

การออกแบบกล่องชิลด์ความถี่สูงสำหรับแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซิ่ง

DESIGN OF HIGH FREQUENCY SHIELDING BOX FOR SWITCHING POWER SUPPLIES



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2546

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบกล่องชีลด์ความถี่สูงสำหรับแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซ์ซิ่ง
Design of high Frequency shielding box for Switching power supplies

ผู้จัดทำ

1. นาย เดชา แสงอุทัย
2. นาย ดุษฎี บุญธรรม
3. นาย วุฒิกร เกษรบัว
4. นาย สักดา เชาวหัต



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ดร. วีระเชษฐ์ ชินเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบกล่องซีลด์ความถี่สูงสำหรับแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซ์ซิ่ง

นายเดชา แสงอุทัย

นายคุณฎี บุญธรรม

นายวุฒิกร เกษรบัว

นายศักดิ์ดา เชาวทัต

รศ. ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2546

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาและนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย และคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องจะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่าสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย (Switching power supply) ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ ตัวอย่างเช่น 12 V, 5 V เป็นต้น

อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ทุกชนิดไม่เพียงแต่สร้างคุณประโยชน์จากการใช้งานเพียงอย่างเดียวเท่านั้น หากแต่ยังนำมาซึ่งปัญหาต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นอีกด้วย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาถึงปัญหาและแนวทางการแก้ไขปัญหานี้จากอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ (Transistor) หรือมอสเฟต (MOSFET) ซึ่งเป็นส่วนประกอบภายในสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย โดยปัญหาที่เกิดขึ้นคือในการทำงานของทรานซิสเตอร์หรือมอสเฟตได้สร้างสัญญาณออกมาอีกด้านหนึ่งเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูงและสัญญาณเหล่านี้ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียงหรืออยู่ในระยะที่ตัวสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายสามารถส่งสัญญาณไปถึง จากปัญหาที่เครื่องใช้ไฟฟ้าถูกรบกวนโดยสัญญาณความถี่สูงนี้จะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของเครื่องใช้ไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยและศึกษานี้คือการวัดค่าสัญญาณรบกวนจากสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย เพื่อให้ทราบถึง

- ประเภทของสัญญาณรบกวน
- ค่าของสัญญาณรบกวนที่วัดได้
- ตำแหน่งที่เกิดสัญญาณรบกวนมากที่สุด

จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดค่าดังกล่าวมาทำการซีลด์โดยเทคนิคการซีลด์นี้ได้ประยุกต์มาจากทฤษฎีการซีลด์ (Shield Theory)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF HIGH FREQUENCY SHIELDING BOX FOR SWITCHING POWER SUPPLIES

Mr. Deacha Sangauthai

Mr. Dussade Buntam

Mr. Wuttikorn Gaysornbua

Mr. Sukda Chaowatat

Assoc. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern Advisor

The Academic of year 2003

ABSTRACT

Recently, computer was developed and used widely. Every computer consists of Switching power supply which was supplied source of Direct Current to any appliance tools using low voltage Direct Current, for example 12 V and 5 V etc. However every appliance tools not only have usefulness but also to bring about EMI problems.

The objective of this research is to study and solve the effect of Transistor or MOSFET which was component of switching power supply by transforming signal from Alternating current to Direct Current. Moreover another operation give to bring about high frequency signal, extraction It also supply noise to other electric system.

The problem of appliance tools is noises from high frequency signal which give the affect to of appliance tools life. For these reason, this Thesis was occurred. The results of this study were as follow ; The noise signal were measured from within switching power supply, as the following.

- to specify the types of the noise signal.
- to measure the noise.
- to specify frequency domain

The result of this work can be achieved based on shielding technique using various type of shielding materials.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ ท่าน รศ. ดร. วีระเชษฐุ์ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นผู้ให้คำแนะนำความรู้ ความคิด ข้อมูลต่างๆ ตลอดแนวทางในการทำงาน และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ห้อง EMC Lab ทุกท่านที่ได้ให้กำลังใจและความรู้ต่างๆ ตลอดในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 อธิบายถึงปัญหาที่กำลังศึกษาและวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 แผนผังการดำเนินงาน.....	2
1.5 วิธีการดำเนินงาน.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็ก.....	3
2.1.1 ประวัติและความเป็นมา.....	3
2.1.2 นิยามของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็ก.....	4
2.1.3 หลักการพื้นฐานของกรรเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก.....	8
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็ก.....	10
2.2.1 สัญญาณรบกวน.....	11
2.2.1.1 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน.....	11
2.2.1.2 ทางเดินของสัญญาณรบกวน.....	12
2.2.1.3 สิ่งที่ได้รับผลกระทบและผลสัญญาณรบกวน.....	12
2.2.2 ทฤษฎี shield.....	13
2.2.2.1 ทฤษฎีสานาม (Field Theory).....	13
2.2.2.2 Wave Impedance.....	16
2.2.2.3 Metal Impedance.....	16
2.2.2.4 Skin depth.....	17
2.2.3 Shielding Effectiveness.....	17
2.2.3.1 Absorption Loss.....	17
2.2.3.2 Reflection Loss.....	24
2.2.3.3 Re-Reflection correction.....	24
2.3 บทสรุป.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1 ความหนา.....	43
4.2.1.1 ตารางแสดงผลการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ความหนาขนาด ต่างๆในแนวแกน x1.....	43
4.2.1.2 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ความหนาต่างๆ ที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz.....	44
4.2.1.3 ตารางแสดงผลการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ความหนาขนาด ต่างๆในแนวแกน x2.....	45
4.2.1.4 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ความหนาต่างๆ ที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz.....	46
4.2.1.5 ตารางแสดงผลการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ความหนาขนาด ต่างๆในแนวแกน x3.....	47
4.2.1.6 ตารางแสดงผลการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ความหนาขนาด ต่างๆในแนวแกน x3.....	49
4.2.1.7 บทสรุป.....	50
4.2.2 ขนาดการวางตัวของเนื้อสาร.....	50
4.2.2.1 ตารางแสดงการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กโดยการเปลี่ยนแนว การวางตัวของแผ่นทดสอบ 2 แผ่นในแนวแกน x1.....	51
4.2.2.2 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดจากการเปลี่ยนแนว การวางตัวของแผ่นทดสอบ 2 แผ่น ที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz.....	52
4.2.2.3 ตารางแสดงการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กโดยการเปลี่ยนแนว การวางตัวของแผ่นทดสอบ 2 แผ่นในแนวแกน x2.....	53
4.2.2.4 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดจากการเปลี่ยนแนว การวางตัวของแผ่นทดสอบ 2 แผ่น ที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz.....	54
4.2.2.5 ตารางแสดงการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กโดยการเปลี่ยนแนว การวางตัวของแผ่นทดสอบ 2 แผ่นในแนวแกน x3.....	55
4.2.2.6 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดจากการเปลี่ยนแนว การวางตัวของแผ่นทดสอบ 2 แผ่น ที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz.....	56
4.2.2.7 บทสรุป.....	57
4.2.3 ชนิดของวัสดุทดสอบ.....	58
4.2.3.1 ตารางการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กโดยการเปลี่ยน ชนิดของแผ่นทดสอบในแนวแกน x1.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.3.2 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดจาก การเปลี่ยนแผ่นทดสอบที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz.....	59
4.2.3.3 ตารางการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กโดยการเปลี่ยน ชนิดของแผ่นทดสอบในแนวแกน x2.....	60
4.2.3.4 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดจาก การเปลี่ยนแผ่นทดสอบที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz.....	61
4.2.3.5 ตารางการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กโดยการเปลี่ยน ชนิดของแผ่นทดสอบในแนวแกน x3.....	62
4.2.3.6 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดจาก การเปลี่ยนแผ่นทดสอบที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz.....	63
4.2.3.7 บทสรุป.....	64
4.3 การซัดด้วยใช้กล่องโลหะ.....	65
4.3.1 ตารางการผลิตของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นของกล่องโลหะ แต่ละชนิดในแนวแกน x1.....	65
4.3.2 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดการเปลี่ยนกล่องวัสดุ ทดสอบที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz.....	66
4.3.3 ตารางการผลิตของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นของกล่องโลหะ แต่ละชนิดในแนวแกน x2.....	67
4.3.4 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดการเปลี่ยนกล่องวัสดุ ทดสอบที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz.....	68
4.3.5 ตารางการผลิตของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นของกล่องโลหะ แต่ละชนิดในแนวแกน x3.....	69
4.3.6 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดการเปลี่ยนกล่องวัสดุ ทดสอบที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz.....	70
4.3.7 บทสรุป.....	72
4.4 ผลสรุป.....	75
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	77
5.1 สรุปผลการทดลองเปรียบเทียบการคำนวณทางทฤษฎี.....	77
5.2 ปัญหาที่เกิดการทดลอง.....	80
5.3 สรุปโครงการ.....	80
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

ภาคผนวก

เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.4 แผนผังการดำเนินงาน	2
4.1 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กถี่ไอซีต่างๆ	34
4.2 ผลการวัด Radiate โดยเปิดฝากล่องที่ out put load ต่างๆที่แนวแกน x1	36
4.3 ผลการวัด Radiate โดยเปิดฝากล่องที่ out put load ต่างๆที่แนวแกน x2	38
4.4 ผลการวัด Radiate โดยเปิดฝากล่องที่ out put load ต่างๆที่แนวแกน x3	40
4.5 การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่โหลดต่างๆที่ความถี่ 30.2 kHz	42
4.6 การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่โหลดต่างๆที่ความถี่ 59.8 kHz	42
4.7 ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กจาก Switching power supply ขนาด 400 W ที่แกน x1	43
4.8 ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กจาก Switching power supply ขนาด 400 W ที่แกน x2	45
4.9 ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กจาก Switching power supply ขนาด 400 W ที่แกน x3	48
4.10 ประสิทธิภาพการซัดที่ความหนาต่างๆ	50
4.11 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กจากการวางตามและวางขวางที่แกน x1	51
4.12 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กจากการวางตามและวางขวางที่แกน x2	53
4.13 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กจากการวางตามและวางขวางที่แกน x3	55
4.14 ประสิทธิภาพการซัดในแนวการวางต่างๆ	57
4.15 ผลของค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของวัสดุแต่ละชนิดที่แกน x1	58
4.16 ผลของค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของวัสดุแต่ละชนิดที่แกน x2	60
4.17 ผลของค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของวัสดุแต่ละชนิดที่แกน x3	62
4.18 ประสิทธิภาพการซัดของวัสดุต่างๆ	64
4.19 ผลของค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของกล่องแต่ละชนิด ที่แกน x1	66
4.20 ผลของค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของกล่องแต่ละชนิด ที่แกน x2	68
4.21 ผลของค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของกล่องแต่ละชนิด ที่แกน x3	70
4.22 ประสิทธิภาพการซัดของกล่องซัดชนิดต่างๆ	72
4.23 การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในเงื่อนไขต่างๆ	75
5.1 ค่า μ และ σ ของวัสดุแต่ละชนิด	77
5.2 ค่าประสิทธิภาพในทางทฤษฎีเทียบกับค่าในการทดสอบ	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 พิสูจน์ความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.2 สเปกตรัมและการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
2.3 รูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	7
2.4 องค์ประกอบหลักที่ทำให้เกิดการส่ง-รับแม่เหล็กไฟฟ้า.....	8
2.5 หลักการเชื่อมต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	9
2.6 ตัวอย่างการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างระบบ	9
2.7 ตัวอย่างองค์ประกอบแฝงในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง	10
2.8 ความสัมพันธ์ของนิยามต่างๆ ของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	11
2.9 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบกับระยะห่างจากแหล่งจ่าย	14
2.10 เปรียบเทียบการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	15
2.11 Wave impedance เปรียบเทียบกับระยะห่างจากแหล่งจ่าย.....	15
2.12 การสะท้อนและดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแผ่นโลหะ.....	18
2.13 การเคลื่อนที่ของคลื่นในรูปของสมการ.....	19
2.14 การเกิดสัญญาณรบกวน.....	25
3.1 เครื่อง EMC Analyzer.....	27
3.2 Close-Field Probe	28
3.3 Switching Power Supply ชนิด 400 W.....	28
3.4 ภาระทางไฟฟ้า 147 W.....	29
3.5 ภาระทางไฟฟ้า 95 W.....	30
3.6 ภาระทางไฟฟ้า 55 W.....	30
3.7 จำลองการวัดและจุดที่ทำการวัด.....	31
3.8 ขั้นตอนการดำเนินงาน	32
4.1 ขั้นตอนการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่โหลดต่าง.....	35
4.2 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x1.....	36
4.3 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่โหลด ต่างๆ ที่ $f=30.2$ kHz ที่แนวแกน x1 (เปิดฝากล่อง)	37
4.4 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ โหลด ต่างๆ ที่ $f=59.8$ kHz ที่แนวแกน x1 (เปิดฝากล่อง)	37
4.5 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x2.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ โหลด ต่างๆ ที่ $f=30.2$ kHz ที่แนวแกน x2 (เปิดฝากล่อง)	39
4.7 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ โหลดต่างๆ ที่ $f=59.8$ kHz ที่แนวแกน x2 (เปิดฝากล่อง)	39
4.8 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x3	40
4.9 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ โหลดต่างๆ ที่ $f=30.2$ kHz ที่แนวแกน x3 (เปิดฝากล่อง)	41
4.10 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ โหลดต่างๆ ที่ $f=59.8$ kHz ที่แนวแกน x3 (เปิดฝากล่อง)	41
4.11 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x1	44
4.12 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับความหนา ที่ $f=30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x1	44
4.13 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับความหนา ที่ $f=59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x1	45
4.14 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x2	46
4.15 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับความหนา ที่ $f=30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x2	47
4.16 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับความหนา ที่ $f=59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x2	47
4.17 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x3	48
4.18 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับความหนา ที่ $f=30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x3	49
4.19 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับความหนา ที่ $f=59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x3	49
4.20 แนวการวางตัวของวัสดุทดสอบ	51
4.21 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x1	52
4.22 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับแนวการวาง ที่ $f=30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x1	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับแนวการวาง ที่ $f=59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x1	53
4.24 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x2	54
4.25 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับแนวการวาง ที่ $f=30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x2	54
4.26 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับแนวการวาง ที่ $f=59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x2	55
4.27 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x3	56
4.28 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับแนวการวาง ที่ $f=30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x3	56
4.29 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับแนวการวางที่ ที่ $f=59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x3	57
4.30 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x1	59
4.31 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของแผ่น โลหะ ที่ $f=30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x1	59
4.32 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของแผ่น โลหะ ที่ $f=59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x1	60
4.33 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x2	61
4.34 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของแผ่น โลหะ ที่ $f=30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x2	61
4.35 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของแผ่น โลหะ ที่ $f=59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x2	62
4.36 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x3	63
4.37 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของแผ่น โลหะ ที่ $f=30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x3	63
4.38 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของแผ่น โลหะ ที่ $f=59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x3	64
4.39 ลักษณะของกล่องซีลด์.....	65
4.40 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x1	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของกล่องโลหะ ที่ $f = 30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x1	67
4.42 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของกล่องโลหะ ที่ $f = 59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x1	67
4.43 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x2	68
4.44 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของกล่องโลหะ ที่ $f = 30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x2	69
4.45 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของกล่องโลหะ ที่ $f = 59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x2	69
4.46 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x3	70
4.47 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของกล่องโลหะ ที่ $f = 30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x3	71
4.48 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของกล่องโลหะ ที่ $f = 59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x3	71
4.49 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ออกมาทางรูระบายอากาศ	73
4.50 วิธีการลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่รูระบายอากาศ	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 อธิบายถึงปัญหาที่กำลังศึกษาและวิจัย

ปัจจุบันเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆได้เข้ามาอยู่ในชีวิตประจำวันมาก ซึ่งเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆในปัจจุบันส่วนมากจะใช้ส่วนประกอบพวกเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น MOSFET, Transistor เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์พวกนี้จะเป็นตัวส่งสัญญาณรบกวนออกมาทั้งทางอากาศและทางตัวนำซึ่งสัญญาณรบกวนนี้จะส่งผลกระทบต่อระบบเครือข่ายต่างๆ หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าตัวอื่น เช่น ระบบ FM, โทรศัพท, คอมพิวเตอร์ เป็นต้น

ปัญหาเหล่านี้ต้องแก้ไขอย่างเร่งด่วน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะวิจัยเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนที่ออกมาทางอากาศ โดยแก้ปัญหาเหล่านี้โดยวิธีการชิลด์ ซึ่งการชิลด์นี้จะช่วยให้อุปกรณ์ไฟฟ้าลดการส่งสัญญาณรบกวนออกไปและคงทนต่อการรับสัญญาณรบกวนจากภายนอก

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่เกิดจาก switching power supply ขนาด 400 W
2. หาโลหะที่เหมาะสมสำหรับนำมาชิลด์
3. สร้างต้นแบบที่จะใช้ในการชิลด์ และเปรียบเทียบกับ switching power supply ที่ขายอยู่ตามท้องตลาด
4. ศึกษาวิธีการลดทอนสัญญาณรบกวนที่ออกมาจาก switching power supply
5. ฝึกการบริหารโครงการและแก้ปัญหาเป็นทีม

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาและออกแบบการลดทอนสัญญาณรบกวนของ switching power supply ขนาด 400 W ในย่านความถี่ 9 kHz – 30 kHz
2. ศึกษาคุณสมบัติของสัญญาณรบกวน ขนาด จำนวนแผ่นโลหะ ในการชิลด์ที่มีผลต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ในรัศมีใกล้กับ switching power supply
3. ทำการออกแบบ โครงสร้างต้นแบบที่สามารถนำมาชิลด์ได้
4. วิเคราะห์ผลการทดลอง
5. เขียนปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 แผนผังการดำเนินงาน

เดือน แผนงาน	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2			
	มี.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1. ศึกษาการเกิดสัญญาณรบกวนจาก Switching Power Supply									
2. ทำการวัดสัญญาณรบกวนวิเคราะห์และเก็บผลการทดลอง									
3. นำผลของภาคเรียนที่ 1 มาออกแบบ และสร้างต้นแบบเพื่อใช้ซัสดีได้จริง									
4. ทำการทดลองซัสดีและเก็บผลการทดลอง									
5. ปรับปรุงและสรุปผลการทดลอง									
6. เขียนปริญญานิพนธ์									

1.5 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนที่เกิดจาก switching power supply ว่ามีผลอย่างไรกับอุปกรณ์ชนิดต่างๆอย่างไรบ้าง
2. เลือกวิธีการที่จะลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจาก switching power supply
3. ทำการทดลองว่าชนิดของโลหะ ลักษณะการวาง ความหนา มีผลอย่างไรบ้าง
4. นำผลที่ได้มาสรุปและวิจัย
5. ออกแบบโครงสร้างต้นแบบของกล่อง switching power supply ให้ป้องกันและลดทอน สัญญาณรบกวน ได้ดีกว่าแบบเดิม
6. นำโครงสร้างต้นแบบ มาเปรียบเทียบกับ switching power supply ตามท้องตลาดว่ามีคุณภาพที่ดีกว่าหรือไม่
7. สามารถนำผลที่ได้จากการทดลองไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อื่นๆได้ เช่น เครื่องเชื่อมไฟฟ้า, เครื่องหลอมเหล็ก, UPS เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1.1 ประวัติและความเป็นมา

อาจกล่าวได้ว่าปัญหาที่เกี่ยวกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าถูกค้นพบและแก้ไขในปลายปี ค.ศ.1800 โดยนาย Marconi [3] ส่วนในด้านของบทความวิชาการที่เกี่ยวกับเรื่องดังกล่าวเริ่มต้นได้รับการตีพิมพ์ประมาณปี ค.ศ.1920 ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นบทความทางด้านสาขาอากาศและเครื่องรับเป็นต้น ในขณะที่ปัญหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอุปกรณ์ เครื่องใช้ไฟฟ้าเช่น มอเตอร์ รถไฟฟ้า ฯลฯ เริ่มต้นได้รับความสนใจประมาณปี ค.ศ.1930

สำหรับพัฒนาการทางด้านปัญหาที่เกี่ยวกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นสามารถกล่าวได้ว่า ในระหว่างช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยส่วนใหญ่จะมีความหนาแน่นของอุปกรณ์น้อย ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะได้แก่หลอดสุญญากาศ (Vacuum tube electronics) ทำให้ปัญหาที่เกี่ยวกับเรื่องดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ง่าย ไม่ซับซ้อน

แต่ปัญหาที่เกี่ยวกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้รับความสนใจอย่างจริงจัง เริ่มตั้งแต่การเกิดขึ้นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสูง (High-density electronic components) เช่น การเกิดขึ้นของตัวทรานซิสเตอร์ในปี ค.ศ.1950 การเกิดขึ้นของตัววงจร (IC) ในปี ค.ศ.1960 และการเกิดขึ้นของตัวไมโครโปรเซสเซอร์ในปี ค.ศ.1970 นอกจากนั้นภายหลังจากปี ค.ศ.1970 เป็นต้นมาไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือคอมพิวเตอร์ทั้งหลายได้มีการเปลี่ยนจากการประมวลผลแบบอนาล็อก (analog signal processing) มาเป็นแบบดิจิทัล (digital signal processing) เพราะทำให้สามารถเพิ่มความเร็วในการสวิตช์ (switching speed) และลดวงจรรวมลงได้ ด้วยสาเหตุดังกล่าวทำให้ในปัจจุบันปัญหาในเรื่องของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นปัญหาหลักที่สำคัญสำหรับการติดต่อสื่อสารโดยใช้สายหรือสัญญาณวิทยุ ดังนั้นในปี ค.ศ.1979 ประเทศสหรัฐอเมริกาได้จัดตั้งคณะกรรมการบริหาร Federal Communications Commission (FCC) ขึ้นมาเพื่อกำหนดขีดจำกัด (limit) สำหรับอุปกรณ์ดิจิทัล (digital devices) ให้มีการแผ่กระจายสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ให้ต่ำกว่าขีดจำกัดดังกล่าว และยังห้ามมิให้อุปกรณ์ให้อุปกรณ์ดิจิทัลที่ไม่ผ่านข้อกำหนดดังกล่าวจำหน่ายสินค้าในประเทศสหรัฐอเมริกาอีกด้วย

ในขณะที่ทางยุโรปได้เริ่มต้นก่อนทางสหรัฐอเมริกา โดยมีการเริ่มต้นกำหนดขีดจำกัดสำหรับอุปกรณ์ดิจิทัลในปี ค.ศ.1933 ที่ประเทศฝรั่งเศส โดยคณะกรรมการบริหาร International Electrotechnical Commission (IEC) ซึ่งได้กำหนดให้คณะกรรมการ International Special Committee on Radio Interference (CISPR) เป็นหน่วยงานซึ่งมีหน้าที่ในการจัดการปัญหาที่เกี่ยวกับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และในตอนแรกหน่วยงานดังกล่าวได้จัดทำเอกสารที่เกี่ยวกับเครื่องมือวัดที่ใช้สำหรับการแผ่กระจายของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และหลังจากสงครามโลกครั้งที่สองหรือในปี ค.ศ.1946 ที่ประเทศอังกฤษ ได้มีการออกเอกสารทางเทคนิคเพิ่มเติมที่เกี่ยวกับเทคนิคในการวัดและทดสอบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(measurement techniques) และรวมถึงการกำหนดขีดจำกัด (limit) ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในคอนแรกประเทศสหรัฐอเมริกาได้ใช้ขีดจำกัดดังกล่าวกำหนดเป็นขีดจำกัดสำหรับระบบที่เป็นดิจิทัล (digital system) ที่ใช้ภายในประเทศ

สำหรับทางด้านทางทหาร เริ่มต้นในปี ค.ศ.1960 ประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการออกมาตรฐาน MIL - STD - 461 โดยที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิดจะต้องผ่านมาตรฐานดังกล่าว นอกจากนั้นทางด้านทหารยังได้เพิ่มเติมความสนใจที่ “ความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (susceptibility)” ของอุปกรณ์ต่างๆด้วย ในขณะที่ ณ.เวลาปัจจุบัน (ค.ศ.2003) ทางอุตสาหกรรมทั่วไปยังไม่ได้เน้นความสำคัญของปัญหาความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ไฟฟ้าเลย [3], [5-6], [7] เพราะการทดสอบความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางตัวนำจะมีปัญหา ทางด้านราคาในการออกแบบและทดสอบที่เพิ่มขึ้นมากกว่าสองเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การควบคุมการแผ่กระจายตามสายตัวนำ (emission control) [6]

สำหรับมาตรฐานที่ใช้ทางด้านที่เกี่ยวกับ “ความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (susceptibility)” ซึ่งเป็นคำนิยามของประเทศสหรัฐอเมริกา (FCC) หรือ “ภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (immunity)” ซึ่งเป็นคำนิยามของมาตรฐานนานาชาติ (IEC)

สำหรับมาตรฐานนานาชาติจะได้แก่ IEC 1000-4-3 ถึง IEC 1000-4-6 โดยมีรายละเอียดดังนี้ [4]

- IEC 1000-4-3 จะ ได้แก่ ภูมิคุ้มกันแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายทางอากาศ (Radiates Immunity Test)
- IEC 1000-4-4 จะ ได้แก่ Electrical Fast Transients (EFT)/Burst
- IEC 1000-4-5 จะ ได้แก่ Electrical Surges
- IEC 1000-4-6 จะ ได้แก่ ภูมิคุ้มกันแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายทางสายตัวนำ (Conducted Immunity Test)

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติโดยส่วนใหญ่จะทดสอบความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในรูปของการแทรกสอดของสัญญาณพัลส์ (Pulse interference) เช่น Electrical Surges และ Electrical Fast Transients (EFT)/Burst เท่านั้น [8]

2.1.2 นิยามของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic disturbance) อาจจะทำให้การทำงานของอุปกรณ์ (device) เครื่องมือ (equipment) หรือระบบ (system) มีความผิดพลาดหรือเกิดความเสียหายได้ ซึ่งเมื่อใดก็ตามที่การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าง่ายกว่าก่อให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานหรือเกิดความเสียหายต่อ อุปกรณ์ (device) เครื่องมือ (equipment) หรือระบบ (system) การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าง่ายกว่าจะเรียกว่าเป็น สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าหรือ EMI (Electro-Magnetic Interference) ซึ่งหมายถึงสัญญาณที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระบบนั่นเอง

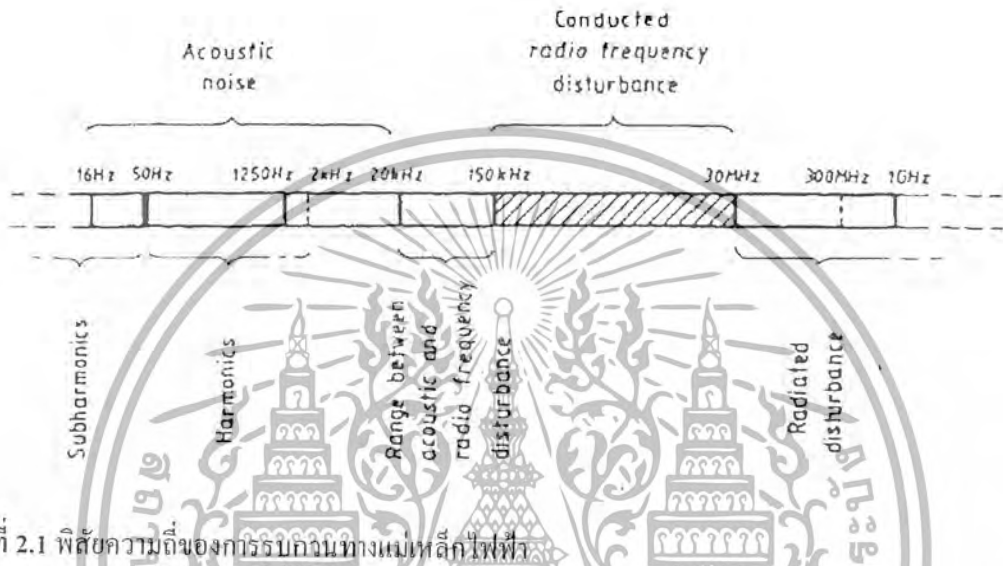
โดยทั่วไปการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้หลายรูปแบบตามพิสัยความถี่ที่แสดง ในรูปที่ การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ในพิสัย 0 Hz ถึงประมาณ 2000 Hz จะจัดอยู่ในพิสัยการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำหรือที่นิยมเรียกกันว่า “ฮาร์โมนิก” ซึ่งจะมีผลทำให้สัญญาณรูปคลื่น

เอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ข้อมูลนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากำลังมีความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์และนอกจากนั้นยังเพิ่มความสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังอีกด้วย

สำหรับความถี่ในพิสัย 1.25 kHz ถึง 150 kHz ในปัจจุบัน (ค.ศ.2003) ยังไม่จัดว่าเป็นปัญหาที่จะต้องแก้ไขด้วยวิศวกรทางด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC engineers) แต่อย่างไรก็ตามมาตรฐานนานาชาติหลายฉบับได้ขยายพิสัยความถี่ฮาร์มอนิก (Harmonics) ให้ครอบคลุมถึงพิสัยความถี่ดังกล่าวบ้างแล้ว[2]



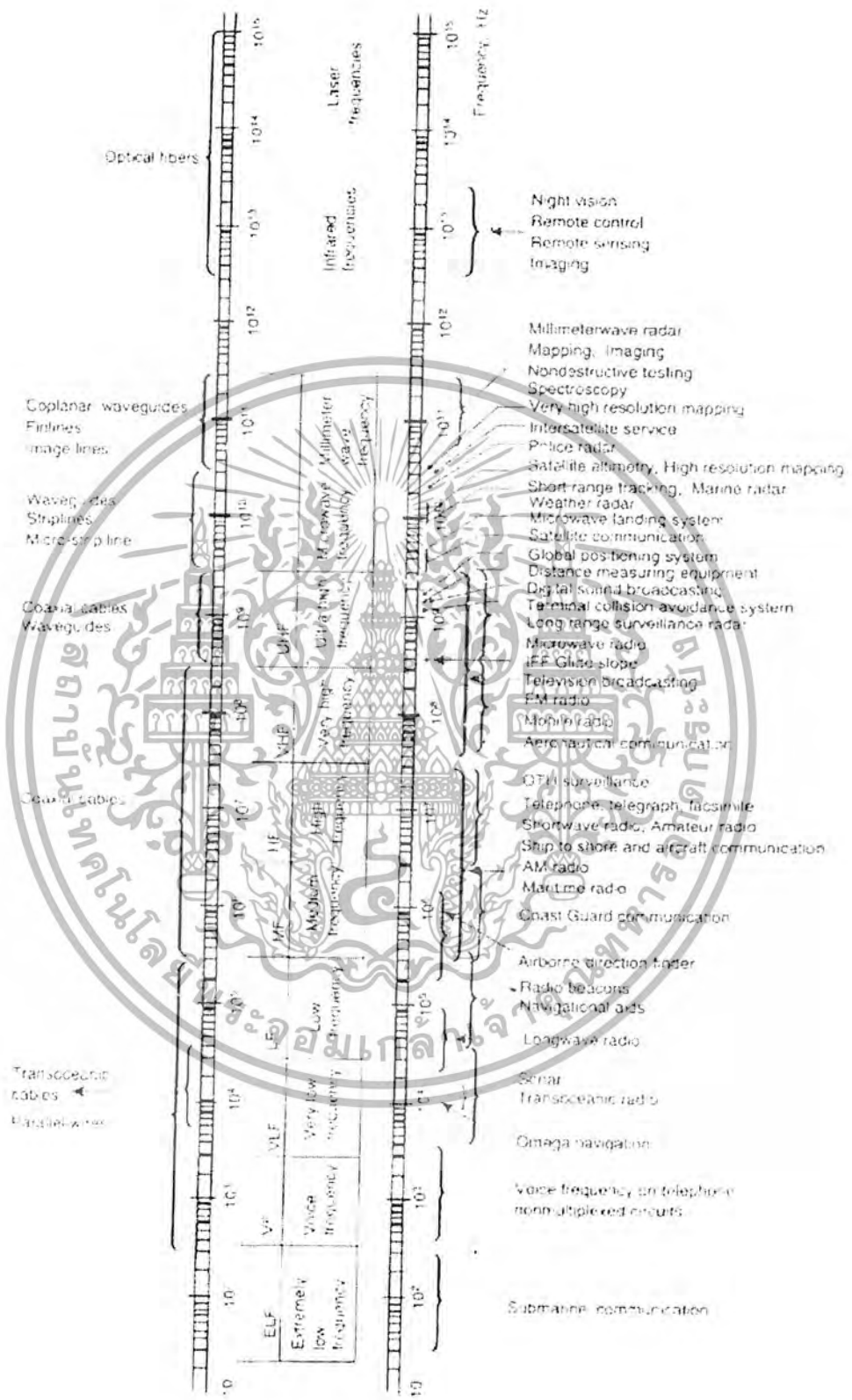
รูปที่ 2.1 พิสัยความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ส่วนพิสัยความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือบางครั้งจะเรียกแทนว่าการรบกวนความถี่วิทยุ (Radio frequency disturbance) จะจัดอยู่ในการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

โดยเริ่มพิจารณาความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 1 GHz สามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบด้วยกันคือ ที่ความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 30 MHz จะพิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted EMI) และพิสัยความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1 GHz จะพิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (Radiated EMI) ซึ่งทั้งสองแบบจะมีรูปแบบในการรบกวนและวิธีการตรวจจับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าไม่เหมือนกัน อย่างไรก็ตามโดยแท้จริงแล้วคำว่า “การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า” กับ “การรบกวนความถี่วิทยุ” จะไม่สามารถใช้แทนกันได้เพราะการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเพียงหนึ่งในพิสัยความถี่วิทยุเท่านั้น [1] ดังแสดงในรูปที่ 2.2 กล่าวในทำนองเดียวกันสำหรับการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกหรือการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบหรือวงจรใดๆก็ตามไม่ได้หมายความว่าจะเป็นการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแต่อย่างใด

