

การศึกษาการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำและทางอากาศของ  
อุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูง

STUDY ON ATTENUATION OF CONDUCTED AND RADIATED ELECTROMAGNETIC  
INTERFERENCES GENERATED BY HIGH-FREQUENCY SWITCHING DEVICES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-020-097

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำและทางอากาศของ  
อุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูง

STUDY ON ATTENUATION OF CONDUCTED AND RADIATED ELECTROMAGNETIC  
INTERFERENCES GENERATED BY HIGH-FREQUENCY SWITCHING DEVICES



T148825



ปิยะวิทย์ ศรีโปดก  
PIYAWIT SRIPODOK

เลขหมู่ 148825  
เลขทะเบียน  
รับเดือนปี 23 พ.ย. 2560

00266928

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560  
KMITL-2017-EN-M-020-097

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON ATTENUATION OF CONDUCTED AND RADIATED ELECTROMAGNETIC  
INTERFERENCES GENERATED BY HIGH-FREQUENCY SWITCHING DEVICES



THE THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2017  
KMUTL-2017-EN-M-020-097

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำและทางอากาศของอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูง  
Thesis Title Study on Attenuation of Conducted and Radiated Electromagnetic Interferences Generated by High-Frequency Switching Devices  
นักศึกษา นายปิยะวิทย์ ศรีโปดก  
รหัสประจำตัว 57601103  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-097

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ปฐมทัศน์	จิระเดชะ	
ผศ.ดร.นิรุช	จิรสวรรณกุล	
รศ.ดร.อรรถพล	เง่าพิทักษ์กุล	
รศ.ดร.มณฑล	ลีลาจินดาไกรฤกษ์	
ผศ.ดร.ชัยยันต์	เจตนาเสน	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 08.30-10.30 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-302

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงกว้าง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อ คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่มีการนำไปใช้

วันที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำและทางอากาศของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งความถี่สูง
นักศึกษา	นายปิยะวิทย์ ศรีโปดก
รหัสประจำตัว	57601103
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ชัยยันต์ เจตนาเสน

### บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลการศึกษาเกี่ยวกับการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ที่แพร่ออกมาจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งความถี่สูงทั้งทางสายตัวนำและทางอากาศในขณะที่อุปกรณ์ทำงาน ซึ่งเป็นอุปสรรคหนึ่งต่อการพัฒนาทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และเพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้นและลดปัญหาสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC) จึงถูกนำมาใช้ ผลลัพธ์ที่ผ่านมาตรฐาน EMC นั้น สามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์อื่นที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทางแม่เหล็กไฟฟ้าเดียวกันได้โดยไม่ทำให้อุปกรณ์อื่นเสียหาย มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC) ได้กำหนดช่วงความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 1GHz และได้แบ่งช่วงความถี่ในการวัดสัญญาณรบกวนนั้นออกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 30 MHz จะวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ และช่วงที่ 2 ความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1 GHz จะวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศ ซึ่งจะสนใจในการวัดสัญญาณรบกวนที่แพร่ออกมาจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งที่ต่อเข้ากับชุด Tuner (วิทยุ FM) และทำการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้วิธีการกราวด์ (Grounding) และการชิลด์ (Shielding) และนำผลการทดลองนี้มาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน EN55022 class B เพื่อดูว่าสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้มากน้อยแค่ไหน จากการวิเคราะห์ผลการทดลองสรุปได้ว่า การต่อกราวด์ร่วมสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำได้ แต่ในกรณีการต่อกราวด์หลายจุดและมีการ Shielding ที่อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งและชุด Tuner (วิทยุ FM) นั้นสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางอากาศได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในย่านความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Study on Attenuation of Conducted and Radiated Electromagnetic Interferences Generated By High-Frequency Switching Devices
<b>Student</b>	Mr. Piyawit Sripodok
<b>Student ID.</b>	57601103
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2017
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Chaiyan Jettanasen

## ABSTRACT

This research aims to investigate how to attenuate the electromagnetic interference (EMI) generated by high-frequency switching devices for both conducted and radiated EMI produced when the devices are in operation. This results in restriction of power electronic devices evolution. In order to effectively reduce EMI generation or overcome EMI problems an Electromagnetic Compatibility (EMC) regulation should be applied. The conformity to the standard will guarantee the performance and the compatibility of the electrical/electronic devices/equipment to be employed or installed in the sensitive electromagnetic environment. The EMC standard is defined in the frequency range of 150 kHz to 1 GHz: 150 kHz to 30 MHz for conducted emission measurement and 30 MHz to 1GHz for radiated emission one. A switching device connecting to tuner kit (FM radio) is herein focused as an EMI source. The generated noises will be reduced by using grounding and shielding methods. The obtained results will be compared with an EMC standard (EN55022 class B) in order to reveal the effectiveness of the applied EMI mitigation techniques. The analysis and experimental results finally show that the conducted emission can be diminished by using single-point grounding whereas the radiated emission is effectively reduced by using multi-point grounding and shielding, in particular at high frequencies.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาที่มีคุณค่าของอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำทางวิชาการในด้านต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่น้องๆ นักศึกษาในห้อง Lab ทุกท่าน สำหรับความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆที่มอบแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ในการวัดค่าเพื่อเก็บค่าผลการทดลองเพื่อนำข้อมูลนี้ไปใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณการสนับสนุนจากทุนพัฒนากลุ่มและเครือข่ายวิจัย กองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (KREF025606) ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณสำหรับการทำวิจัย

สุดท้ายขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่และครอบครัวสำหรับการสนับสนุนและกำลังใจที่ดีกับผมเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ปิยะวิทย์ ศรีโปดก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	5
2.1.1 นิยามของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	5
2.1.2 องค์ประกอบและปรากฏการณ์ของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC).....	6
2.2 ปรากฏการณ์ของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC).....	7
2.2.1 กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	9
2.3 หลักการเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	10
2.3.1 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ทางสายตัวนำ (Conducted Noise).....	11
2.3.2 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ทางอากาศ (Radiated Noise).....	13
2.4 ทฤษฎีการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding Theory).....	14
2.4.1 ทฤษฎีสันนามไฟฟ้า (Field Theory).....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้และระยะไกล (Near field and far field) .....	16
2.4.3 อิมพีแดนซ์คลื่น (Wave impedance).....	17
2.4.4 อิมพีแดนซ์โลหะ (Metal impedance) และความลึกผิว (skin depth).....	19
2.4.5 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding Effectiveness: SE)...	20
2.4.6 การสูญเสียจากการดูดซับ (Absorption loss).....	22
2.4.7 การสูญเสียจากการสะท้อน (Reflection loss and Re- Reflection loss) ....	22
2.5 การต่อลงดิน (Grounding) .....	26
2.6 อุปกรณ์และวิธีการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ทางสายตัวนำ.....	30
2.6.1 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN).....	31
2.6.2 เครื่องวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI RECEIVER).....	32
2.6.3 แผ่นกราวด์ (Ground plane).....	33
2.6.4 ห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielded Room).....	33
2.6.5 การติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบวาง อุปกรณ์บนโต๊ะ.....	34
2.6.6 การพิจารณาผลการแพร่สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางสายตัวนำ	36
2.7 อุปกรณ์และวิธีการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ทางอากาศ .....	36
2.7.1 ห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Semi Anechoic Chamber).....	36
2.7.2 สายอากาศ.....	37
2.7.3 ระยะเวลาทดสอบการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	38
2.7.4 การติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ.....	39
2.8 มาตรฐานสำหรับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	39
2.8.1 กฎระเบียบของ FCC (FCC REGULATIONS).....	39
2.8.2 CISPR .....	40
2.8.3 มาตรฐานทางการทหาร (Military Standards) .....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.4 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.).....	40
2.8.5 มาตรฐาน EN 55022 Information technology equipment (ITE) .....	42
2.9 โปรแกรม COMSOL .....	46
บทที่ 3 การศึกษาและการออกแบบอุปกรณ์สวิตซ์ความถี่สูง.....	48
3.1 ชุดอุปกรณ์สวิตซ์ (Switching Devices).....	48
3.2 ชุดควบคุมแรงดัน (Regulator).....	58
3.3 ชุดจูนเนอร์วิทยุ FM (Tuner Kit).....	59
บทที่ 4 ผลการทดลอง .....	61
4.1 ชุดอุปกรณ์สวิตซ์ความถี่สูงในงานวิจัย.....	61
4.2 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำมีความถี่สวิตซ์แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป).....	66
4.3 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำมีความถี่สวิตซ์แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ (ที่ได้มีการออกแบบ).....	67
4.4 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์อย่างเดียว (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป).....	68
4.5 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์อย่างเดียว (ที่ได้มีการออกแบบ).....	69
4.6 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์อย่างเดียว (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป).....	71
4.7 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์อย่างเดียว (ที่ได้มีการออกแบบ).....	72
4.8 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์และ ชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์หลายจุด).....	73
4.9 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์และ ชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์หลายจุด).....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.10 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์ร่วม) .....	75
4.11 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์ร่วม) .....	76
4.12 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์หลายจุดและไม่มีกริลด์).....	78
4.13 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์หลายจุดและไม่มีกริลด์).....	79
4.14 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์หลายจุดและมีการกริลด์).....	80
4.15 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์หลายจุดและมีการกริลด์).....	81
4.16 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์ร่วมและไม่มีกริลด์).....	82
4.17 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์ร่วมและไม่มีกริลด์).....	83
4.18 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์ร่วมและมีการกริลด์).....	84
4.19 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์ร่วมและมีการกริลด์).....	85
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	90
เอกสารอ้างอิง .....	92
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก.....	97
ประวัติผู้เขียน.....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 นิยามและความหมายคำสำคัญที่เกี่ยวข้องสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า .....	5
2.2 แสดงค่าความลึกเชิงผิว (skin depth) ของวัสดุต่างๆ .....	20
2.3 มาตรฐานกฎระเบียบด้านการแพร่สัญญาณรบกวนทางความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า .....	42
2.4 ข้อมูลเส้นขีดจำกัด (Limit) ตามมาตรฐาน EN55022 Class A ที่แพร่กระจายผ่านสายตัวนำ (Conducted Emission) .....	43
2.5 ข้อมูลเส้นขีดจำกัด (Limit) ตามมาตรฐาน EN55022 Class B ที่แพร่กระจายผ่านสายตัวนำ (Conducted Emission) .....	43
2.6 ข้อมูลเส้นขีดจำกัด (Limit) ตามมาตรฐาน EN55022 Class A ที่แพร่กระจายผ่านทางอากาศ (Radiated Emission) ระยะทดสอบ 10 เมตร .....	44
2.7 ข้อมูลเส้นขีดจำกัด (Limit) ตามมาตรฐาน EN55022 Class B ที่แพร่กระจายผ่านทางอากาศ (Radiated Emission) ระยะทดสอบ 10 เมตร .....	44
2.8 ข้อมูลเส้นขีดจำกัด (Limit) ตามมาตรฐาน FCC Class A ที่แพร่กระจายผ่านทางอากาศ (Radiated Emission) ระยะทดสอบ 10 เมตร .....	45
2.9 ข้อมูลเส้นขีดจำกัด (Limit) ตามมาตรฐาน FCC Class B ที่แพร่กระจายผ่านทางอากาศ (Radiated Emission) ระยะทดสอบ 10 เมตร .....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
2.2 พิสัยความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	8
2.3 กลไกการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์.....	10
2.4 หลักการเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	10
2.5 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนในโหมดผลร่วม.....	12
2.6 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง.....	12
2.7 วงจรไฟฟ้าเฟสเดียว.....	13
2.8 การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ.....	14
2.9 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากกระแสขั้ว.....	16
2.10 แสดงระยะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
2.11 ค่าอิมพีแดนซ์คลื่นโดยเปรียบเทียบกับระยะทางจากแหล่งจ่าย.....	18
2.12 การชิลด์แบบปิดที่อุปกรณ์โดยตรงจะอยู่บนผิวด้านนอกของตัวนำ.....	20
2.13 การแพร่ของคลื่นผ่านแผ่นปิดกั้น.....	21
2.14 การสะท้อนกลับของคลื่นเมื่อผ่านพื้นผิวของวัสดุปิดกั้น.....	24
2.15 Ground Loop ที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 วงจร.....	26
2.16 แสดงลักษณะต่อกราวด์และไม่ต่อกราวด์ของวงอุปกรณ์.....	26
2.17 รูปแสดงสัญญาณลักษณะของ Ground แบบต่างๆ.....	27
2.18 แสดงระบบกราวด์ร่วม (ต่อแบบอนุกรม).....	28
2.19 แสดงระบบกราวด์แยก (ต่อแบบขนาน).....	28
2.20 แสดงระบบกราวด์หลายจุด.....	29
2.21 วงจรสมมูลของวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN).....	31
2.22 การตอบสนองของความต้านทานต่อความถี่ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์.....	32
2.23 เครื่องวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI RECEIVER).....	32
2.24 วิธีการทดสอบหาระดับสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำภายในห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielded Room).....	34
2.25 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบวาง อุปกรณ์บนโต๊ะ.....	34
2.26 ห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้า.....	37
2.27 สายอากาศที่ใช้ในการวัด โดยแสดงสายอากาศแบบ Bi-conical, Log-Periodic และ Bi-Log ตามลำดับ.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 2.28 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ..... 39  
 ไม่วางกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29 ขีดจำกัดการกระจายผ่านสายตัวนำตามมาตรฐาน EN 55022 Class B.....	43
2.30 ขีดจำกัดการกระจายทางอากาศตามมาตรฐาน CISPR และ FCC Class A และ Class B.....	46
3.1 ชุดอุปกรณ์สวิตซ์ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป .....	49
3.2 รูปวงจรชุดอุปกรณ์สวิตซ์ที่ได้มีการออกแบบ .....	49
3.3 รูปวงจรชุดอุปกรณ์สวิตซ์ใน PCB ที่ได้มีการออกแบบ .....	49
3.4 ชุดอุปกรณ์สวิตซ์ที่ได้มีการออกแบบ .....	50
3.5 ผลจำลองวงจรในโปรแกรม Psim ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 12 Vdc.....	51
3.6 ผลจำลองวงจรในโปรแกรม Psim ค่ากระแสไฟฟ้าขาออกไม่เกิน 1 A.....	51
3.7 ผลจำลองวงจรที่ออกแบบในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้าแบบจุดบนพื้นผิว .....	52
3.8 ผลจำลองวงจรที่ออกแบบในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้าแบบจุดบนพื้นผิวเป็นแบบมิติ 2	52
3.9 ผลจำลองวงจรที่ออกแบบในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้าแบบจุด (เส้นแสดงรูปร่าง)....	53
3.10 ผลจำลองวงจรที่ออกแบบในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้าแบบเส้นขอบเขตบนพื้นผิว .	53
3.11 ผลจำลองวงจรที่ออกแบบในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้าแบบเส้นขอบเขตบนพื้นผิว เป็นแบบมิติ .....	54
3.12 ผลจำลองวงจรที่ออกแบบในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้าแบบเส้นขอบเขต (เส้นแสดงรูปร่าง) .....	54
3.13 ผลจำลองวงจรที่สลับตำแหน่งการจัดวางของอุปกรณ์ใหม่ในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้า แบบจุดบนพื้นผิว.....	55
3.14 ผลจำลองวงจรที่สลับตำแหน่งการจัดวางของอุปกรณ์ใหม่ในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้า แบบจุดบนพื้นผิวเป็นแบบมิติ .....	55
3.15 ผลจำลองวงจรที่สลับตำแหน่งการจัดวางของอุปกรณ์ใหม่ในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้า แบบจุด (เส้นแสดงรูปร่าง).....	56
3.16 ผลจำลองวงจรที่สลับตำแหน่งการจัดวางของอุปกรณ์ใหม่ในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้า แบบเส้นขอบเขตบนพื้นผิว .....	56
3.17 ผลจำลองวงจรที่สลับตำแหน่งการจัดวางของอุปกรณ์ใหม่ในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้า แบบเส้นขอบเขตบนพื้นผิวเป็นแบบมิติ .....	57
3.18 ผลจำลองวงจรที่สลับตำแหน่งการจัดวางของอุปกรณ์ใหม่ในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้า แบบเส้นขอบเขต (เส้นแสดงรูปร่าง) .....	57
3.19 รูปวงจรชุดควบคุมแรงดัน (Regulator).....	58
3.20 ชุดควบคุมแรงดัน (Regulator) .....	58
3.21 รูปวงจรชุดจูนเนอร์วิทยุ FM (Tuner Kit).....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.22 ชุดจูนเนอร์วิทยุ FM (Tuner Kit) .....	60
4.1 บล็อกไดอะแกรมการต่อชุดอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูงที่ใช้ในงานวิจัย .....	61
4.2 ชุดอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูงที่ใช้ในงานวิจัย (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป) .....	61
4.3 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูงสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป).....	62
4.4 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูงสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป).....	62
4.5 ชุดอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูงที่ใช้ในงานวิจัย (ที่ได้มีการออกแบบ) .....	63
4.6 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูงสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ (ที่ได้มีการออกแบบ).....	63
4.7 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูงสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศ (ที่ได้มีการออกแบบ).....	64
4.8 บล็อกไดอะแกรมการต่อกราวด์ร่วมในชุดอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูง (ต่อแบบอนุกรม).....	65
4.9 บล็อกไดอะแกรมการต่อกราวด์หลายจุดในชุดอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูง.....	65
4.10 บล็อกไดอะแกรมการชิลด์โดยใช้เทปชิลด์ โครงโลหะหรือแผ่นชิลด์ปิดไปที่อุปกรณ์โดยตรงของ ชุดอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูง .....	65
4.11 การชิลด์โดยใช้เทปชิลด์ โครงโลหะหรือแผ่นชิลด์ปิดไปที่อุปกรณ์โดยตรงของชุดอุปกรณ์ สวิตชิงความถี่สูงสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศ .....	66
4.12 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำมีความถี่สวิตชิงแพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิง (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป).....	66
4.13 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำมีความถี่สวิตชิงแพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิง (ที่ได้มีการออกแบบ).....	67
4.14 การติดตั้งอุปกรณ์สวิตชิงอย่างเดียวสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป).....	68
4.15 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงอย่างเดียว (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป).....	68
4.16 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงอย่างเดียว (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป).....	69
4.17 การติดตั้งอุปกรณ์สวิตชิงอย่างเดียวสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ (ที่ได้มีการออกแบบ).....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียว (ที่ได้มีการออกแบบ).....	70
4.19 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียว (ที่ได้มีการออกแบบ).....	70
4.20 การติดตั้งอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียวสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป).....	71
4.21 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียว (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป).....	71
4.22 การติดตั้งอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียวสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศ (ที่ได้มีการออกแบบ).....	72
4.23 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียว (ที่ได้มีการออกแบบ).....	72
4.24 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียว (ที่ได้มีการออกแบบ).....	73
4.25 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์หลายจุด).....	73
4.26 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์หลายจุด).....	74
4.27 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์หลายจุด).....	74
4.28 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์หลายจุด).....	75
4.29 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์ร่วม).....	75
4.30 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์ร่วม).....	76
4.31 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์ร่วม).....	76
4.32 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์ร่วม).....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกรราวต์หลายจุดและไม่มีกรซิลด์).....	78
4.34 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกรราวต์หลายจุดและไม่มีกรซิลด์).....	78
4.35 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกรราวต์หลายจุดและไม่มีกรซิลด์).....	79
4.36 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกรราวต์หลายจุดและไม่มีกรซิลด์).....	79
4.37 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกรราวต์หลายจุดและมีการซิลด์).....	80
4.38 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกรราวต์หลายจุดและมีการซิลด์).....	80
4.39 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกรราวต์หลายจุดและมีการซิลด์).....	81
4.40 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกรราวต์หลายจุดและมีการซิลด์).....	81
4.41 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกรราวต์ร่วมและไม่มีกรซิลด์).....	82
4.42 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกรราวต์ร่วมและไม่มีกรซิลด์).....	82
4.43 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกรราวต์ร่วมและไม่มีกรซิลด์).....	83
4.44 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกรราวต์ร่วมและไม่มีกรซิลด์).....	83
4.45 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกรราวต์ร่วมและมีการซิลด์).....	84
4.46 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกรราวต์ร่วมและมีการซิลด์).....	84
4.47 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกรราวต์ร่วมและมีการซิลด์).....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.48 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์ร่วมและมีการชิลด์).....	85
4.49 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (หมุนทวนเข็มนาฬิกา (ซ้ายมือสุด)).....	86
4.50 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (หมุนทวนเข็มนาฬิกา (ซ้ายมือสุด)).....	87
4.51 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (หมุนทวนเข็มนาฬิกา (ซ้ายมือสุด)).....	87
4.52 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (หมุนทวนเข็มนาฬิกา (ซ้ายมือสุด)).....	87
4.53 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (หมุนไปที่ตรงกลาง).....	88
4.54 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (หมุนไปที่ตรงกลาง).....	88
4.55 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (หมุนตามเข็มนาฬิกา (ขวามือสุด)).....	89
4.56 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (หมุนตามเข็มนาฬิกา (ขวามือสุด)).....	89
ก.1 ห้องทดสอบสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ.....	98
ก.2 ห้องทดสอบสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ.....	98
ก.3 เครื่อง EMI TEST RECEIVER.....	99
ก.4 เครื่อง CONTROLLER ANTENNA.....	99
ก.5 เครื่อง CONTROLLER TURN TABLE.....	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูงมีการใช้งานเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน หรือในภาคอุตสาหกรรมที่นำมาใช้ประโยชน์อย่างมากและเพิ่มมูลค่าในตัวผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น Switched mode power supply (SMPS), Uninterruptible Power Supply (UPS), บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (electronic ballast), อินเวอร์เตอร์ (inverter), วงจรแปลงผันกำลังกระแสตรงเป็นกระแสตรง (dc-dc converter) และ ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า (motor drive) เป็นต้น อีกตัวอย่างหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับความถี่สูงคือ วิทยุรถยนต์หรือวิทยุทั่วไปซึ่งจะรับสัญญาณ AM/FM จากสถานีวิทยุกระจายเสียงและอาจจะมีการเกิดสัญญาณรบกวนขึ้นในระบบ ดังนั้นจึงพิจารณาปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงหรือชุดจูนเนอร์ (วิทยุ FM) นั้นไปรบกวนการทำงานของระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์อื่นๆ ทำให้มีผลต่อการทำงานของระบบวิทยุการเดินเรือ การบริการด้านการสื่อสาร ระบบสื่อสารในรถไฟ BTS, MRT และทางด้านการบิน เป็นต้น วัตถุประสงค์หลักในการควบคุมระดับสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า คือการตรวจสอบความถี่พื้นฐานของสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำและสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกมาจากตัวอุปกรณ์และใช้เทคนิคการลดทอนสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำและสัญญาณรบกวนทางอากาศเพื่อทำการพัฒนาและแก้ไขปัญหาด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ส่วนระบบเครื่องมือวัดและควบคุมทางอุตสาหกรรมจะมีการทำงานที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณไฟฟ้าที่ได้มาจากเครื่องมือวัดที่ถูกติดตั้งอยู่ในกระบวนการผลิตเพื่อส่งสัญญาณต่อไปยังระบบควบคุมเพื่อใช้แสดงผลหรือควบคุมกระบวนการตามต้องการ ซึ่งสัญญาณไฟฟ้าเหล่านี้สามารถถูกรบกวนได้ง่ายจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนต่างๆ ดังนั้นในการออกแบบระบบเครื่องมือวัดและควบคุมจะต้องทำการพิจารณาวิธีการป้องกันสัญญาณรบกวนต่างๆเหล่านี้ ตั้งแต่ขั้นตอนเริ่มต้นการออกแบบระบบ เพื่อหาสาเหตุการเกิดสัญญาณรบกวนกับสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องมือวัดและแสดงวิธีป้องกัน เพื่อใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการพิจารณาเลือกใช้ในการออกแบบระบบเครื่องมือวัดได้อย่างเหมาะสม สำหรับสัญญาณรบกวนสามารถแสดงได้ในรูปของสัญญาณไฟฟ้าที่ไม่ต้องการ ซึ่งทำให้สัญญาณไฟฟ้าที่ต้องการมีความผิดพลาดไปจากสัญญาณที่คาดหวังจากเครื่องมือวัด สัญญาณรบกวนสามารถเกิดขึ้นมาจากแหล่งกำเนิดต่างๆหลายแหล่ง ดังเช่น กระแสและแรงดันไฟฟ้าจากสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ใกล้กับสายสัญญาณจากเครื่องมือวัด ฟิวส์หรือกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรง การเหนี่ยวนำจากสายไฟใกล้เคียง และสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ เป็นต้น สัญญาณรบกวนเหล่านี้จะเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมาจากแหล่งกำเนิดภายนอก ยังมีสัญญาณรบกวนอีกประเภทหนึ่งที่เป็นสัญญาณรบกวนจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่อาจกรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งกำเนิดภายใน เช่น สัญญาณคลื่นความร้อนและการออกแบบทางไฟฟ้าที่ไม่สมบูรณ์ เป็นต้น เทคนิคการป้องกันทั่วไปที่ยอมรับในการลดทอนสัญญาณรบกวนจากแหล่งกำเนิดภายนอกจะเป็นดังนี้ คือ การชิลด์รอบสายสัญญาณ เพิ่มระยะห่างระหว่างสายสัญญาณและแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน ใช้สายสัญญาณเป็นแบบตีเกลียวและการต่อกราวด์ลงดินที่ถูกต้องเหมาะสม สาเหตุของการเกิดสัญญาณรบกวนและเทคนิคในการป้องกัน สามารถแสดงได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้ 1) แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน 2) Ground loop และการต่อลงดินที่ตี 3) การยับยั้งสัญญาณรบกวน

อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้มุ่งเน้นในการลดทอนสัญญาณรบกวนที่แตกต่างกันทั้งในการต่อกราวด์และการชิลด์ ในส่วนหลักๆของระบบวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์จะมีกราวด์ของระบบและระบบกราวด์นี้เป็นปัญหามากต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องมือสื่อสารซึ่งมีความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนมากสาเหตุคือการต่อสายกราวด์หรือการเดินระบบสายไฟไม่เรียบร้อยและทำให้เกิดสัญญาณรบกวนทางสายสัญญาณและสายไฟในระบบไฟฟ้ากำลังได้ การเกิด Ground loop ครบวงจร ประกอบไปด้วยในส่วนของสัญญาณและในส่วนโครงสร้างของกราวด์ซึ่งมี 2 ลักษณะดังนี้ 1) เกิดจากการแยกกราวด์ของอุปกรณ์แต่ละตัวออกจากระบบซึ่งทำให้ระบบกราวด์มีกระแสไฟฟ้าไหลวนซึ่งมีผลต่อการเกิดสัญญาณรบกวน 2) วงจรไม่สมดุล ถ้าไม่แยกวงจรก็ทำให้สมดุลอาจจะทำให้ลดปัญหาการเกิดสัญญาณรบกวนได้ สำหรับเทคนิคการชิลด์คือจะช่วยดูดซับ หรือปิดกั้นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะทำการชิลด์ทั้งระบบหรือแต่ละอุปกรณ์ก็ได้เพื่อป้องกันไม่ให้ไปรบกวนระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์อื่นๆ จึงได้นำวิธีการต่อกราวด์และการชิลด์มาใช้ในการลดทอนสัญญาณรบกวนในระบบที่ศึกษา

## 1.2 ศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยของ Mr. Mohammed [1] ศึกษาการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำและทางอากาศในโหมดผลรวมของระบบวงจรแปลงผันกำลังกระแสตรงเป็นกระแสตรง (dc-dc converter) โดยใช้วิธี finite-difference time-domain (FDTD) จำลองสัญญาณรบกวนและเปรียบเทียบกับกระแสรบกวนในโหมดผลรวม งานวิจัยของ Mr. Zoran [2] นำเสนอวิธี double clamp methodology (DCM) ซึ่งสามารถลดทอนการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนทางอากาศของสายไฟหรือสายสัญญาณได้โดยวิธีการชิลด์กราวด์ที่อุปกรณ์สวิตชิงและชิลด์สายไฟทั้งเส้น ซึ่งสามารถลดทอนการแพร่สนามไฟฟ้าได้ งานวิจัยของ Mr. Pablo [8] ศึกษาว่าอุปกรณ์สวิตชิงนั้นเป็นอุปกรณ์ที่แพร่สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากอุปกรณ์สวิตชิงเมื่อมีการทำงานจะมีรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้น เมื่อทำการใส่ฟิลเตอร์ในอุปกรณ์สวิตชิงเพื่อให้มีการเปลี่ยนรูปคลื่นเฟส ซึ่งทำให้ลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในโหมดผลต่างได้ งานวิจัยของ Mr. Bhatgadde [9] ศึกษาว่าการที่จะป้องกันหรือลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ตั้งแต่ 60 Hz ถึง 1000 MHz โดยมีข้อบังคับที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเทศต่างๆ คือควรใช้โลหะที่เป็นตัวนำมากกว่าพลาสติกในการป้องกันหรือลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ในงานวิจัยของ Mr. Parisa [11] ศึกษาประสิทธิภาพของตู้สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการเจาะรูผนังโดยจะมีการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อดูว่าความหนาของตู้สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการเจาะรูผนังนั้นมีประสิทธิผลมากน้อยแค่ไหน โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการวัดและวิธีการเชิงตัวเลข ในงานวิจัยของ Mr. Valentin [12] ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับโลหะผสมสำหรับการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทั้งในการใช้งาน และออกแบบให้ได้มาตรฐานโดยอาศัยการคำนวณองค์ประกอบต่างๆ กำหนดคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยของ Mr. Wang [17] ศึกษาวิธีการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยใช้วิธีการออกแบบการจัดวางของอุปกรณ์แต่ละตัวที่มีความร้อนหรืออุณหภูมิที่แตกต่างกันนั้น ควรจัดวางให้ได้ตำแหน่งที่เหมาะสม ซึ่งมีผลต่อการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ในงานวิจัยของ Mr. Qian Liu [18] นำเสนอวิธีโดเมนความถี่สำหรับจำลองค่าสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์สวิตซ์และค่าต่างๆ พร้อมกับศึกษาระดับสัญญาณรบกวนทั้งหมดผลรวมและโหมดผลต่าง ในงานวิจัยของ Mr. Diego [20] นำเสนอการวิเคราะห์อย่างละเอียดทางด้านความถี่ของตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกันที่มีการชิลด์กราวด์ว่ามีผลแตกต่างกันอย่างไร

### 1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.3.1 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การเกิดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำและทางอากาศจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งความถี่สูง

1.3.2 เพื่อศึกษาหาวิธีลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น เพื่อให้สัญญาณดังกล่าวอยู่ในระดับที่สอดคล้องตามที่มาตรฐานกำหนด

1.3.3 เพื่อออกแบบวงจรอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งความถี่สูง โดยพิจารณาการกราวด์และการชิลด์เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น

1.3.4 เพื่อให้ได้วงจรกรองสัญญาณรบกวนเพื่อช่วยในการลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งความถี่สูง

### 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 ศึกษาการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งความถี่สูงที่ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้า

1.4.2 วัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำและทางอากาศที่เกิดขึ้นจากการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งความถี่สูง

1.4.3 ออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนเพื่อลดระดับสัญญาณให้สอดคล้องตามมาตรฐานที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.4 ออกแบบการกราวด์และการชิลด์เพื่อลดระดับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น

1.4.5 ตรวจสอบประสิทธิภาพของวงจรกรองที่ออกแบบโดยการนำไปใส่ในระบบจริงที่พิจารณาเพื่อใช้เทคนิคการกราวด์และการชิลด์ แล้ววัดค่าของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมหรือสอดคล้องตามมาตรฐานที่พิจารณาหรือไม่ โดยอาจใช้มาตรฐาน EN55022 Class B

## 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1.5.1 ศึกษาคุณลักษณะการเกิดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ

1.5.2 ศึกษาคุณลักษณะการเกิดสัญญาณรบกวนทางอากาศ

1.5.3 ศึกษาวิธีการจำลองและการตรวจวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

1.5.4 ศึกษากระบวนการต่อกราวด์

1.5.5 ศึกษากระบวนการชิลด์

1.5.6 ศึกษาวิธีการลดทอนสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ

1.5.7 ศึกษาวิธีการลดทอนสัญญาณรบกวนทางอากาศ

1.5.8 นำอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (วิทยุ FM) มาต่อเข้าด้วยกันและวัดค่าสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำและทางอากาศของอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (วิทยุ FM) และเปรียบเทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทำให้สามารถเข้าใจหลักการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูงที่ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าได้

1.6.2 ทำให้สามารถอธิบายและแก้ไขสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในสายตัวนำและทางอากาศระหว่างอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (วิทยุ FM) ได้

1.6.3 ทำให้สามารถเข้าใจเกี่ยวกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

##### 2.1.1 นิยามของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 นิยามและความหมายคำสำคัญที่เกี่ยวข้องสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า [1]-[6], [22]-[34]

คำนิยาม	ความหมาย
Electromagnetic Compatibility : EMC ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	-ความสามารถของอุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบ ที่สามารถทำงานร่วมกันได้เป็นปกติในสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้า โดยไม่ก่อให้เกิดผลเสีย หรือผลกระทบใดๆ ต่ออุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบ ที่ทำงานในสภาวะสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้าเดียวกัน
Electromagnetic disturbance : EMD การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	-ปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าใดๆ ที่อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบซึ่งเป็นสาเหตุของการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า
Electromagnetic interference : EMI การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า หรือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	-การที่อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบเกิดการดำเนินงานที่ผิดพลาดหรือได้รับความเสียหาย ซึ่งมีสาเหตุมาจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ประเด็นสำคัญคือผลที่เกิดจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
Emission	-การปล่อยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา
Conducted Emission	-การปล่อยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาทางสายตัวนำ
Radiated Emission	-การปล่อยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการแพร่กระจายคลื่นทางอากาศ
Immunity	-ภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
Susceptibility	-ความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

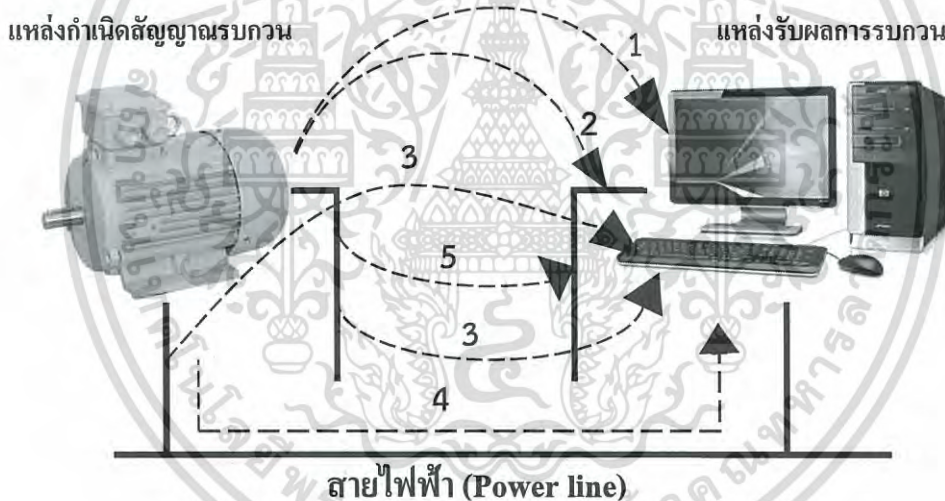
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.2 องค์ประกอบและปรากฏการณ์ของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC)

ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีส่วนประกอบด้วยกันอยู่ 3 ส่วน คือ

1. แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI source)
2. ตัวรับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (receptor or victim)
3. ส่วนเชื่อมต่อหรือตัวกลาง (coupling)

สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง (coupling path) จากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI source) ไปยังตัวรับผลกระทบ (receptor) ซึ่งตัวรับผลกระทบ อาจจะเป็นอุปกรณ์ (Device) เครื่องมือ (Equipment) หรือระบบ (system) โดยในทางปฏิบัติ แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI source) อาจจะได้รับสัญญาณรบกวนจากแหล่งอื่นด้วย จึงอาจเรียกได้ว่าเป็นทั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI source) และตัวรับผลกระทบ ในเวลาเดียวกันก็ได้ สัญญาณรบกวนที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนไปยังตัวรับผลกระทบมีหลายรูปแบบ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปแบบที่ 1 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านทางอากาศ ไปยังตัวรับผลกระทบโดยตรง (radiated emission)

รูปแบบที่ 2 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านทางอากาศ ไปยังสายตัวนำกำลังหรือสายตัวนำสัญญาณหรือสายตัวนำควบคุมที่เชื่อมต่อกับตัวรับผลกระทบ โดยสายตัวนำดังกล่าวจะเป็นตัวนำสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นไปยังตัวรับผลกระทบ (indirect-conducted emission)

**รูปแบบที่ 3** สายตัวนำกำลังหรือสายตัวนำสัญญาณหรือสายตัวนำควบคุมที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังตัวรับผลกระทบ (indirect-radiated emission)

**รูปแบบที่ 4** สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนส่งผลกระทบไปยังตัวรับผลกระทบโดยผ่านทางสายตัวนำกำลังหรือสายตัวนำสัญญาณหรือสายตัวนำควบคุมที่เชื่อมต่อถึงกันกับตัวรับผลกระทบ (conducted emission)

**รูปแบบที่ 5** สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในสายตัวนำกำลังหรือสายตัวนำสัญญาณหรือสายตัวนำควบคุม ที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน เหนี่ยวนำไปยังสายตัวนำกำลังหรือสายตัวนำสัญญาณหรือสายตัวนำควบคุม ที่ต่ออยู่กับตัวรับผลกระทบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสายตัวนำดังกล่าวอยู่ใกล้ชิดกันมากเท่าไรก็จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตัวรับผลกระทบมากขึ้นเท่านั้น

## 2.2 ปราบปรามการรบกวนของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC)

ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC) คือความสามารถของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ที่สามารถทำงานร่วมกันได้เป็นปกติในสภาวะแวดล้อมทางไฟฟ้า และมีความสัมพันธ์คือไม่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) และสามารถทนต่อการรบกวนของปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Susceptibility: EMS) จากภายนอกด้วย สัญญาณรบกวนที่เชื่อมต่อในรูปที่ 2.1 สามารถจำแนกตามลักษณะของสัญญาณออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1. วัดสัญญาณที่มาตามสายตัวนำ จะวัดสัญญาณในรูปแรงดัน (Voltage: V) หรือกระแสไฟฟ้า (Current: A)
2. วัดสัญญาณที่มาจากอากาศ จะวัดสัญญาณรบกวนในรูปสนามไฟฟ้า (Electric field: V/m) หรือสนามแม่เหล็ก (Magnetic field: A/m) หรือความหนาแน่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (plane wave:  $W/m^2$ )

โดยทั่วไปการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้หลายรูปแบบตามพิสัยความถี่ แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่พิสัย 0 เฮิรตซ์ ถึงประมาณ 2 กิโลเฮิรตซ์จะถูกจัดอยู่ในการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิสัยความถี่ต่ำ โดยจะส่งผลให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากระบบกำลังไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์และทำให้เกิดความสูญเสียในระบบกำลังไฟฟ้า ซึ่งเรียกรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิสัยความถี่นี้ว่า “ฮาร์มอนิกส์ (Harmonics)”

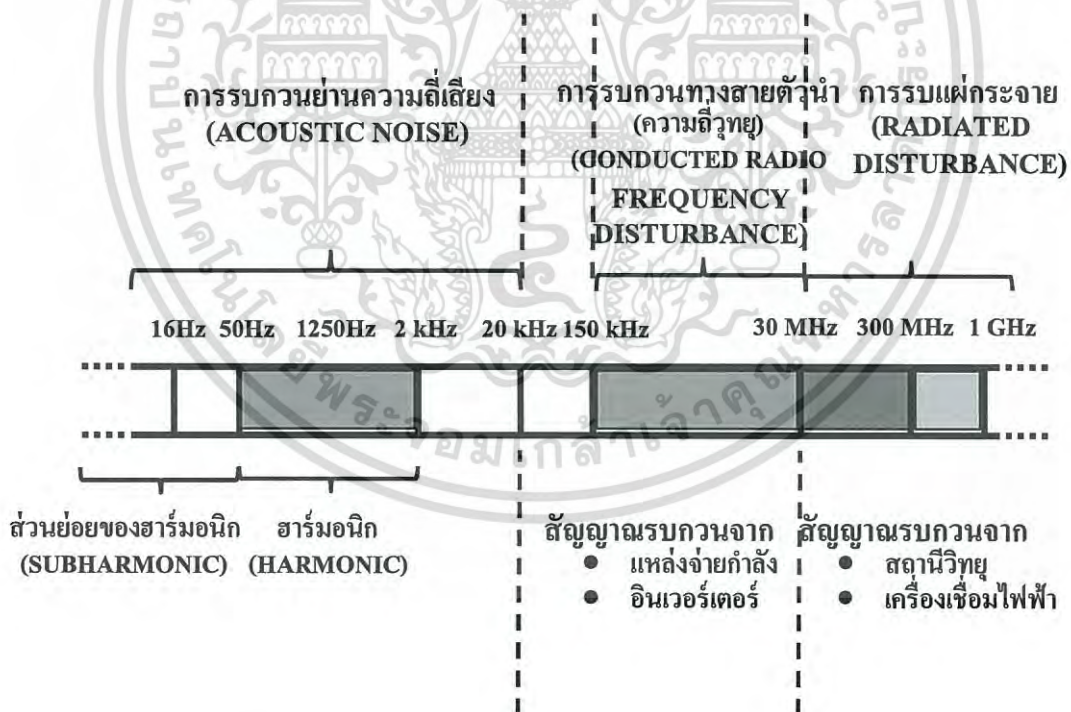
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่พิสัย 1.25 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึงประมาณ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ในปัจจุบันยังไม่จัดว่าเป็นปัญหาที่จะต้องแก้ไขด้วยวิศวกรทางด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC engineers) แต่มาตรฐานนานาชาติหลายฉบับได้ขยายพิสัยความถี่ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) ให้ครอบคลุมถึงพิสัยความถี่ดังกล่าวข้างแล้ว

3. การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่พิสัย 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึงประมาณ 1 จิกกะเฮิร์ตซ์ จะถูกจัดอยู่ในการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิสัยความถี่สูง บางครั้งจะเรียกแทนว่าการรบกวนความถี่วิทยุ (Radio frequency disturbance) สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือ

1. การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 30 เมกกะเฮิร์ตซ์ จะพิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted Emission: CE)

2. การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 30 เมกกะเฮิร์ตซ์ ถึง 1 จิกกะเฮิร์ตซ์ จะพิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (Radiated Emission: RE)



รูปที่ 2.2 พิสัยความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ซึ่งทั้งสองแบบจะมีรูปแบบในการรบกวนและวิธีตรวจจับสัญญาณรบกวนไม่เหมือนกัน อย่างไรก็ตาม

ตามคำว่า “การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า” กับ “การรบกวนความถี่วิทยุ” จะไม่สามารถนำมาใช้แทน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการพิจารณาของเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันได้เพราะการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นส่วนหนึ่งในพิสัยความถี่วิทยุเท่านั้น สำหรับการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกส์ (Harmonics) หรือการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor) ของระบบหรือวงจรใดๆก็ตามไม่ได้หมายความว่า จะเป็นการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแต่อย่างใด

