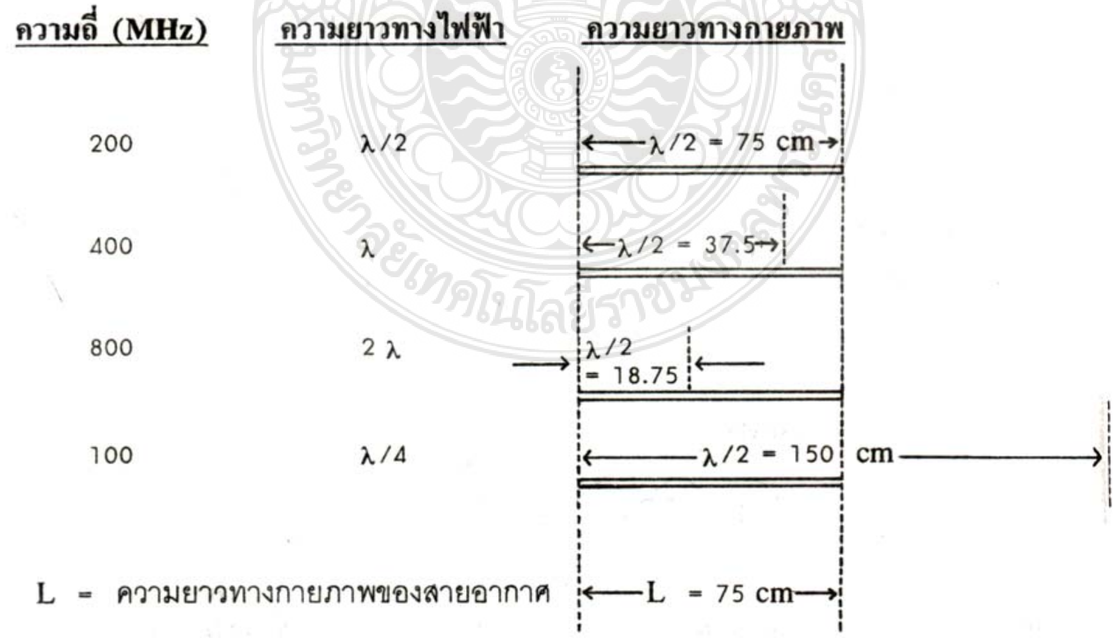
ตัวอย่างเช่น ในการใช้งานที่ความถี่ 300 MHz ของสายอากาศแบบ $\frac{1}{2}\lambda$ พบว่ามีความยาวกายภาพเท่ากับ 50 cm $\frac{\lambda}{2}$ = 50 cm) แต่ถ้าความถี่ในการใช้งานเปลี่ยนเป็น 600 MHz พบว่า $\frac{\lambda}{2}$ = 25 cm นั่นคือความยาวทางไฟฟ้าเปลี่ยนเป็น λ (จากเดิมที่ค่าความยาวทางไฟฟ้าเท่ากับ $\frac{\lambda}{2}$)

ฉะนั้นวิธีแก้อาจตัดความยาวจริงให้เหลือ 25 cm ก็ได้ ขอยกตัวอย่างเพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น

ให้คำนวณจากสูตร $V = f\lambda$

โดย V = ความเร็วของคลื่นวิทยุ $\approx 3\times10^{8}$ m/S

กำหนดความถี่ใช้งานมี 200 MHz, 400 MHz, 800 MHz และ 100 MHz พิจารณาความยาวทางไฟฟ้าและความยาวทางกายภาพได้ดังนี้



จากข้างต้นเป็นสายอากาศต้นเดียวกัน แต่นำไปใช้ในความถี่ที่ต่างกัน เห็นได้ว่าในแต่ละความถี่จะให้ความยาวทางไฟฟ้าต่างกัน ส่วนความยาวทางกายภาพคงที่ เราสามารถกำหนดเงื่อนไขได้ 2 อย่าง คือ

- ให้ความยาวทางกายภาพคงที่ (75 cm) พบว่าความยาวทางไฟฟ้าเปลี่ยนตามความถี่
- ให้ความยาวทางไฟฟ้าคงที่ $\frac{\lambda}{2}$ พบว่าความยาวทางกายภาพเปลี่ยนได้โดยการตัดออกหรือต่อเพิ่ม

ในทางปฏิบัติแล้ว เราไม่นำค่าความยาวทางไฟฟ้าไปตัดท่อตัวนำเพื่อทำสายอากาศหรือนำไปตัดสายนำสัญญาณ เพราะว่าหากนำค่าตัวเลขนี้ไปตัดที่ค่าหนึ่งแล้ว ผลลัพธ์ที่ออกมาคือสายอากาศนั้นจะรีโซแนนซ์ที่มีค่าความถี่ต่ำกว่าที่เราคิด อย่างเช่น เราต้องการสร้างสายอากาศไดโพลแบบครึ่งความยาวคลื่น ที่ความถี่ 200 MHz จะพบว่าสายอากาศสามารถแพร่กระจายคลื่นได้ดีที่ความถี่น้อยกว่านี้เช่นที่ 193 MHz

ดังนั้นทางแก้ คือ ตัดให้สั้นกว่าค่าความยาวทางไฟฟ้าที่ 200 MHz ลงไปเล็กน้อยที่นี้เกิดคำถามขึ้นว่า “จะสั้นกว่าเดิมไปเท่าไร จึงให้ผลดี ?” มีการทดลองจนค้นพบว่า ต้องนำค่าคงที่ค่าหนึ่ง (สำหรับตัวนำแต่ละแบบ) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 เช่น 0.971 หรือ 0.88 เป็นต้น นำไปคูณกับค่าความยาวทางไฟฟ้า ทำให้ได้ค่าความยาวจริง ๆ ของสายอากาศออกมา คือความยาวทาง กายภาพ

ค่าคงที่นี้เรียกว่า ค่า k ซึ่งจะอธิบายถึงวิธีคำนวณในตอนต่อไป

\# หมายเหตุ ตัวอย่างคำนวณข้างต้นที่ผู้เขียนนำมาอธิบายไม่ได้คิดคำนึงถึงค่า k ด้วยมีจุดประสงค์ให้เกิดความเข้าใจในความแตกต่างของค่าความยาวทั้งสองแบบนี้

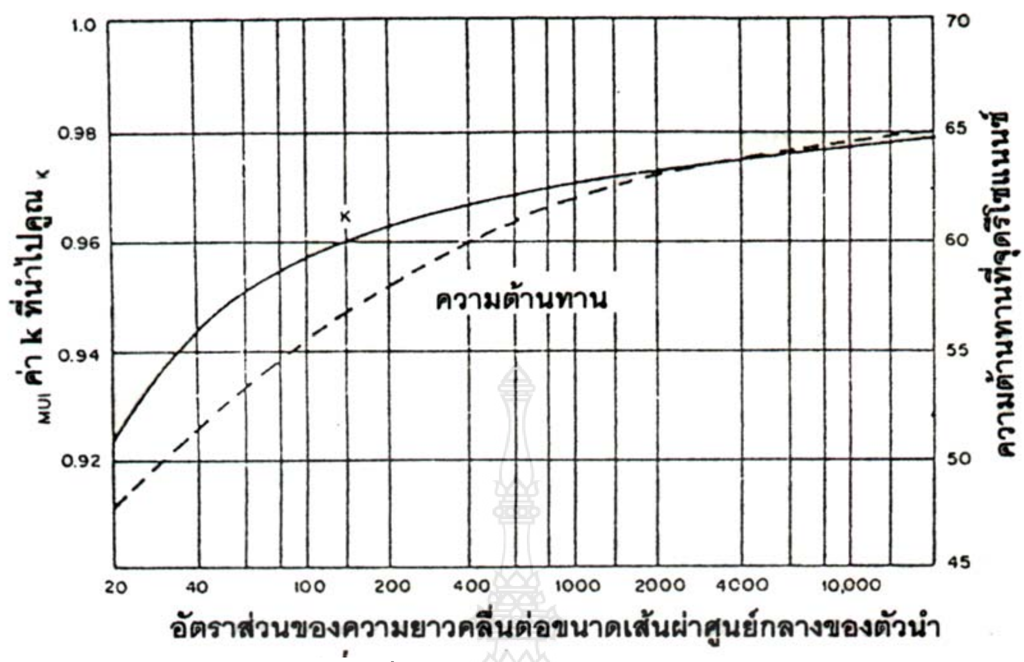
2.8 ความยาวจริงของสายอากาศแบบครึ่งความยาวคลื่น (Half – wave)

ในทางปฏิบัติ พบว่าความยาวจริงของสายอากาศมีค่าน้อยกว่าความยาวทางไฟฟ้าอยู่เล็กน้อย แสดงถึงสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟจะมีค่าความยาวจริงไม่เท่ากับค่าครึ่งความยาวคลื่น ($\lambda/2$)เพื่อให้สายอากาศสามารถแพร่กระจายคลื่นได้ดีที่สุด หรือเกิดรีโซแนนซ์

ความยาวจริงของสายอากาศที่ทำให้เกิดรีโซแนนซ์ที่ค่าความถี่ใช้งานพอดี จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความยาวของตัวนำต่อค่าเส้นผ่าศูนย์กลาง (diameter) ของตัวนำ

เห็นได้ว่าถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าน้อยลง (ใช้ตัวนำหนาขึ้น) มีผลให้ความยาวของสายอากาศจะลดลงที่ความถี่ใช้งาน

พิจารณาจากกราฟในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงกราฟของค่า k

จากรูป ค่า k นี้นำไปคูณกับความยาวทางไฟฟ้า เพื่อหาความยาวจริงของสายอากาศที่เกิดรีโซแนนซ์พอดี

โดยที่ค่า k คือ อัตราส่วนของหนึ่งความยาวคลื่น (ในภาวะสุญญากาศ) ต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ เขียนอักษรย่อว่า $\frac{\lambda}{dia}$

เส้นทึบโค้งในกราฟเป็นผลคำนวณจากทฤษฎีที่ช่วยให้เราหาความยาวจริงของสายอากาศได้ และต้องใช้กับท่อตัวนำที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากันตลอดด้วย

สำหรับค่า $\frac{\lambda}{dia}$ ที่ประมาณ 20,000 ขึ้นไป ค่า k เปลี่ยนไปน้อยมากมีการประมาณกันว่า สายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟ โดยใช้ลวดตัวนำทำขึ้นจะมีความยาวจริงสั้นกว่าอยู่ 2 % ของค่า $\lambda/2$ ที่ความถี่ใช้งาน

ผลของค่า k จะเห็นได้ชัดที่ค่าอัตราส่วนเท่ากับ 200 หรือน้อยกว่านั้น ตัวอย่างเช่น สายอากาศสร้างจากท่อโลหะกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว เพื่อใช้ในความถี่ 144 MHz จะมีค่า k ประมาณ 80 ทำให้ความยาวจริงของสายอากาศสั้นกว่าอยู่ 5 % ของค่า $\lambda/2$ ที่ความถี่นี้

ถ้าสายอากาศทำจากแท่งโลหะตันหรือท่อกลมที่ไม่มีการต่อฉนวนที่ปลายทั้งสองข้างแล้ว มีสูตรคำนวณหาความยาวจริงของสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟดังนี้

$$\text{ความยาวจริง (ฟุต)} = \frac{491.8 \times k}{f(MHz)}$$

หรือความยาวจริง (นิ้ว) $= \dfrac{5902 \times k}{f(MHz)}$

ค่า k ที่ใช้กันในปัจจุบันมีมาตรฐานอยู่หลายอย่าง แตกต่างกันไป สำหรับในหนังสือเล่มนี้ยึดแนวค่า k ของสมาคมนักวิทยุสมัครเล่นอเมริกัน (จาก ARRL) เป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีของสมาคมนักวิทยุสมัครเล่นอังกฤษ (RSGB) ที่ผู้เขียนเห็นว่าเป็นมาตรฐานที่เชื่อถือได้ดี

2.9 ปรากฏการณ์เอนด์ เอฟเฟ็กต์ (End Effect)

มีอยู่กรณีหนึ่งที่น่าสนใจ คือ ในสายอากาศแบบลวดตัวนำ ถ้ามีการใช้ฉนวน เช่นลูกยางกันน้ำ หรือจุกยางปิดที่ปลายทั้งสองข้างของลวดตัวนำ มีผลทำให้สายอากาศรีโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ที่ใช้งานลงมาเล็กน้อย อาจทำให้อัตราขยายของสายอากาศต่ำลงกว่าที่ควรเป็นทำให้บางครั้งผู้ใช้งานคิดว่าคำนวณความยาวของสายอากาศผิดไป

คำอธิบายของเรื่องนี้คือ ฉนวนที่ใส่เข้าไปเป็นการเพิ่มค่าประจุไฟฟ้าปริมาณเล็กน้อยให้กับระบบ มีผลช่วยจูนสายอากาศในรีโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำลงมาจากเดิม (เหมือนกับการเพิ่มค่า C ในวงจรจูนทั่วไป) เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เอนด์ เอฟเฟ็กต์ ซึ่งมีผลให้ค่ากระแสที่ปลายสายอากาศไม่ใกล้ศูนย์ (ในทางทฤษฎีต้องเท่ากับศูนย์) และจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ความถี่สูงขึ้นจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้ฉนวนในลักษณะนี้

2.10 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

จากคำอธิบายเบื้องต้นเกี่ยวกับการแพร่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้า ในสายอากาศในตอนแรกนั้นได้ระบุว่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟ (หรือในอีกแง่คือ กระแสมีค่ามากที่สุด)

แต่ถ้าเจาะลึกไปมากกว่านี้ กล่าวได้ว่าระดับแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุด (เข้าใกล้ศูนย์) เพราะถ้าค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์จริง แสดงถึงวงจรนั้นไม่มีค่าความต้านทานเลยแม้แต่น้อย นั่นคือจะไม่มีพลังงานแพร่กระจายมาจากสายอากาศได้ เพราะวงจรที่ไม่มีความต้านทานอยู่จะเป็นเพียงการส่งผ่านพลังงานเท่านั้น

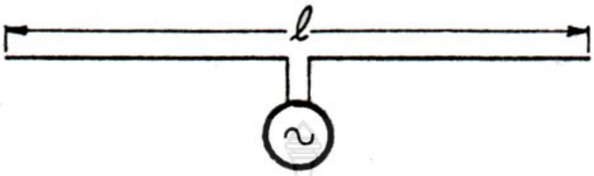
สายอากาศ เราสามารถ เราสามารถเปรียบเป็นวงจรไฟฟ้าได้ ที่มีคุณสมบัติคือต้องใช้พลังงานดังนั้นกระแสที่ไหลอยู่ภายในสายอากาศควรถูกจ่ายด้วยระดับแรงดันไฟฟ้าที่ค่าหนึ่ง

คิดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอย่างง่าย คือ เท่ากับระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายผ่านขั้วต่อหารด้วยปริมาณกระแสที่ไหลผ่านขั้วเช่นกัน

โดยถ้ากระแสและแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะเฟสเหมือนกันทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับค่าความต้านทาน จัดเป็นกรณีที่สายอากาศรีโซแนนซ์

แต่กรณีที่กระแสและแรงดันไฟฟ้ามีเฟสต่างกัน ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่ารีแอ็กแตนซ์เพิ่มขึ้นมาจากค่าความต้านทานด้วย ทำให้สายอากาศไม่รีโซแนนซ์

ลองสมมุติให้ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าที่นำบริเวณจุดกึ่งกลางของสายอากาศดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงสายอากาศที่มีจุดฟีด (feed point) ตรงกลาง

หมายเหตุ คำว่า ฟีด (feed) หมายถึง การจ่ายสัญญาณอินพุทให้วงจร, สายนำสัญญาณหรือสายอากาศ

ส่วนฟีดเดอร์ (feeder) หมายถึง สายนำสัญญาณที่ใช้ระหว่างเครื่องส่งกับสายอากาศการเลือกจุดต่อแหล่งจ่ายสัญญาณต่างกัน จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์แตกต่างกันด้วยพิจารณาได้จากรูป 2.3 ที่แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้ากับกระแส (คือค่าอิมพีแดนซ์) มีค่าแตกต่างกันตามจุดต่าง ๆ บนสายอากาศ