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (source) ผ่านตัวกลาง (coupling) ไปยังตัวรับผลกระทบ (receptor) ซึ่งตัวรับผลกระทบดังกล่าวอาจจะหมายถึงอุปกรณ์เครื่องมือหรือระบบก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

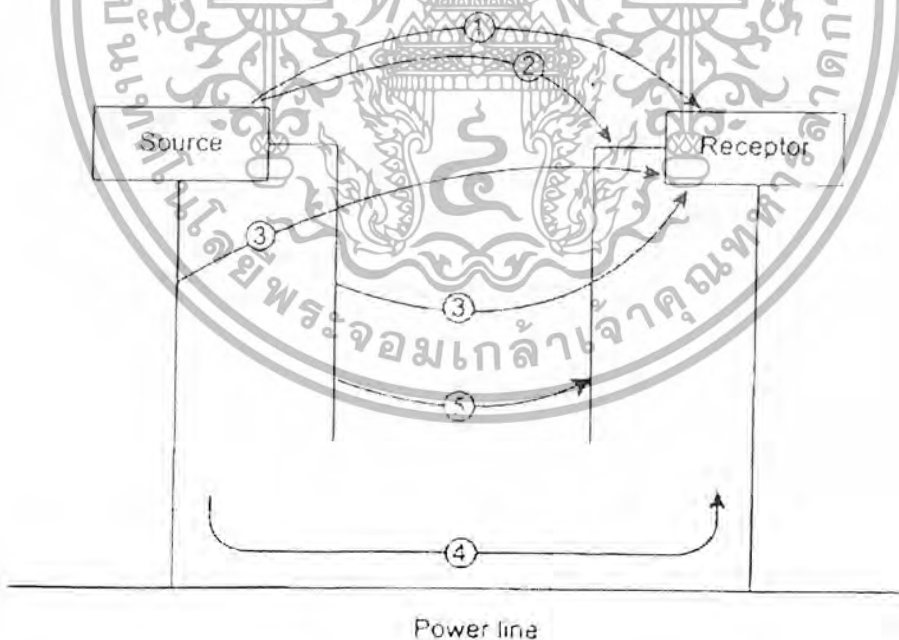


รูปที่ 2.2 สเปกตรัมและการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนไปยังตัวรับผลกระทบ ได้แสดงไว้ดังต่อไปนี้

- แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านทางอากาศไปยังตัวรับผลกระทบโดยตรง (รูปแบบที่ 1)
- แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านทางอากาศไปยังสายเคเบิลกำลัง/สัญญาณ/ควบคุม ที่เชื่อมต่อกับตัวรับผลกระทบ โดยที่สายเคเบิลดังกล่าวจะเป็นตัวนำสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ไปยังตัวรับผลกระทบ (รูปแบบที่ 2)
- สายเคเบิลกำลัง/สัญญาณ/ควบคุม ที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังตัวรับผลกระทบ (รูปแบบที่ 3)
- สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนส่งผลกระทบไปยังตัวรับผลกระทบโดยผ่านทางสายเคเบิลกำลัง/สัญญาณ/ควบคุม ที่เชื่อมต่อกันกับตัวรับผลกระทบ (รูปแบบที่ 4)
- สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในสายเคเบิลกำลัง/สัญญาณ/ควบคุม ที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน เหนี่ยวนำไปยังสายเคเบิลกำลัง/สัญญาณ/ควบคุมที่ต่ออยู่กับตัวรับผลกระทบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสายดังกล่าวอยู่ใกล้ชิดกันมากเท่าไรก็จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตัวรับผลกระทบมากขึ้นเท่านั้น (รูปแบบที่ 5)



รูปที่ 2.3 รูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากตัวกำเนิดสัญญาณรบกวนที่มีขนาดเกินกว่าภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic field immunity) ของตัวรับผลกระทบที่สามารถทนได้ ก็จะทำให้ตัวรับผลกระทบนั้นเกิดความเสียหายหรือเกิดความผิดพลาดในการทำงานขึ้นซึ่งนั่นก็หมายถึงการไม่เอื้ออำนวยเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นคำว่า “ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility) หรือ EMC” ก็จะหมายถึงความสามารถของตัวรับผลกระทบ (อุปกรณ์ เครื่องมือ ระบบ) ที่สามารถทำงานได้โดยปกติในสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้า และในขณะเดียวกันตัวรับผลกระทบดังกล่าวจะต้องไม่ก่อให้เกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มากเกินไปเกินภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถทนได้ของ อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบอื่นๆด้วย

2.1.3 หลักการพื้นฐานของการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1.1 สามารถสรุปองค์ประกอบที่สำคัญที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าดังรูป 2.4



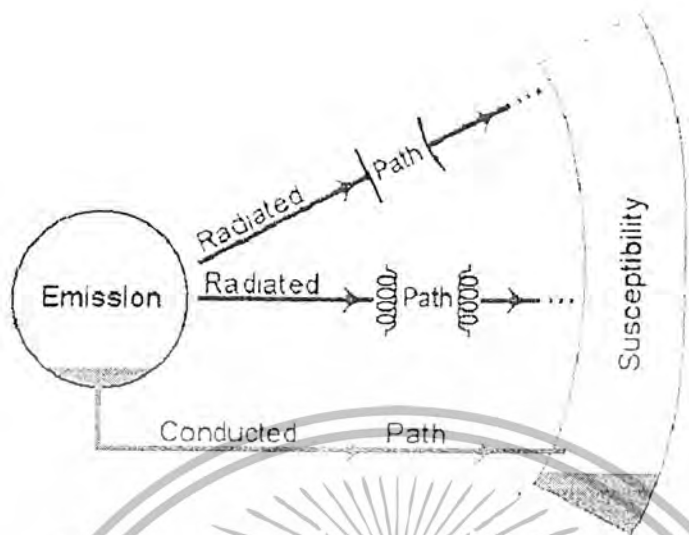
รูปที่ 2.4 องค์ประกอบหลักที่ทำให้เกิดการส่ง-รับแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปที่ 2.4 ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI source) เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวน (Coupling path) และตัวรับผลกระทบ (receptor) โดยที่การส่งผ่านสัญญาณรบกวนของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนอาจจะอยู่ในรูปแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าในสายตัวนำ สนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กที่แผ่กระจายไปทางอากาศก็ได้

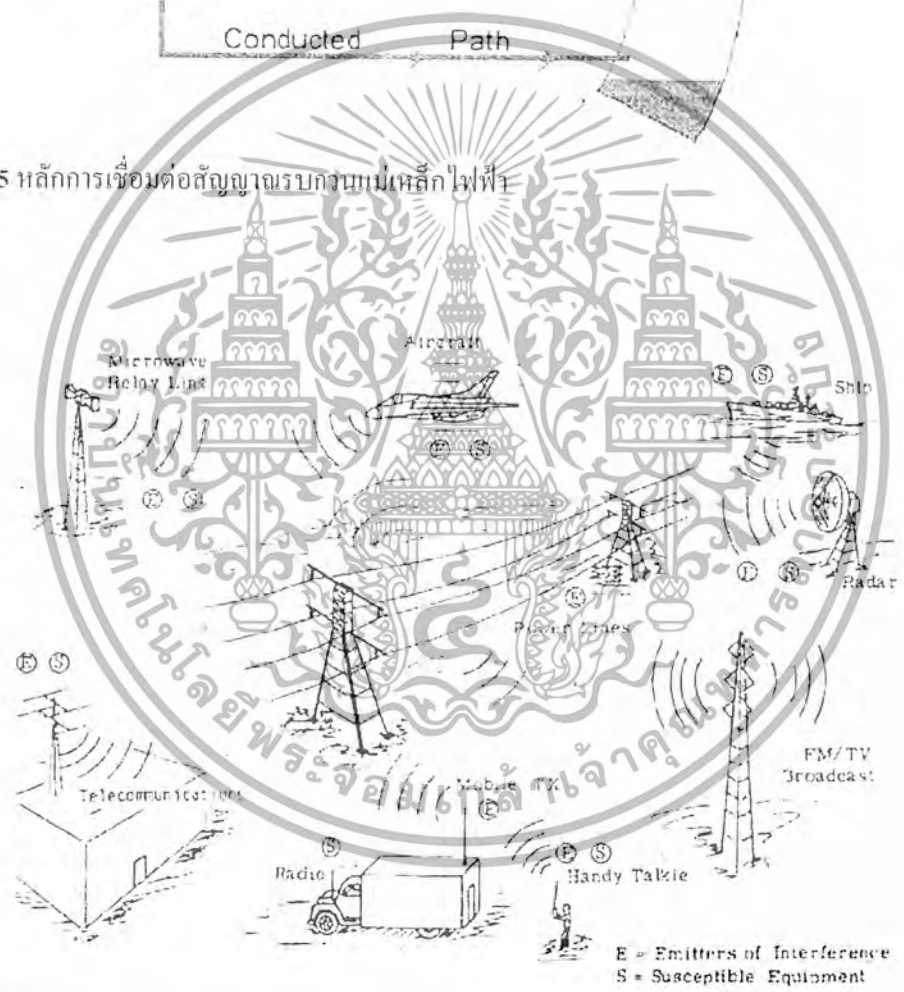
ตัวอย่างของทั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนและตัวรับผลกระทบได้แสดงไว้เช่นกันและจะสังเกตเห็นได้ว่าเครื่องมือหรือระบบบางแบบจะเป็นได้ทั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนและตัวรับผลกระทบดังแสดงดังรูปที่ 2.5 เส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนไปยังตัวรับผลกระทบสามารถแบ่งออกได้เป็นสองรูปแบบด้วยกันคือ

การแผ่กระจาย (Radiation) หรือการเชื่อมต่อโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศหรือวัตถุอื่นๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเชื่อมต่อผ่านทางสายตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

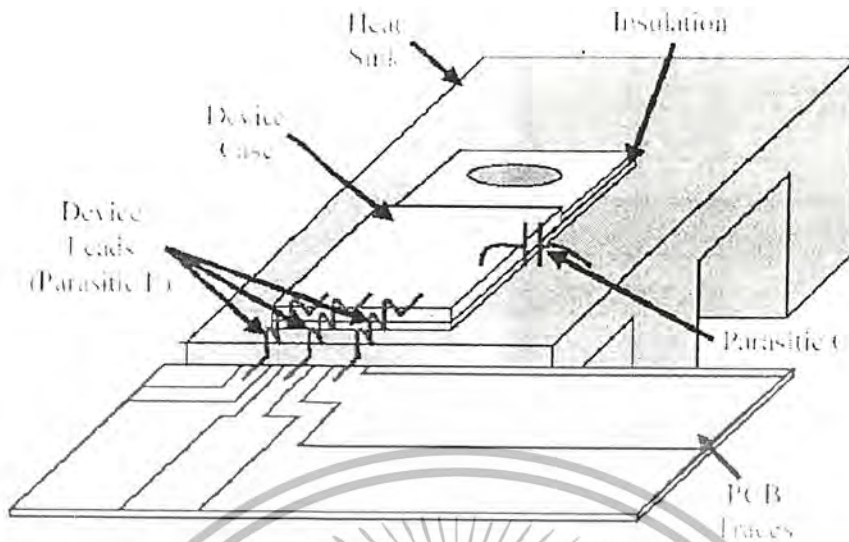


รูปที่ 2.5 หลักการเชื่อมต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



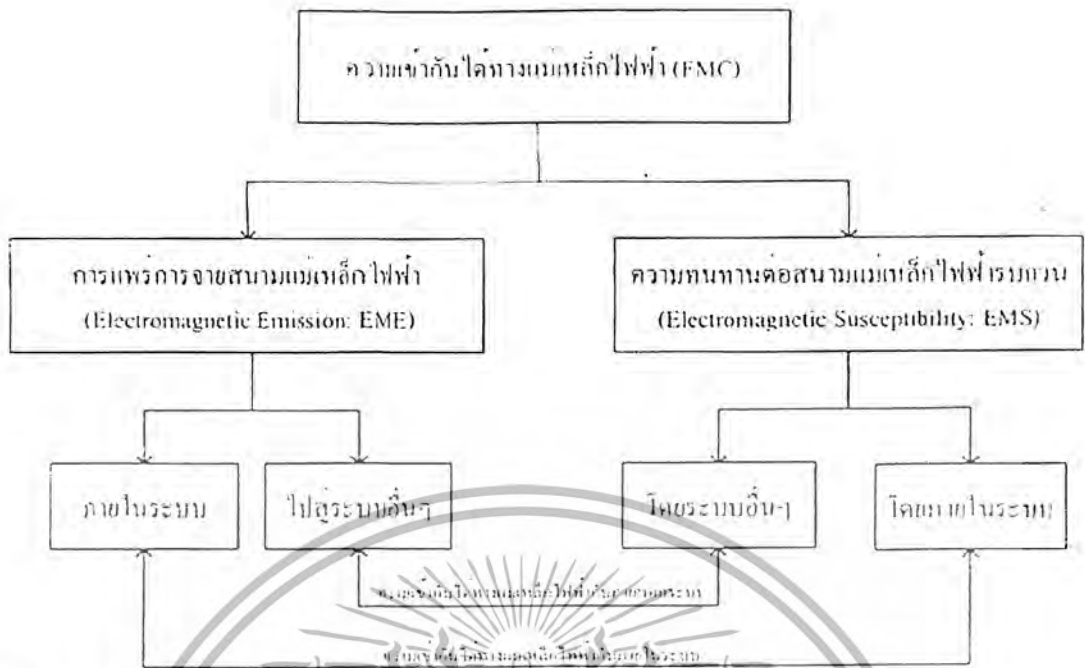
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างองค์ประกอบแผงในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference : EMI) เป็นส่วนหนึ่งของศาสตร์ที่ว่าด้วยเรื่อง ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นหัวข้อที่ว่าด้วยเรื่องการเกิดสัญญาณรบกวน (Immunity) หรือความสามารถในการรับสัญญาณรบกวน (Susceptibility) ของระบบหรืออุปกรณ์ใดๆ โดยนิยามของ EMC คือ “ ความสามารถของอุปกรณ์เครื่องมือหรือระบบที่สามารถทำงานอยู่ได้ในสภาวะแวดล้อม การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าและต้องไม่เป็นตัวสร้างมลภาวะออกสู่สภาพแวดล้อมนั้น ” [8] สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมีทั้งมาจากตัวระบบเดียวกันเองและจากระบบภายนอก ดังนั้น EMC จึงได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบเดียวกัน (Intra – system EMC) และ ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก (Inter – system EMC) ซึ่งนิยามของทั้งสองประเภทเป็นดังนี้ [9]

1. ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบ คือความสามารถของส่วนประกอบภายในระบบที่สามารถทำงานได้ในระบบเดียวกัน และไม่สร้างสัญญาณรบกวนในระดับที่อุปกรณ์อื่นๆ ในระบบเดียวกันทนไม่ได้
2. ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระบบภายนอก คือความสามารถในการทำงานของระบบที่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ที่สร้างโดยระบบภายนอก และไม่สร้างสัญญาณรบกวนในระดับที่ระบบอื่นภายนอกไม่สามารถทำงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของนิยามต่างๆ ของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า[10]

2.2.1 สัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวน (Noise) คือสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ที่เกิดขึ้นในระหว่างที่อุปกรณ์หรือระบบใดทำงานอยู่ หรือปนเข้ามาับสัญญาณที่พึงประสงค์ บ่อยครั้งสัญญาณรบกวนนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้การทำงานของอุปกรณ์หรือระบบเกิดความผิดพลาด ถ้าระดับสัญญาณรบกวนอยู่ในระดับที่มากเกินไป อุปกรณ์หรือระบบจะรับได้ โดยสัญญาณรบกวนมีหลายประเภท หลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นสัญญาณเสียง สัญญาณไฟฟ้า และอื่นๆ สัญญาณรบกวนนี้เกิดได้จากที่สร้างโดยธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้น และสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าก็เป็นสัญญาณรบกวนอีกประเภทหนึ่งที่เกิดจากการกระทำของอุปกรณ์หรือระบบไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งได้นำมาวิเคราะห์และอธิบายในโครงการนี้ โดยการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายทางอากาศ (Radiated) และสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายทางตัวนำ (Conducted)

2.2.1.1 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน

แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถที่จะแบ่งออกเป็น 2 แหล่ง คือ ที่เกิดจากธรรมชาติและจากมนุษย์ ซึ่งสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนมากมาจากการกระทำของมนุษย์ [11] โดยจะเกิดจากอุปกรณ์ที่มนุษย์สร้างขึ้น

สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากธรรมชาตินั้นส่วนใหญ่จะเป็นการแพร่กระจายทางอากาศที่เกิดจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญญาณรบกวนทางอากาศ (Atmospheric noise) เกิดการคายประจุไฟฟ้าระหว่างเกิดฝนตกฟ้าคะนอง หรือฟ้าผ่า
- สัญญาณรบกวนคอสมิก (Cosmic noise) จากดวงอาทิตย์ ดวงจันทร์ กลุ่มดาวขนาดใหญ่ หรือกาแล็กซี่ โดยจะก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแพร่กระจาย ออกมายังโลก
- ไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge : ESD)

สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระทำของมนุษย์นั้น จะมีการแพร่กระจายทางอากาศและทางตัวนำ โดยเป็นผลต่อเนื่องมาจากการที่มนุษย์ได้สร้างสิ่งอำนวยความสะดวกในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เช่น อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และเมื่ออุปกรณ์เหล่านี้ทำงานก็จะสร้างสัญญาณรบกวนออกมาสู่ระบบเดียวกันและระบบอื่นๆ โดยรอบทั้งทางอากาศและสายตัวนำ

2.2.1.2 ทางเดินของสัญญาณรบกวน

ทางเดินของสัญญาณรบกวนนั้นเป็นศูนย์กลางที่สำคัญสำหรับการนำพาสัญญาณรบกวนออกไปสู่สภาพแวดล้อมซึ่งมีหลายทางเดินทั้งโดยธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้น ตัวอย่างเช่น

- พื้นดิน
- กลุ่มเมฆ
- สิ่งก่อสร้าง และสัญญาณพาหนะ
- ตัวถังอุปกรณ์
- การเดินสายสัญญาณบน PCB หรือสายตัวนำในวงจรหรือระบบ
- ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์

2.2.1.3 สิ่งที่ได้รับผลกระทบและผลสัญญาณรบกวน

สำหรับสิ่งที่ได้รับผลกระทบ (Victim) คืออุปกรณ์หรือระบบใดๆที่ไม่สามารถทนต่อสัญญาณรบกวนได้ ซึ่งผลของสัญญาณรบกวนส่งผลให้อุปกรณ์เครื่องมือหรือระบบทำงานไม่เป็นดังเป้าหมายหรือไม่ทำงานเลย หรืออาจเกิดความเสียหายขึ้นได้ ตัวอย่างของสิ่งที่ได้รับผลกระทบเช่น

- ตัวขยายสัญญาณ
- ตัวรับสัญญาณ
- คอมพิวเตอร์
- เครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม และเครื่องมือทางการแพทย์
- มนุษย์และสัตว์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ทฤษฎี Shielding [12]

2.2.2.1 ทฤษฎีสานาม (Field Theory)

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงความสัมพันธ์สนามแม่เหล็ก (Magnetic fields), สนามไฟฟ้า (Electric fields) และ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า รวมทั้งลักษณะของ Near fields, Far fields ซึ่งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดจากมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำแบบ short wire (straight wire) ซึ่งความยาวตัวนำ $D \ll \lambda$ สามารถประยุกต์ใช้สมการของ Maxwell's equations ดังนี้

$$E_\theta = \frac{Z_o I D \pi \sin \theta}{\lambda^2} \left[-\left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^3 \cos \varphi - \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^2 \sin \varphi + \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right) \cos \varphi \right] \quad (2.1)$$

$$E_r = \frac{2Z_o I D \pi \cos \theta}{\lambda^2} \left[\left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^3 \cos \varphi + \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^2 \sin \varphi \right] \quad (2.2)$$

$$H_\phi = \frac{I D \pi \sin \theta}{\lambda^2} \left[\left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^2 \sin \varphi + \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right) \cos \varphi \right] \quad (2.3)$$

เมื่อ

$$Z_o = \text{free-space impedance } (Z_o = \sqrt{\mu_o / \epsilon_o} = 120\pi = 377 \Omega)$$

I = current in short wire

λ = Length in short wire $D \ll \lambda$

θ = Zenith angle to radial distance r

r = distance from short wire to measuring point

$$\varphi = 2\pi r / \lambda - \omega t$$

ω = Radial frequency = $2\pi f$

t = time = $1/f$

$$c = 1/\sqrt{\mu\epsilon} = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$$

จากสมการที่ (2.1), (2.2) และ (2.3) จะได้ว่า

เมื่อ $r \gg \lambda / 2\pi$ ในช่วงนี้เรียกว่า Far fields

ทั้งแบบ Straight wire และ loop wire

เทอมสุดท้ายของสมการที่ (2.1) และ (2.3) จะมีผลมาก

Wave impedance $Z_o = E_\theta / H_\phi = 377 \Omega$

ช่วงนี้อาจเรียกว่า Radiation field (Plane wave)

เมื่อ $r \ll \lambda / 2\pi$ ในช่วงนี้เรียกว่า Near fields หรือ Induction field

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบ Straight wire

เทอมแรกของสมการที่ (2.1), (2.2) และ (2.3) จะมีผลมาก

Wave impedance = $E_\theta / H_\phi = Z_0 \lambda / 2\pi r$ ซึ่ง $\lambda / 2\pi r \gg 1$ ดังนั้นช่วงนี้จะเรียกว่า High-impedance field และ impedance มีค่าสูงกว่า Plane wave impedance และช่วงนี้จะพิจารณาเป็น Electric field

แบบ Wire loop

เทอมแรกของสมการ (2.1) และ (2.2) จะหมดไปจะมีเฉพาะเทอมแรกของสมการที่ (2.3) ที่มีผลมาก

Wave impedance = $E_\theta / H_\phi = Z_0 2\pi r / \lambda$ ซึ่ง $\lambda / 2\pi r \gg 1$ ดังนั้นช่วงนี้จะเรียกว่า Low-impedance field และ impedance มีค่าน้อยกว่า Plane wave impedance และช่วงนี้จะพิจารณาเป็น Magnetic field

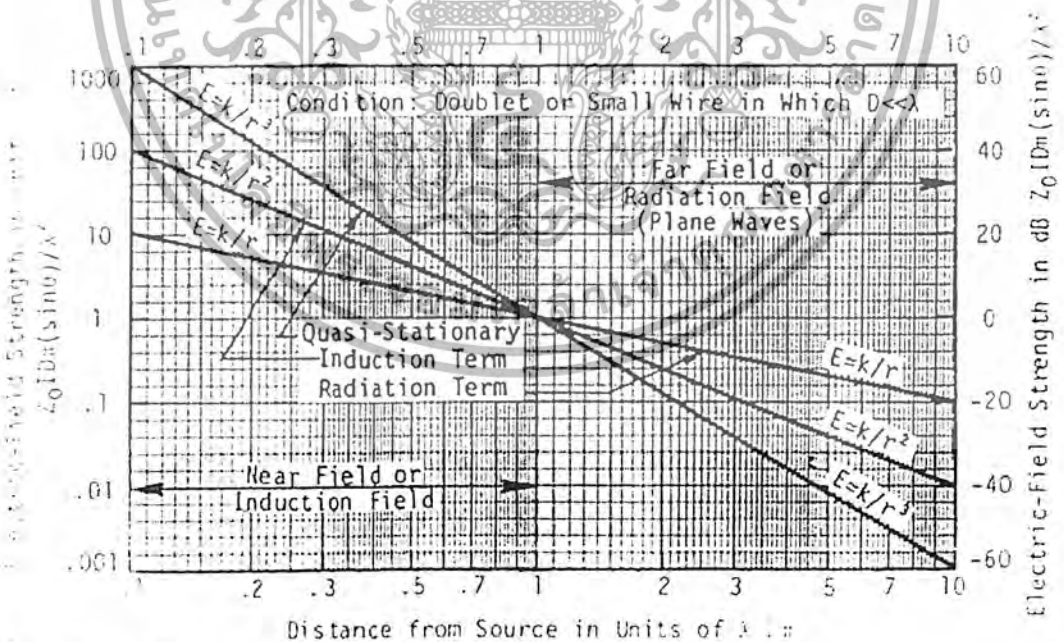
เมื่อ $r = \lambda / 2\pi$ ณ จุดนี้คือรอยต่อของ Near fields กับ Far fields สัมประสิทธิ์ของทุกเทอมทุกสมการมีขนาดเท่ากัน

ในสมการ (2.1), (2.2) และ (2.3)

เทอมที่ $E \propto 1/r^3$ เรียกว่า Quasi-stationary term

เทอมที่ $E \propto 1/r^2$ เรียกว่า Induction term

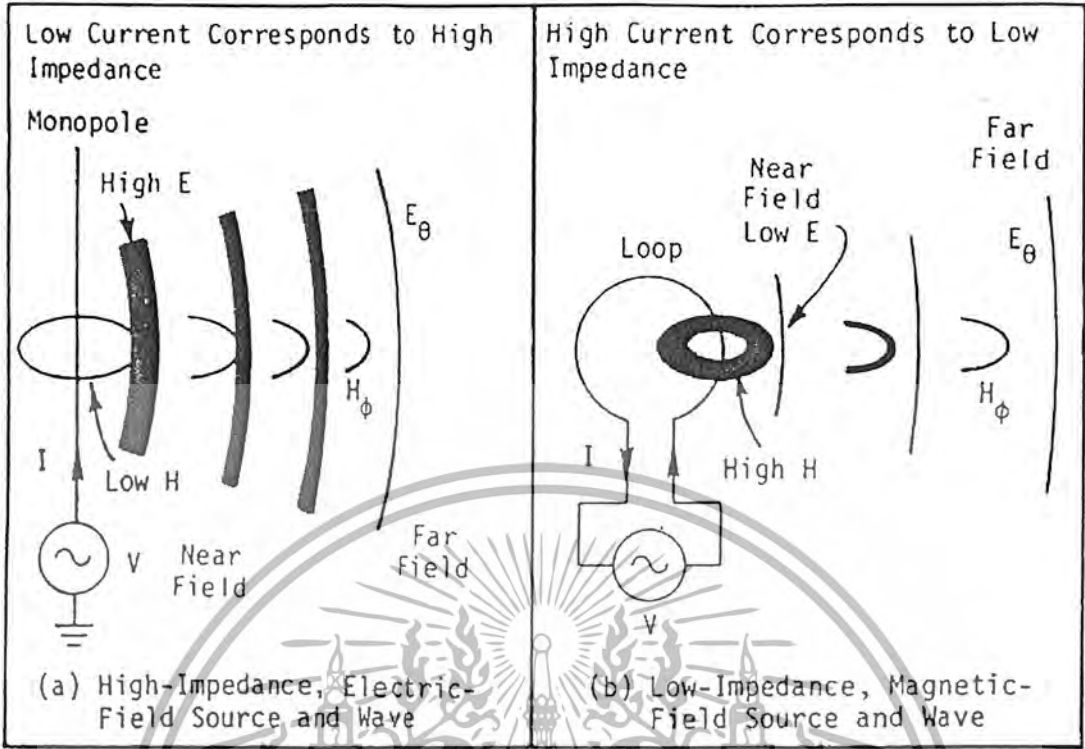
เทอมที่ $E \propto 1/r$ เรียกว่า Radiation term



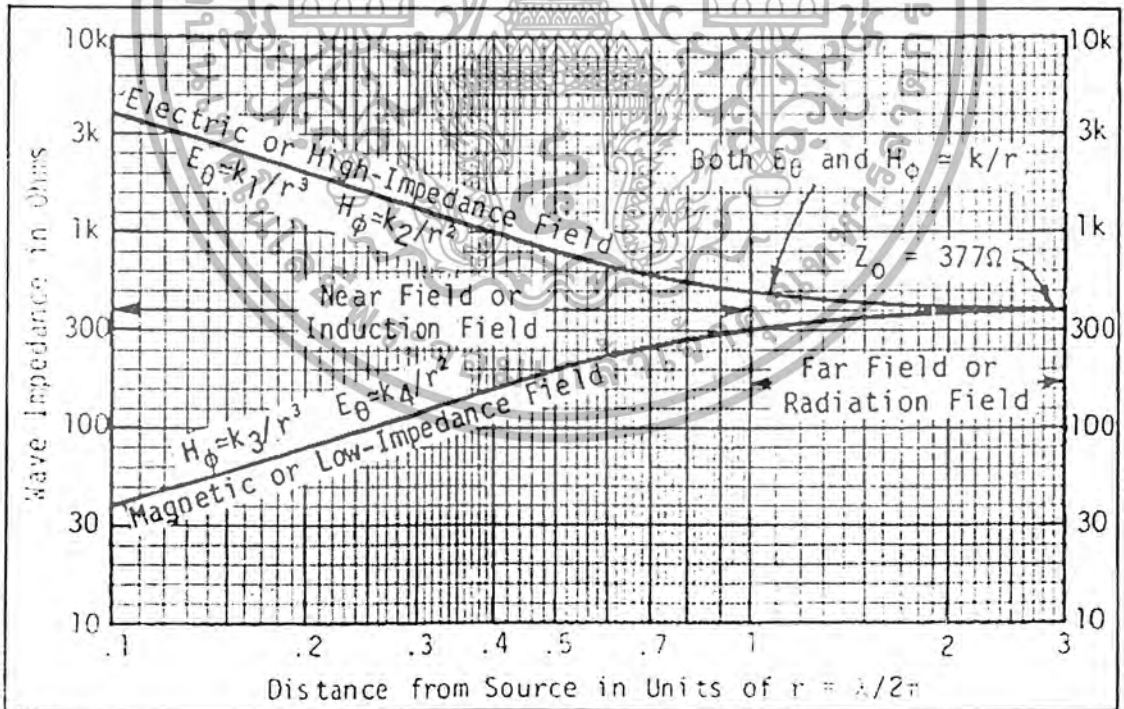
รูปที่ 2.9 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบกับระยะห่างจากแหล่งจ่าย

จากรูปกราฟแสดงให้เห็นว่า ใน Near fields พบว่า Quasi - Stationary term ($E \propto 1/r^3$) มีผลมากที่สุด ส่วนใน Far fields พบว่า Radiation term ($E \propto 1/r$) มีผลมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.11 Wave impedance เปรียบเทียบกับระยะห่างจากแหล่งจ่าย

จากรูปที่ 2.10 รูป a แสดงให้เห็นว่า short monopole หรือ straight wire ซึ่งที่ Near fields จะมี High - electric field ส่วนในรูป b ซึ่งเป็นแบบ loop wire จะมี High - magnetic field เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.11 เป็นกราฟแสดง wave impedance ที่ระยะห่างจาก source ต่างๆ ซึ่งที่ Far fields wave impedance จะมีค่า $Z_o = 377 \Omega$ คงที่

2.2.2.2 Wave Impedance (Z_w)

คือ Impedance ของคลื่นที่เคลื่อนที่บนอากาศ

ที่ Far fields $r \gg \lambda / 2\pi$

สำหรับ Plane wave

$$Z_w = E / H$$

$$Z_w = Z_o = \sqrt{\mu_o / \epsilon_o} = 120 \pi$$

$$Z_w = 377 \Omega$$

(2.4)

ที่ Near fields $r \ll \lambda / 2\pi$

สำหรับ Electric field

$$Z_w = \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right) \times Z_o \Omega$$

(2.5)

เมื่อ High - impedance (straight wire)

สำหรับ Magnetic field

$$Z_w = \left(\frac{2\pi r}{\lambda} \right) \times Z_o \Omega$$

(2.6)

เมื่อเป็น Low - impedance (loop wire)

เมื่อ

$$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$\epsilon_o = 1/36\pi \times 10^9 \text{ F/m}$$

2.2.2.3 Metal Impedance (Z_m)

คือ Impedance ของโลหะที่จะทำการ shield โดยพิจารณา intrinsic impedance ของ วัสดุใดๆ

$$Z_m = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.4 Skin depth (δ)

δ คือ ระยะความหนาของโลหะจากผิวซึ่งมีกระแสไหลคิดเป็น 63.2 % ของกระแสที่ไหลในโลหะทั้งหมด 2δ คิดที่ 86.5% 3δ คิดที่ 95.0%

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \tag{2.8}$$

Metal Impedance เมื่อ $t \gg \delta$ (t = ความหนาของโลหะ)

จาก Z_r เมื่อวัตถุเป็นโลหะ นั่นคือ $\sigma \gg \omega \epsilon$ จะได้

$$Z_m = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = (1+j) \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}}$$

$$|Z_m| = \sqrt{2 \times 10^3} \sqrt{\frac{\pi \mu f_{MHz}}{\sigma}}$$

$$|Z_m| = 369 \sqrt{\frac{\mu_r f_{MHz}}{\sigma}} \quad \mu \text{ } \Omega/\text{sq}$$

โดย $\sigma = \sigma_c \sigma_r$
 σ_c = conductivity of copper = 5.80×10^7 mhos/m
 σ_r = conductivity of metal relatives to copper

(2.9)

Metal Impedance เมื่อ $t < 3\delta$ จะได้

$$Z_m = \frac{\sigma}{(1 - e^{-t/\delta})}$$

$$|Z_m| = \frac{369 \sqrt{\mu_r f_{MHz} / \sigma}}{(1 - e^{-t/\delta})} \quad \Omega/\text{sq} \tag{2.10}$$

2.2.3 Shielding Effectiveness

Shielding Effectiveness (SE) เป็นการแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลดพลังงาน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไปรบกวนการทำงานของอุปกรณ์ใดๆ โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$SE = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{incident power density}}{\text{transmitted power density}} \right) \tag{2.11}$$

Incident power density = พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่วัดได้ที่จุดสนใจก่อนทำการชิลด์