## 2.2.1 กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทแสดงดังรูปที่ 2.3 [7] ดังนี้

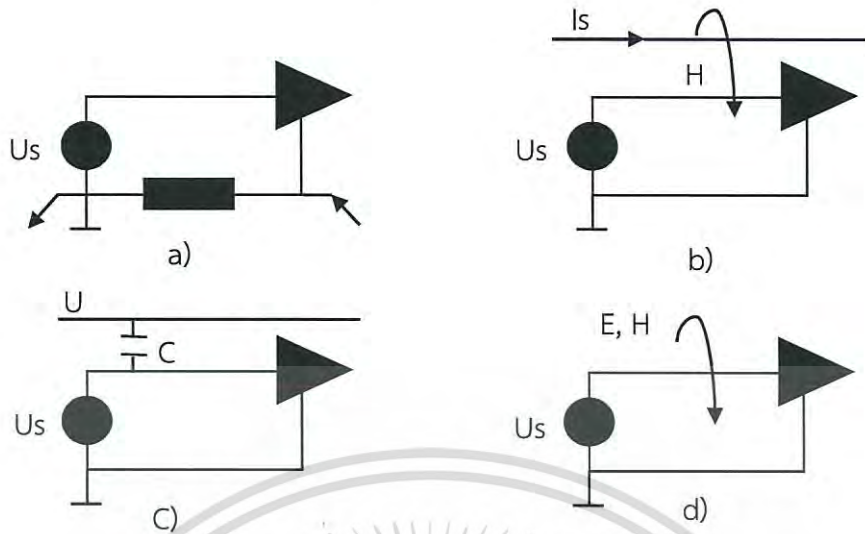
- Common ground impedance coupling การรบกวนประเภทนี้มีสาเหตุมาจากความต่างศักย์ระหว่างกราวด์ของระบบ โดยปกติแล้วระบบหลายๆระบบที่นำมาต่อกันเพื่อทำงานร่วมกันจะใช้กราวด์ของตัวเอง การแยกหรือการใช้งานกราวด์คนละระบบเมื่อนำมาต่อเชื่อมกันจะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างกราวด์ขึ้น ผลของความต่างศักย์ของระบบกราวด์นี้เองทำให้เกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3(a)

- Inductive Coupling การรบกวนประเภทนี้มีสาเหตุมาจากกระแสไฟฟ้าสูงๆ เมื่อกระแสไหลผ่านเส้นลวดตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นโดยรอบตัวนำตามแนวรัศมี ผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะไปเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลของกระแสบนตัวนำหรือวงจรที่อยู่ใกล้เคียง ดังแสดงในรูปที่ 2.3(b)

- Capacitive Coupling การรบกวนประเภทนี้มีสาเหตุมาจากแรงดันที่อยู่ข้างเคียง เมื่อนำแหล่งกำเนิดที่มีแรงดันสูงๆ มาวางไว้ใกล้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อากาศซึ่งมีความซึมซาบแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอยู่ระหว่างแหล่งกำเนิด และวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะประพฤติดังเสมือนเป็นตัวเก็บประจุขนาดเล็กและสามารถส่งถ่ายพลังงานจากแหล่งกำเนิดมายังวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3(c)

- Radiate Field Coupling การรบกวนประเภทนี้มีสาเหตุมาจากคลื่นระนาบ (plane wave) ซึ่งประกอบด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปรบกวนการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ข้างเคียง ดังแสดงในรูปที่ 2.3(d)

จากปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวัน แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 2 แหล่ง คือ จากแหล่งกำเนิดธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า สนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์ และสนามแม่เหล็กโลก อีกแหล่งกำเนิดเกิดจากมนุษย์สร้างขึ้น เช่น เครื่องรับ-ส่งวิทยุ เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน รถยนต์ และเครื่องบิน เป็นต้น



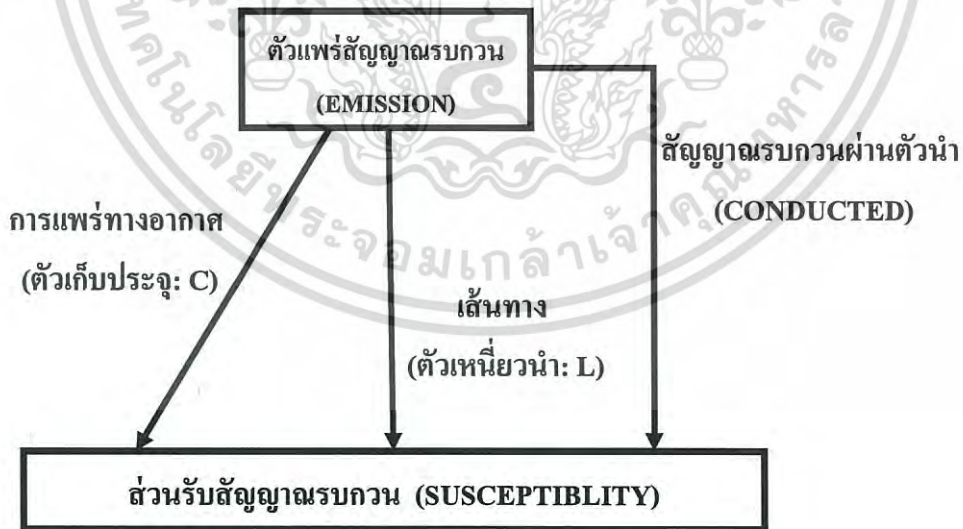
รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

### 2.3 หลักการเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

เส้นทางการเดินของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังตัวรับผลกระทบสามารถแบ่งออกได้

2 รูปแบบแสดงดังรูปที่ 2.4 คือ [3], [4]

1. การแผ่กระจาย (Radiation) หรือการเชื่อมต่อโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศหรือวัตถุอื่นๆ
2. การเชื่อมต่อผ่านทางสายตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน



รูปที่ 2.4 หลักการเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งหลักการเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 2.4 สามารถแทนรูปแบบทางไฟฟ้า (electrically) ให้อยู่ในรูปของตัวเก็บประจุ (capacitor) หรือแทนรูปแบบทางแม่เหล็ก (magnetically) ให้อยู่ในรูปของตัวเหนี่ยวนำ (inductor) ได้ เช่น กรณีที่ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเหล่านี้เป็นตัวเชื่อมต่อในการนำสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายตัวนำที่มีสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าให้สามารถส่งสัญญาณรบกวนดังกล่าวไปยังสายตัวนำตัวอื่นได้

### 2.3.1 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ทางสายตัวนำ (Conducted Noise)

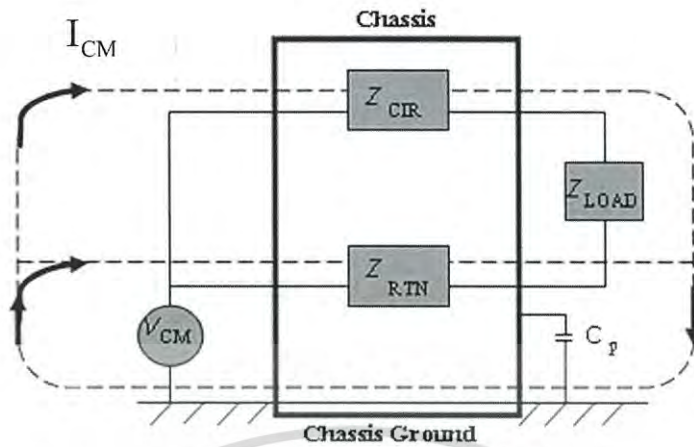
การเกิดสัญญาณรบกวนในสายตัวนำที่ไม่พึงประสงค์ที่ส่งออกมาทางสายตัวนำ ซึ่งเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ สามารถแบ่งการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำออกเป็น 2 ชนิดคือ การเกิดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำโหมดผลร่วม (Common Mode) และการเกิดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำโหมดผลต่าง (Differential Mode)

การเกิดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในโหมดผลร่วม (Common Mode) โดยนิยามของโหมดผลร่วมคือ ความแตกต่างของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายตัวนำ (หรือกลุ่มตัวนำ) เทียบกับกราวด์ หรือกลุ่มตัวนำอื่นๆเป็นตัวอ้างอิง โดยตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic capacitor) ทำหน้าที่เป็นทางเดินสัญญาณไปยังกราวด์ซึ่งเป็นตัวอ้างอิง จึงทำให้เกิดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในโหมดผลร่วมขึ้น จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าสัญญาณแรงดันของสัญญาณรบกวนของสายสัญญาณ ( $V_{\text{noiseCIR}}$ ) ไม่เท่ากับสัญญาณแรงดันของสัญญาณรบกวนของสายป้อนกลับ ( $V_{\text{noiseRTN}}$ ) ดังแสดงสมการ (2.1) และ (2.2) ได้ดังนี้ เนื่องจากเส้นทางการไหลของสัญญาณรบกวนในแต่ละสายมีอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากัน [8], [35]

$$V_{\text{noiseCIR}} = I_{\text{CM1}} \times (Z_{\text{CIR}} + Z_{\text{LOAD}} + X_{\text{Cp}}) \quad (2.1)$$

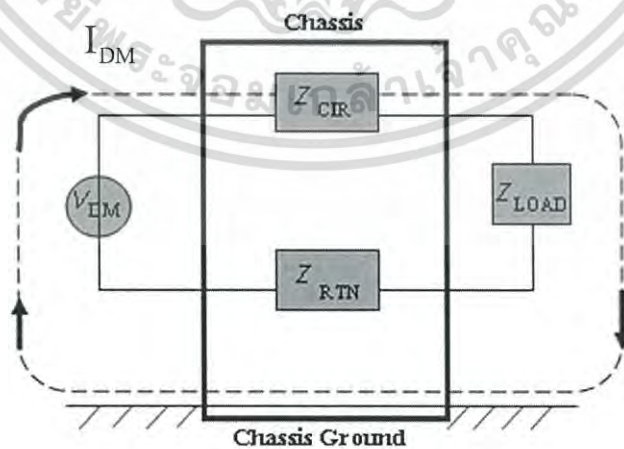
$$V_{\text{noiseRTN}} = I_{\text{CM2}} \times (Z_{\text{RTN}} + X_{\text{Cp}}) \quad (2.2)$$

จากสมการ (2.1) จะได้ว่าสัญญาณแรงดันของสัญญาณรบกวนของสายสัญญาณจะผ่านอิมพีแดนซ์ของวงจรแล้วผ่านไปยังอิมพีแดนซ์ของภาระทางไฟฟ้า ในขณะที่สัญญาณแรงดันของสัญญาณรบกวนของสายป้อนกลับจะผ่านอิมพีแดนซ์ของสายป้อนกลับเพียงอันเดียว ถ้ากระแสโหมดผลร่วมไม่เท่ากันทำให้เกิดความไม่สมดุลขึ้นส่งผลให้เกิดกระแสโหมดผลร่วมนี้กลายเป็นโหมดผลต่าง



รูปที่ 2.5 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนในโหมดผลรวม

การเกิดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในโหมดผลต่าง (Differential Mode) สัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในโหมดผลต่างเป็นการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสองสายตัวนำ คือตัวนำสัญญาณไป (Signal line) และตัวนำสัญญาณกลับ (Return line) ซึ่งสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำในโหมดผลต่างนี้จะเกิดจากการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น สัญญาณนาฬิกาหรือรูปคลื่นสัญญาณแรงดันในวงจรใดๆ โดยสัญญาณในโหมดผลต่างนี้จะมีทางเดินของกระแสหรือแรงดันไหลจากแหล่งจ่ายผ่านอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของวงจร ( $Z_{RTN}$ ) เพื่อไปยังภาระทางไฟฟ้า และไหลกลับมายังแหล่งจ่ายโดยผ่านอิมพีแดนซ์ของสายป้อนกลับ ดังรูปที่ 2.6 คือทางเดินหลักของสัญญาณในวงจรมัน ดังนั้นทางเดินของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการทำงานของวงจรและทางเดินของสัญญาณของวงจรก็คือทางเดินเดียวกัน



รูปที่ 2.6 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนในโหมดผลต่าง

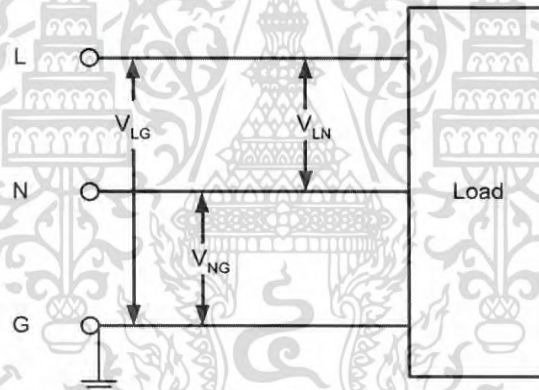
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7 แสดงวงจรไฟฟ้าหนึ่งเฟส ประกอบด้วยสายไลน์ (L) สายนิวทรัล (N) และสายกราวด์หรือสายดิน (G) จะสามารถหาแรงดันไฟฟ้าโหมดผลรวม (Common mode voltage) และแรงดันไฟฟ้าในโหมดผลต่าง (Differential mode voltage) ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$V_{CM} = \frac{(Z_{LG} + Z_{NG})}{2} \quad (2.3)$$

$$V_{DM} = \frac{(Z_{LG} - Z_{NG})}{2} \quad (2.4)$$

โดย  $V_{CM}$  : แรงดันไฟฟ้าโหมดผลรวม       $V_{LG}$  : แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไลน์กับกราวด์  
 $V_{DM}$  : แรงดันไฟฟ้าในโหมดผลต่าง       $V_{NG}$  : แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายนิวทรัลกับกราวด์  
 $V_{LN}$  : แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไลน์กับสายนิวทรัล

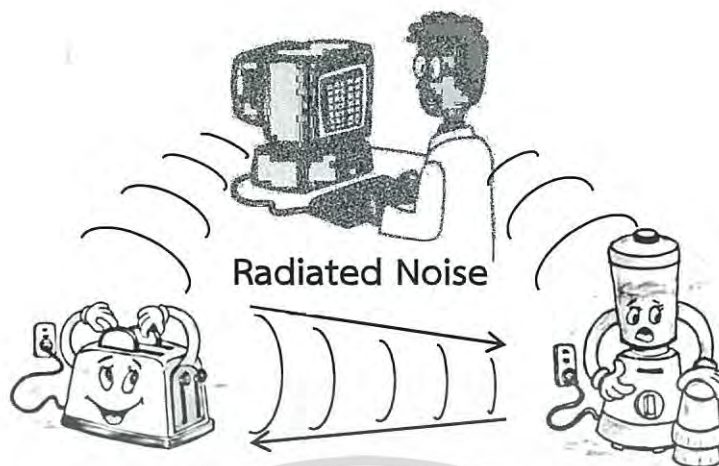


รูปที่ 2.7 วงจรไฟฟ้าเฟสเดียว

### 2.3.2 สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ทางอากาศ (Radiated Noise)

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ที่แพร่กระจายผ่านสายตัวนำ นอกจากจะมีผลต่อการแพร่กระจายกลับไปในระบบแล้ว ยังมีผลให้เกิดการแพร่กระจายในรูปสัญญาณรบกวนผ่านอากาศได้ โดยตัวนำหรือตัวระบายนความร้อนของอุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบ จะทำหน้าที่เสาอากาศที่ส่งสัญญาณรบกวนในรูปของแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิสัยความถี่ 30 เมกกะเฮิร์ตซ์ ถึง 1 จิกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อมีตัวนำไฟฟ้าของอุปกรณ์ใกล้เคียง สายตัวนำก็จะทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณการแพร่กระจาย ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและเกิดการรบกวนต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าดังกล่าว ตัวอย่างการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ แสดงดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ

## 2.4 ทฤษฎีการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding Theory)

หลักของการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ การทำให้อิมพีแดนซ์ของเส้นทางการแพร่คลื่นไม่ต่อเนื่องสามารถสะท้อนและดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาตกกระทบได้ หลักการของการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเหมือนกับการทำงานของตัวกรองสัญญาณ (filter) คือ ทำให้อิมพีแดนซ์ของสัญญาณรบกวนในตัวกลางไม่ต่อเนื่อง การปิดกั้นคลื่นจะนำไปใช้ในการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งจากภายนอกเข้าสู่ภายใน และป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายในออกสู่ภายนอก จะถูกนำไปใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อป้องกันปัญหาการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) โดยการปิดกั้นคลื่นจะช่วยลดทอนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมา เป็นการแก้ไขปัญหาลำดับหนึ่งเพื่อให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตผ่านการทดสอบทางความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับตัวแปรที่ใช้พิจารณาคุณภาพของการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะขึ้นกับค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding Effectiveness: SE) ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลดพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไปรบกวนการทำงานของอุปกรณ์รอบข้าง ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำได้โดยหาจากการเทียบอัตราส่วนของการแพร่คลื่นในขณะที่มีและไม่มี การปิดกั้นต่อการแพร่คลื่นในขณะที่วางแผ่นปิดกั้นคลื่น ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2.5) และ (2.6) ดังนี้ [4]

$$SE_E (dB) = 20 \log(E_0 / E) \quad (2.5)$$

$$SE_H (dB) = 20 \log(H_0 / H) \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่า  $E_0$ ,  $H_0$  คือ ค่าคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กที่ไม่ได้มีการปิดกั้นคลื่นตามลำดับ และ  $E$ ,  $H$  คือ ค่าคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กที่ได้มีการใช้แผ่นปิดกั้นคลื่นตามลำดับ ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นนี้มีประโยชน์ในการใช้เปรียบเทียบค่าในการหาสิ่งปิดกั้นที่ดี โดยการปิดกั้นคลื่นที่ดีจะมีค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นที่มาก การปิดกั้นคลื่นมีด้วยกัน 2 รูปแบบ คือ แบบพาสซีฟ (passive shielding) และแบบแอคทีฟ (active shielding) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- Passive shielding เป็นรูปแบบการปิดกั้นคลื่นโดยอาศัยคุณสมบัติของวัสดุซึ่งจะประกอบไปด้วยค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability) และค่าความนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ในวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) เช่น ซิลิกอน สตีล (silicon steel) จะช่วยเบนทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็กไปในทิศทางที่ไม่ต้องการได้ ซึ่งก็จะเป็นการช่วยปิดกั้นคลื่นในบริเวณที่ต้องการได้ ส่วนในวัสดุประเภทที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูง เช่น ทองแดง จะช่วยในการเกิดปรากฏการณ์กระแสสวน (eddy current) ที่บริเวณผิวหน้าวัสดุ โดยจะมีประสิทธิภาพที่ดีในกรณีที่มีวัสดุนี้มีทั้งค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์และค่านำไฟฟ้าที่สูงด้วยกันทั้งคู่

-Active shielding รูปแบบนี้เป็นการใช้เรื่องของสนามกระแสจากตัวนำมาทำให้เกิดการหักล้าง (cancel) ของสนามด้วยตัวเอง โดยจะใช้การที่กระแสไหลผ่านคอยล์ (coil) ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและกระแสจะถูกควบคุมในการเกิดรูปแบบสนามที่แตกต่างกันไป โดยปกติแล้ววิธีการปิดกั้นนี้จะใช้กันมากในบริเวณที่จำกัดเท่านั้น

ในการพิจารณาการปิดกั้นคลื่นจะพบว่า คุณสมบัติต่างๆของวัสดุเป็นเรื่องสำคัญสำหรับการคำนวณหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่น ดังนั้นหัวข้อถัดไปจึงจะนำเสนอทฤษฎีสถานเพื่อให้เห็นถึงที่มาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และเรื่องของค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ของวัสดุชนิดต่างๆเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความลึกผิว (skin depth) ซึ่งมีผลต่อการปิดกั้น

#### 2.4.1 ทฤษฎีสถานไฟฟ้า (Field Theory)

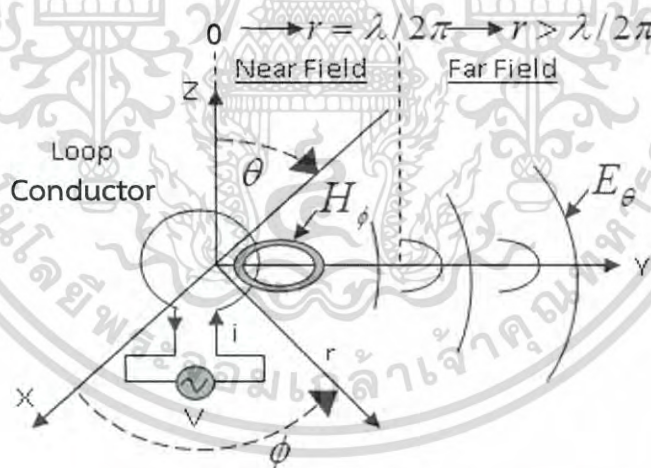
สนามไฟฟ้า (Electric field) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic fields) มีความสัมพันธ์ตามสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) ซึ่งการศึกษาการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของสนามทั้ง 2 แบบ นอกจากนี้ต้องยังเกี่ยวข้องกับระยะทางของการแพร่ในสนามระยะใกล้ (Near fields) และ สนามระยะไกล (Far fields) ด้วย โดยสามารถอธิบายสนามทั้ง 2 ที่เกิดจากมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำแบบ short wire ซึ่งมีความยาว ( $D$ ) ที่น้อยกว่าความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ได้ดังนี้

$$E_\theta = \frac{Z_0 I D \pi \sin \theta}{\lambda^2} \left[ -\left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^3 \cos \varphi - \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^2 \sin \varphi + \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right) \cos \varphi \right] \quad (2.7)$$

$$E_r = \frac{2Z_0 I D \pi \cos \theta}{\lambda^2} \left[ \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^3 \cos \varphi + \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^2 \sin \varphi \right] \quad (2.8)$$

$$E_\phi = \frac{I D \pi \sin \theta}{\lambda^2} \left[ \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^2 \sin \varphi + \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right) \cos \varphi \right] \quad (2.9)$$

เมื่อ  $Z_0$  คือ อิมพีแดนซ์ของอากาศมีค่า 370 โอห์ม,  $I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลใน short wire,  $\theta$  คือ ขนาดของมุมในการแพร่,  $r$  คือ ระยะทางถึงจุดทดสอบ และ  $\varphi$  คือ ตัวแปรเฟสมีค่าเป็น  $(2\pi r/\lambda) - \omega t$  และจากสมการข้างต้นจะสังเกตว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจะมีแต่ละเทอมที่แปรผกผันกับระยะทาง ซึ่งแต่ละเทอมมีชื่อเรียก คือ  $E\alpha/r^3$  เรียกว่า Quasi-stationary term,  $E\alpha/r^2$  เรียกว่า Induction term และ  $E\alpha/r$  เรียกว่า Radiation term แสดงดังรูปที่ 2.9

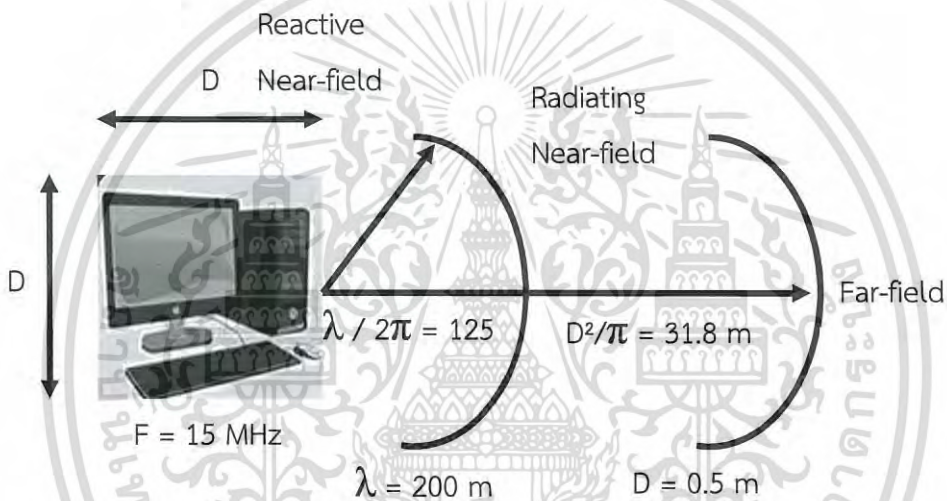


รูปที่ 2.9 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากกระแสขั้ววง

#### 2.4.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้และระยะไกล (Near field and far field)

การศึกษาพฤติกรรมการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งกรณีศึกษาออกได้ตามลักษณะของแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยทั่วไปจะใช้ทฤษฎีของสายอากาศไดโพลและสายอากาศแบบลูกบด ดังแสดงในรูปที่ 2.9 บริเวณรอบๆของสายอากาศหรือแหล่งกำเนิดอื่นๆ ถูกแบ่งออกเป็น 3 บริเวณคือ บริเวณสนามระยะใกล้แบบ Reactive (reactive near field) บริเวณสนามระยะใกล้แบบ Radiating (radiating near field) และแบบสุดท้ายคือบริเวณสนามระยะไกล (far field) โดยบริเวณสนามเอกสารอินเบนเอกสารที่ส่งในเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะใกล้แบบ Reactive ลักษณะของสนามลดลงตามค่า  $E \propto 1/r^m$  และ  $H \propto 1/r^n$  เมื่อ  $m, n > 1$  และขอบด้านนอกของสนามแบบนี้เป็น  $r = \lambda/2\pi$  เมื่อ  $\lambda$  เป็น ความยาวคลื่น ส่วนบริเวณสนามระยะใกล้แบบ Radiating (radiating near field) จะพบว่าการทำงานสนามในระยะนี้ไม่สามารถทำได้เพราะสนามจะแกว่งแบบไม่คงที่ โดยมีขอบเขตนอกอยู่ที่  $D^2/4\lambda$  ระยะนี้อยู่ระหว่างบริเวณสนามระยะใกล้แบบ Reactive และสนามระยะไกล บริเวณนี้จะไม่เกินระยะ  $D \ll \lambda$  เมื่อ  $D$  เป็นค่ามากที่สุดของมิติของแหล่งกำเนิด และแบบสุดท้ายคือบริเวณสนามระยะไกล (far field) สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางการแพร่กระจายคลื่นและตั้งฉากต่อกันตามระนาบคลื่น สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กลดลงตามระยะ  $1/r$  โดยสนามระยะต่างๆสามารถแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงระยะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

### 2.4.3 อิมพีแดนซ์คลื่น (Wave impedance)

ถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก โดยมี  $Z_w = E/H$  และอิมพีแดนซ์คลื่นระนาบ หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางจะถูกกำหนดให้เป็น  $Z_w = \sqrt{\mu/\epsilon}$  โดยอิมพีแดนซ์คลื่นระนาบในอากาศมีค่าเป็น  $120\pi$  หรือ 377 โอห์ม และในการหาอิมพีแดนซ์ในคลื่นที่เคลื่อนที่บนอากาศยังแบ่งออกได้ตามระยะของการแพร่ด้วย โดยค่า  $120\pi$  คือค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดในสนามระยะไกล ในรูปที่ 2.9 แสดงค่าอิมพีแดนซ์คลื่นที่สนามระยะใกล้และไกล จะสังเกตว่าที่สนามระยะไกลจะมีค่าอิมพีแดนซ์คลื่นคงที่ตลอด 377 โอห์ม แต่ในสนามระยะใกล้จะพบว่ามีค่าการแบ่งแยกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่แสดงสนามไฟฟ้ามากกว่าเรียกว่า high source impedance เพราะมีค่าของอิมพีแดนซ์มีค่ามากกว่าคลื่นระนาบ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.10)

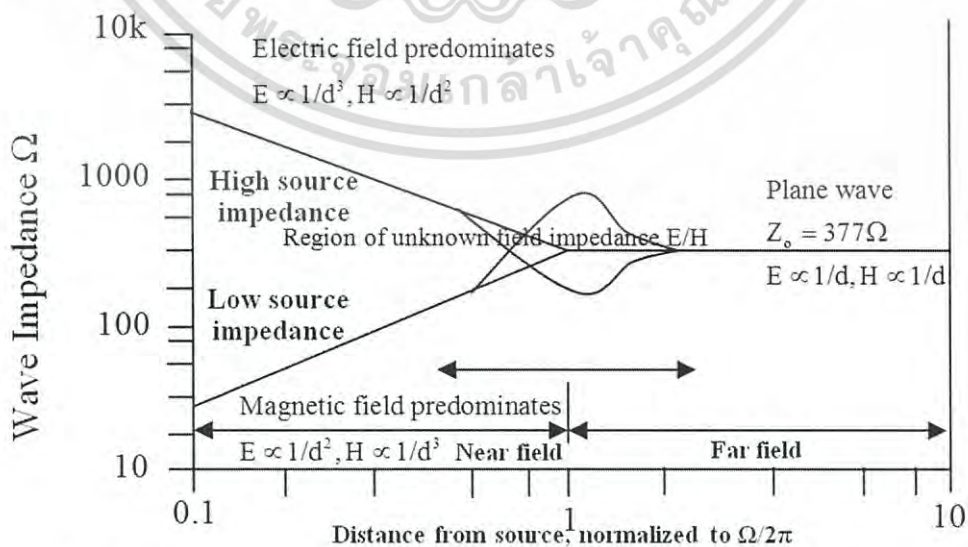
$$Z_w = Z_0(\lambda/(2\pi r)) \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะพบว่าที่ส่วนนี้ สนามไฟฟ้าจะแปรผกผันกับระยะทางกำลังสาม ในขณะที่สนามแม่เหล็กจะแปรผกผันกับระยะทางกำลังสอง นั่นแสดงว่า ส่วนนี้จะแสดงค่าของสนามไฟฟ้ามากกว่าสนามแม่เหล็ก ในกรณีนี้แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นสายอากาศแบบเส้นตรง อีกส่วนหนึ่งจะถูกเรียกว่า low source impedance เนื่องจากมีค่าอิมพีแดนซ์ที่น้อยกว่าส่วนคลื่นระนาบ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.11)

$$Z_w = Z_0(2\pi r / \lambda) \quad (2.11)$$

ซึ่งในส่วนนี้ สนามไฟฟ้าจะแปรผกผันกับระยะทางกำลังสอง ในขณะที่สนามแม่เหล็กจะแปรผกผันกับระยะทางกำลังสาม ซึ่งส่วนนี้จะแสดงค่าของสนามแม่เหล็กมากกว่าสนามไฟฟ้า จะสังเกตว่าอิมพีแดนซ์คลื่นจะขึ้นอยู่กับระยะของสนามแม่เหล็กด้วยไฟฟ้าด้วย จากสนามระยะไกลจะพบว่าอิมพีแดนซ์จะคงที่อยู่ที่ค่า 377 โอห์ม ในขณะที่สนามระยะใกล้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักที่แบ่งตามการแสดงอำนาจของประเภทสนามออกมา โดยจะแบ่งเป็นช่วง high impedance ที่แสดงค่าความต่างศักย์สูงแต่ค่ากระแสต่ำ จึงแสดงประเภทสนามไฟฟ้าออกมา และอีกช่วงหนึ่งคือ low impedance ที่แสดงค่าตรงข้ามกัน กล่าวคือจะมีค่าความต่างศักย์ต่ำแต่ค่าของกระแสสูง จึงแสดงประเภทสนามแม่เหล็กออกมา จะพบว่าในกรณีของสนามระยะใกล้ประเภทของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กจะต้องพิจารณาแยกกัน เนื่องจากค่าอัตราส่วนของสนามทั้งสองไม่คงที่ จึงแสดงประเภทของสนามที่ต่างกัน แต่ในขณะที่สนามระยะไกลอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กคงที่ (377 โอห์ม) ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงคลื่นระนาบจึงมักจะหมายถึงการพิจารณาที่สนามระยะไกล แต่ถ้าต้องการแยกพิจารณาเป็นสนามทั้งสองประเภท จะหมายถึงการทำกรวัดที่สนามระยะใกล้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ค่าอิมพีแดนซ์คลื่นโดยเปรียบเทียบกับระยะทางจากแหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.4 อิมพีแดนซ์โลหะ (Metal impedance) และความลึกผิว (skin depth)

คุณสมบัติของโลหะแต่ละชนิดจะทำให้ค่าของการแพร่คลื่นที่ได้แตกต่างกันไป อิมพีแดนซ์โลหะเป็นตัวแปรหนึ่งในการปิดกั้นคลื่น โดยค่าของมันจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของโลหะแต่ละชนิด ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติและค่าอิมพีแดนซ์ ดังสมการที่ (2.12) ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์จะเป็นตัวแปรที่สำคัญในการพิจารณานำวัสดุมาใช้ในการทำแผ่นปิดกั้นคลื่น

$$Z_m = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \approx \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} (\Omega) \quad \text{สำหรับ } \sigma \gg \omega\varepsilon \quad (2.12)$$

ชิลด์ คือ วัสดุที่ไม่เป็นแม่เหล็กและมีความหนาน้อยกว่า ความลึกผิว (skin depth) ที่ความถี่ของสัญญาณ โดยปกติแล้วเทคนิคการชิลด์นั้นใช้สำหรับลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศได้ การชิลด์คือการดูดซับหรือการสะท้อนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกหรือป้องกันอุปกรณ์นั้นๆ เพื่อไม่ให้ไปรบกวนอุปกรณ์อื่นๆ ดังนั้นการป้องกันที่มีคุณสมบัติที่คล้ายกับกรงฟาราเดย์ การชิลด์เป็นเทคโนโลยีที่สำคัญของการยับยั้งและลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ซึ่งเป็นผลที่ตามมาต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ในด้านการออกแบบทางวิศวกรรมและในระบบการสื่อสารต่างๆ [7], [9], [10], [11]

การชิลด์ทำโดยใช้เทปชิลด์ โครงโลหะหรือแผ่นชิลด์ปิดไปที่อุปกรณ์โดยตรงซึ่งสามารถลดสัญญาณรบกวนทางอากาศได้ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าคือ ค่าความลึกผิว (Skin Depth) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงระยะที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแทรกผ่านเข้าภายในวัสดุได้ ซึ่งนิยามอยู่ในรูปความลึกซึ่งขนาดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าลดทอนลงเท่ากับ  $1/e$  เท่า หรือ 37 เปอร์เซ็นต์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิววัสดุนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของวัสดุและความลึกผิวของโลหะที่ชิลด์นี้หาได้จากสมการที่ (2.13) ซึ่งค่าความลึกผิวนี้จะนำไปใช้ในการคำนวณการสูญเสียแบบดูดซับ ซึ่งจะสังเกตว่าค่าความลึกผิวจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ คือค่าความซึมซาบ และค่าความนำไฟฟ้า นอกจากนี้ยังจะสังเกตได้อีกว่าค่าของความถี่ก็มีผลต่อค่าความลึกผิวอีกด้วย ดูได้จากตารางที่ 2.2 จะแสดงถึงค่าความลึกผิวของวัสดุต่างๆ [11], [12]

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\delta$  คือ ค่าระยะความลึกผิว (Skin Depth) m

$f$  คือ ความถี่ (Frequency) Hz

$\mu$  คือ ค่าการซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) H/m

$\mu_0$  คือ ค่าการซึมซาบแม่เหล็กในที่ว่าง (Permeability of Free Space,  $4\pi \times 10^{-7}$ ) H/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อผู้เขียนได้ใช้ประโยชน์จากการนำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

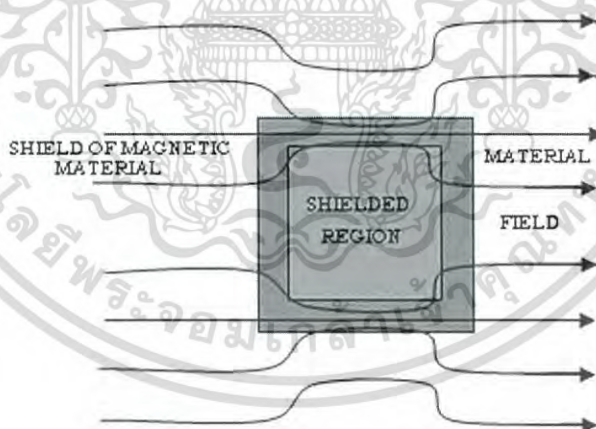
$\mu_r$  คือ ค่าการซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative Permeability)

$\sigma$  คือ ค่าการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity) S/m

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความลึกเชิงผิว (skin depth) ของวัสดุต่างๆ [11], [12]

Frequency	Copper (นิ้ว)	Aluminum (นิ้ว)	Steel (นิ้ว)
60 Hz	0.335	0.429	0.034
100 Hz	0.260	0.333	0.026
1 kHz	0.082	0.105	0.008
10 kHz	0.026	0.033	0.003
100 kHz	0.008	0.011	0.0008
1 MHz	0.003	0.003	0.0003
10 MHz	0.0008	0.001	0.00008

สังเกตเห็นว่าประจุจะอยู่บนผิวด้านนอกของตัวนำเท่านั้นและไม่มีผลอะไรกับสิ่งที่อยู่ภายใน แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การชีลด์แบบปิดไปที่อุปกรณ์โดยตรงประจุจะอยู่บนผิวด้านนอกของตัวนำ

#### 2.4.5 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding Effectiveness: SE)

การปิดกั้นคลื่นจะพิจารณาจากตัวแปรที่สูญเสียใน 3 แบบด้วยกัน คือ การสูญเสียจากการสะท้อน (Reflection loss) การสูญเสียจากการดูดซับ (Absorption loss) และการสูญเสียจากการสะท้อนกลับ (Re- Reflection loss) ซึ่งการสูญเสียทั้ง 3 แบบ แสดงได้ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงทิศทางการแพร่คลื่นจากทางด้านซ้ายมาทางด้านขวา โดยการสูญเสียแบบแรกจะเกิดจากการที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นเคลื่อนที่ผ่านอากาศและมาสะท้อนที่แผ่นปิดกั้นพลังงานส่วนหนึ่งจึงเกิดจากการสูญเสียไป ต่อมาเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านแผ่นปิดกั้นจะเกิดการลดทอนขึ้น นั่นก็คือการสูญเสียแบบที่ 2 คือ การสูญเสียแบบดูดซับ การสูญเสียแบบนี้จะขึ้นอยู่กับความหนาและค่าซึมซาบแม่เหล็ก (permeability) ของวัสดุที่ใช้ ส่วนแบบสุดท้าย คือการสูญเสียแบบการสะท้อนกลับอีกครั้งเนื่องจาก คลื่นจะเคลื่อนที่ออกจากแผ่นโลหะเข้าสู่อากาศจึงมีส่วนหนึ่งที่เกิดการสะท้อนกลับอีกครั้ง โดยการหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นสามารถกำหนดได้จากความสัมพันธ์อีกแบบได้ดังสมการที่ (2.14) ถึง สมการที่ (2.17) [13]

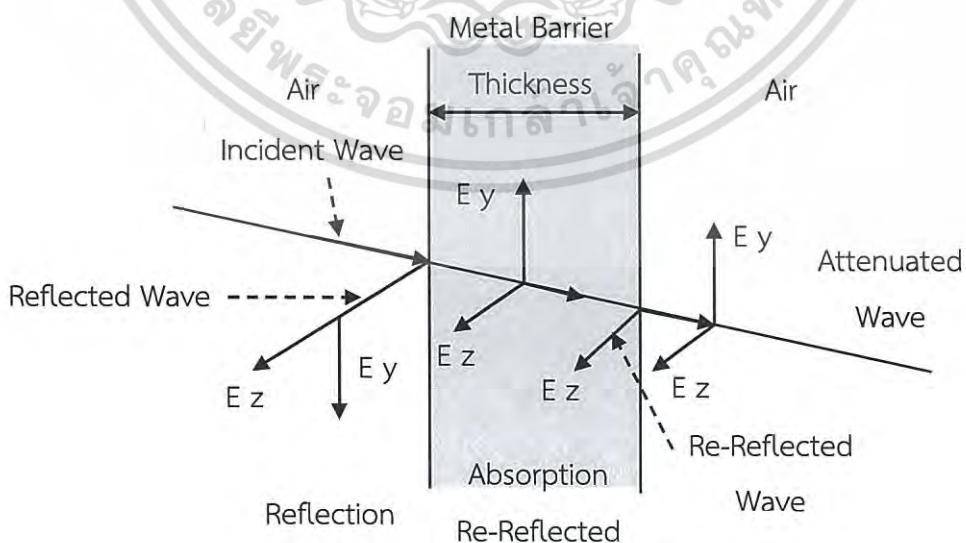
$$SE_{dB} = A_{dB} + R_{dB} + RR_{dB} \tag{2.14}$$

$$A_{dB} = 131.4 t_{mm} \sqrt{f_{MHz} \mu_r \sigma_r} \tag{2.15}$$

$$R_{dB} = 20 \log \left| \frac{(1+k)^2}{4k} \right| \tag{2.16}$$

$$RR_{dB} = 20 \log \left| 1 - \left( \frac{k-1}{k+1} \right)^2 e^{-0.23 A_{dB} (1+j)} \right| \tag{2.17}$$

เมื่อ  $A_{dB}$ ,  $R_{dB}$ ,  $RR_{dB}$  คือการสูญเสียจากการดูดซับ การสะท้อน และการสะท้อนกลับตามลำดับ และค่า  $k$  สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์คลื่นและอิมพีแดนซ์โลหะ ( $k = Z_w / Z_m$ ) เนื่องจากคลื่นเคลื่อนที่ผ่านอากาศสู่โลหะ



รูปที่ 2.13 การแพร่ของคลื่นผ่านแผ่นปิดกั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.6 การสูญเสียจากการดูดซับ (Absorption loss)

เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ทะลุผ่านตัวกลางจะทำให้ขนาดของแอมพลิจูดลดลงแบบเอกโพเนนเชียล (exponential) ปรากฏการณ์นี้เป็นเพราะว่ามีการเปลี่ยนพลังงานเป็นพลังงานความร้อนซึ่งสามารถแสดงได้ตามความสัมพันธ์ดังนี้  $E_1 = E_0 e^{-1/\delta}$  สำหรับคลื่นไฟฟ้าและ  $H_1 = H_0 e^{-1/\delta}$  สำหรับคลื่นแม่เหล็ก โดย  $E_1$  และ  $H_1$  เป็นความเข้มของสนามที่ระยะทาง  $t$  ในตัวกลางที่ทำให้พลังงานลดลงไปที่  $1/e$  หรือ 37 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งนั่นก็คือความลึกผิว (skin depth) นั่นเอง ค่าความลึกผิวจะแตกต่างกันไปตามคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ คือความหนา ( $t$ ) ค่าความนำสัมพัทธ์ (relative conductivity:  $\sigma_r$ ) และค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability:  $\mu_r$ ) นอกจากนี้ค่าความลึกผิวยังขึ้นอยู่กับความถี่ที่นำแผ่นปิดกันไปใช้อีกด้วย เพื่อให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของค่าความลึกผิวกับค่าการสูญเสียจากการดูดซับ สามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบของความสัมพันธ์ได้จากสมการที่ (2.18)

$$A = 20 \left( \frac{t}{\delta} \right) \log(e) = 8.69 \left( \frac{t}{\delta} \right) \text{dB} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.18) พบว่า การสูญเสียจากการดูดซับในแผ่นปิดกันของ 1 ช่วงความลึกผิว จะประมาณ 9 dB ซึ่งถ้าใช้แผ่นกันที่หนาขึ้นก็สามารถทำให้เกิดการสูญเสียได้เพิ่มขึ้นเช่นกัน กล่าวคือเมื่อเพิ่มความหนาให้เพิ่มเป็น 2 ช่วงความลึกผิว ค่าการสูญเสียจากการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอีก 9 dB นอกจากนี้จะต้องการปิดกันคลื่นให้มากตามต้องการแล้วจะต้องคำนึงถึงการแพร่ของความร้อนด้วย