ดังนั้นเพื่อป้อนกันมิให้สับสนมาก เราจึงเลือกจุดกึ่งกลางของสายอากาศเป็นการอ้างอิง

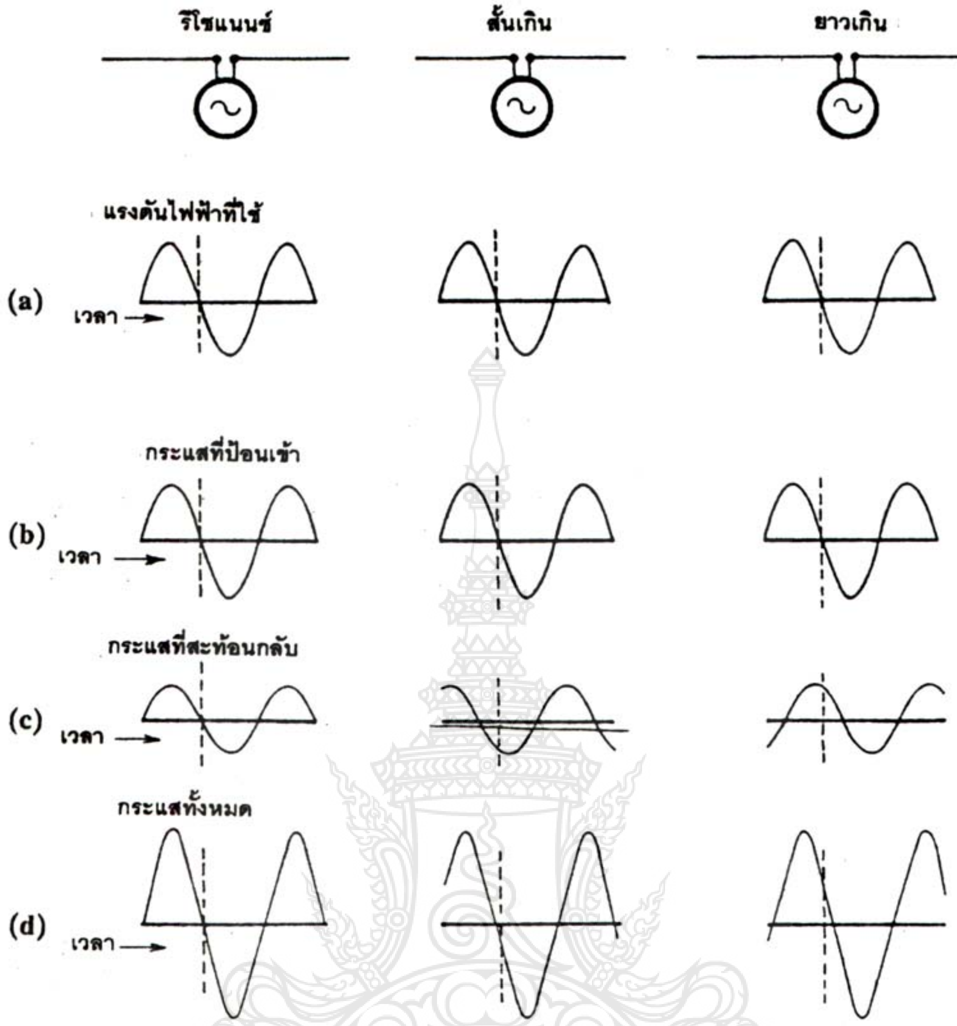
2.11 การพิจารณาสายอากาศเป็นวงจร

ถ้าค่าความถี่ที่ป้อนให้จุดตรงกลางของสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟมีค่ามากหรือน้อยกว่าความถี่รีโซแนนซ์ มีผลให้คุณสมบัติของสายอากาศมีลักษณะไม่เหมือนกัน

- อย่างกรณีเกิดรีโซแนนซ์ พบว่ากระแสมีเฟสเท่ากันกับแรงดันไฟฟ้า
- กรณีใช้ความถี่ต่ำกว่าค่ารีโซแนนซ์ พว่าเฟสของกระแสนำหน้าเฟสของแรงดันไฟฟ้า ทำให้ค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศเป็นค่าประจุไฟฟ้า (capacitance)
- กรณีใช้ความถี่สูงกว่าค่ารีโซแนนซ์ พบว่าเฟสของกระแสตามหลังเฟสของแรงดันไฟฟ้า ทำให้ค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศเป็นค่าเหนี่ยวนำไฟฟ้า(inductance)

ขอให้พิจารณาในรูป 2.7 ที่แสดงรูปแบบต่าง ๆ โดยให้มี 3 ลักษณะคือ

- ความยาวของสายอากาศเกิดรีโซแนนซ์พอดี
- ความยาวของสายอากาศสั้นเกินไป
- ความยาวของสายอากาศมากเกินไป



รูปที่ 2.7 แสดงกระแสในสภาวะรีโซแนนซ์และไม่รีโซแนนซ์

จากรูปแต่ละกรณี ป้อนแรงดันไฟฟ้าเหมือนกันหมด ดังรูป (A) และกระแสที่ป้อนเข้าสายอากาศมีลักษณะดังรูป (B) ให้สังเกตว่าทั้งกระแส (B) และแรงดันไฟฟ้ามีเฟสเหมือนกัน (ไม่ว่าความยาวของสายอากาศเป็นเท่าไหร่)

พิจารณาทีละกรณีได้ดังนี้

- กรณีสายอากาศรีโซแนนซ์

พบว่าเฟสของกระแสมีการเปลี่ยนแปลงดังต่อไปนี้

- กระแสเดินทางจากปลายข้างหนึ่งไปอีกปลาย เฟสเปลี่ยนไป 90^0 ($\lambda/2$)

- กระแสที่สะท้อนกลับมาจากปลายหนึ่งไปจนถึงอีกข้าง เฟสเปลี่ยนไป 90^0 (คิดเฉพาะตอนกลับ)

ผลรวมทางเฟสของกระแสที่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากเดินทางไป – กลับภายในสายอากาศเท่ากับ

และยังมีการเปลี่ยนเฟสไปอีก 180^0 เนื่องจากทิศทางของกระแสเปลี่ยนกลับตรงข้ามที่ปลายสายอากาศ

ทำให้ผลรวมทั้งหมดทางเฟสที่เปลี่ยนไปของกระแสในการเดินทางไป – กลับ คือ 360^0 แสดงว่ากระแสส่วนที่สะท้อนกลับกับกระแสอินพุทมีเฟสเหมือนกัน (ดังรูป (C) แสดงสัญญาณกระแสสะท้อนกลับ)

ผลรวมทั้งหมดของกระแสภายในสายอากาศ แสดงดังรูป (D)

สรุปได้ว่า กรณีสายอากาศรีโซแนนซ์ เป็น**การที่รูปสัญญาณของผลรวมกระแสทั้งหมดกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า มีเฟสเหมือนกันทุกประการ** และโหลด (สายอากาศ) ถูกพิจารณาจากแหล่งป้อนพลังงานว่าเป็นค่าความต้านทานอย่างเดียว

- กรณีสายสั้นเกินไป (ที่จะเกิดรีโซแนนซ์)

เฟสที่เปลี่ยนแปลงแตกต่างจากกรณีแรก เพราะว่ารูปสัญญาณของกระแสที่สะท้อนมาถึงจุดเดิม เร็วกว่าเดิม เนื่องจากระยะเฟสน้อยกว่า 90^0 ($\lambda/2$) ทำให้การเดินทางทั้งไป-กลับจะมีค่าเฟสที่เปลี่ยนไปน้อยกว่า 180^0 แสดงถึงค่าสูงสุดของกระแสที่สะท้อนมาเกิดก่อนค่าสูงสุดของกระแสที่เดินทางไป (ความจริงควรเกิดพร้อมกัน) และเมื่อรวมกับการกลับเฟสเนื่องจากเปลี่ยนทิศทางอีก แล้ว พบว่าผลรวมทั้งหมดของเฟสที่เปลี่ยนไปมีค่าน้อยกว่า 360^0 (ดังรูป (C)) และให้ผลรวมทั้งหมดของกระแสดังรูป (D)

สรุปได้ว่า ผลรวมของกระแสมีรูปสัญญาณนำหน้า (ทางเฟส) กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนทำให้โหลด (สายอากาศ) ถูกพิจารณาเป็นค่าความต้านทานต่ออนุกรมกับค่าประจุไฟฟ้า

- กรณีสายอากาศยาวเกินไป (ที่จะเกิดรีโซแนนซ์)

พบกระแสที่สะท้อนกลับมาถึงจุดเดิมช้ากว่ากรณีปกติ เพราะว่าระยะเฟสมากกว่า 180^0 (ไป-กลับ) ทำให้ค่ามากที่สุดของกระแสสะท้อน เกิดหลังค่ามากที่สุดของกระแสที่เดินทางไป ดังรูป (C)

ผลรวมทั้งหมดของกระแสมีรูปสัญญาณตามหลัง (ทางเฟส) กับแรงดันไฟฟ้าทำให้โหมด (สายอากาศ) ถูกพิจารณาเป็นค่าความต้านทานต่อขนานกับค่าเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ยังมีอีกประเด็นที่น่าสนใจ คือ ถ้าความยาวสายอากาศเพิ่มระยะเฟสเป็น 180^0 จะมีความยาวทางเฟสของการเดินทางไป-กลับเท่ากับ 360^0 บวกกับการเปลี่ยนทิศตรงข้ามอีก รวมการเปลี่ยนเฟสทั้งหมด 540^0 (มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนเฟสไป 180^0)

ในกรณีอย่างนี้ กระแสที่สะท้อนกลับกับกระแสเดิมเกิดเฟสต่างกันหมด ทำให้ผลรวมของกระแสเหลือน้อยมาก (หักล้างกัน) แต่ค่ากระแสที่เหลือนี้ยังมีเฟสเดียวกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน

นั่นคือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ กลับมาเป็นค่าความต้านทานอย่างเดียวอีกครั้งและความต้านทานในลักษณะแบบนี้มีค่าสูงมาก ทำให้เปรียบสายอากาศเป็นวงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน (parallel – resonant circuit) ได้

ส่วนขนาด (แอมปลิจูด) ของกระแสที่สะท้อนกลับ เมื่อเปรียบเทียบกับของเดิมแล้วพบว่ามีขนาดลดลง เนื่องจากสูญเสียพลังงานในการเดินทางไป - กลับภายในลวดตัวนำ

2.12 ค่าความต้านทาน

พลังงานที่เราป้อนเข้าสายอากาศ พบว่าถูกนำไปใช้ 2 อย่าง คือ

- การแพร่กระจายคลื่นวิทยุออกอากาศ
- การสูญเสียเป็นความร้อนภายในลวดตัวนำ

โดยพลังงานที่นำคลื่นวิทยุออกอากาศจัดเป็นการใช้ประโยชน์ แต่ส่วนที่เปลี่ยนเป็นความร้อนจดเป็นการสูญเปล่า

ถ้าเรากำหนดให้สูตรการใช้พลังงานจาก $P = I^2 R$

ดังนั้นกรณีของการสูญเสียความร้อน ค่า R เป็นค่าความต้านทานจริง ส่วนกรณีของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ค่า R เป็นค่าความต้านทานสมมุติที่อาจแทนด้วยตัวต้านทานที่มีค่าเท่ากันได้ เราเรียกความต้านทานนี้ว่า ความต้านทานการแพร่คลื่น (radiation resistance)

เพื่อป้องกันการสับสน กำหนดสูตรให้ $P = I^2 (R_O + R)$

โดย R_O แทนค่าความต้านทานจริง หรือ ohmic resistance

R แทนค่าความต้านทานสมมุติ หรือ radiation resistance

ในทางปฏิบัติสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟ ค่าพลังงานสูญเสีย เนื่องจากความร้อนภายในลวดตัวนำมีค่าที่น้อยมากเมื่อเทียบกับค่าทั้งหมดที่ป้อนให้สายอากาศ ทั้งนี้เกิดจากค่าความต้านทานจริงมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าความต้านทานการแพร่คลื่น

นอกจากนี้ถ้าสายอากาศไม่มีสิ่งกีดขวางรอบตัว และไม่ใกล้พื้นโลกเกินไป เราสามารถละค่าความต้านทานจริง (ohmic resistance) ได้ และค่าความต้านทานทั้งหมดของสายอากาศที่จุดฟีดเท่ากับค่าความต้านทานการแพร่คลื่นอย่างเดียว

การวัดค่าความต้านทานการแพร่คลื่นกระทำที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟ โดยมีเงื่อนไขเกี่ยวข้องดังนี้

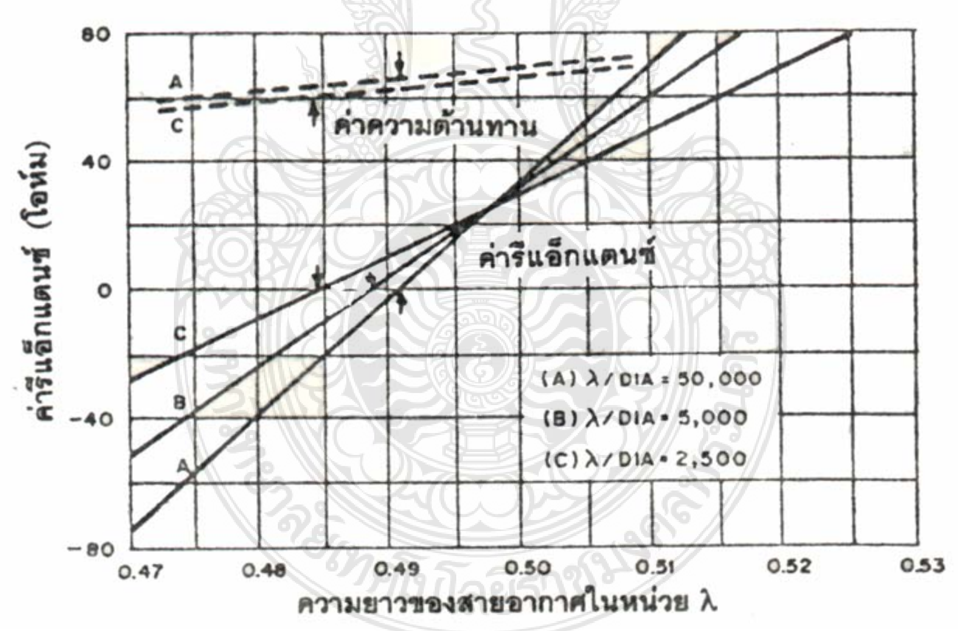
- ตำแหน่งของสายอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งของหรือวัตถุรอบตัว โดยเฉพาะพื้นโลก
- อัตราส่วนของหนึ่งความยาวคลื่นต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ $\frac{\lambda}{dia}$ ที่ใช้

เราพบว่าในสภาวะสุญญากาศ ค่าความต้านทานการแพร่คลื่นของตัวนำมีค่าประมาณ 73 โอห์ม และยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ λ/dia อีก ดังแสดงตามเส้นประในรูปที่ 2.5 ซึ่งพอสรุปได้ว่า ถ้าสายอากาศถูกสร้างให้มีขนาดหนาขึ้น จะทำให้ค่าความต้านานการแพร่คลื่นมีค่าลดลง

โดยทั่วไปสายอากาศที่ทำจากลวดตัวนำมีค่าต้านทานการแพร่คลื่นประมาณ 65 โอห์ม ส่วนที่ทำจากแท่งเหล็กหรือท่อตัวนำจะมีค่าระหว่าง 55 และ 60 โอห์ม

ค่าความต้านทานการแพร่คลื่นในกรใช้งานจริง (จากค่าประมาณ 50 โอห์ม หรือมากกว่า) จะมีผลอย่างชัดเจนต่อประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ทั้งนี้ส่วนหนึ่งมาจากค่า ohmic resistance มีค่าเพียง 1 โอห์มช่วงนี้ จนค่าความต้านทานการแพร่คลื่นลดลงต่ำกว่า 10 โอห์ม ค่าความต้านทานจากความร้อนจะมีผลกระทบขึ้นมาทันที อาจพบในกรณีที่สายอากาศต่อกันเป็นแผง หรืออาร์เรย์

จากที่กล่าวว่าค่าความต้านทานนี้ขึ้นกับความยาวของสายอากาศกับอัตราส่วน λ/dia ถ้าสายอากาศใช้ตามความยาวขนาด $\frac{1}{2}\lambda$ พบว่าความต้านทานนี้มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย ต่อความยาวที่เปลี่ยน ดังเส้นประในรูป 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงกราฟของค่าความต้านทานและรีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศที่มีจุดฟีดอยู่กึ่งกลาง

จากกราฟเห็นได้ว่า ค่าความต้านทานการแพร่คลื่นมีค่าลดลงเมื่อสายอากาศมีความยาวสั้นลง และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสายอากาศมีความยาวมากขึ้น

2.13 ค่ารีแอ็กแตนซ์

การเพิ่มของค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศในขณะที่ความยาวสายอากาศเพิ่มจากจุดรีโซแนนซ์ ยังขึ้นกับอัตราส่วน λ/dia ของตัวนำที่ใช้ด้วย และพบจากกราฟเส้นทึบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่านี้มีมากกว่าค่าความต้านทานการแพร่ขึ้น

กล่าวสรุปจากกราฟว่า ถ้าตัวนำมีขนาดหนาขึ้นทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอ็กแตนซ์เกิดน้อยลง เทียบกรณี (c) และ (a) ดูจุดที่เส้นทึบแต่ละกรณีตัดกับแกนศูนย์ (แสดงที่จุดมีลูกศรชี้) เราพิจารณาเป็นการที่สายอากาศในแต่ละค่าอัตราส่วน λ/dia เกิดรีโซแนนซ์ได้

ผลจากอัตราส่วน λ/dia ที่มีต่อค่ารีโซแนนซ์ คือ ค่า λ/dia มีน้อยลงเท่าใดมีผลให้ความยาวของสายอากาศที่เกิดรีแอ็กแตนซ์เท่ากับศูนย์ (รีโซแนนซ์) มีขนาดสั้นลง

คุณสมบัติของสายอากาศที่มีต่ออัตราส่วน λ/dia ที่มีค่าต่างกัน เราพออธิบายเทียบได้กับพฤติกรรมของวงจรรีโซแนนซ์ทั่วไปที่มีค่า Q แตกต่างกัน

กล่าวคือ เมื่อค่า Q ของวงจรมีค่าต่ำ ทำให้ค่ารีแอ็กแตนซ์มีค่าน้อย และมีช่วงการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างต่ำ ในกรณีค่า Q ของวงจรมีค่าสูง ผลที่ได้จะตรงข้ามกับข้างต้น