Transmitted power density = พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่วัดได้ที่จุดสนใจหลังทำการชิลด์

การชิลด์ผลของ Magnetic fields และ Electric fields

สำหรับ Electric fields

$$SE = 20 \log_{10} \left(\frac{E_b}{E_a} \right) \tag{2.12}$$

เมื่อ E_b = Electric field strength ก่อนชิลด์

E_a = Electric field strength หลังชิลด์

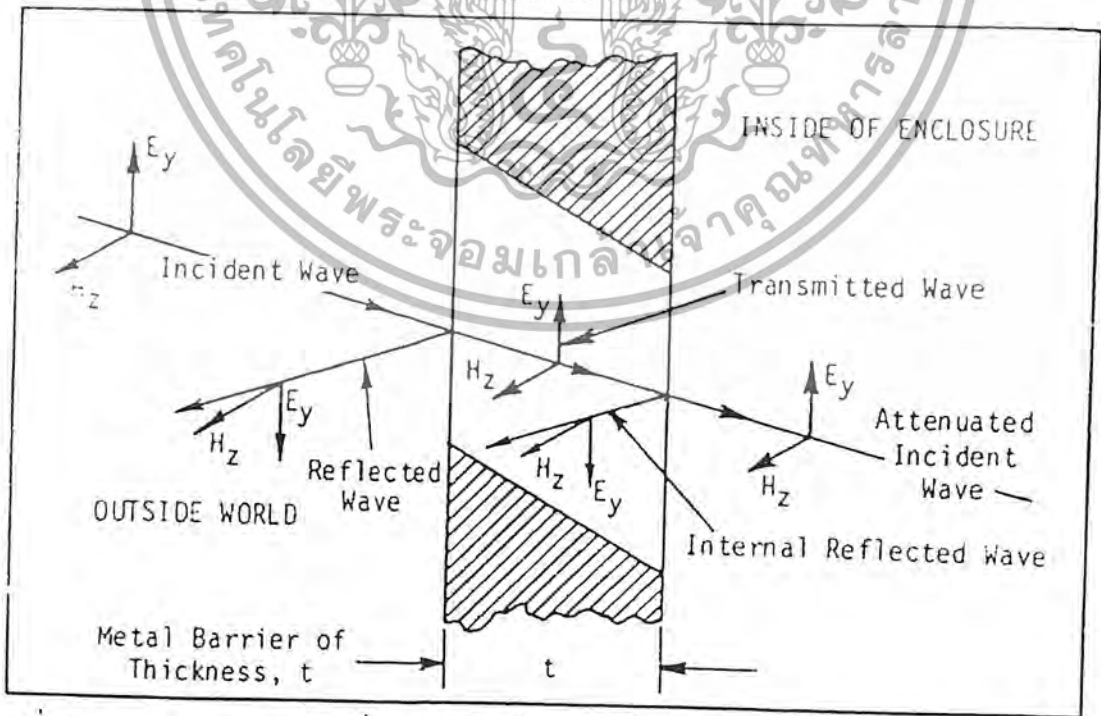
สำหรับ Magnetic fields

$$SE = 20 \log_{10} \left(\frac{H_b}{H_a} \right) \tag{2.13}$$

เมื่อ H_b = Magnetic field strength ก่อนชิลด์

H_a = Magnetic field strength หลังชิลด์

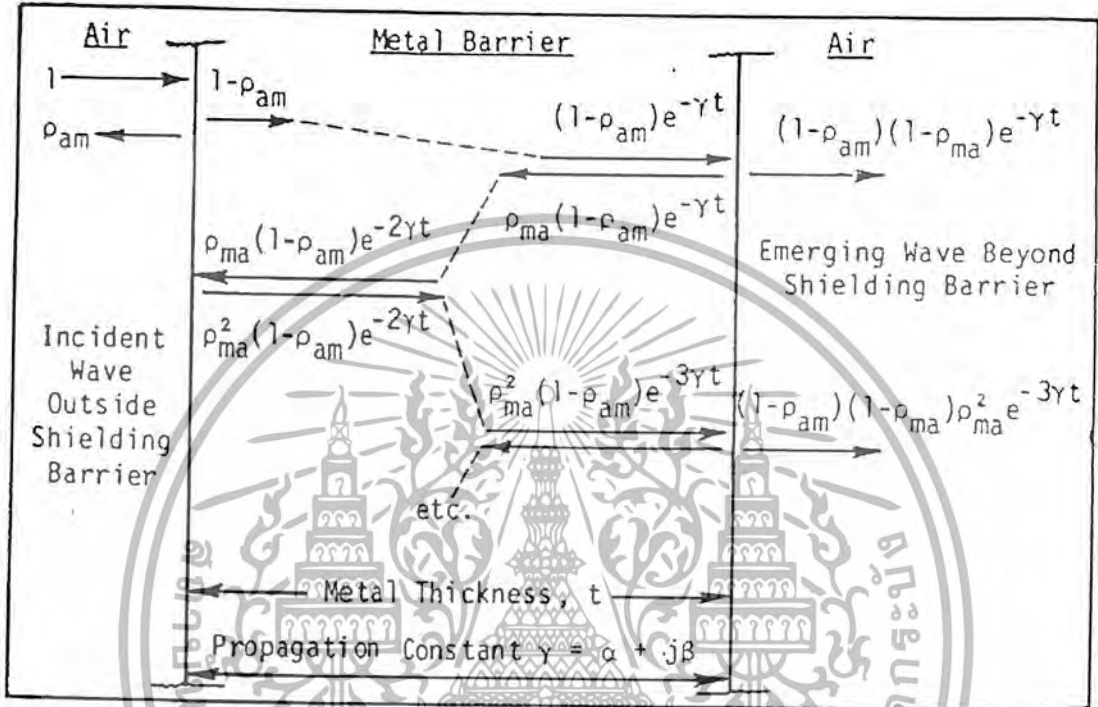
ใน Near fields wave impedance ของ Electric fields และ Magnetic fields ต่างกัน ดังนั้นในการชิลด์ จะให้ผลในสมการ (2.12), (2.13) ต่างกัน



รูปที่ 2.12 การสะท้อนและดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแผ่นโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.12 เป็นการแสดงให้เห็นถึงลักษณะของการใช้แผ่นโลหะมากั้นทางเดินของคลื่นเพื่อลดผลของ Electromagnetic wave โดยคลื่นส่วนหนึ่งจะมีการสะท้อนออกไป (reflected wave) ก่อนที่จะผ่านเข้าไปภายในแผ่นโลหะ ซึ่งที่แผ่นโลหะจะมีการดูดซับ ไว้ที่แผ่นโลหะทำให้คลื่นลดลง จากนั้นจะมีการสะท้อนภายในแผ่นโลหะ (internal Reflected Wave) ตรงรอยต่อของแผ่นโลหะกับอากาศอีก คลื่นที่เหลือคือคลื่นที่ผ่านออกไปหลังจากการทำซัด (attenuated incident wave)



รูปที่ 2.13 การเคลื่อนที่ของคลื่นในรูปของสมการ

จากรูปที่ 2.13 เป็นการแสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นในรูปของสมการโดย

$$\text{reflection coefficient } (\rho) = \frac{1 - k}{1 + k} \tag{2.14}$$

เมื่อ $k = Z_w / Z_m$ เมื่อคลื่นเคลื่อนที่จาก air to metal

$Z_w =$ Wave impedance

$Z_m =$ Metal impedance

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่จากอากาศผ่านเข้าสู่โลหะ (Air to metal) คลื่นส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับออกมา โดยมีสัมประสิทธิ์การสะท้อน คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนจากอากาศผ่านเข้าสู่โลหะ

$$\rho_{am} = \frac{1 - k}{1 + k} = \frac{z_m - z_w}{z_m + z_w} \tag{2.15}$$

เมื่อ $k = \frac{z_w}{z_m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่จากโลหะออกสู่อากาศ (Metal to air) ก็จะมีการสะท้อนที่รอยต่ออีก โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อน คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน จากโลหะออกสู่อากาศ

$$\rho_{ma} = \frac{k-1}{k+1} = \frac{z_w - z_m}{z_w + z_m} \quad (2.16)$$

เมื่อ $k = \frac{z_w}{z_m}$

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่จากอากาศผ่านเข้าสู่โลหะ (Air to metal) คลื่นที่ผ่านเข้าสู่โลหะพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากอากาศสู่โลหะดังนี้

$$\Gamma_{am} = 1 - \rho_{am} = \frac{2k}{1+k} = \frac{2z_w}{z_w + z_m} \quad (2.17)$$

และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากโลหะสู่อากาศ

$$\Gamma_{ma} = 1 - \rho_{ma} = \frac{2k}{1+k} = \frac{2z_m}{z_w + z_m} \quad (2.18)$$

จากรูปที่ 2.13 เมื่อเริ่มต้นคลื่นที่เคลื่อนที่มาก่อนจะกระทบแผ่นโลหะมีค่าเป็น 1 จะได้ว่า

(1) คลื่นที่สะท้อนเมื่อตกกระทบแผ่นโลหะคือ

$$1 \times \rho_{am} \quad (2.19)$$

(2) คลื่นที่ผ่านจากอากาศสู่โลหะที่รอยต่อคือ

$$1 \times \Gamma_{am} = 1 - \rho_{am} \quad (2.20)$$

(3) คลื่นที่รอยต่อ metal to air ภายในแผ่นโลหะน้อยกว่าที่รอยต่อ air to metal เนื่องจากคลื่นส่วนหนึ่งถูกดูดซับเอาไว้ภายในแผ่นโลหะ โดยขึ้นอยู่กับความหนา (t) ของโลหะซึ่งคลื่นที่รอยต่อ metal to air คือ

$$\Gamma_{am} e^{-\gamma} = \Gamma_{am} e^{-(\alpha + j\beta)t} = (1 - \rho_{am}) e^{-(\alpha + j\beta)t} \quad (2.21)$$

เมื่อ

$$\gamma = \text{propagation constant} = \alpha + j\beta$$

$$\alpha = \text{attenuation constant}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

β = phase constant
t = metal thickness

- (4) ที่ขอบ metal to air จะมีการสะท้อนของคลื่นที่รอยต่อนี้อีกครั้งเรียกว่า re-reflection คลื่นที่ สะท้อน ตรงนี้ คือ

$$\rho_{ma} \Gamma_{am} e^{-\gamma t} = \rho_{ma} (1 - \rho_{am}) e^{-\gamma t} \quad (2.22)$$

- (5) คลื่นที่ผ่านรอยต่อ metal to air ออกสู่อากาศ คือ

$$\Gamma_{ma} \Gamma_{am} e^{-\gamma t} = (1 - \rho_{ma}) (1 - \rho_{am}) e^{-\gamma t} \quad (2.23)$$

- (6) คลื่นที่สะท้อนที่รอยต่อ metal to air หรือ re-reflection จะเคลื่อนที่ผ่านโลหะมายังรอยต่อ metal to air ที่ขอบด้านซ้ายของแผ่นโลหะซึ่งคลื่นที่จุดนี้จะน้อยลงเพราะถูกดูดซับไว้ โดยคลื่นที่จุดนี้คือ

$$\rho_{ma} \Gamma_{am} e^{-2\gamma t} = \rho_{ma} (1 - \rho_{am}) e^{-2\gamma t} \quad (2.24)$$

- (7) คลื่นจากข้อ (6) จะสะท้อนที่ขอบอีกครั้ง โดยคลื่นที่สะท้อนกลับมาที่จุดนี้คือ

$$\rho_{ma}^2 (1 - \rho_{am}) e^{-2\gamma t} \quad (2.25)$$

- (8) คลื่นที่สะท้อนในข้อ (7) จะถูกดูดซับไว้อีกทำให้ ขอบรอยต่อที่จุด (8) คลื่นจะลดลงคือ

$$\rho_{ma}^3 (1 - \rho_{am}) e^{-3\gamma t} \quad (2.26)$$

- (9) คลื่นที่ผ่านออกมาที่จุดนี้คือ

$$\gamma_{ma} \rho_{ma}^2 (1 - \rho_{am}) e^{-3\gamma t} = \rho_{ma}^2 (1 - \rho_{ma}) (1 - \rho_{am}) e^{-3\gamma t} \quad (2.27)$$

และคลื่นก็จะมี การสะท้อนเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ซึ่งเราสามารถหาคลื่นรวมทั้งที่ผ่านแผ่นโลหะหรือคลื่นที่ วกได้หลังทำการซิดคั้งนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นรวมที่ผ่านแผ่นโลหะหลังทำการชิลด์แล้ว (Γ_{total})

$$\begin{aligned} \Gamma_{total} = & (1 - \rho_{am})(1 - \rho_{ma})e^{-\gamma t} \\ & + \rho_{ma}^2(1 - \rho_{am})(1 - \rho_{ma})e^{-3\gamma t} \\ & + \rho_{ma}^4(1 - \rho_{am})(1 - \rho_{ma})e^{-5\gamma t} \\ & + \rho_{ma}^6(1 - \rho_{am})(1 - \rho_{ma})e^{-7\gamma t} \\ & + \dots \end{aligned} \quad (2.28)$$

จะได้

$$\begin{aligned} \Gamma_{total} &= (1 - \rho_{am})(1 - \rho_{ma})e^{-\gamma t} \left[1 + \rho_{ma}^2 e^{-2\gamma t} + \rho_{ma}^4 e^{-4\gamma t} + \rho_{ma}^6 e^{-6\gamma t} + \dots \right] \\ \Gamma_{total} &= (1 - \rho_{am})(1 - \rho_{ma})e^{-\gamma t} \left[1 - \rho_{ma}^2 e^{-2\gamma t} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (2.29)$$

แทนค่า $\rho_{am} = \frac{1-k}{1+k} = \frac{z_m - z_w}{z_m + z_w}$, $\rho_{ma} = \frac{k-1}{k+1} = \frac{z_w - z_m}{z_w + z_m}$ ใน (2.29) จะได้

$$\Gamma_{total} = e^{-\gamma t} \left[\frac{4k}{(k+1)^2} \left[1 - \left(\frac{k-1}{k+1} \right)^2 e^{-2\gamma t} \right]^{-1} \right] \quad (2.30)$$

สมการแสดงประสิทธิภาพการชิลด์

$$SE_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{\text{คลื่นที่วัดได้ก่อนทำการshield}}{\text{คลื่นที่วัดได้หลังทำการshield}} \right) \quad (2.31)$$

จาก (2.30) แทนค่า Γ_{total} ใน (2.31) จะได้

$$SE_{dB} = 20 \log_{10} e^{\gamma t} \left[\frac{(k+1)^2}{4k} \right] \left[1 - \left(\frac{k-1}{k+1} \right)^2 e^{-2\gamma t} \right] \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} SE_{dB} &= 20 \log_{10} \left| e^{\gamma t} \right| + 20 \log_{10} \left| \frac{(k+1)^2}{4k} \right| \\ &+ 20 \log_{10} \left| 1 - \left(\frac{k-1}{k+1} \right)^2 e^{-2\gamma t} \right| \end{aligned} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการแสดงประสิทธิภาพการขีดคืนใน (2.33) สามารถแสดงในรูปการดูดซับ, การสะท้อน และ re-reflect ดังนี้

$$SE_{dB} = A_{dB} + R_{dB} + RR_{dB} \tag{2.34}$$

A_{dB} = Absorption loss
 R_{dB} = Reflection loss
 RR_{dB} = Re-Reflection

2.3.1 Absorption Loss (dB)

เมื่อการสูญเสียเนื่องจากคลื่นเคลื่อนที่ผ่านโลหะที่มากขึ้นทางเดินทำให้คลื่นที่ผ่านออกไปมีพลังงาน

ลดลง โดย

$$\begin{aligned}
 A_{dB} &= 20 \log_{10} |e^{-\gamma l}| \\
 &= 20 \log_{10} |e^{-(\alpha + j\beta)l}| \\
 &= 20 \log_{10} |e^{-\alpha l}| |e^{-j\beta l}| \\
 &= 20 \log_{10} |e^{-\alpha l}| \\
 &= 8.686 \alpha l
 \end{aligned} \tag{2.35}$$

$$\begin{aligned}
 \gamma = \alpha + j\beta &= \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} \\
 &= \sqrt{j\omega\mu\sigma}
 \end{aligned}$$

$$= (1 + j)\sqrt{\pi f\mu\sigma} \tag{2.36}$$

เมื่อ $\sigma \gg \omega\epsilon$ สำหรับโลหะ

นั่นคือ $\alpha = \beta = \sqrt{\pi f\mu\sigma}$ สำหรับโลหะจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_{dB} = 8.686 \alpha l = 8.686 l \sqrt{\pi f \mu \sigma}$$

$$A_{dB} = 131.4 l_{mm} \sqrt{f_{MHz} \mu_r \sigma_r} \quad (2.37)$$

2.2.3.2 Reflection Loss (dB)

เป็นการสูญเสียพลังงานคลื่นเนื่องจากการสะท้อนของคลื่นเมื่อมีโลหะมากั้นทางเดินคลื่นซึ่งถ้ามันสะท้อนได้มากก็แสดงว่ามันลดพลังงานคลื่นด้วยการสะท้อนได้ดี

$$R_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{(1+k)^2}{4k} \right| \text{ dB} \quad (2.38)$$

ค่า K ที่พิจารณาดังนี้

ที่ Electric fields (High-impedance field)

$$K = 1/2\pi r f \epsilon_0 \sqrt{2\pi f \mu \sigma} \quad (2.39)$$

ที่ Magnetic fields (Low-impedance fields)

$$K = r \sqrt{2\pi f \mu_r \epsilon_0 / \mu_r} \quad (2.40)$$

ที่ Plane wave

$$K = 1/\sqrt{2\pi f \mu_r \epsilon_0 / \sigma} \quad (2.41)$$

2.2.3.3 Re - Reflection Correction

$$\begin{aligned} RR_{dB} &= 20 \log_{10} \left| 1 - \left(\frac{k-1}{k+1} \right)^2 e^{-2\gamma} \right| \\ &= 20 \log_{10} \left| 1 - \left(\frac{k-1}{k+1} \right)^2 e^{-2i(\alpha+j\beta)} \right| \end{aligned} \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

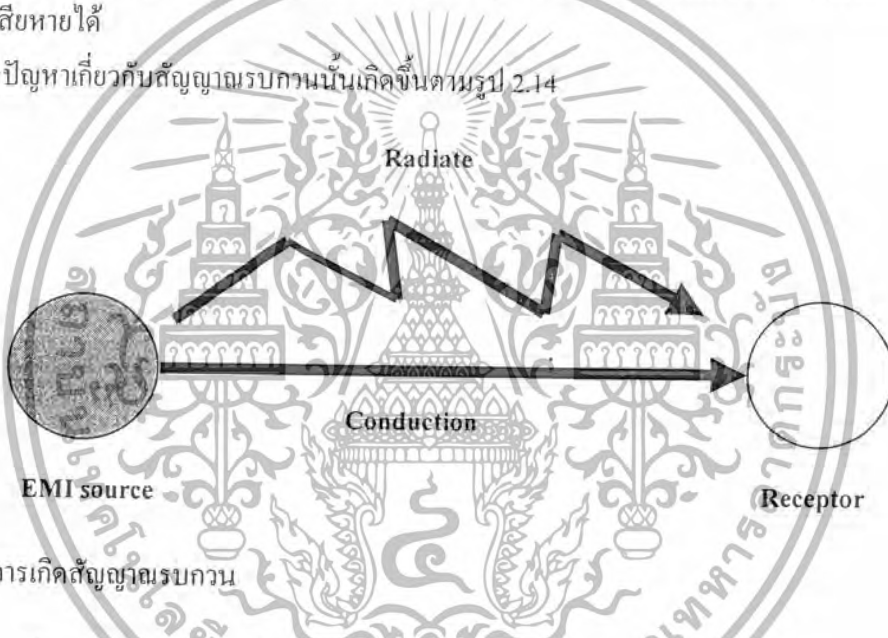
เนื่องจากโลหะ $\sigma \gg \omega\epsilon$ จะได้ $\alpha = \beta = \sqrt{\pi\mu\sigma}$ และจาก $A_{dB} = 8.686 \alpha l$
 จะได้ $\alpha l = \frac{A_{dB}}{8.686}$ และจะได้

$$RR_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 - \left(\frac{k-1}{k+1} \right)^2 e^{-0.23 A_{dB} (1+j)} \right| \quad (2.43)$$

2.3 บทสรุป

เป็นการศึกษาเกี่ยวกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความเข้ากันได้
 ใต้นั้นเกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความจุสูง (High-density electronic components) ซึ่งอุปกรณ์
 อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความจุสูงนี้อาจจะทำให้การทำงานของอุปกรณ์เครื่องมือหรือระบบมีความผิดพลาดหรือ
 เกิดความเสียหายได้

ซึ่งปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนนั้นเกิดขึ้นตามรูป 2.14



รูปที่ 2.14 การเกิดสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 2.14 อธิบายได้ดังนี้

EMI source คือ อุปกรณ์หรือเครื่องมือส่งสัญญาณรบกวน

Receptor คือ ระบบหรืออุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวน

Radiation คือ สัญญาณรบกวนที่แผ่ไปทางอากาศ

Conduction คือ สัญญาณรบกวนที่ไปทางสายตัวนำ

ซึ่งในที่นี่จะทำการศึกษาเกี่ยวกับการป้องกันไม่ให้สัญญาณรบกวนนั้นออกไปรบกวนระบบหรือ
 อุปกรณ์

ซึ่งการป้องกันสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำจะใช้วงจรกรองความถี่ (Filter) และการป้องกัน
 สัญญาณรบกวนทางอากาศจะใช้ทฤษฎีการชีลด์ สัญญาณรบกวนอากาศจะแบ่งออกเป็น สนามไฟฟ้า
 (Electric Field) สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Plane Wave)

โดยในโครงการนี้จะเป็นแบบสนามแม่เหล็ก โดยใช้สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายเป็น EMI source ซึ่ง
 ทำการวัดที่ระยะ 2 cm. ซึ่งสามารถพิจารณาการแยกคลื่นได้โดยการแบ่งว่าเป็นสนามแบบใดได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่เช่นใดในการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$r \ll \lambda/2\pi$ เป็น near field

$r \gg \lambda/2\pi$ เป็น far field

$$\lambda = c/f$$

$$= 3 \cdot 10^8 / 30.2 \cdot 10^3$$

$$= 9933.77 \text{ m}$$

$$\lambda/2 = 9933.77 / 2\pi$$

$$= 1581.81 \text{ m}$$

ใช้ระยะวัด $r = 2 \text{ cm}$.

$0.02 \ll 1581.81$ เป็น near field

และ near field สามารถแยกได้เป็นสนามแม่เหล็ก จากสมการที่ 2.6

$$\left(\frac{2\pi r}{\lambda} \right) \times Z_0 \ll Z_0$$

$$= 2\pi \cdot 0.02 \cdot 377 / 9933.77$$

$$= 0.0047$$

จะได้ $0.0047 \ll 377$ เป็น low impedance (magnetic field)

โดยรายละเอียดในการวัดต่างๆ จะได้กล่าวในบทต่อไป

บทที่ 3

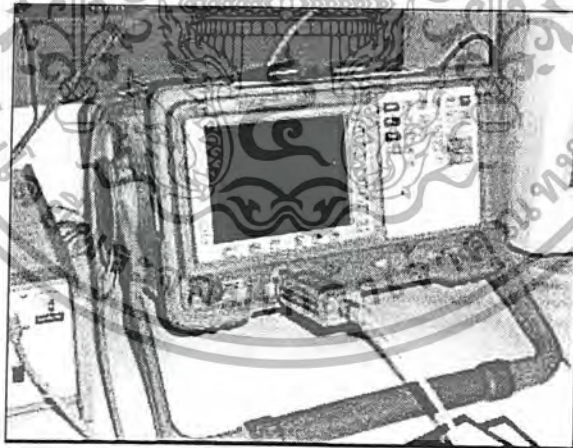
การออกแบบการทดลองและวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะประกอบไปด้วย อุปกรณ์และเครื่องมือ การออกแบบและวิธีการทดสอบ รายละเอียดจะบอกถึงอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบในโครงการนี้มีอะไรบ้าง หลักการทำงานและประโยชน์ของแต่ละตัวเป็นอย่างไร มีหน้าที่อะไร และอธิบายถึงขั้นตอนและวิธีการทดสอบโครงการนี้ ว่ามีวิธีการทดสอบอย่างไรบ้าง ขั้นตอนในการทดสอบเป็นอย่างไร

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 เครื่อง EMC Analyzer รุ่น E7401A

เป็นเครื่องมือที่ใช้ประกอบการวัดสัญญาณรบกวน สามารถวัดสัญญาณรบกวนได้ทั้งทางสาย คิวนำและทางอากาศ พิกัดความถี่ 9 kHz – 1.5 GHz ในโครงการนี้ใช้ย่านความถี่ 9 kHz – 150 kHz และจะวัดสัญญาณรบกวนที่มาทางอากาศ การวัดจะต้องใช้ EMC Analyzer ร่วมกับ Close-Field Probe ดังรูปที่ 3.2 โดยจะรับสัญญาณรบกวนทางอากาศผ่าน Close-Field Probe แล้วส่งสัญญาณไปยังเครื่อง EMC Analyzer จึงทำการประมวลผลและแสดงทางมอริเตอร์ สามารถแสดงผลได้ทั้ง time domain และ frequency domain ยังสามารถบันทึกข้อมูลในรูปแบบของ ไฟล์ข้อมูลและไฟล์ภาพได้



รูปที่ 3.1 เครื่อง EMC Analyzer

3.1.2 Close-Field Probe รุ่น Agilent 11941A

เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กผ่านทางอากาศ โดยจะมีหลายขนาดแต่ละขนาดจะแบ่งตาม ย่านความถี่ที่ใช้วัด ในโครงการนี้ใช้ย่านความถี่ 9 kHz – 3 MHz เพราะสัญญาณรบกวนที่ใช้พิจารณาเกิดจากสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย ซึ่งมีความถี่สวิตชิงเท่ากับ 30.2 kHz โดยการทำงานของ

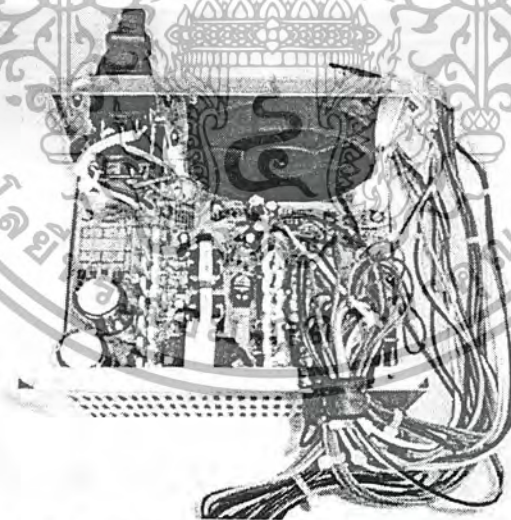
Close-Field Probe จะรับสัญญาณรบกวนที่แผ่มาทางอากาศผ่านทางด้านปลายของโพรบ ผ่าน สายตัวนำไปยังเครื่อง EMC Analyzer



รูปที่ 3.2 Close-Field Probe

3.1.3 Switching Power Supply ขนาด 400 W

สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ แนวทางในการเลือกใช้สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายเพราะเป็นอุปกรณ์กำเนิดกำลังที่ความถี่สูงจึงทำให้เกิดสัญญาณรบกวน และมีผลกระทบต่อเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นๆ ที่อยู่ใกล้ตัวสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย



รูปที่ 3.3 Switching Power Supply ขนาด 400 W

การทำงานส่วนต่างๆ ของสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย

1. ไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า (AC Input) เมื่อเสียบปลั๊ก ไฟกระแสสลับจะวิ่งเข้ามายังเครื่องใช้ไฟฟ้า

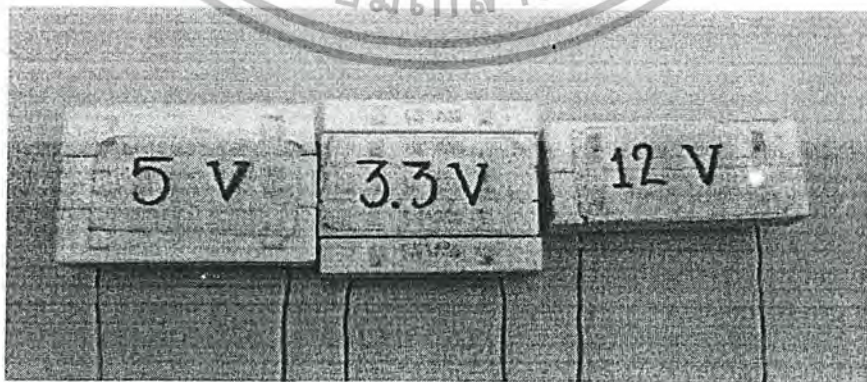
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ฟิวส์ (Fuse) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการป้องกันวงจรเพาเวอร์ซัพพลาย โดยหากเกิดกระแสไฟฟ้าแรงสูงเกินกว่าที่ฟิวส์จะทนได้ ฟิวส์ก็ตัดทันที
3. วงจรกรองแรงดัน เพื่อป้องกันแรงดันไฟที่ผิดปกติ เช่น ไฟกระชาก
4. ภาคเรกติไฟเออร์ (Rectifier) คือ แปลงไฟกระแสสลับให้เป็นไฟกระแสตรง ซึ่งประกอบด้วย
 - 4.1 ตัวเก็บประจุ (capacitor)
 - 4.2 ไดโอดบริดจ์เรกติไฟเออร์ (Bridge Rectifier) จะอยู่ในรูปของ IC หรือเป็นแบบไดโอด 4 ตัว ต่อกันให้เป็นวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์
5. วงจรสวิตชิง (switching) เป็นวงจรที่ใช้ทำงานร่วมกับวงจรควบคุม (control circuit) เพื่อตรวจสอบว่าควรจ่ายแรงดันทั้งหมดให้กับระบบ
6. หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) เป็นหม้อแปลงที่มีหน้าที่ในการแปลงไฟที่ได้จากภาคสวิตชิง
7. วงจรควบคุมแรงดัน (voltage control) เป็นวงจรที่จะกำหนดค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับมาจากหม้อแปลงไฟฟ้า โดยค่าของระดับไฟฟ้าจะมีขนาด 5 V, 12 V, 3.3 V
8. วงจรควบคุม เป็นวงจรที่ใช้ในการควบคุมวงจรสวิตชิง

3.1.4 ภาระทางไฟฟ้า (Load)

3.1.4.1 กำลังไฟฟ้ารวม 147 W

- ที่เอาต์พุต 3.3 V ค่าความต้านทาน 1Ω 20 W ขนานกัน 5 ตัว กระแสรวม 10.8 A
กำลังไฟฟ้ารวม 35.64 W
- ที่เอาต์พุต 5 V ค่าความต้านทาน 1Ω 30 W ขนานกัน 3 ตัว กระแสรวม 11.5 A
กำลังไฟฟ้ารวม 57.5 W
- ที่เอาต์พุต 12 V ค่าความต้านทาน 5.6Ω 30 W ขนานกัน 2 ตัว กระแสรวม 4.5 A
กำลังไฟฟ้ารวม 54 W

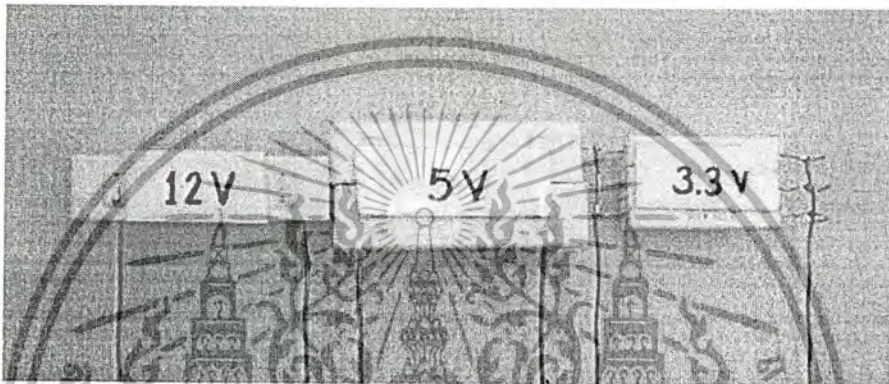


รูปที่ 3.4 ภาระทางไฟฟ้า 147 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4.2 กำลังไฟฟ้ารวม 95 W

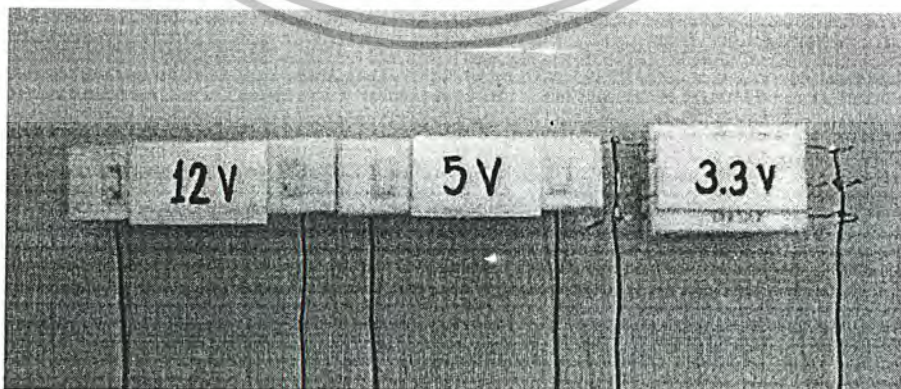
- ที่เอาต์พุต 3.3 V ค่าความต้านทาน 1Ω 10 W ขนานกัน 3 ตัว กระแสรวม 7.6 A
กำลังไฟฟ้ารวม 25.08 W
- ที่เอาต์พุต 5 V ค่าความต้านทาน 1Ω 30 W ขนานกัน 2 ตัว กระแสรวม 8.5 A
กำลังไฟฟ้ารวม 42.5 W
- ที่เอาต์พุต 12 V ค่าความต้านทาน 5.6Ω 30 W 1 ตัว กระแสรวม 2.3 A
กำลังไฟฟ้ารวม 27.6 W