#### 2.4.7 การสูญเสียจากการสะท้อน (Reflection loss and Re- Reflection loss)

การสูญเสียแบบนี้จะเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง 2 ตัวที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่างกัน และค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นไปตามสมการที่ (2.19) และ สมการที่ (2.20) ดังนี้

$$E_1 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E_0 \quad (2.19)$$

$$H_1 = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} H_0 \quad (2.20)$$

$E_0$ ,  $H_0$  เป็นค่าความเข้มสนามของคลื่นตกกระทบ ในขณะที่  $E_1$ ,  $H_1$  เป็นค่าความเข้มสนามของคลื่นที่ผ่านออกไป และเนื่องจากคลื่นจะเคลื่อนที่ออกจากแผ่นปิดกันออกสู่ภายนอกจึงมีการสะท้อนเกิดขึ้นอีกครั้งจากตัวกลางที่เป็นแผ่นปิดกันออกสู่อากาศ ในส่วนนี้ยังจะไม่คำนึงถึงการสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการดูดซับของคลื่นเนื่องจากความหนาของตัวกลาง ดังนั้นความเข้มของสนามคลื่นทั้งสองที่เคลื่อนที่ออกไปสู่ภายนอกจะเป็นตามสมการที่ (2.21) และ สมการที่ (2.22) ดังนี้

$$E_t = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} E_1 \quad (2.21)$$

$$H_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} H_1 \quad (2.22)$$

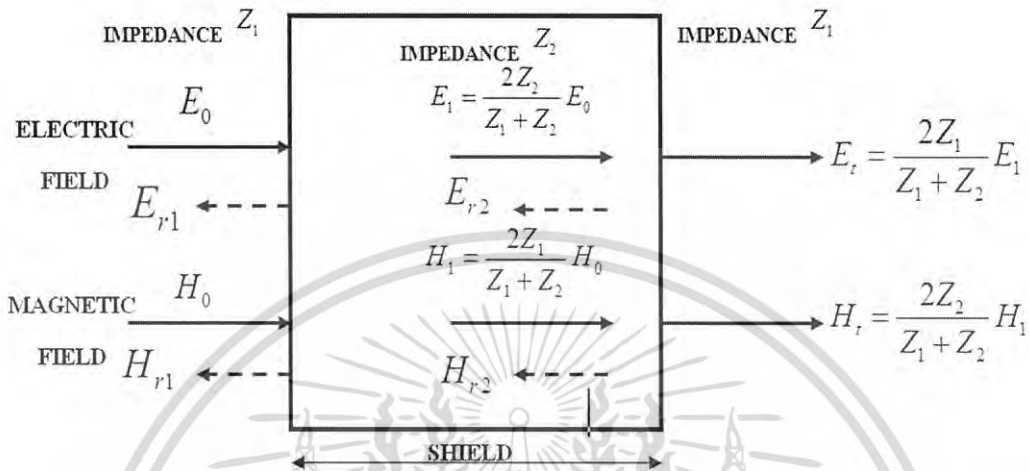
โดยสมการแสดงความสัมพันธ์ของการสูญเสียจากการสะท้อนจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวกลางทั้ง 2 ตัว ที่คลื่นเดินทางผ่าน เมื่อแผ่นปิดกั้นเป็นโลหะและพื้นที่โดยรอบเป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้วจะพบว่า  $Z_1 \gg Z_2$  ซึ่งภายใต้เงื่อนไขนี้ ในกรณีของสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดการสะท้อนเกิดขึ้นอย่างมากในขอบเขตแรก (จากอากาศเข้าสู่แผ่นปิดกั้น) แต่ในกรณีของสนามแม่เหล็กจะพบว่าเกิดการสะท้อนกลับขึ้นในส่วนขอบเขตที่สอง (จากแผ่นปิดกั้นออกสู่อากาศ) โดยการเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ทำให้สรุปได้ว่า ในกรณีของสนามไฟฟ้าวัสดุที่บางจะสามารถทำให้เกิดการสูญเสียจากการสะท้อนได้เป็นอย่างดี และในกรณีที่กำหนดให้  $Z_1 \gg Z_2$  จะได้ความสัมพันธ์ของความเข้มสนามของทั้ง 2 ประเภทออกสู่ภายนอกดังสมการที่ (2.23) และ สมการที่ (2.24) ดังนี้

$$E_t = \frac{4Z_2}{Z_1} E_0 \quad (2.23)$$

$$H_t = \frac{4Z_2}{Z_1} H_0 \quad (2.24)$$

เมื่อนำความสัมพันธ์ของความเข้มสนามคลื่นที่เข้ามาระทบ และความเข้มของสนามที่แพร่ออกไป ( $E_0$  กับ  $E_t$  และ  $H_0$  กับ  $H_t$ ) จะทำให้ได้ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแบบการสูญเสียจากการสะท้อนตามรูปที่ 2.14 โดยที่กล่าวมาตั้งแต่ต้นเป็นการคำนวณการสูญเสียจากการสะท้อนของคลื่นระนาบที่ทำมุมตั้งฉากกับพื้นผิวแผ่นปิดกั้น ซึ่งการสูญเสียแบบนี้จะเพิ่มมากขึ้นตามมุมที่ตกกระทบ โดยจากความสัมพันธ์ของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นเนื่องจากการสูญเสียในการสะท้อนจะได้ว่า เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของโลหะที่นำมาทำแผ่นปิดกั้นมีค่าน้อยจะทำให้เกิดการสูญเสียจากการสะท้อนมีค่ามากขึ้น และการใช้วัสดุที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำๆ สามารถเลือกได้จากคุณสมบัติของวัสดุที่มีค่าความนำไฟฟ้าที่สูงๆและมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กที่ต่ำๆ ในส่วนของสนามในระยะใกล้ (near field) การพิจารณาจะแตกต่างออกไปเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ไม่ได้คงที่ 377 โอห์ม เหมือนในสนามระยะไกล (far field) แต่ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้ออิมพีแดนซ์คลื่น ดังนั้นเมื่อมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอิมพีแดนซ์ที่สูง (สนามจะแสดงเป็นคลื่นไฟฟ้า) จะเกิดค่าการสูญเสียจากการสะท้อนมากกว่าคลื่นระนาบ ในทางเดียวกันเมื่อมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำ (สนามจะแสดงเป็นคลื่นแม่เหล็ก) จะเกิดค่าการสูญเสียที่น้อยกว่า



รูปที่ 2.14 การสะท้อนกลับของคลื่นเมื่อผ่านพื้นผิวของวัสดุปิดกั้น

โดยทั่วไปแล้วแผ่นโลหะซึ่งมีความหนามากกว่า 0.5 มิลลิเมตร มีค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 1 MHz ถึง 100 MHz ปัญหาที่พบจากการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือไม่สามารถกรองสัญญาณรบกวนที่ความถี่ต่างๆได้ รูปร่างของกล่องปิดกั้นมีผลต่อการปิดกั้นด้วย กล่องที่ใช้ในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีจะต้องมีขนาดใหญ่ โดยจะต้องมีระยะห่างระหว่างวงจรถับผิวด้านในของกล่องมีค่ามากๆ เพื่อที่จะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากวงจรถูกกักอยู่ในกล่องนอกจากนี้จะต้องไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์รีโซแนนซ์ขึ้นภายในกล่อง โดยต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้ผนังของกล่องขนานกับทิศทางการแพร่คลื่นนิ่ง (standing wave) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดรีโซแนนซ์ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการกรองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าลดลง โดยทั่วไปสำหรับรูปร่างของกล่องปิดกั้นที่ดีควรจะมีเหลี่ยมมุมมากๆ เพื่อป้องกันการเกิดรีโซแนนซ์หรือหลีกเลี่ยงการขนานกันของผนังปิดกั้นจากความกว้าง ความยาว ความสูงของผนังปิดกั้น ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงกล่องแบบที่มี ความกว้าง ความยาว และความสูงเท่ากัน กำหนดให้ด้านยาวของกล่องยาวกว่าด้านกว้าง ตัวอย่างเช่น ด้านยาวของกล่องปิดกั้นยาวกว่าด้านกว้าง 1.5 เท่า จะทำให้ฮาร์มอนิกรีโซแนนซ์ที่ 2 ของด้านกว้างทับกับฮาร์มอนิกที่ 3 ของด้านยาว ดังนั้นจึงควรจัดให้ด้านยาวและด้านกว้างไม่เป็นอัตราส่วนกัน ในกรณีปรากฏการณ์ทางผิว (skin effect) ก็มีผลต่อการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยเหมือนกัน สนามแพร่ผ่านจากอากาศมาจากร่องส่วนหลัก คือ สนามไฟฟ้า (E-Field) และสนามแม่เหล็ก (H-Field) โดยมีระยะห่างจากแหล่งกำเนิดมากกว่า  $\lambda/2\pi$  อัตราส่วนของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กจะมีค่า

เท่ากับ 377 โอห์ม หรือเรียกอัตราส่วนนี้ว่า อิมพีแดนซ์คลื่น (wave impedance) สนามไฟฟ้าและ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เจริญปัญญา เติบโตก้าวหน้าไปข้างหน้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กจะรวมกันกลายเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave: EM) โดยสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและตั้งฉากกับทิศทางการแพร่คลื่น ตามปกติเราสามารถกั้นสนามไฟฟ้าได้โดยการใช้แผ่นโลหะบางๆ เช่น ฟลอยด์ เพราะแผ่นฟลอยด์ที่นำมาใช้กับสนามไฟฟ้า จะทำให้เกิดเส้นทางในการเคลื่อนที่ของประจุใกล้ขึ้น ดังนั้นการใช้วัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงๆ (ความต้านทานต่ำๆ) มาั้นจะทำให้อิมพีแดนซ์ของการแพร่คลื่นลดลง ที่ความถี่สูงๆ กระแสแม่เหล็กจะเคลื่อนที่เฉพาะที่บริเวณผิวเท่านั้น การปิดกั้นสนามไฟฟ้าที่ความถี่สูงๆ จึงทำได้ง่าย โดยการใช้เพียงแผ่นอลูมิเนียมฟลอยด์เท่านั้น แต่การปิดกั้นสนามแม่เหล็กทำได้ยากกว่า เพราะขณะที่วัสดุที่ใช้ปิดกั้น เช่น โลหะมาขวางทางของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสวน (eddy current) ที่ผิวด้านในของกล่อง และทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำเข้าสู่ภายในกล่อง ดังนั้นการปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยการใช้แผ่นอลูมิเนียมฟลอยด์จึงไม่สามารถปิดกั้นสนามแม่เหล็กได้ นอกจากนี้ความลึกผิว (skin depth) ของกระแสในพื้นผิวของวัสดุที่ใช้ทำกล่องปิดกั้นยังขึ้นอยู่กับความถี่ของสนามแม่เหล็กด้วย ถ้าความลึกผิวของวัสดุที่ใช้ทำกล่องปิดกั้นคลื่นทำให้สนามแม่เหล็กลดลง 9 dB ดังนั้นถ้าเพิ่มความหนาของผิววัสดุปิดกั้นขึ้น 3 เท่า จะทำให้สามารถกรองสนามแม่เหล็กได้ลดลง 27 dB ด้วย ค่าปรากฏการณ์ทางผิวจะมีความสำคัญมากเมื่อความถี่มีค่าต่ำๆ เพราะที่ระยะนี้สนามแม่เหล็กจะมีค่ามากกว่าสนามไฟฟ้า และอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำกว่า 377 โอห์ม การปิดกั้นสนามแม่เหล็กในระยะใกล้ๆ นี้ จำเป็นต้องใช้แผ่นโลหะที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงๆ หรือความต้านทานต่ำๆ มาก

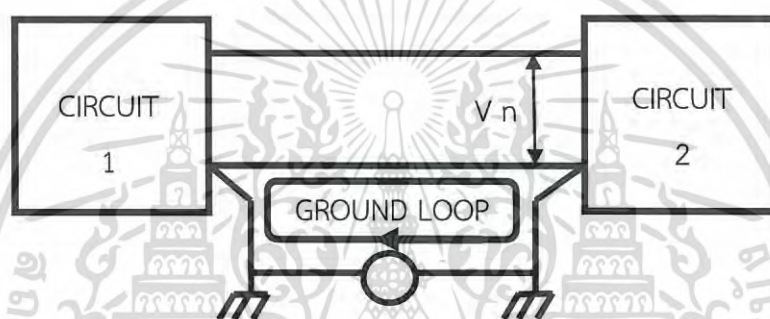
แผ่นทองแดงและแผ่นอลูมิเนียมมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าแผ่นเหล็กมากกว่า 5 เท่า ดังนั้นการใช้แผ่นทองแดงและแผ่นอลูมิเนียมจึงเพียงพอสำหรับการปิดกั้นสนามไฟฟ้า แผ่นทองแดงและแผ่นอลูมิเนียมมีค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (permeability) มีค่าประมาณ 1 หรือเท่ากับของอากาศ ในขณะที่แผ่นโลหะมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กประมาณ 300 ที่ความถี่ต่ำ และจะลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้นจนมีค่าเป็น 1 เมื่อความถี่สูงขึ้นไปมากกว่า 100 KHz ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูงๆ จะลดค่าความลึกผิวลง ดังนั้นการใช้วัสดุที่มีความหนามากๆ เช่น เหล็ก จะสามารถกรองสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่ำได้ดีกว่าทองแดงและอลูมิเนียม วัสดุที่ใช้ในการกรองสนามแม่เหล็กที่ดีจะต้องมีค่าการนำไฟฟ้าสูง และมีความหนาของผิวมากกว่าความลึกผิวที่ความถี่ต่ำที่สุด โดยแผ่นหนา 1 มิลลิเมตรที่เคลือบผิวด้วยสังกะสีนำไปประยุกต์ใช้ปิดกั้นสนามแม่เหล็กในงานทั่วไป

การชิลด์เพื่อป้องกันอุปกรณ์จากสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดย Coupling Noise สู่ตัวชิลด์ แทนที่จะเข้าสู่อุปกรณ์และทำตัวเป็นกราวด์ สำหรับกระแสที่เกิดจากการเหนี่ยวนำโดยสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า การชิลด์ โครงโลหะหรือแผ่นชิลด์นั้น ควรทำโดยการต่อกับโพลบเพื่อหลีกเลี่ยงและดึงประจุบวก การชิลด์ ที่ดีควรหุ้มด้วยสายไฟทั้งเส้นด้วยชิลด์และต่อชิลด์ลงกราวด์ เพื่อทำให้เกิดลูปปิดและมีกระแสไหลในชิลด์ ซึ่งสามารถลดสัญญาณรบกวนทางอากาศได้มากกว่าการชิลด์แบบใช้เทปชิลด์ โครงโลหะหรือแผ่นชิลด์ปิดไปที่อุปกรณ์โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

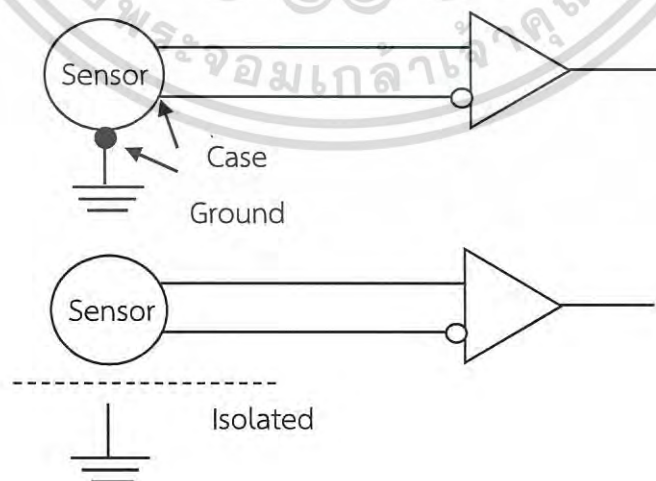
## 2.5 การต่อลงดิน (Grounding)

การกราวด์ที่เหมาะสมเป็นวิธีที่ดีและประหยัดที่สุด การลดสัญญาณรบกวน ในทางทฤษฎีกราวด์ หมายถึง จุดหรือระนาบที่มีศักดาไฟฟ้าเท่ากันและทำหน้าที่เป็นศักดาไฟฟ้าอ้างอิงของวงจรและระบบ ในทางปฏิบัติ กราวด์เป็นจุดร่วม (common) และเป็นทางกลับซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำของสัญญาณ (return path) ไปยังแหล่งจ่าย ดังนั้น กราวด์ไม่ได้เป็น 0 V และ 0 โอห์ม หรือมีศักดาไฟฟ้าเท่ากันทุกจุดอย่างแท้จริง ในบางกรณีจึงมีการเกิด กระแสไหลในสาย คือมี ground loop เกิดขึ้น ( ลักษณะเป็นเส้นหรือแนวและมีการมาบรรจบกันที่ใดที่หนึ่งเกิดเป็นวง หรือ Loop) เส้นทางการวิ่งกลับและพื้นที่ Loop จะมีผลต่อ สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [14], [15], [20], [21] แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 Ground Loop ที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 วงจร

กราวด์ เป็นจุดที่สัญญาณรบกวนจะเข้าสู่ระบบ ถ้าไม่กราวด์ จะไม่ค่อยมีสัญญาณรบกวนแต่อันตราย แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะต่อกราวด์และไม่ต่อกราวด์ของวงอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกราวด์มี 2 ประเภท คือ

1. การกราวด์เพื่อความปลอดภัย (Safety Ground) ซึ่งต่อกับศักดาไฟฟ้าของโลกเรียกว่า Earth ground หรือในบางครั้งมีการต่อผ่านตัวถังหรือ Case เรียกว่า Chassis Ground กรณีที่เป็นการต่อกราวด์ (ซึ่งส่วนใหญ่คือ Earth ground) กับ Faraday Shield อาจเรียกว่า Shield ground แสดงดังรูปที่ 2.17 (a และ b)
2. การกราวด์สัญญาณ (Signal ground หรือ Common) เป็นจุดของสัญญาณที่มี ศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน แสดงดังรูปที่ 2.17 (c)



a. Earth ground    b. Chassis ground    c. Common

รูปที่ 2.17 รูปแสดงสัญลักษณ์ของ Ground แบบต่างๆ

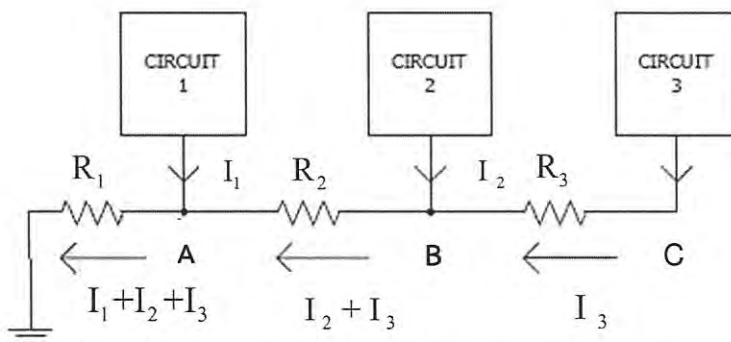
กราวด์สำหรับสัญญาณสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดกราวด์จุดเดียว และชนิดที่มีกราวด์หลายจุด ซึ่งชนิดกราวด์จุดเดียวยังสามารถแบ่งออกเป็นชนิดที่ต่อแบบอนุกรม และชนิดที่ต่อแบบขนาน และสำหรับเทคนิคการต่อกราวด์นั้น มีหลักสำคัญอยู่ 2 ประการ คือ

1. ตัวนำทุกตัวจะมีอิมพีแดนซ์ค่าหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยความต้านทาน และอินดักแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า
2. กราวด์ที่ไม่ได้อยู่ในจุดเดียวกันมักจะมีศักดาไม่เท่ากัน

เราสามารถเรียกระบบกราวด์จุดเดียวซึ่งต่อแบบอนุกรมแสดงดังรูปที่ 2.18 ว่า ระบบกราวด์ร่วม (common ground system) ซึ่งก็คือการนำกราวด์ของแต่ละวงจรมาต่ออนุกรมกันนั่นเอง โดยความต้านทาน  $R_1, R_2, R_3$  คืออิมพีแดนซ์ของแต่ละวงจร ซึ่งมีกระแสกราวด์  $I_1, I_2, I_3$  ไหลผ่านตามลำดับ ดังนั้น ที่จุด A ศักดาไฟฟ้าจะไม่เป็น 0 แต่จะมีค่าเท่ากับแสดงในสมการที่ (2.25) และ ศักดาที่จุด C แสดงในสมการที่ (2.26)

$$V_A = (I_1 + I_2 + I_3) \cdot R_1 \quad (2.25)$$

$$V_C = (I_1 + I_2 + I_3) \cdot R_1 + (I_2 + I_3) \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 \quad (2.26)$$



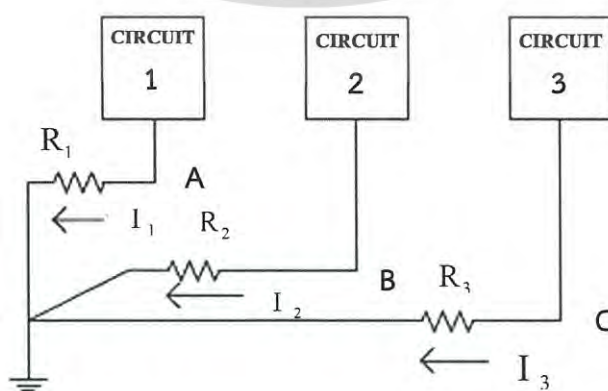
รูปที่ 2.18 แสดงระบบกราวด์ร่วม (ต่อแบบอนุกรม)

ถึงแม้ว่าการต่อในลักษณะนี้จะสร้างปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนมากที่สุดก็ตาม แต่แง่ของความสะดวก วงจรนี้จะง่ายต่อการประกอบมากที่สุด แต่ถ้าหากระบบที่กำลังออกแบบนี้มีระดับแรงดันภายในวงจรต่างกันมากแล้ว ไม่ควรนำกราวด์ชนิดนี้มาใช้งาน เนื่องจากสัญญาณรบกวนของวงจรซึ่งมีระดับสัญญาณสูง จะรบกวนวงจรซึ่งมีสัญญาณต่ำจนเกินจุดวิกฤตที่ผู้ออกแบบได้กำหนดไว้ จากรูปที่ 2.18 จะเห็นว่าคัทด้าที่ A มีค่าน้อยกว่า คัทด้าที่ C ดังนั้นวงจรที่เข้าใกล้จุดวิกฤตที่สุดควรอยู่ใกล้จุดกราวด์ที่สุด

และเราสามารถเรียกระบบกราวด์จุดเดียวซึ่งต่อแบบขนานแสดงดังรูปที่ 2.19 ว่า ระบบกราวด์แยก (separate ground system) ซึ่งก็คือการนำกราวด์ของแต่ละวงจรมาต่อขนานกันนั่นเอง เนื่องจากกระแสกราวด์จากวงจรหนึ่งจะไม่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของวงจรอื่น ดังนั้นแรงดันที่กราวด์ของแต่ละวงจรจะเป็นอิสระจากกัน โดยที่จุด A และ C เป็นไปตามสมการที่ (2.27) และ สมการที่ (2.28) ตามลำดับ

$$V_A = I_1 R_1 \quad (2.27)$$

$$V_C = I_3 R_3 \quad (2.28)$$

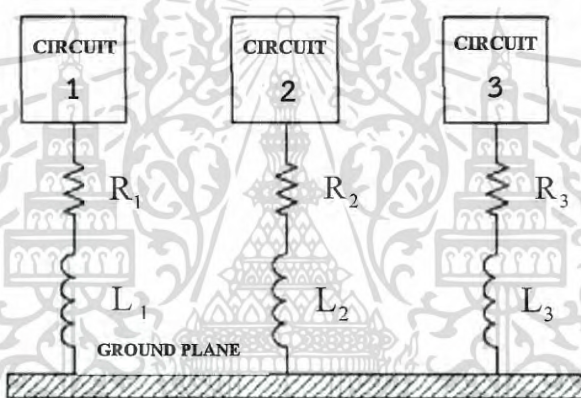


รูปที่ 2.19 แสดงระบบกราวด์แยก (ต่อแบบขนาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสียของระบบนี้คือความยุ่งยากในการต่อสายไฟฟ้า และนอกจากนี้ที่ความถี่สูงอินดักแตนซ์ของสายไฟตัวนำที่ใช้ต่อกับกราวด์จะมีค่าเพิ่มตามความถี่ ทำให้อิมพีแดนซ์มีค่าสูงตามไปด้วยและยังอาจเพิ่มการเหนี่ยวนำกระแสแม่เหล็กระหว่างสายกราวด์ด้วยกัน อีกทั้งยังสามารถเกิดการคับปลิงผ่านพาราซิติกคาปาซิแตนซ์ของกราวด์ได้โดยง่าย วิธีในการแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยการใช้สายไฟสำหรับต่อกราวด์ที่สั้นกว่า  $\lambda/20$  เพื่อป้องกันการผ่านสัญญาณรบกวน และลดอิมพีแดนซ์ไว้ให้มีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้

ส่วนระบบกราวด์หลายจุด (multipoint ground system) แสดงดังรูปที่ 2.20 ในช่วงความถี่สูงระบบกราวด์หลายจุดจะให้กราวด์อิมพีแดนซ์ที่ต่ำมาก วงจรซึ่งต่อกราวด์เข้าที่ระนาบกราวด์ที่อิมพีแดนซ์ต่ำ (โดยมากจะต่อกับตัวถัง) การต่อสายไฟลงกราวด์ควรใช้ตัวนำที่มีขนาดสั้นที่สุดเพื่อลดอิมพีแดนซ์ของตัวนำนี้



รูปที่ 2.20 แสดงระบบกราวด์หลายจุด

แต่ที่ความถี่ต่ำ ระบบนี้จะไม่สามารถทำงานได้ดี เนื่องจากกระแสจากวงจรทั้งหมดจะไหลผ่านกราวด์อิมพีแดนซ์ตัวเดียวกัน (ผ่านระนาบกราวด์ซึ่งมีอิมพีแดนซ์สูงขึ้นเมื่อมีความถี่ต่ำลง) ส่วนที่ความถี่สูง ผลจาก skin effect จะทำให้เกิดกระแสที่ผิวของระนาบกราวด์เท่านั้น ดังนั้นความหนาของระนาบกราวด์จึงไม่มีผลมากนักเมื่อใช้ที่ความถี่สูง

เทคนิคการต่อกราวด์สามารถใช้แบบการต่อกราวด์ร่วมหรือแบบการต่อกราวด์หลายจุด ขึ้นอยู่กับความถี่ที่เราต้องการจะลดสัญญาณรบกวน วัตถุประสงค์ของเทคนิคการต่อกราวด์คือค่าอิมพีแดนซ์และการลด ground loop ในวงจรของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งความถี่สูงให้น้อยลง โครงสร้างของระบบกราวด์มีกระแสไฟฟ้าภายนอกไหลวนเหมือนกับเสาอากาศซึ่งมีประสิทธิภาพต่อกระแสรบกวนสูง แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจาก ground loop นี้หาได้จากสมการที่ (2.29) [16], [17]

$$V_{induced} = \frac{-d\phi}{dt} = -s \frac{dB}{dt} \quad (2.29)$$

เมื่อ  $s$  คือ พื้นที่ของวงรอบ ( $m^2$ )

$\frac{dB}{dt}$  คือ การเปลี่ยนแปลงทางเวลาของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านแนวตั้งของ ground loop

ผลจากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของ ground loop ทำให้เกิดจุดอ้างอิงในระบบกราวด์ที่ไม่เสถียรภาพขึ้นและมีสัญญาณซ้อนทับกันเกิดเป็นสัญญาณรบกวนขึ้นมา แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำหาได้จากสมการที่ (2.30) [16]

$$V = i_g (r_g + j\omega L_g) - s \frac{dB}{dt} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $i_g$  คือ กระแสไฟฟ้าชั่วขณะ และ  $(r_g + j\omega L_g)$  คือ ค่า impedance ที่จุด  $g$  อ้างอิงกับระบบกราวด์ [18] ในระบบที่ศึกษานี้มีการต่อกราวด์ 2 แบบ คือ การต่อกราวด์แบบจุดเดียวจะดีช่วงกระแสไฟฟ้าต่ำ ( $< 1$  A) และช่วงความถี่ต่ำ ( $< 1$  MHz) เพื่อลดปัญหาจากการรบกวนของกระแสซึ่งไหลผ่าน ground loop และป้องกันการรบกวนจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กที่ ground loop นี้ด้วย ส่วนการต่อกราวด์แบบหลายจุด จะดีช่วงกระแสไฟฟ้าสูง ( $> 1$  A) และช่วงความถี่สูง ( $> 100$  kHz) หรือเมื่อความยาวของสายไฟตัวนำมีค่ามากกว่า  $\lambda / 20$  [5] แล้วควรใช้การต่อกราวด์แบบหลายจุดเพื่อให้กราวด์ภายในตัวนำตลอดทั้งเส้นมีแรงดันอ้างอิงของกราวด์มีค่าใกล้เคียงกันที่สุดซึ่งมีผลต่อการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศ

โดยทั่วไป เราสามารถสรุปการใช้ระบบการต่อกราวด์ได้ ดังนี้

1. ที่ความถี่ต่ำกว่า 1 MHz ควรใช้ระบบกราวด์จุดเดียว
2. ที่ความถี่สูงกว่า 10 kHz ควรใช้ระบบกราวด์หลายจุด

## 2.6 อุปกรณ์และวิธีการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ทางสายตัวนำ

อุปกรณ์ที่ใช้นั้นจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานนานาชาติที่กำหนด เพื่อให้การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเป็นไปอย่างถูกต้อง ในหัวข้อนี้จะนำเสนอลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ทางสายตัวนำ โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน CISPR 22 (EN 55022) โดยอุปกรณ์ต่างๆมีดังนี้

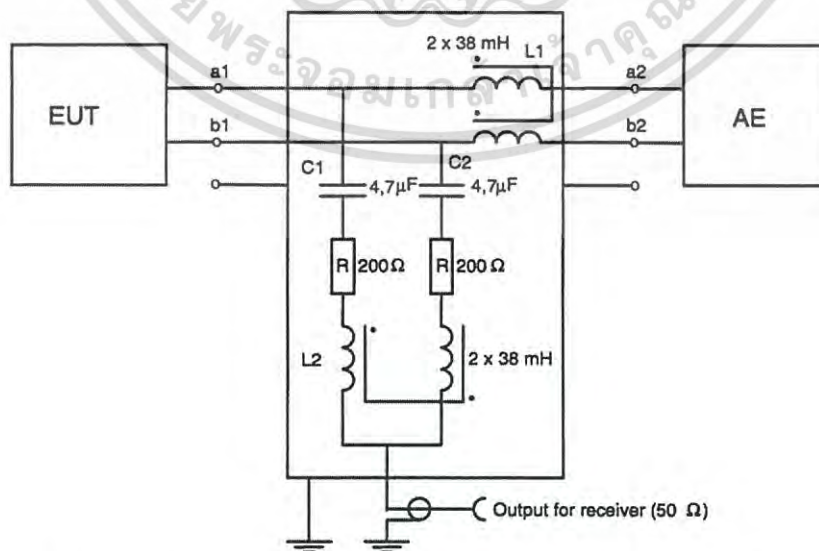
### 2.6.1 โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN)

ในการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้น จำเป็นต้องมีโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilization Network: LISN) หรืออาจจะเรียกว่า Artificial Mains Network (AMN) ซึ่งโดยทั่วไปจะต่ออยู่ระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและตัวทดสอบ (Equipment Under Test: EUT) สาเหตุที่ต้องต่อเครื่องวัดไว้ที่ด้านหน้าของแหล่งจ่ายไฟ เพราะที่ด้านขาออกของแหล่งจ่ายไฟ เป็นเส้นทางหลักของสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ที่จะไปรบกวนวงจรอื่นทางสายตัวนำ และสายที่ต่อจากแหล่งจ่าย จะทำตัวคล้ายกับสายอากาศ แพร่สัญญาณรบกวนออกไปด้วยความถี่ที่ทำการทดลอง หน้าที่หลักๆของ LISN ตามมาตรฐาน CISPR 22 (EN 55022) แบ่งได้เป็น 3 ข้อด้วยกันคือ

1. รักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ระหว่างสายในแต่ละสายของแหล่งจ่ายกับจุดกราวด์อ้างอิงให้คงที่ที่ 50 โอห์มโดยมีตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำ 50 ไมโครเฮนรี่ต่ออยู่ด้วย สำหรับความถี่ตั้งแต่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์โดยที่ 50 โอห์มต่อ 50 ไมโครเฮนรี่ + 5 โอห์มใช้สำหรับ LISN ทั่วไป และ 50 โอห์มต่อ 50 ไมโครเฮนรี่ + 1 โอห์มใช้สำหรับ LISN ที่ใช้ทดสอบในสภาวะกระแสสูงถึง 500 แอมแปร์

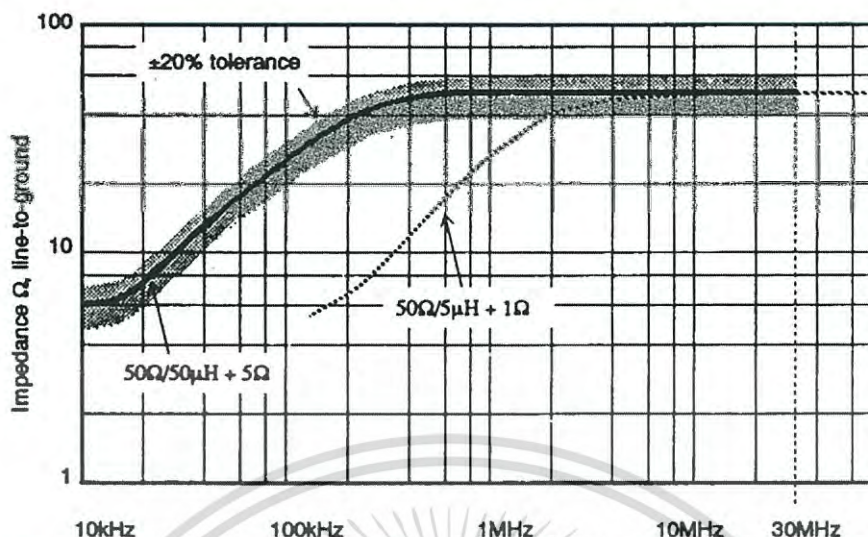
2. แยกสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายตัวนำ ที่ปล่อยออกมาจากเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่อยู่ภายใต้การทดสอบ (Equipment Under Test: EUT) และส่งผ่านสัญญาณรบกวน ไปยังอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI receiver) เพื่อทำการวิเคราะห์

3. ลดทอนสัญญาณรบกวนที่มากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักออกไปได้ โดยไม่ให้เข้าสู่ระบบที่กำลังวัดอยู่ และเพื่อความปลอดภัยในการทดสอบ ควรมีการต่อจุดอ้างอิงของ LISN ลงดิน



รูปที่ 2.21 วงจรสมมูลของวงจรโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (LISN) [7]

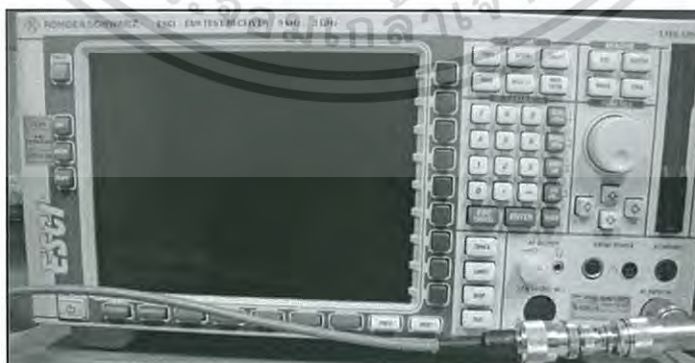
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 การตอบสนองของความต้านทานต่อความถี่ของโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ [7]

### 2.6.2 เครื่องวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI RECEIVER)

เครื่องวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า หรือเครื่องรับสัญญาณรบกวนแสดงดังรูปที่ 2.23 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ สำหรับการวัดสัญญาณรบกวนในตัวนำ หรือจากสายอากาศต่างๆ และสำหรับสัญญาณรบกวนที่มาทางสายอากาศ เครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในการวัดแบบค่ายอดเสมือน (quasi-peak) จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16-1 เครื่องรับสัญญาณแบบค่าเฉลี่ย (average) จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16-1 และจะต้องมี bandwidth 6 เดซิเบล ตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16-1 ส่วนเครื่องรับสัญญาณแบบค่าสูงสุด (peak) จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อ 3 ของ CISPR 16-1 และจะต้องมีแบนวิดท์ 6 เดซิเบล ตามมาตรฐานข้อ 2 ของ CISPR 16-1



รูปที่ 2.23 เครื่องวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI RECEIVER)

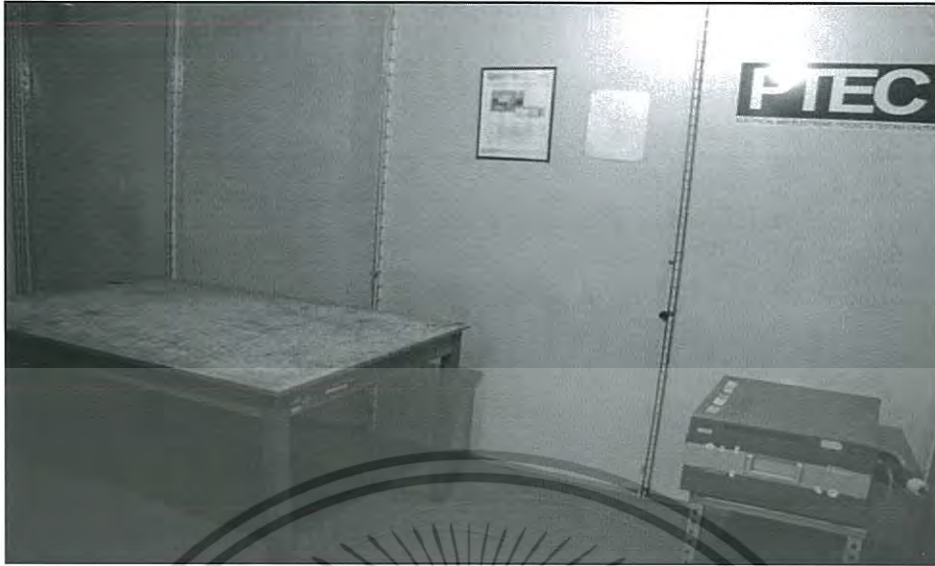
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3 แผ่นกราวด์ (Ground plane)

เมื่อต้องการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ โดยให้อุปกรณ์ที่ต้องการจะวัด (Equipment Under Test: EUT) ตั้งอยู่บนโต๊ะทดลอง จะต้องตั้งให้สูงกว่าแผ่นโลหะที่ใช้ทำเป็นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตร โดยที่แผ่นโลหะจะต้องมีขนาดกว้างและยาวอย่างน้อยด้านละ 2 เมตร และจะต้องตั้งให้ห่างจากแผ่นโลหะอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทดลองอย่างน้อย 0.8 เมตร ถ้าอุปกรณ์ที่ต้องการวัดบรรจุอยู่ในกล่องปิดให้ถือว่าระยะห่างจากแผ่นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตรนี้วัดถึงวัสดุที่ใช้ทำกล่องถ้าอุปกรณ์ที่ต้องการวัดไม่ได้บรรจุอยู่ในกล่องปิดให้ถือว่าระยะห่างจากแผ่นกราวด์อ้างอิง 0.4 เมตรนี้ วัดถึงแนวระดับของแผ่นกราวด์ภายในวงจร แผ่นกราวด์จะต้องวางอยู่ที่พื้นระดับแนวราบใต้โต๊ะที่จะใช้ในการทดลองและต้องทำการยึดแผ่นกราวด์ให้มั่นคง ด้วยวัสดุที่ไม่ได้ทำมาจากโลหะหรืออาจใช้พื้นที่ทำด้วยโลหะแทนแผ่นกราวด์ก็ได้และแผ่นกราวด์ที่ใช้จะต้องมีขอบที่อยู่เลยจากขอบอุปกรณ์ที่ต้องการจะวัด ไม่น้อยกว่า 0.5 เมตรมีขนาดไม่ต่ำกว่า 2x2 ตารางเมตร จุดกราวด์อ้างอิงของ LISN และโครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์จะต้องต่อกับแผ่นกราวด์ด้วยตัวนำโดยให้สายที่ใช้ต่อสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้

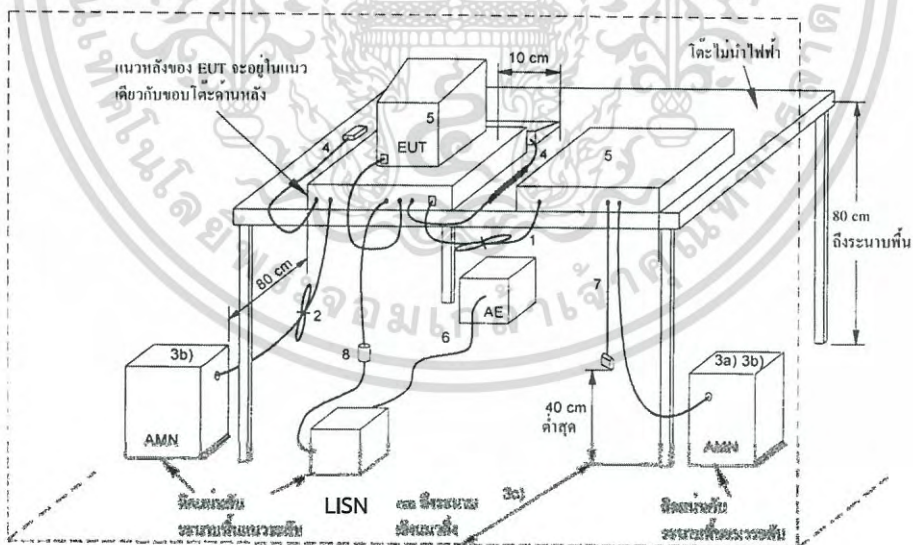
### 2.6.4 ห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielded Room)

ห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นห้องที่ถูกปิดทั้งหกด้าน วัสดุที่ใช้ทำผนังแต่ละด้านเป็นโลหะที่บสามารถป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกเข้าสู่ระบบทดสอบ และกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ที่ถูกทดสอบออกไปรบกวนระบบอื่นๆภายนอก ภายนอกห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกติดตั้งตัวกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (EMI Filter) เพื่อใช้กรองสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งจ่ายไฟภายนอกให้มีระดับต่ำ ก่อนป้อนเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ที่ถูกทดสอบที่ติดตั้งอยู่ในห้อง แสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 วิธีการทดสอบหาระดับสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำภายในห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielded Room)

### 2.6.5 การติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ



รูปที่ 2.25 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำแบบวางอุปกรณ์บนโต๊ะ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AMN: โครงข่ายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าประธานเทียม