ดังนั้นพอวาดกราฟตอบสนองของวงจรกรณีค่า Q ต่ำ ได้มีลักษณะ “กว้าง” ส่วนกรณีค่า Q สูง จะมีลักษณะ “แคบ”

เช่นเดียวกันกับสายอากาศ ที่เราพบว่าสายอากาศที่มีขนาดหนา (ตัวนำ) จะสามารถทำงานตอบสนองต่อความถี่ได้ในแถบความถี่กว้าง ขณะที่ขนาดบางอย่างจะทำงานในช่วงแถบความถี่แคบ ทำให้เทียบค่า Q ของสายอากาศแบบหนาว่ามีค่าต่ำ และค่า Q ของสายอากาศแบบบางว่ามีค่าสูง

2.14 การคัปเปิลสายอากาศ

ความหมายของคัปเปิล (couple) ในทางไฟฟ้า คือ การต่อวงจร 2 ชุด เข้าด้วยกันเพื่อให้ส่งสัญญาณจากวงจรหนึ่งไปอีกวงจรได้ โดยอาจผ่านทางลวดตัวนำ, ตัวต้านทาน, ทรานฟอร์เมอร์, คาปาซิเตอร์ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ

ในทางไฟฟ้าเมื่อมีวงจรจูน (tuned circuit) เดี่ยว ๆ ค่า Q ของวงจร และค่าอิมพีแดนซ์จะคิดจาก ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า, ค่าประจุไฟฟ้า, และค่าความต้านทานภายในวงจรนั้น แต่ถ้าเรามีการต่อหรือคัปเปิลวงจรจูน 2 ชุด ด้วยกัน ค่า Q และค่าอิมพีแดนซ์จะเปลี่ยนไป

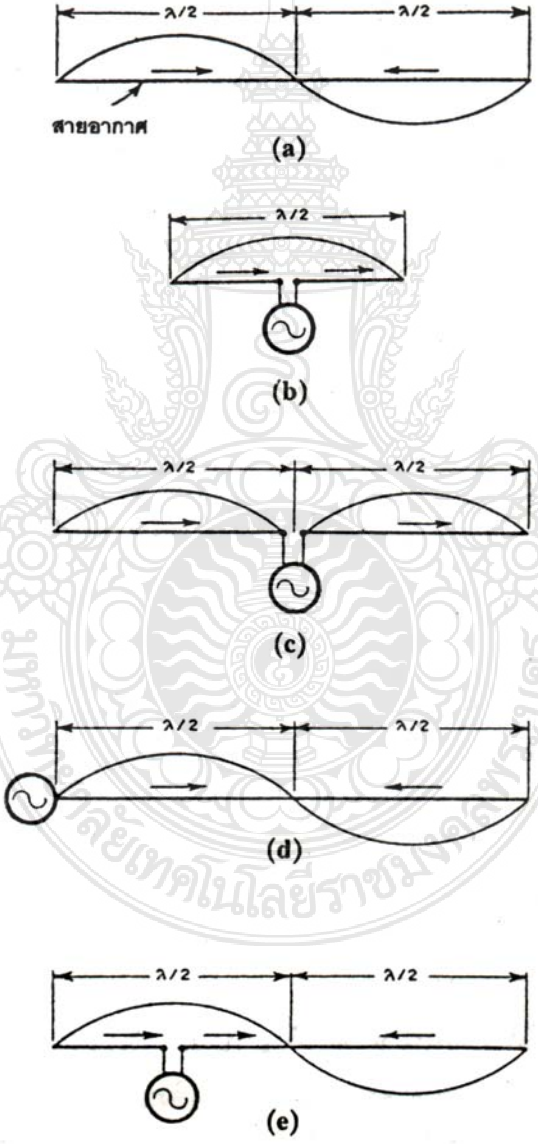
ในทำนองเดียวกับการคัปเปิลสายอากาศตั้งแต่ 2 หรือมากกว่านั้น โดยวงจรใกล้กันในระยะไม่กี่ความยาวคลื่น (หรือน้อยกว่านี้) สายอากาศแต่ละอันในกรณีนี้เราเรียกว่าอีลีเมนท์ (element) เราพบว่าค่ารีโซแนนซ์และความต้านทานการแพร่คลื่นของแต่ละอีลีเมนท์จะเปลี่ยนไป เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานที่เกิดขึ้นภายในทั้งหมด

ตัวอย่างของสายอากาศที่มีการคัปเปิลอีลีเมนท์ ได้แก่ แบบยากิ และแบบไดราเว่น อาร์เรย์ เป็นต้น การวิเคราะห์สายอากาศที่ถูกคัปเปิลอีลีเมนท์จะยากกว่าเดิม และอาจใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณด้วย

2.15 การใช้งานสายอากาศในช่วงฮาร์โมนิก

สายอากาศที่ถูกใช้งานในช่วงฮาร์โมนิกของความถี่พื้นฐาน จะมีคุณสมบัติต่าง ๆ ไม่เหมือนกับสายอากาศแบบ $\lambda/2$ ที่ได้อธิบายไปก่อนหน้าแล้ว

ประเด็นที่น่าสนใจในการใช้งานช่วงฮาร์โมนิก คือ มีการกลับทิศทางไหลของกระแส ในทางระยะ $\lambda/2$ ของสายอากาศ ซึ่งพิจารณาได้จากรูป 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงการต่อจุดฟีดที่ระยะต่าง ๆ และทำให้การไหลของกระแสเปลี่ยนไปในสายอากาศ

จากรูป 2.9 (a) เส้นโค้งแสดงคลื่นนิ่งที่เกิดจากกระแสในลวดตัวนำโดยเส้นโค้งบนเส้นทึบ คือ กระแสที่ไหลในทิศทางหนึ่ง ส่วนเส้นโค้งใต้เส้นทึบแสดงกระแสที่ไหลในทิศตรงข้าม สรุปว่าทิศทางการไหลของกระแสบนลวดตัวนำยาว $\lambda/2$ จะกลับทิศกันในช่วง $\lambda/2$ ต่อไป

สำหรับสายอากาศในรูป 2.9 (a) มีความยาวเท่ากับ 1λ และใช้งานในช่วงฮาร์โมนิก ลำดับที่สอง (second harmonic)

ขอให้พิจารณาสายอากาศแบบ $\lambda/2$ ที่แสดงในรูป 2.9 (b) มีการต่อจุดฟีดสัญญาณเข้าที่กึ่งกลางของสายอากาศ พบว่ากระแสไหลในทิศทางเดียวกันทั้งสองด้านของจุดฟีด ถ้าเพิ่มความยาวของลวดตัวนำแต่ละด้านของจุดฟีดให้เป็น $\lambda/2$ ดังแสดงในรูป 2.9 (c) พบว่ากระแสในส่วนด้านซ้ายและขวามือมีทิศทางเดียวกัน (เหมือนกับกรณีรูป 2.9 (b)) แต่การไหลของกระแสไม่เหมือนกับรูป 2.9 (a) ถึงแม้ว่าความยาวของลวดตัวนำทั้งในรูป 2.9 (a) และ (c) จะเท่ากันก็ตาม และสายอากาศในรูป 2.9 (a) ถูกใช้งานในช่วงฮาร์โมนิก ส่วนของรูป 2.9 (c) ไม่ใช่

ดังนั้นพอมีแนวคิดว่าการใช้งานช่วงฮาร์โมนิกให้ดีขึ้น จำเป็นต้องมีจุดฟีดสัญญาณที่จุดเหมาะสมบนลวดตัวนำ ซึ่งวิธีที่ติดจุดฟีดมี 2 แบบ ดังรูป (d) และ (e) ในรูป 2.9

กรณีที่เราจ่ายสัญญาณเข้าที่จุดปลายใดด้านหนึ่ง (ดังรูป 2.9 (e)) ทิศทางการไหลของกระแสจะกลับกันในแต่ละช่วงยาว $\lambda/2$ ส่วนกรณีจ่ายเข้าที่จุดกึ่งกลางของส่วนสายอากาศยาว $\lambda/2$ ส่วนใดส่วนหนึ่ง (ดังรูป 2.9 (e)) ทิศทางการไหลของกระแส เหมือนกับกรณีข้างต้น

สรุปได้ว่าการใช้งานช่วงฮาร์โมนิก เราควรจ่ายสัญญาณเข้าที่จุดปลายใดปลายหนึ่ง หรือจุดที่เป็นกระแสลูป (มีขนาดมากที่สุด)

2.16 ความยาวของสายอากาศในการใช้ช่วงฮาร์โมนิก

ความยาวกายภาพของสายอากาศในย่านฮาร์โมนิก จะมีขนาดไม่เท่ากับความยาวทางไฟฟ้าเป็นเนื่องจากเหตุผลเดียวกับที่อธิบายมาแล้ว ในสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟ ความยาวจริงจะสั้นกว่าค่าความยาวที่คิดจากจำนวนเต็มคูณครึ่งความยาวคลื่น เนื่องมาจากเหตุ 2 อย่างคือ

- อัตราส่วน λ/dia ของตัวนำ
- ปรากฏการณ์ เอนด์เอฟเฟ็กต์ (end effect)

สำหรับผลจาก เอนด์ เอฟเฟ็กต์ เห็นได้ชัด เมื่อเพิ่มฉนวนที่ปลายตัวนำ (เป็นกรเพิ่มค่าประจุไฟฟ้า) และสายอากาศที่ใช้งานช่วงฮาร์โมนิกมักมีฉนวนเพิ่มที่ปลายสายอากาศเท่านั้น

ดังนั้นปรากฏการณ์ เอนด์ เอฟเฟ็กต์ มีผลเฉพาะส่วน $\lambda/2$ ที่อยู่ปลายสุดแต่ละด้านของสายอากาศ และสมการต่อไปนี้เป็นการหาความยาวของสายอากาศที่ใช้งานในช่วงฮาร์โมนิก ของความถี่พื้นฐาน (เป็นค่าที่ใช้ในทางปฏิบัติจริงได้)

$$\text{ความยาวของสายอากาศ (ฟุต)} = \frac{492(N-0.05)}{f(\text{MHz})}$$

ค่า N แทน จำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่น $\lambda/2$ ของสายอากาศ กรณีเรากำหนดความยาวกายภาพของสายอากาศมีค่าแน่นอนขึ้นมาก่อนจะหาค่าความถี่ เพื่อให้เกิดความยาวทางไฟฟ้าให้ทำงานในลำดับฮาร์โมนิกที่ต้องการได้จากสมการต่อไปนี้

$$\lambda = \frac{fL}{984} + 0.025$$

โดยที่ λ แทนความยาวของตัวนำในหน่วยความยาวคลื่น

f แทนความถี่ในหน่วยMHz

L แทนความยาวกายภาพ (จริง) ของสายอากาศในหน่วยฟุต

2.17 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ใช้งานช่วงฮาร์โมนิก

เราสามารถพิจารณาสายอากาศในย่านฮาร์โมนิกว่าเป็นส่วนขนาด $\lambda/2$ มาเรียงต่อกันและกระแสที่จ่ายให้ในแต่ละส่วนมีทิศทางกลับกัน (หรือมีเฟสต่างกัน 90^0)

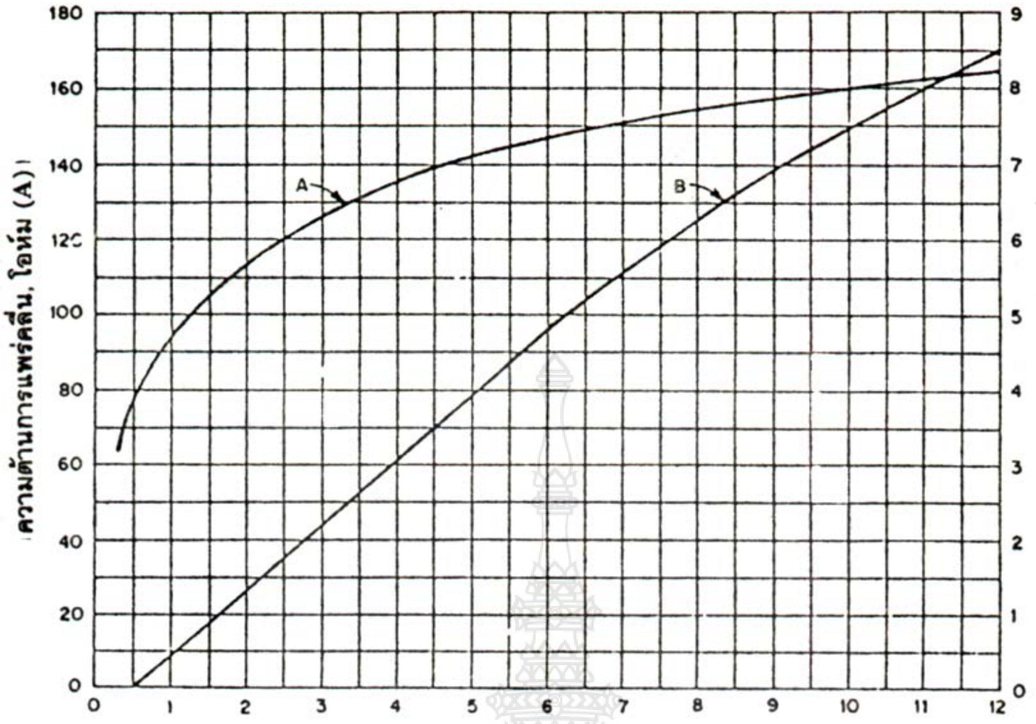
ถ้าพิจารณาในแง่นี้ ทำให้กล่าวได้ว่ามีการคัปเปิลระหว่างส่วน $\lambda/2$ ที่อยู่ติดกัน ด้วยเหตุนี้ กับผลกระทบจากการแพร่คลื่นของส่วนอื่น ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัด ณ จุดกระแสลูปบนส่วน $\lambda/2$ มีค่าไม่เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศแบบ $\lambda/2$ (เข้าใจด้วยว่าเป็นการเปรียบเทียบส่วน $\lambda/2$ ที่อยู่เดี่ยว ๆ คือสายอากาศกับอีกแบบที่ต่อกันอยู่)

ในกรณีของสายอากาศแบบ $\lambda/2$ ค่าอิมพีแดนซ์ประกอบด้วยค่า 2 ส่วน คือ ความต้านทานการแพร่คลื่น และรีแอ็กแตนซ์ สำหรับค่าความต้านทานจากความร้อนมีขนาดต่ำเกินไป (สามารถละทิ้งได้) โดยมีเงื่อนไขว่า ถ้าสายอากาศรีโซแนนซ์จะไม่มีค่ารีแอ็กแตนซ์ (เท่ากับศูนย์) ที่จุดฟีดคงเหลือเฉพาะค่าความต้านทานการแพร่คลื่นเท่านั้น และมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์

ค่าความต้านทานการแพร่คลื่นขึ้นกับจำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่น และอาจเปลี่ยนค่าได้จากผลของตัวนำและฉนวนที่อยู่ใกล้ รวมถึงพื้นดินด้วย

เนื้อหาต่อจากนี้จะมุ่งไปที่ขนาดของค่าความต้านทานนี้โดยใช้สายอากาศในทางทฤษฎีที่มีตัวนำขนาดบางมาก ๆ ในสภาวะสุญญากาศ และมีความยาวในช่วงฮาร์โมนิก (รีโซแนนซ์)

จากการทดสอบพบว่าถ้าสายอากาศยาว 1λ วัดค่าความต้านทานที่จุดกระแสลูปได้เท่ากับ 90 โอห์ม หากสายอากาศมีขนาดยาวขึ้น เช่นที่ 10λ จะมีค่าประมาณ 160 โอห์มแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานการแพร่คลื่นสัมพันธ์กับความยาวที่เพิ่มขึ้นของสายอากาศได้ดังกราฟ (A) ในรูป 2.10

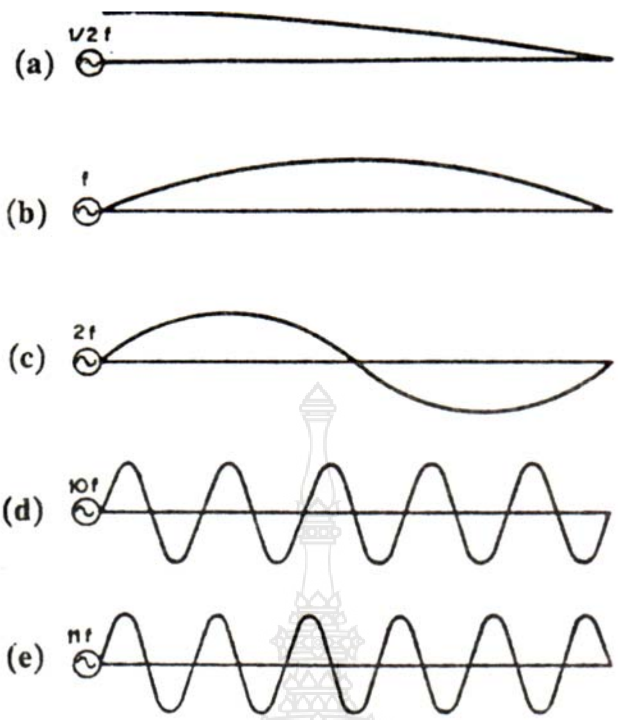


รูปที่ 2.10 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานการแพร่คลื่นและกำลังของสัญญาณโดย
กราฟ (A) แทนค่าความต้านทานตามขนาดความยาวสายอากาศ
กราฟ (B) แทนค่าอัตราขยายกำลังสายอากาศ