รูปที่ 3.5 ภาระทางไฟฟ้า 95 W

3.1.4.2 กำลังไฟฟ้ารวม 55 W

- ที่เอาต์พุต 3.3 V ค่าความต้านทาน 1Ω 10 W ขนานกัน 2 ตัว กระแสรวม 5.5 A
กำลังไฟฟ้ารวม 18.15 W
- ที่เอาต์พุต 5 V ค่าความต้านทาน 1Ω 30 W 1 ตัว กระแสรวม 4.6 A
กำลังไฟฟ้ารวม 23 W
- ที่เอาต์พุต 12 V ค่าความต้านทาน 10Ω 30 W 1 ตัว กระแสรวม 1.2 A
กำลังไฟฟ้ารวม 14.4 W



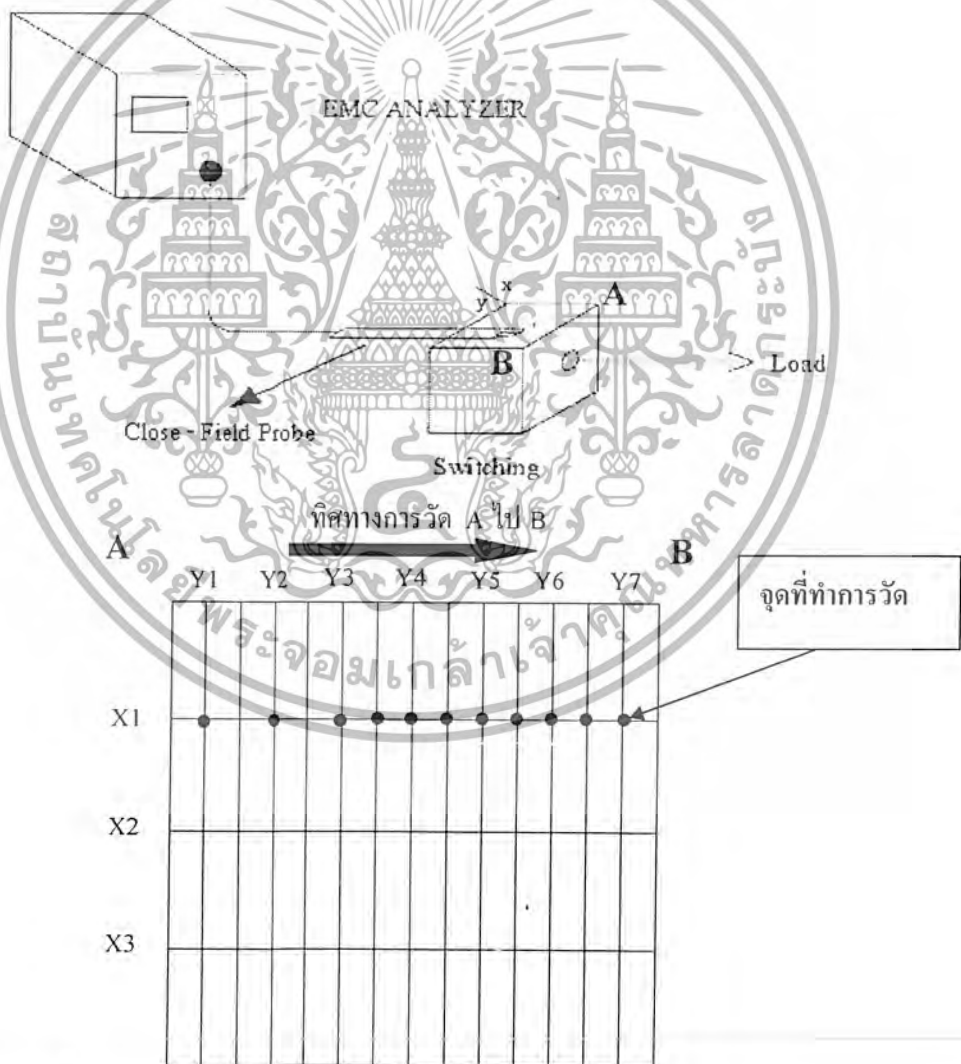
รูปที่ 3.6 ภาระทางไฟฟ้า 55 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการวัดและขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2.1 วิธีการวัด

ในการวัดสัญญาณรบกวนที่ส่งผ่านมาทางอากาศ (radiate emission) จะทำการวัดทางด้านบนของสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย ตำแหน่งที่ทำการวัดจะเป็นไปดังรูป โดยจะวัดทุกจุดเพื่อดูขนาดของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นว่าตำแหน่งใดมีค่ามาก และตำแหน่งที่มีค่ามากเป็นตำแหน่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดใด ทำให้ทราบว่าอุปกรณ์ชนิดใดเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนมากที่สุด โดยมีระยะที่ทำการวัดเท่ากับ 2 เซนติเมตร คือให้เครื่องมือที่ใช้วัด (probe) สูงจากสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย 2 เซนติเมตร

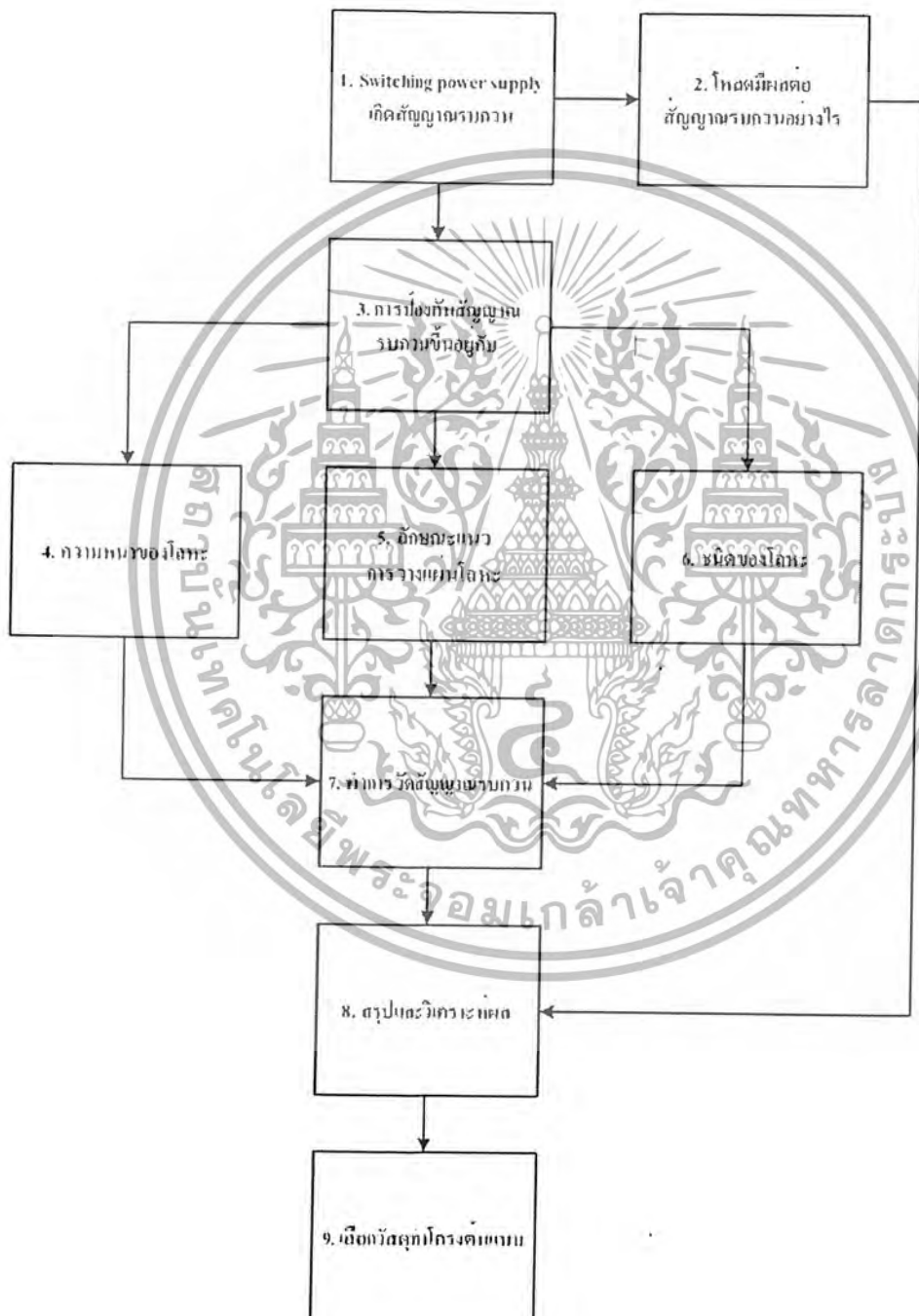


รูปที่ 3.7 จำลองการวัดและจุดที่ทำการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน จะอธิบายเป็นบล็อกไดอะแกรม ตามลำดับของการดำเนินงานให้เป็นไปตามลำดับ ทำให้ไม่เกิดการสับสน และง่ายต่อการดำเนินงาน



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 วิธีการทำงานตาม Block diagram

- Block 1 Switching Power Supply เกิดสัญญาณรบกวน โดยทำการต่อ Switching Power Supply เข้ากับโหลดพร้อมที่จะใช้งาน
- Block 2 Load มีผลต่อสัญญาณรบกวนอย่างไร ขณะต่อใช้งาน
- Block 3 การป้องกันสัญญาณรบกวนขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบหลายๆอย่างซึ่งแต่ละอย่างมีผลต่อการทดสอบเช่นกัน
- Block 4 ความหนาของโลหะ ทำการชิลด์ โดยใช้โลหะแต่ละชนิดที่มีความหนาต่างกันมาทำการทดสอบ
- Block 5 ลักษณะการวางแผ่นโลหะ คือ การวางของโลหะตามแนวและตามขวางของฝาครอบเดิมของ switching power supply
- Block 6 ชนิดโลหะ คือโลหะแต่ละชนิดซึ่งมีคุณสมบัติต่างกันจึงต้องทำการทดสอบว่าโลหะชนิดใดสามารถทำการชิลด์ได้ดี
- Block 7 ทำการวัดสัญญาณรบกวน โดยนำโลหะแต่ละชนิดมาทำการวัดสัญญาณรบกวนทำการวัดเหมือนกันทุกชนิด โดยนำแผ่นโลหะมาทับกับ switching power supply ขณะที่ switching power supply เปลือยฝาครอบเดิมออก
- Block 8 สรุปและวิเคราะห์ผล นำผลการทดสอบมาวิเคราะห์แล้วสรุปผลการทดลอง
- Block 9 เลือกวัสดุมาทำโครงคั่นแบบ โดยนำโลหะที่ได้มาจากการวิเคราะห์มาออกแบบเป็นโครงคั่นแบบต่อมา

3.3 บทสรุป

จุดประสงค์ในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ วิธีการวัดสัญญาณรบกวนความถี่สูง และขั้นตอนการดำเนินงานและสามารถสรุปได้ที่หัวข้อดังนี้

3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

ทำให้ทราบว่าการศึกษาเรื่องการลดทอนสัญญาณรบกวนด้วยวิธีการชิลด์นั้นจะต้องมีเครื่องมืออะไรบ้างที่ใช้ในการศึกษาและทราบถึงวิธีการใช้เครื่องมือและมาตรฐานการตั้งย่านวัดต่างๆ

3.3.2 วิธีการวัดสัญญาณรบกวน

หัวข้อนี้ทำให้ทราบถึงวิธีการวัดสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่ผ่านมาจากอากาศ (Radiate) ว่ามีเทคนิคในการวัดอย่างไร ที่ตำแหน่งใดบ้าง

3.3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การบอกขั้นตอนการดำเนินงานจะทำให้รูปแบบที่จะทำการศึกษาดูง่ายขึ้นและสามารถแยกเงื่อนไขในการลดทอนสัญญาณรบกวนทำให้การดำเนินงานและการวิเคราะห์ง่ายขึ้นไม่เกิดการสับสน และใช้รูปแบบการดำเนินงานในรูปที่ 3.8 เป็นขั้นตอนการดำเนินงานในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

การทดสอบการวัดขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กผ่านทางอากาศ (radiate) ในบทนี้ จะทำการทดสอบโดยมีเงื่อนไขในการทดสอบหลายเงื่อนไข คือ

1. ภาระทางไฟฟ้ามีผลต่อขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กหรือไม่
 2. การซีลด์โดยใช้แผ่น โลหะ
 - 2.1 ความหนาของแผ่น โลหะมีผลต่อขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กหรือไม่
 - 2.2 แนวการวาง (grain) ของเนื้อ โลหะที่ใช้ทดสอบมีผลต่อขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กหรือไม่
 - 2.3 ชนิดของวัสดุทดสอบ มีผลต่อขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กหรือไม่
 3. การซีลด์โดยใช้กล่องโลหะ โดยน้ำทองแดง ทองเหลือง อลูมิเนียม มาทำเป็นกล่องแล้ววัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ออกมาว่าวัสดุชนิดใดสามารถลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กได้มากกว่าและขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ลดได้นั้นแตกต่างกันเป็นแบบแผนอย่างไร
- เงื่อนไขต่างๆนี้สามารถนำมาเขียนไว้ในตารางซึ่งทำให้เข้าใจได้ง่ายยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในเงื่อนไขต่างๆ

ความถี่ (kHz)	สัญญาณรบกวนแม่เหล็ก (dB μ A/m)														
	โหลด (W)			ความหนา (Al)			แนวการวาง (Al)		ชนิดโลหะ			กล่องซีลด์			
	55	95	147	0 mm	0.5 mm	1 mm	วางตามกัน	วางขวางกัน	Al	Cu	B	Al	Cu	B	
30.2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
59.8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

หมายเหตุ :

- * คือ การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแต่ละเงื่อนไข
- Al คือ อลูมิเนียม
- Cu คือ ทองแดง
- B คือ ทองเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ผลของภาระทางไฟฟ้าที่มีผลต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก

4.1.1 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบให้สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายจ่ายไฟให้กับภาระทางไฟฟ้า 3 ขนาด คือ 55 วัตต์, 95 วัตต์ และ 147 วัตต์ ตามลำดับ โดยสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายจะทำการเปิดฝาครอบออก แล้วทำการวัดผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยวิธีการวัดจะเป็นไปตามหัวข้อ 3.2.1 แล้วทำการเปรียบเทียบ ผลที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่โหลดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

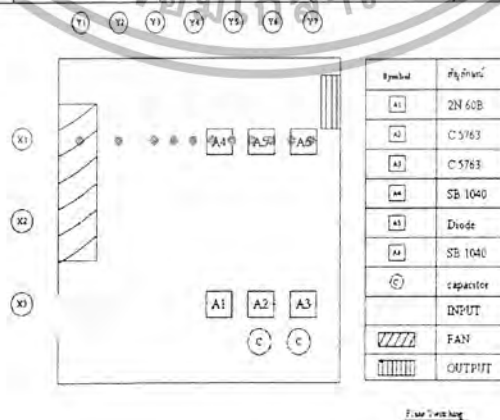
4.1.2 ผลจากการทดสอบ

เป็นผลจากการวัดขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากโหลดขนาดต่างกัน โดยเปิดฝาครอบของสวิทซ์เพาเวอร์ซัพพลายออก (without) โดยจะพิจารณาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ 2 ความถี่คือ 30.2 kHz และ 59.8 kHz

4.1.2.1 ตารางแสดงผลการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่แนวแกน x1 ดังแสดงตำแหน่งการวัดไว้ดังรูปที่ 4.2 โดยจะทำการวัดตามตำแหน่งจากซ้ายไปขวา

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่า Radiate โดยเปิดฝากล่องที่ power output ต่างๆ ที่แนวแกน x1

ตำแหน่ง (x,y)	สัญญาณรบกวนแม่เหล็ก (dB μ A/m)					
	power output=147 W		power output=95 W		power output=55 W	
	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz
1,1	27.8	22	12.77	10.2	11.41	-
1,2	32.11	30	17.84	16.17	15.88	-
1,3	36.5	37.18	26.48	21	23.69	13.27
1,3.5	39.33	39	30.64	25.11	27.25	15.78
1,4	41	42.3	33.88	27.85	30.01	17.77
1,4.5	43	44.61	36.67	30.29	33.07	20.14
1,5	45	46.89	39.12	32.56	35.33	22.58
1,5.5	48	48.49	40.75	34.27	37.2	23.79
1,6	49.08	49	41.76	35.41	38.1	25.11
1,6.5	49	49.72	42.31	35.86	38.62	24.56
1,7	49.2	49	41.75	35.48	38.34	25.36

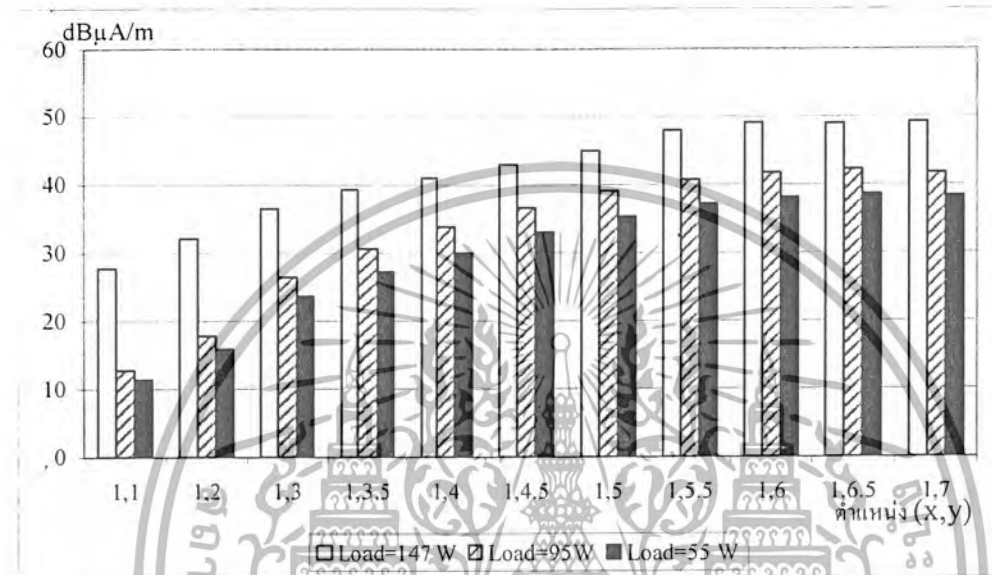


รูปที่ 4.2 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน X1

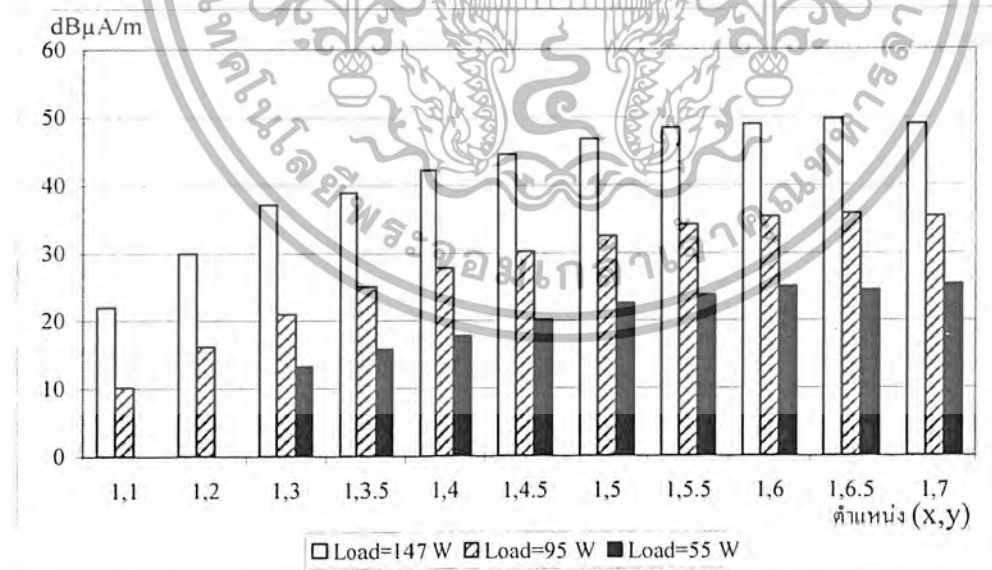
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่โหลดขนาดต่างๆที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz

เป็นการนำค่าจากในตารางที่ 4.1 มาทำการเปรียบเทียบที่แนวแกน x1 เพื่อให้เห็นขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่โหลดต่างๆที่เกิดขึ้นที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ โหลด ต่างๆที่ f=30.2 kHz ที่แนวแกน x1 (เปิดฝากล่อง)



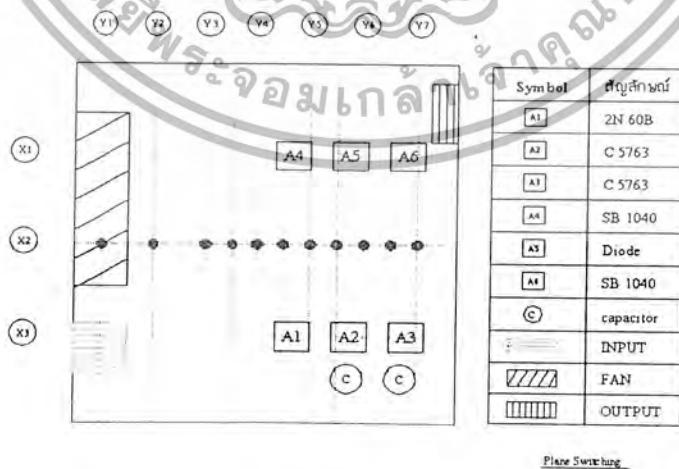
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ โหลด ต่างๆที่ f=59.8 kHz ที่แนวแกน x1 (เปิดฝากล่อง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.3 ตารางแสดงผลการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่แนวแกน x2 ดังแสดงตำแหน่งการวัดไว้ดังรูปที่ 4.5 โดยจะทำการวัดตามตำแหน่งจากซ้ายไปขวา

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดค่า Radiate โดยเปิดฝากล่องที่ power output ต่างๆ ที่แนวแกน x2

ตำแหน่ง (x,y)	สัญญาณรบกวนแม่เหล็ก (dB μ A/m)					
	power output=147W		power output=95W		power output=55W	
	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz
2.1	20	24.99	12.18	19.88	-	18.36
2.2	22	30.15	13.34	24.39	-	22.03
2.3	24	34.07	15.31	28.56	11.46	26
2,3,5	26	35.92	19.64	29.5	14.77	27.4
2,4	30	37.69	23.42	31.06	19.43	27.93
2,4,5	43	44.61	27.54	31.9	23.1	28.85
2,5	46	46.89	30.54	32.75	25.67	29.52
2,5,5	31	40.37	32.7	33.23	28.81	29.43
2,6	33	41.44	34.07	33.2	29.64	28.71
2,6,5	30,5	39.4	34.24	33	30	27.66
2,7	26	37.35	33.44	31.21	29.04	25.85



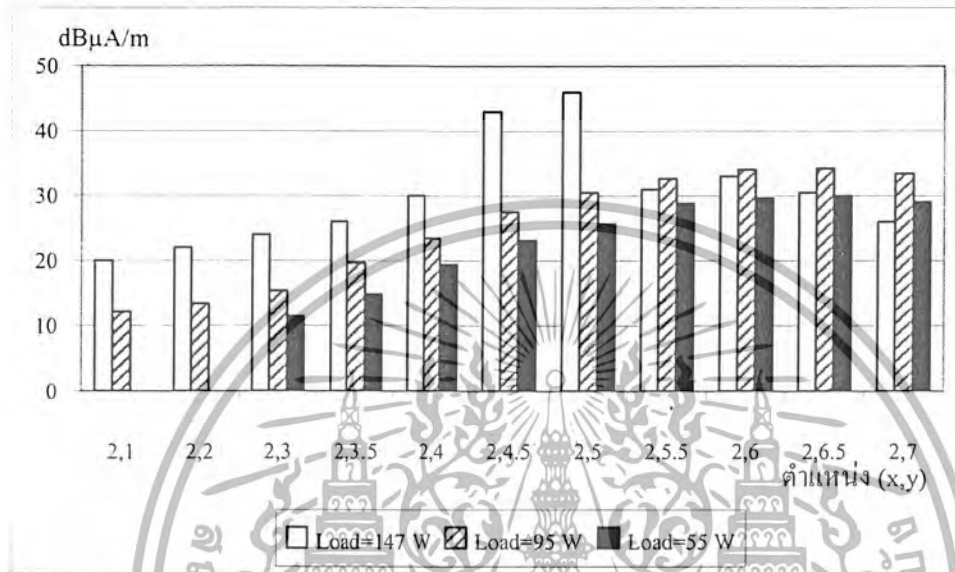
รูปที่ 4.5 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

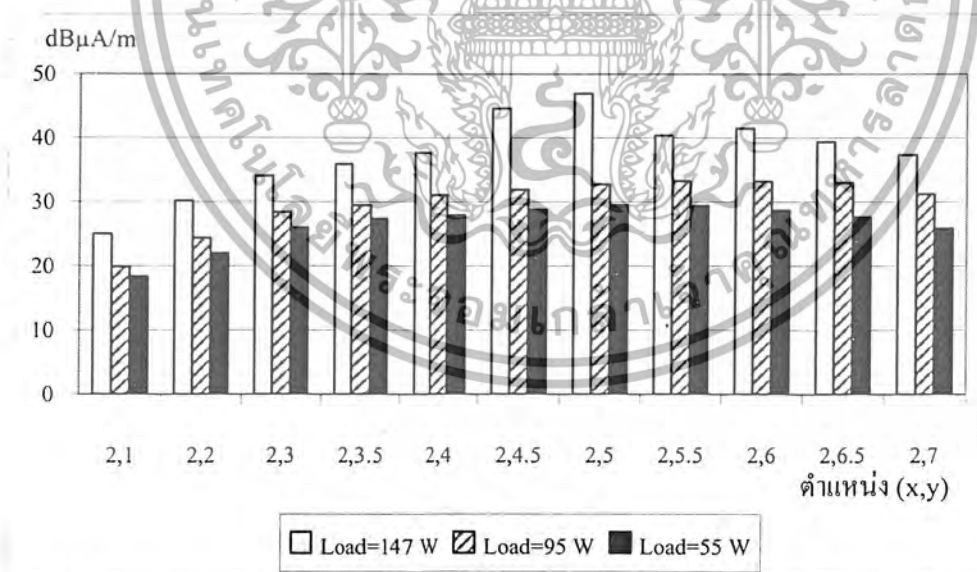
4.1.2.4 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของโหลดขนาดต่างๆที่ความถี่

30.2 kHz และ 59.8 kHz

เป็นการนำค่าจากในตารางที่ 4.2 มาทำการเปรียบเทียบที่แนวแกน x2 เพื่อให้เห็นขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดที่โหลดต่างๆที่เกิดขึ้นที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ โหลด ต่างๆที่ $f=30.2$ kHz ที่แนวแกน x2 (เปิดฝากล่อง)



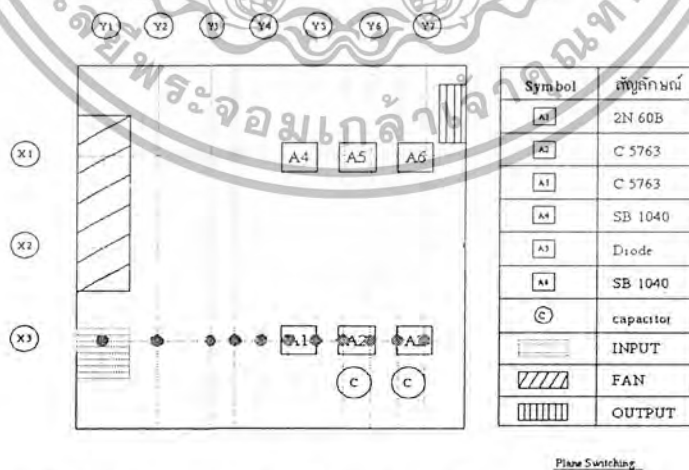
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ โหลดต่างๆที่ $f=59.8$ kHz ที่แนวแกน x2 (เปิดฝากล่อง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.5 ตารางแสดงผลการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่แนวแกน x3 ดังแสดงตำแหน่งการวัดไว้ดังรูปที่ 4.8 โดยจะทำการวัดตามตำแหน่งจากซ้ายไปขวา

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดค่า Radiate โดยเปิดฝากล่องที่ power output ต่างๆ ที่แนวแกน x3

ตำแหน่ง (x,y)	สัญญาณรบกวนแม่เหล็ก (dB μ A/m)					
	power output = 147 W		power output = 95 W		power output = 55 W	
	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz
3,1	21	22.78	19.04	19.36	15.01	17.04
3,2	25	25.47	23.71	22.88	20.09	20.74
3,3	34.79	32	30.27	24.6	26.38	22.51
3,3.5	50.17	48	33.3	26.52	29.64	22.9
3,4	42.95	40.9	36.06	28.78	32.43	23.93
3,4.5	45.7	43	38.75	31.34	35.38	23.9
3,5	48.49	46	40.65	33.77	37.43	25.21
3,5.5	50.17	48.8	42.29	35.55	38.89	25.79
3,6	51.15	50	43.07	36.44	39.64	25.98
3,6.5	51.68	50.8	42.81	36.51	39.68	26.18
3,7	50.5	49	42.05	35.5	38.92	25.12

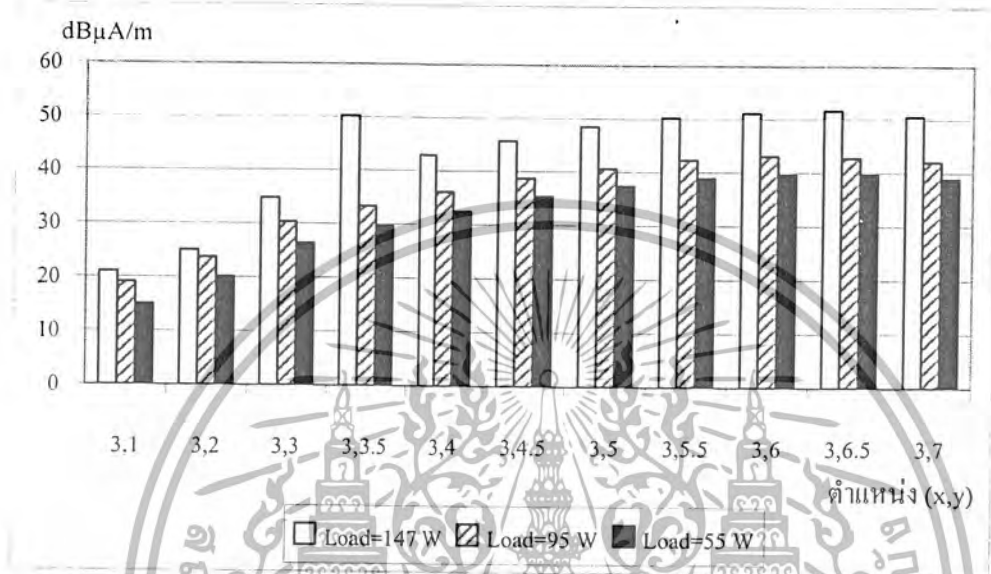


รูปที่ 4.8 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x3

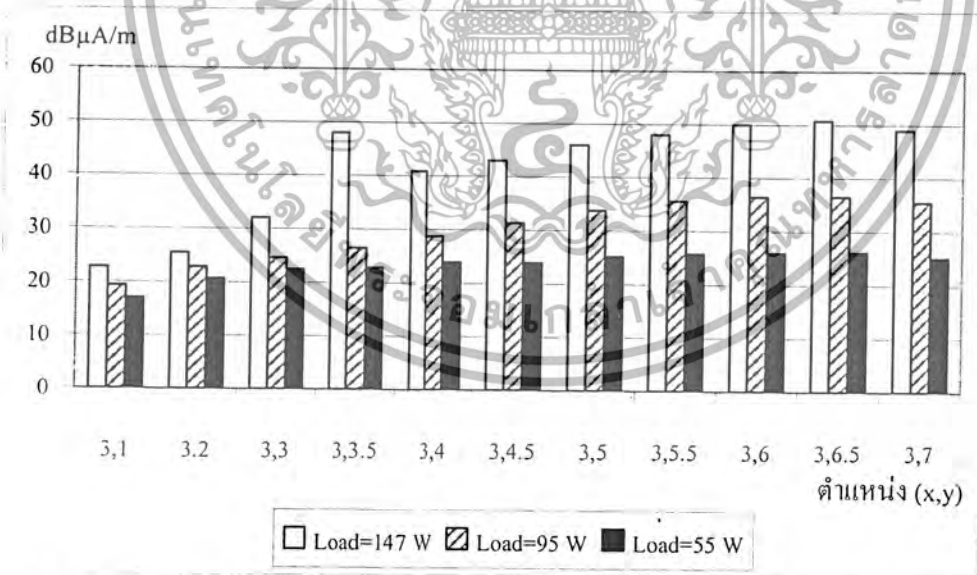
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.6 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่โหนดขนาดต่างๆที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz

เป็นการนำค่าจากในตารางที่ 4.3 มาทำการเปรียบเทียบที่แนวแกน x3 เพื่อให้เห็นขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่โหนดต่างๆที่เกิดขึ้นที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่โหนดต่างๆที่ $f = 30.2$ kHz ที่แนวแกน x3 (เปิดฝากล่อง)



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่โหนดต่างๆที่ $f = 59.8$ kHz ที่แนวแกน x3 (เปิดฝากล่อง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 บทสรุป

จากกราฟการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x1, x2 และ x3 จากสามารถสรุปได้เป็นค่าดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่โหลดต่างๆที่ความถี่ 30.2 kHz

ความถี่ (kHz)	Output Load		
	147 W	95 W	55 W
30.2	***	**	*

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่โหลดต่างๆที่ความถี่ 59.8 kHz

ความถี่ (kHz)	Output Load		
	147 W	95 W	55 W
59.8	***	**	*

หมายเหตุ : * คือ ถ้ามีมากแสดงว่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กมาก