AE: บริภัณฑ์ที่เกี่ยวข้อง

EUT: บริภัณฑ์ที่ทดสอบ

LISN: โครงข่ายรักษาเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

ในการวัดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำนั้น จำเป็นต้องมีการจัดวางอุปกรณ์ให้ เป็นไปตามมาตรฐานการวัด ซึ่งในที่นี้จะอ้างอิงตามมาตรฐาน มอก. 1956-2548

1. ถ้าสายเคเบิลที่ห้อยอยู่ใกล้ระนาบพื้นโลหะแนวระดับมากกว่า 40 เซนติเมตร และไม่สามารถ ทำให้สั้นลงจนมีความยาวที่เหมาะสมได้ ส่วนที่เกินจะต้องม้วนทาบให้เป็นมัดที่ความยาว 30 ถึง 40 เซนติเมตร

2. สายไฟหลักที่ยาวเกินต้องม้วนทาบให้เป็นมัดที่กลางสาย หรือทำให้สั้นลงจนมีความยาวที่ เหมาะสม

3. ให้ต่อ EUT เข้ากับ AMN เครื่องหนึ่ง AMN และ LISN ทุกเครื่องจะต้องติดตั้งเข้ากับระนาบ อ้างอิงแนวตั้งหรือผนังโลหะ

3a. หน่วยอื่นทั้งหมดของระบบได้รับกำลังไฟฟ้าจาก AMN เครื่องที่ 2 อาจติดตั้งได้รับสำหรับ การใช้หลายอุปกรณ์

3b. AMN และ LISN ห่างจาก EUT 80 เซนติเมตร และห่างจากอุปกรณ์อื่นๆและแผ่นโลหะอื่น อย่างน้อย 80 เซนติเมตร

3c. ต้องจัดตำแหน่งสายไฟหลักและสายสัญญาณให้อยู่ห่างกันมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ และต้องอยู่ สูงจากระนาบอ้างอิงแนวตั้ง 40 เซนติเมตร

4. สายของอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมในการวัด เช่น คีย์บอร์ด เมาส์ และอื่นๆ ให้วางในลักษณะการใช้งาน ทั่วไป

5. อุปกรณ์รบกวนข้างต้องวางห่างอย่างน้อย 10 เซนติเมตร จากอุปกรณ์อื่นๆและจากตัวควบคุม ยกเว้นจอภาพที่ต้องใช้ในการทดสอบ สามารถวางบนตัวควบคุมได้

6. มีสายสัญญาณเข้า/ออก สำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

7. ที่ปลายสายสัญญาณเข้าออกที่ไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ช่วยสามารถปล่อยลอยเอาไว้ หรืออาจต่อ เข้ากับอิมพีแดนซ์ก็ได้

8. ถ้าใช้โพรบกระแส ต้องวางอยู่ห่างจาก LISN ไม่น้อยกว่า 1 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.6 การพิจารณาผลการแพร่สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางสายตัวนำ

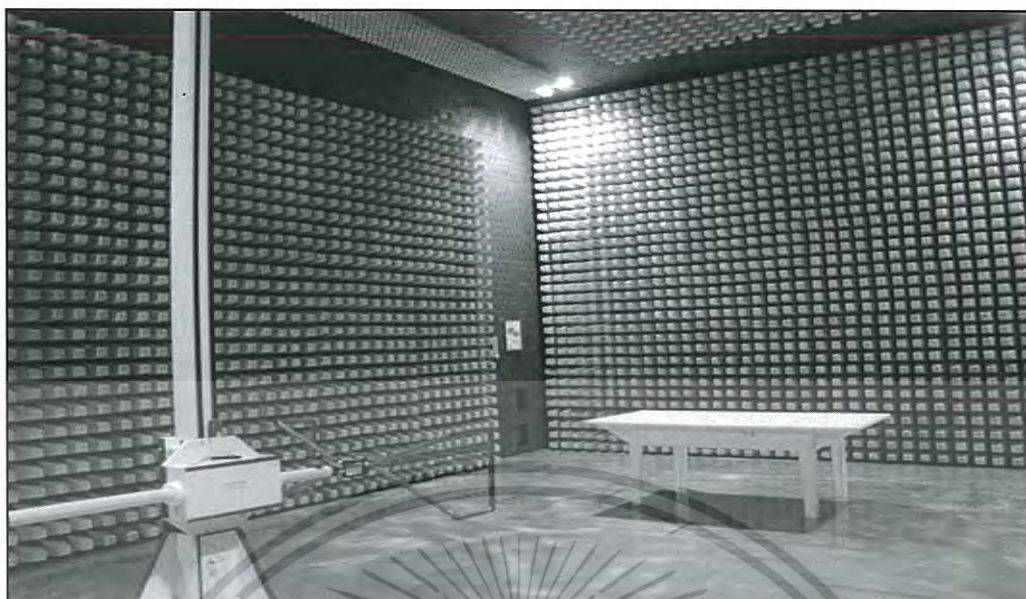
ข้อมูลของการทดสอบการแพร่สัญญาณรบกวนผ่านสายตัวนำ จะเริ่มจากความถี่ 9 KHz ถึง 30 MHz ระดับของสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากผลิตภัณฑ์จะถูกตรวจวัดและแสดงโดยเครื่องรับสัญญาณรบกวน (EMI receiver) โดยมีวงจรที่ถูกใช้ในการวิเคราะห์ผลการวัดที่แตกต่างกันสามแบบ คือ ตัวตรวจวัดแบบค่าสูงสุด (Peak detector) ตัวตรวจวัดแบบควอซีพีค (Quasi-peak detector) และตัวตรวจวัดแบบค่าเฉลี่ย (Average detector)

## 2.7 อุปกรณ์และวิธีการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ทางอากาศ

การทดสอบการแพร่กระจายสัญญาณคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางอากาศ (Radiated EMI Testing) เป็นการทดสอบหาระดับสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ที่แพร่กระจายออกไปในอากาศ โดยมีอากาศเป็นตัวกลางในการส่งผ่าน การทดสอบนี้จะต้องนำอุปกรณ์หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทดสอบไปจัดวางในห้องปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบกึ่งไร้คลื่นสะท้อน (Semi-Anechoic Chamber) ที่มีขนาดระยะทดสอบ 3 เมตร และวัดสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากตัวอุปกรณ์โดยใช้สายอากาศชนิดพิเศษแบบไบ-ล็อก (Bi-log) เป็นตัวรับสัญญาณและแสดงผลการวัดที่ได้ที่เครื่องวัดสัญญาณรบกวนและเทียบผลที่วัดได้กับค่าขีดจำกัดที่ระบุในมาตรฐาน สำหรับการทดสอบในหมวดนี้จะเริ่มทดสอบที่ความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz ซึ่งในการทดสอบการแพร่กระจายสัญญาณคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางอากาศตามมาตรฐานสากลจะใช้โครงสร้างสำคัญของการวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าแตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบ ขนาดของ EUT ราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ ความสะดวกในการใช้งาน เพื่อให้การวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเป็นไปอย่างถูกต้อง ในหัวข้อนี้จะนำเสนอลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน CISPR 22 (EN 55022) ซึ่งพอจะแบ่งโครงสร้างในการทดสอบทาง EMC โดยอุปกรณ์ต่างๆมีดังนี้

### 2.7.1 ห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Semi Anechoic Chamber)

ห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์หรือห้องที่ใช้ปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกสู่ภายนอก และป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าและสัญญาณวิทยุ (RFI) จากภายนอกเข้ามารบกวนอุปกรณ์ภายใต้การทดสอบ ภายในห้องประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.26 ดังนี้



รูปที่ 2.26 ห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้า

- ฉนวนซีลด์ เป็นโลหะซึ่งมีค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กไฟฟ้าสูง ใช้กันสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกเข้าสู่ภายในห้องทดสอบ
- ฉนวนเฟอร์ไรต์ เป็นออกไซด์ของโลหะหลายชนิดใช้ในการดูดซับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสะท้อนภายในห้อง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกดูดซับและไม่มีการสะท้อนในห้อง
- แผ่นโฟมผสมผงเฟอร์ไรต์จะถูกดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำ ภายในห้องไม่ให้เกิดการสะท้อน
- พื้นซึ่งเป็นกราวด์เพลนแบบเรียบใช้ในการสะท้อนสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- สายอากาศใช้ในการรับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งแผ่ออกจากอุปกรณ์ทดสอบ สายอากาศจะถูกติดตั้งอยู่บนเสาอากาศเคลื่อนที่ได้ (Antenna Mast) ความสูง 4 เมตร
- แท่นหมุน เป็นจานโลหะรัศมี 1.5 เมตร ถึง 3 เมตร ใช้ในการวางอุปกรณ์ทดสอบสามารถปรับมุมการหมุนได้ตั้งแต่ 0 องศาถึง 360 องศา เพื่อใช้ในการหาตำแหน่งที่ EUT แผ่สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าออกมามากที่สุด

### 2.7.2 สายอากาศ

การทดสอบหาระดับสัญญาณรบกวนแพร่กระจายผ่านทางอากาศจะใช้สายอากาศ (Antenna) เป็นตัววัดสัญญาณโดยจะรับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกจากผลิตภัณฑ์แล้วแปลงค่าที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้าแล้วป้อนเข้าสู่เครื่องตรวจวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า การทดสอบในหมวดนี้จะเริ่มทดสอบที่ความถี่ตั้งแต่ 30 MHz จนถึง 1 GHz ตามมาตรฐานสากล สายอากาศที่นำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดสัญญาณรบกวนแพร่กระจายผ่านทางอากาศ มีหลายชนิด เช่น สายอากาศแบบ Bi-conical ราค

เอกสาร  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(30-300 MHz) แบบ Log-Periodic (300 MHz – 1GHz) แบบ Bi-Log (30 MHz – 1 GHz) เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.27



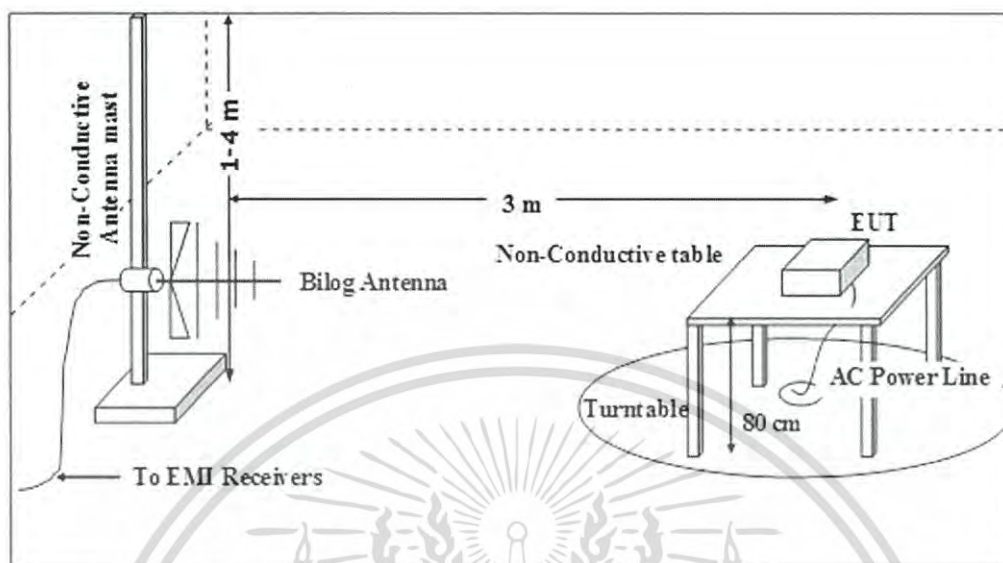
รูปที่ 2.27 สายอากาศที่ใช้ในการวัด โดยแสดงสายอากาศแบบ Bi-conical, Log-Periodic และ Bi-Log ตามลำดับ

### 2.7.3 ระยะเวลาทดสอบการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สำหรับระยะเวลาในการทดสอบหรือการวัดการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Radiated Emission) ของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ถูกกำหนดขึ้นตามสภาวะแวดล้อมการใช้งานจริง เช่น สภาวะแวดล้อมที่เป็นที่อยู่อาศัยจะถูกกำหนดการทดสอบที่ระยะ 3 เมตร เนื่องจากอ้างอิงตามสภาพของที่อยู่อาศัย

ในกรณีที่เป็นอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบมาให้ใช้งานในทางอุตสาหกรรมระยะเวลาในการทดสอบถูกกำหนดเป็น 10 เมตร เนื่องจากอุปกรณ์ในทางอุตสาหกรรมบางอย่างต้องการแหล่งกำเนิดพลังงานมากและสามารถแผ่สัญญาณรบกวนออกมาได้มากเช่นกัน เช่น เครื่องเชื่อมโลหะ เครื่องควบคุมมอเตอร์แบบ 3 เฟส เป็นต้น ในอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบมาให้เป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาโดยเจตนา เช่น เครื่องส่งวิทยุ สายอากาศสำหรับรับส่งสัญญาณ หรืออุปกรณ์ทางการแพทย์และอวกาศบางตัว อาจกำหนดระยะเวลาในการทดสอบเป็น 30 เมตร

## 2.7.4 การติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ



รูปที่ 2.28 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ

## 2.8 มาตรฐานสำหรับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารก่อให้เกิดทั้งผลดี และผลเสียต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น เพื่อช่วยให้ผู้ผลิตและผู้ใช้เครื่องมือสามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างเป็นธรรมชาติ ไม่เกิดปัญหาด้านการใช้งาน มีความปลอดภัย หน่วยงานต่างๆจึงได้กำหนดมาตรฐานสำหรับการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น [3], [4], [19] ดังนี้

### 2.8.1 กฎระเบียบของ FCC (FCC REGULATIONS)

FCC ย่อมาจาก Federal Communications Commission เป็นองค์กรในประเทศสหรัฐอเมริกา ที่ทำการออกกฎข้อบังคับสำหรับอุปกรณ์สื่อสาร (wire and radio communications) ก่อตั้งในปี พ.ศ. 2470 สามารถแบ่งออกได้เป็นสามส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกัน กล่าวคือ Part 15 สำหรับอุปกรณ์ความถี่วิทยุ (radio-frequency devices) Part 18 สำหรับอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และอุปกรณ์ทางการแพทย์ (ISM) และ Part 68 สำหรับอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับระบบโทรศัพท์ (telephone network) สำหรับ Part 15 จะแบ่งมาตรฐานออกเป็นสี่ฉบับ และนิยามความหมายของอุปกรณ์ความถี่วิทยุว่าหมายถึงอุปกรณ์ใดๆก็ตามที่การทำงานก่อให้เกิดการแพร่กระจายพลังงานที่ความถี่วิทยุ (radio-frequency energy) ได้ทั้งทางสาย (conduction) หรือทางอากาศ (radiation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FCC ได้นิยามพลังงานความถี่วิทยุ (Energy in the radio frequency range) ว่าเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ย่านความถี่ (9 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 3000 จิกะเฮิรตซ์) โดยมีจุดประสงค์ ในการออกมาตรฐาน เพื่อกำหนดการทำงานของตัวส่งสัญญาณ (transmitters) ที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำซึ่งไม่ได้รับใบอนุญาตในการติดตั้ง (radio station license) และเพื่อควบคุมสัญญาณรบกวน ที่เกิดจากตัวสินค้าที่จะส่งผลกระทบต่อ การติดต่อสื่อสารด้วยความถี่วิทยุ (radio communications) อุปกรณ์ดิจิทัล (digital electronics) ก็จัดอยู่ในหมวดนี้

### 2.8.2 CISPR

CISPR ซึ่งมาจากคำเต็มในภาษาฝรั่งเศสคือ Comite International Special des Perturbations Radioelectrique ย่อมาจาก (International Special Committee on Radio Interference) เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2476 เพื่อหาวิธีการวัดและขีดจำกัดของการรบกวนในย่านความถี่วิทยุสำหรับนานาชาติ หลายๆประเทศได้นำมาตรฐาน CISPR มาดัดแปลงใช้โดยจัดทำเป็นมาตรฐานบังคับใช้สำหรับแต่ละประเทศ ประเทศไทยได้นำมาตรฐานนี้มาปรับใช้ เช่นมาตรฐานของบริภัณฑ์ส่องสว่าง ได้จากการนำมาตรฐาน CISPR 15 มาดัดแปลงใช้งาน

มาตรฐาน CISPR หลัก เช่น CISPR Publication 22 ถูกกำหนดขึ้นเพื่อการควบคุมสัญญาณรบกวนที่เกี่ยวข้องกับบริภัณฑ์เทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology Equipment) ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์ดิจิทัล (digital electronics) เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2528 หลังจากนั้นหลายๆประเทศได้นำมาตรฐานดังกล่าวมาปรับใช้เป็นมาตรฐานประจำชาติ (national standard) อาทิ ประเทศญี่ปุ่นได้ออกมาตรฐาน VCCI (Voluntary Control Council for Interference by Information Technology Equipment) โดยใช้เส้นขีดจำกัดตาม CISPR Publication 22 เว้นเพียงแต่แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนแก่ตัวถูกทดสอบ (EUT) จะแตกต่างกัน โดยที่ VCCI จะทดสอบที่แรงดันด้านเข้าของตัวถูกทดสอบเท่ากับ 100 โวลต์เป็นต้น

### 2.8.3 มาตรฐานทางการทหาร (Military Standards)

MIL-STD-461B และ MIL-STD-462 เป็นมาตรฐานที่ออก โดยหน่วยทางการทหารของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยที่ MIL-STD-461B กำหนดเส้นขีดจำกัด (Limit) และ MIL-STD-462 จะกำหนดขั้นตอนและวิธีการทดสอบ มาตรฐานดังกล่าว จะมีรายละเอียดและเข้มข้มกว่า FCC เพราะมาตรฐานดังกล่าวพิจารณาถึง “ความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Susceptibility) และย่านความถี่ที่พิจารณาอย่างกว้างกว่าด้วย (30 เฮิรตซ์– 40 จิกะเฮิรตซ์)

### 2.8.4 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)

ในด้านที่เกี่ยวข้องกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยได้มีการนำมาตรฐานนานาชาติ (IEC) มาปรับใช้เป็นมาตรฐานภายในประเทศอย่างเป็นทางการตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 โดยได้มีไม่วารณี่ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำมาปรับปรุงแก้ไข CISPR 15 และ CISPR 22 เป็นมาตรฐานไทยแล้วได้แก่ มอก. 1955-2542 (บริษัทส่งออกสว่างและบริษัทที่คล้ายกัน: ชีตจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ) ซึ่งเป็นมาตรฐานบังคับใช้ และ มอก. 1956-2542 (บริษัทเทคโนโลยีสารสนเทศ: ชีตจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ)

มาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย มีแนวทางและได้นำมาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ของ IEC (International Electro technical Commission) เช่น เทคนิคการทดสอบด้านสิ่งแวล้อม มาใช้โดยออกเป็นประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม โดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ตารางที่ 2.3 แสดงถึงตารางสรุปมาตรฐานกฎระเบียบด้านการแพร่สัญญาณรบกวนของนานาชาติและภูมิภาคที่สำคัญ

สาเหตุสำคัญที่ต้องมีการกำหนดขีดจำกัดและมาตรฐานสำหรับสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำก็เพราะว่า ต้องการจำกัดกระแสสัญญาณรบกวน (Noise current) ที่เกิดจากตัวสินค้าผ่านออกมาทางสายไฟฟ้า (AC power cord) ผ่านเต้ารับและจากนั้นจะรวมกันอยู่เป็นกลุ่มที่จุดรวมสายไฟฟ้า (Common power distribution system) ซึ่งในสภาวะดังกล่าวจะเปรียบเสมือนกับเป็นสายอากาศขนาดใหญ่ (Antenna) เป็นผลทำให้กระแสสัญญาณรบกวนสามารถแพร่กระจายและเกิดการรบกวนต่อระบบโดยรวมได้ ซึ่งการผ่านการทดสอบมาตรฐานที่กำหนด ไม่ได้เป็นการรับประกันว่าสินค้าที่ผ่านการทดสอบนั้นจะไม่ก่อให้เกิดการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า แต่เป็นเพียงแค่การยอมรับหรือจำกัดการสร้างสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของสินค้านั้นให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

### ตารางที่ 2.3 มาตรฐานกฎระเบียบด้านการแพร่สัญญาณรบกวนทางความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

International	USA	European	หัวข้อ/รายการ
CISPR 11	FCC Part18	EN 55011	งานอุตสาหกรรม การทดลองวิทยาศาสตร์และการแพทย์ (Industrial, Scientific and Medical)
CISPR 12	(SAE)		งานยานยนต์ (Auto motives)
CISPR 13	Part 15	EN 55013	ภาครับการกระจายเสียง หรือภาพ (Broadcast Receivers)
CISPR 14		EN 55014	อุปกรณ์เครื่องใช้ภายในบ้าน (Household Appliances/tools)
CISPR 15		EN 55015	หลอดไฟส่องสว่าง หรือแสงฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent lights/luminaries)
CISPR 16			อุปกรณ์การวัด (Measurement apparatus/methods)
CISPR 22	Part 15	EN 55022	บริภัณฑ์เทคโนโลยีสารสนเทศ (Information technology equipment)
		EN 55081-1,2	มาตรฐานการแพร่สัญญาณทั่วไป (Generic emissions standards)

\*\*การทดลองในรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้จะใช้มาตรฐาน EN 55022 Class B เป็นตัวอ้างอิง\*\*

#### 2.8.5 มาตรฐาน EN 55022 Information technology equipment (ITE)

มาตรฐานนี้จะพิจารณาในช่วงความถี่วิทยุ 9กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 400 จิกะเฮิร์ตซ์ โดยแบ่งออกเป็น 2 class ด้วยกันคือ

Class A ได้รับการออกแบบเพื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ไม่ใช่บ้าน/ที่พักอาศัย นอกจากนี้ยังอาจใช้ผลิตภัณฑ์ Class A ภายในบ้าน/ที่พักอาศัยได้ แต่อาจก่อให้เกิดการรบกวนและผู้ใช้ต้องดำเนินการแก้ไขที่เพียงพอ

Class B ได้รับการออกแบบเพื่อใช้งานภายในบ้าน/ที่พักอาศัย แต่อาจถูกใช้ในสภาพแวดล้อมที่ไม่ใช่บ้าน/ที่พักอาศัยได้เช่นกัน โดยสภาพแวดล้อมภายในบ้าน/ที่พักอาศัยเป็นสภาพแวดล้อมที่มีการใช้เครื่องรับสัญญาณวิทยุและโทรทัศน์ในระยะห่าง 10 เมตรจากตำแหน่งที่ผลิตภัณฑ์นี้ถูกใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

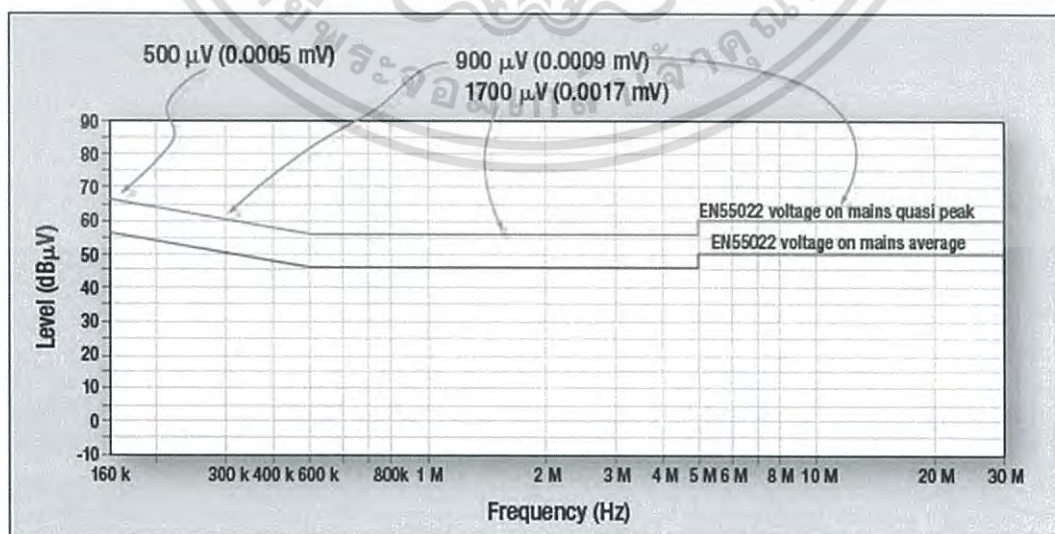
ขีดจำกัด (Limit) การแพร่กระจายผ่านสายตัวนำ (Conducted Emission) ตามมาตรฐาน EN55022 Class B แสดงดังรูปที่ 2.29 และมีข้อมูลเส้นขีดจำกัด (Limit) Class A และ Class B ดังตารางที่ 2.2 และ 2.3ตามลำดับ ดังนี้

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลเส้นขีดจำกัด (Limit) ตามมาตรฐาน EN55022 Class A ที่แพร่กระจายผ่านสายตัวนำ (Conducted Emission)

Frequency range MHz	Limits dB( $\mu$ V)	
	Quasi-peak	Average
150-500kHz	79	66
500k-30MHz	73	50

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลเส้นขีดจำกัด (Limit) ตามมาตรฐาน EN55022 Class B ที่แพร่กระจายผ่านสายตัวนำ (Conducted Emission)

Frequency range MHz	Limits dB( $\mu$ V)	
	Quasi-peak	Average
150-500kHz	66 ถึง 56	56 ถึง 46
500k-5MHz	56	46
5-30MHz	60	50



รูปที่ 2.29 ขีดจำกัดการกระจายผ่านสายตัวนำตามมาตรฐาน EN 55022 Class B  
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขีดจำกัด (Limit) การแพร่กระจายทางอากาศ (Radiated Emission) ตามมาตรฐาน CISPR และ FCC แสดงดังรูปที่ 2.30 และมีข้อมูลเส้นขีดจำกัด (Limit) Class A และ Class B ที่ระยะทดสอบ 10 เมตร ดังตารางที่ 2.2 ดังนี้ ซึ่งจะประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ 2 Class คือ

Class A คือ ขีดจำกัดสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Industrial use)

Class B สำหรับใช้ในที่อยู่อาศัย (Residence use)

ขีดจำกัดกำหนดของ Class A จะกำหนดให้สัญญาณรบกวนได้สูงกว่าในที่อยู่อาศัยเนื่องจากแนวความคิดที่ว่า เครื่องจักรและคนที่อยู่ในอุตสาหกรรมเป็นคนวัยทำงานมีความแข็งแรงสูงกว่าในที่อยู่อาศัยและผลิตภัณฑ์ คนในที่อยู่อาศัยและมาตรฐาน CISPR กำหนดเกณฑ์ให้สัญญาณรบกวนได้น้อยกว่า FCC

ตารางที่ 2.6 ข้อมูลเส้นขีดจำกัด (Limit) ตามมาตรฐาน EN55022 Class A ที่แพร่กระจายผ่านทางอากาศ (Radiated Emission) ระยะทดสอบ 10 เมตร

Frequency range MHz	Quasi-peak dB( $\mu$ V/m)
30-300MHz	40
300MHz-1GHz	47

ตารางที่ 2.7 ข้อมูลเส้นขีดจำกัด (Limit) ตามมาตรฐาน EN55022 Class B ที่แพร่กระจายผ่านทางอากาศ (Radiated Emission) ระยะทดสอบ 10 เมตร

Frequency range MHz	Quasi-peak dB( $\mu$ V/m)
30-300MHz	30
300MHz-1GHz	37

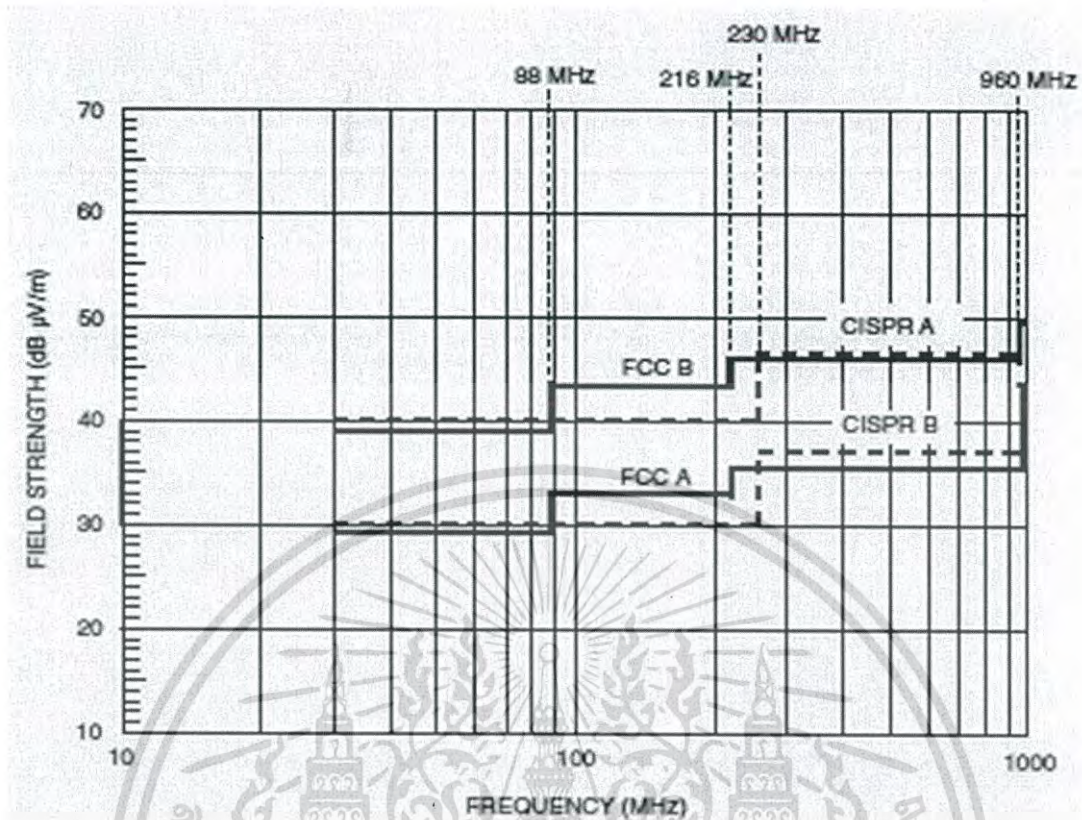
ตารางที่ 2.8 ข้อมูลเส้นขีดจำกัด (Limit) ตามมาตรฐาน FCC Class A ที่แพร่กระจายผ่านทางอากาศ (Radiated Emission) ระยะทดสอบ 10 เมตร

Frequency range MHz	Quasi-peak dB( $\mu$ V/m)
30-88MHz	40
88-216MHz	43
216-960MHz	46
300MHz-1GHz	53

ตารางที่ 2.9 ข้อมูลเส้นขีดจำกัด (Limit) ตามมาตรฐาน FCC Class B ที่แพร่กระจายผ่านทางอากาศ (Radiated Emission) ระยะทดสอบ 10 เมตร

Frequency range MHz	Quasi-peak dB( $\mu$ V/m)
30-88MHz	30
88-216MHz	33
216-960MHz	36
300MHz-1GHz	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 ขีดจำกัดการกระจายทางอากาศตามมาตรฐาน CISPR และ FCC Class A และ Class B

[5]

## 2.9 โปรแกรม COMSOL

โปรแกรม COMSOL นี้เป็นโปรแกรมซอฟต์แวร์ที่มีประสิทธิภาพ ใช้สร้างแบบจำลองและการแก้ไขปัญหา สำหรับนักวิจัย วิศวกรและคนอื่นที่สนใจ เพื่อสำรวจพฤติกรรมของโครงสร้างอุปกรณ์ทางกายภาพที่แตกต่างกันก่อนที่จะไปทดสอบในห้องปฏิบัติการจริง โปรแกรมนี้สร้างขึ้นภายในบริษัทของโลกทางกายภาพ (ฟิสิกส์ประยุกต์) เช่น Ohm's law และ Joule's law ซึ่งเป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ เช่นการแก้ไขปัญหามาจากการสร้างแบบจำลอง สมมติฐาน ค่าสัมประสิทธิ์วัสดุ ให้ใกล้เคียงกับค่าความเป็นจริงมากที่สุด โดยมีการจำลองหลายรูปแบบ เช่น AC/DC, Acoustics, Chemical Engineering, Earth Science, Heat Transfer, MEMS, RF และโครงสร้างกลศาสตร์ เป็นต้น ประโยชน์หลักที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์และ การวิเคราะห์ก็คือผู้สร้างแบบจำลองสามารถลองวิธีการต่างๆในการแก้ปัญหาได้หลายวิธีของปัญหาเดียวกันเท่าที่จำเป็นเพื่อให้ถูกต้อง (หรือน้อยใกล้เคียงค่าความเป็นจริงมากที่สุด) นอกจากนี้ยังสามารถใช้ผลการทดสอบอุปกรณ์ทางกายภาพเพื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของรูปแบบต่างๆ เหมาะกับการแก้ปัญหาขั้นตอนสุดท้ายอย่างรวดเร็วกว่าการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ ในโปรแกรม COMSOL นี้มีข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุประมาณ 2,500 รายการ รวมทั้งองค์ประกอบแร่ธาตุ, ดิน, โลหะผสม, ออกไซด์, เหล็ก, ฉนวนความร้อน, เซมิคอนดักเตอร์

นอกจากนี้ยังสามารถใช้ผลการทดสอบอุปกรณ์ทางกายภาพเพื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของรูปแบบต่างๆ เหมาะกับการแก้ปัญหาขั้นตอนสุดท้ายอย่างรวดเร็วกว่าการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ ในโปรแกรม COMSOL นี้มีข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุประมาณ 2,500 รายการ รวมทั้งองค์ประกอบแร่ธาตุ, ดิน, โลหะผสม, ออกไซด์, เหล็ก, ฉนวนความร้อน, เซมิคอนดักเตอร์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตอร์และวัสดุอุปกรณ์ วัสดุแต่ละชนิดสามารถมีคุณสมบัติได้ถึง 27 คุณสมบัติ แต่ละคุณสมบัติที่กำหนดไว้สามารถใช้ได้ตามอนุภูมิ แต่ละคุณสมบัติที่กำหนดเหล่านี้เชื่อมโยงกับอนุภูมิของการวัดและความถี่ของการวัด และยังมีสมการเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพที่ใช้ในการจำลองการแพร่กระจายคลื่นได้หลากหลาย เช่น คลื่นกายภาพในของเหลว คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถจำลองได้ทั้งแบบ 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ สามารถแสดงค่าสนามไฟฟ้าแบบแผ่น แบบเส้นขอบเขต และแบบจุดบนพื้นผิววัสดุที่จำลองได้ เทคนิคการสร้างแบบจำลองสามารถประยุกต์ใช้กับทางด้านวิทยาศาสตร์ได้ไปจนถึงการศึกษาด้านชีวการแพทย์และทางด้านวิศวกรรม การวัดและการออกแบบอีกด้วย [36]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การศึกษาและออกแบบอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูง

ในบทนี้เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาและออกแบบอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูง โดยการนำอุปกรณ์สวิตชิงที่ขายตามท้องตลาดที่ยังไม่ได้มีการทดสอบสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้งานร่วมกับชุดจูนเนอร์วิทยุ FM เพื่อจำลองระบบสื่อสารที่มีการใช้งานในชีวิตประจำวัน เช่น ระบบสื่อสารในรถไฟฟ้า BTS, MRT และทางด้านการบิน เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์สวิตชิงที่ได้มีการออกแบบและศึกษาการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำและทางอากาศของอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูงแล้ว และทำการวิเคราะห์ผลการทดลองต่างๆที่มีผลกระทบต่ออุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูง

การติดตั้งอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูงมี 3 ส่วน ดังนี้

- 1) ชุดอุปกรณ์สวิตชิง (Switching Devices)
- 2) ชุดควบคุมแรงดัน (Regulator)
- 3) ชุดจูนเนอร์วิทยุ FM (Tuner Kit)

#### 3.1 ชุดอุปกรณ์สวิตชิง (Switching Devices)

เป็นชุดแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (220Vac) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (12Vdc) ซึ่งเป็นชุดอุปกรณ์สวิตชิงที่สามารถซื้อตามตลาดได้ทั่วไปดังรูปที่ 3.1 และได้มีการออกแบบวงจรชุดอุปกรณ์สวิตชิงดังรูปที่ 3.2 ถึงรูปที่ 3.4 ขึ้นมาใหม่เพื่อใช้ศึกษางานวิจัยในด้านความเข้ากันได้ทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC)

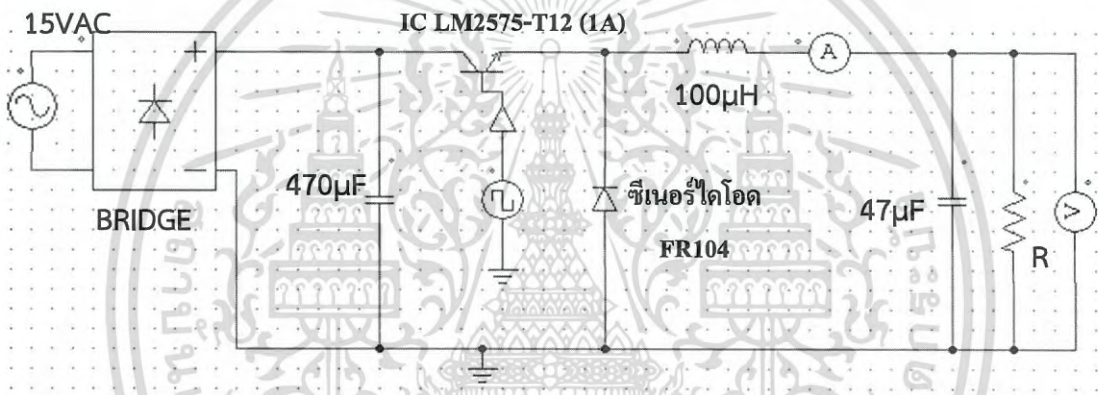
รายการอุปกรณ์ของชุดอุปกรณ์สวิตชิง (Switching Devices) ที่ได้มีการออกแบบ

- SINGLE- PHASE BRIDGE RECTIFIER (W04M) V=50-1000V, I=1.5A
- ตัวเก็บประจุอิเล็กโทรลิติก C1 = 47 $\mu$ F 50V  
C2 = 470 $\mu$ F 50V
- ตัวเหนี่ยวนำ L = 100 $\mu$ H
- ซีเนอโรไดโอด FR104
- ไอซี IC = IC LM2575-T12 (1A) Step-Down Switching Regulator (buck converter)

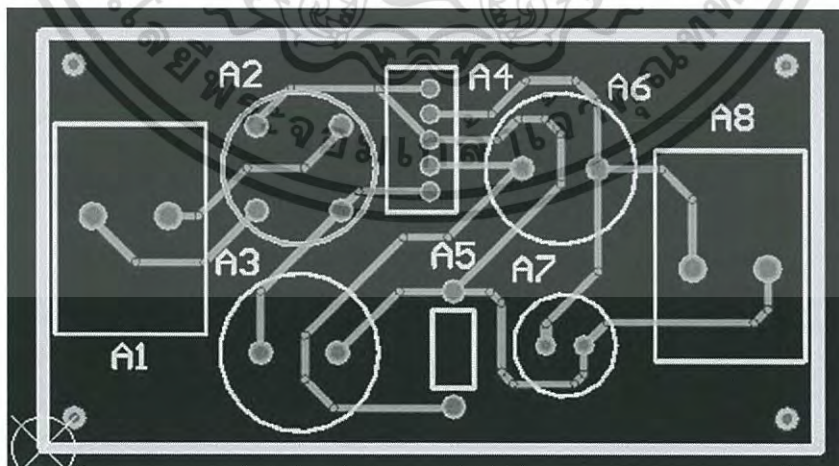
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์สวิตซิ่งที่ซื้อตามตลาดทั่วไป

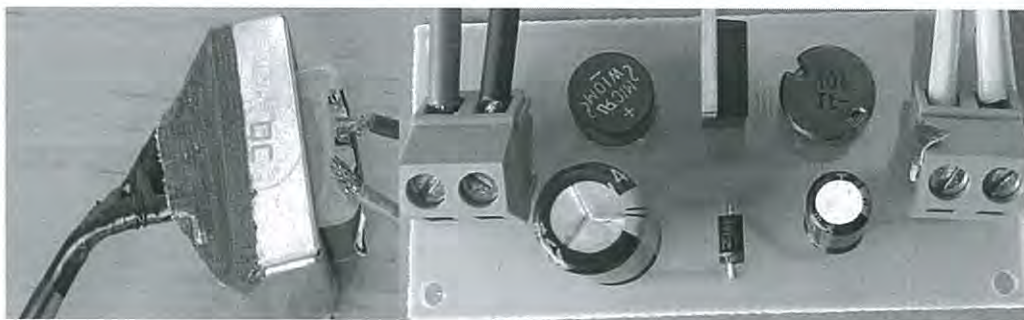


รูปที่ 3.2 รูปวงจรชุดอุปกรณ์สวิตซิ่งที่ได้มีการออกแบบ



รูปที่ 3.3 รูปวงจรชุดอุปกรณ์สวิตซิ่งใน PCB ที่ได้มีการออกแบบ

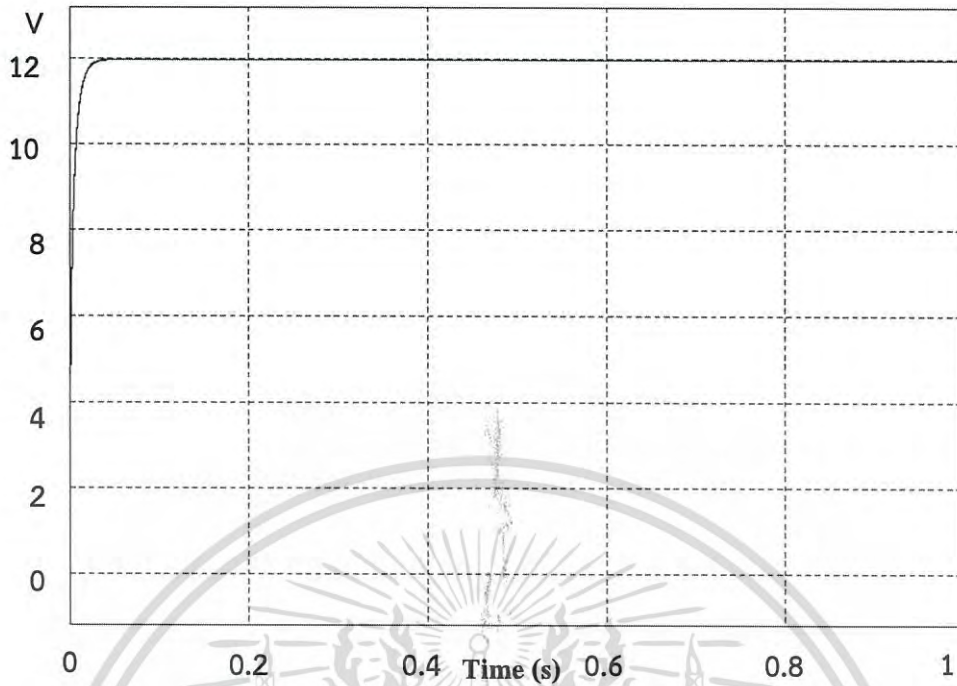
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