กรณีสายอากาศถูกใช้งานในช่วงความถี่คลาดไปจากความถี่รีโซแนนซ์พบว่าจุดฟีดมีทั้งค่ารีแอ็กแตนซ์และความต้านทานเกิดที่จุดฟีด

โดยทั่วไปค่ารีแอ็กแตนซ์จะเปลี่ยนตามความถี่ที่ใช้ดังได้กล่าวในสายอากาศสแบบฮาล์ฟเวฟ ส่วนกรณีสายอากาศที่ใช้ช่วงฮาร์โมนิกพบว่าอัตราการเปลี่ยนค่าของรีแอ็กแตนซ์ตามความถี่มีมากกว่า (เปรียบเทียบจากรูป 2.8 และ 2.10)

ลองพิจารณาในอีกแง่มุมอื่นในสายอากาศจากรูป 2.11 (a)



รูปที่ 2.11 แสดงผลจากการเปลี่ยนค่าความถี่

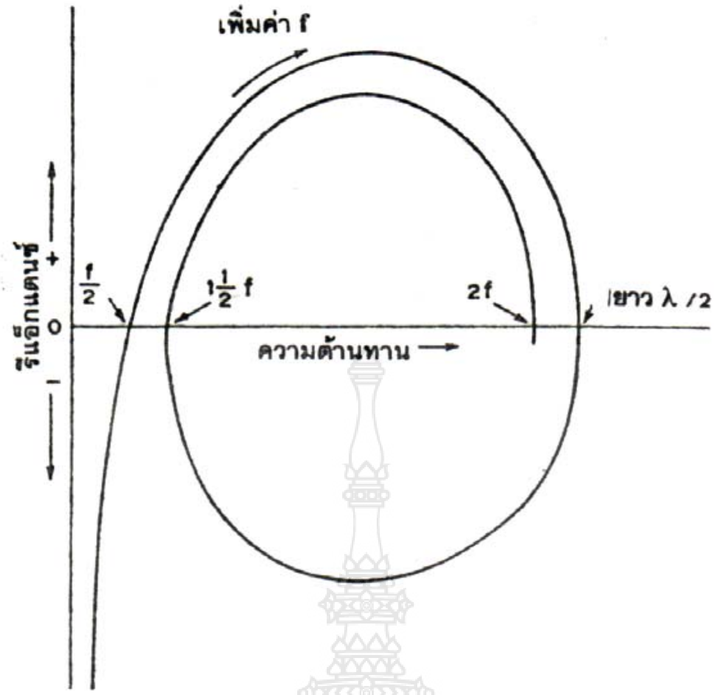
จากรูป 2.11 (a) มีการส่งสัญญาณผ่านจุดฟีดที่ปลายด้านหนึ่ง โดยใช้ความถี่เท่ากับ f/2 (ค่า f คือความถี่พื้นฐานสของสายอากาศแบบ $\lambda/2$)

เมื่อจ่ายสัญญาณความถี่ f/2 จะใช้ลวดตัวนำขนาดยาว $\lambda/4$ ทำให้เกิดรูปกระแสดังรูป และที่ค่านี้ถือว่าสายอากาศรีโซแนนซ์ และเกิดค่าความต้านทานต่ำเท่านั้นที่จุดฟีด

ถ้าความถี่ถูกเพิ่มค่าขึ้น ทำให้สายอากาศยาวเกินไปและกระแสที่จุดฟีดมีลักษณะตามหลัง (Lag) แรงดันไฟฟ้า (ดูจากรูป 2.7) มีผลให้สายอากาศเกิดค่ารีแอ็กแตนซ์เชิงเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductive reactance) ไปพร้อมกับค่าความต้านทานด้วย และถ้าความถี่ถูกเพิ่มมากขึ้นไปอีก ค่ารีแอ็กแตนซ์นี้จะเพิ่มจนถึงจุดค่ามากที่สุด จากนั้นลดลงจนเท่ากับศูนย์ที่ความถี่ f (ใช้ลวดตัวนำยาว $\lambda/2$ ดังแสดงในรูป 2.11 (b)

เมื่อเราเพิ่มความถี่มากขึ้น จากนี้จะเกิดค่ารีแอ็กแตนซ์เชิงประจุไฟฟ้า (capacitive reactance) ขึ้นและเพิ่มจนถึงค่ามากที่สุด จากนั้นลดลงเท่ากับศูนย์อีกครั้ง ถ้ายังมีการเพิ่มค่าความถี่ต่อไปจะเกิดค่ารีแอ็กแตนซ์เชิงเหนี่ยวนำไฟฟ้าใหม่ และมีค่ามากที่สุดจนเหลือศูนย์ ที่จุดความถี่ 2f ณ จุดนี้เกิดคลื่นนิ่งสมบูรณ์สองลูกของกระแส และลวดตัวนำเกิดรีโซแนนซ์อีกครั้งที่ฮาร์โมนิกลำดับที่สอง แสดงดังรูป 2.11 (c)

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอ็กแตนซ์ และค่าความต้านทานเมื่อความถี่เพิ่มจาก f/2 ถึง 2f แสดงได้ในกราฟรูป 2.12



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของรีแอ็กแตนซ์
และความต้านทานจากค่าความถี่

จากรูป อธิบายถึงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศว่ามีการเปลี่ยนค่าเป็นวัฏจักรเมื่อลำดับฮาร์โมนิกเพิ่มขึ้นอีกหนึ่ง โดยเริ่มจาก (คิดที่จุดฟีด) ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าความต้านทานอย่างเดียว (ค่าสูง) ที่ความถี่ f จากนั้นจะมีความรีแอ็กแตนซ์เชิงประจุไฟฟ้าเพิ่มเข้ามาจนมีค่ามากที่สุด และลดลงจนมีค่ามากที่สุด และลดลงจนได้ค่าความต้านทานอย่างเดียว (ค่าสูง) ที่ความถี่ 2f เห็นได้ว่าเกิดวัฏจักรเช่นนี้เสมอเมื่อลำดับฮาร์โมนิกเพิ่มขึ้นหนึ่ง

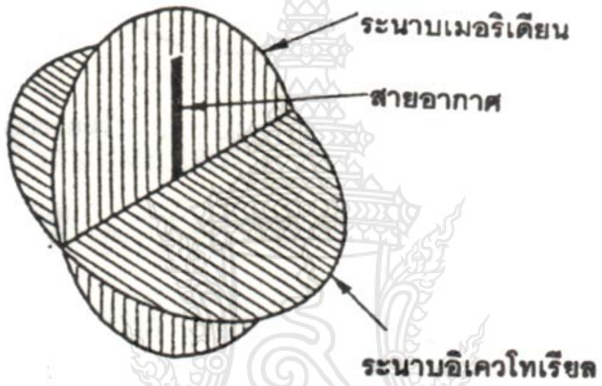
ลองพิจารณาจากรูป 2.11 (d) และ (e) ค่าความถี่ของรูป (d) คือ 10f (สิงเท่าจากความถี่พื้นฐาน) นั่นคือ สายอากาศใช้งานในช่วงฮาร์โมนิกลำดับที่สิบ จากนั้นในรูป (e) เพิ่มเป็น 11f ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไปอีกหนึ่งวัฏจักร

เห็นได้ว่า 11f มีค่ามากกว่า 10f อยู่ 10 เปอร์เซ็นต์ กล่าวได้คือการเปลี่ยนไป 10 % ของความถี่ทำให้วัฏจักรของอิมพีแดนซ์เกิดได้หนึ่งรอบ แต่ถ้าเปรียบเทียบการเปลี่ยนจาก f ไป 2f หรือ 100% ของความถี่เพิ่มขึ้น นั่นคือ ค่าอิมพีแดนซ์ไปเร็วกว่าอยู่ 10 เท่า แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์มีสูงขึ้นเมื่อความถี่ใช้ค่ามากขึ้น

2.18 รูปแบบการแพร่คลื่น, อัตราขยาย และไดเร็คติวิตี้

สายอากาศทุกแบบจะมีคุณสมบัติในการแพร่กระจายพลังงานไปได้มากในทิศทาง (เมื่อเทียบกับทิศทางรอบสายอากาศ) คุณสมบัติเช่นนี้เรียกว่า ไดเร็คติวิตี้ (DIRECTIVITY) จัดว่าสำคัญมากสำหรับ การส่งสัญญาณไปยังทิศทางที่ต้องการให้มีขนาดมากกว่าทิศทางที่ไม่ต้องการไดเร็คติวิตี้ของสายอากาศ แสดงโดยใช้รูปแบบการแพร่คลื่น (RADIATION PATTERN)

รูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศเป็นรูปกราฟที่แสดงความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายอากาศตามระยะทางที่ห่างออกไปรอบตัว และเนื่องจากมีการแพร่คลื่นไปทุกทิศทางรอบตัว จึงต้องกำหนดระนาบในการพิจารณารูปแบบคลื่นขึ้น โดยตกลงกันให้มีใช้อยู่ 2 ระนาบ ดังแสดงในรูป 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงระนาบเมอริเดียนและอิเควโทเรียลของสาอากาศ

จากรูป

- ระนาบเมอริเดียน (meridian) คือ ระนาบตามแนวแกนของสายอากาศ
- ระนาบอิเควโทเรียล (equatorial) คือ ระนาบตั้งฉากกับแนวสายอากาศ

ยกตัวอย่าง เช่น สายอากาศชนิดแนวตั้ง (vertical) อธิบายได้ว่า ระนาบเมอริเดียนมีทิศตั้งฉากกับพื้นโลก และระนาบอิเควโทเรียลมีทิศแนวนอน

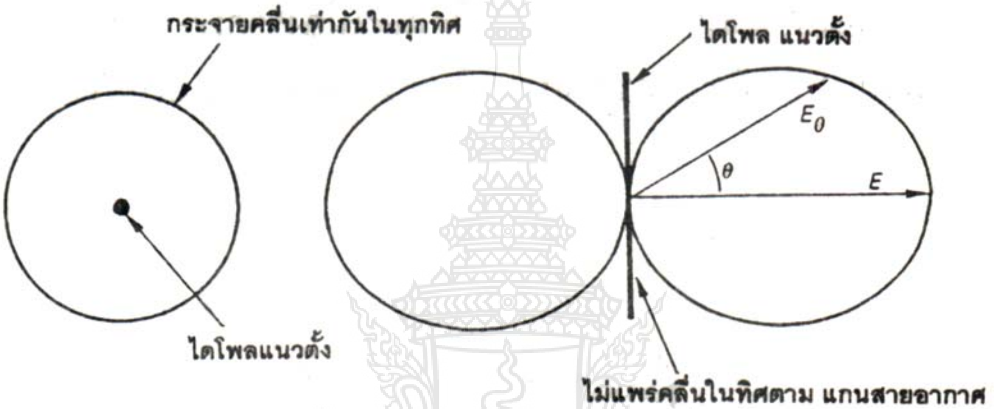
รูปแบบการแพร่คลื่นสามารถแสดงถึงประสิทธิภาพของสายอากาศได้ดี โดยต้องเป็นในสภาพที่ติดตั้งห่างจากวัสดุต่าง ๆ เช่น ตึก, อาคาร หรือพื้นดิน ที่อาจทำให้เกิดคลื่นสะท้อนขึ้นและมีผลต่อรูปแบบได้

แต่ในการใช้งานจริง สายอากาศถูกติดตั้งไว้ใกล้กับวัสดุต่าง ๆ ทำให้รูปแบบการแพร่คลื่นไม่อาจระบุถึงประสิทธิภาพแท้จริงของสายอากาศได้เต็มร้อยเปอร์เซนต์ ถึงกระนั้นรูปแบบการแพร่คลื่นใช้ประโยชน์ในแง่การเปรียบเทียบความแตกต่างกันของสายอากาศแต่ละชนิด

สายอากาศอาจถูกใช้ในการรับคลื่นได้ และเราสามารถใช้รูปแบบการแพร่คลื่นระบุถึงความสามารถในการรับของสายอากาศได้ โดยเฉพาะคุณสมบัติไดเร็คติวิตี้ที่ทำให้รู้ว่าควรหันเสาหรือติดตั้งในทิศทางใดจึงได้สัญญาณที่ต้องการ

สายอากาศไดโพลชนิดแนวตั้งจะแพร่/หรือรับคลื่นได้เท่ากันในทุกทิศตามระนาบแนวนอน ทำให้มีรูปแบบการแพร่คลื่นเป็นวงกลม ดังแสดงในรูป 2.14 (a)

ส่วนระนาบแนวตั้งของสายอากาศชนิดนี้จะไม่แพร่/หรือรับคลื่นตลอดตามแนวสายอากาศ ทำให้รูปแบบการแพร่คลื่นเป็นลักษณะเลขแปด ดังแสดงในรูป 2.14 (b)



รูปที่ 2.14 แสดงรูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพลแบบแนวตั้ง (ขนาด

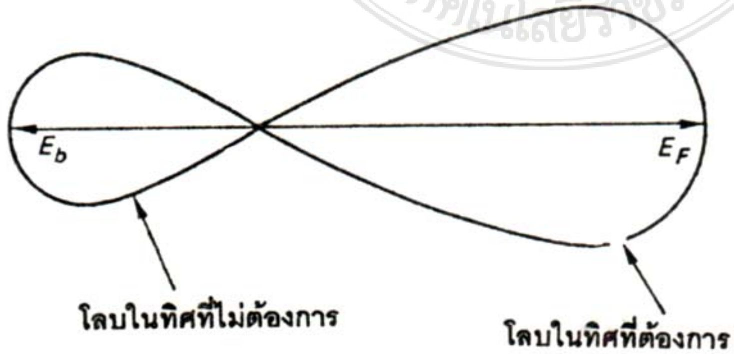
(a) รูปแบบระนาบแนวนอน

(b) รูปแบบระนาบแนวตั้ง

อัตราส่วนฟรอนด์ทูแบค (Front-to-Back Ratio)

รูปแบบการแพร่คลื่นส่วนใหญ่แล้วจะมีไดเร็คติวิตี้ไปในทิศทางใดทิศหนึ่งมากกว่าทิศอื่น

ดังนั้นอัตราส่วนฟรอนด์ทูแบคของสายอากาศ คือ อัตราส่วนของความเข้มสนามไฟฟ้า ที่เกิดจากสายอากาศโดยคิดจากทิศที่ต้องการกับทิศไม่ต้องการ (ตรงข้ามกัน) แสดงดังรูป 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงอัตราส่วนฟรอนด์ทูแบคของสายอากาศ

ตัวอย่างการคำนวณ

ค่าความเข้มสนามที่ระยะ X กิโลเมตร ตามทิศที่ต้องการจากสายอากาศเท่ากับ 10 mV/m และในระยะทางที่เท่ากันแต่ทิศตรงข้ามมีค่าเท่ากับ 1mV/m

จงคำนวณหาอัตราส่วนฟรอนต์ทูแบคของสายอากาศนี้

คำตอบ

อัตราส่วนฟรอนต์ทูแบค $= \frac{E_f}{E_b} = \frac{10\times 10^{-3}}{1\times 10^{-3}} = 10$

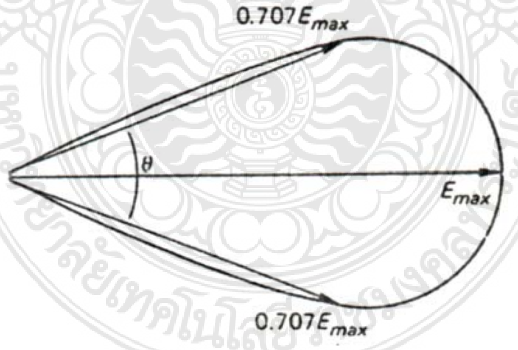
หรือในหน่วยเดซิเบล $= 20 \text{ Log } 10 = 20 \text{ dB}$

บีมวิดท์ (Beamwidth)

จัดเป็นการวัดความกว้างของลำคลื่น เพื่ออธิบายไดเร็คติวิตี้ของสายอากาศได้ดี โดยกำหนดให้มีหน่วยเป็นมุมที่คิดจากกรณีดังนี้ (มีความหมายเหมือนกันทุกกรณี)

- ที่จุดซึ่งค่าพลังงานในการแพร่คลื่นลดลงเหลือครึ่งหนึ่งจากค่าสูงสุด
- หรือจุดที่ค่าความเข้มสนามเหลือ $1/\sqrt{2}$ หรือ 0.707 เท่าของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด
- หรือจุด 3 dB บนรูปแบบการแพร่คลื่น

แสดงค่าบีมวิดท์ θ จากรูป 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงบีมวิดท์ของสายอากาศ

อัตราขยายของสายอากาศ

ค่านี้ไม่ใช่ค่าอัตราส่วนระหว่างพลังงานเอาท์พุทต่อด้านอินพุท แต่เป็นอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้วัดคุณสมบัติไดเร็คติวิตี้ และสามารถระบุถึงปริมาณของการแพร่คลื่นมีมากในทิศทางใด