จากผลในตารางสามารถสรุปได้ว่า เครื่องหมาย "***" แทนขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก จะเห็นว่าที่โหลดขนาด 147 W มีจำนวนเครื่องหมาย "***" มากที่สุดรองลงมา คือ 95 และ 55 W ตามลำดับแสดงว่าที่โหลด 147 W เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กมากที่สุดรองลงมาคือ 95 และ 55 W ตามลำดับ จะเห็นว่าขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อ สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายจ่ายไฟให้กับโหลดมากขึ้นและจะลดลงเมื่อ สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายจ่ายไฟให้กับโหลดน้อยไม่ว่าจะเป็นที่ความถี่ 30.2 หรือ 59.8 kHz

ทำให้พบว่าอุปกรณ์สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายเมื่อจ่ายโหลดมากขึ้นหรือโหลดสูงๆนั้น จะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กขึ้น โดยจะมีขนาดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของโหลด จะเห็นได้ชัดเจนว่าขนาดของโหลดมีต่อขนาดของสัญญาณรบกวนอย่างแน่นอนสังเกตได้จากตารางที่ 4.5 และ 4.6

4.2 การชิลด์โดยใช้แผ่นโลหะ

ในบทนี้จะทำการชิลด์โดยการใชแผ่นโลหะ โดยจะมีเงื่อนไขในการวัดคือความหนาของวัสดุทดสอบแนวการวางตัวของเนื้อสารและชนิดของวัสดุ โดยทั้ง 3 เงื่อนไขนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิผลของการชิลด์ซึ่งจะเป็นแนวทางที่จะนำไปเลือกวัสดุและการออกแบบกล่องชิลด์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ความหนา

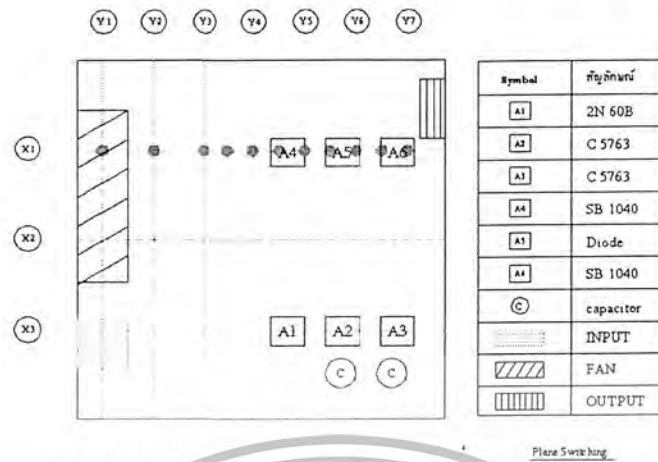
ตำแหน่งประสงค์ของหัวข้อนี้เป็นการศึกษาว่าความหนา มีผลต่อขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กหรือไม่ โดยการเปลี่ยนฝาครอบและใช้ฉนวนนิย่ม มาเป็นวัสดุทดสอบ โดยการวางแผ่นฉนวนนิย่มขนาด 20.5×21 เซนติเมตร หนา 0.5 มิลลิเมตร และ 1 มิลลิเมตร ตามลำดับ ไว้ด้านบนของสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย และใช้ภาระทางไฟฟ้าขนาด 147 W แล้วทำการวัดขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก แสดงได้ดังตารางที่ 4.7

4.2.1.1 ตารางแสดงการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ความหนาขนาดต่างๆในแนวแกน x1 ดังแสดงตำแหน่งการวัดไว้ดังรูปที่ 4.11 โดยทำการวัดจากตำแหน่งจากซ้ายไปขวา

ตารางที่ 4.7 ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กจาก Switching Power Supply ขนาด 400 W ที่แกน x1

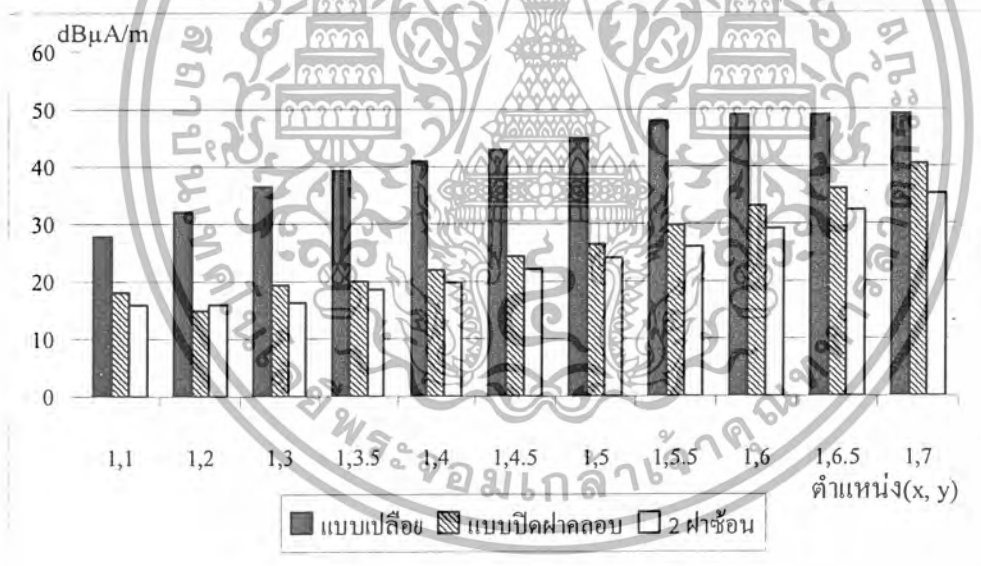
ตำแหน่ง (x, y)	ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก (dB μ A/m)					
	หนา 0 มม (เปลือย)		หนา 0.5 มม (ฝาครอบ 1 ฝา)		หนา 1 มม (ฝาครอบ 2 ฝา)	
	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz
1,1	27.8	22	18.09	17	15.96	15.65
1,2	32.11	30	15	18.02	15.97	15.71
1,3	36.5	37.18	19.38	17.9	16.31	16.29
1,3.5	39.33	39	20	20.78	18.61	17.1
1,4	41	42.3	21.97	18	19.83	17.03
1,4.5	43	44.61	24.39	22	22.12	20.09
1,5	45	46.89	26.51	25	24.13	20.63
1,5.5	48	48.49	29.77	28	26.06	23.15
1,6	49.08	49	33.113	31	29.2	26.3
1,6.5	49	49.72	36.13	33	32.38	28.88
1,7	49.2	49	40.47	38	35.26	31.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



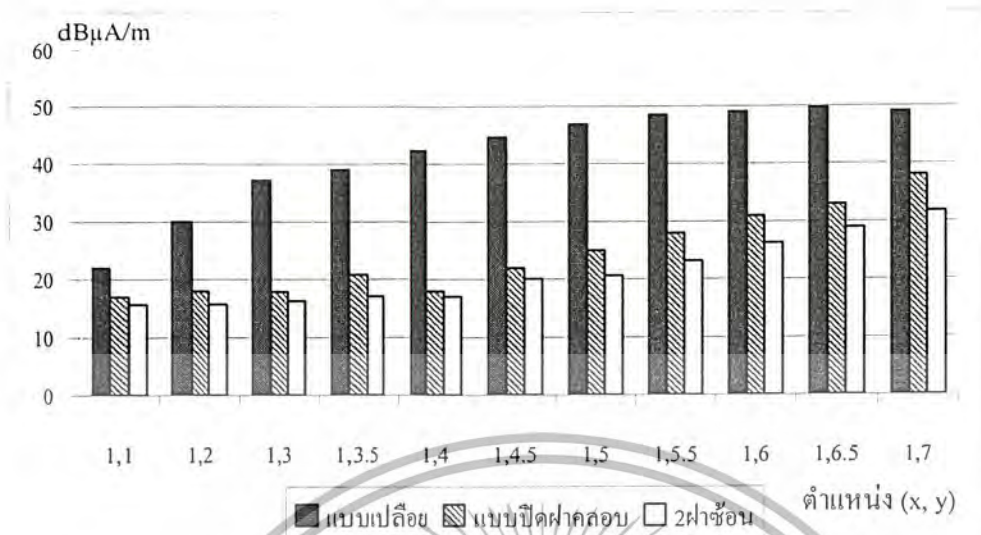
รูปที่ 4.11 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x1

4.2.1.2 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ความถี่ต่างๆที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz เป็นการนำค่าจากในตารางที่ 4.4 มาทำการเปรียบเทียบที่แนวแกน x1 ให้เห็นขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ความถี่ต่างๆที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับความถี่ที่ $f=30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับความหนาที่ $f=59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x1

4.2.1.3 ตารางแสดงการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ความหนาต่างๆ ในแนวแกน x2 ดังแสดงตำแหน่งการวัดไว้ดังรูปที่ 4.14 โดยทำการวัดตามตำแหน่งจากซ้ายไปขวา

ตารางที่ 4.8 ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กจาก Switching Power Supply ขนาด 400 W ที่แกน x2

ตำแหน่ง (x, y)	ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก (dBµA/m)					
	หนา 0 น.ม. (เปลือย)		หนา 0.5 น.ม. (ฝาครอบ 1 ฝา)		หนา 1 น.ม. (ฝาครอบ 2 ฝา)	
	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz
2,1	20	24.99	-	18.18	-	12.42
2,2	22	30.15	-	15.77	-	12.47
2,3	24	34.07	-	13.27	-	-
2,3.5	26	35.92	10.2	15.62	-	11.91
2,4	30	37.69	11.8	16.78	-	13.44
2,4.5	43	44.61	12.5	17.43	-	11.74
2,5	46	46.89	15.6	19.19	10.97	13.89
2,5.5	31	40.37	15.6	21.02	15.51	16.99
2,6	33	41.44	20	23.881	21.04	21.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 (ต่อ) ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กจาก Switching Power Supply ขนาด 400 W ที่แกน x2

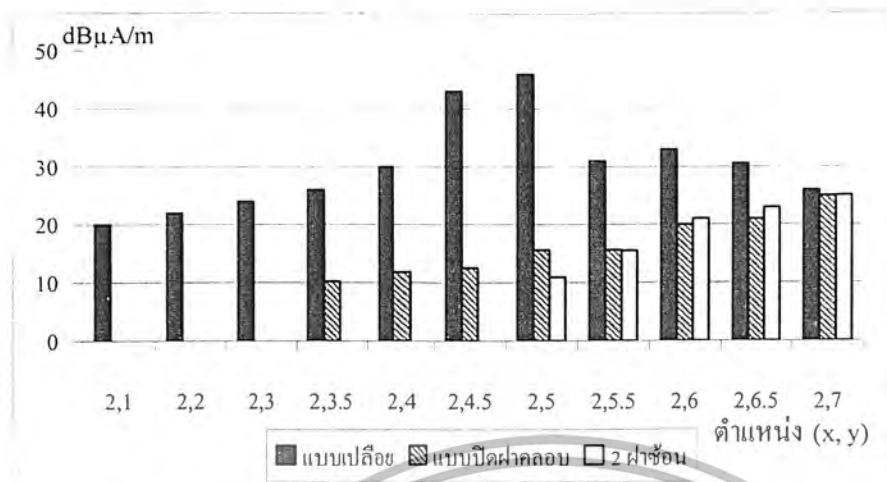
ตำแหน่ง (x, y)	ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก (dB μ A/m)					
	หนา 0 ม.ม. (เปลือย)		หนา 0.5 ม.ม. (ฝาครอบ 1 ฝา)		หนา 1 ม.ม. (ฝาครอบ 2 ฝา)	
	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz
2,6.5	30.5	39.4	21	26.889	22.96	23.91
2,7	26	37.35	25	29.64	25.03	23.87



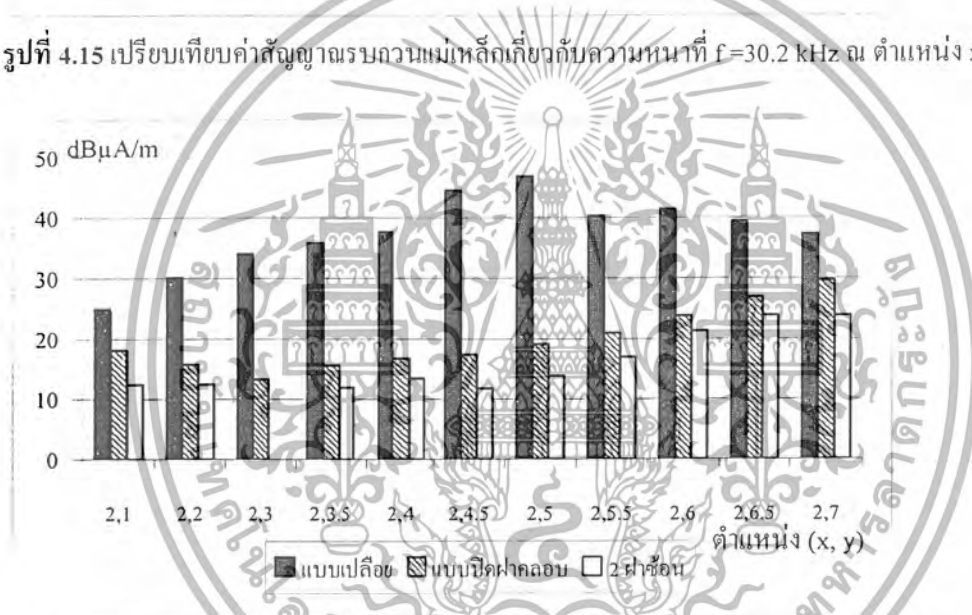
รูปที่ 4.14 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x2

4.2.1.4 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ความหนาต่างๆที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz เป็นการนำค่าจากตารางที่ 4.5 มาทำการเปรียบเทียบที่แนวแกน x2 ให้เห็นขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ความหนาต่างๆที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับความหนาที่ $f=30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x2



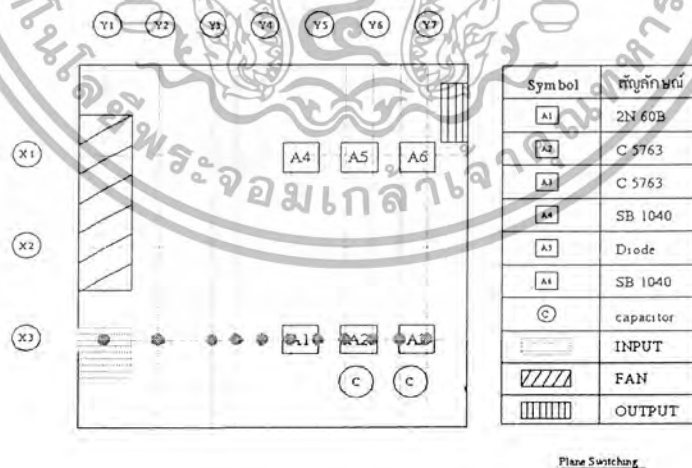
รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับความหนาที่ $f=59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x2

4.2.1.5 ตารางแสดงการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ความหนาต่างๆ ในแนวแกน x3 ดังแสดงตำแหน่งการวัดไว้ดังรูปที่ 4.17 โดยทำการวัดตามตำแหน่งจากซ้ายไปขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กจาก Switching Power Supply ขนาด 400 W ที่แกน x3

ตำแหน่ง (x, y)	ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก (dB μ A/m)					
	หนา 10 ม.ม. (เปลือย)		หนา 0.5 ม.ม. (ฝาครอบ 1 ฝา)		หนา 1 ม.ม. (ฝาครอบ 2 ฝา)	
	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz
3,1	21	22.78	-	15.13	12.38	12.59
3,2	25	25.47	-	10.96	14.92	11.98
3,3	34.79	32	16.48	11.9	18.72	13.8
3,3.5	50.17	48	19.49	15	18.644	14.58
3,4	42.95	40.9	20.71	16	21.09	15.744
3,4.5	45.7	43	22.81	18	21.38	18.12
3,5	48.49	46	24.87	19	24.02	20.69
3,5.5	50.17	48.8	26.7	21.1	25.72	21.69
3,6	51.15	50	30.43	27	27.36	22.56
3,6.5	51.68	50.8	33.77	30	30.51	27.35
3,7	50.5	49	36.442	33	32.39	29.24

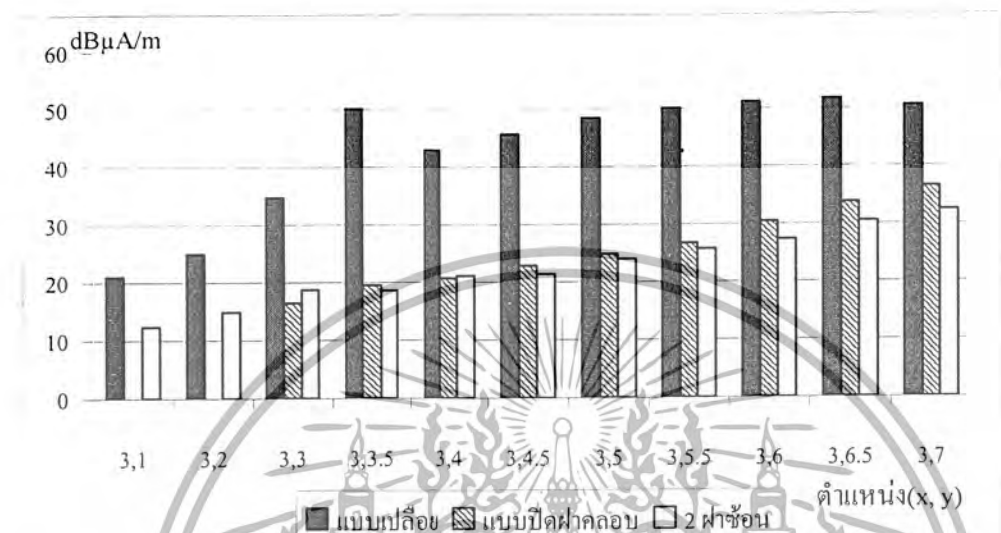


Phase Switching

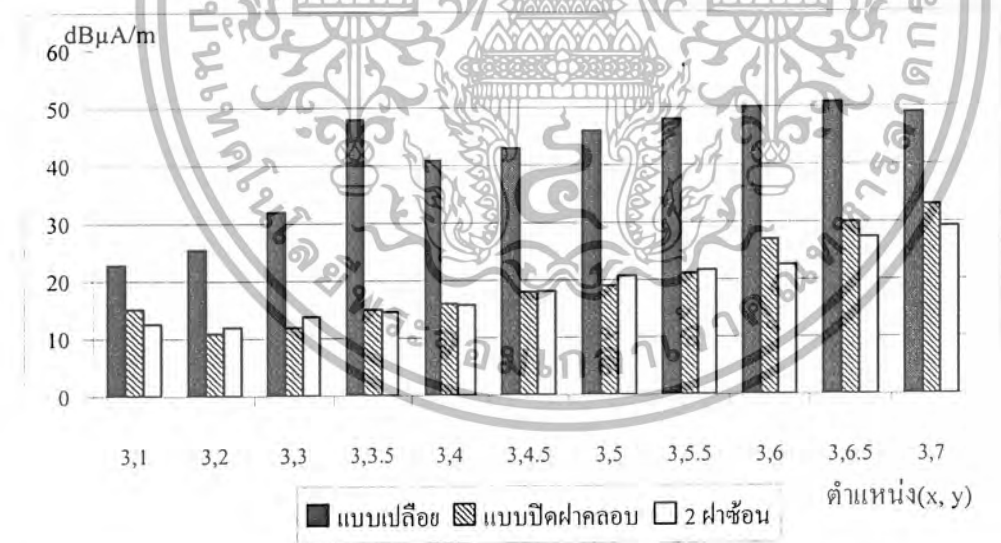
รูปที่ 4.17 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.6 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ความหนาต่างๆที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz เป็นการนำค่าจากตารางที่ 4.6 มาทำการเปรียบเทียบที่แนวแกน x3 ให้เห็นขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ความหนาต่างๆที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับความหนาที่ $f=30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x3



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับความหนาที่ $f=59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.7 บทสรุป

ในเงื่อนไขเรื่องความหนาแน่นจะทำการยกตำแหน่งที่จะพิจารณาเพียงตำแหน่งเดียวซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีการเปรียบเทียบของกราฟได้ชัดเจน และเป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้ทรานซิสเตอร์ ดูจากรูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก โดยพิจารณาที่ตำแหน่ง $x3, y6.5$ ค่าประสิทธิภาพการชิลด์ = $20 \log$ (ค่าที่วัดได้ก่อนชิลด์ / ค่าที่วัดได้หลังชิลด์) ; ค่าที่วัดได้ก่อนนั้นดูจากตารางที่ 4.9 และสามารถสรุปได้เป็นตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพการชิลด์ที่ความหนาแน่นต่างๆ

ความถี่ (kHz)	ประสิทธิภาพการชิลด์ (dB)		
	หนา 0 mm.	หนา 0.5 mm	หนา 1 mm
30.2	-	3.69	4.57
59.8	-	4.57	5.37

จากตารางจะเห็นว่าที่ความหนา 0, 0.5 และ 1 มม. ค่าประสิทธิภาพการชิลด์ที่ความหนา 1 มม. มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ 0.5 มม. ค่าประสิทธิภาพการชิลด์ยิ่งมากการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กก็จะยิ่งดีวัสดุที่มีความหนามากขึ้นจะมีประสิทธิภาพของการชิลด์ได้ดีมากขึ้นด้วยไม่ว่าจะเป็นความถี่ 30.2 kHz หรือ 59.8 kHz สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นเพราะวัสดุที่มีความหนาจะดูดซับพลังงาน (absorbing energy) อธิบายได้โดยสมการที่ 2.37 แต่ที่ความถี่ 59.8 kHz มีค่าประสิทธิภาพการชิลด์มากกว่าที่ความถี่ 30.2 kHz ที่ความถี่สูงขึ้นทำให้ค่าการดูดซับพลังงานมากขึ้น โดยตัวแปรอื่นคงที่อธิบายได้โดยสมการที่ 2.37

เพราะฉะนั้นสรุปได้ว่าวัสดุที่มีความหนาเพิ่มขึ้นสามารถดูดซับพลังงานได้มากขึ้น ก็หมายความว่าสามารถลดสัญญาณรบกวนได้มากขึ้น และสามารถนำเงื่อนไขเรื่องความหนาไปช่วยในการออกแบบกล่องชิลด์ต่อไป

4.2.2 แนวการวางตัวของเนื้อสาร

ตำแหน่งประสงค์ของหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาว่าแนวการวางตัวของเนื้อสารมีผลต่อขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กหรือไม่ โดยการวางวัสดุทดสอบ 2 แผ่น ให้มีการวางตัวของเนื้อสารตามกัน และขวางกันตามลำดับดังรูป โดยมีคูมูนิเยมเป็นวัสดุทดสอบที่มีความหนาเท่ากับ 0.5 มม. ทั้งสองแผ่น วิธีการวัดทำตาม หัวข้อ 3.2.1 และใช้ภาระทางไฟฟ้า 147 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วางตามกัน



วางขวางกัน

รูปที่ 4.20 แนวการวางตัวของวัสดุทดสอบ

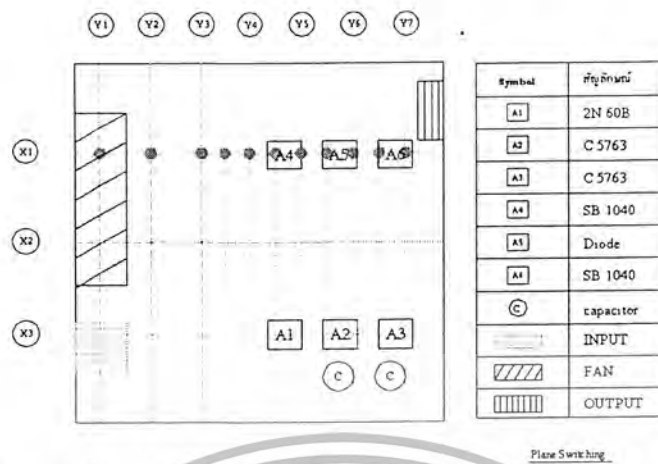
ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแนวการวางตัวของวัสดุทดสอบกับขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก แสดงได้ดังตาราง 4.11, 4.12 และ 4.13

4.2.2.1 ตารางแสดงการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กโดยการเปลี่ยนแนวการวางตัวของแผ่นทดสอบ 2 แผ่นในแนวแกน x1 ดังแสดงตำแหน่งการวัดไว้ดังรูปที่ 4.21 โดยทำการวัดจากซ้ายไปขวา

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กจากกรวางตามและวางขวาง ที่แกน x1

ตำแหน่ง (x, y)	ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก (dB μ A/M)			
	2 ฟวางตาม		2 ฟวางขวาง	
	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz
1,1	15.96	15.65	14.53	13.9
1,2	15.97	15.71	15.97	11.79
1,3	16.31	16.29	16.21	14.23
1,3.5	18.61	17.1	16.29	15.05
1,4	19.83	17.03	19.33	16.42
1,4.5	22.12	20.09	19.81	18.89
1,5	24.13	20.63	22.75	20.12
1,5.5	26.06	23.15	24.81	22.56
1,6	29.2	26.3	26.55	24.36
1,6.5	32.38	28.88	29.8	27.05
1,7	35.26	31.72	32.23	29.81

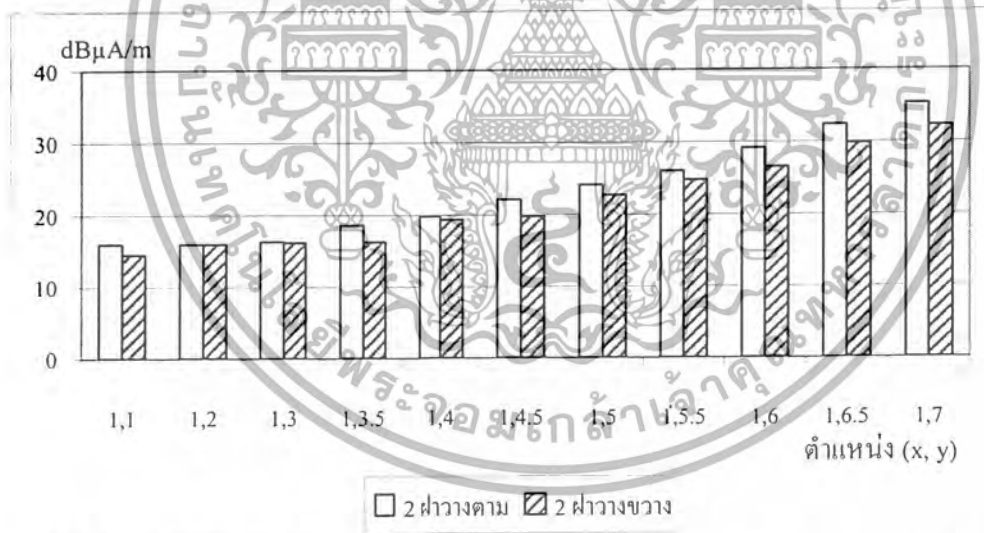
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x1

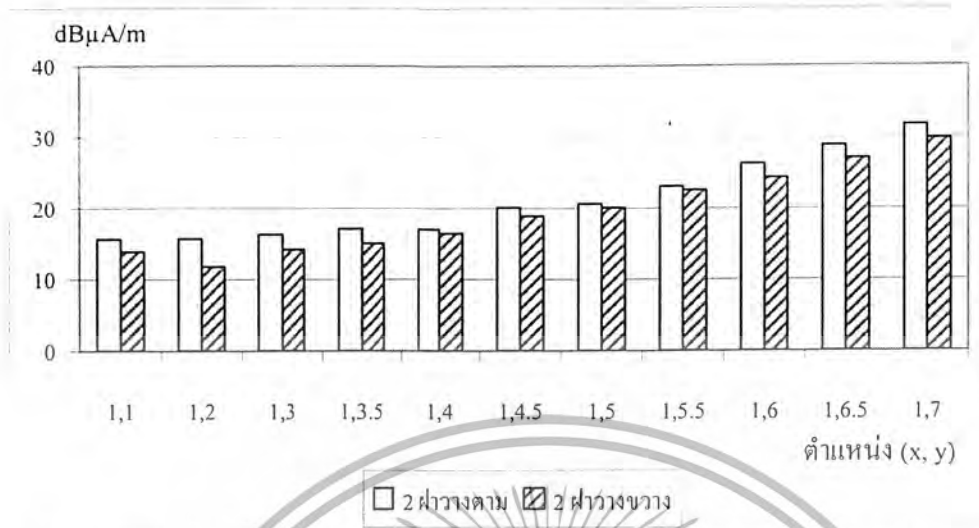
4.2.2.2 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดจากการเปลี่ยนแนวการวางตัวของแผ่นทดสอบ 2 แผ่นที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz

เป็นการนำค่าจากตารางที่ 4.7 มาเปรียบเทียบที่แนวแกน x1 ให้เห็นขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแนวการวางตัวของแผ่นทดสอบ 2 แผ่นที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับแนวการวางที่ $f=30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

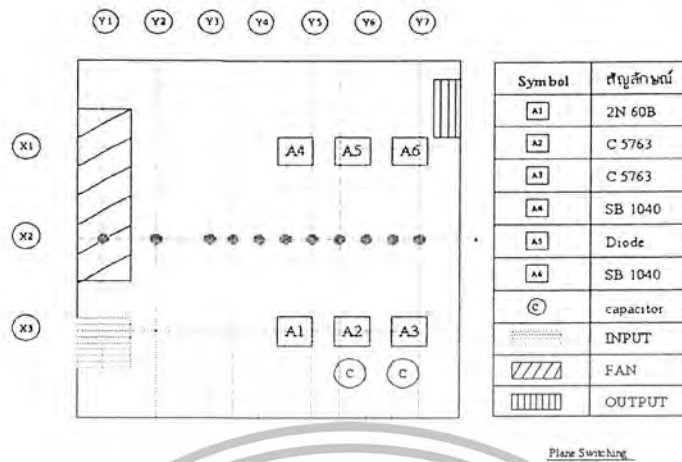


รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับแนวการวางที่ $f=59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x1

4.2.2.3 ตารางแสดงการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กโดยการเปลี่ยนแนวการวางตัวของแผ่นทดสอบ 2 แผ่นในแนวแกน x2 ดังแสดงตำแหน่งการวัดไว้ดังรูปที่ 4.24 โดยทำการวัดจากซ้ายไปขวา ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กจากการวางตามและวางขวาง ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กจาก ที่แกน x2.