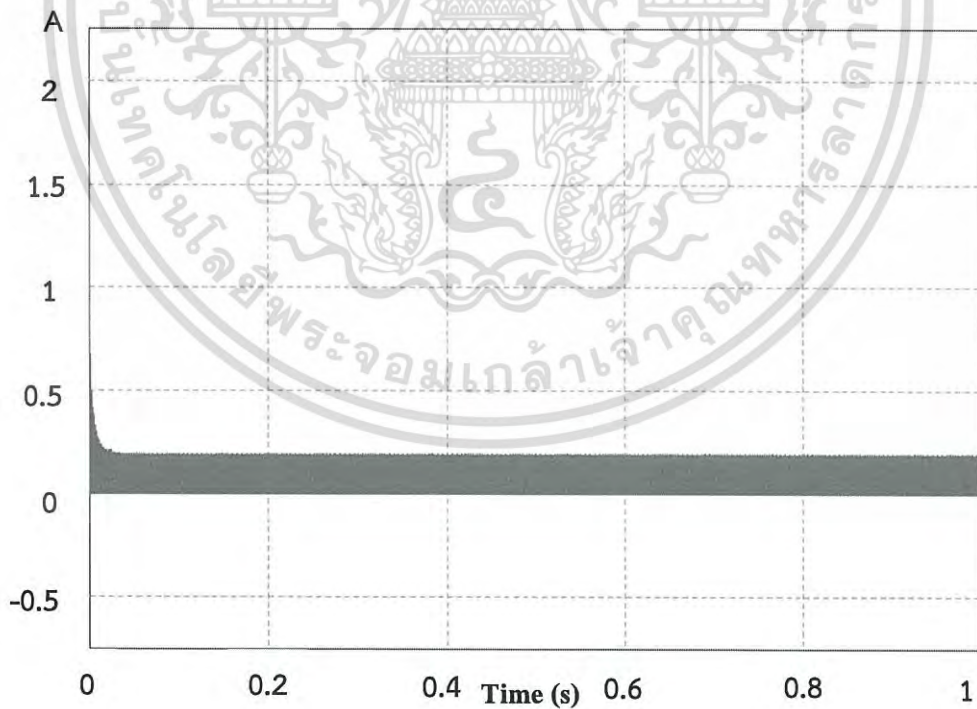
รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งได้มีการออกแบบ

การออกแบบชุดอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งมีดังนี้ เลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้า โดยแปลงไฟจาก 220Vac เป็น 15Vac เพื่อเข้าวงจรที่ออกแบบในโปรแกรม Altium Designer และได้เลือกใช้ไอซี LM2575-T12 (1A) ในการออกแบบวงจรสวิตซ์ 12Vdc ซึ่งเป็นอุปกรณ์แปลงโวลต์ให้ต่ำลง (Step Down Voltage Regulator) ออกแบบให้มีขนาดเล็ก ข้อดีของไอซี LM2575-T12 (1A) คือใช้ได้กับโวลต์นำเข้า (Input Voltage) ได้สูงโดยไม่ต้องมีตัวระบายความร้อน (Heat Sink) และชุดอุปกรณ์สวิตซ์เป็นวงจรที่มีการใช้อุปกรณ์น้อยในการสร้าง ประหยัดเวลา ลดต้นทุน และวงจรเล็กกะทัดรัดเหมาะกับการใช้งานกับชุดจูนเนอร์วิทยุ FM ที่ใช้ในการศึกษาทำวิจัย เมื่อออกแบบวงจรเสร็จก็ทำการจำลองวงจรในโปรแกรม Psim เพื่อดูว่าค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 12Vdc ดังรูปที่ 3.5 และค่ากระแสไฟฟ้าขาออกไม่เกิน 1A ดังรูปที่ 3.6 ตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ และทำการ Simulation วงจรในโปรแกรม COMSOL แบบ 2 มิติ เพื่อดูว่าค่าสนามไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้น โดยดูค่าแบบจุดและแบบเส้นขอบเขตของวงจรชุดอุปกรณ์สวิตซ์ที่ได้ออกแบบไว้ว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด เมื่อจำลองใส่ค่าแรงดันไฟฟ้าในอุปกรณ์แต่ละตัวเข้าไป มีดังนี้ SINGLE- PHASE BRIDGE RECTIFIER, C2 = 470 $\mu$ F, IC LM2575-T12 ใส่ค่าแรงดันไฟฟ้า 21VDC เพราะประมาณค่าเอาท์พุทจากวงจร SINGLE- PHASE BRIDGE RECTIFIER ได้  $V_P = 1.414 \text{ VAC}$  (โดย  $V_{AC} = 15\text{V}$  ดังนั้น ค่า  $V_P = 21\text{VDC}$ ) และ C1 = 47 $\mu$ F, L = 100 $\mu$ H, ซีเนอร์ไดโอด FR104 ใส่ค่าแรงดันไฟฟ้า 12VDC เพราะเราต้องการเอาท์พุท 12VDC ซึ่งจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.7 ถึง ดังรูปที่ 3.12 และลองสลับตำแหน่งการจัดวางของอุปกรณ์ใหม่ เพื่อดูว่ามีค่าต่างต่างกันมากน้อยเพียงใดด้วย แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.13 ถึง ดังรูปที่ 3.18 ตามลำดับ จากผลการจำลองของวงจรที่ออกแบบและลองสลับตำแหน่งการจัดวางของอุปกรณ์ใหม่นั้น มีค่าสนามไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงเลือกใช้วงจรที่ออกแบบไว้ เพื่อที่จะไม่ต้องเสียเวลาในการทำวงจรหลายๆครั้ง ประหยัดค่าใช้จ่ายในการทำชุดอุปกรณ์สวิตซ์และในการทดลองจริงได้มาก จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด เมื่อได้ค่าถูกต้องแล้วก็ทำการปริ้นแผ่น PCB เพื่อที่จะประกอบอุปกรณ์ลงในแผ่น PCB แล้วนำไปต่อกับชุดควบคุมแรงดันและชุดจูนเนอร์วิทยุ FM พร้อมทั้งจะไปทดสอบวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งทางสายตัวนำ (ความถี่ต่ำ) และทางอากาศ (ความถี่สูง) ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

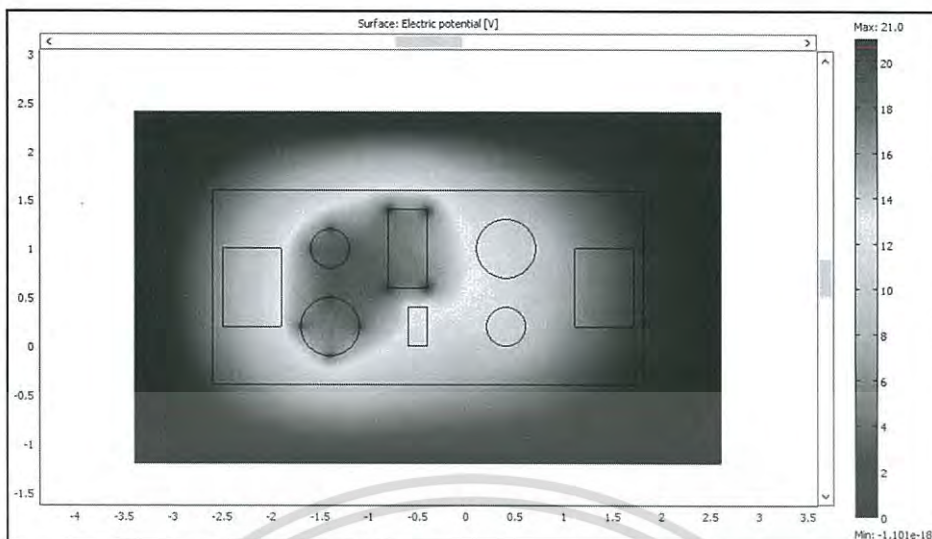


รูปที่ 3.5 ผลจำลองวงจรในโปรแกรม Psim ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 12 Vdc



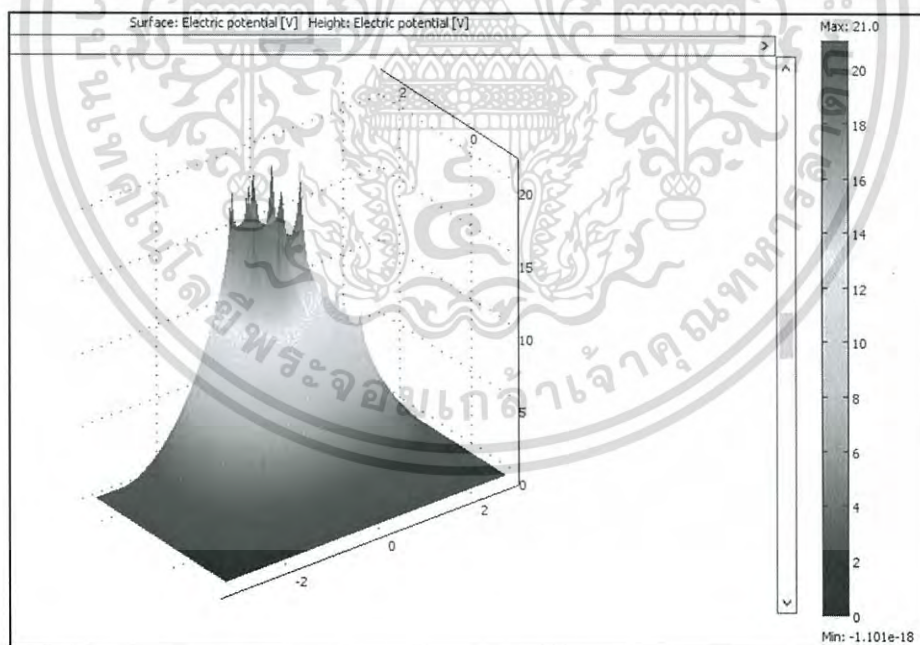
รูปที่ 3.6 ผลจำลองวงจรในโปรแกรม Psim ค่ากระแสไฟฟ้าขาออกไม่เกิน 1 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



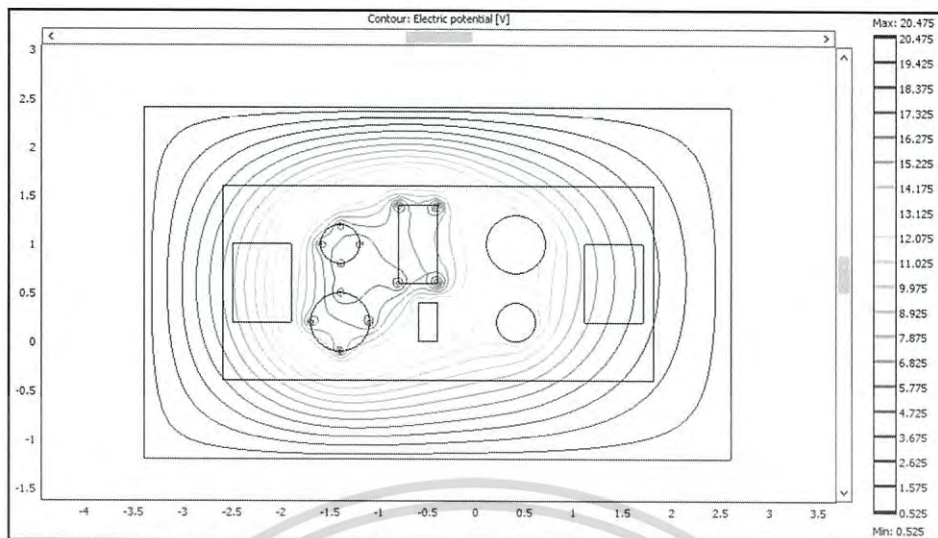
รูปที่ 3.7 ผลจำลองวงจรที่ออกแบบในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้าแบบจุดบนพื้นผิว

สังเกตว่าการจำลองค่าสนามไฟฟ้าแบบจุดบนพื้นผิวนี้นี้ มีค่าสนามไฟฟ้าเป็นจุดตรงมุม 4 มุม ของอุปกรณ์ที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าเป็น 21 VDC เยอะสุด (สีแดง คือ ค่าสนามไฟฟ้าที่มากที่สุด, สีน้ำเงิน คือ ค่าสนามไฟฟ้าที่น้อยสุด) ส่วนอุปกรณ์ที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าเป็น 12 VDC นั้นค่าสนามไฟฟ้าไม่เยอะมาก



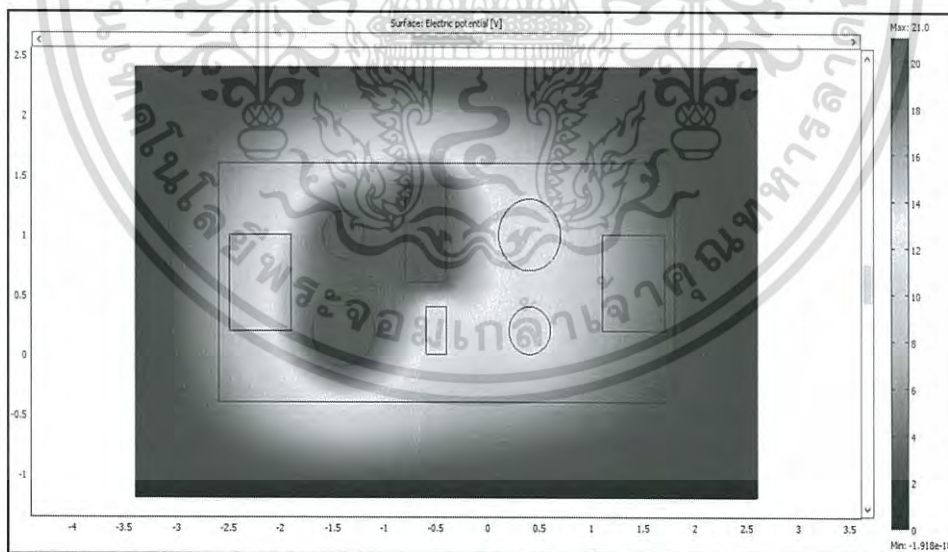
รูปที่ 3.8 ผลจำลองวงจรที่ออกแบบในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้าแบบจุดบนพื้นผิวเป็นแบบมิติ

สังเกตว่าการจำลองค่าสนามไฟฟ้าแบบจุดบนพื้นผิวเป็นมิตินี้ จะเหมือนกับการจำลองค่าสนามไฟฟ้าแบบจุดบนพื้นผิว แต่จะมองภาพได้ง่ายและเห็นได้ชัดเจนกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ผลจำลองวงจรที่ออกแบบในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้าแบบจุด (เส้นแสดงรูปร่าง)

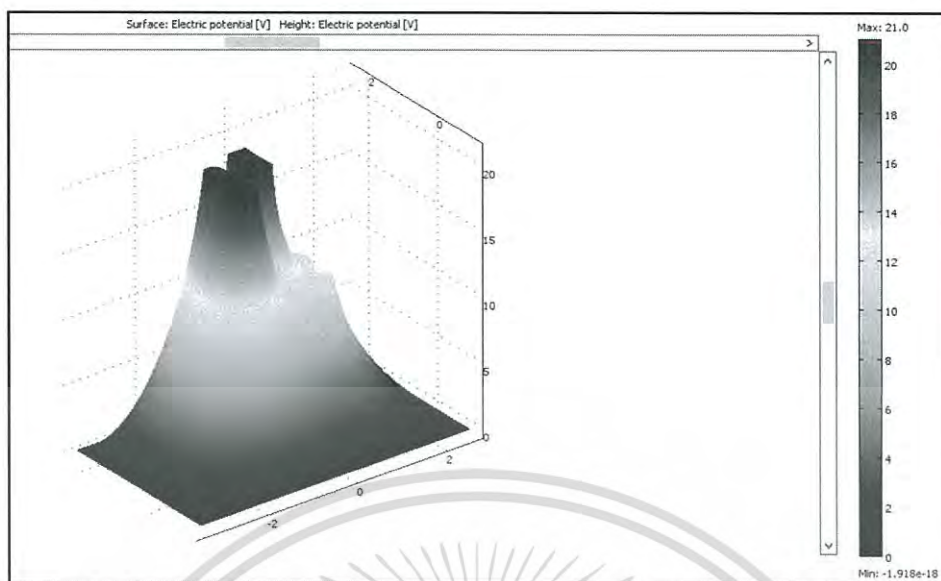
สังเกตว่าการจำลองค่าสนามไฟฟ้าแบบจุด (เส้นแสดงรูปร่าง)นี้ จะเหมือนกับการจำลองค่าสนามไฟฟ้าแบบจุดบนพื้นผิว แต่จะมองภาพเป็นเส้นเหมือนลายน้ำ



รูปที่ 3.10 ผลจำลองวงจรที่ออกแบบในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้าแบบเส้นขอบเขตบนพื้นผิว

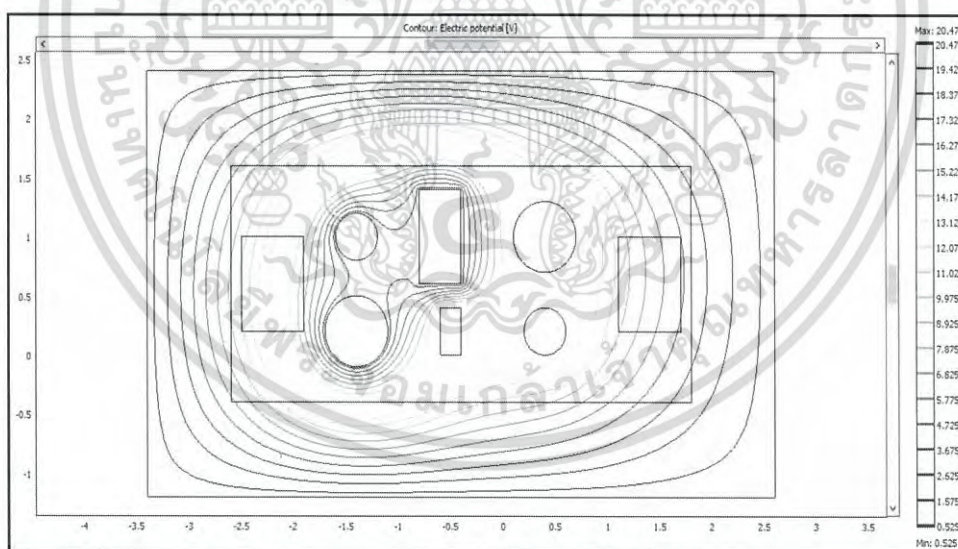
สังเกตว่าการจำลองค่าสนามไฟฟ้าแบบเส้นขอบเขตบนพื้นผิวนี้นี้ มีค่าสนามไฟฟ้าหนาที่มากกว่าแบบจุด เพราะว่าค่าสนามไฟฟ้านั้นออกมาจากเส้นขอบเขตของอุปกรณ์ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



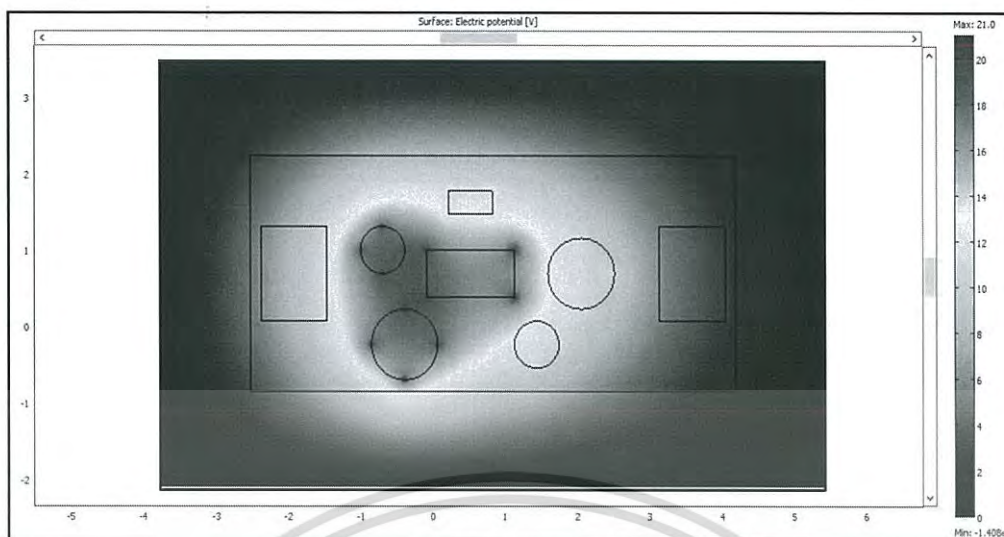
รูปที่ 3.11 ผลจำลองวงจรที่ออกแบบในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้าแบบเส้นขอบเขตบนพื้นผิวเป็นแบบมิติ

สังเกตว่าการจำลองค่าสนามไฟฟ้าแบบเส้นขอบเขตบนพื้นผิวเป็นแบบมิตินี้ จะเหมือนกับการจำลองค่าสนามไฟฟ้าแบบจุดบนพื้นผิวเป็นมิติ แต่มีค่าสนามไฟฟ้าหนาที่มากกว่าแบบจุด

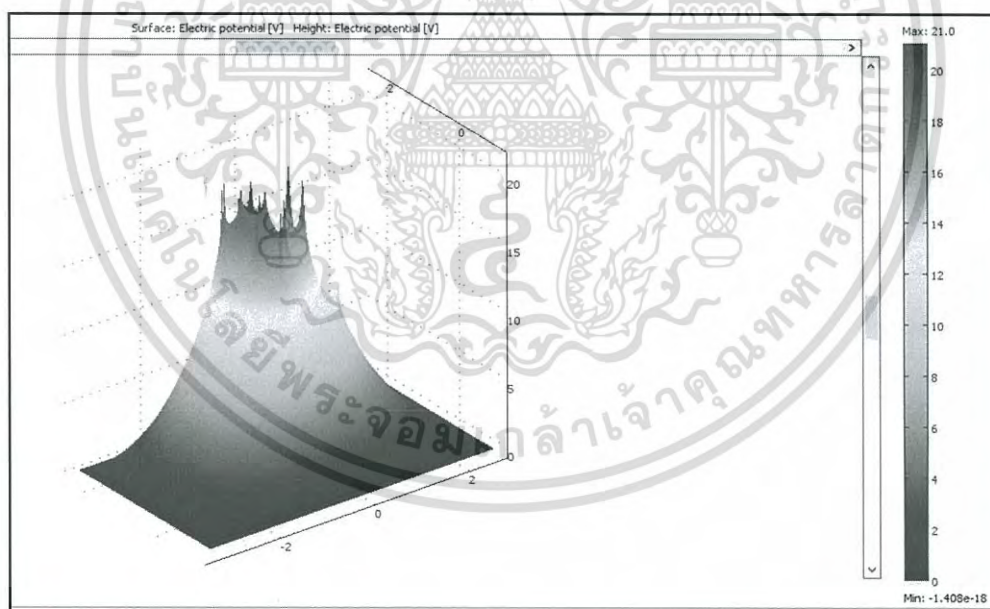


รูปที่ 3.12 ผลจำลองวงจรที่ออกแบบในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้าแบบเส้นขอบเขต (เส้นแสดงรูปร่าง)

สังเกตว่าการจำลองค่าสนามไฟฟ้าแบบเส้นขอบเขต (เส้นแสดงรูปร่าง) นี้ จะเหมือนกับการจำลองค่าสนามไฟฟ้าแบบจุดบนพื้นผิว (เส้นแสดงรูปร่าง) แต่มีค่าสนามไฟฟ้าเป็นเส้นเหมือนสายน้ำเอกสมมากกว่าแบบจุดที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

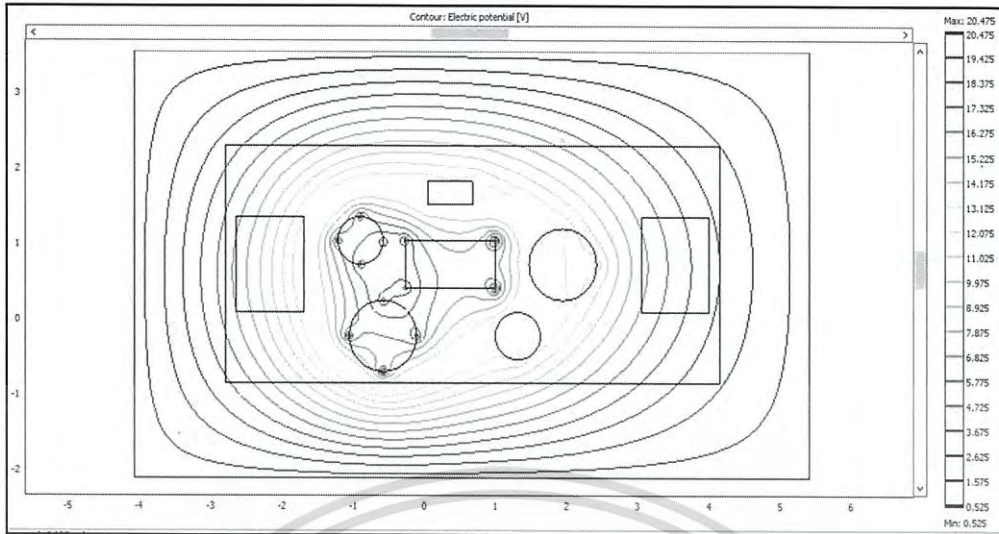


รูปที่ 3.13 ผลจำลองวงจรที่สลับตำแหน่งการจัดวางของอุปกรณ์ใหม่ในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้าแบบจุดบนพื้นผิว



รูปที่ 3.14 ผลจำลองวงจรที่สลับตำแหน่งการจัดวางของอุปกรณ์ใหม่ในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้าแบบจุดบนพื้นผิวเป็นแบบมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

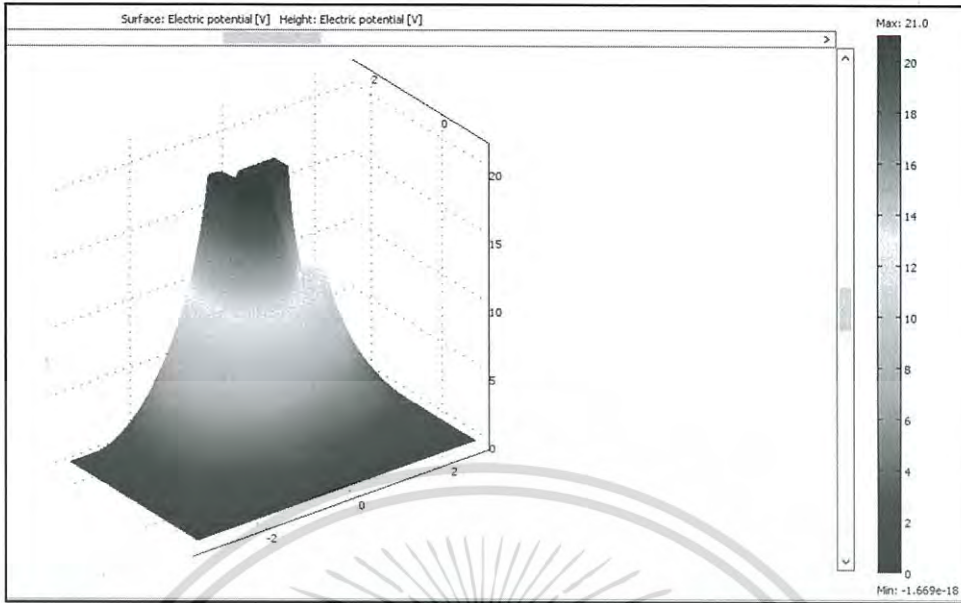


รูปที่ 3.15 ผลจำลองวงจรที่สลับตำแหน่งการจัดวางของอุปกรณ์ใหม่ ในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้าแบบจุด (เส้นแสดงรูปร่าง)

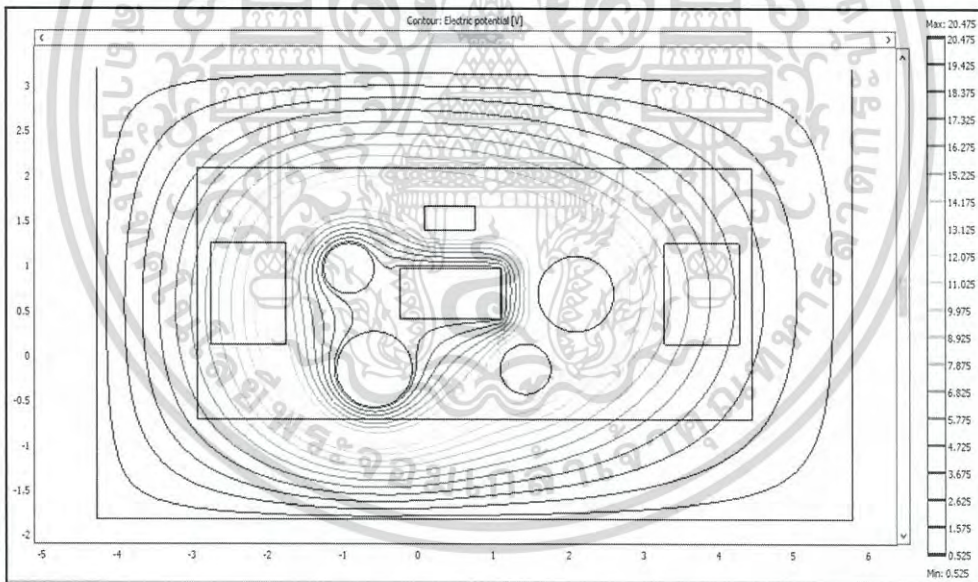


รูปที่ 3.16 ผลจำลองวงจรที่สลับตำแหน่งการจัดวางของอุปกรณ์ใหม่ในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้าแบบเส้นขอบเขตบนพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ผลจำลองวงจรที่สลับตำแหน่งการจัดวางของอุปกรณ์ใหม่ในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้าแบบเส้นขอบเขตบนพื้นผิวเป็นแบบมิติ



รูปที่ 3.18 ผลจำลองวงจรที่สลับตำแหน่งการจัดวางของอุปกรณ์ใหม่ในโปรแกรม COMSOL ค่าสนามไฟฟ้าแบบเส้นขอบเขต (เส้นแสดงรูปร่าง)

สรุปวงจรที่ออกแบบนั้นมีค่าสนามไฟฟ้ากระจายได้ดีกว่า เนื่องจากอุปกรณ์ที่จัดวางเหมาะสมกว่า วงจรที่สลับตำแหน่งการจัดวางของอุปกรณ์ใหม่ เพราะว่าถ้าวางอุปกรณ์ใกล้กันมากสนามไฟฟ้าก็จะเยอะและทำให้อุปกรณ์แต่ตัวกระจายความร้อนได้ไม่ดี

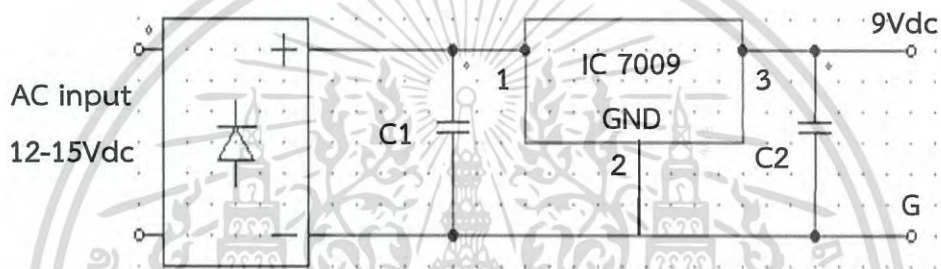
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ชุดควบคุมแรงดัน (Regulator)

เป็นชุดควบคุมแรงดัน มีไอซีสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 1.5A โดยจ่ายแรงดันอินพุทเท่ากับ 12Vdc จากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง จะให้แรงดันเข้าพุทเท่ากับ 9Vdc เพื่อเข้ากับชุดจูนเนอร์วิทยุ FM

รายการอุปกรณ์ของชุดควบคุมแรงดัน (Regulator)

- ไดโอด D1-D4 = 1N4001
- ตัวเก็บประจุอิเล็กโทรลิติก C1 = 470 $\mu$ F 35V  
C2 = 470 $\mu$ F 25V
- ไอซี IC = IC7009



รูปที่ 3.19 รูปวงจรชุดควบคุมแรงดัน (Regulator)



รูปที่ 3.20 ชุดควบคุมแรงดัน (Regulator)

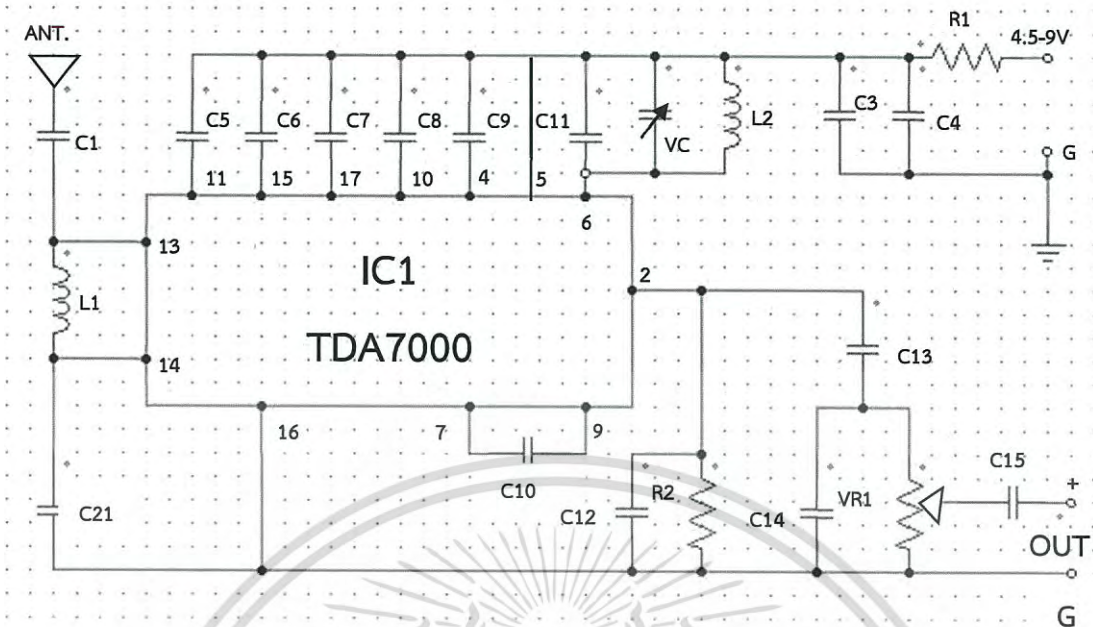
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ชุดจูนเนอร์วิทยุ FM (Tuner Kit)

จูนเนอร์ (TUNER) คือเครื่องรับวิทยุซึ่งมีหน้าที่รับสัญญาณที่สถานีวิทยุส่งคลื่นออกอากาศออกมา การต่อให้นำจุด OUT ไปต่อเข้ากับลำโพง แต่ในงานวิจัยนี้ใช้โหลด R (ตัวต้านทานเซรามิกส์) 10W 5Ω แทนเพื่อไม่ให้มีเสียงดัง โดยจ่ายไฟเข้าวงจร ซึ่งวงจรนี้ใช้ไฟได้ตั้งแต่ 4.5 - 9Vdc ปรับ VR1 ในตำแหน่งแรงสุด และค่ากระแสสูงสุดประมาณ 10 mA ส่วนการทำงานของวงจรนี้เน้นการสร้างที่ง่าย และใช้อุปกรณ์น้อย โดยจะมี IC1 เป็นหัวใจหลักของวงจร ซึ่งทำหน้าที่เป็นภาครับของวิทยุ FM (88-108MHz) โดยเฉพาะอุปกรณ์ภายนอกที่นำมาต่อมีเพียงไม่กี่ตัว ดังนั้นจูนเนอร์รุ่นนี้จึงมีขนาดเล็ก กระทัดรัด ภายในของไอซีเบอร์นี้จะประกอบด้วย ภาคออสซิลเลเตอร์

รายการอุปกรณ์ของชุดจูนเนอร์วิทยุ FM (Tuner Kit)

- ตัวต้านทาน R1 = 47Ω, R2 = 22kΩ
- Trimmer potentiometer VR1 = 100kΩ
- ตัวเก็บประจุอิเล็กโทรลิก C3 = 100μF
- C13, C15 = 1μF
- ตัวเก็บประจุเซรามิก C1 = 220pF
- C2, C4 = 0.047μF
- C5, C10, C12 = 0.0033μF
- C6 = 0.1μF
- C7, C8 = 330pF
- C9, C14 = 0.01μF
- C11 = 30pF
- ไอซี IC1 = TDA7000



รูปที่ 3.21 รูปวงจรชุดจูนเนอร์วิทยุ FM (Tuner Kit)



รูปที่ 3.22 ชุดจูนเนอร์วิทยุ FM (Tuner Kit)

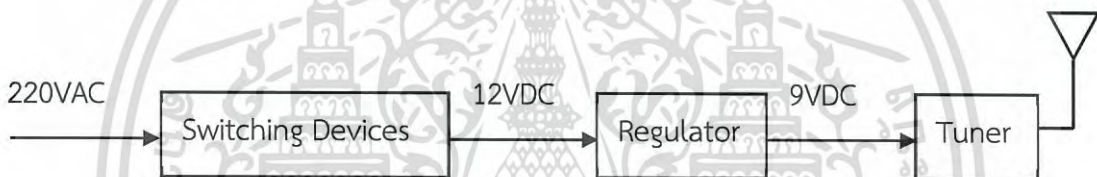
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

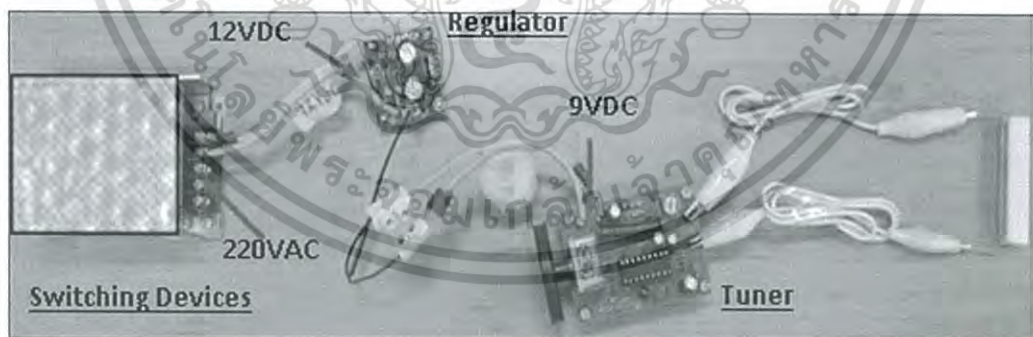
### ผลการทดลอง

#### 4.1 ชุดอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูงในงานวิจัย

ผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ (Conducted Emission) และผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศ (Radiated Emission) โดยรูปชุดอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูงที่ใช้ในงานวิจัยที่ศึกษาคือชุดรับสัญญาณวิทยุ FM ประกอบด้วย 1) ต่อไฟ 220Vac จากแหล่งจ่ายเข้าอุปกรณ์สวิตชิง (Switching Devices), 2) ชุดควบคุมแรงดัน (Regulator) โดยปรับจากแรงดันขาเข้า 12Vdc ให้ได้แรงดันขาออก 9Vdc, 3) ต่อชุดจูนเนอร์ (Tuner) เข้ากับลำโพง เพื่อที่จะรับสัญญาณวิทยุ FM จากสถานีวิทยุกระจายเสียง แต่ในงานวิจัยนี้ใช้โหลด R แทนเพื่อไม่ให้มีเสียงดัง แสดงดังรูปที่ 4.1

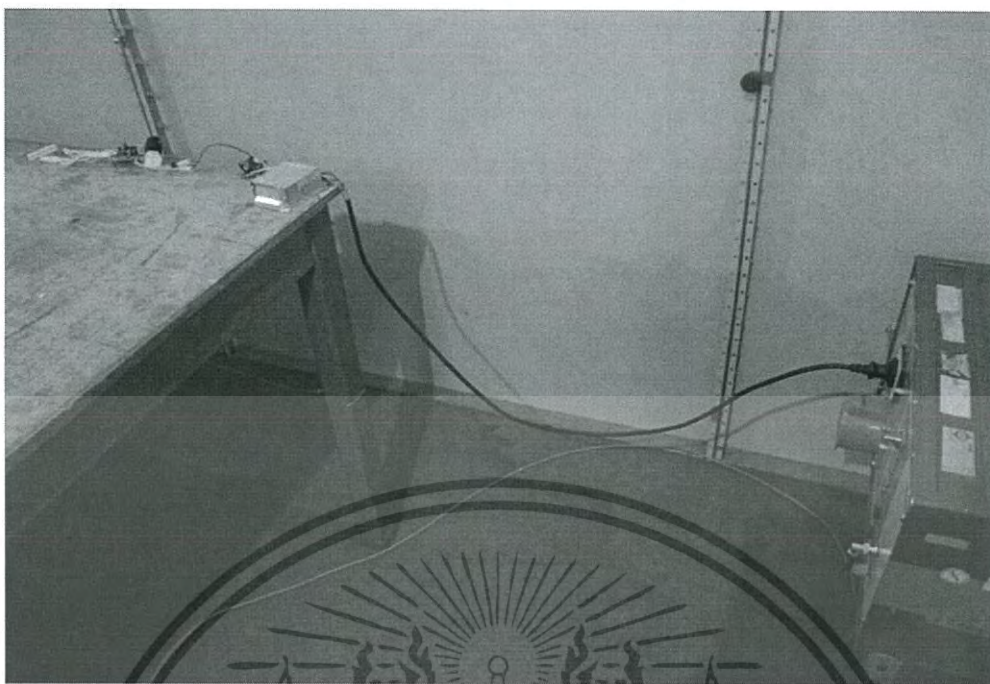


รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมการต่อชุดอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูงที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 4.2 ชุดอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูงที่ใช้ในงานวิจัย (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

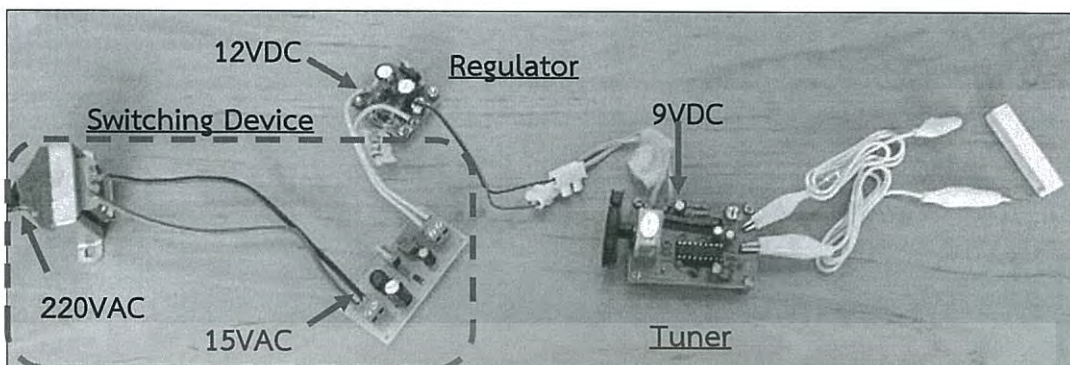


รูปที่ 4.3 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สวิตซ์ความถี่สูงสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ  
(ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป)



รูปที่ 4.4 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สวิตซ์ความถี่สูงสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศ  
(ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