การคิดค่าอัตราขยายของสายอากาศจะวัดเทียบกับสายอากาศอ้างอิง

โดยอัตราขยายของสายอากาศส่งคือ กำลังสองของค่าอัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามตามทิศที่มีการแพร่คลื่นมากที่สุด เทียบกับค่าความเข้มสนามที่จุดเดียวกันของสายอากาศอ้างอิง หรืออาจแสดงในรูปอัตราส่วนของค่าพลังงานที่ต้องใช้ส่งอากาศของสายอากาศทั้งสองเพื่อให้เกิดความเข้มสนามขนาดเท่ากัน (ณ จุดเดียวกัน) ในทิศทางที่มีการแพร่คลื่นมากที่สุด หรืออัตราขยายของสายอากาศรับ คือ อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มสนามของสายอากาศทดสอบกับสายอากาศอ้างอิง ณ จุดตั้งสายอากาศที่เดียวกัน

การใช้สายอากาศอ้างอิงมักเป็นแบบไดโพลขนาด $\lambda/2$ หรือแบบไอโซทรอปิก (isotropic) ซึ่งมีลักษณะพิเศษ คือ กระจายคลื่นได้รอบตัวทุกทิศในปริมาณเท่ากัน (ในความเป็นจริงเราไม่สามารถสร้างสายอากาศไอโซทรปิกได้ มีใช้เฉพาะเป็นหลักการในงานสายอากาศเท่านั้น) มีการทดลองจนได้ผลสรุปว่าอัตราขยายของสายอากาศไดโพลขนาด $\lambda/2$ เทียบค่ากับสายอากาศไอโซทรอปิกได้มากกว่าอยู่ 1.64 เท่า หรือ 2.15 dB

ตัวอย่างการคำนวณ #1

สายอากาศทดสอบถูกจ่ายหรือฟีดสัญญาณขนาด 10kW จะได้ขนาดความเข้มสนาม ณ จุดทดสอบเท่ากับที่สร้างจากสายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ ซึ่งถูกฟีดด้วยสัญญาณขนาด 20 kW

จงคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศทดสอบเมื่อ

(a) ใช้สายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ อ้างอิง

(b) ใช้สายอากาศไอโซทรอปิกอ้างอิง

ถ้ามีการปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศทดสอบที่ฟีดสัญญาณขนาด 10 kW ให้สร้างความเข้มสนาม ณ จุดเดิมมากเป็นสองเท่า ให้คำนวณอัตราขยายของสายอากาศหลังจากปรับปรุง (ใช้สายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ อ้างอิง)

คำตอบ

(a) ค่าอัตราขยายของสายอากาศทดสอบเทียบกับแบบ $\lambda/2$

$$= 10 \ \mathrm{Log}_{10} \frac{20\times10^3}{10\times10^3} = 3$$

(b) เนื่องจากอัตราขยายของไดโพลแบบ $\lambda/2$ เทียบกับไอโซทรอปิก = 2.15 **dB**

ดังนั้นอัตราขยายของสายอากาศทดสอบกับไอโซทรอปิก = 2.15 + 3 = 5.15 **dB** **(Ans.)**

สำหรับสายอากาศที่ปรับปรุงแล้วให้ค่าความเข้มสนามเป็น 2 เท่าจากเดิม

ดังนั้นค่าอัตราขยายใหม่ $= 20 \ \mathrm{Log}_{10} 2 = 6$ **dB**

และเทียบกับไดโพลแบบ $\lambda/2$ จะได้อัตราขยาย $= 3+6 = 9$ **dB** **(Ans.)**

ตัวอย่างการคำนวณ # 2

ในการทดสอบสายอากาศชนิดหนึ่งที่ไม่รู้ค่าอัตราขยายกับสายอากาศมาตรฐานแบบหนึ่งที่รู้ค่าอัตราขยาย

กำหนดให้วัดค่าพลังงานที่ถูกส่งมาถึงสายอากาศ และแม็ชท์ได้พอดีกับโหลดได้ดังนี้

สายอากาศทดสอบวัดได้ 2uW

สายอากาศมาตรฐานวัดได้ 8uW

ถ้าอัตราขยายของสายอากาศมาตรฐานเทียบกับแบบไอโซทรอปิกมีคา 30 **dB**

จงคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศที่ทดสอบนี้

คำตอบ

หาอัตราขยายของสายอากาศมาตรฐานเทียบกับสายอากาศที่ทดสอบได้

$$= 10 \ \mathrm{Log}_{10} \left(\frac{8 \times 10^{-6}}{2 \times 10^{-6}} \right) = 6\mathrm{dB}$$

ดังนั้นอัตราขยายของสายอากาศทดสอบเทียบกับไอโซทรอปิก = 30-6 = 24 **dB**

 # กำลังส่งประสิทธิผล (Effective Radiated Power)

ในทางทฤษฎีสายอากาศไอโซทรอปิก มีคุณสมบัติแพร่กระจายพลังงานได้ทุกทิศรอบตัว และมีขนาดความเข้มสนามเท่ากันหมดตามระยะทางรอบสายอากาศ

ส่วนสายอากาศที่ใช้งานจริง ทุกชนิดจะไม่มีคุณสมบัติเช่นนี้อยู่ โดยมีการ**อัดคลื่นวิทยุ** ไปในทิศใดทิศหนึ่งเท่านั้น

ดังนั้นสรุปได้ว่า สายอากาศที่ใช้งานจริงต้องการกำลังที่ป้อนให้สายอากาศน้อยกว่าแบบไอโซทรอปิก ในการสร้างความเข้มสนามค่าเท่ากัน ณ จุดเดียวกัน ตามทิศทางที่มีการแพร่คลื่นมากที่สุด

กำลังส่งประสิทธิผล หรือ **ERP** ของสายอากาศ หมายถึง ค่าพลังงานส่วนที่ไอโซทรอปิกใช้สร้างความเข้มสนามขนาดเท่ากับสายอากาศใช้งานจริง ณ จุดเดียวกัน หรือในอีกนัยคือ ถ้าเราใช้สายอากาศที่มีอัตราขยายกำลังของคลื่นวิทยุที่ออกอากาศจะถูกเพิ่มให้มากกว่ากำลังส่งของเครื่องส่งค่าที่มากขึ้นนี้เรียกว่า **ERP**

ในการคำนวณ ERP ของสายอากาศคิดจากกำลังส่งทั้งหมดที่ถูกส่งให้สายอากาศ (P_t) คูณกับอัตราขยายของสายอากาศ (G) ได้สูตรว่า

$$ERP = P_t G$$

ตัวอย่างการคำนวณ

สายอากาศที่มีอัตราขยายเท่ากับ 10dB (เมื่อเทียบกับแบบไอโซทรอปิก) จะแพร่คลื่นขนาด 100 วัตต์ จงคำนวณหากำลังส่งประสิทธิผลของสายอากาศ

คำตอบ

10 dB คือ พลังงานในอัตราส่วน 10:1

ดังนั้น คิดจากสูตรได้ว่า

ERP = 10 x 1000 = 10 กิโลวัตต์ **(Ans.)**

 # แถบความถี่ (Bandwidth)

จัดเป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศทำงานได้น่าพอใจ ซึ่งในหนังสือเล่มนี้พิจารณาโลบหลักของรูปแบบการแพร่คลื่น ซึ่งคิดจากกราฟว่าแถบความถี่คือ ช่วงความถี่ที่ค่าพลังงานของสายอากาศที่แพร่ออกอากาศในทิศทางโลบหลักมีค่าไม่ต่ำกว่า 3 **dB**

 # ความต้านทานการแพร่คลื่นและประสิทธิภาพสายอากาศ

กำหนดค่าพลังงานที่แพร่จากสายอากาศมีสูตร

$$P = I^2 R$$

Rr คือ ความต้านทานการแพร่คลื่น และถ้าคิดความต้านทาน เนื่องจากการสูญเสียความร้อนด้วยให้แทนอักษร R_l

ดังนั้นประสิทธิภาพของสายอากาศ (เขียนแทนด้วยอักษร η) คืออัตราส่วนของพลังงานที่แพร่ออกอากาศต่อส่วนที่ป้อนให้สายอากาศ มีสูตรคำนวณดังนี้ (จะแสดงผลเป็นเปอร์เซนต์)

$$\eta = \frac{I^2 R_r}{I^2 R_L + I^2 R_r} = \frac{R_r}{R_r + R_L} \times 100\%$$

ตัวอย่างการคำนวณ

สายอากาศส่งความถี่ค่าต่ำ มีความต้านทานการแพร่คลื่น 0.3 โอห์ม และความต้านทานจากการสูญเสียเป็นความร้อน 1.5 โอห์ม ถ้ากระแสที่จ่ายให้สายอากาศมีขนาด 50 แอมป์ ให้คำนวณหากำลังส่งออกอากาศ, กำลังสัญญาณที่จ่ายเข้า และประสิทธิภาพของสายอากาศ

คำตอบ

กำลังส่งที่ออกอากาศ $= I^2R_r = (50)^2 \times 0.3 = 750$ วัตต์

กำลังสัญญาณที่จ่ายเข้า $= I^2R_r + I^2R_L = (50^2 \times 0.3) + (50^2 \times 1.5)$

$= 4500$ วัตต์

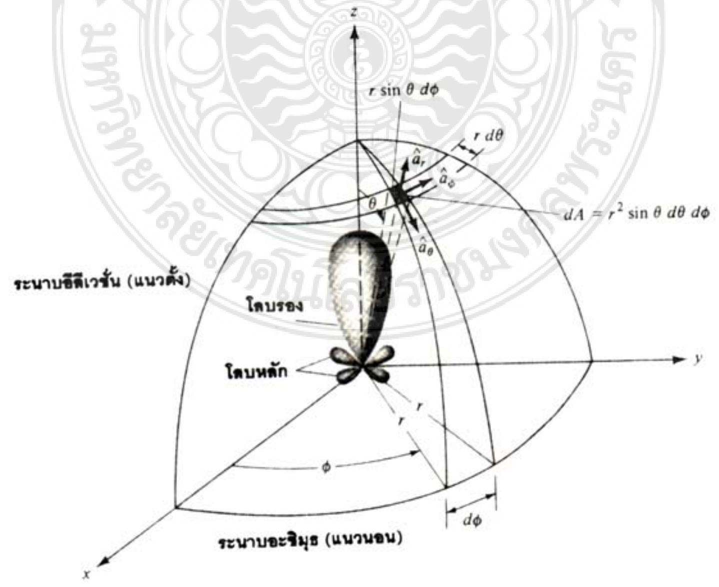
ประสิทธิภาพของสายอากาศ $= \dfrac{100R_2}{R_L + R_r} = \dfrac{100 \times 0.3}{0.3 + 1.5} = 16.67\%$

ที่ความถี่ค่าต่ำมาก พบว่าประสิทธิภาพของสายอากาศมีค่าน้อย แต่ที่ความถี่สูงอาจมีค่าเพิ่มมากกว่า 90 % ได้

2.19 รูปแบบการแพร่คลื่น

เป็นการเขียนคุณสมบัติต่าง ๆ ในการแพร่คลื่นลงเป็นภาพขึ้นมา ซึ่งสามารถแสดงถึงความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น, ความเข้มสนาม, เฟส หรือโพลาไรเซชั่นได้

คุณสมบัติเหล่านี้มีลักษณะการกระจายค่าแบบ 3 มิติ จึงใช้แกนโคโอดิเนตแบบ 3 มิติ (X,Y,Z) แทนได้ดังรูป 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงแกนโคโอดิเนตในการวิเคราะห์สายอากาศ

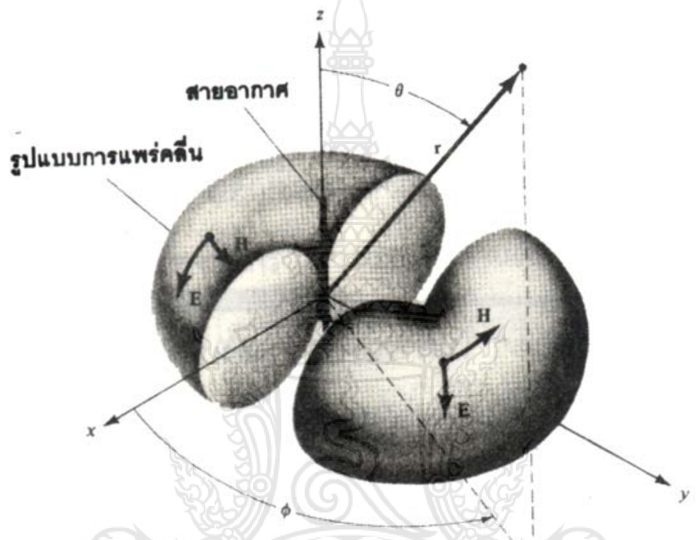
2.20 รูปแบบไอโซทรอปิก, ไดเร็คชั่นแนล และออมนิไดเร็คชั่นแนล

มีคำศัพท์อยู่ 3 คำที่น่าสนใจดังนี้

- ไอโซทรอปิก คือ สายอากาศในทางทฤษฎีที่สามารถแพร่คลื่นในทุกทิศทางด้วยความเข้มสนามเท่ากัน

- ไดเร็คชั่นแนล คือ คุณสมบัติในการแพร่คลื่นหรือรับคลื่นในทิศทางใดทิศหนึ่งได้ดีกว่าทิศทางอื่น

ยกตัวอย่างของสายอากาศแบบไดเร็คชั่นแนลได้ดังรูป 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงตัวอย่างของสายอากาศแบบไดเร็คชั่นแนล

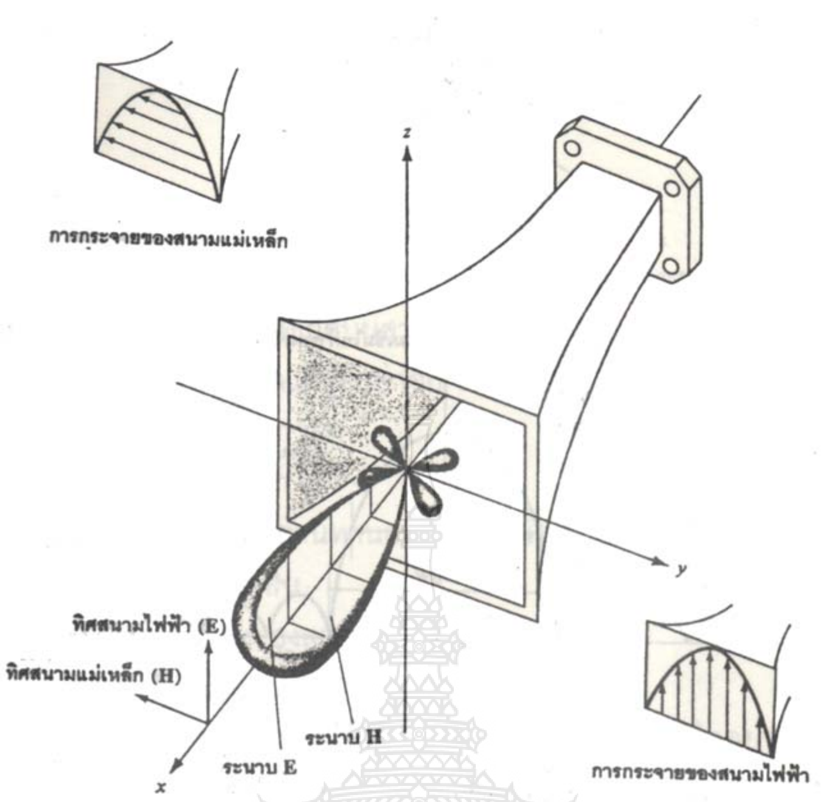
จากรูปวิเคราะห์ได้ว่า ไม่มีการไดเร็คชั่นแนลในระนาบแนวนอน [g(θ) , ϕ = ค่าคงที่] และมีไดเร็คชั่นแนลในระนาบแนวตั้ง [g(θ) , ϕ = ค่าคงที่] เราเรียกรูปแบบการแพร่คลื่นลักษณะว่าออมนิไดเร็คชั่นแนล (omnidirectional) ซึ่งหมายถึง “รอบตัว” ทำให้ครอบคลุมพื้นที่ใช้งานได้ดีตามแนวราบ

2.21 รูปแบบ E และ H

บางครั้งเราแสดงประสิทธิภาพของสายอากาศในรูปแบบระนาบ E และ H โดยถ้าสายอากาศมีโพลาไรเซชั่นแบบลิเนียร์แล้ว อธิบายความหมายได้ว่า

- รูปแบบระนาบ E คือ ระนาบที่มีเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า และทิศทางของการแพร่คลื่นมากที่สุด

- รูปแบบระนาบ H คือ ระนาบที่มีเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็ก และทิศทางของการแพร่คลื่นมากที่สุด ตัวอย่างแสดงดังรูป 2.19