ตำแหน่ง (x, y)	ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก (dBμA/M)			
	2 ฟ้างตาม		2 ฟ้างขวาง	
	$f=30.2$ kHz	$f=59.8$ kHz	$f=30.2$ kHz	$f=59.8$ kHz
2,1	-	12.42	-	12.12
2,2	-	12.47	-	-
2,3	-	-	-	11.32
2,3.5	-	11.91	-	12.39
2,4	-	13.44	-	11.49
2,4.5	-	11.74	11.3	11.96
2,5	10.97	13.89	-	13.71
2,5.5	15.51	16.99	11.4	15.08
2,6	21.04	21.33	15.37	15.72
2,6.5	22.96	23.91	16.77	17.19
2,7	25.03	23.87	17.95	19.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x2

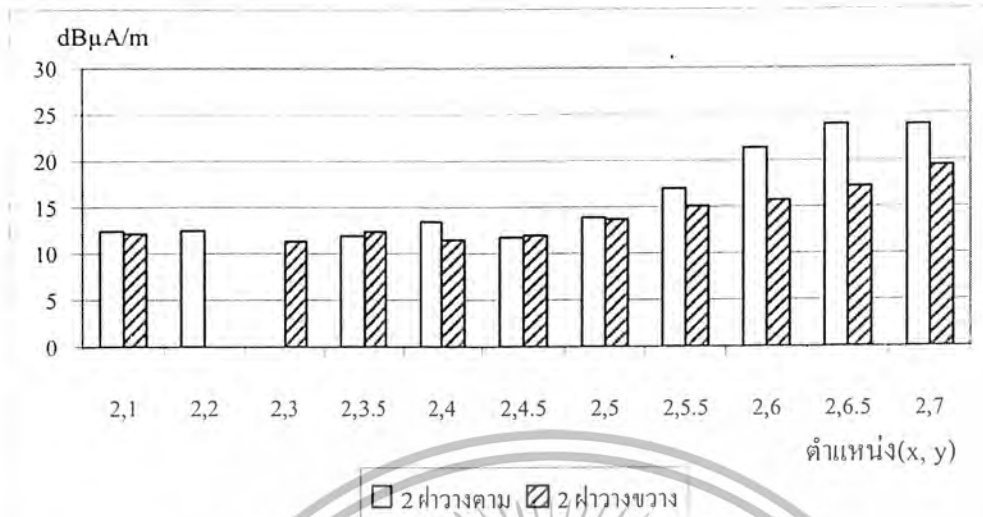
4.2.2.4 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดจากการเปลี่ยนแนวการวางตัวของแผ่นทดสอบ 2 แผ่นที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz

เป็นการนำค่าจากตารางที่ 4.8 มาเปรียบเทียบที่แนวแกน x1 ให้เห็นขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแนวการวางตัวของแผ่นทดสอบ 2 แผ่นที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz



รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับแนวการวางที่ f=30.2 kHz ณ ตำแหน่ง x2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

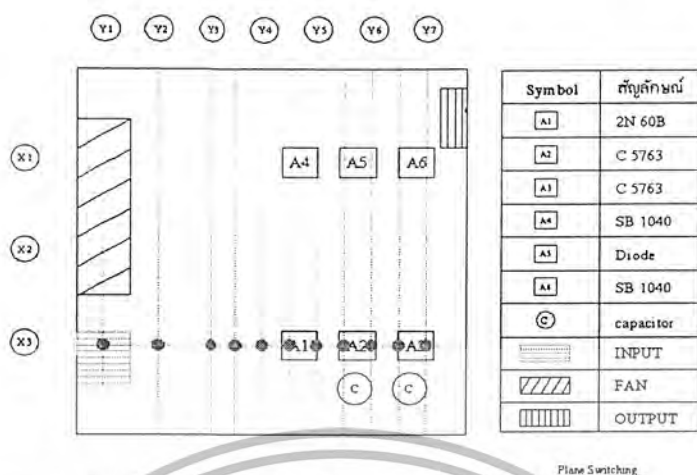


รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับแนวการวางที่ $f=59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x2

4.2.2.5 ตารางแสดงการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กโดยการเปลี่ยนแนวการวางตัวของแผ่นทดสอบ 2 แผ่นในแนวแกน x3 ดังแสดงตำแหน่งการวัดไว้ดังรูปที่ 4.26 โดยทำการวัดจากซ้ายไปขวา ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กจากการวางตามและวางขวาง ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กจาก ที่แกน x3

ตำแหน่ง (x, y)	ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก (dBμA/M)			
	2 ฟ้าวางตาม		2 ฟ้าวางขวาง	
	$f=30.2$ kHz	$f=59.8$ kHz	$f=30.2$ kHz	$f=59.8$ kHz
3,1	12.38	12.59	-	11.66
3,2	14.92	11.98	11.41	-
3,3	18.72	13.8	14.88	10.93
3,3.5	18.644	14.58	16.22	11.51
3,4	21.09	15.74	17.41	12.53
3,4.5	21.38	18.12	17.65	14.4
3,5	24.02	20.69	20.32	16.84
3,5.5	25.72	21.69	21.59	18.91
3,6	27.36	22.56	24.08	19.32
3,6.5	30.51	27.35	26.22	23.18
3,7	32.39	29.24	29.55	26.32

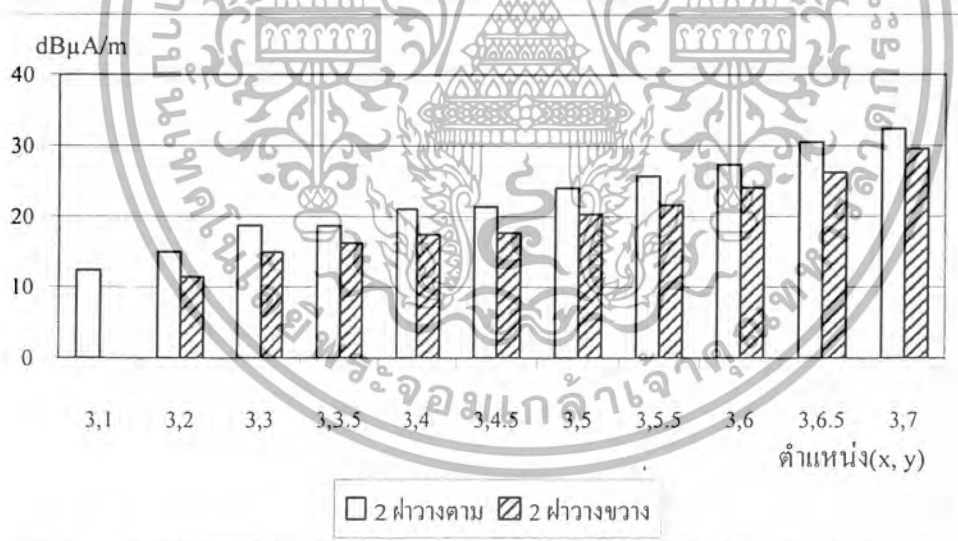
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x3

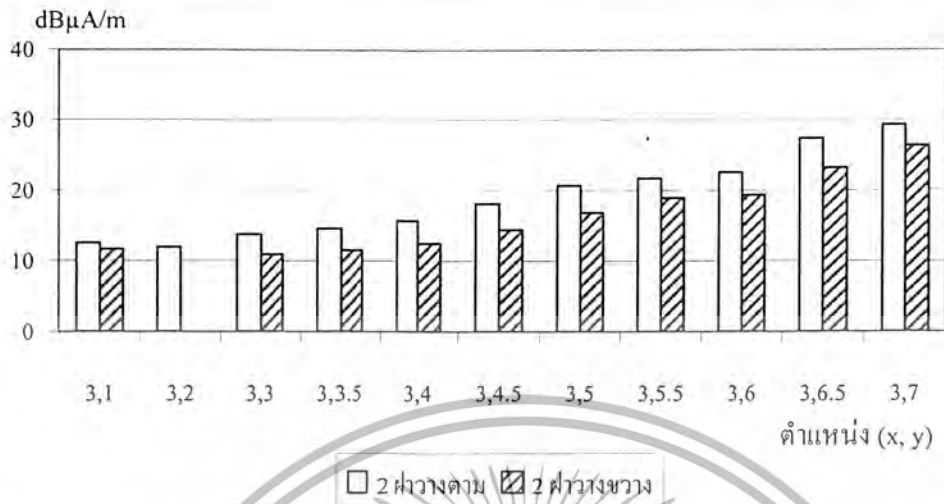
4.2.2.6 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดจากการเปลี่ยนแนวการวางตัวของแผ่นทดสอบ 2 แผ่นที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz

เป็นการนำค่าจากรายที่ 4.9 มาเปรียบเทียบที่แนวแกน x1 ให้เห็นขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแนวการวางตัวของแผ่นทดสอบ 2 แผ่นที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับแนวการวางที่ f=30.2 kHz ณ ตำแหน่ง x3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับแนวการวางที่ $f=59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x3

4.2.2.7 บทสรุป

ในเงื่อนไขเรื่องการวางตัวของแผ่นทดสอบ 2 แผ่น จะทำการพิจารณาเพียงตำแหน่งเดียว โดยเป็นตำแหน่งที่มีสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่สามารถเปรียบเทียบได้ง่ายและง่ายในการพิจารณา โดยในที่นี้จะเลือกเอาตำแหน่ง x3,y 6.5 ให้ตรงกับเงื่อนไขความหนา ค่าประสิทธิภาพการชิลด์ = $20 \log (\text{ค่าที่วัดได้ก่อนชิลด์} / \text{ค่าที่วัดได้หลังชิลด์})$; ค่าที่วัดได้ก่อนกันดูจากตารางที่ 4.9 และสามารถสรุปเป็นตารางที่ 4.14 ดังนี้

ตารางที่ 4.14 ประสิทธิภาพการชิลด์ในแนวการวางต่างๆ

ความถี่ (kHz)	ประสิทธิภาพการชิลด์ (dB)	
	2 ฝาหวางตาม	2 ฝาหวางหวาง
30.2	4.57	5.89
59.8	5.37	6.81

จากตารางและกราฟการทดสอบแนวการวางตัวของวัสดุทดสอบมีผลต่อขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก คือแนวการวางตามกันจะสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กได้น้อยกว่าวางขวางกัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า แนวการวางตัวของวัสดุทดสอบมีผลต่อขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก และนี่ก็เป็นอีกประเด็นหนึ่งที่จะนำไปช่วยในการออกแบบกล่องชิลด์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ชนิดของวัสดุทดสอบ

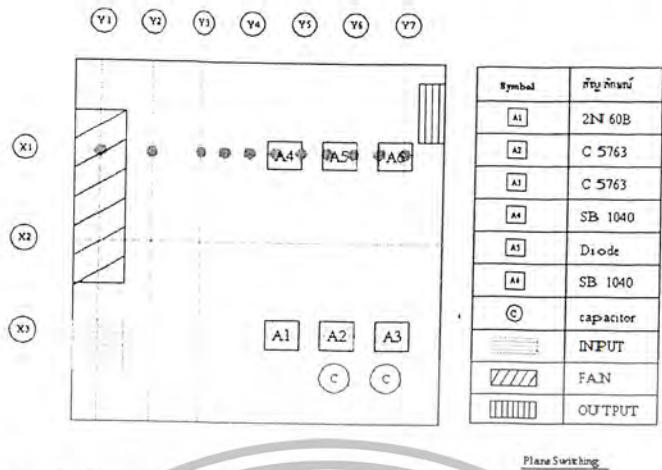
ตำแหน่งประสงค์ของหัวข้อนี้ จะศึกษาเกี่ยวกับชนิดของวัสดุที่นำมาทดสอบ ว่าวัสดุต่างชนิดกันจะสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กได้มากกว่ากันหรือไม่ โดยใช้ ทองแดง, ทองเหลือง และ อลูมิเนียม ตามลำดับ วัสดุทั้งสามมีขนาด 20.5×21 เซนติเมตร หนา 0.5 มม. ใช้ภาระทางไฟฟ้าขนาด 147 W โดยวิธีการวัดทำตามหัวข้อ 3.2.1 ผลการทดสอบความสามารถในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของวัสดุทั้งสามชนิด แสดงได้ดังตาราง 4.10

4.2.3.1 ตารางการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก โดยการเปลี่ยนชนิดของแผ่นทดสอบในแนวแกน $x1$ ในหัวข้อนี้จะใช้แผ่นทองแดง ทองเหลือง และ อลูมิเนียม โดยแสดงตำแหน่งการวัดดังรูปที่ 4.30 โดยทำการวัดจากซ้ายไปขวา

ตารางที่ 4.15 ผลของค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของวัสดุแต่ละชนิด ที่แกน $x1$

ตำแหน่ง (x, y)	ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก					
	แผ่นทองเหลือง		แผ่นอลูมิเนียม		แผ่นทองแดง	
	$f=30.2 \text{ kHz}$	$f=59.8 \text{ kHz}$	$f=30.2 \text{ kHz}$	$f=59.8 \text{ kHz}$	$f=30.2 \text{ kHz}$	$f=59.8 \text{ kHz}$
1,1	-	10.26	-	12.37	-	-
1,2	-	12.75	-	14.04	-	12
1,3	-	14.33	-	14.28	-	12.81
1,3.5	-	15.45	-	15.19	-	12.49
1,4	11.84	16.36	-	14.91	-	12.98
1,4.5	12.78	17.444	10.63	15.2	10.94	14.37
1,5	18.74	18.11	13.2	15.61	14.36	16.26
1,5.5	20.75	18.86	17.86	18.03	16.48	16.68
1,6	22.93	19.14	19.44	18.47	18.12	17.69
1,6.5	25	21.73	21.26	19.43	21.31	19.09
1,7	27.04	23.97	23.28	20.93	23.36	21.73

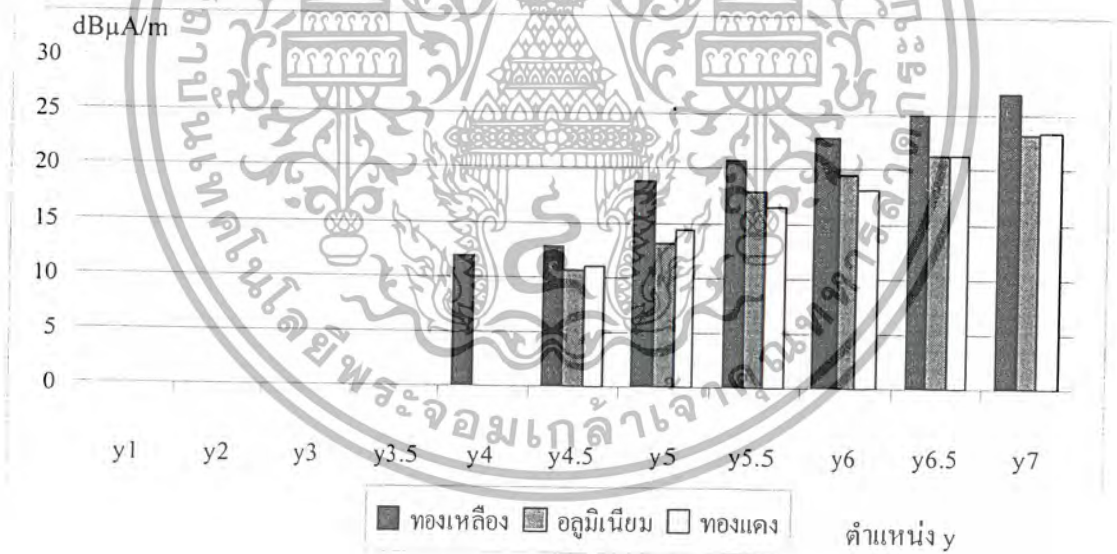
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x1

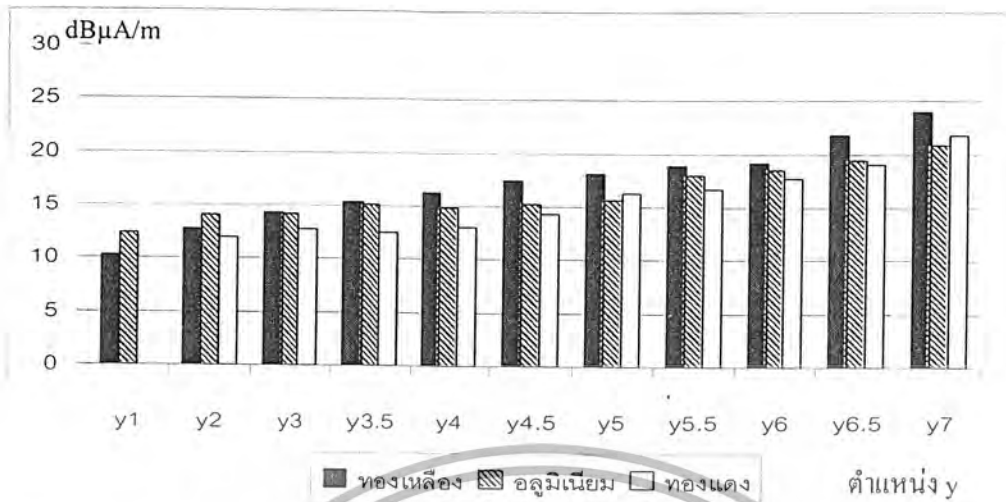
4.2.3.2 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดจากการเปลี่ยนแผ่นทดสอบที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz

เป็นการนำค่าจากตารางที่ 4.10 มาทำการเปรียบเทียบในแนวแกน x1 ให้เห็นขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยการเปลี่ยนแผ่นทดสอบที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz



รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของแผ่น โลหะที่ $f = 30.2 \text{ kHz}$ ณ ตำแหน่ง x1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



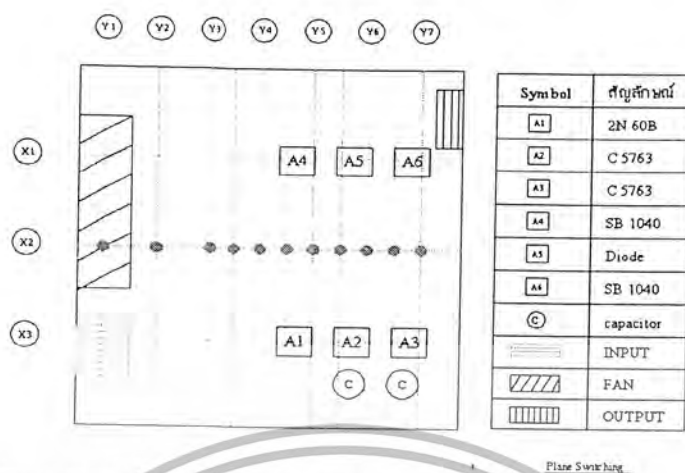
รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของแผ่นโลหะที่ $f = 59.8 \text{ kHz}$ ณ ตำแหน่ง x1

4.2.3.3 ตารางการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กโดยการเปลี่ยนชนิดของแผ่นทดสอบในแนวแกน x2 ในหัวข้อนี้จะใช้แผ่นทองแดง ทองเหลือง และ อลูมิเนียม โดยแสดงตำแหน่งการวัดดังรูปที่ 4.33 โดยทำการวัดจากซ้ายไปขวา

ตารางที่ 4.16 ผลของค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของวัสดุแต่ละชนิด ที่แกน x2

ตำแหน่ง (x, y)	ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก					
	แผ่นทองเหลือง		แผ่นอลูมิเนียม		แผ่นทองแดง	
	$f=30.2 \text{ kHz}$	$f=59.8 \text{ kHz}$	$f=30.2 \text{ kHz}$	$f=59.8 \text{ kHz}$	$f=30.2 \text{ kHz}$	$f=59.8 \text{ kHz}$
2,1	-	-	-	-	-	-
2,2	-	-	-	11.05	-	-
2,3	-	-	-	-	-	-
2,3.5	-	-	-	-	-	-
2,4	-	11.31	-	-	-	-
2,4.5	10.41	13.89	-	-	-	-
2,5	13.77	11.98	12.5	10.57	-	11.63
2,5.5	17.12	12.79	14.53	11.36	11.61	11.42
2,6	18.81	13.56	14.57	11.15	12.27	12.94
2,6.5	18.33	15.24	14.61	12.77	13.87	12.82
2,7	19.58	16.08	14.08	12.03	12.1	13.03

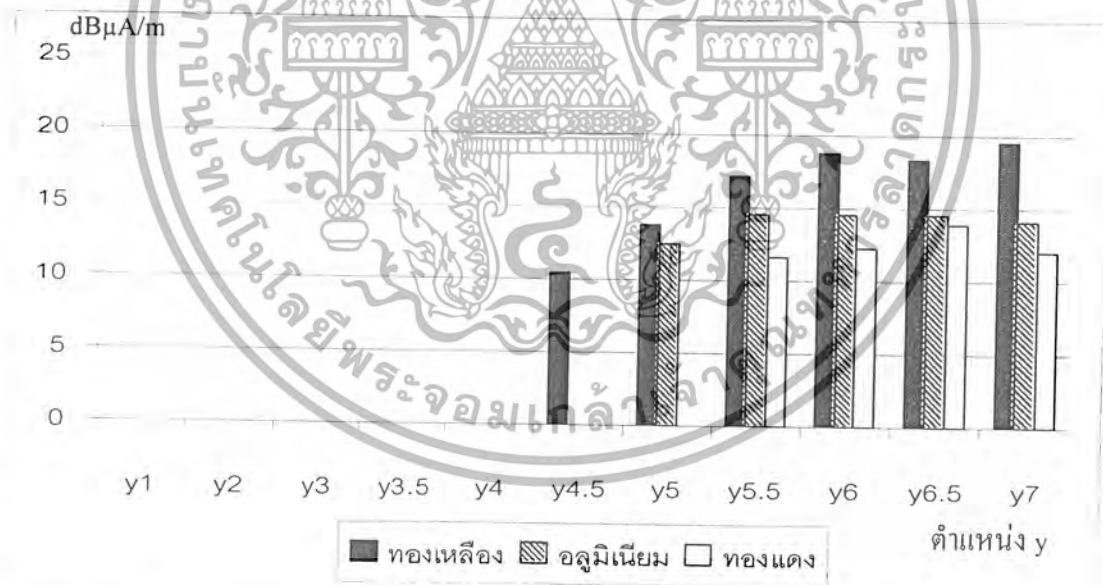
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x2

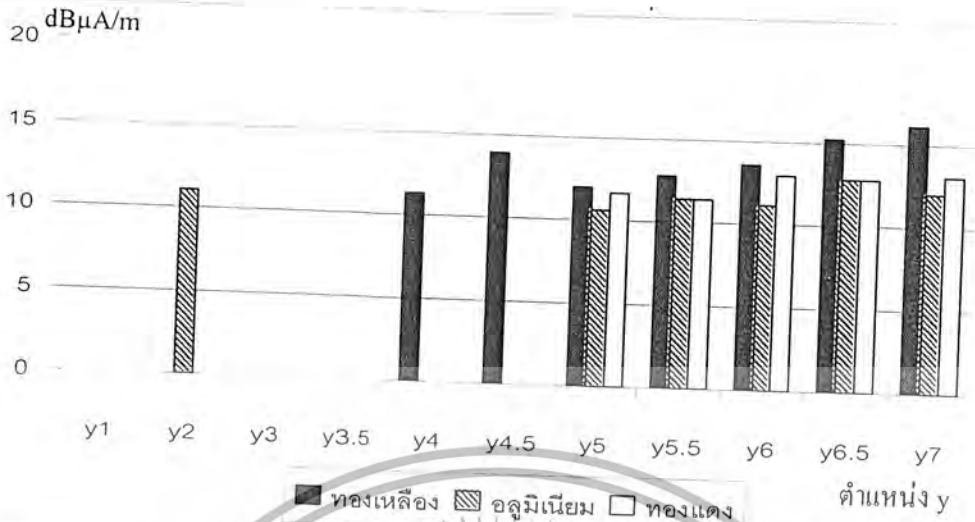
4.2.3.4 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดจากการเปลี่ยนแผ่นทดสอบที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz

เป็นการนำค่าจากตารางที่ 4.11 มาทำการเปรียบเทียบในแนวแกน x2 ให้เห็นขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยการเปลี่ยนแผ่นทดสอบที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz



รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของแผ่นโลหะที่ $f = 30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



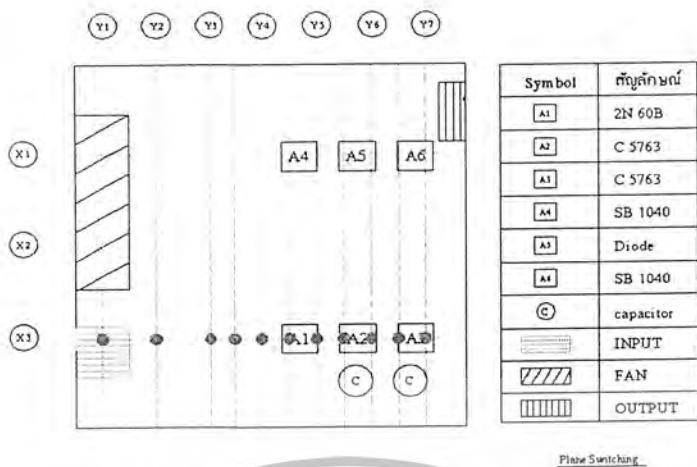
รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของแผ่นโลหะที่ $f = 59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x2

4.2.3.5 ตารางการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กโดยการเปลี่ยนชนิดของแผ่นทดสอบในแนวแกน x3 ในหัวข้อนี้จะใช้แผ่นทองแดง ทองเหลือง และ อลูมิเนียม โดยแสดงตำแหน่งการวัดดังรูปที่ 4.36 โดยทำการวัดจากซ้ายไปขวา

ตารางที่ 4.17 ผลของค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของวัสดุแต่ละชนิด ที่แกน x3

ตำแหน่ง (x, y)	ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก					
	แผ่นทองเหลือง		แผ่นอลูมิเนียม		แผ่นทองแดง	
	$f = 30.2$ kHz	$f = 59.8$ kHz	$f = 30.2$ kHz	$f = 59.8$ kHz	$f = 30.2$ kHz	$f = 59.8$ kHz
3,1	-	-	-	-	-	-
3,2	-	-	-	-	-	-
3,3	-	-	-	-	-	-
3,3.5	10.8	-	-	-	-	-
3,4	16.25	10.46	-	-	-	-
3,4.5	17.42	13.47	11.27	10.99	-	-
3,5	20.64	16.78	15.8	11.85	-	-
3,5.5	23.1	17.83	15.58	13.44	11.83	-
3,6	25.38	20.96	18.1	13.63	15.46	-
3,6.5	26.72	21.97	19.35	13.93	16.38	11.9
3,7	26.68	22.42	20.61	15.87	18.42	15.37

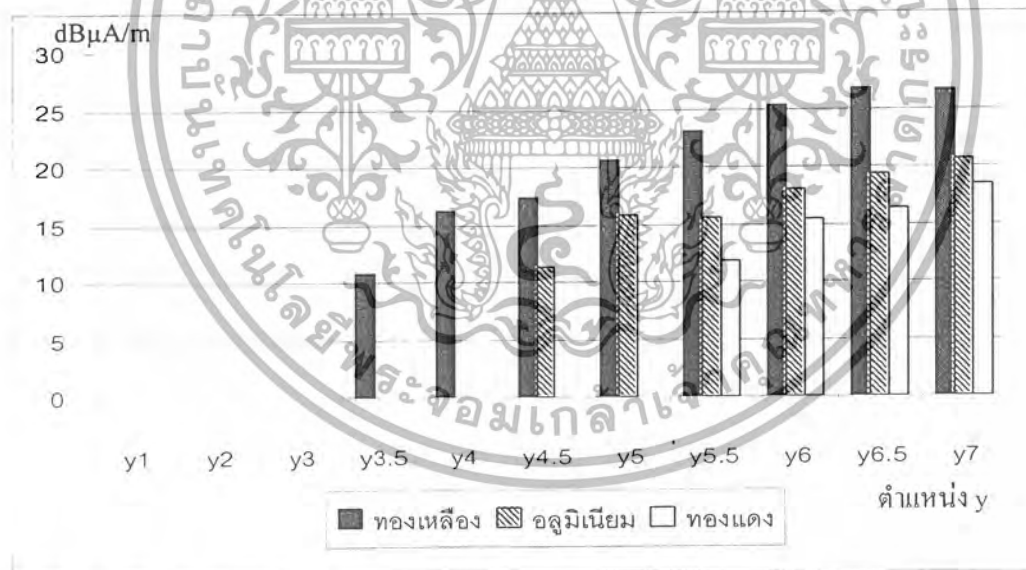
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x3

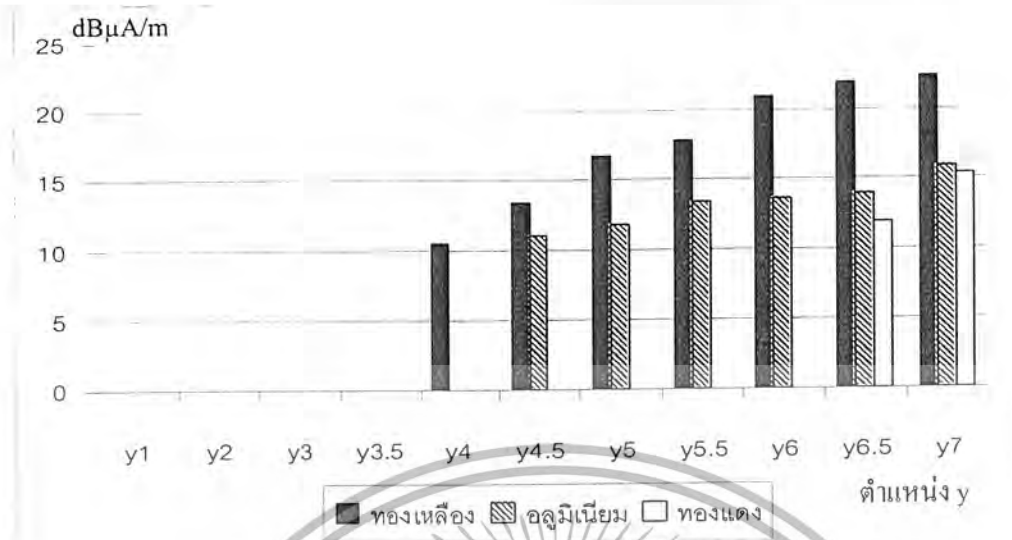
4.2.3.6 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดจากการเปลี่ยนแผ่นทดสอบที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz

เป็นการนำค่าจากตารางที่ 4.12 มาทำการเปรียบเทียบในแนวแกน x3 ให้เห็นขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยการเปลี่ยนแผ่นทดสอบที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz



รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของแผ่นโลหะที่ f = 30.2 kHz ณ ตำแหน่ง x3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของแผ่นโลหะที่ $f = 59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x3

4.2.3.7 บทสรุป

ในเงื่อนไขชนิดของวัสดุทดสอบจะทำการพิจารณาเพียงตำแหน่งเดียวซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกิดขึ้นชัดเจนและเป็นตำแหน่งเดียวกับเงื่อนไขของความหนาและแนวการวางตัวของเนื้อสาร คือ ตำแหน่ง x3,y6.5 ทำให้ง่ายต่อการพิจารณา ค่าประสิทธิภาพการชีลด์ = $20 \log$ (ค่าที่วัดได้ก่อนชีลด์ / ค่าที่วัดได้หลังชีลด์); ค่าที่วัดได้ก่อนกันดูจากตารางที่ 4.9 และสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ประสิทธิภาพการชีลด์ของวัสดุต่างๆ

ความถี่ (kHz)	ประสิทธิภาพการชีลด์ (dB)		
	ทองเหลือง	อลูมิเนียม	ทองแดง
30.2	5.72	8.53	9.98
59.8	7.28	11.23	12.6

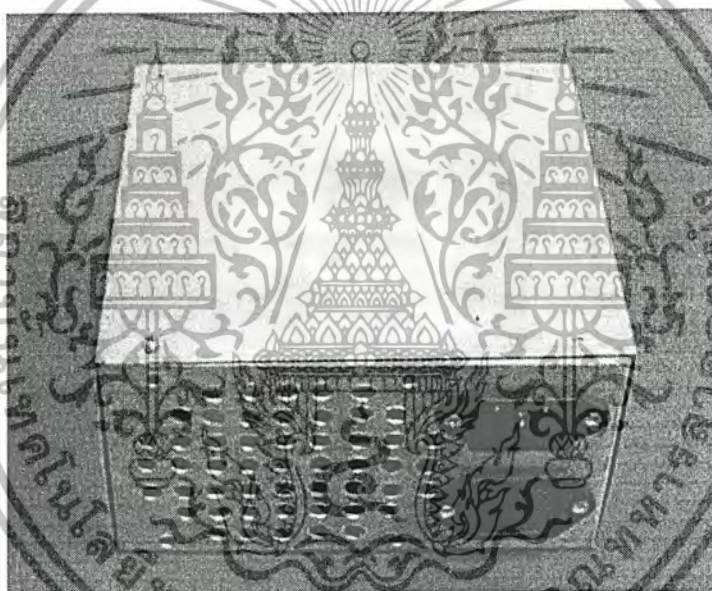
จากตารางทำให้ทราบว่าวัสดุที่ให้ผลของประสิทธิภาพการชีลด์ที่ดีที่สุดคือ ทองแดง รองลงมาคือ อลูมิเนียมและทองเหลืองตามลำดับไม่ว่าจะเป็นความถี่ 30.2 kHz หรือ 59.8 kHz ทองแดงก็ยังคงให้ผลของประสิทธิภาพการชีลด์ได้ดีกว่า สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นเพราะ คุณสมบัติภายในของวัสดุแต่ละชนิดอธิบายได้โดยอาศัย สมการที่ 2.37 ซึ่งเป็นสมการการดูดซับพลังงาน โดยจะขึ้นอยู่กับค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็ก (relative permeability) และ ค่าความนำไฟฟ้า (relative conductivity) ถ้ามีค่ามากจะทำให้การดูดซับพลังได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก ทำให้ค่าประสิทธิผลการซีลด์มากขึ้น ส่งผลให้สามารถลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่แผ่มาทางอากาศได้มากขึ้นเพราะฉะนั้นจึงเลือกเอาทองแดงมาทำเป็นวัสดุในการออกแบบกล่องซีลด์ในบทต่อไป

4.3 การซีลด์โดยใช้กล่องโลหะ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเอา ทองแดง, ทองเหลือง และอลูมิเนียม มาทำเป็นกล่องให้มีลักษณะเดียวกับกล่องเดิมของตัววัดซึ่งเพาเวอร์ซัพพลาย โดยมีขนาด $14 \times 15 \times 8,5$ เซนติเมตร เพื่อให้ใช้งานได้จริง โดยวัสดุทั้งสามจะต้องมีความหนาเท่ากันคือ 0.5 มม. แล้วทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยวิธีการวัดทำตามหัวข้อ 3.2.1 ใช้ภาระทางไฟฟ้าขนาด 147 W และมีระยะเวลาการวัดเท่าเดิมคือ 2 ชม. แล้วดูผลจากการทดสอบว่ากล่องทองแดงยังสามารถลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กได้มากกว่า ทองเหลืองและ อลูมิเนียมหรือไม่ เมื่อเทียบกับคอนกรีตด้วยแผ่น



รูปที่ 4.39 ลักษณะของกล่องซีลด์

ผลการทดสอบการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นของทั้งสามวัสดุทดสอบ แสดงได้ดังตารางที่

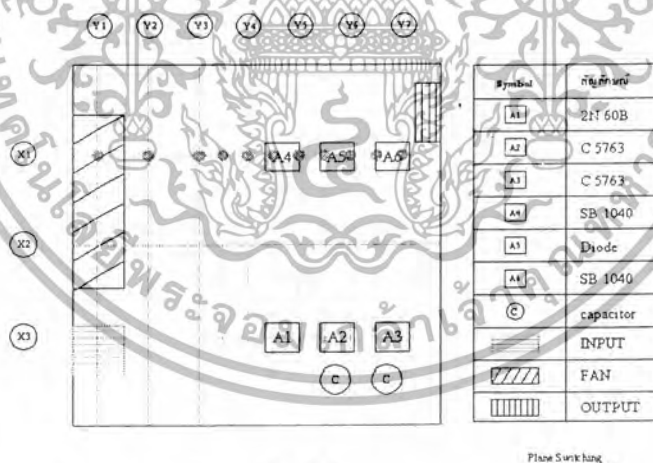
4.19

4.3.1 ตารางการวัดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นของกล่องโลหะแต่ละชนิดในแนวแกน x1 ดังแสดงตำแหน่งการวัดไว้ดังรูปที่ 4.40 โดยทำการวัดตามตำแหน่งจากซ้ายไปขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 ผลของค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของกล่องแต่ละชนิด ที่แกน x1

ตำแหน่ง (x, y)	ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก					
	กล่องทองเหลือง		กล่องอลูมิเนียม		กล่องทองแดง	
	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz
1,1	-	-	12.47	-	-	-
1,2	-	-	12.22	10.6	-	-
1,3	10.25	-	12.41	10.85	-	-
1,3.5	12.16	11.13	13.37	-	-	-
1,4	16.17	13.51	15.45	11.7	10.29	-
1,4.5	18.54	14.77	15.55	10.57	12.01	-
1,5	21.14	16.88	19.5	11.28	15	-
1,5.5	23.79	16.61	20.52	14.66	17.69	12.72
1,6	26.61	19.64	22.88	17.74	19.82	14.93
1,6.5	28.65	21.55	25.3	21.6	22.21	18.58
1,7	29.54	23.75	27.36	23.6	25.2	21.7