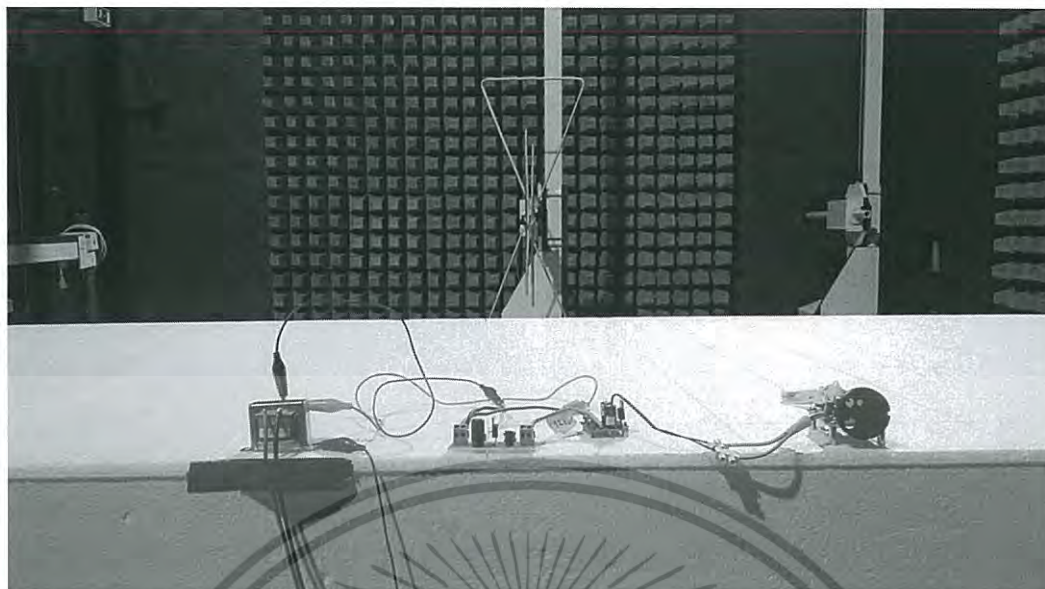


รูปที่ 4.5 ชุดอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งความถี่สูงที่ใช้ในงานวิจัย (ที่ได้มีการออกแบบ)



รูปที่ 4.6 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งความถี่สูงสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ (ที่ได้มีการออกแบบ)

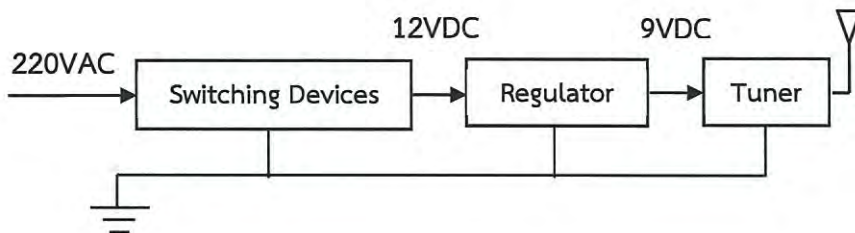
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



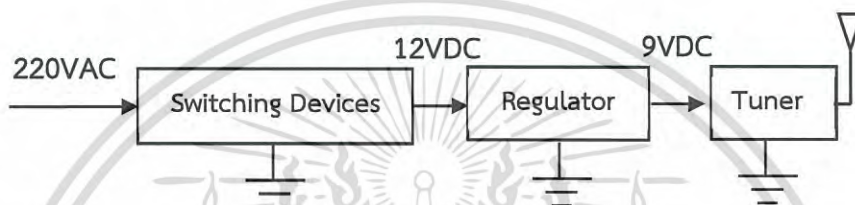
รูปที่ 4.7 การติดตั้งชุดอุปกรณ์วัดซึ่งความถี่สูงสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศ  
(ที่ได้มีการออกแบบ)

จากรูปที่ 4.3 ทำการทดสอบโดยวัดค่าสัญญาณรบกวน (noise) ที่ออกมาจากชุดอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งความถี่สูงในระบบการทดสอบสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ โดยป้อนไฟกระแสสลับ (AC main) เข้ามาเพื่อจ่ายไฟเข้าสู่ชุดอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งความถี่สูง เมื่อชุดอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งความถี่สูงใช้ไฟก็จะผลิตสัญญาณรบกวน (noise) ออกมาจากตัวอุปกรณ์ผ่านสายไฟ AC main ป้อนเข้ากลับมา และตัว LISN จะทำหน้าที่ตรวจจับความถี่สูงๆที่มันขึ้นมา ปกติไฟ AC main จะผลิตความถี่ 50 Hz เมื่อมีสัญญาณรบกวน (noise) ซึ่มาทับไฟ 50 Hz LISN จะจับคลื่นความถี่สูงๆของ noise แล้วส่งไปที่เครื่อง EMI Receiver เพื่อแสดงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นแล้วส่งเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูล

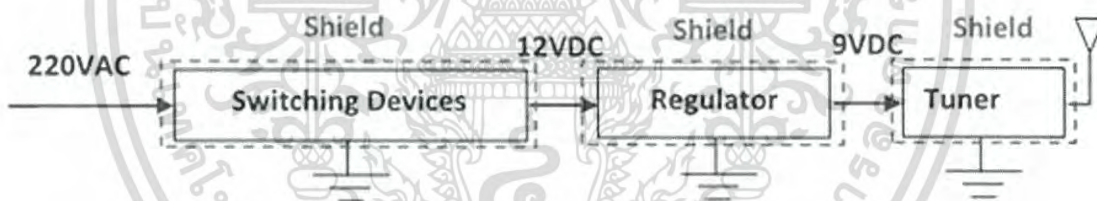
จากรูปที่ 4.4 ทำการทดสอบโดยวัดค่าสัญญาณรบกวน (noise) ที่ออกมาจากชุดอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งความถี่สูงในระบบการทดสอบสัญญาณรบกวนทางอากาศ โดยป้อนไฟกระแสสลับ (AC main) เข้ามาเพื่อจ่ายไฟเข้าสู่ชุดอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งความถี่สูง เมื่อชุดอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งความถี่สูงใช้ไฟก็จะผลิตสัญญาณรบกวน (noise) ออกมาจากตัวอุปกรณ์ผ่านทางอากาศ และทำการหมุนโต๊ะ Turn table 360° และเลื่อนเสาอากาศขึ้นจาก 1 ถึง 4 m เพื่อหาค่าสัญญาณรบกวน (noise) ที่แพร่ออกมามากที่สุดทั้งแนวแกนนอน (Horizontal) และแนวแกนตั้ง (Vertical) แล้วส่งไปที่เครื่อง EMI Receiver เพื่อแสดงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นแล้วส่งเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูล



รูปที่ 4.8 บล็อกไดอะแกรมการต่อกราวด์ร่วมในชุดอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูง (ต่อแบบอนุกรม)

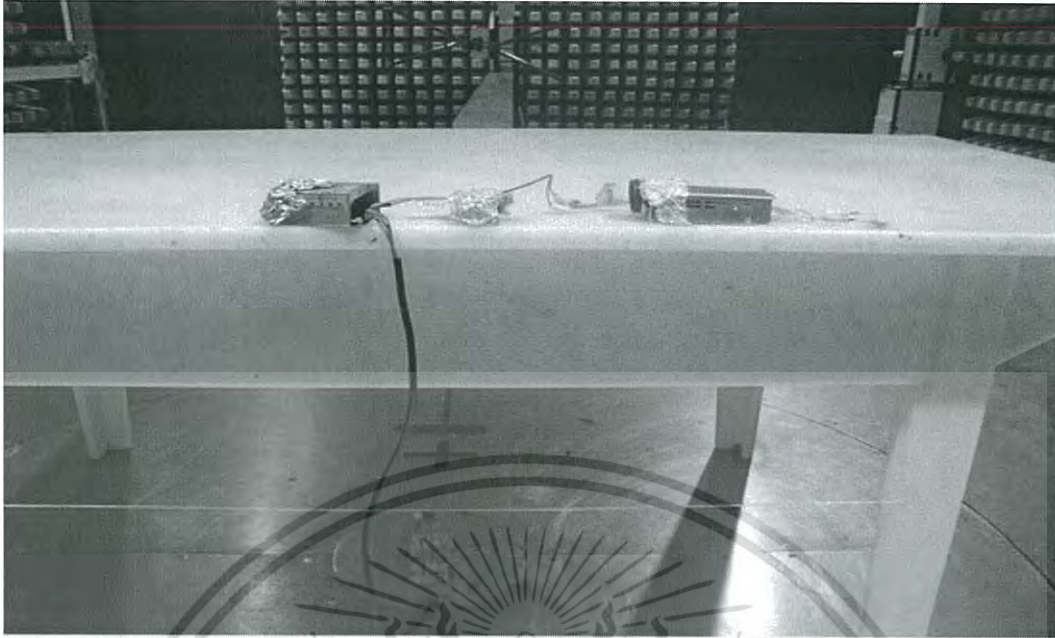


รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมการต่อกราวด์หลายจุดในชุดอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูง



รูปที่ 4.10 บล็อกไดอะแกรมการชิลด์โดยใช้เทปชิลด์ โครงโลหะหรือแผ่นชิลด์ปิดไปที่อุปกรณ์โดยตรงของชุดอุปกรณ์สวิตชิงความถี่สูง

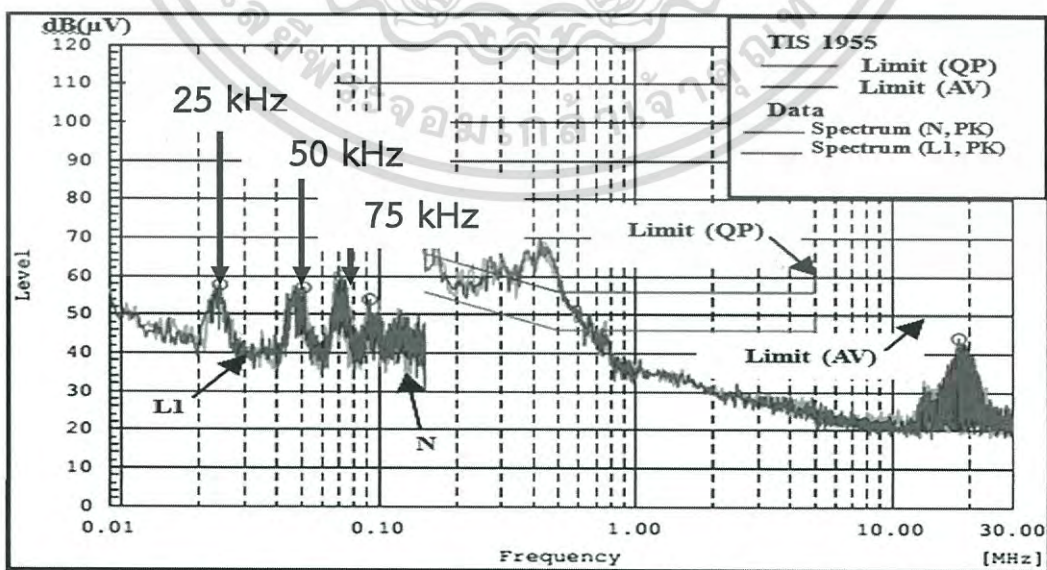
โดยทำการทดสอบวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC)



รูปที่ 4.11 การซัดโดยใช้เทปซิลด์ โคร่งโลหะหรือแผ่นซิลด์ปิดไปที่อุปกรณ์โดยตรงของชุดอุปกรณ์ สวิตชิงความถี่สูงสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศ

#### 4.2 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำมีความถี่สวิตชิงแพร่ออกจากอุปกรณ์ สวิตชิง (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป)

อุปกรณ์สวิตชิงมีความถี่สวิตชิงที่แพร่ออกมาทางสายตัวนำ คือความถี่ที่ 25 kHz (ฮาร์มอนิกส์ที่ 1) ความถี่ที่ 50 kHz (ฮาร์มอนิกส์ที่ 2) ความถี่ที่ 75 kHz (ฮาร์มอนิกส์ที่ 3) [13] แสดงในรูปที่ 4.12

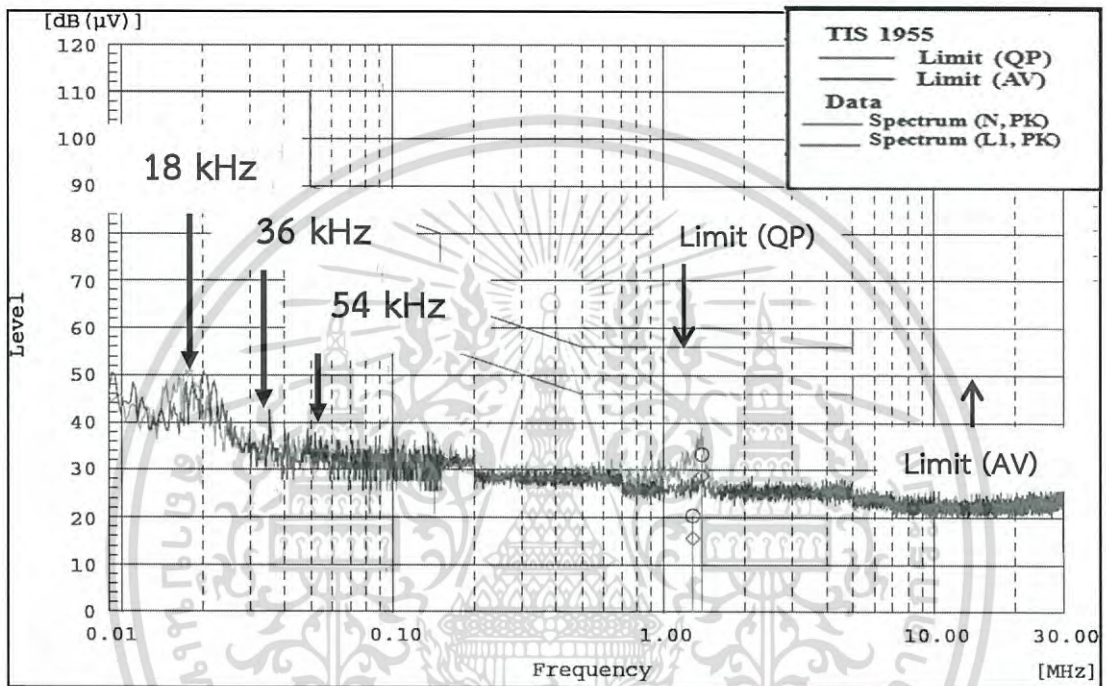


รูปที่ 4.12 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำมีความถี่สวิตชิงแพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

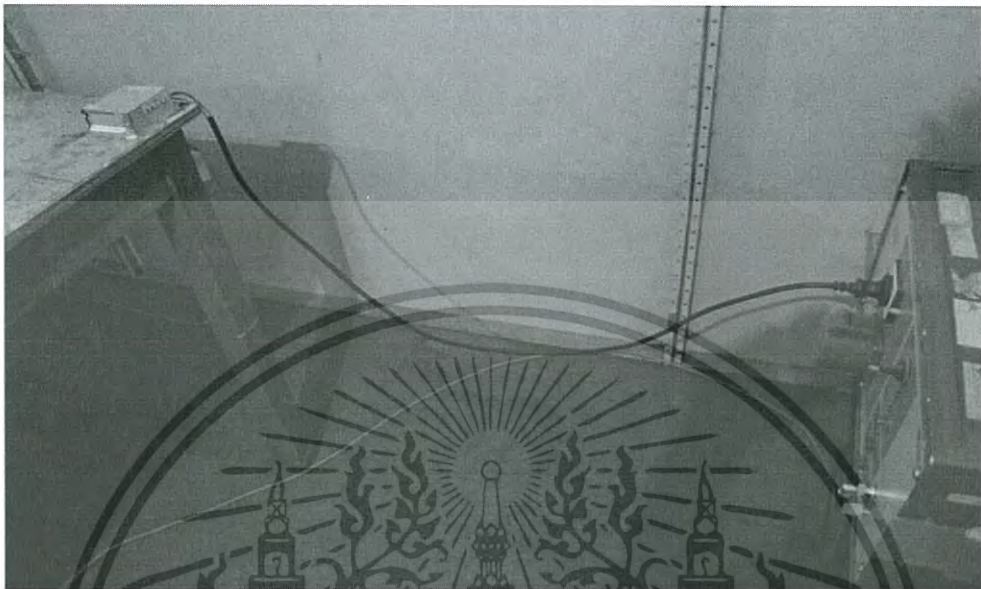
### 4.3 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำมีความถี่สวิตชิงแพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิง (ที่ได้มีการออกแบบ)

อุปกรณ์สวิตชิงที่มีความถี่สวิตชิงที่แพร่ออกมาทางสายตัวนำ คือความถี่ที่ 18 kHz (ฮาร์มอนิกส์ที่ 1) ความถี่ที่ 36 kHz (ฮาร์มอนิกส์ที่ 2) ความถี่ที่ 54 kHz (ฮาร์มอนิกส์ที่ 3) [13] แสดงในรูปที่ 4.13

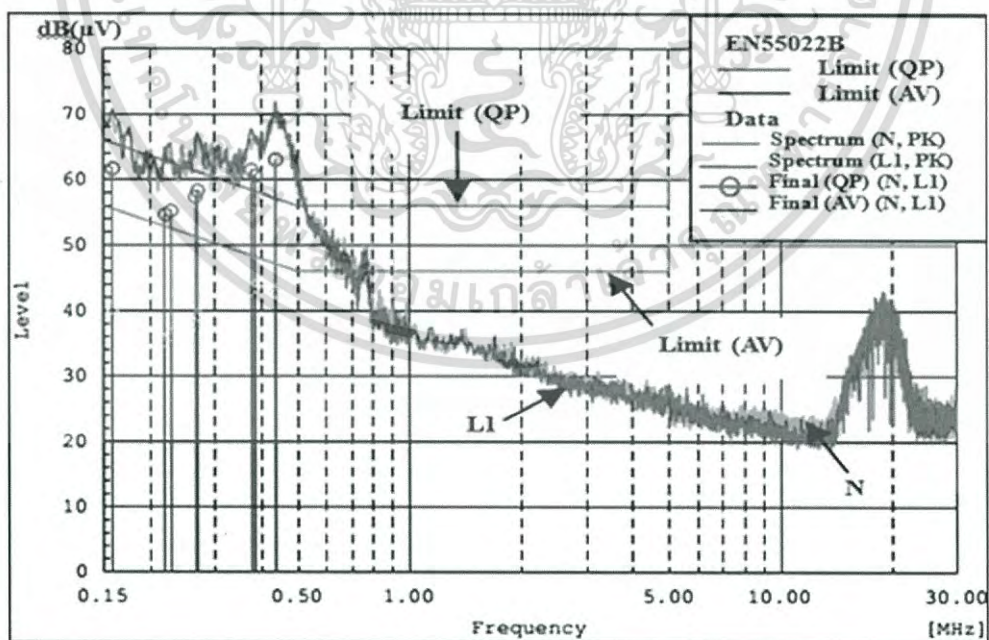


รูปที่ 4.13 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำมีความถี่สวิตชิงแพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิง (ที่ได้มีการออกแบบ)

#### 4.4 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียว (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป)



รูปที่ 4.14 การติดตั้งอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียวสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป)



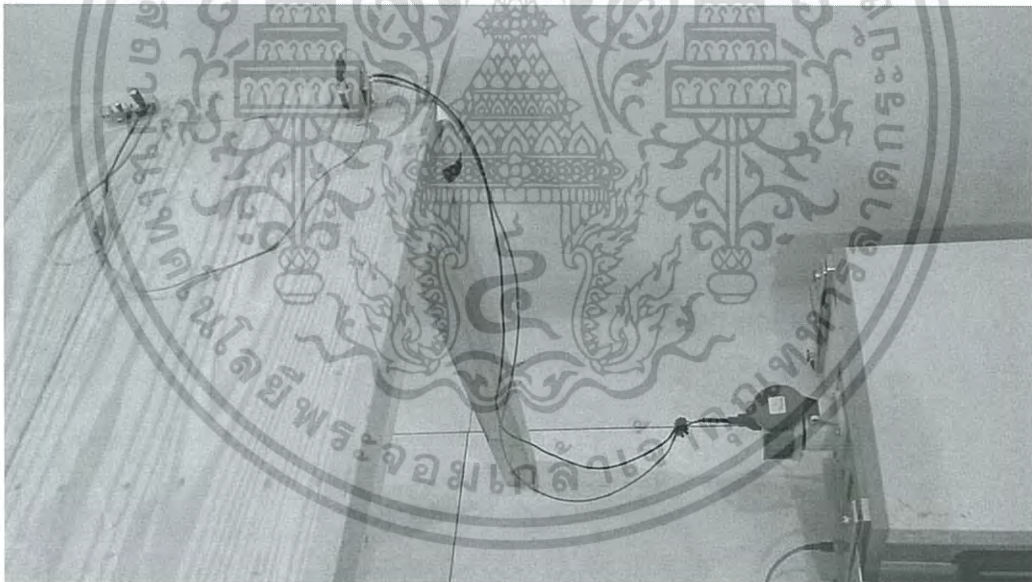
รูปที่ 4.15 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียว (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Final Result										
--- N Phase ---										
No.	Frequency	Reading QP	Reading CAV	c.f	Result QP	Result CAV	Limit QP	Limit AV	Margin QP	Margin CAV
	[MHz]	[dB (7V)]	[dB (7V)]	[dB]	[dB (7V)]	[dB (7V)]	[dB (7V)]	[dB (7V)]	[dB]	[dB]
1	0.15874	51.3	29.5	10.2	61.5	39.7	65.5	55.5	4.0	15.8
2	0.22027	44.4	25.2	10.2	54.6	35.4	62.8	52.8	5.2	17.4
2	0.26567	47.2	27.8	10.2	57.4	38.0	61.3	51.3	2.9	13.3
4	0.38554	50.3	32.5	10.2	60.5	43.7	58.2	48.2	-2.2	4.5
5	0.43741	52.7	32.5	10.2	62.9	42.7	57.1	47.1	-5.8	4.4
--- L1 Phase ---										
No.	Frequency	Reading QP	Reading CAV	c.f	Result QP	Result CAV	Limit QP	Limit AV	Margin QP	Margin CAV
	[MHz]	[dB (7V)]	[dB (7V)]	[dB]	[dB (7V)]	[dB (7V)]	[dB (7V)]	[dB (7V)]	[dB]	[dB]
1	0.15929	51.5	30.2	10.2	61.7	40.4	65.5	55.5	2.8	15.1
2	0.22844	45.0	26.0	10.2	55.2	36.2	62.5	52.5	7.2	16.3
2	0.26945	48.1	29.1	10.2	58.3	39.3	61.1	51.1	2.8	11.8
4	0.37552	51.2	33.0	10.2	61.4	43.2	58.4	48.4	-3.0	5.2
5	0.43744	52.9	32.7	10.2	63.1	42.9	57.1	47.1	-6.0	4.2

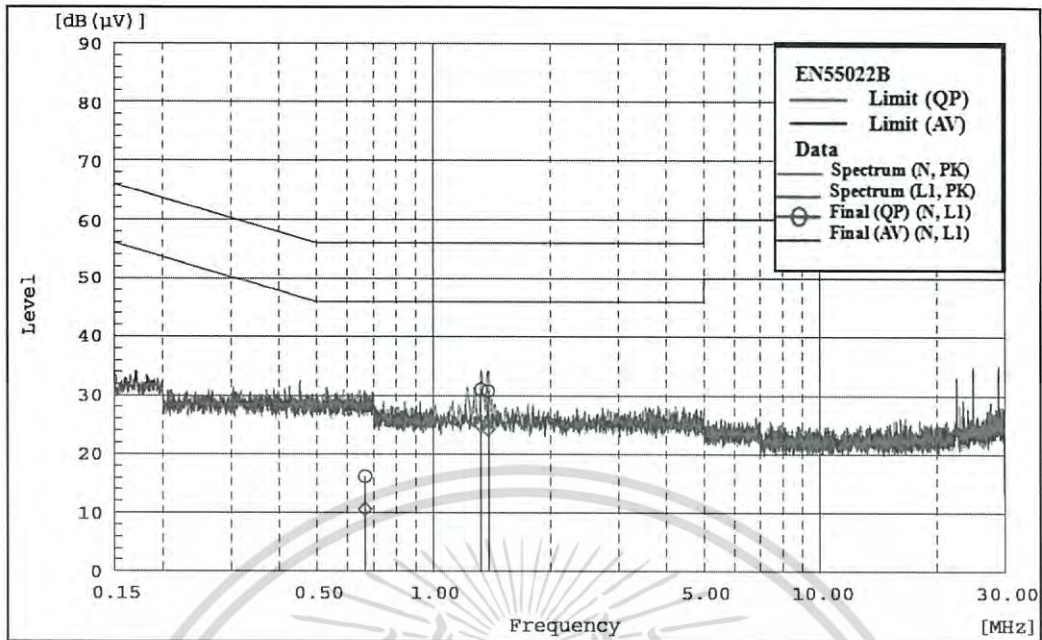
รูปที่ 4.16 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่จากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียว (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป)

#### 4.5 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่จากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียว (ที่ได้มีการออกแบบ)



รูปที่ 4.17 การติดตั้งอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียวสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำ (ที่ได้มีการออกแบบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียว (ที่ได้มีการออกแบบ)

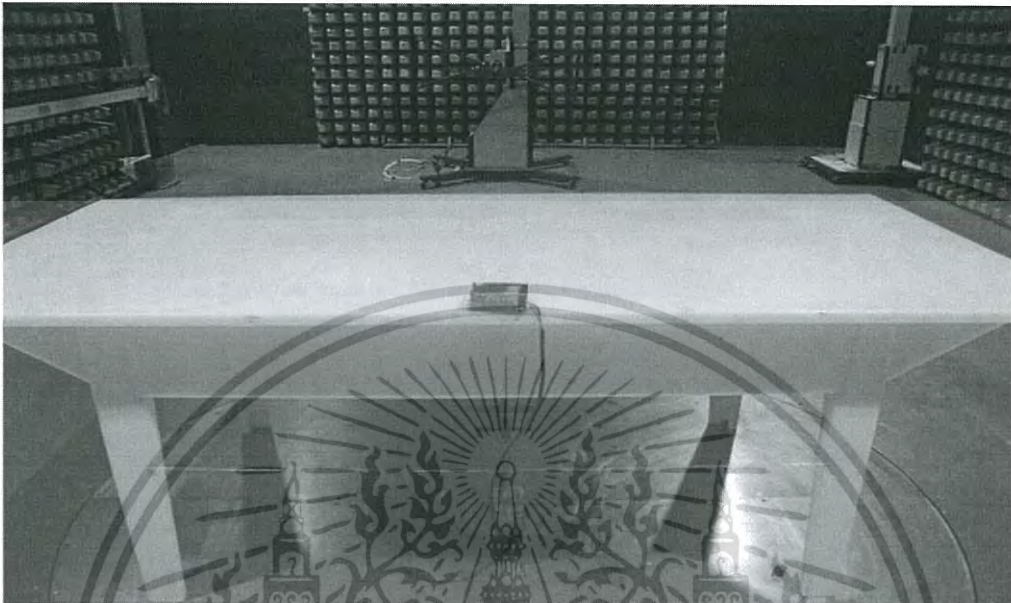
Final Result										
--- N Phase ---										
No.	Frequency	Reading QP	Reading CAV	c.f	Result QP	Result CAV	Limit QP	Limit AV	Margin QP	Margin CAV
	[MHz]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB]	[dB]
1	1.38391	20.6	14.1	10.1	30.7	24.2	56.0	46.0	25.3	21.8
2	1.32853	20.9	14.7	10.1	31.0	24.8	56.0	46.0	25.0	21.2
--- L1 Phase ---										
No.	Frequency	Reading QP	Reading CAV	c.f	Result QP	Result CAV	Limit QP	Limit AV	Margin QP	Margin CAV
	[MHz]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB]	[dB]
1	0.66614	6.1	0.5	10.1	16.2	10.6	56.0	46.0	39.8	35.4

รูปที่ 4.19 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียว (ที่ได้มีการออกแบบ)

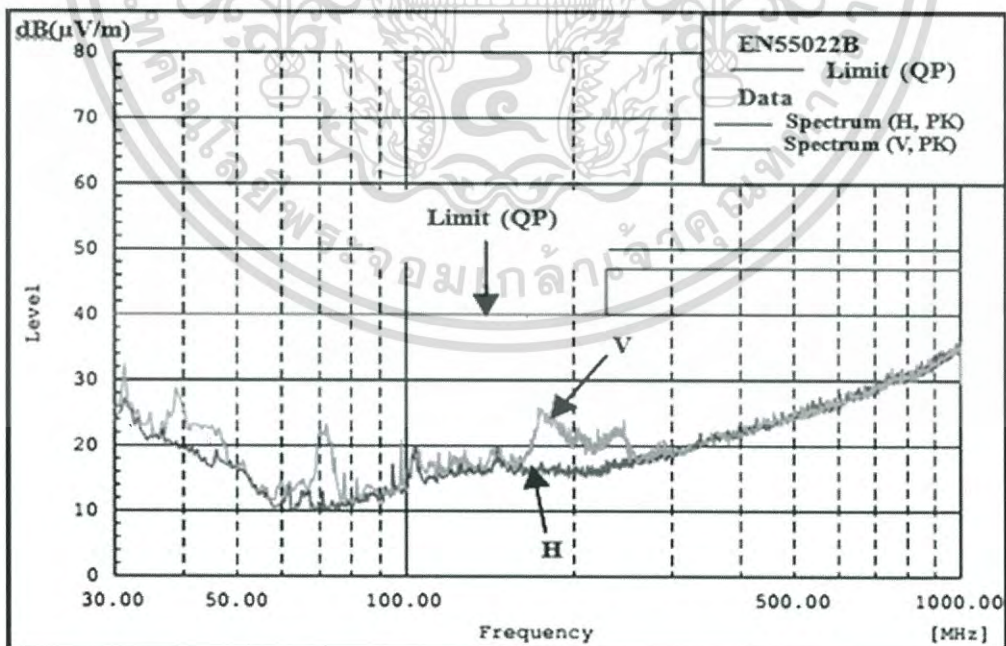
จากข้อมูลในรูปที่ 4.16 เป็นการแสดงผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนในสายไลน์และสายนิวทริค เทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B คือในช่วงความถี่ 150 kHz ถึง 30MHz จะเห็นว่าข้อมูลในคอลัมน์ Margin QP [dB] ส่วนใหญ่ทั้งในสายไลน์และสายนิวทริคมีค่าติดลบในช่วงความถี่ 150 kHz ถึง 800 kHz ดังนั้นระดับของสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียวมีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ ส่วนข้อมูลในรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าข้อมูลในคอลัมน์ Margin QP [dB] และ Margin CAV [dB] ทั้งในสายไลน์และสายนิวทริคมีค่าเป็นบวก ดังนั้นระดับของสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียวมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์อย่างเดียว (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป)



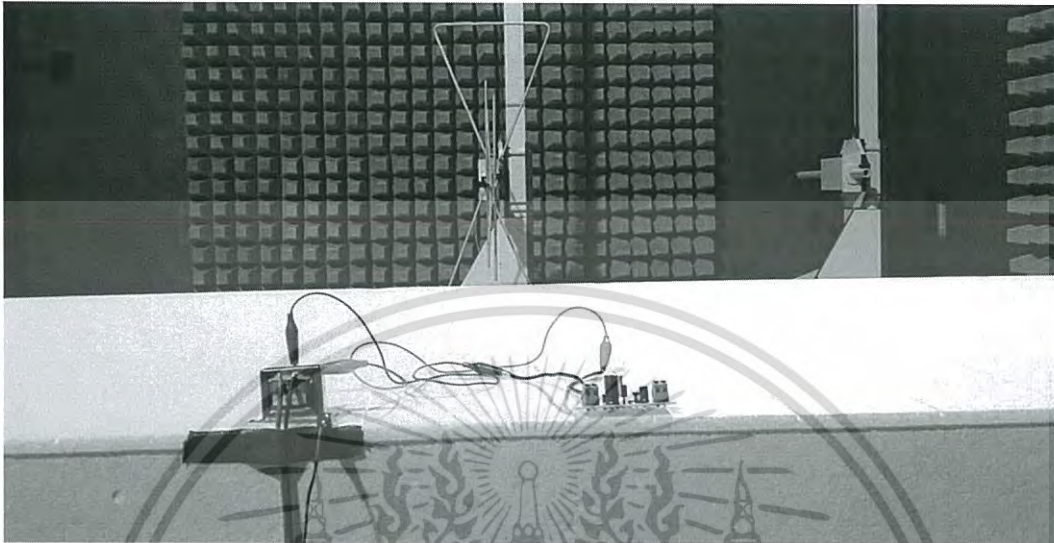
รูปที่ 4.20 การติดตั้งอุปกรณ์สวิตซ์อย่างเดียวสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป)



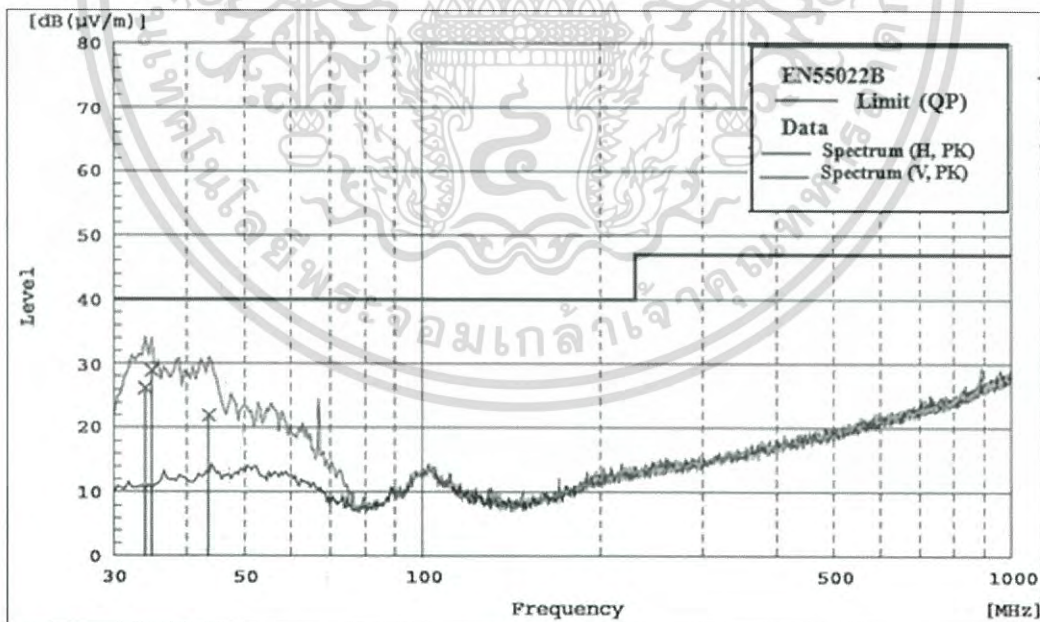
รูปที่ 4.21 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์อย่างเดียว (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์อย่างเดียว (ที่ได้มีการออกแบบ)



รูปที่ 4.22 การติดตั้งอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียวสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศ (ที่ได้มีการออกแบบ)



รูปที่ 4.23 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอย่างเดียว (ที่ได้มีการออกแบบ)

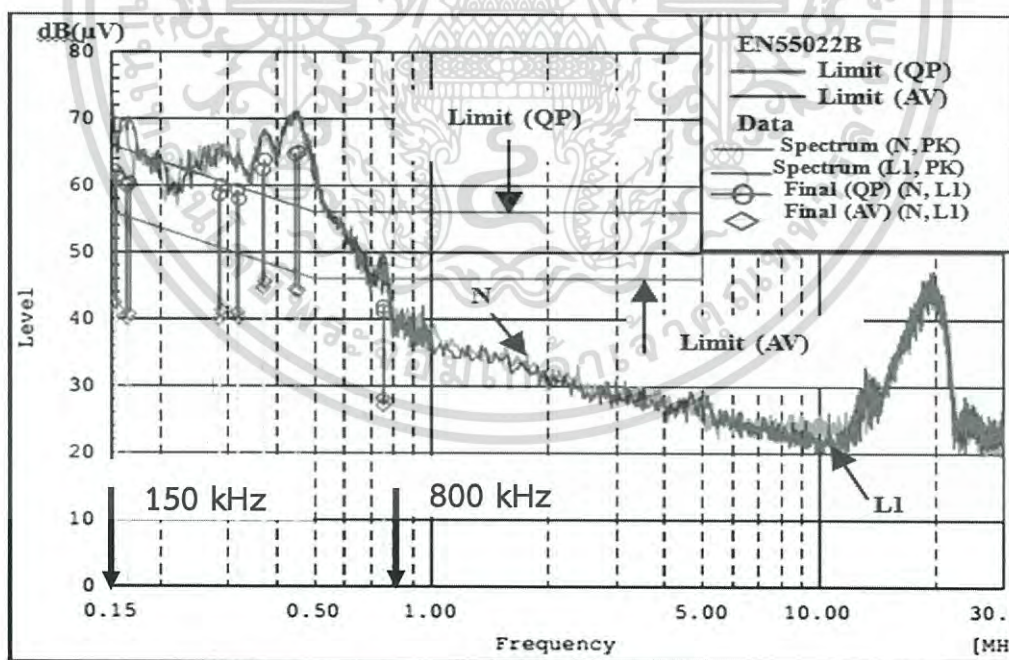
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Final Result							
No.	Frequency [MHz]	(P)	Reading QP [dB (μV)]	c.f [dB (1/m)]	Result QP [dB (μV/m)]	Limit QP [dB (μV/m)]	Margin QP [dB]
1	33.933	V	43.7	-17.5	26.2	40.0	13.8
2	34.807	V	46.3	-17.4	28.9	40.0	11.1
3	43.548	V	37.8	-15.8	22.0	40.0	18.0

รูปที่ 4.24 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์อย่างเดียว (ที่ได้มีการออกแบบ)

จากผลในรูปที่ 4.21 และ 4.23 เป็นการแสดงผลการวัดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนทางอากาศ ในแกนตั้ง (Vertical) และแกนนอน (Horizontal) เทียบกับมาตรฐาน EN 55022 Class B คือในช่วงความถี่ 30 MHz ถึง 1000 MHz จะเห็นว่าระดับของสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์อย่างเดียวมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้

#### 4.8 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์และชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์หลายจุด)



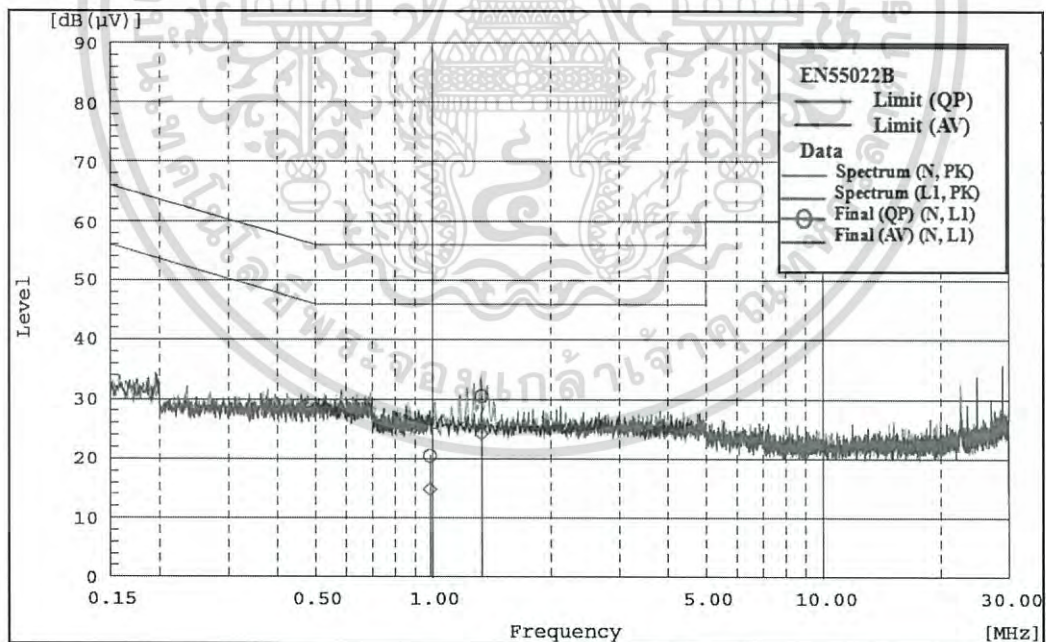
รูปที่ 4.25 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์และชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์หลายจุด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Final Result										
--- N Phase ---										
No.	Frequency	Reading QP	Reading CAV	c.f	Result QP	Result CAV	Limit QP	Limit AV	Margin QP	Margin CAV
	[MHz]	[dB (7V)]	[dB (7V)]	[dB]	[dB (7V)]	[dB (7V)]	[dB (7V)]	[dB (7V)]	[dB]	[dB]
1	0.15522	51.2	31.0	10.2	61.5	41.2	65.7	55.7	4.2	14.5
2	0.16448	49.7	29.5	10.2	59.9	40.0	65.2	53.2	5.3	15.2
3	0.28428	45.4	29.5	10.2	58.6	40.0	60.7	50.7	2.1	10.7
4	0.31956	47.7	30.0	10.2	57.9	40.2	59.7	49.7	1.5	9.5
5	0.36792	52.2	34.5	10.2	62.4	44.7	58.5	48.5	-3.9	3.3
6	0.44642	54.4	34.2	10.2	64.6	44.4	56.9	46.9	-7.7	2.5
7	0.75296	31.6	18.0	10.2	41.8	28.2	56.0	46.0	14.2	17.8
--- L1 Phase ---										
No.	Frequency	Reading QP	Reading CAV	c.f	Result QP	Result CAV	Limit QP	Limit AV	Margin QP	Margin CAV
	[MHz]	[dB (7V)]	[dB (7V)]	[dB]	[dB (7V)]	[dB (7V)]	[dB (7V)]	[dB (7V)]	[dB]	[dB]
1	0.1528	51.9	32.2	10.2	62.1	42.4	65.8	55.8	3.7	13.4
2	0.16672	50.1	30.4	10.2	60.3	40.6	65.1	55.1	4.8	14.5
3	0.2882	49.5	31.1	10.2	60.0	41.3	60.6	50.6	0.6	9.3
4	0.31698	49.1	30.5	10.2	59.3	41.0	59.8	49.8	0.5	8.8
5	0.37162	53.6	35.4	10.2	63.8	45.6	58.5	48.5	-5.3	2.9
6	0.45428	54.7	34.0	10.2	64.9	44.2	56.8	46.8	-8.1	2.6
7	0.75386	30.9	16.9	10.2	41.1	27.1	56.0	46.0	14.9	18.9

รูปที่ 4.26 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์หลายจุด)

4.9 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์หลายจุด)