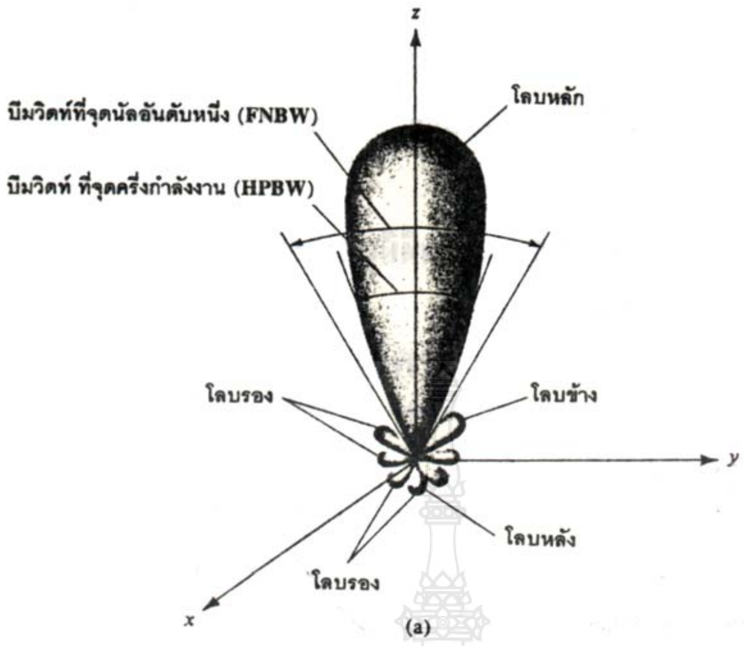


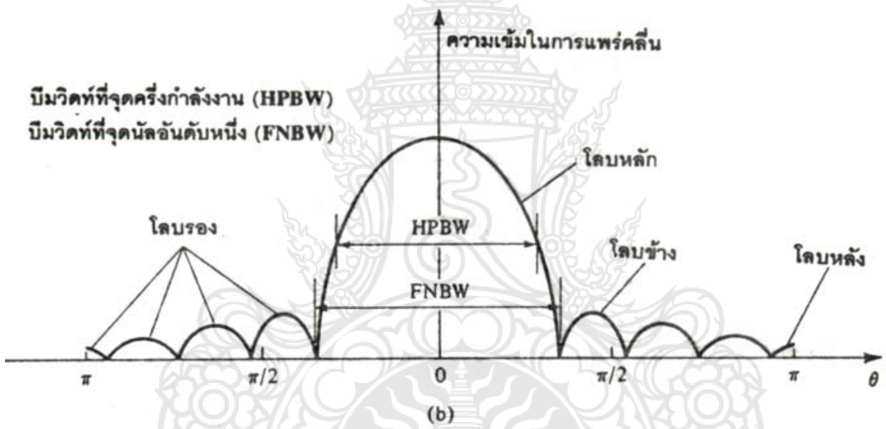
รูปที่ 2.19 แสดงรูปแบบระนาบ E และ H ของสายอากาศแบบ Pyramidal horn

จากรูประนาบ E คือ ระนาบ X-Z (แนวตั้ง ; $\phi = 0$) และระนาบ H คือ ระนาบ X-Y (แนวนอน ; $\theta = \pi/2$)

2.22 ส่วนต่าง ๆ ในรูปแบบการแพร่คลื่น

แต่ละส่วนของรูปแบบการแพร่เรียกว่า โลบ (Lobe) ซึ่งยังแบ่งย่อยเป็นโลบหลัก, โลบรอง, โลบข้าง และโลบหลังอีกด้วยพิจารณาในรูป 2.20





รูปที่ 2.20 แสดงส่วนต่าง ๆ ของรูปแบบการแพร่คลื่น

(a) แสดงโลบและบีมวิดท์ (แบบ 3 มิติ)

(b) แสดงระดับกำลังคลื่น และโลบต่าง ๆ (แบบ 2 มิติ)

อธิบายจากรูปได้ว่า ความหมายของโลบ คือ ส่วนของรูปแบบการแพร่คลื่นที่มีความเข้มของกำลังคลื่นสูง (รอบ ๆ เป็นความเข้มต่ำ)

ในรูป 2.20 (a) เป็นการเขียนรูปบนแกนโพลาร์ 3 มิติ ที่มีโลบอยู่หลายขนาดส่วนรูป 2.20 (b) เป็นการเขียนในลักษณะแกน 2 มิติ

โลบหลัก (major lobe) หรืออาจเรียกบีมหลัก หมายถึง โลบที่มีการแพร่ไปในทิศทางที่มีการแพร่มากที่สกุด ในรูป 2.20 โลบหลักมีทิศตามจุด $\phi = 0$ สำหรับสายอากาศบางแบบบีมลำคลื่นมากกว่าหนึ่ง จะมีโลบหลักมากกว่าหนึ่งโลบได้

โลบรอง (minor lobe) คือ โลบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่โลบหลัก ในรูป 2.20 (a) และ (b) ทุกโลบยกเว้นโลบหลัก เราระบุเป็นโลบรองได้

โลบข้าง (side lobe) คือ โลบที่อยู่ในทิศทางอื่น นอกเหนือจากทิศทางของโลบหลัก (ทั่วไปแล้วโลบข้างจะอยู่ติดกับโลบหลัก และมีทิศรอบบีมหลัก)

โลบหลัง (back lobe) คือ โลบรองที่มีทิศตรงข้ามกับโลบหลัก (ต่างกัน 180°) เราพบว่าโลบรองจะเกิดในทิศที่ไม่ต้องการเสมอ จึงควรลดขนาดให้น้อยที่สุด สำหรับโลบข้างจัดเป็นโลบรองที่มีขนาดมากที่สุด (ต้องลดขนาดโลบข้างลง)

โดยทั่วไปถ้าระดับของโลกข้างมีค่าประมาณ -20 **dB** หรือน้อยกว่านี้ จะไม่มีผลต่อการใช้งานมากนัก จุดที่รับสัญญาณได้เท่ากับศูนย์ (ถึงแม้จะรีโซแนนซ์กับความถี่ในการส่ง) เรียกว่า นัล (null)

2.23 บทสรุป

เนื่อหาของบทที่ 2 ได้อธิบายถึงพื้นฐานการทำงานของสายอากาศ โดยเฉพาะรูปสัญญาณ (กระแส, แรงดันไฟฟ้า) ที่เกิดบนสายอากาศในขณะรีโซแนนซ์เป็นสำคัญ

ยังมีประเด็นที่น่าสนใจแก่ผู้ศึกษาอีก ได้แก่

- ความยาวทางกายภาพ
- ความยาวทางไฟฟ้า
- อิมพีแดนซ์, ความต้านทานการแพร่คลื่น
- รูปแบบการแพร่คลื่น
- อัตราขยายกำลังของสายอากาศ
- ไดเร็คติวิตี้ (directivity)

ซึ่งความหมายของสิ่งเหล่านี้ใคร่ขอให้ผู้อ่านทำความเข้าใจอย่างถ่องแท้ เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาสายอากาศต่อไป

การทดลองที่ 1

Radiation Pattern and Polarization Measurements

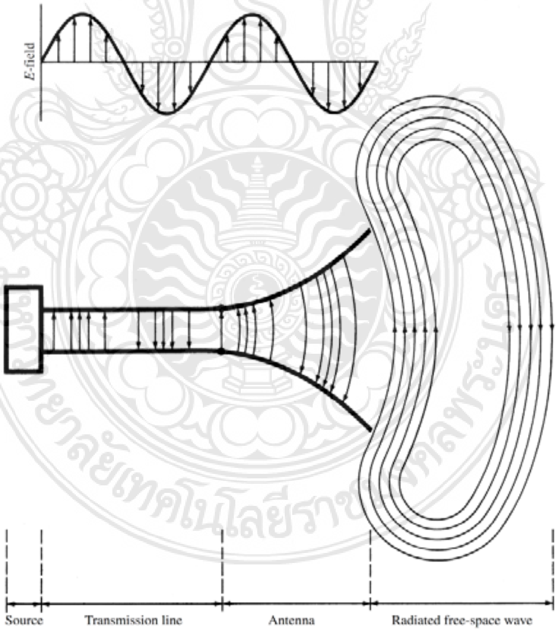
วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจหลักการทำงานของสายอากาศ
2. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจและสามารถใช้งานเครื่องมือทดสอบที่เกี่ยวข้องได้
3. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจและสามารถทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) และการโพลาไรซ์

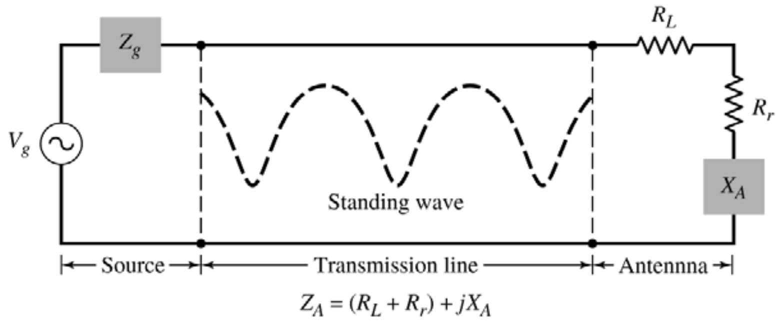
ทฤษฎีเบื้องต้น

สายอากาศ (Antenna)

สายอากาศ คืออุปกรณ์หรือโครงสร้างใดๆที่ใช้ในการการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิด หรือแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างสายนำสัญญาณและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางในอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 หลักการของสายอากาศ

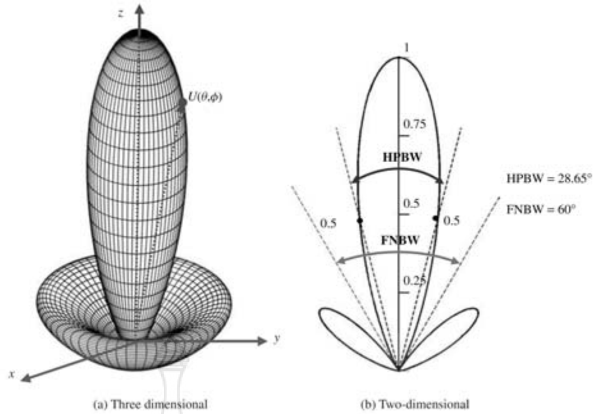


รูปที่ 2 วงจรสมมูลของสายอากาศที่ด้านส่ง (Transmitter)

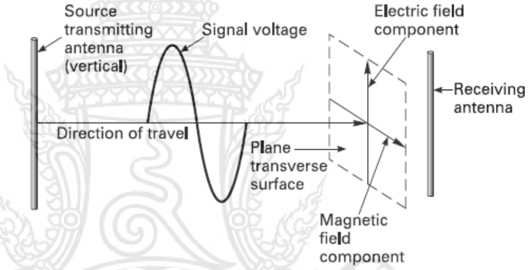
วงจรสมมูลของสายอากาศในด้านส่ง (Transmitter) แสดงในรูปที่ 2 เมื่อกำหนดให้แหล่งกำเนิดคลื่นในอุดมคติมีค่าอิมพีแดนซ์ Z_g ซึ่งต่อเชื่อมกับสายนำสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_o และสายอากาศส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์ Z_A โดยวงจรสมมูลของสายอากาศในอุดมคติประกอบด้วย $Z_A = (R_L + R_r) + jX_A$ เมื่อ R_L คือค่าความต้านทานโหลดของสายอากาศซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าการสูญเสียเนื่องจากความนำไฟฟ้า (Conduction loss) และค่าการสูญเสียจากวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric loss) ซึ่งทั้งสองเกี่ยวข้องโดยตรงกับโครงสร้างสายอากาศและวัสดุที่นำมาสร้างสายอากาศ ขณะที่ R_r คือความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation resistance) ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ขณะที่ X_A คือค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเช่นกัน พารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 Antenna parameter

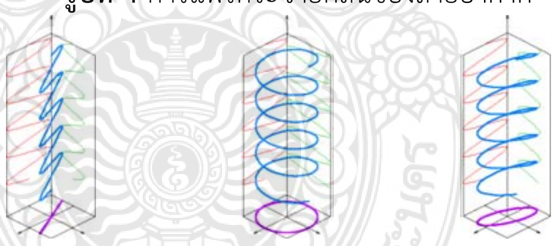
Antenna characteristics	Description
Radiation pattern	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ หรือคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันเปลี่ยนไปตามมุมรอบสายอากาศ
Beamwidth	คือความกว้างลำคลื่น หรือมุมระหว่างองศาที่อยู่ตรงข้ามกันเมื่ออ้างอิงจากจุดสูงสุดของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งความกว้างลำคลื่นที่นิยมใช้บอกคุณสมบัติของสายอากาศประกอบด้วย ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half power beamwidth: HPBW) และ ความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์ครั้งแรก (First null beamwidth: FNBW)

<table>
<tr><td></td><td>

รูปที่ 3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น</td></tr>
<tr><td>Polarization</td><td>คือทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามเวลา (ในรูปที่ 4) ที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศในทิศทางที่พิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 3 แบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ คือ 1. โพลาไรซ์เชิงเส้น (ก) 2. โพลาไรซ์วงกลม(ข) 3. โพลาไรซ์วงรี (ค)



รูปที่ 4 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ



(ก) โพลาไรซ์เชิงเส้น (ข) โพลาไรซ์วงกลม (ค) โพลาไรซ์วงรี

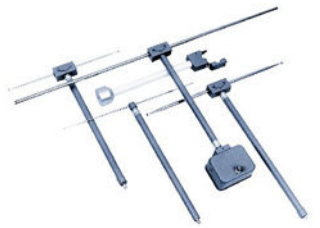
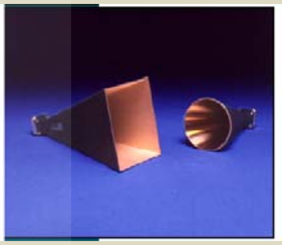
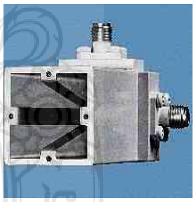
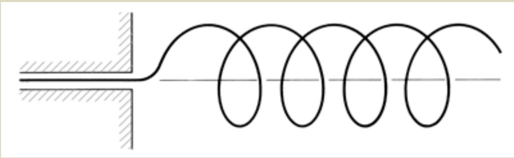
รูปที่ 5 การโพลาไรซ์ของสายอากาศ</td></tr>
<tr><td>Bandwidth</td><td>แบนวิดธ์ของสายอากาศคือช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศเมื่อพิจารณาร่วมกับคุณลักษณะบางอย่างของสายอากาศเช่น

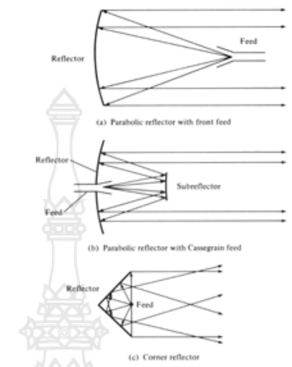
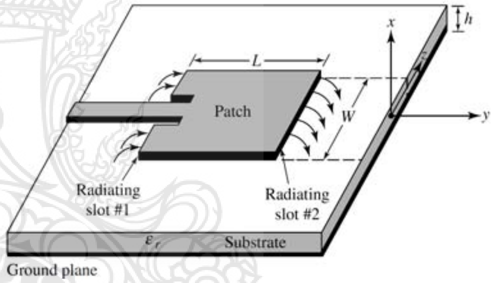
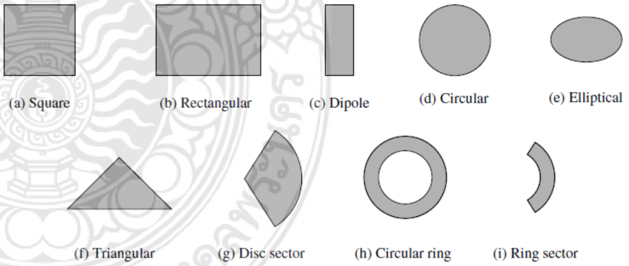
Impedance bandwidth จะคำนึงถึงค่า VSWR ที่ต้องการของระบบ (ระบบสื่อสารโดยทั่วไปแล้วค่ามีค่าอิมพิแดนซ์ของสายนำสัญญาณ $Z_o =$ 50 โอห์ม) โดยทั่วไปแล้วค่า VSWR < 2 หรือค่า$|S_{11}| \approx -10$ dB

Polarization bandwidth จะคำนึงถึงค่า Polarization ของสายอากาศที่ต้องการของระบบ

Gain bandwidth จะคำนึงถึงค่า gain ของสายอากาศที่ต้องการของระบบเป็นต้น</td></tr>
<tr><td>Side lobe level</td><td>คือระดับสูงสุดลำดับที่สองของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นหรือระดับสูงสุดของลำคลื่นข้างเคียง</td></tr>
</table>

ตารางที่ 2 ตัวอย่างสายอากาศชนิดต่างๆ

Half-Wavelength Dipoles		
Gain	~ 2.15 dBi	
Radiation pattern	Omnidirectional	
Impedance Bandwidth	Narrow	
Polarization	Linear polarization	
Standard Gain Horn		
Gain	10~25 dBi	
Radiation pattern	Unidirectional	
Impedance Bandwidth	Wideband	
Polarization	Linear polarization	
Ridge Horn		
Gain	0 to20 dBi	
Radiation pattern	Unidirectional	
Impedance Bandwidth	Broadband	
Polarization	Linear polarization	
Helical antenna		
Gain:	2 to 10 dBi	
Radiation pattern	Omnidirectional, Unidirectional	
Impedance Bandwidth	Wideband	
Polarization	Circular polarization	
Loop antenna		
Gain	~2.2 dBi	