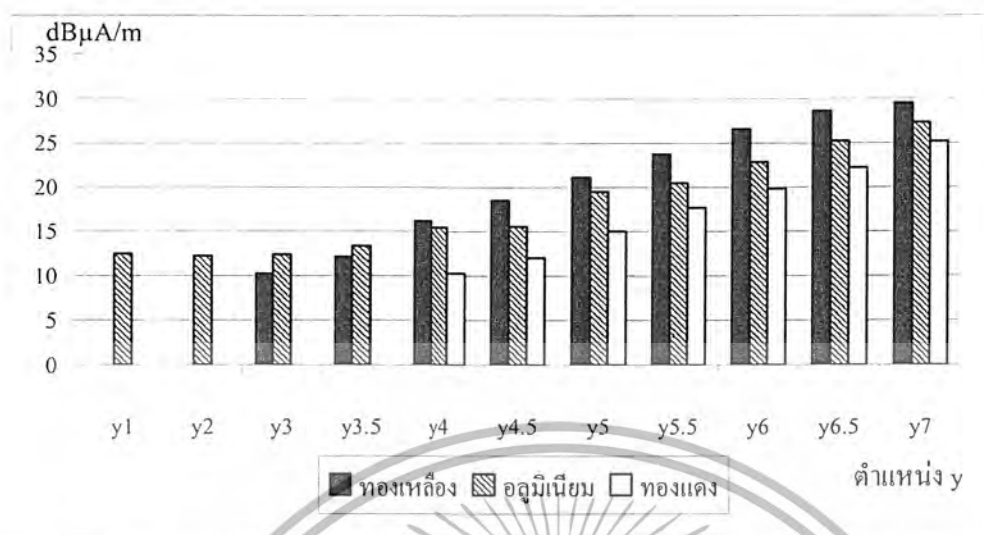


รูปที่ 4.40 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x1

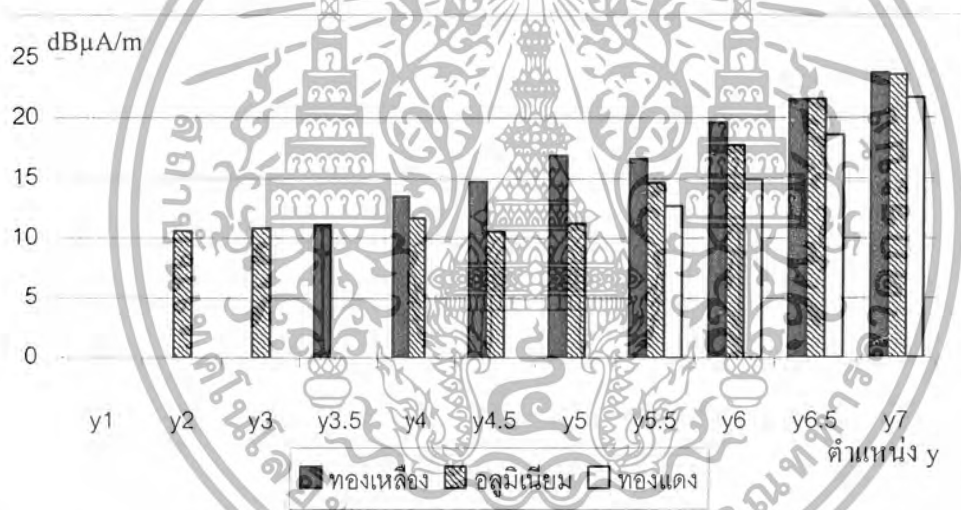
4.3.2 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดจากการเปลี่ยนกล่องวัสดุทดสอบที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz

เป็นการนำค่าจากตาราง 4.13 มาเปรียบเทียบที่แนวแกน x1 ให้เห็นขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนกล่องวัสดุทดสอบที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของกล่องโลหะที่ $f = 30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x1



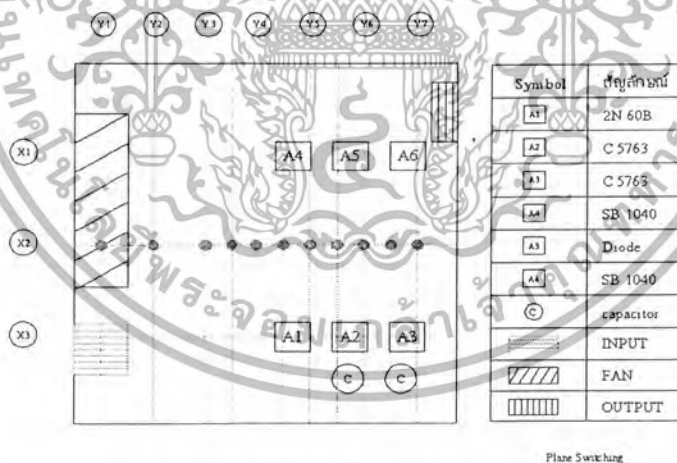
รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของกล่องโลหะที่ $f = 59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x1

4.3.3 ตารางการวัดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นของกล่องโลหะแต่ละชนิดในแนวแกน x2 ดังแสดงตำแหน่งการวัดไว้ดังรูปที่ 4.43 โดยทำการวัดตามตำแหน่งจากซ้ายไปขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 ผลของค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของกล่องแต่ละชนิด ที่แกน x2

ตำแหน่ง (x, y)	ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก					
	กล่องทองเหลือง		กล่องอลูมิเนียม		กล่องทองแดง	
	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz
2,1	-	-	-	-	-	-
2,2	-	-	-	-	-	-
2,3	-	-	-	-	-	-
2,3.5	10.15	-	-	-	-	-
2,4	10.52	11.36	-	-	-	-
2,4.5	15.43	12.57	-	-	-	-
2,5	18.01	13.89	10.44	-	-	-
2,5.5	21.03	17.7	1.48	-	13.42	-
2,6	23.04	18.48	12.72	-	15.01	10.15
2,6.5	25.73	19.6	13.35	-	16.62	13.49
2,7	27.03	21.7	15.1	10.37	19.2	15.5

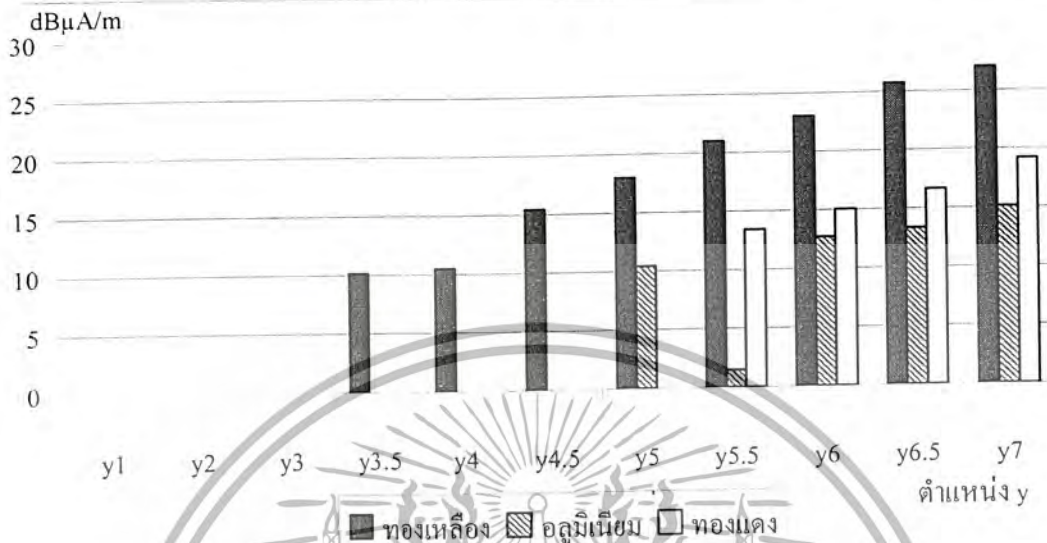


รูปที่ 4.43 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x2

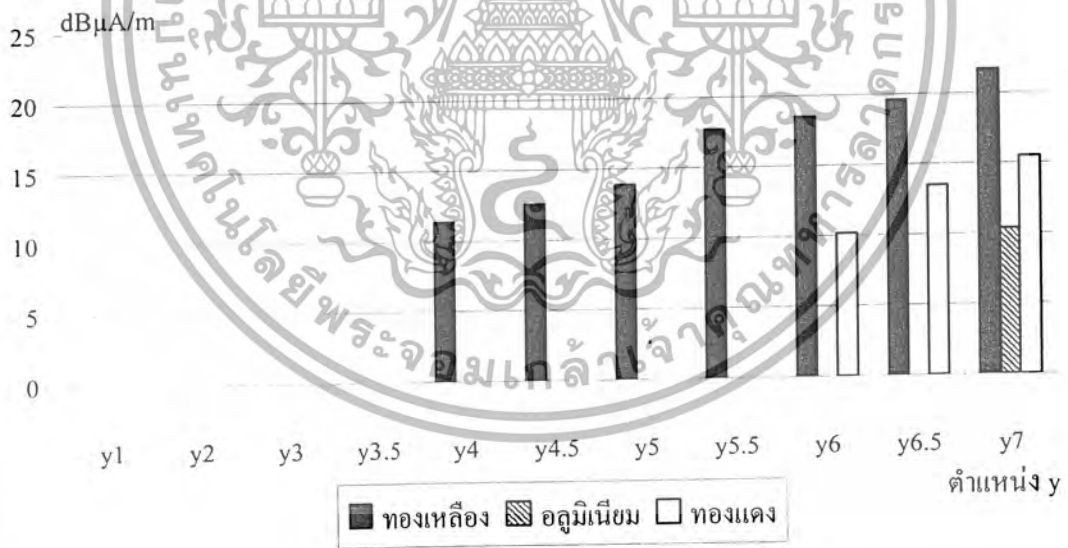
4.3.4 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดจากการเปลี่ยนกล่องวัสดุทดสอบที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นการนำค่าจากตาราง 4.14 มาเปรียบเทียบที่แนวแกน x2 ให้เห็นขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนกล่องวัสดุทดสอบที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz



รูปที่ 4.44 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของกล่องโลหะที่ $f = 30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x2



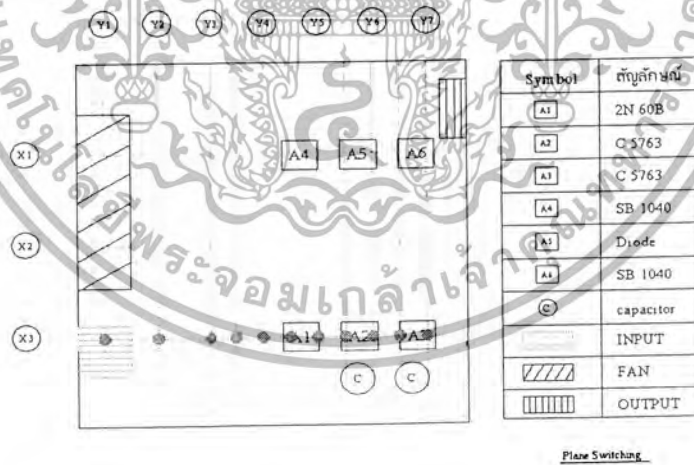
รูปที่ 4.45 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของกล่องโลหะที่ $f = 5$ kHz ณ ตำแหน่ง x2

4.3.5 ตารางการวัดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นของกล่องโลหะแต่ละชนิดในแนวแกน x3 ดังแสดงตำแหน่งการวัดไว้ดังรูปที่ 4.46 โดยทำการวัดตามตำแหน่งจากซ้ายไปขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.21 ผลของค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของกล่องแต่ละชนิด ที่แกน x3

ตำแหน่ง (x, y)	ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก					
	กล่องทองเหลือง		กล่องอลูมิเนียม		กล่องทองแดง	
	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz	f=30.2 kHz	f=59.8 kHz
3,1	-	-	-	-	-	-
3,2	-	-	-	-	-	-
3,3	-	-	-	-	-	-
3,3.5	-	-	-	-	-	-
3,4	14.44	10.61	12.73	-	-	-
3,4.5	18.91	14.44	15.32	10.11	-	-
3,5	23.18	15.81	19.81	13.95	13.22	-
3,5.5	25.93	19.42	20.63	15.74	15.9	10.2
3,6	27.45	19.76	22.62	17.52	16.85	11.01
3,6.5	28.65	23.05	24.49	19.04	16.46	13.56
3,7	29.28	22.01	25.98	19.87	17.23	12.62

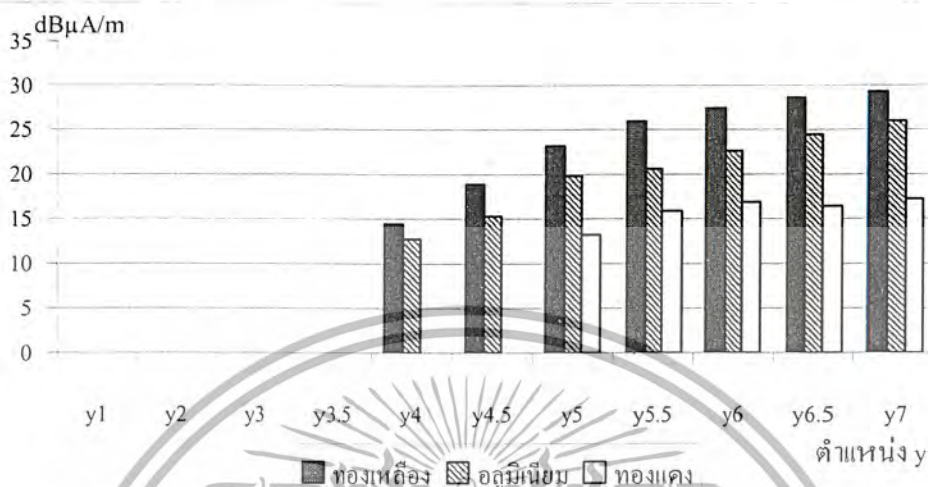


รูปที่ 4.46 ตำแหน่งในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในแนวแกน x3

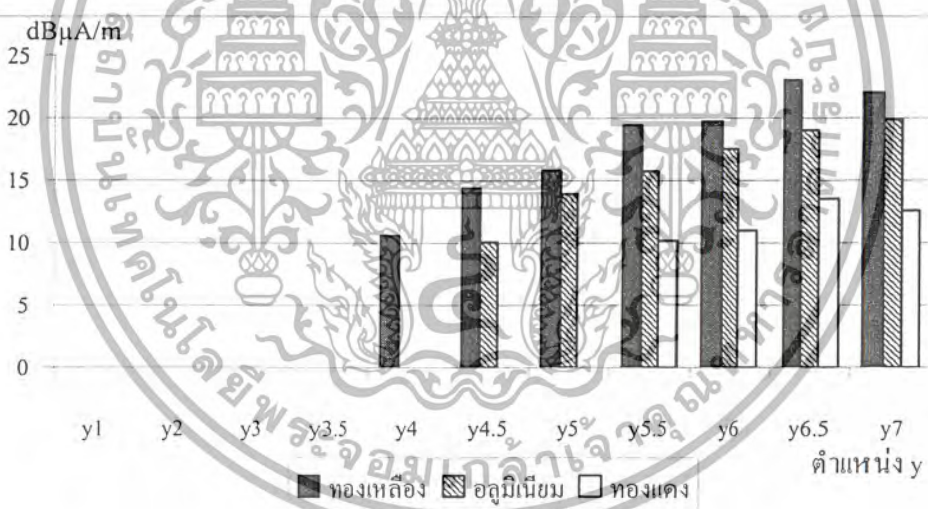
4.3.6 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดจากการเปลี่ยนกล่องวัสดุทดสอบที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นการนำค่าจากตาราง 4.15 มาเปรียบเทียบที่แนวแกน x3 ให้เห็นขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนกล่องวัสดุทดสอบที่ความถี่ 30.2 kHz และ 59.8 kHz



รูปที่ 4.47 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของกล่อง โลหะที่ $f = 30.2$ kHz ณ ตำแหน่ง x3



รูปที่ 4.48 เปรียบเทียบค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กของกล่อง โลหะที่ $f = 59.8$ kHz ณ ตำแหน่ง x3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.7 บทสรุป

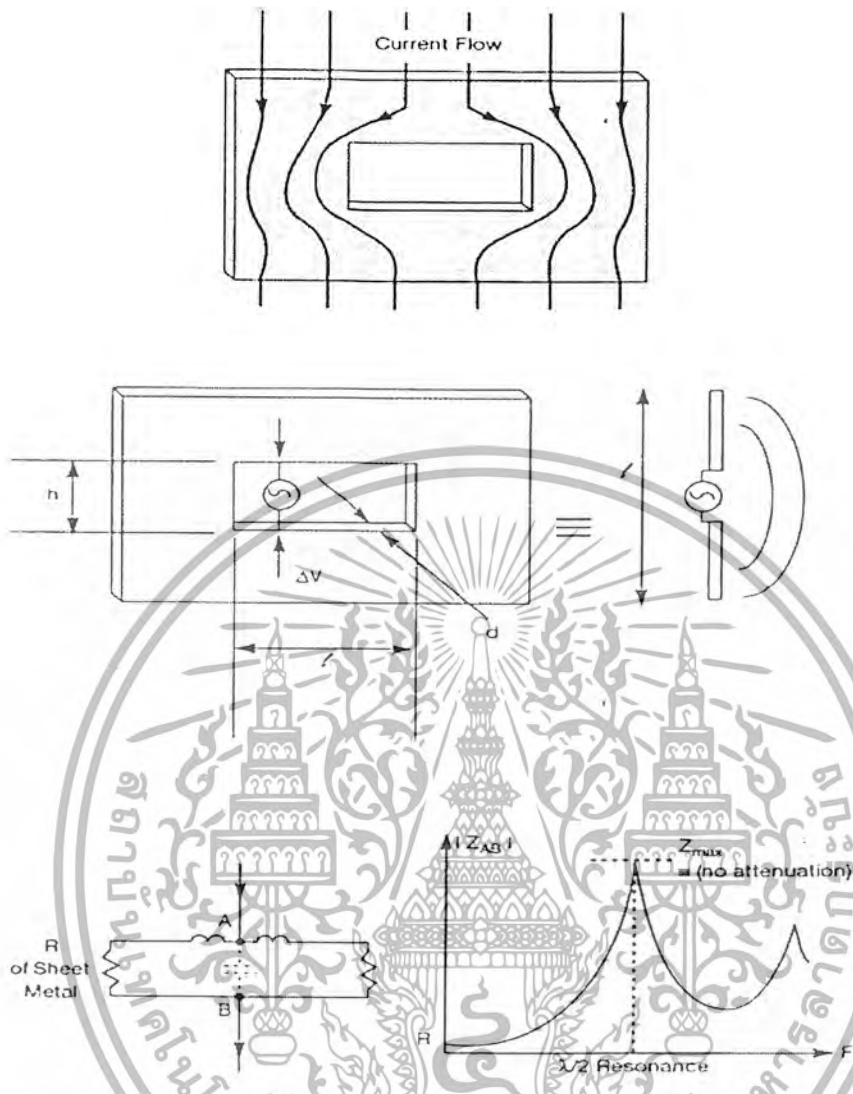
บทสรุปในหัวข้อนี้ทำการพิจารณาการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเพียงตำแหน่งเดียวกับเงื่อนไขของ ความหนา แนวการวางตัว ชนิดของวัสดุ เพื่อให้พิจารณาได้ง่าย ตำแหน่งที่ใช้ในการพิจารณาคือ $x3, y6.5$ โดยค่าประสิทธิผลการชิลด์ $= 20 \log(\text{ค่าที่วัดได้ก่อนชิลด์} / \text{ค่าที่วัดได้หลังชิลด์})$; ค่าที่วัดได้ก่อนนั้น ดูจากตารางที่ 4.9 สามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 4.22 ประสิทธิภาพการชิลด์ของกล่องชิลด์ชนิดต่างๆ

ความถี่ (kHz)	ประสิทธิภาพการชิลด์ (dB)		
	กล่องทองเหลือง	กล่องอลูมิเนียม	กล่องทองแดง
30.2	5.12	6.48	9.9
59.8	6.86	8.52	11.47

จากตารางจะเห็นว่าเมื่อนำวัสดุทั้งสามมาทำกล่องแล้วความสามารถในการลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กก็ยังคงเป็นทองแดงอยู่ แสดงว่าทองแดงมีประสิทธิภาพการชิลด์ได้ดีที่สุด แต่ขนาดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กแบบกล่องมีค่ามากกว่าแบบแผ่นสาเหตุที่เป็นเช่นนั้นก็เพราะ

- ระบายอากาศ [13] ในการออกแบบกล่องชิลด์ของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย จะต้องมีการเจาะรูระบายอากาศเพื่อระบายความร้อน เมื่อมีรูเกิดขึ้นทำให้เกิดเสมือนแรงดันคกร่วมที่ระบายอากาศทำให้รูระบายอากาศเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายอีกที่หนึ่งดังแสดงในรูปที่ 4.47 จึงทำให้สัญญาณรบกวนแม่เหล็กสามารถแผ่กระจายออกมาทางรูระบายอากาศได้



รูปที่ 4.49 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ออกมาทางรูระบายอากาศ

การที่จะลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ออกมาทางรูระบายอากาศสามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนาให้มากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรูก็สามารถลดได้



รูปที่ 4.50 วิธีการลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กที่ระบายอากาศ

- ขนาดของแผ่นโลหะมีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่ด้านบนของกล่อง เมื่อแผ่นโลหะที่นำมาปิดกั้นใหญ่กว่าพื้นที่ของกล่องทำให้กั้นสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก ได้มากกว่ากล่องซีลด์

4.4 ผลสรุป

จากการทดสอบการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กตามเงื่อนไขต่างๆสามารถสรุปผลของการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กได้เป็นตารางตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.23 การเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กในเงื่อนไขต่างๆ

ความถี่ (kHz)	สัญญาณรบกวนแม่เหล็ก (dBμA/M)													
	โหลด (W)			ความหนา (Al)			แนวการวาง (Al)		ชนิดโลหะ			กล่องซีลด์		
	55	95	147	0 mm	0.5 mm	1 mm	วางตามกั้น	วางขวางกั้น	B	Al	Cu	B	Al	Cu
30.2	*	**	***	###	##	#	\$\$	\$!!!	!!	!	///	//	/
59.8	*	**	*	###	##	#	\$\$	\$!!!	!!	!	///	//	/

หมายเหตุ :

B คือ ทองเหลือง

Al คือ อลูมิเนียม

Cu คือ ทองแดง

* คือ ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับโหลดถ้ามีมากแสดงว่ามีค่ามาก

คือ ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับความหนาถ้ามีมากแสดงว่ามีค่ามาก

\$ คือ ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับแนวการวางถ้ามีมากแสดงว่ามีค่ามาก

! คือ ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับชนิดของโลหะถ้ามีมากแสดงว่ามีค่ามาก

/ คือ ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กเกี่ยวกับกล่องซีลด์ถ้ามีมากแสดงว่ามีค่ามาก

จากการทดสอบการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กผ่านทางอากาศในบทนี้ทำให้สามารถที่จะออกแบบกล่องซีลด์ความถี่สูง โดยจะต้องพิจารณาเงื่อนไขใดบ้างที่มีผลต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก เพื่อนำไปวิเคราะห์ในการออกแบบกล่องซีลด์ โดยในโครงการนี้ สามารถสรุปเป็นประเด็นการวิเคราะห์ออกเป็น 4 เงื่อนไข คือ

1. โหลด ใช้เป็นตัวเพิ่มขนาดของสัญญาณรบกวนเพื่อใช้ในการวิเคราะห์
2. ความหนาของวัสดุที่นำมาซีลด์ ถ้าการซีลด์ครั้งแรกไม่ผ่านก็ให้เพิ่มความหนาเข้าไป
3. แนวการวางตัวของวัสดุทดสอบ การวางที่ส่งผลต่อขนาดของสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ชนิดของวัสดุที่นำมาทดสอบ วัสดุแต่ละชนิดมีประสิทธิผลการซึดค้ไม่เท่ากัน เพราะฉะนั้น ในการออกแบบกล่องซึดค้จะต้องใช้ประโยชน์จากการศึกษาเงื่อนไขทั้ง 4 นี้ เป็นตัวช่วย ในการออกแบบกล่องซึดค้ความถี่สูง และยังสามารถนำเงื่อนไขนี้ไปประยุกต์ใช้ในการซึดค้อุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดอื่น ที่ไม่ใช่สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎี

จากผลการทดลองที่ผ่านมาในแต่ละกรณีนั้นไม่ว่าจะเป็นการชีดต์โดยแบบ อลูมิเนียม, ทองแดง และทองเหลืองก็ตามถ้าเป็นโลหะที่ต่างชนิดกันจะให้ผลในการลดทอนสัญญาณรบกวน (Radiated) ได้แตกต่างกันออกไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติในการดูดกลืน (Absorption) และการสะท้อน (Reflecting) คลื่นสนามแม่เหล็กของโลหะแต่ละชนิดที่จะแตกต่างกันออกไปตามแต่ความหนา (Thickness), ลักษณะของพื้นผิว, โพลด และชนิดโลหะ

จากทฤษฎีจะพบว่าผลการลดสัญญาณรบกวนทางอากาศนั้นอาศัยหลักการ 2 อย่างคือ

1. การดูดซับพลังงาน (Absorbing Energy)
2. การสะท้อนพลังงาน (Reflecting Energy)

การที่จะทราบว่าค่าของโลหะชนิดไหนมีประสิทธิภาพดีกว่ากันนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 5.1, 5.2, 5.3 และ 5.4

$$SE = A_{dB} + R_{dB} + R_{rb} \quad (5.1)$$

$$A_{dB} = 132t \sqrt{f_{MHz} \mu_r \sigma_r} \quad (5.2)$$

$$R_{dB} = 20 \log_{10} \left[\frac{(1+k)^2}{4k} \right] \quad (5.3)$$

$$RR_{dB} = 20 \log_{10} \left[1 - \left[\frac{(k-1)^2}{1+k} \right] e^{-0.23 A_{dB} (1+k)} \right] \quad (5.4)$$

หมายเหตุ 1. เมื่อสัญญาณรบกวนเป็นแบบสนามแม่เหล็ก

$$k = r \sqrt{2\pi f \sigma_r \mu_r} \quad (5.5)$$

ตารางที่ 5.1 ค่า μ_r และ σ_r ของวัสดุแต่ละชนิด

ชนิดโลหะ	μ_r	σ_r	t
ทองเหลือง	0.5	0.4	0.5 mm.
อลูมิเนียม	1	0.63	0.5 mm.
ทองแดง	1	1	0.5 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทองเหลือง

ค่า Absorbing Energy ของทองเหลือง

$$A_{dB} = 132 \times 0.5 \sqrt{30.2 \times 10^{-3} \times 0.5 \times 0.4}$$

$$= 5.129 \text{ dB At } 30.2 \text{ kHz}$$

ค่า Reflecting Energy ของทองเหลือง

$$k = 0.02 \sqrt{2 \times 3.14 \times 30.2 \times 10^3 \times 0.4 \times 5.8 \times 10^7 \times 4\pi \times 10^{-7} / 0.5}$$

$$k = 66.52$$

$$R_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{(66.52+1)^2}{4 \times 66.52} \right|$$

$$= 24.67 \text{ dB At } 30.2 \text{ kHz}$$

ค่า Re-Reflection Correction ของทองเหลือง

$$RR_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 - \left(\frac{66.52-1}{66.52+1} \right)^2 e^{-0.23 \times 5.129 \times (1+1)} \right|$$

$$= -1.69 \text{ dB At } 30.2 \text{ kHz}$$

ค่า Shielding Effectiveness ของทองเหลือง

$$SE = 5.129 + 24.67 - 1.69$$

$$= 28.109 \text{ dB At } 30.2 \text{ kHz}$$

อลูมิเนียม

ค่า Absorbing Energy ของอลูมิเนียม

$$A_{dB} = 132 \times 0.5 \sqrt{30.2 \times 10^{-3} \times 1 \times 0.63}$$

$$= 9.1 \text{ dB At } 30.2 \text{ kHz}$$

ค่า Reflecting Energy ของอลูมิเนียม

$$k = 0.02 \sqrt{2 \times 3.14 \times 30.2 \times 10^3 \times 0.63 \times 5.8 \times 10^7 \times 4\pi \times 10^{-7} / 1}$$

$$k = 59.03$$

$$R_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{(59.03+1)^2}{4 \times 59.03} \right|$$

$$= 23.67 \text{ dB At } 30.2 \text{ kHz}$$

ค่า Re-Reflection Correction ของอลูมิเนียม

$$RR_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 - \left(\frac{59.03-1}{59.03+1} \right)^2 e^{-0.23 \times 9.1 \times (1+1)} \right|$$

$$= -0.43 \text{ dB At } 30.2 \text{ kHz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Shielding Effectiveness ของทองเหลือง

$$SE = 9.1 + 23.67 - 0.43 \\ = 32.34 \text{ dB At } 30.2 \text{ kHz}$$

ทองแดง

ค่า Absorbing Energy ของทองแดง

$$A_{dB} = 132 \times 0.5 \sqrt{30.2 \times 10^{-3} \times 1 \times 1} \\ = 11.46 \text{ dB At } 30.2 \text{ kHz}$$

ค่า Reflecting Energy ของทองแดง

$$k = 0.02 \sqrt{2 \times 3.14 \times 30.2 \times 10^3 \times 1 \times 5.8 \times 10^7 \times 4\pi \times 10^{-7} / 1} \\ k = 74.37$$

$$R_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{(74.37 + 1)^2}{4 \times 74.37} \right| \\ = 25.61 \text{ dB At } 30.2 \text{ kHz}$$

ค่า Re-Reflection Correction ของทองแดง

$$RR_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 - \left(\frac{74.37 - 1}{74.37 + 1} \right)^2 e^{-0.23 \times 11.46 \times (1 + i)} \right| \\ = -0.2 \text{ dB At } 30.2 \text{ kHz}$$

ค่า Shielding Effectiveness ของทองแดง

$$SE = 11.46 + 25.61 - 0.2 \\ = 36.87 \text{ dB At } 30.2 \text{ kHz}$$

เมื่อนำค่าประสิทธิภาพการชีลด์จากการทดลองที่ตำแหน่ง (x3, y6.5) จากตารางที่ 4.22 นำมาเทียบกับค่าการคำนวณทางทฤษฎีข้างต้น จะได้ค่าตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าประสิทธิภาพในทางทฤษฎีเทียบกับค่าในการทดสอบ

ชนิดโลหะ	ทฤษฎี	ทดสอบ
	ค่าประสิทธิภาพการชีลด์ (dB)	ค่าประสิทธิภาพการชีลด์ (dB)
ทองเหลือง	28.109	5.12
อลูมิเนียม	32.34	6.48
ทองแดง	36.87	9.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าจากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบจะได้ข้อสรุปเดียวกัน คือ ทองแดงนั้นจัดเป็นโลหะที่สามารถลดสัญญาณรบกวนได้มากที่สุด ซึ่งค่าประสิทธิภาพของทองแดงนั้นมีค่าประสิทธิภาพมากที่สุด

แต่ที่ค่าประสิทธิภาพของการทดสอบกับทางทฤษฎีนั้นที่มีค่าไม่เท่ากันนั้นก็เนื่องจาก

1. ช่องระบายของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย
2. ห้องที่ใช้ในการทดสอบไม่ได้มาตรฐาน
3. สัญญาณรบกวนจากภายนอกเข้ามารบกวน

5.2 ปัญหาที่เกิดจากการทดลอง

1. สัญญาณรบกวนจากภายนอกแทรกเข้ามาในขณะวัด
2. Switching Power Supply ไม่สามารถจ่ายโหลดได้เต็มพิกัดตามที่บอกมา
3. ไม่สามารถที่จะทำการหาค่า μ_r ที่แน่นอนและถูกต้องแม่นยำของโลหะบางชนิดได้
4. ห้องที่ใช้ในการทดสอบไม่ใช่ห้องที่ใช้ในการชิลด์
5. การจัดวางสาย อุปกรณ์ ขณะทำการวัดมีการเคลื่อนที่ไม่สามารถจะกำหนดตำแหน่งให้แน่นอนได้

5.3 สรุปโครงการ

โครงการนี้เกิดขึ้นเนื่องจากว่าสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายนั่นก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนออกมาภายในระบบต่างๆ และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ จึงต้องหาวิธีการป้องกันซึ่งจากการศึกษาจะพบว่าถ้าเรานำโลหะทองแดงมาสร้าง โครงต้นแบบจะสามารถลดสัญญาณรบกวนได้มากกว่าสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายที่หาซื้อตามท้องตลาดซึ่งผลได้จากการผลการทดสอบตารางที่ 4.22 ซึ่งจะพบว่ากล่องที่เป็นทองแดงสามารถลดสัญญาณได้มากที่สุด

แต่เนื่องจากราคาของทองแดงนั้นมีราคาสูงเกินไป ก็ไม่เหมาะที่จะนำมาทำกล่องนอกเสียจากว่าสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่มากเกินไปจนไปทำความเสียหายแก่ระบบต่างๆ หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดอื่นๆ

5.4 ข้อเสนอแนะ

ผลที่ได้จากการทดสอบนั้นสามารถนำไปใช้ในการชิลด์อุปกรณ์ชนิดอื่นๆ ได้อีกมากมายเช่น UPS, เครื่องเชื่อมความถี่สูง หรืออุปกรณ์ที่มีส่วนประกอบเป็นเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์

แต่ถ้าต้องการชิลด์กับอุปกรณ์ที่มีความถี่ต่ำจะต้องศึกษาในการชิลด์ความถี่ต่ำต่อไป

ภาคผนวก ก.

ผลการทดลองในกรณีต่างๆ ของการขีด

ก.1 รูปสัญญาณที่โหลดต่างๆ

- โหลด 55 W
- โหลด 95 W
- โหลด 147 W

ก.2 รูปสัญญาณรบกวนที่ความหนาต่างๆ ขณะจ่ายโหลด 147 W

- ความหนา 0 มม.
- ความหนา 0.5 มม.
- ความหนา 1 มม.