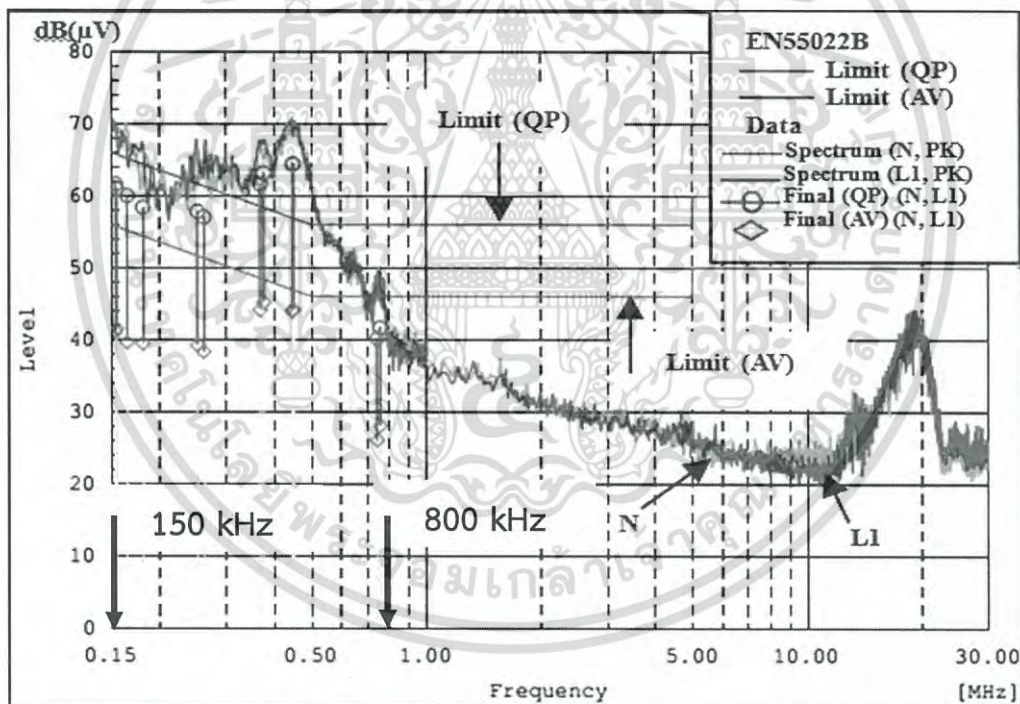
รูปที่ 4.27 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์หลายจุด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Final Result										
--- N Phase ---										
No.	Frequency	Reading QP	Reading CAV	c.f	Result QP	Result CAV	Limit QP	Limit AV	Margin QP	Margin CAV
	[MHz]	[dB (μV)]	[dB (μV)]	[dB]	[dB (μV)]	[dB (μV)]	[dB (μV)]	[dB (μV)]	[dB]	[dB]
1	1.33256	20.4	14.1	10.1	30.5	24.2	56.0	46.0	25.5	21.8
--- L1 Phase ---										
No.	Frequency	Reading QP	Reading CAV	c.f	Result QP	Result CAV	Limit QP	Limit AV	Margin QP	Margin CAV
	[MHz]	[dB (μV)]	[dB (μV)]	[dB]	[dB (μV)]	[dB (μV)]	[dB (μV)]	[dB (μV)]	[dB]	[dB]
1	0.98233	10.4	4.7	10.1	20.5	14.8	56.0	46.0	35.5	31.2

รูปที่ 4.28 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์หลายจุด)

4.10 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์ร่วม)



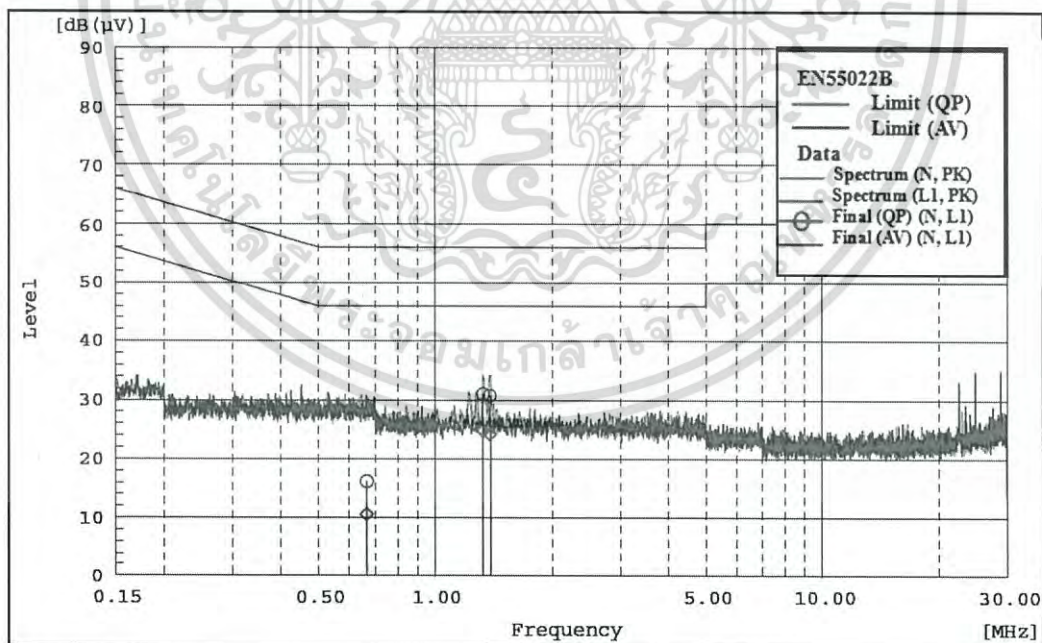
รูปที่ 4.29 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์ร่วม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Final Result											
--- N Phase ---											
No.	Frequency	Reading QP	Reading CAV	c.f	Result QP	Result CAV	Limit QP	Limit AV	Margin QP	Margin CAV	
	[MHz]	[dB (??V)]	[dB (??V)]	[dB]	[dB (??V)]	[dB (??V)]	[dB (??V)]	[dB (??V)]	[dB]	[dB]	
1	0.15416	51.4	30.9	10.2	61.6	41.1	65.8	55.8	4.2	14.7	
2	0.16524	49.8	29.4	10.2	60.0	39.6	65.2	55.2	5.2	15.6	
3	0.26245	46.8	28.1	10.2	57.0	38.3	61.4	51.4	4.4	13.1	
4	0.36795	51.4	33.9	10.2	61.6	44.1	58.5	48.5	-3.1	4.4	
5	0.45045	54.3	34.0	10.2	64.5	44.2	56.9	46.9	-7.6	2.7	
6	0.75631	31.4	17.8	10.2	41.6	28.0	56.0	46.0	14.4	18.0	
--- L1 Phase ---											
No.	Frequency	Reading QP	Reading CAV	c.f	Result QP	Result CAV	Limit QP	Limit AV	Margin QP	Margin CAV	
	[MHz]	[dB (??V)]	[dB (??V)]	[dB]	[dB (??V)]	[dB (??V)]	[dB (??V)]	[dB (??V)]	[dB]	[dB]	
1	0.15529	50.7	31.2	10.2	60.9	41.5	65.7	55.7	4.8	14.2	
2	0.18165	48.2	29.2	10.2	58.4	39.4	64.4	54.4	6.0	15.0	
3	0.2526	47.6	29.0	10.2	57.8	39.2	61.7	51.7	3.9	12.5	
4	0.3752	53.0	35.0	10.2	63.2	45.2	58.4	48.4	-4.8	3.2	
5	0.44663	54.2	33.8	10.2	64.4	44.0	56.9	46.9	-7.5	2.9	
6	0.74379	30.0	15.8	10.2	40.2	26.0	56.0	46.0	15.8	20.0	

รูปที่ 4.30 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์ร่วม)

4.11 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์ร่วม)



รูปที่ 4.31 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์ร่วม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

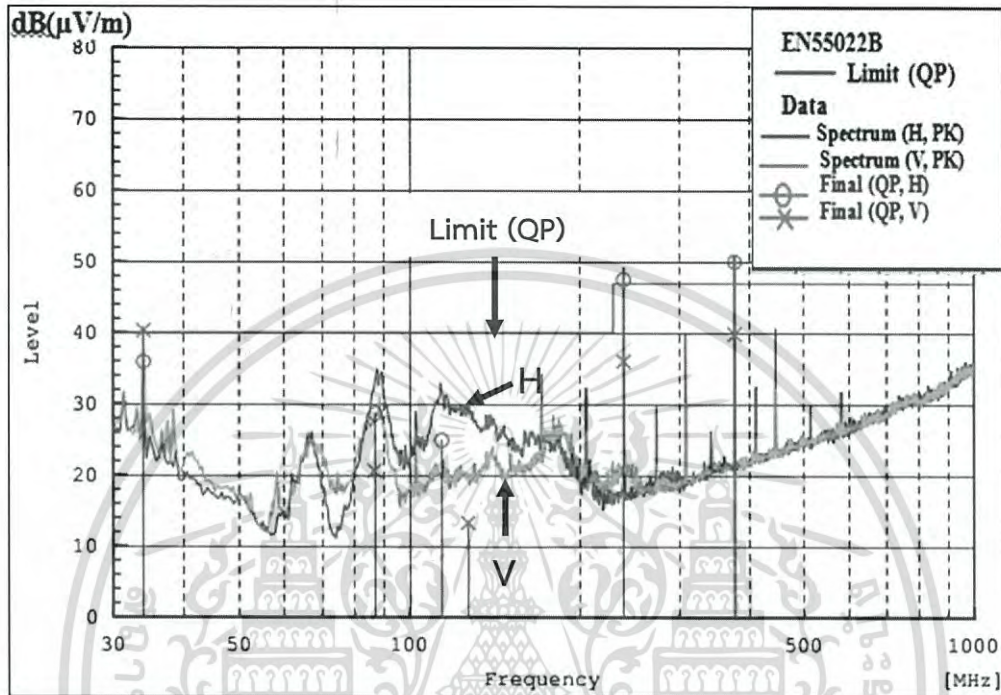
Final Result										
--- N Phase ---										
No.	Frequency	Reading QP	Reading CAV	c.f	Result QP	Result CAV	Limit QP	Limit AV	Margin QP	Margin CAV
	[MHz]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB]	[dB]
1	1.38391	20.6	14.1	10.1	30.7	24.2	56.0	46.0	25.3	21.8
2	1.32853	20.9	14.7	10.1	31.0	24.8	56.0	46.0	25.0	21.2
--- L1 Phase ---										
No.	Frequency	Reading QP	Reading CAV	c.f	Result QP	Result CAV	Limit QP	Limit AV	Margin QP	Margin CAV
	[MHz]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB]	[dB]
1	0.66614	6.1	0.5	10.1	16.2	10.6	56.0	46.0	39.8	35.4

รูปที่ 4.32 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์และชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์ร่วม)

จากกราฟในรูปที่ 4.25, 4.27, 4.29 และ 4.31 พบว่า เส้นสีแดงคือเส้นที่พิกัดของค่าสูงสุดเสมือน (Quasi peak) ส่วนเส้นสีชมพูคือเส้นที่พิกัดของค่าเฉลี่ย (Average value) โดยที่กราฟเส้นสีแดงคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายไลน์และกราฟเส้นสีเขียวคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนิวทรัล

เมื่อทำการทดสอบวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์และชุดจูนเนอร์ (ต่อกราวด์หลายจุด) และทดสอบวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์และชุดจูนเนอร์ (ต่อกราวด์ร่วม) พบว่ามีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในระบบอยู่ในระดับเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ จะเห็นว่าข้อมูลในคอลัมน์ Margin QP [dB] ส่วนใหญ่ทั้งในสายไลน์และสายนิวทรัลมีค่าติดลบในช่วงความถี่ 150 kHz ถึง 180 kHz สรุปได้ว่าการต่อกราวด์ร่วมสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำได้เล็กน้อยในชุดอุปกรณ์สวิตซ์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป) ส่วนในชุดอุปกรณ์สวิตซ์ (ที่ได้มีการออกแบบ) มีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในระบบอยู่ในระดับที่ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้

4.12 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์หลายจุดและไม่มีกริลด์)



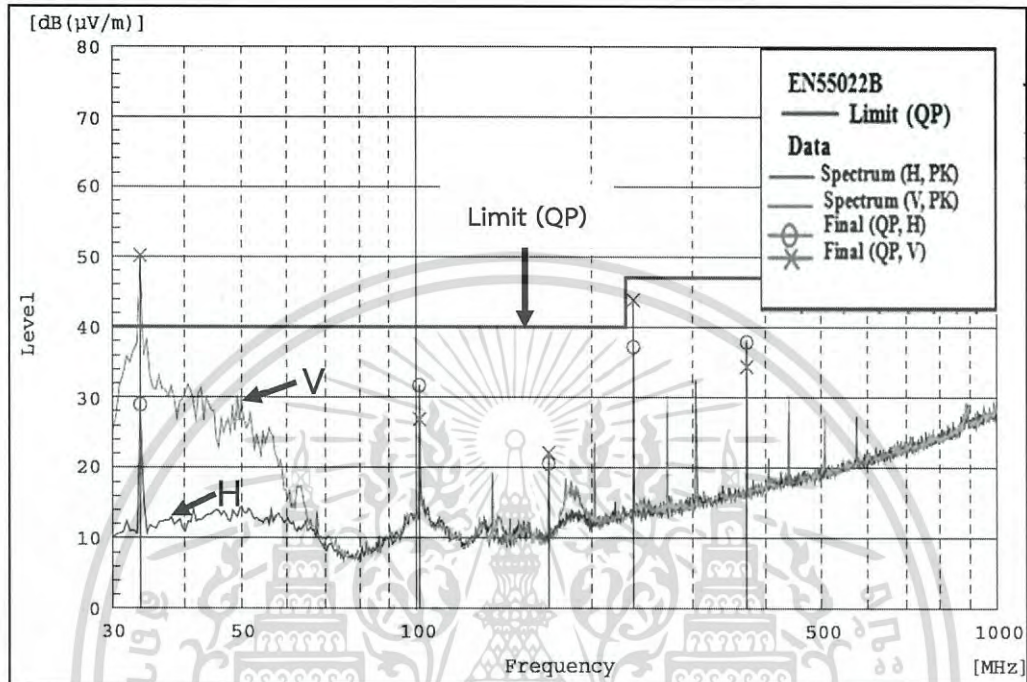
รูปที่ 4.33 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์หลายจุดและไม่มีกริลด์)

Final Result							
No.	Frequency [MHz]	(P)	Reading QP [dB (V)]	c.f [dB (1/m)]	Result QP [dB (V/m)]	Limit QP [dB (V/m)]	Margin QP [dB]
1	33.933	V	48.0	-7.7	40.3	40.0	-0.3
2	86.670	V	38.4	-17.8	20.6	40.0	19.4
3	126.870	V	27.1	-13.8	13.3	40.0	26.7
4	239.574	V	49.0	-13.0	36.0	47.0	11.0
5	376.484	V	48.3	-8.5	39.8	47.0	7.2
6	33.933	H	43.6	-7.7	35.9	40.0	4.1
7	86.981	H	46.4	-17.8	28.6	40.0	11.4
8	113.984	H	39.9	-15.0	24.9	40.0	15.1
9	239.575	H	60.5	-13.0	47.5	47.0	-0.5
10	376.484	H	58.5	-8.5	50.0	47.0	-3.0

รูปที่ 4.34 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์หลายจุดและไม่มีกริลด์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.13 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกראวดหลายจุดและไม่มีการชิลด์)



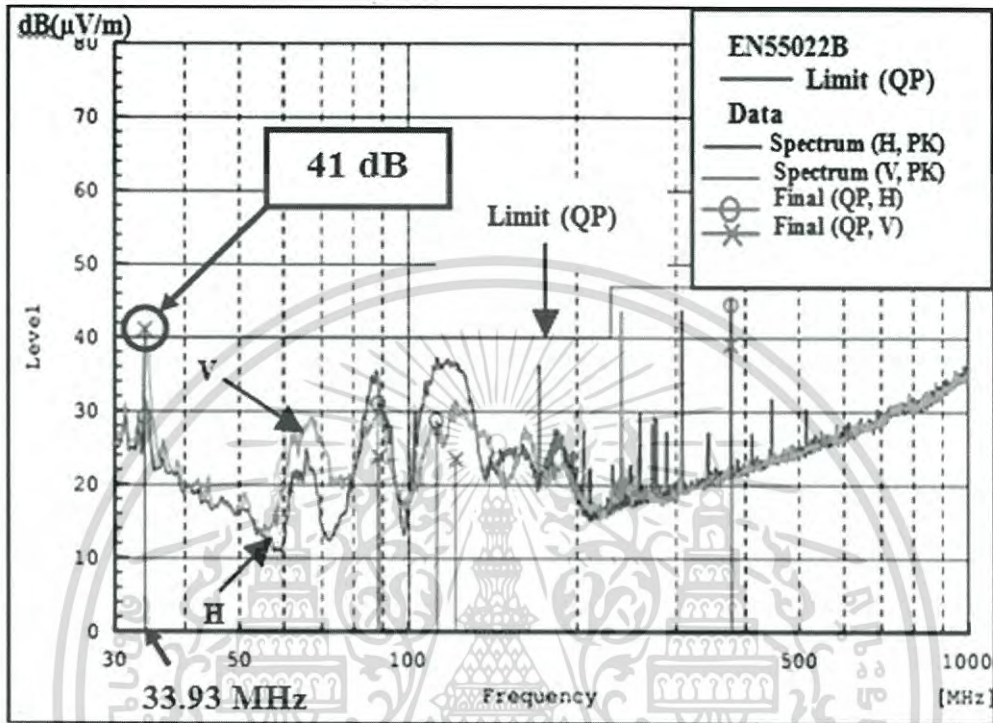
รูปที่ 4.35 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกראวดหลายจุดและไม่มีการชิลด์)

Final Result							
No.	Frequency [MHz]	(P)	Reading QP [dB (µV)]	c.f [dB (1/m)]	Result QP [dB (µV/m)]	Limit QP [dB (µV/m)]	Margin QP [dB]
1	33.496	V	67.8	-17.6	50.2	40.0	-10.2
2	101.234	V	42.4	-15.5	26.9	40.0	13.1
3	168.972	V	41.5	-19.4	22.1	40.0	17.9
4	236.710	V	59.5	-15.6	43.9	47.0	3.1
5	371.380	V	46.6	-12.2	34.4	47.0	12.6
6	33.496	H	46.5	-17.6	28.9	40.0	11.1
7	101.234	H	47.2	-15.5	31.7	40.0	8.3
8	168.972	H	40.0	-19.4	20.6	40.0	19.4
9	236.710	H	52.8	-15.6	37.2	47.0	9.8
10	371.380	H	50.1	-12.2	37.9	47.0	9.1

รูปที่ 4.36 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกראวดหลายจุดและไม่มีการชิลด์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.14 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์หลายจุดและมีการชิลด์)



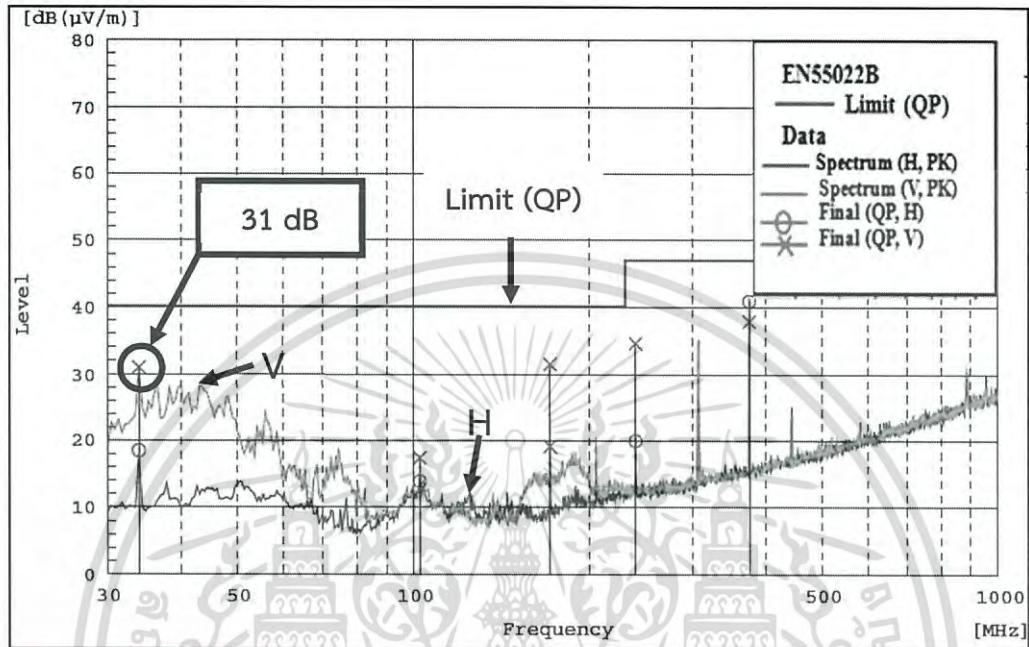
รูปที่ 4.37 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์หลายจุดและมีการชิลด์)

Final Result							
No.	Frequency [MHz]	(P)	Reading QP [dB (?V)]	c.f [dB (1/m)]	Result QP [dB (?V/m)]	Limit QP [dB (?V/m)]	Margin QP [dB]
1	33.930	V	48.8	-7.7	41.1	40.0	-1.1
2	88.648	V	41.5	-17.7	23.8	40.0	16.2
3	121.774	V	37.7	-14.3	23.4	40.0	16.6
4	377.045	V	47.5	-8.5	39.0	47.0	8.0
5	33.933	H	36.9	-7.7	29.2	40.0	10.8
6	88.391	H	48.7	-17.7	31.0	40.0	9.0
7	112.200	H	43.8	-15.1	28.7	40.0	11.3
8	377.045	H	53.0	-8.5	44.5	47.0	2.5

รูปที่ 4.38 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์หลายจุดและมีการชิลด์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.15 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์หลายจุดและมีการชิลด์)



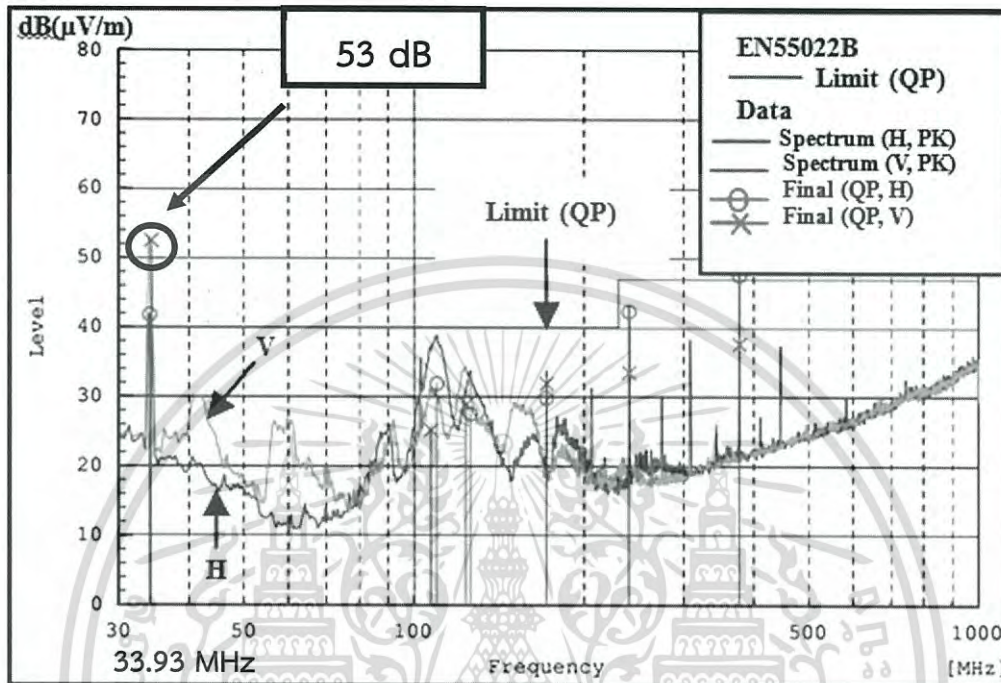
รูปที่ 4.39 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์หลายจุดและมีการชิลด์)

Final Result							Margin QP [dB]
No.	Frequency [MHz]	(P)	Reading QP [dB (µV)]	c. f [dB (1/m)]	Result QP [dB (µV/m)]	Limit QP [dB (µV/m)]	
1	33.933	V	48.5	-17.5	31.0	40.0	9.0
2	102.545	V	33.2	-15.7	17.5	40.0	22.5
3	171.157	V	50.8	-19.3	31.5	40.0	8.5
4	239.769	V	50.1	-15.5	34.6	47.0	12.4
5	375.912	V	50.0	-12.1	37.9	47.0	9.1
6	33.933	H	36.0	-17.5	18.5	40.0	21.5
7	102.545	H	29.6	-15.7	13.9	40.0	26.1
8	171.157	V	38.5	-19.3	19.2	40.0	20.8
9	239.769	H	35.5	-15.5	20.0	47.0	27.0
10	375.912	H	53.0	-12.1	40.9	47.0	6.1

รูปที่ 4.40 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์หลายจุดและมีการชิลด์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.16 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์ร่วมและไม่มีกริลด์)



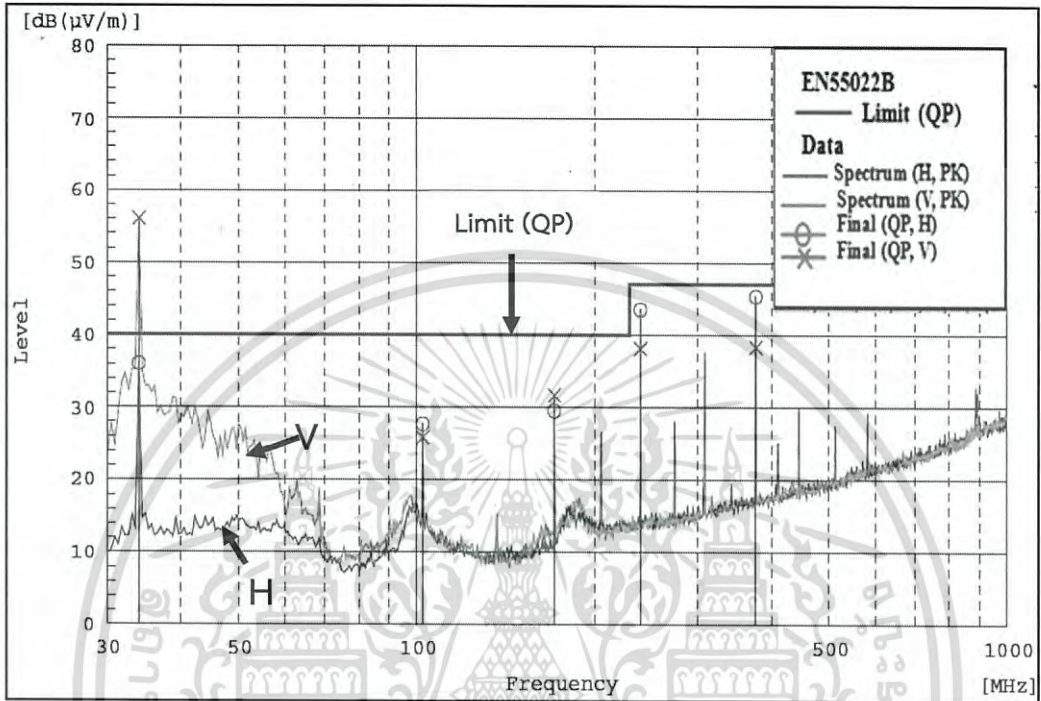
รูปที่ 4.41 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์ร่วมและไม่มีกริลด์)

Final Result							
No.	Frequency [MHz]	(P)	Reading QP [dB(μV)]	c.f [dB(1/m)]	Result QP [dB(μV/m)]	Limit QP [dB(μV/m)]	Margin QP [dB]
1	34.310	V	60.5	-8.0	52.5	40.0	-12.5
2	107.352	V	40.7	-15.5	25.2	40.0	14.8
3	123.959	V	42.9	-14.0	28.9	40.0	11.1
4	171.594	V	45.9	-14.0	31.9	40.0	8.1
5	240.206	V	46.5	-13.0	33.5	47.0	13.5
6	377.438	V	46.1	-8.5	37.6	47.0	9.4
7	34.096	H	49.6	-7.8	41.8	40.0	-1.8
8	109.975	H	47.2	-15.3	31.9	40.0	8.1
9	126.144	H	41.3	-13.8	27.5	40.0	12.5
10	171.594	H	43.8	-14.0	29.8	40.0	10.2
11	240.206	H	55.3	-13.0	42.3	47.0	4.7
12	377.426	H	56.0	-8.5	47.5	47.0	-0.5

รูปที่ 4.42 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์ร่วมและไม่มีกริลด์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.17 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์ร่วมและไม่มีการชิลด์)



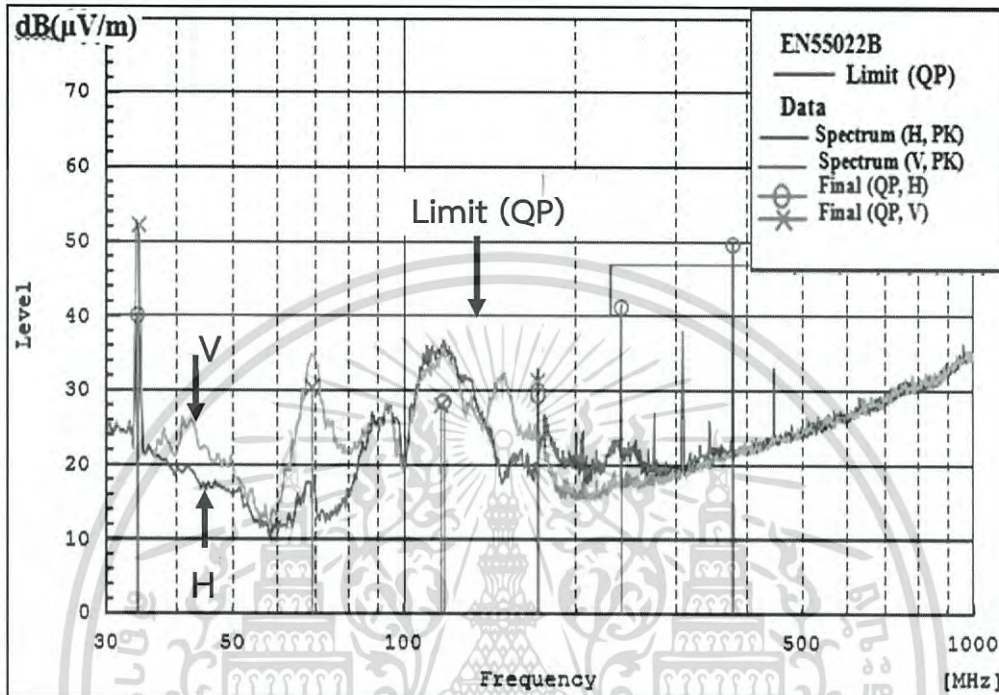
รูปที่ 4.43 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์ร่วมและไม่มีการชิลด์)

Final Result							
No.	Frequency [MHz]	(P)	Reading QP [dB (µV)]	c.f [dB (1/m)]	Result QP [dB (µV/m)]	Limit QP [dB (µV/m)]	Margin QP [dB]
1	33.933	V	73.6	-17.5	56.1	40.0	-16.1
2	102.545	V	41.5	-15.7	25.8	40.0	14.2
3	171.157	V	51.0	-19.3	31.7	40.0	8.3
4	239.769	V	53.6	-15.5	38.1	47.0	8.9
5	375.912	V	50.4	-12.1	38.3	47.0	8.7
6	33.933	H	53.5	-17.5	36.0	40.0	4.0
7	102.545	H	43.4	-15.7	27.7	40.0	12.3
8	171.157	H	48.8	-19.3	29.5	40.0	10.5
9	239.769	H	59.0	-15.5	43.5	47.0	3.5
10	375.912	H	57.5	-12.1	45.4	47.0	1.6

รูปที่ 4.44 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกราวด์ร่วมและไม่มีการชิลด์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.18 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์ร่วมและมีการชิลด์)



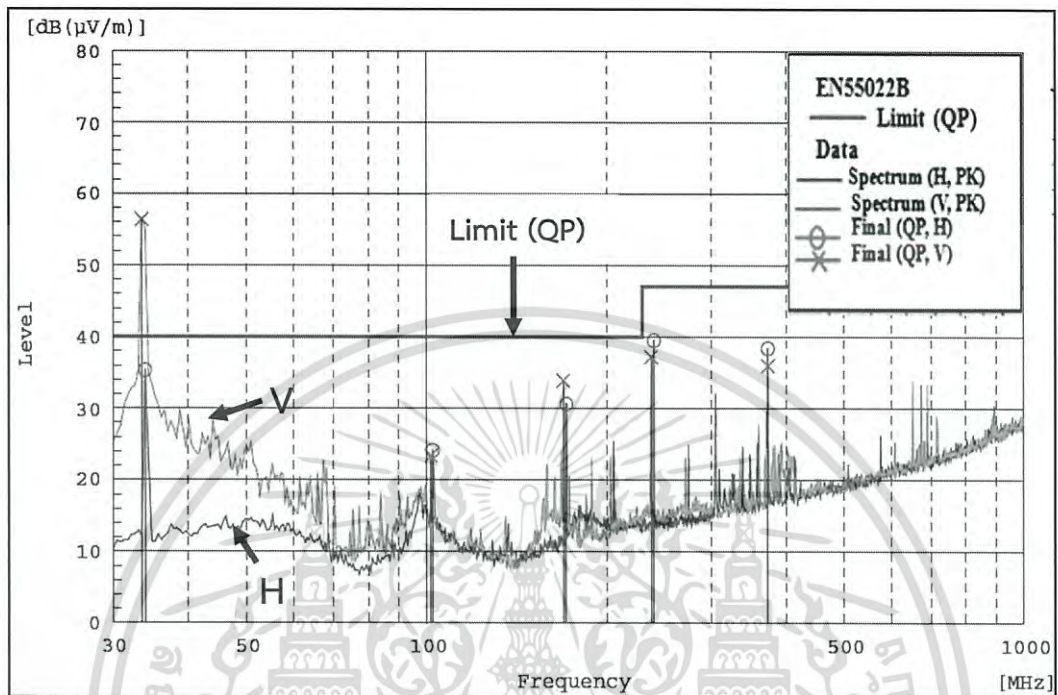
รูปที่ 4.45 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์ร่วมและมีการชิลด์)

Final Result							
No.	Frequency [MHz]	(P)	Reading QP [dB (?V)]	c.f [dB (1/m)]	Result QP [dB (?V/m)]	Limit QP [dB (?V/m)]	Margin QP [dB]
1	34.310	V	60.2	-8.0	52.2	40.0	-12.2
2	68.895	V	50.1	-19.7	30.4	40.0	9.6
3	116.093	V	42.8	-14.8	28.0	40.0	12.0
4	171.594	V	45.3	-14.0	31.3	40.0	8.7
5	34.096	H	47.9	-7.8	40.1	40.0	-0.1
6	117.404	H	43.2	-14.7	28.5	40.0	11.5
7	171.594	H	43.3	-14.0	29.3	40.0	10.7
8	240.206	H	54.2	-13.0	41.2	47.0	5.8
9	377.426	H	58.1	-8.5	49.6	47.0	-2.6

รูปที่ 4.46 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งและชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป, ต่อกราวด์ร่วมและมีการชิลด์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.19 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่มาจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกรวด์ร่วมและมีการชิลด์)



รูปที่ 4.47 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่มาจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกรวด์ร่วมและมีการชิลด์)

Final Result							
No.	Frequency [MHz]	(P)	Reading QP [dB (µV)]	c.f [dB(1/m)]	Result QP [dB (µV/m)]	Limit QP [dB (µV/m)]	Margin QP [dB]
1	33.496	V	74.0	-17.6	56.4	40.0	-16.4
2	101.671	V	39.0	-15.6	23.4	40.0	16.6
3	169.409	V	53.3	-19.4	33.9	40.0	6.1
4	237.584	V	52.8	-15.6	37.2	47.0	9.8
5	372.513	V	48.2	-12.2	36.0	47.0	11.0
6	33.933	H	52.8	-17.5	35.3	40.0	4.7
7	102.545	H	39.8	-15.7	24.1	40.0	15.9
8	171.457	H	49.8	-19.2	30.6	40.0	9.4
9	240.206	H	55.0	-15.5	39.5	47.0	7.5
10	372.513	H	50.6	-12.2	38.4	47.0	8.6

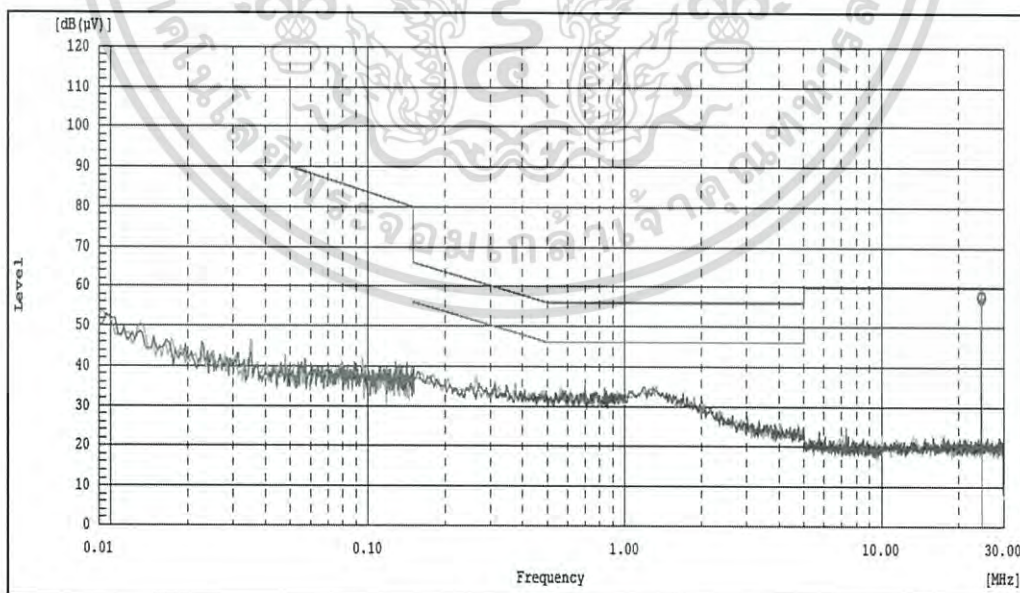
รูปที่ 4.48 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่มาจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ, ต่อกรวด์ร่วมและมีการชิลด์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 4.33, 4.35, 4.37, 4.39, 4.41, 4.43, 4.45 และ 4.47 พบว่า เส้นสีแดงคือเส้นที่พิกัดของค่าสูงสุดเสมือน (Quasi peak) โดยที่กราฟเส้นสีแดงคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกทางอากาศในแนวแกนนอน (Horizontal) และกราฟเส้นสีเขียวคือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกทางอากาศในแนวแกนตั้ง (Vertical)

เมื่อทำการทดสอบวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์และชุดจูนเนอร์ในกรณีต่างๆแล้ว สรุปได้ว่าการต่อกราวด์หลายจุดและมีการชิลด์ที่อุปกรณ์สวิตซ์และชุดจูนเนอร์ (ที่ได้มีการออกแบบ) สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางอากาศได้ดีกว่าอุปกรณ์สวิตซ์และชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป) โดยเฉพาะที่ความถี่สูงอย่างเห็นได้ชัดและอยู่ในระดับที่ไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้อยู่มาก จะเห็นว่าข้อมูลในคอลัมน์ Margin QP [dB] ทั้งในแนวแกนนอน (Horizontal) และในแนวแกนตั้ง (Vertical) มีค่าเป็นบวกตลอดทั้งช่วงความถี่ 30 MHz ถึง 1000 MHz

สังเกตจากผลทดสอบวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์และชุดจูนเนอร์ ซึ่งแต่ละ peak ที่เกิดขึ้นเป็นความถี่ของชุดจูนเนอร์วิทยุ FM เป็น peak ที่นิ่งและเป็นฮาร์มอนิกส์ จากนั้นได้ทำการปรับชุดจูนเนอร์โดยการหมุนปรับค่าความถี่ไปทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (ซ้ายมือสุด) แสดงในรูปที่ 4.49 และ 4.51, ตรงกลาง แสดงในรูปที่ 4.53 และทิศทางตามเข็มนาฬิกา (ขวามือสุด) แสดงในรูปที่ 4.55 ซึ่งค่า peak แต่ละความถี่ที่เกิดขึ้นเปลี่ยนไปอย่างเห็นได้ชัด เพราะชุดจูนเนอร์วิทยุ FM มีหน้าที่รับสัญญาณที่สถานีวิทยุ FM ส่งคลื่นออกอากาศที่ความถี่ต่างๆ (88-108MHz) จึงจำเป็นต้องจูนเพื่อหาคลื่นสถานีวิทยุ FM ที่ต้องการจะรับฟัง

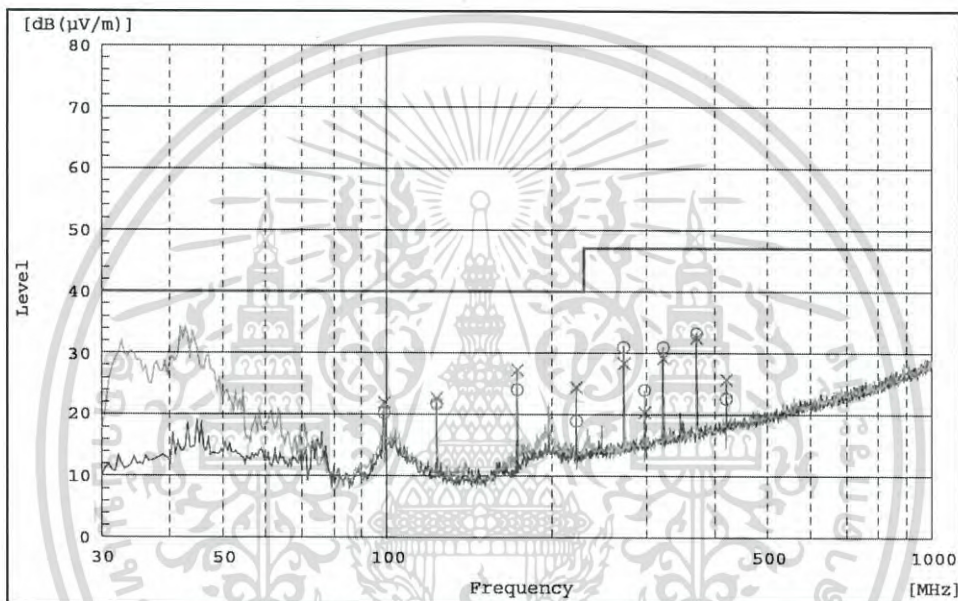


รูปที่ 4.49 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์และชุดจูนเนอร์ (หมุนทวนเข็มนาฬิกา (ซ้ายมือสุด))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Final Result										
--- N Phase ---										
No.	Frequency	Reading QP	Reading CAV	c.f	Result QP	Result CAV	Limit QP	Limit AV	Margin QP	Margin CAV
	[MHz]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB]	[dB]
1	24.6092	46.7	47.1	10.7	57.4	57.8	60.0	50.0	2.6	-7.8
--- L1 Phase ---										
No.	Frequency	Reading QP	Reading CAV	c.f	Result QP	Result CAV	Limit QP	Limit AV	Margin QP	Margin CAV
	[MHz]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB (µV)]	[dB]	[dB]
1	24.6092	46.7	47.1	11.0	57.7	58.1	60.0	50.0	2.3	-8.1

รูปที่ 4.50 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (หมุนทวนเข็มนาฬิกา (ซ้ายมือสุด))