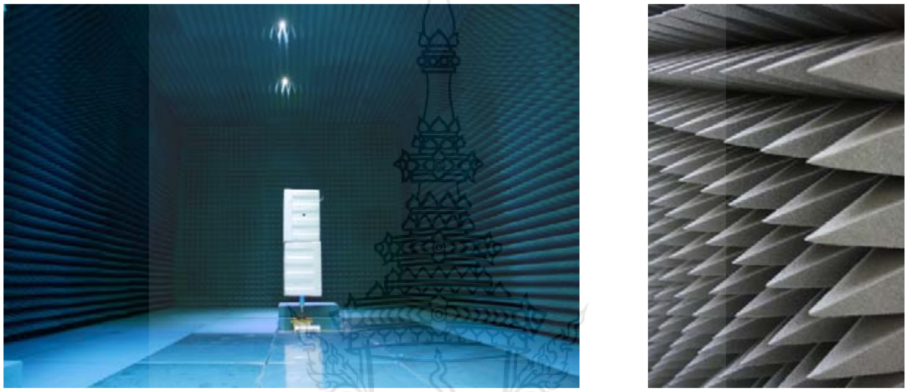
Radiation pattern	Omnidirectional	
Impedance Bandwidth	Narrow band	
Polarization	Linear polarization	
Reflector antenna		
Gain	High Gain (>10dBi)	
Radiation pattern	Unidirectional	
Impedance Bandwidth	Wideband (depends on feed element)	
Polarization	Linear, circular polarization	
Microstrip antenna		 
Gain	~0-8 dBi	
Radiation pattern	Unidirectional	
Impedance Bandwidth	Narrow band or wideband	
Polarization	Linear, circular, elliptical polarization	

เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

1. Network analyzer 1 เครื่อง
2. Signal generator 1 เครื่อง
3. Spectrum analyzer 1 เครื่อง
4. ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Anechoic Microwave Chamber)

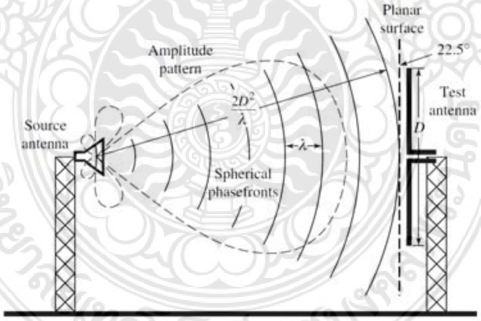
(ก) Network analyzer (ข) Signal generator (ค) Spectrum analyzer

รูปที่ 6 เครื่องมือทดสอบ

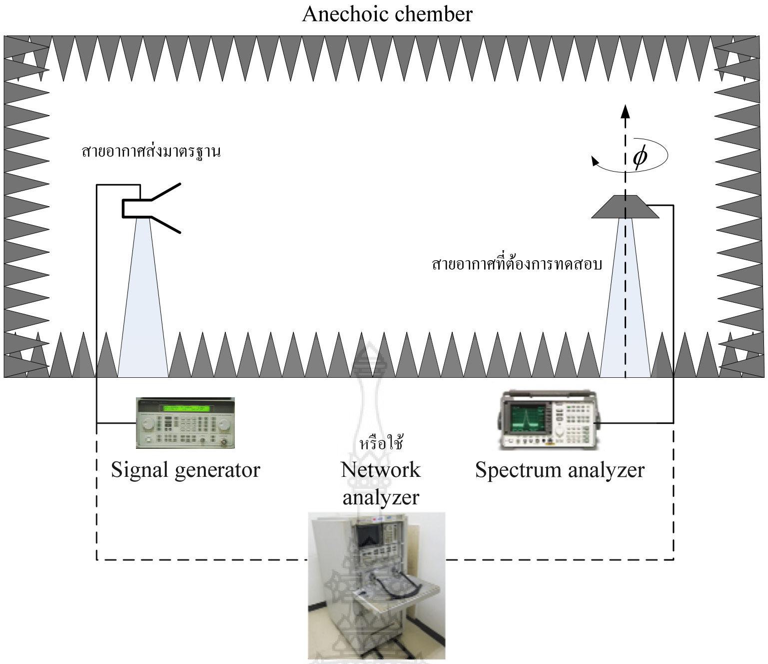


(ก) ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (ข) วัสดุดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปที่ 7 ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Anechoic Chamber) สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รูปที่ 8 ระยะทดสอบสายอากาศ $\dfrac{2D^2}{\lambda}$



รูปที่ 9 การทดสอบสายอากาศ

ลำดับขั้นการทดลอง

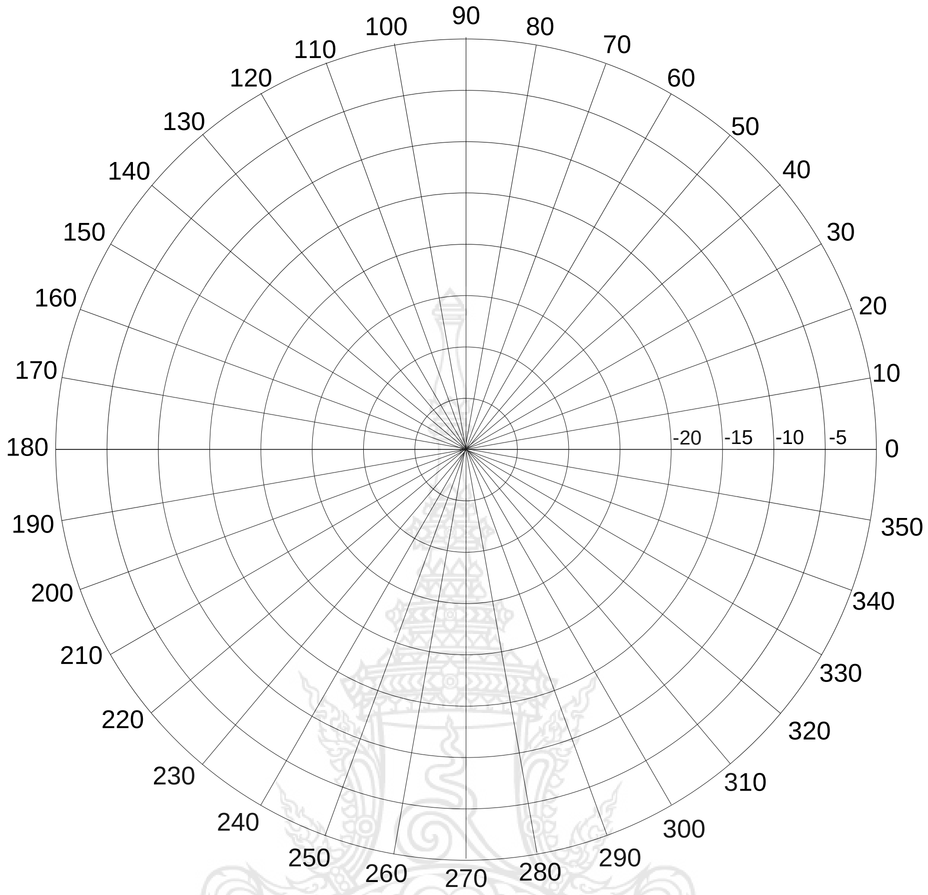
การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 9 ประกอบด้วยสายอากาศส่ง และสายอากาศรับซึ่งเป็นสายอากาศที่ต้องการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Antenna Under Test: AUT)
2. เชื่อมต่อสายนำสัญญาณจากสายอากาศส่งและสายอากาศรับเข้ากับเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณตามลำดับ กำหนดความถี่ทดสอบที่ 2.4GHz
3. บันทึกค่า amplitude ที่เครื่องรับสัญญาณทุกๆ องศาของการหมุนมุม ϕ ของสายอากาศรับ โดยระยะทดสอบสายอากาศต้องมีระยะไม่ต่ำกว่า $\frac{2D^2}{\lambda}$ เมื่อ D คือขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศที่ทำการทดสอบ บันทึกตามตารางที่ 3
4. วาดกราฟบน Polar graph ในรูปที่ 10

ตารางที่ 3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

Angle ϕ	Value
0	
10	
20	
30	
40	
50	

60	
70	
80	
90	
100	
110	
120	
130	
140	
150	
160	
170	
180	
190	
200	
210	
220	
230	
240	
250	
260	
270	
280	
Angle ϕ	Value
290	
300	
310	
320	
330	
340	
350	
360	

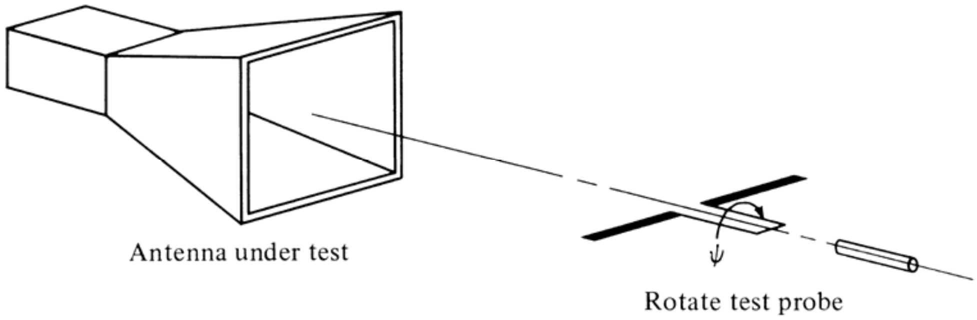


รูปที่ 10 Polar graph (Amplitude ที่เปลี่ยนไปตามมุม ϕ)

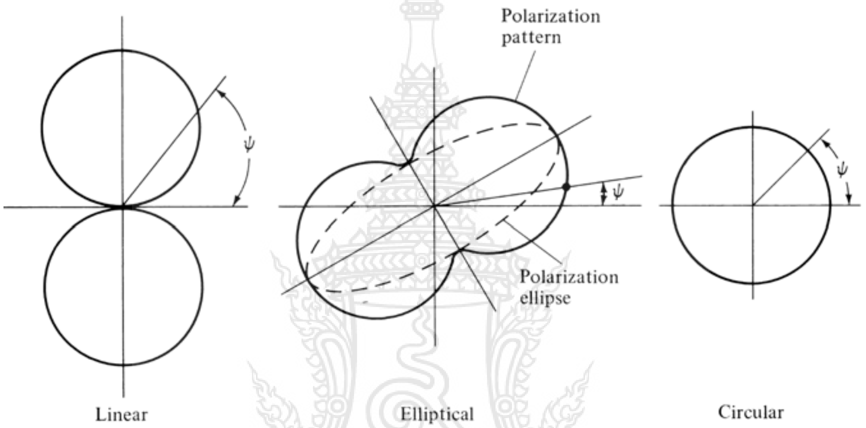
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ....

การทดสอบโพลาไรซ์ของสายอากาศ

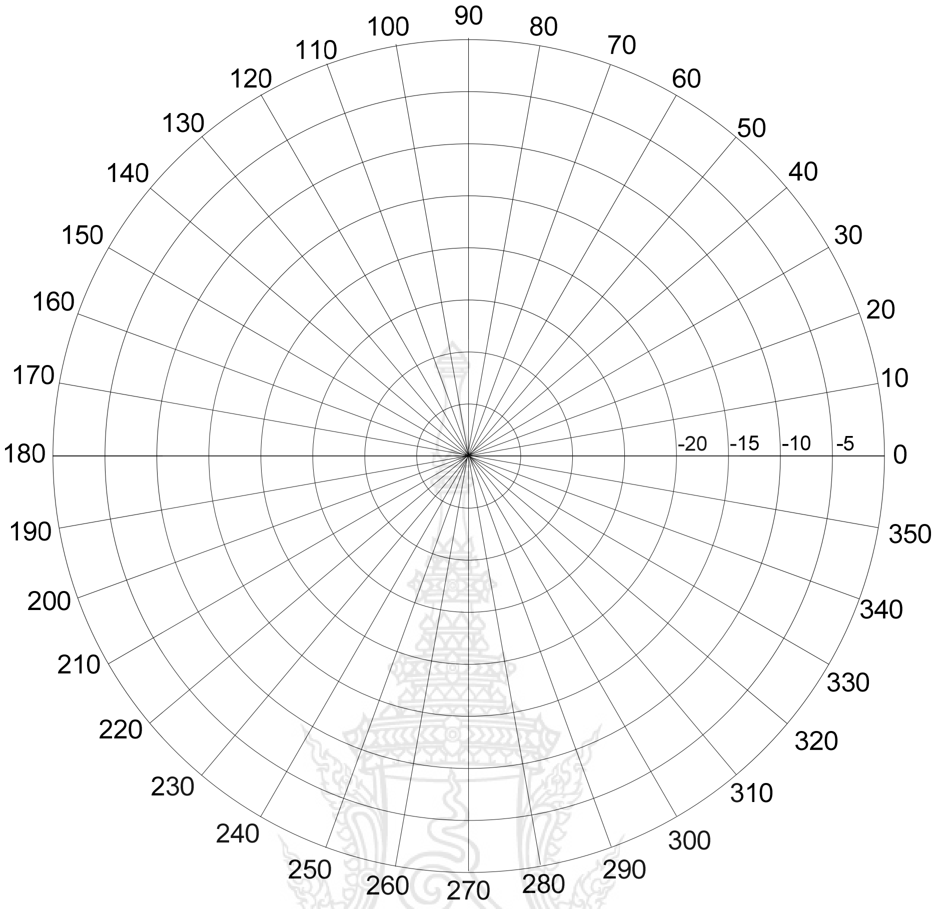
1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 11 ประกอบด้วยสายอากาศส่ง และสายอากาศรับซึ่งเป็นสายอากาศที่ต้องการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Antenna Under Test: AUT)
2. เชื่อมต่อสายนำสัญญาณจากสายอากาศส่งและสายอากาศรับเข้ากับเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณตามลำดับ
3. กำหนดความถี่ทดสอบที่ 2.4 GHz จากนั้นบันทึกค่า amplitude ที่เครื่องรับสัญญาณทุกๆ องศาของการหมุนมุม ψ ของสายอากาศส่ง บันทึกตามตารางที่ 4
4. จากนั้นเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับแบบรูป amplitude ที่เปลี่ยนไปตามมุม ψ ในรูปที่ 12
5. วาดกราฟบน Polar graph ในรูปที่ 13



รูปที่ 11 การทดสอบโพลาไรซ์ของสายอากาศ



รูปที่ 12 แบบรูป amplitude ที่เปลี่ยนไปตามมุม ψ



รูปที่ 13 Polar graph (Amplitude ที่เปลี่ยนไปตามมุม ψ)

ตารางที่ 4 การทดสอบโพลาไรซ์ของสายอากาศ

Angle ψ	Value
0	
45	
90	
135	
180	
225	
270	
315	
360	

สายอากาศที่ทำการทดสอบมีโพลาไรซ์แบบ ....

คำถามและบททดสอบ

1. จงอธิบายระนาบหลัก (Principal plane) ของสายอากาศ
2. จงอธิบายหลักการโพลาไรซ์ของสายอากาศ
3. ถ้าสายอากาศส่งมีโพลาไรซ์วงกลม สายอากาศรับโพลาไรซ์เชิงเส้นจะเกิดผลอย่างไร
4. จงอธิบายความหมายของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half- Power Beamwidth)

เอกสารอ้างอิง

1. C.A Balanis, “Antenna Theory Analysis and Design”, John Wiley&Sons, Inc., 2005.
2. C.A. Balanis, “Advanced Engineering Electromagnetics”, John Wiley&Sons, Inc., 2012.

การทดลองที่ 2

Antenna Gain Measurement

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจพารามิเตอร์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศ
2. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจและสามารถใช้งานเครื่องมือทดสอบที่เกี่ยวข้องได้
3. เพื่อให้นักศึกษาทำความเข้าใจและสามารถทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ

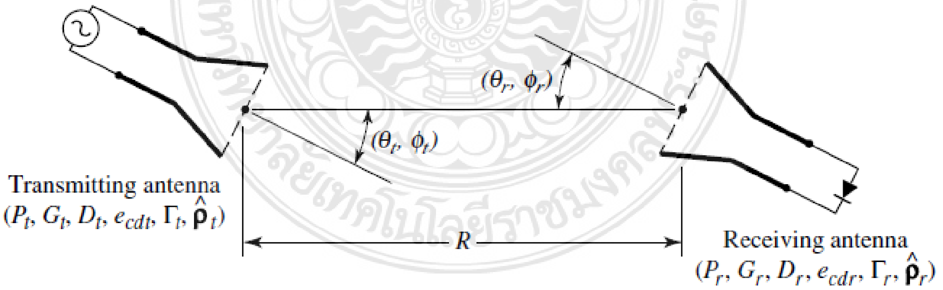
ทฤษฎีเบื้องต้น

5.1 อัตราขยายสายอากาศ (Antenna Gain)

อัตราขยายของสายอากาศหมายถึงความสามารถในการส่งหรือรับคลื่นของสายอากาศต้นแบบเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศมาตรฐาน โดยอัตราขยายของสายอากาศเป็นตัวกำหนดความเข้มการแพร่กระจายคลื่นที่ชี้ทิศทาง รวมไปถึงประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่น

5.2 ระบบสายอากาศ

ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบการติดต่อสื่อสารจำเป็นต้องใช้สมการการส่งผ่านของฟรีส สำหรับสมการการส่งผ่านของฟรีสจะเกี่ยวข้องกับกำลังงานภาครับไปถึงกำลังงานในการส่งผ่านระหว่างสายอากาศทั้งสอง ที่มีระยะห่างเป็น $R > 2D^2/\lambda$ โดยที่ D เป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งแสดงถึงการส่งผ่านของสายอากาศในช่องว่างอิสระ



รูปที่ 1 การส่งผ่านและการรับของระบบสายอากาศในช่องว่างอิสระสำหรับสมการการส่งผ่านฟรีส

สำหรับอัตราส่วนของกำลังงานด้านรับต่อกำลังด้านส่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1

$$\frac{P_r}{P_t} = e_t e_r \frac{\lambda^2 D_t(\theta_t,\phi_t) D_r(\theta_r,\phi_r)}{(4\pi R)^2} \tag{1}$$

e_t	คือ	ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศด้านส่ง
e_r	คือ	ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศด้านรับ

จากสมการที่ 1 เป็นการแสดงอัตราส่วนกำลังงานด้านรับต่อกำลังด้านส่งเมื่อกำหนดให้สายอากาศรับและสายอากาศส่งแมตช์กับโหลดที่นำมาต่อ (ประสิทธิภาพการสะท้อนมีค่าเท่ากับ 1) และมีการโพลาไรซ์เดียวกัน (องค์ประกอบการสูญเสียโพลาไรซ์ =1) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการพิจารณาถึงการสูญเสียที่เกิดจากการไม่แมตช์ระหว่างสายอากาศกับโหลดที่นำมาต่อและการโพลาไรซ์ที่แตกต่างกัน จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2

$$\frac{P_r}{P_t} = e_{cdt} e_{cdr} \left(1-|\Gamma_t|^2\right)\left(1-|\Gamma_r|^2\right)\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 D_t(\theta_t,\phi_t) D_r(\theta_r,\phi_r) |\hat{\boldsymbol{\rho}}_t \cdot \hat{\boldsymbol{\rho}}_r|^2 \tag{2}$$

จากสมการที่ 2 เมื่อสายอากาศวางในแนวเดียวกันและมีโพลาไรซ์เดียวกันจะสามารถแสดงได้ในสมการที่ 3

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 G_{0t} G_{0r} \tag{3}$$

หรือ

$$(G_{0t})_{dB} + (G_{0r})_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_r}{P_t}\right) \tag{4}$$

ถ้ากำหนดให้สายอากาศตัวส่งและตัวรับเหมือนกันจะได้ดังสมการที่ 5

$$(G_{0t})_{dB} = (G_{0r})_{dB} = 0.5\left(20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_r}{P_t}\right)\right) \tag{5}$$

โดยที่	P_r	คือ	กำลังงานด้านรับ
	P_t	คือ	กำลังงานด้านส่ง
	$\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2$	คือ	การสูญเสียในช่องว่างอิสระ (Free-space loss)
	R	คือ	ระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวรับและตัวส่ง
	G_{0t}	คือ	อัตราขยายของสายอากาศส่ง
	G_{0r}	คือ	อัตราขยายของสายอากาศรับ

ตารางที่ 1 Antenna parameter

Antenna parameters	Description
Directivity	ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ (Directivity: $D(\theta,\phi)$) คือ อัตราส่วนความเข้มการแพร่กระจายคลื่น ($U(\theta,\phi)$) ในทิศทางที่พิจารณาหรือทิศทางที่กำหนดจากสายอากาศต่อความเข้มการแพร่กระจายคลื่นเฉลี่ยรวมทุกทิศทุกทาง (U_0) โดยที่ความเข้มการแพร่กระจายคลื่นเฉลี่ยรวมทุกทิศทุกทางคือกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดที่แพร่กระจายจากสายอากาศ ($P_{rad.}$) หารด้วย 4π $$D(\theta,\phi)=\frac{U(\theta,\phi)}{U_0}=\frac{4\pi U(\theta,\phi)}{P_{rad.}}$$
Gain and Efficiency	$G(\theta,\phi)=e_o D(\theta,\phi)$ เมื่อ $e_o=e_r e_c e_d$ โดยที่ e_o คือ ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (Total efficiency) e_r คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศเนื่องจากการสะท้อนที่ขั้ว (Reflection efficiency) หาได้จาก $e_r=(1-\|\Gamma\|^2)$ e_c คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศเนื่องจากความนำไฟฟ้า (Conduction efficiency) e_d คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศเนื่องจากความเป็นไดอิเล็กตริก (Dielectric efficiency)

เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

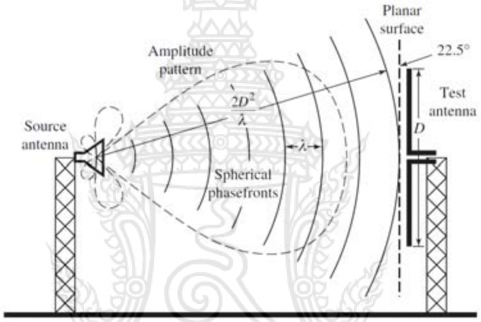
1. Network analyzer 1 เครื่อง
2. สายอากาศ 2 ตัว
3. ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Anechoic Microwave Chamber)

(ก) Network analyzer

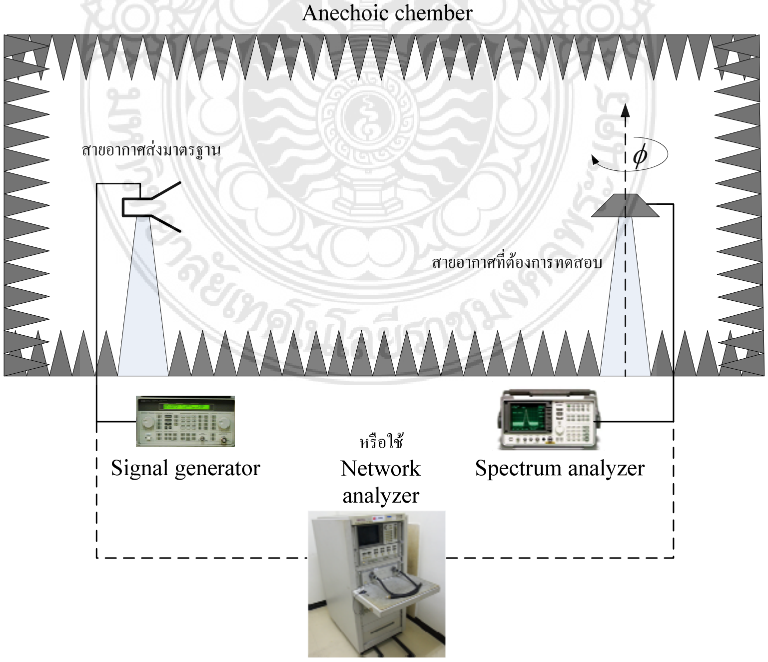
(ข) ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น

(ค) วัสดุดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปที่ 2 ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Anechoic Chamber) สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รูปที่ 3 ระยะทดสอบสายอากาศ $\frac{2D^2}{\lambda}$



รูปที่ 4 การทดสอบสายอากาศ

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ ๔ ประกอบด้วยสายอากาศส่ง และสายอากาศรับ ซึ่งทั้งสองเป็นสายอากาศที่ต้องการทดสอบและจะต้องเป็นแบบเดียวกัน (Identical)
2. เชื่อมต่อสายนำสัญญาณจากสายอากาศส่งและสายอากาศรับเข้ากับเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณตามลำดับ กำหนดความถี่ทดสอบที่ 2.4 GHz
3. บันทึกค่า amplitude ที่เครื่องรับสัญญาณที่มุมด้านหน้ามุมเดียว จากนั้นคำนวณตามสูตรด้านล่าง

$$G_{0t}(dB) = G_{0r}(dB) = 0.5\left[20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_r}{P_t}\right)\right]$$

เมื่อ R คือระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ

อัตราการขยายของสายอากาศ (Antenna Gain) มีค่า...

เอกสารอ้างอิง

1. C.A Balanis, “Antenna Theory Analysis and Design”, John Wiley&Sons, Inc., 2005.
2. C.A. Balanis, “Advanced Engineering Electromagnetics”, John Wiley&Sons, Inc., 2012.

ประวัติผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) รุ่งอรุณ พรเจริญ
(ภาษาอังกฤษ) Rungaroon Pornchanroen

รหัสประจำตัวประชาชน 3 6009 00109 19 7

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

หน่วยงานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
399 ถนนสามเสน แขวงวชิรพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300 โทร. 084 680 7894
E-mail : rung_koys@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญา	คุณวุฒิ/สาขาวิชา	สถาบันอุดมศึกษา	ปีที่สำเร็จ
ปริญญาเอก	ปร.ด. สาขาวิชาวิจัยและพัฒนาการสอนเทคนิคศึกษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	2555
ปริญญาโท	คอ.ม. สาขาวิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	2548
ปริญญาตรี	คอ.บ. สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์-โทรคมนาคม	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์	2544

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

คอมพิวเตอร์ การวิจัยทางการศึกษา เทคนิคและวิธีการสอน การสร้างหลักสูตร และการจัดฝึกอบรม

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

ผลงานวิจัย

ชื่อผลงานวิจัย	สถานภาพ	แหล่งทุน/ปี
ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงจูงใจในการประกอบวิชาชีพครูภายใต้ภาวะวิกฤตทางเศรษฐกิจ	หัวหน้าโครงการวิจัย	งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2551
ศึกษาความพร้อมและความต้องการพัฒนาด้านวิชาการของบุคลากร (สายสอน) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	หัวหน้าโครงการวิจัย	งบประมาณผลประโยชน์ของสถาบัน ประจำปี 2551

ชื่อผลงานวิจัย	สถานภาพ	แหล่งทุน/ปี
แนวทางการพัฒนาวินัยนักศึกษาตามความคิดเห็นของบุคลากรสายวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร งบประมาณผลประโยชน์ของสถาบัน	หัวหน้าโครงการวิจัย	งบประมาณผลประโยชน์ของสถาบัน ประจำปี 2556
การพัฒนาแบบจำลองคอมพิวเตอร์ช่วยสอนแบบอัจฉริยะสำหรับ ปรับพื้นฐานความรู้ทางด้านคณิตศาสตร์ในระดับอุดมศึกษา โดยใช้การวิจัยเชิงปฏิบัติการ	หัวหน้าโครงการวิจัย	งบประมาณเงินรายจ่าย ประจำปี 2558
ความพึงพอใจของนักศึกษาชั้นปีที่ 1 ที่มีต่อการจัดกิจกรรมนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	หัวหน้าโครงการวิจัย	งบประมาณเงินผลประโยชน์ของสถาบัน ประจำปี 2558
การพัฒนาโปรแกรมจำลองการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศสำหรับประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม	หัวหน้าโครงการวิจัย	งบประมาณเงินรายจ่าย ประจำปี 2559
การศึกษาวิจัยตลาดแรงงานกับการก้าวเข้าสู่อุตสาหกรรม 4.0 ของคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มทร.พระนคร	หัวหน้าโครงการวิจัย	งบประมาณเงินผลประโยชน์ของสถาบัน ประจำปี 2559

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัย

วารสารระดับนานาชาติ

Rungaroon Sripan and Bandit Suksawat. Factors Affecting Teaching and Learning of Computer Disciplines at Rajamangala University of Technology. **US-China Education Review (Journal).** Vol. 7, No. 12, pp. 33-38, 2010.

วารสารระดับชาติ

รุ่งอรุณ ศรีปาน และ เชาวน์วัฒน์ อุมานนท์. **ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงจูงใจในการประกอบวิชาชีพครูภายใต้ภาวะวิกฤตทางเศรษฐกิจ.** วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ฉบับที่ 7 เล่มที่ 1 หน้า 70-79 (มกราคม – มิถุนายน, 2551)

นุชนาฎ ผ่องพุฒิ และ**รุ่งอรุณ ศรีปาน**. **ศึกษาคุณสมบัติของผู้เรียนที่เข้าสู่กระบวนการผลิตบัณฑิตในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.** วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยรามคำแหง ฉบับที่ 11 เล่มที่ 2 หน้า 65 – 70 (กรกฎาคม – ธันวาคม 2551)

Rungaroon Sripan, Uri Apichatbanlue and Bandit Suksawat. **Design of Practical Learning System for Computer Disciplines by Using Quality Function Deployment Technique.** *The Journal of KITNB*. Vol. 22 , No. 2, pp. 405-415, 2012.

Rungaroon Sripan, Uri Apichatbanlue and Bandit Suksawat. **Comparison of Ability in Classifying Content by Students' Knowledge Level between Teachers Who Learn Through CAI Media and Teachers Who Attend Computer Training Courses**. *RMUTP Research Journal*. Vol. 7 , No. 1, pp. 67-78, 2013.

รุ่งอรุณ พรเจริญ. การพัฒนาชุดสื่อประสมสำหรับการสอนการสื่อสารทางแสงเพื่อพัฒนาทักษะทางปัญญาตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับที่ 7 เล่มที่ 2 (กันยายน 2015)

รุ่งอรุณ พรเจริญ. การพัฒนาแบบจำลองคอมพิวเตอร์ช่วยสอนแบบอัจฉริยะโดยใช้การวิจัยเชิงปฏิบัติการ. วารสารวิชาการและวิจัยสังคมศาสตร์. ปีที่ 11 ฉบับ 33 (2) (2016) ฉบับพิเศษ สิงหาคม2559 ปีที่ 11 (สหวิทยาการด้านมนุษยศาสตร์ละสังคมศาสตร์). หน้า 33-46.

การประชุมวิชาการระดับชาติ

รุ่งอรุณ ศรีปาน. ศึกษาความพร้อมและความต้องการพัฒนาด้านวิชาการของบุคลากร (สายสอน) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. การประชุมวิชาการ ประจำปี 2551 มหาวิทยาลัยรามคำแหง หน้า 431 – 439 (3-4 กรกฎาคม 2551)

นุชนาฎ ผ่องพุฒิ, **รุ่งอรุณ ศรีปาน** และเริงศักดิ์ มานะสุนทร. **การพัฒนารูปแบบการเสริมสร้างภาพลักษณ์ของครูช่างอุตสาหกรรมที่สำเร็จการศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.** การประชุมทางวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรมแห่งชาติ ครั้งที่ 3. (18 – 19 ธันวาคม 2551)

รุ่งอรุณ ศรีปาน และบัณฑิต สุขสวัสดิ์. **สภาพและปัญหาการเรียนการสอนกลุ่มวิชาคอมพิวเตอร์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล.** การประชุมวิชาการ ประจำปี 2552 มหาวิทยาลัยรามคำแหง หน้า 389 – 398 (3-4 พฤศจิกายน 2552)

Rungaroon Sripan. Factor Analysis that Applied E-Learning in Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, **Proceeding of The 5th Rajamangala University of Technology Conference (5th RMUTCON) and The 4th Rajamangala University of Technology International Conference (4th RMUTIC)**, 15-16 July 2013 in Bangkok, Thailand, 2013.

Rungaroon Sripan and Nudchanard Pongput. A Developing Learning Package to Increase a Competency Learning Management and Professional Teacher for Teacher License, **Proceeding of The 5th Rajamangala University of Technology Conference (5th RMUTCON) and The 4th Rajamangala University of Technology International Conference (4th RMUTIC)**, 15-16 July 2013 in Bangkok, Thailand, 2013.

รุ่งอรุณ พรเจริญ. การประยุกต์ระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือสำหรับการประเมินคุณลักษณะการปฏิบัติงานของนักศึกษาสายช่างอุตสาหกรรมในระดับอุดมศึกษา. **รายงานการประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลระดับชาติ ครั้งที่ 7**. 1-3 กันยายน 2558. ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา.

รุ่งอรุณ พรเจริญ. การพัฒนาแบบจำลองคอมพิวเตอร์ช่วยสอนแบบอัจฉริยะโดยใช้การวิจัยเชิงปฏิบัติการ. **รายงานการประชุมสัมมนาวิชาการราชภัฏนครสวรรค์วิจัย ครั้งที่ 1**. 22-23 สิงหาคม 2559. ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ นครสวรรค์.

อนุชา ไชยชาญ, พิสิฐ สอนละ, ภาวนา ชูศิริ, วรรณภา มโนสืบ และ**รุ่งอรุณ พรเจริญ.** การพัฒนาความเที่ยงตรงของนาฬิกาดิจิตอลด้วยเทคโนโลยีระบบสมองกลฝังตัว. **รายงานการประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลระดับชาติ ครั้งที่ 8**. 24-26 สิงหาคม 2559. ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพมหานคร.

รุ่งอรุณ พรเจริญ และอัมภาภรณ์ พีรวณิชกุล. การพัฒนาบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนแบบอัจฉริยะสำหรับปรับพื้นฐานความรู้ทางด้านคณิตศาสตร์ในระดับอุดมศึกษา. **รายงานการประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลระดับชาติ ครั้งที่ 8**. 24-26 สิงหาคม 2559. ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพมหานคร.

การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Rungaroon Sripan and Bandit Suksawat. Propose of Fuzzy Logic-Based Students' Learning Assessment. **International Conference on Control, Automation and Systems 2010 (ICCAS 2010)**, 27 – 30 October 2010 in KINTEX, Gyeonggi-do, Korea, 2010.

Nudchanard Pongput and **Rungaroon Porncharoen.** Comparing Blended Learning with Traditional Approaches of Profesional Teacher and knowledge Management for Teaching License Applicants. **Proceeding of The 5th Rajamangala University of Techonology International Conference (6th RMUTNC & 5th RMUTIC),** June 2015 in Phranakhon Si Ayutthaya, Thailend, 2015.

Rungaroon Porncharoen. Using Graphical User Interface of MatLab in Teaching Telecommunication Engineering**. Proceeding of International Conference on Education, Psychology, and Learning-Fall Session (ICEPL-Fall 2016).** November 07-09, Seoul, Korea, 2016.