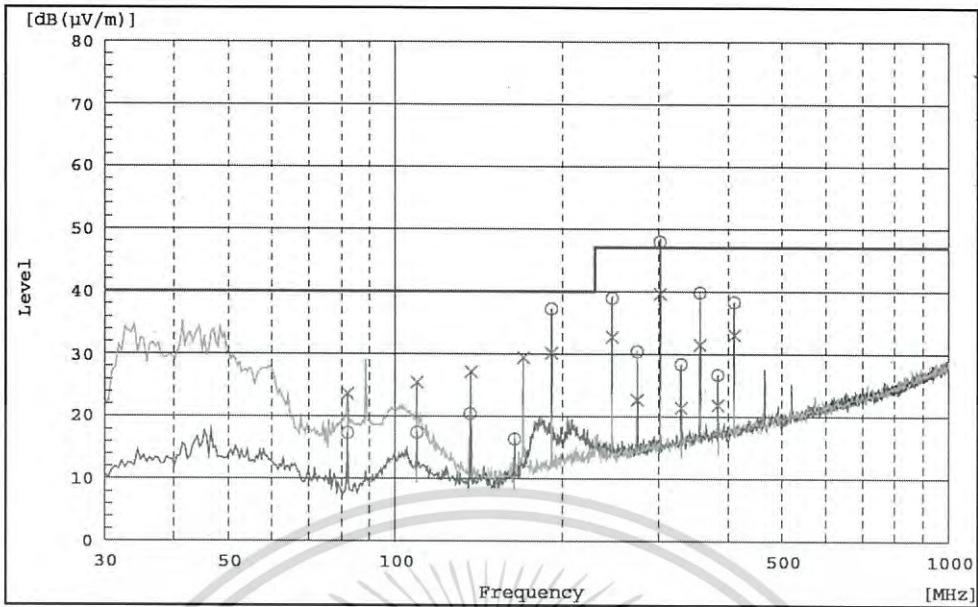


รูปที่ 4.51 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (หมุนทวนเข็มนาฬิกา (ซ้ายมือสุด))

Spectrum Selection						
--- Horizontal Polarization ---						
No.	Frequency	Reading	c.f	Result PK	Limit QP	Margin QP
	[MHz]	[dB (µV)]	[dB (1/m)]	[dB (µV/m)]	[dB (µV/m)]	[dB]
1	99.049	36.0	-15.7	20.3	40.0	19.7
2	123.522	41.4	-19.6	21.8	40.0	18.2
3	173.342	43.1	-19.1	24.0	40.0	16.0
4	222.726	35.0	-16.0	19.0	40.0	21.0
5	272.109	45.8	-14.8	31.0	47.0	16.0
6	297.019	38.2	-14.2	24.0	47.0	23.0
7	321.527	44.5	-13.5	31.0	47.0	16.0
8	370.247	45.4	-12.2	33.2	47.0	13.8
9	420.099	33.9	-11.3	22.6	47.0	24.4

รูปที่ 4.52 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (หมุนทวนเข็มนาฬิกา (ซ้ายมือสุด))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

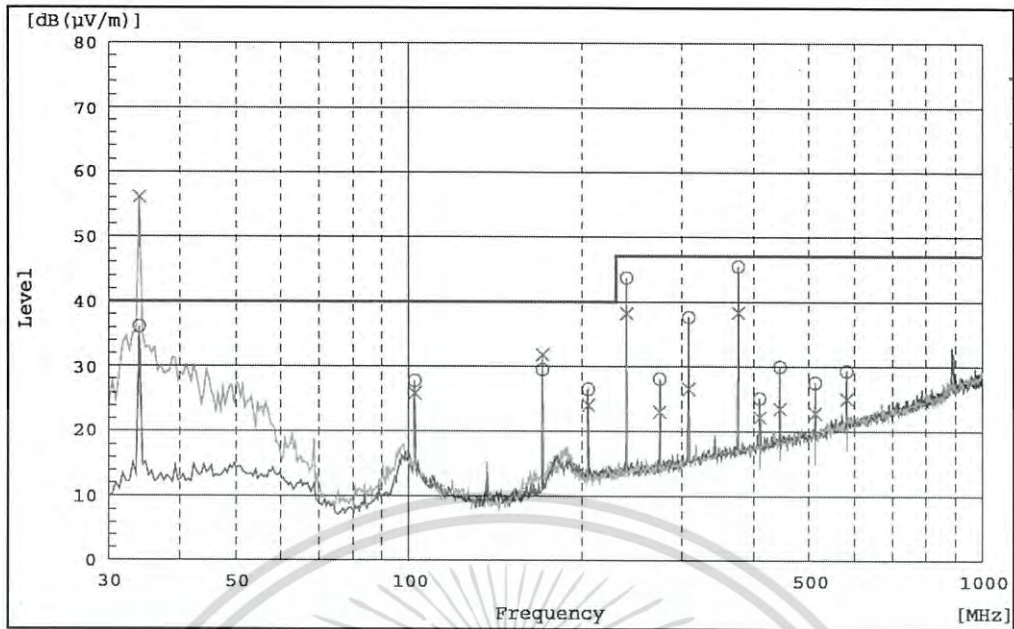


รูปที่ 4.53 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (หมุนไปที่ตรงกลาง)

Spectrum Selection						
--- Horizontal Polarization ---						
No.	Frequency	Reading	c.f	Result	Limit	Margin
	[MHz]	[dB (µV)]	[dB (1/m)]	PK [dB (µV/m)]	QP [dB (µV/m)]	QP [dB]
1	82.005	38.6	-21.2	17.4	40.0	22.6
2	109.538	34.7	-17.3	17.4	40.0	22.6
3	136.633	41.0	-20.5	20.5	40.0	19.5
4	164.165	36.1	-19.7	16.4	40.0	23.6
5	191.697	54.7	-17.4	37.3	40.0	2.7
6	246.762	54.3	-15.3	39.0	47.0	8.0
7	273.857	45.2	-14.7	30.5	47.0	16.5
8	301.133	62.1	-14.1	48.0	47.0	-1.0
9	328.325	41.7	-13.3	28.4	47.0	18.6
10	355.518	52.4	-12.6	39.8	47.0	7.2
11	382.710	38.7	-12.0	26.7	47.0	20.3
12	409.902	49.7	-11.4	38.3	47.0	8.7

รูปที่ 4.54 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (หมุนไปที่ตรงกลาง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.55 ผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (หมุนตามเข็มนาฬิกา (ขวามือสุด))

--- Horizontal Polarization ---						
No.	Frequency [MHz]	Reading [dB (µV)]	c.f [dB (1/m)]	Result PK [dB (µV/m)]	Limit QP [dB (µV/m)]	Margin QP [dB]
1	33.933	53.6	-17.5	36.1	40.0	3.9
2	102.545	43.5	-15.7	27.8	40.0	12.2
3	171.157	48.8	-19.3	29.5	40.0	10.5
4	205.682	43.2	-16.7	26.5	40.0	13.5
5	239.769	59.2	-15.5	43.7	47.0	3.3
6	273.857	42.8	-14.7	28.1	47.0	18.9
7	307.931	51.5	-13.9	37.6	47.0	9.4
8	375.912	57.6	-12.1	45.5	47.0	1.5
9	409.902	36.6	-11.4	25.2	47.0	21.8
10	445.026	40.8	-10.8	30.0	47.0	17.0
11	513.006	37.2	-9.6	27.6	47.0	19.4
12	582.120	37.5	-8.2	29.3	47.0	17.7

รูปที่ 4.56 ข้อมูลผลการวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตชิงและชุดจูนเนอร์ (หมุนตามเข็มนาฬิกา (ขวามือสุด))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ที่แพร่ออกมาจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งความถี่สูงทั้งทางสายตัวนำและทางอากาศในขณะที่อุปกรณ์ทำงาน ซึ่งจะสนใจในการวัดสัญญาณรบกวนที่แพร่ออกมาจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งที่ต่อเข้ากับชุด Tuner (วิทยุ FM) และทำการลดทอนสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้วิธีการกราวด์ (Grounding) และการชิลด์ (Shielding) และนำผลการทดลองนี้มาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน EN55022 Class B เพื่อดูว่าสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้มากน้อยแค่ไหน

ผลการทดลองวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์และชุดจูนเนอร์ (ต่อกราวด์หลายจุด) และทดสอบวัดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์และชุดจูนเนอร์ (ต่อกราวด์ร่วม) นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับมาตรฐาน EN55022 class B พบว่ามีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในระบบอยู่ในระดับเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ จะเห็นว่าข้อมูลในคอลัมน์ Margin QP [dB] ส่วนใหญ่ทั้งในสายไลน์และสายนิวทรัลมีค่าติดลบในช่วงความถี่ 150 kHz ถึง 180 kHz สรุปได้ว่าการต่อกราวด์ร่วมสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำได้เล็กน้อยในชุดอุปกรณ์สวิตซ์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป) ส่วนในชุดอุปกรณ์สวิตซ์ (ที่ได้มีการออกแบบ) มีการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในระบบอยู่ในระดับที่ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศ เห็นได้ชัดว่าชุดจูนเนอร์มีผลกระทบต่อสัญญาณรบกวนทางอากาศซึ่งมีค่าที่เกินมาตรฐานอยู่มาก

ผลการทดลองวัดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่แพร่ออกจากอุปกรณ์สวิตซ์และชุดจูนเนอร์ (ต่อกราวด์หลายจุดและมีการชิลด์) (ที่ได้มีการออกแบบ) สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางอากาศได้ดีกว่าอุปกรณ์สวิตซ์และชุดจูนเนอร์ (ที่ซื้อตามตลาดทั่วไป) โดยเฉพาะที่ความถี่สูงอย่างเห็นได้ชัด และอยู่ในระดับที่ไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้อยู่มาก จะเห็นว่าข้อมูลในคอลัมน์ Margin QP [dB] ทั้งในแนวแกนนอน (Horizontal) และในแนวแกนตั้ง (Vertical) มีค่าเป็นบวกตลอดทั้งช่วงความถี่ 30 MHz ถึง 1000 MHz ซึ่งสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางอากาศได้ถึง 10 dB

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองการต่อกราวด์ร่วมสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำได้เล็กน้อยและการต่อกราวด์หลายจุดกับมีการชิลด์ที่อุปกรณ์สวิตซ์และชุดจูนเนอร์สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางอากาศได้ดีโดยเฉพาะที่ความถี่สูงอย่างเห็นได้ชัด สุดท้ายนี้วิธีทั้ง 2 นี้มีผลกระทบต่อสัญญาณรบกวนที่แพร่มาจากอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งที่ต่อกับเครื่องรับวิทยุ FM ดังนั้นงานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาและต่อยอดได้ โดยใช้วิธีการกราวด์ (Grounding) และการชิลด์ (Shielding) เพื่อแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบในการวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำและทางอากาศ เมื่อมีการใช้จ่ายพลังงานให้ภาระทางไฟฟ้าจะทำให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องวิเคราะห์และแก้ไขเพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในส่วนนี้ด้วย โดยสัญญาณรบกวนเกิดจากปัจจัยหลายอย่างเช่น ผลจากการออกแบบสายวงจร จำนวนของจุดต่อเชื่อม ความยาวสายตัวนำ และไม่มีการชิลด์ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการลดรูปของสายวงจร เพิ่มจุดต่อเชื่อมลงกราวด์ ลดความยาวสายตัวนำ และมีการชิลด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Mohammed Laour, Redouane Tahmi, and Christian Vollaire, "Modeling and Analysis of Conducted and Radiated Emissions Due to Common Mode Current of a Buck Converter", **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, vol. 59, no. 4, August 2017
- [2] Zoran Vrankovic, Gary L, Skibinski, and Craig Winterhalter, "Novel Double Clamp Methodology to Reduce Shielded Cable Radiated Emissions Initiated by Electronic Device Switching", **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 53, no. 1, January/February 2017
- [3] Philip Keebler, Kermit Phipps, and Bill Howe, "Electromagnetic Compatibility (EMC) concerns for distributed generation technologies", **Electrical Power Quality and Utilisation Magazine**, 2005.
- [4] Mathew N. O. Sadiku, "Electromagnetic Compatibility", **IEEE**, 1992
- [5] Kim Fowler, "Grounding and Shielding, Part 2-Grounding and Return", **IEEE Instrumentation and Measurement Magazine**, June 2000.
- [6] Jin Meng, Weiming Ma, Qijun Pan, Lei Zhang, and Zhihua Zhao, "Multiple Slope Switching Waveform Approximation to Improve Conducted EMI Spectral Analysis of Power Converters", **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, vol. 48, no. 4, pp. 742-751, November 2006.
- [7] ประสิทธิ์ ทีฆพุดิ และ ไกรสร อัญชลีวรรณ. EMC 1: มาตรฐานอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ มาตรฐานและการทดสอบ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [8] Pablo Zumel, Oscar García, Jesús A. Oliver, and José A. Cobos, "Differential-Mode EMI Reduction in a Multiphase DCM Flyback Converter", **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 24, no. 8, pp. 2013-2020, August 2009.
- [9] L.G. Bhatgadde, S. Joseph, "Electroless Techniques for EMI Shieldings", **IEEE Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility**, pp. 443-445, 1997.
- [10] Li Shufang, Pan Yang Beijing Univ. of Posts & Telecomm.P.O. Box 171, 100876 "EMC Application in 340M RF Transceiver", **IC EMC Internation Conference on Electromagnetic Compatibility**, Phuket 2005.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] Parisa Dehkhoda, Ahad Tavakoli, and Mohammad Azadifar, "Shielding Effectiveness of an Enclosure With Finite Wall Thickness and Perforated Opposing Walls at Oblique Incidence and Arbitrary Polarization by GMMoM", **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, vol. 54, no. 4, pp. 792-805, August 2012
- [12] Valentin Preault, Romain Corcolle, Laurent Daniel, and Lionel Pichon, "Effective Permittivity of Shielding Composite Materials for Microwave Frequencies", **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, vol. 55, no. 6, pp. 1178-1186, December 2013
- [13] T. Dumrongkittigule, P. Khamphakdi, W. Khan-ngern, and C. Chat-uthai, "The Study of Low Frequency Magnetic Field Shielding Causing by Power Transformer", **IC EMC Internation Conference on Electromagnetic Compatibility**, Phuket 2005.
- [14] P. Van der Laan, M. Van Houten, A. Van Deursen, "A grounding philosophy", **Proc. IEEE Symposium on Electromagnetic compatibility**, CD-ROM Symposia Records1955-1995.
- [15] Edward C. Cantwell, "Effective grounding- The key to personnel and proper equipment operation", **Proc. IEEE Symposium on Electromagnetic compatibility**, pp 194-199, 1980.
- [16] Mdhisam, Rezad, "Ground loop and Secondary Lightning Protection: A Case Study", **IC EMC Internation Conference on Electromagnetic Compatibility**, Phuket 2005.
- [17] J.B. Wang "Reduction in conducted EM1 noises of a switching power supply after thermal management design", **IEEE Proceedings**, vol. 150, no. 3, pp. 301-310, May 2003
- [18] Qian Liu, Fred Wang, and Dushan Boroyevich, Fellow, "Conducted- EMI Prediction for AC Converter Systems Using an Equivalent Modular-Terminal-Behavioral (MTB) Source Model", **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 43, no. 5, pp. 1360-1370, September/October 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [19] CISPR22. Information technology equipment Radio disturbance characteristic Limit and methods of measurement. Amendment 2, 2002-10.
- [20] Diego M. Cortés-Hernández, Reydezel Torres-Torres, Oscar González-Díaz, and Mónico Linares-Aranda, "Experimental Characterization of Frequency-Dependent Series Resistance and Inductance for Ground Shielded On-Chip Interconnects", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 6, December 2014
- [21] L. F. Tiemeijer, R. M. T. Pijper, R. J. Havens, and O. Hubert, "Low-loss patterned ground shield interconnect transmission lines in advanced IC processes," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 55, no. 3, pp. 561–570, Mar. 2007.
- [22] Vuttipon Tarateeraseth, "Educationnal Laboratory Experiments on EMC in Power Electronics", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, pp. 55-60, 2014
- [23] B. K. Bose, "Global energy scenario and impact of power electronics in 21<sup>st</sup> century," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 7, pp. 2638–2650, Jul. 2013.
- [24] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, 2nd edition, John Wiley & Sons, 2006.
- [25] P.F. Miaja and et.al., "A switching-mode power supply design tool to improve learning in a power electronics course," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 54, no. 1, pp. 104-113, Feb. 2011.
- [26] S.A. Shirsavar, "Teaching practical design of switch-mode power supplies," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 47, no. 4, pp. 467-473, Nov. 2004.
- [27] L. Max and et.al., "Power electronics design laboratory exercise for final year M.Sc. students," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 52, no. 4, pp. 524-531, Nov. 2009.
- [28] D.G. Lamar and et.al., "Experiences in the application of project-based learning in a switching-mode power supplies course," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 55, no. 1, pp. 69-77, Feb. 2012.
- [29] Boon-Kuan Chung, "An experiment on the layout and grounding of power distribution wires in a printed circuit board," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 44, no. 4, pp. 315-321, Nov. 2001.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [30] W. Khan-Ngern and et.al., "Electromagnetic interference self-learning toolkit in switched-mode power supplies," **9th IEEE Workshop on Signal Propagation on Interconnects**, pp.209-212, 10-13 May 2005.
- [31] Michel Mardiguian, **Controlling Radiated Emissions by Design**, 2<sup>nd</sup> edition, Kluwer Academic Publisher, 2000.
- [32] D. Sakulhirak, and et al., "A new simultaneous conducted electromagnetic interference measuring and testing device", **The 19th International Zurich Symposium On Electromagnetic Compatibility**, APEMC 2008, 19-23 May 2008.
- [33] D. Gonzalez, J. Gago, and J. Balcells, "New simplified method for the simulation of conducted EMI generated by switched power converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, no. 6, pp. 1078-1084, Dec. 2003.
- [34] C. R. Paul, **Introduction to Electromagnetic Compatibility**. NewYork: Wiley, 1992.
- [35] X. Huang, J.-S. Lai, and E. Peta, "Analytical evaluation of modulation effect on three-phase inverter differential mode noise prediction," in **Proc. IEEE APEC**, 2004, vol. 2, pp. 681-687.
- [36] Pryor, Roger W. **Multiphysics modeling using COMSOL: a first principles approach** / Roger W. Pryor.

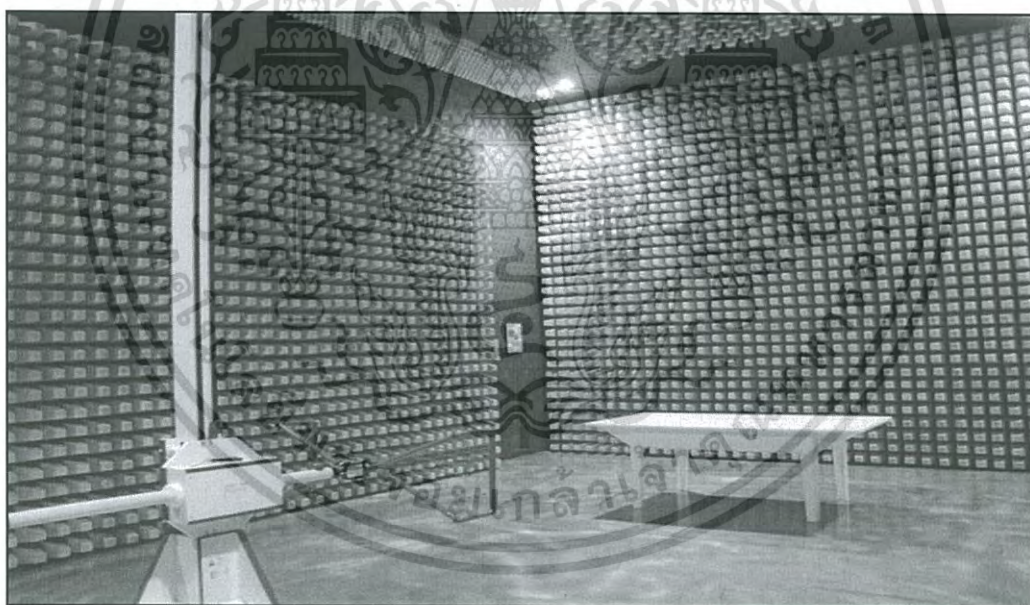


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



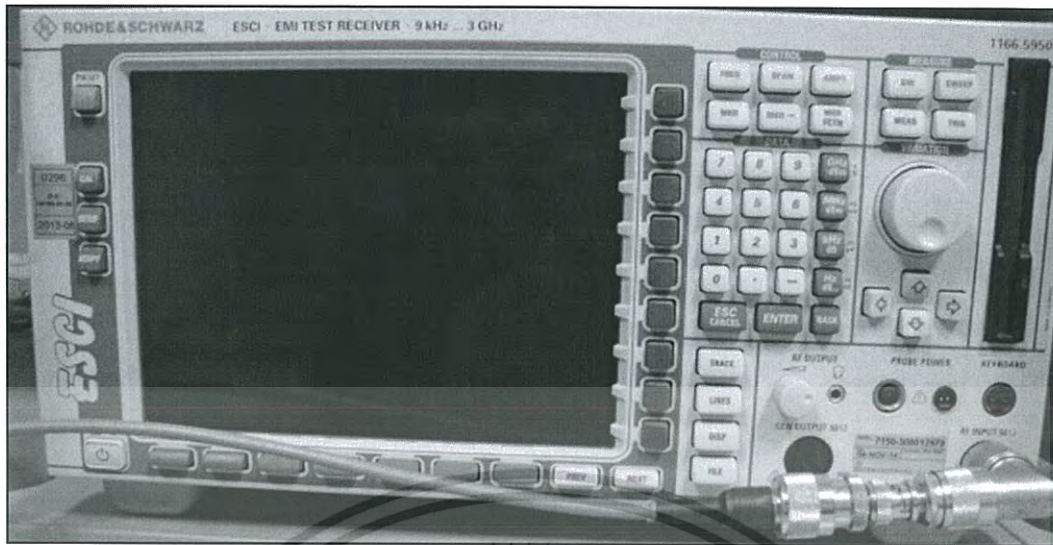


รูปที่ ก.1 ห้องทดสอบสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ



รูปที่ ก.2 ห้องทดสอบสำหรับวัดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 เครื่อง EMI TEST RECEIVER



รูปที่ ก.4 เครื่อง CONTROLLER ANTENNA



รูปที่ ก.5 เครื่อง CONTROLLER TURN TABLE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายปิยะวิทย์ ศรีโปดก
วัน เดือน ปีเกิด	30 เมษายน 2530 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ
ที่อยู่	204/379 (กองวิชาการอวุธร.ร.นายเรือ) ถ.สุขุมวิท ตำบลปากน้ำ อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ 10270
ประวัติการศึกษา	2553 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผลงานวิจัย	ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการและ วารสารวิชาการระดับนานาชาติทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าระหว่างศึกษา ปริญญาโท ซึ่งตีพิมพ์ในการประชุมชื่อ Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015 Vol II, IMECS 2015, March 18-20, 2015, Hong Kong

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015

IMECS 2015, 18-20 March, 2015, Hong Kong

The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists has been organized by the International Association of Engineers (IAENG), a non-profit international association for the engineers and the computer scientists. The IMECS 2015 takes place in The Royal Garden Hotel, Kowloon, Hong Kong, 18-20 March, 2015.

The focus of our conference is on the frontier topics in the theoretical and applied engineering and computer science subjects. The IMECS conferences have been serving as good platforms for our members and the entire engineering community to meet with each other and to exchange ideas. The conferences have also stroke a balance between theoretical and application development.

Our IMECS 2015 has been organized with conference committees that have been formed with over three hundred committee members who are mainly research center heads, faculty deans, department heads, professors, and research scientists from over 30 countries. The conferences are truly international meetings with a high level of participation from many countries.

The response that we have received for the multiconference is excellent. The IMECS 2015 has attracted more than six hundred participants from over 50 countries. All submitted papers have gone through the peer review process. The summary of submissions and accepted papers in IMECS 2015 is as followed: total number of submissions reviewed: 617; total number of accepted papers: 313. And the overall acceptance rate in our multiconference is 50.73%.

IMECS 2015

[►Conference Home](#)

[►Conference Committee](#)

[►Coming Conference](#)

[►Order Conference Publication](#)

[►Contact Us](#)

Join IAENG Now!

[►IAENG Membership](#) is free.

[►Our societies](#) welcome committee members too.

[►Our journals](#) are waiting for your involvement.

Editors: S. I. Ao and Oscar Castillo and Craig Douglas and David Dagan Feng and Jeong-A Lee

ISBN of Vol I (pp1-592): 978-988-19253-2-9

ISBN of Vol II (pp593-1045): 978-988-19253-9-8

ISSN: 2078-0958 (Print) / ISSN: 2078-0966 (Online)

Publisher: Newswood Limited

Organization: International Association of Engineers

CONFERENCE PAPERS:

## The 2015 IAENG International Conference on Artificial Intelligence and Applications

### Air Conditioning Control System Learning Sensory Scale Based on Reinforcement Learning

Yohei Yamaguchi, Noritaka Shigei, and Hiromi Miyajima

Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015, pp1-6 [\[Online Full Text\]](#)

Yohei Yamaguchi, Noritaka Shigei, and Hiromi Miyajima. "Air Conditioning Control System Learning Sensory Scale Based on Reinforcement Learning," *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015, 18-20 March, 2015, Hong Kong, pp1-6*

### Mutual Information based Feature Selection in Spectrometric Data for Agriculture Applications

L.J. Herrera, V. Lafuente, R. Ghinea, M.M Perez, J. Negueruela, H. Pomares, I. Rojas, and A. Guillen

Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015, pp7-13 [\[Online Full Text\]](#)

Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015, pp620-625 [\[Online Full Text\]](#)

A. K. Kishorekumar, P. Kaseyapam, J. Kaseyapam, and P. Wairasi. "Enhanced Mathematical Model by Studying Fundamental Parameters of Hydroponics-based Resilient Oscillator." *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015*, 18-20 March 2015, Hong Kong, pp620-625.

Economic and Environmental Impact Assessment of Micro Grid

Su Youli

Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015, pp626-629 [\[Online Full Text\]](#)

Su Youli. "Economic and Environmental Impact Assessment of Micro Grid." *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015*, 18-20 March 2015, Hong Kong, pp626-629.

Mitigation of Conducted and Radiated EMI Generation in High-Frequency Switching Devices

P. Sripodok, and C. Jettanasen

Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015, pp630-633 [\[Online Full Text\]](#)

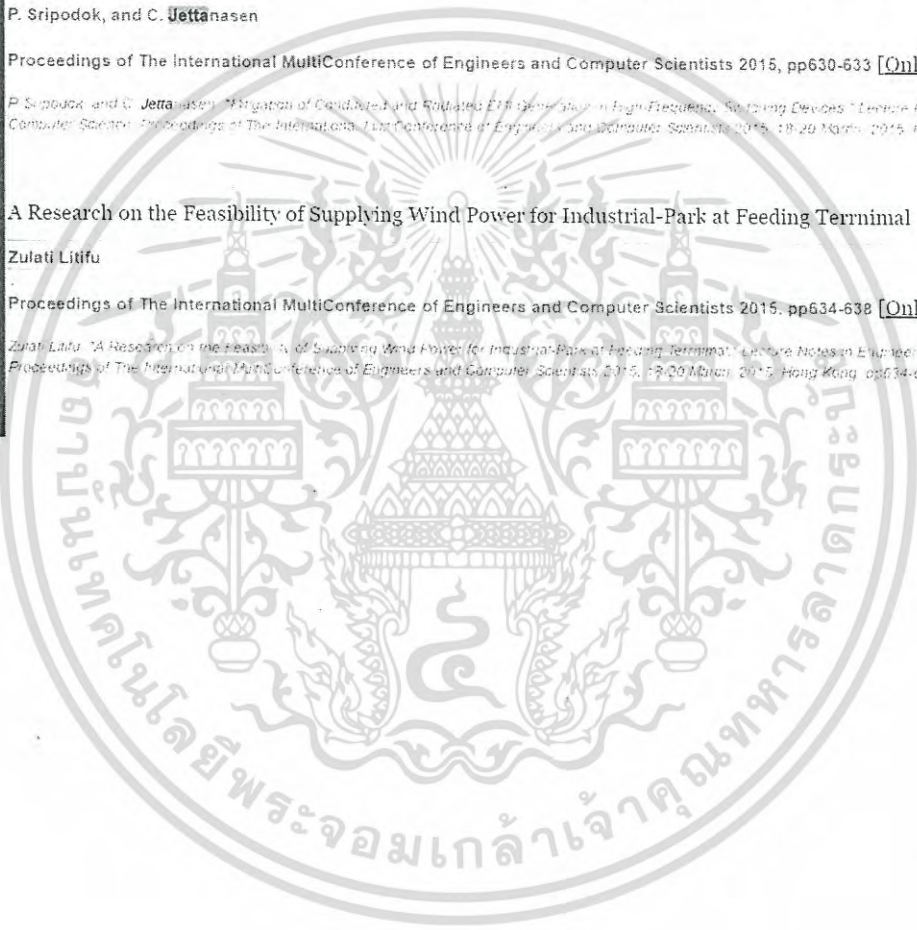
P. Sripodok, and C. Jettanasen. "Mitigation of Conducted and Radiated EMI Generation in High-Frequency Switching Devices." *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015*, 18-20 March 2015, Hong Kong, pp630-633.

A Research on the Feasibility of Supplying Wind Power for Industrial-Park at Feeding Terminal

Zulati Litifu

Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015, pp634-638 [\[Online Full Text\]](#)

Zulati Litifu. "A Research on the Feasibility of Supplying Wind Power for Industrial-Park at Feeding Terminal." *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015*, 18-20 March 2015, Hong Kong, pp634-638.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Mitigation of Conducted and Radiated EMI Generation in High-Frequency Switching Devices

P. Sripodok, and C. Jettanasen

**Abstract**—The purpose of this paper is to investigate the electromagnetic interference (EMI) propagation paths and how to mitigate these generated high-frequency noises in high-frequency switching devices. Both conducted and radiated EMI can be produced when the devices are in operation. This results in restriction of power electronic devices' evolution. In order to effectively reduce EMI generation or overcome EMI problems, an Electromagnetic Compatibility (EMC) regulation should be applied. The conformity to the standard will guarantee the performance and the compatibility of the electrical/electronic devices/equipments to be employed or installed in the sensitive electromagnetic environment. The EMC standard is defined in the frequency range of 150 kHz to 1 GHz: 150 kHz to 30 MHz for conducted emission measurement and 30 MHz to 1GHz for radiated emission one. A switching device connecting to tuner kit (FM radio) is herein focused as an EMI source. The generated noises will be reduced by using grounding and shielding methods. The obtained results will be compared with an EMC standard (EN55022 class B) in order to reveal the effectiveness of the applied EMI mitigation techniques. The analysis and experimental results finally show that the conducted emission can be diminished by using multi-point grounding whereas the radiated emission is effectively reduced by using single-point grounding and shielding, in particular at high frequencies.

**Index Terms**—Electromagnetic interference (EMI), grounding, high-frequency switching devices, mitigation technique, shielding

## I. INTRODUCTION

NOWADAYS, high-frequency switching devices have been increasingly employed in many domestic and industrial applications owing to their numerous advantages. A car radio receiver or a portable radio receiver, which mainly receives AM/FM signal from broadcasting station, is an example of high-switching frequency devices that may be sometimes in radio signal interference situation. Hence, the considered EMC problem herein is focused on undesirable electromagnetic noises issued from the switching device and/or tuner kit (FM radio) that can interfere with the normal

Manuscript received December 10, 2014.

P. Sripodok is presently a student in Electrical Engineering Master program at KMITL. His research interest is EMI/EMC in high-frequency switching devices. (e-mail: piyawits@hotmail.com)

C. Jettanasen is currently an assistant professor in Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok 10520, Thailand. His research interest is EMC in power electronic systems. (e-mail: kichaiya@kmitl.ac.th)

operation of the other nearby electrical/electronic devices or systems. This will affect the functionality of the radio-navigation system and communication services. The main principle in controlling the EMI noise level is to know the EMI propagation paths and to investigate the fundamental frequency of the conducted and radiated noises of the generation devices [1], [2]. There are a number of traditional and innovative conducted and/or radiated EMI attenuation techniques; however, this paper focuses principally on grounding and shielding techniques. Different configurations of grounding and shielding will be carried out. Ground is a main path in an electrical/electronic circuits/systems; it can cause severe problem to most sensitive electronic devices as well as telecommunication equipments if it is not properly connected or wired. For some applications, a noise may be added to original signal, and then, causes the AC line frequency hum in the system. In any systems, a ground loop can be unintentionally created when there is more than one ground connection part between two parts of equipment and interconnection via signal line or power line. The ground loop is a complete circuit consisting of the signal path and part of ground structure, which has two characteristics. First, it has multiple ground connection that provides multiple return paths: these allow significant flowing current in the grounding structure. Second, it unbalances the circuit. Either circuit isolation or balance may remove the mentioned problem [3]. For shielding technique, it is based on absorbing or echoing electromagnetic energy via all kinds of shielded material to prevent external interference (passive shielding) or restricting devices electromagnetic energy in certain area to prevent interfering other devices (initiative shielding). Both grounding and shielding methods will be applied to the studied system, which is the FM radio signal receiver kit.

## II. STUDIED SYSTEM, EMI TESTING, AND EMI ATTENUATION TECHNIQUES

### A. Studied System

The studied system is an FM radio signal receiver kit, consisting of 1) switching devices connected to 220Vac supply, 2) regulator used to adjust dc voltage from input 12Vdc to output 9Vdc, and 3) tuner connecting to antenna to receive FM radio signal from broadcasting station. The block diagram is shown in Fig. 1.

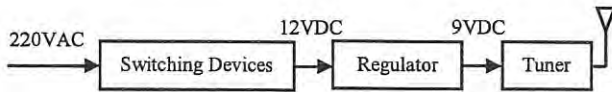


Fig. 1. Block diagram of the studied system

**B. Setup for Conducted Emission Testing**

The conducted EMI emission measurement is normally carried out in a shielded enclosure in EMC laboratory. The conducted emission is measured from 9 kHz to 30 MHz according to EMC standard (such as CISPR, EN, FCC standards). The measurement procedure requires EMI receiver and line impedance stabilization network (LISN) with 50Ω/50μH impedance for testing. The LISN must be inserted between the equipment under test (EUT) and the ac utility line to provide specified measuring impedance for noise voltage measurement. It also serves to isolate the EUT and the measuring equipment from the utility at radio frequencies. The setup configuration of conducted emission is illustrated in Fig. 2. The EUT in Fig. 2 refers to the switching device and tuner.

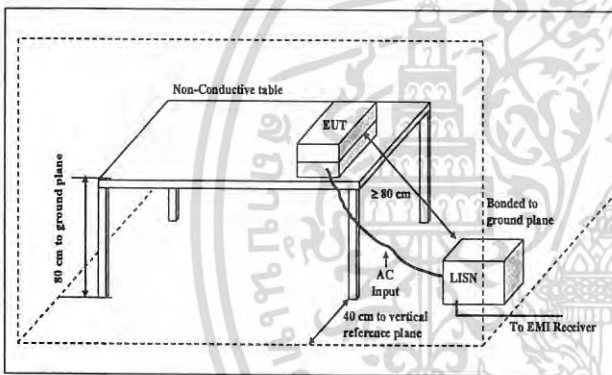


Fig. 2. Setup configuration of conducted emission testing

**C. Setup for Radiated Emission Testing**

The radiated emission measurement is performed with antenna and EMI receiver to observe the emission characteristics and identify the frequency of emission that has the highest amplitude relative to limit by operating the EUT with a typical configuration.

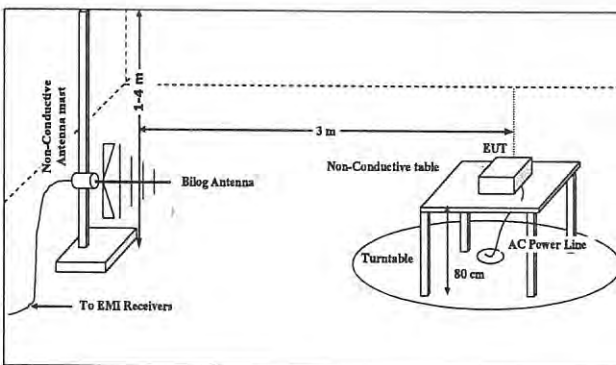


Fig. 3. Setup configuration of radiated emission testing

The EUT and cable configurations of operation are determined for producing the maximum level of emissions. The EUT is placed on the 80cm height non-metallic table on a 1m radius turntable. The Bi-Log antenna (30MHz–2GHz) is used to receive the noises of EUT and put on the antenna mast. They are all inside the semi-anechoic chamber. The testing method and the EUT setup are performed according to EN 55022. The EUT setup configuration is shown in Fig. 3.

**D. Grounding Technique**

Grounding technique is a kind of traditional EMI mitigation techniques. It can be applied either single-point grounding or multi-point grounding; it depends on the noise frequency intended to be reduced. The objective of grounding technique is to minimize the ground impedance, and thus to reduce the potential of the ground loop from circuit of switching devices. Where the external current in the ground structure generates potential difference between the ground connections then the duplicate ground paths form the equivalent of a loop antenna which very efficiently picks up interference currents. The induced voltage by this grounding loop can be determined using equation (1) [3].

$$V_{induced} = \frac{-d\phi}{dt} = -s \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

Where  $s$  is the loop area in  $m^2$ , and  $dB/dt$  is a change in time of magnetic flux intensity through the vertical of loop. As a consequence of ground loop induced voltages, the ground reference in the system is no longer a stable potential, so signal overlaps with the noise. The induced voltage is expressed in equation (2) [3].

$$V = i_g (r_g + j\omega L_g) - s \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

Where  $i_g$  is an instantaneous current, and  $(r_g + j\omega L_g)$  is impedance at point  $g$  referenced to earth [2]. Two grounding techniques are considered in this study. The single-point grounding is generally good for low current ( $< 1$  A) and low frequency range ( $< 1$  MHz) while the multi-point grounding is normally effective for high current ( $> 1$  A) and high frequency range ( $> 100$  kHz) [4]. The single-point grounding connection is illustrated in Fig. 4 it has effect to radiated emission and the multi-point grounding connection is illustrated in Fig. 5; this affects to conducted emission.

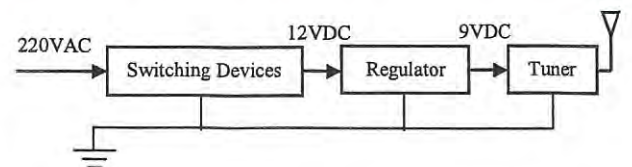


Fig. 4. Single-point grounding configuration

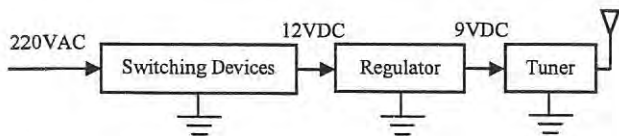


Fig. 5. Multi-point grounding configuration

E. Shielding Technique

Shielding technique is usually used for radiated EMI reduction. Shielding is absorbing or echoing electromagnetic energy via all kinds of shielded material to prevent external interference (passive shielding) or restricting devices electromagnetic energy in certain area to prevent interfering other devices (initiative shielding). Hence, shielding has similar property to Faraday cage. Shielding is important technology of restraining EMI as good restraining effect on not only radiant interference but also electrostatic interference, engineering design, good shielding is realized under breezy condition. In communication system, shielding is commonly a thin piece of metal that is placed between a circuit board and other circuit boards or electronic equipment and on is a thin metal placed on a casing that contains the circuit board [5]. The shielding made of shielding tapes and/or metal case/sheet can be employed to directly reduce or restrict radiated emissions. The main parameter related to this kind of electromagnetic noise is skin depth, which is defined as the distance from the surface of the metal where the current density has fallen to 1/e or 37 percent of its value at the surface. The relationship between material properties and skin depth of the shielding metal is shown in equation (3) and added protection sheet for shielding is depicted in Fig. 6. [6]

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (3)$$

Where  $\delta$  is skin depth (m),  $f$  is frequency (Hz),  $\mu$  is permeability with the relation of  $\mu = \mu_0 \mu_r$  (H/m) where  $\mu_0$  is permeability of free space, equal to  $4\pi \times 10^{-7}$  (H/m) and  $\mu_r$  is relative permeability, and  $\sigma$  is electric conductivity (S/m).

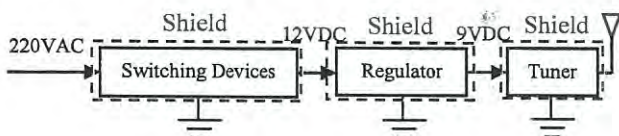


Fig. 6. Added protection sheet for shielding

III. RESULTS AND DISCUSSION

The switching device; a part of radio signal receiver generates conducted noise in frequency domain as shown in Fig. 7. It shows that its switching frequency is 25 kHz (the first harmonic) [7].

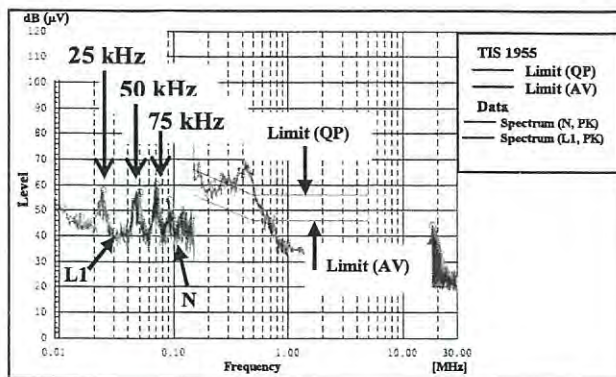


Fig. 7. Conducted noise generated by the switching device

According to the EMC standard, the EMI measurement of switching device will be carried out for both conducted and radiated emissions. The testing results of conducted and radiated noise level for only switching device (disconnected tuner kit) are illustrated in Fig. 8 and Fig. 9, respectively.

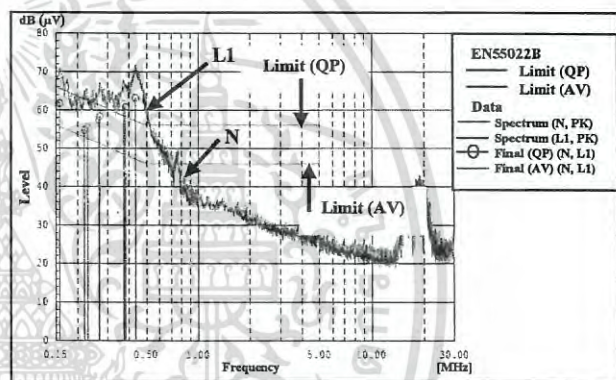


Fig. 8. Conducted noise generated by only switching device

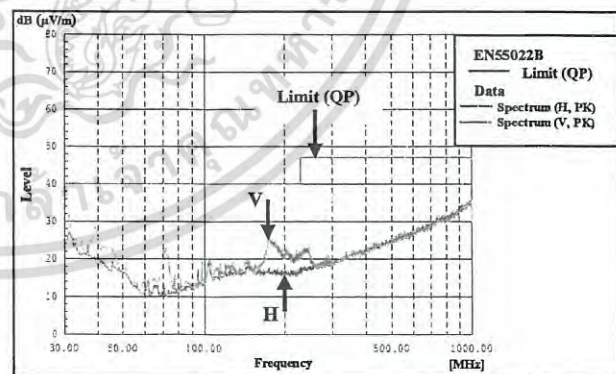


Fig. 9. Radiated noise generated by only switching device

Note that, conducted EMI level exceeds the standard in the frequency range of 150 kHz – 800 kHz while beyond these frequencies and in the frequency range of radiated emission, the generated EMI respects to the standard.

Then, the switching device connecting to tuner kit (FM radio) is taken into account for EMI emission measurement. The testing results of conducted and radiated noises for multi-point grounding and without shielding are illustrated in

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า