ก.3 รูปสัญญาณรบกวนที่แนวการวางต่างๆ ขณะจ่ายโหลด 147 W

- วางตามแนว
- วางขวางแนว

ก.4 รูปสัญญาณรบกวนของแผ่นโลหะชนิดต่างๆ ขณะจ่ายโหลด 147 W

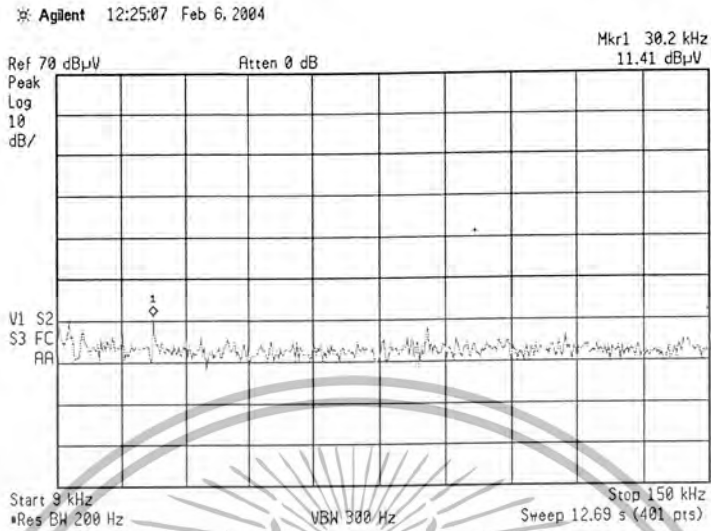
- แผ่นทองเหลือง
- แผ่นอลูมิเนียม
- แผ่นทองแดง

ก.5 รูปสัญญาณรบกวนของกล่องโลหะชนิดต่างๆ ขณะจ่ายโหลด 147 W

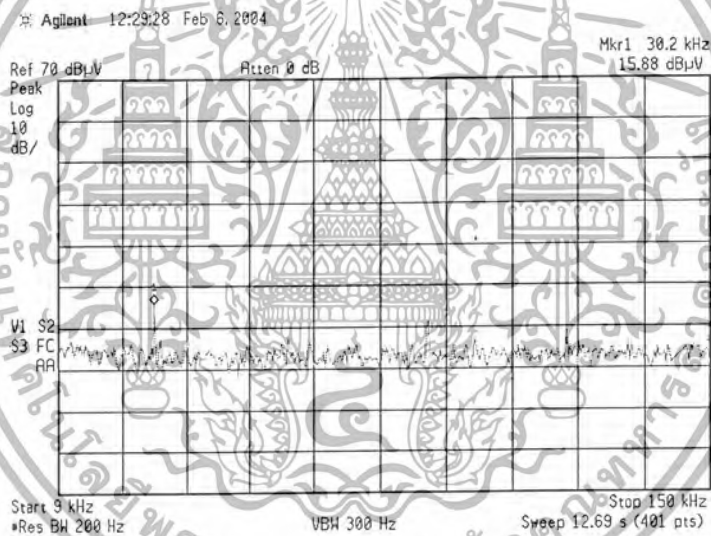
- กล่องทองเหลือง
- กล่องอลูมิเนียม
- กล่องทองแดง

ก.1 รูปสัญญาณที่โหลดต่างๆ
รูปสัญญาณรบกวนแบบเปิดฝาครอบที่โหลด 55 W

แนวแกน (X1, Y1)

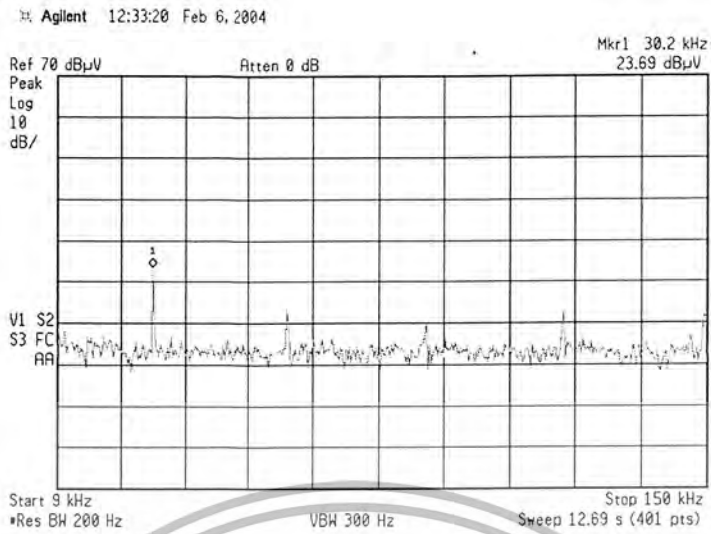


แนวแกน (X1, Y2)

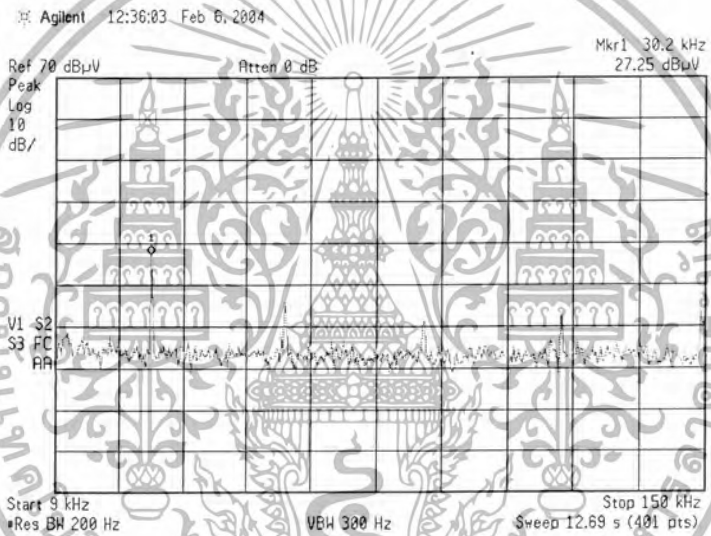


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

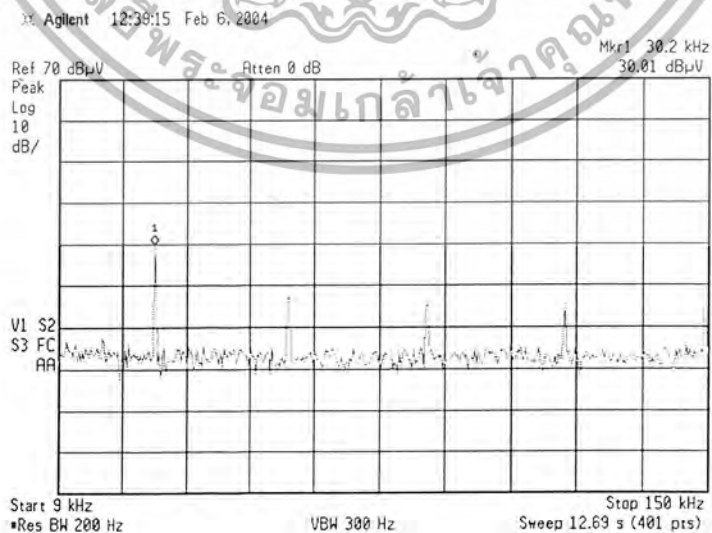
แนวแกน (X1, Y3)



แนวแกน (X1, Y3.5)

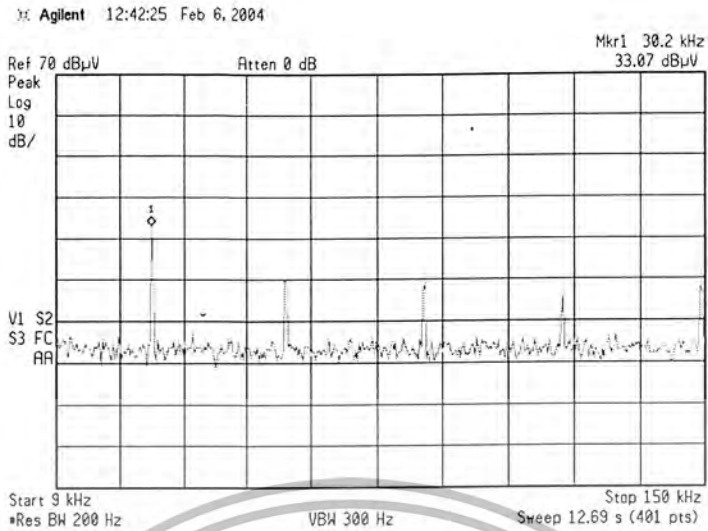


แนวแกน (X1, Y4)

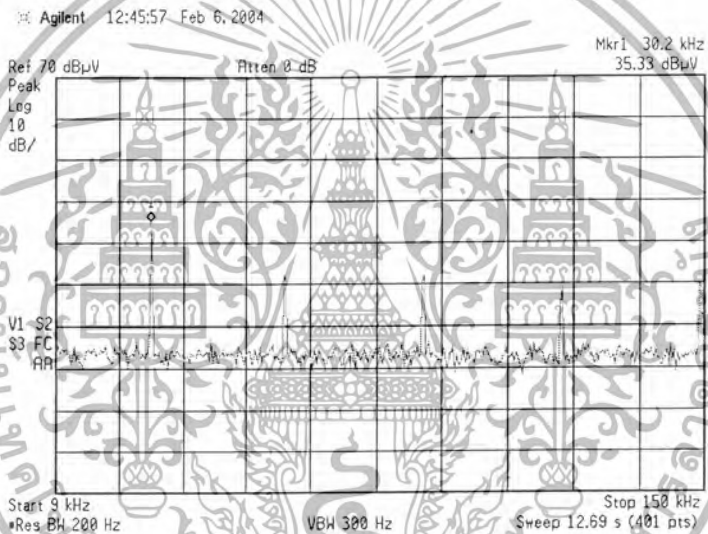


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

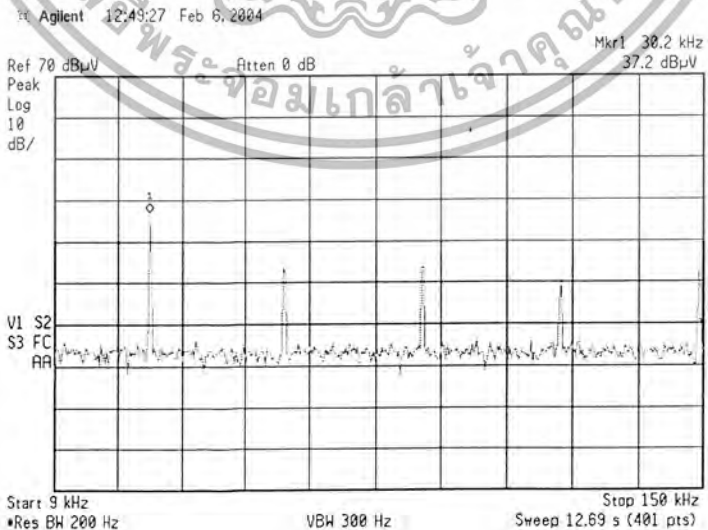
แนวแกน (X1, Y4.5)



แนวแกน (X1, Y5)

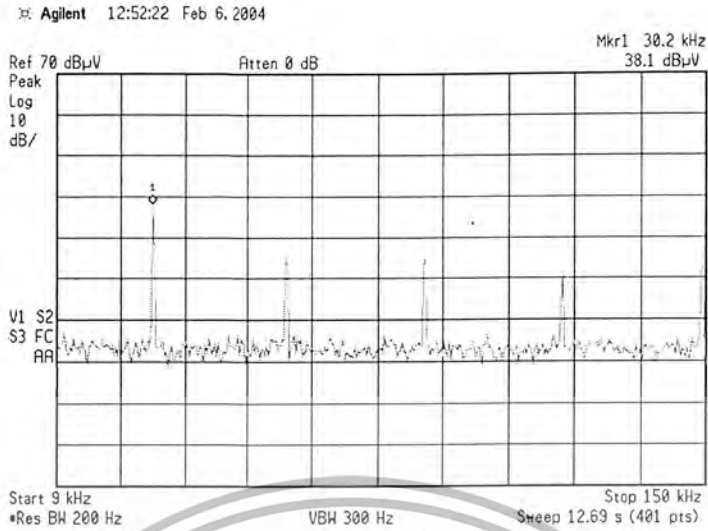


แนวแกน (X1, Y5.5)

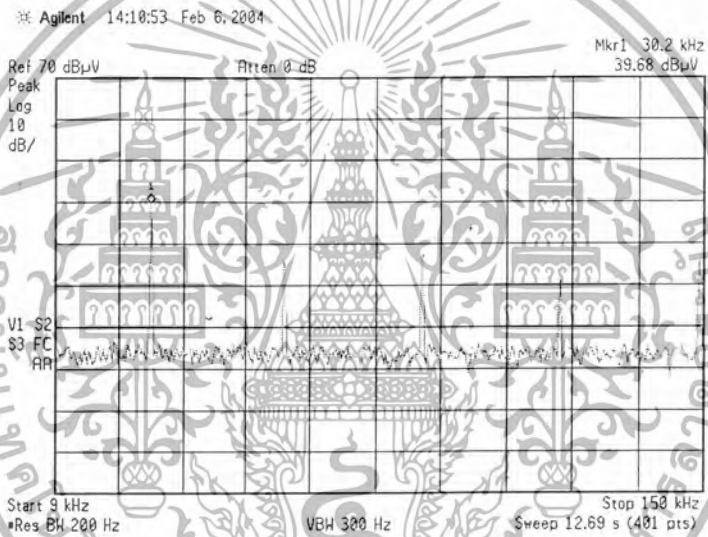


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

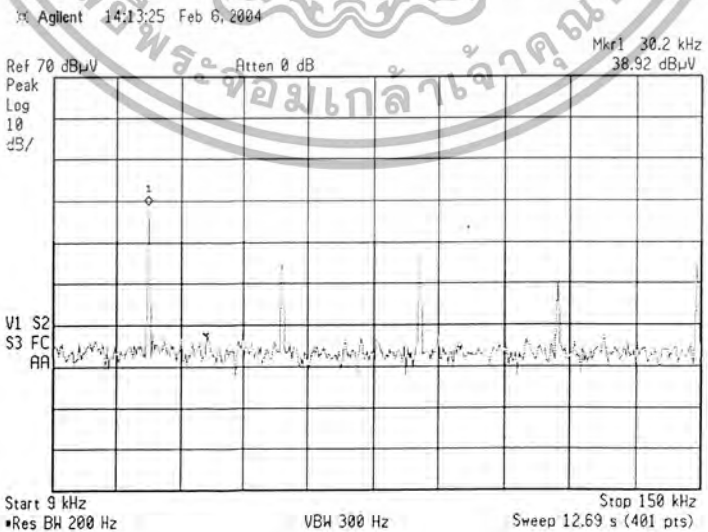
แนวแกน (X1, Y6)



แนวแกน (X1, Y6.5)

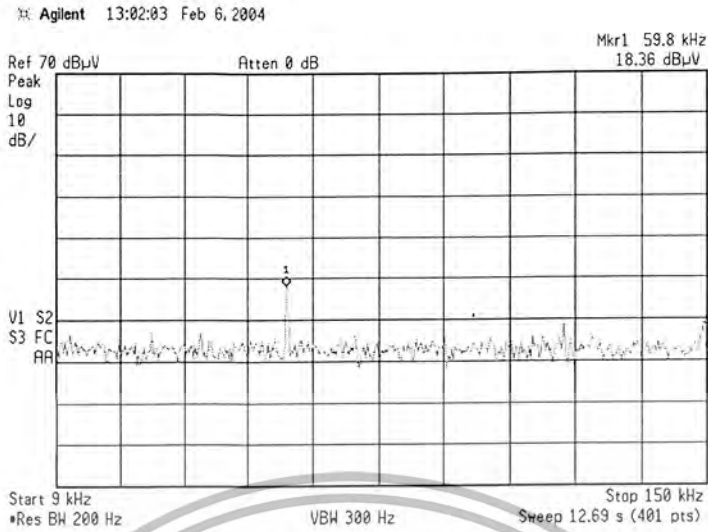


แนวแกน (X1, Y7)

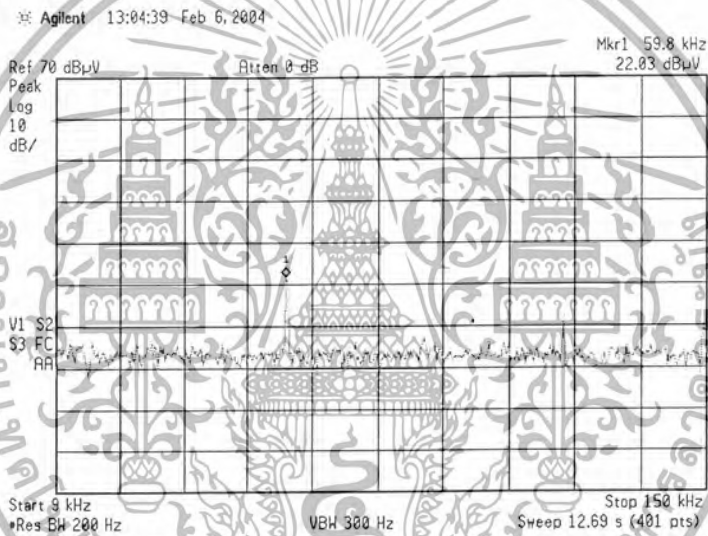


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

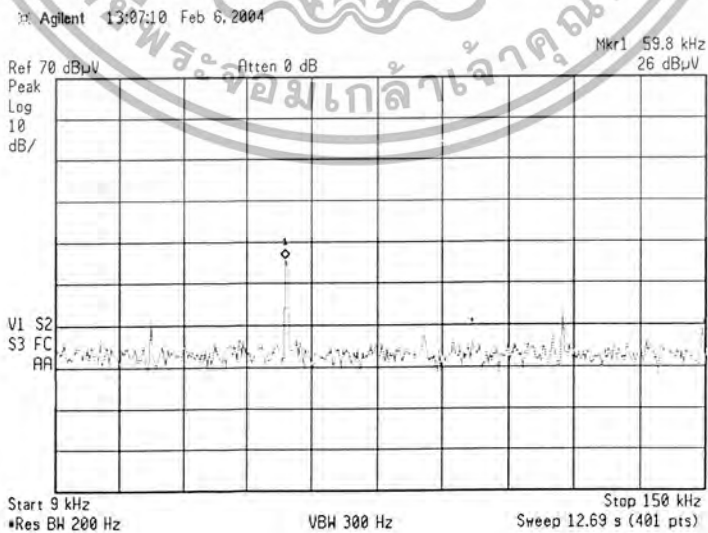
แนวแกน (X2, Y1)



แนวแกน (X2, Y2)

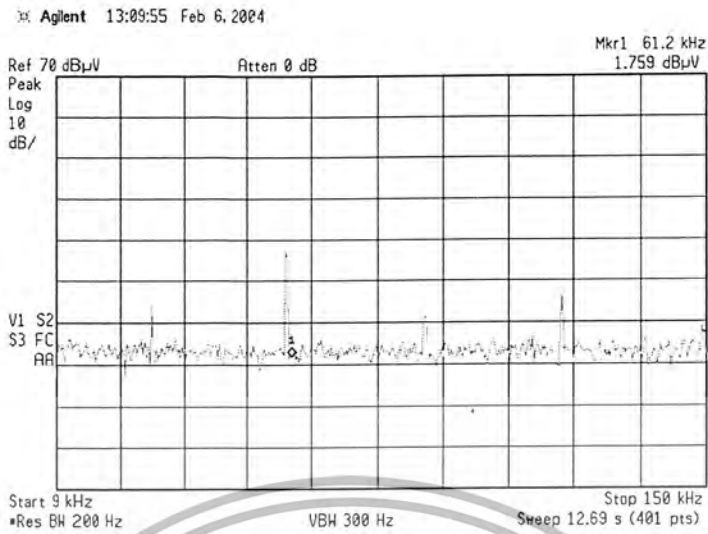


แนวแกน (X2, Y3)

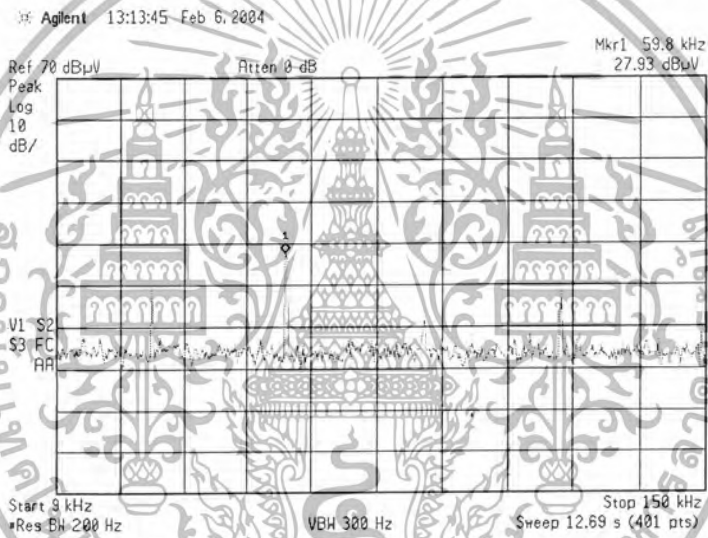


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

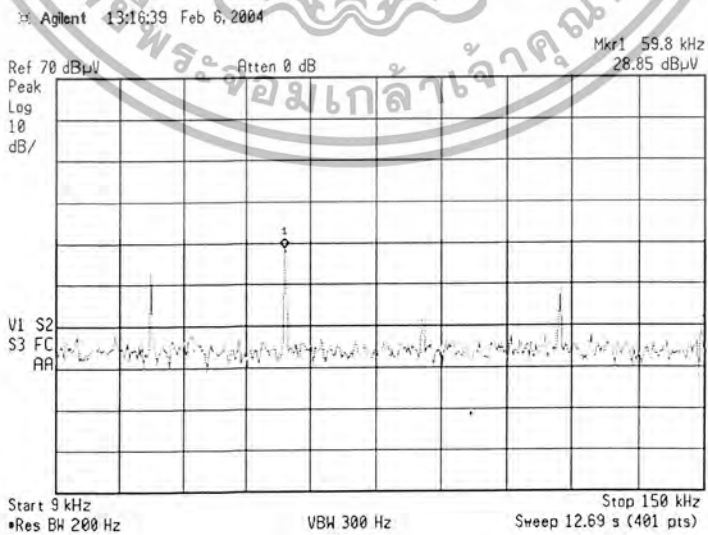
แนวแกน (X2, Y3.5)



แนวแกน (X2, Y4)

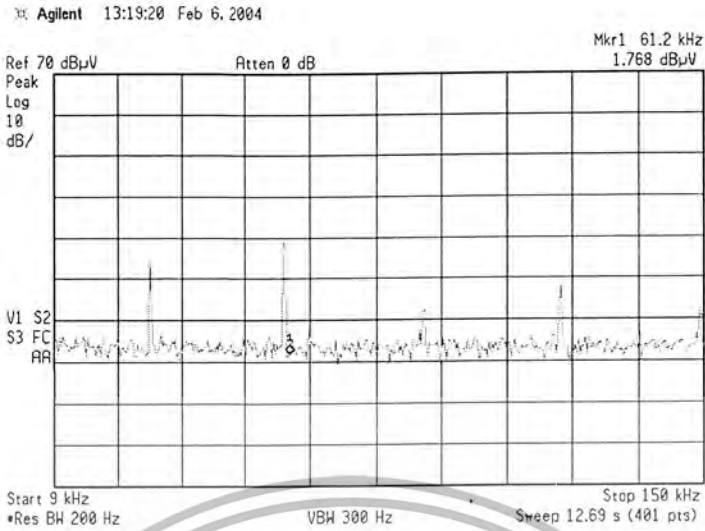


แนวแกน (X2, Y4.5)

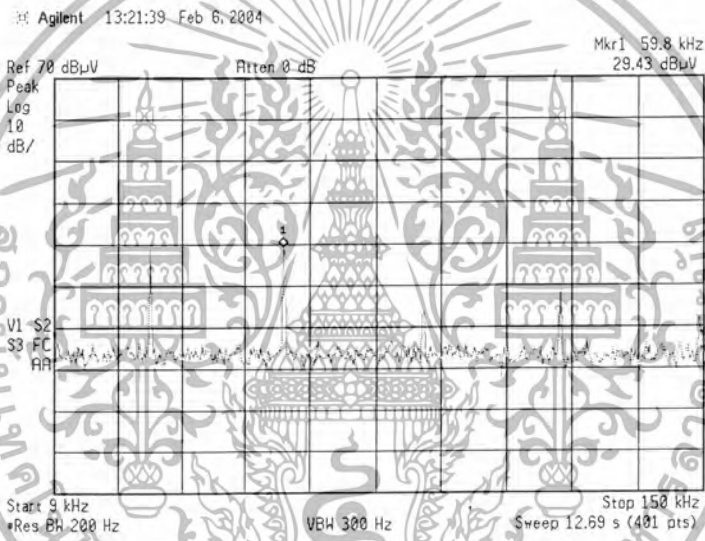


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

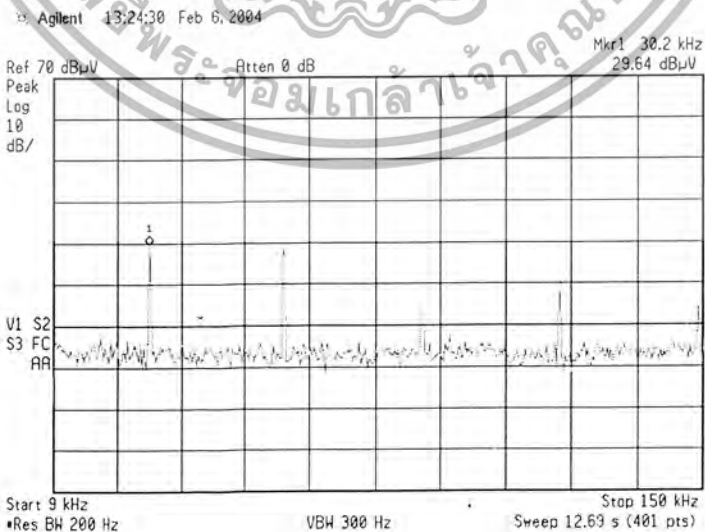
แนวแกน (X2, Y5)



แนวแกน (X2, Y5.5)

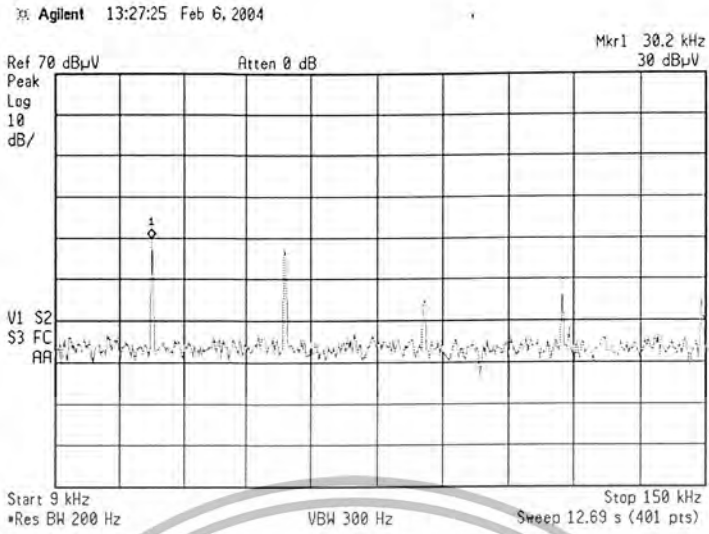


แนวแกน (X2, Y6)

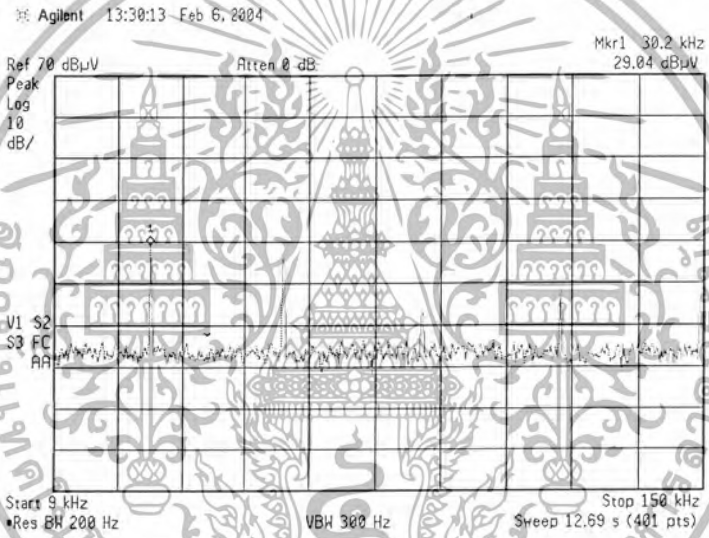


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวแกน (X2, Y6.5)

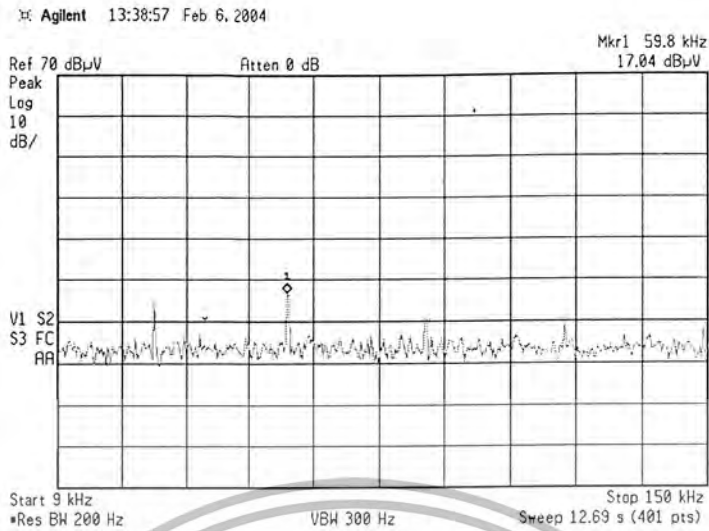


แนวแกน (X2, Y7)

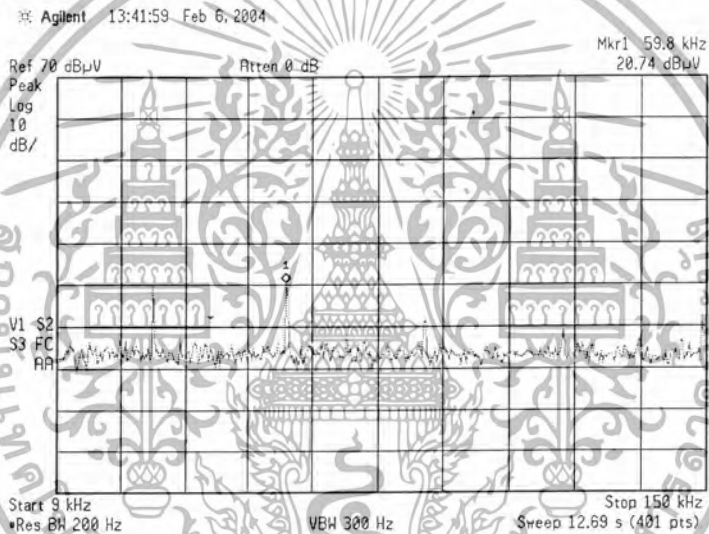


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

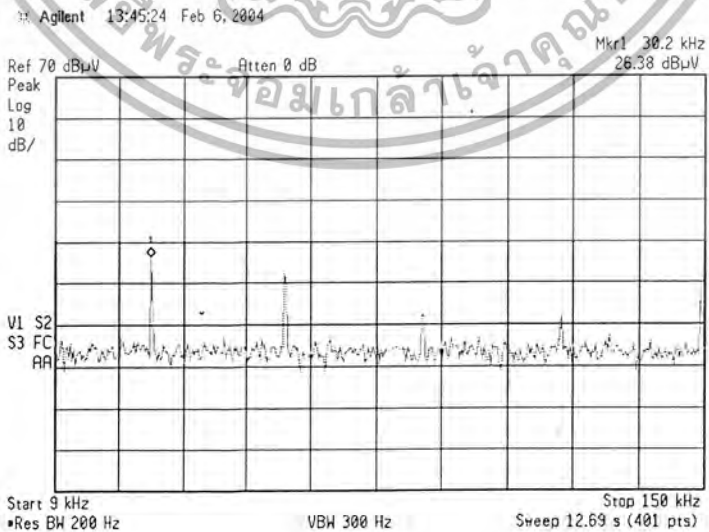
แนวแกน (X3, Y1)



แนวแกน (X3, Y2)

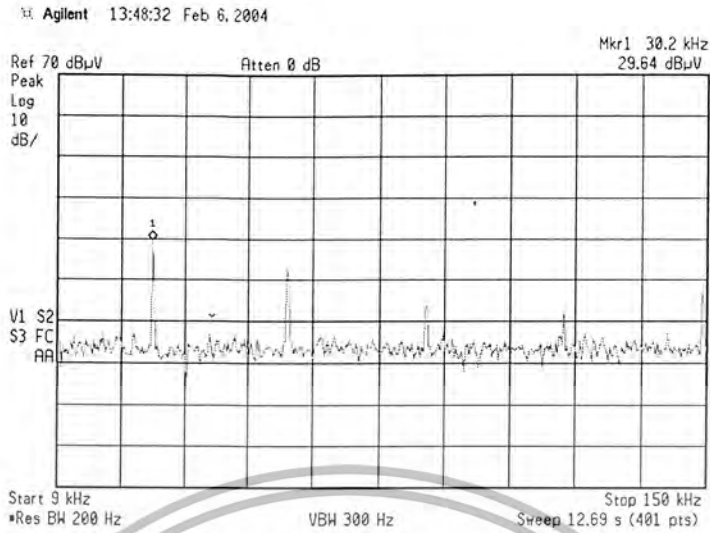


แนวแกน (X3, Y3)

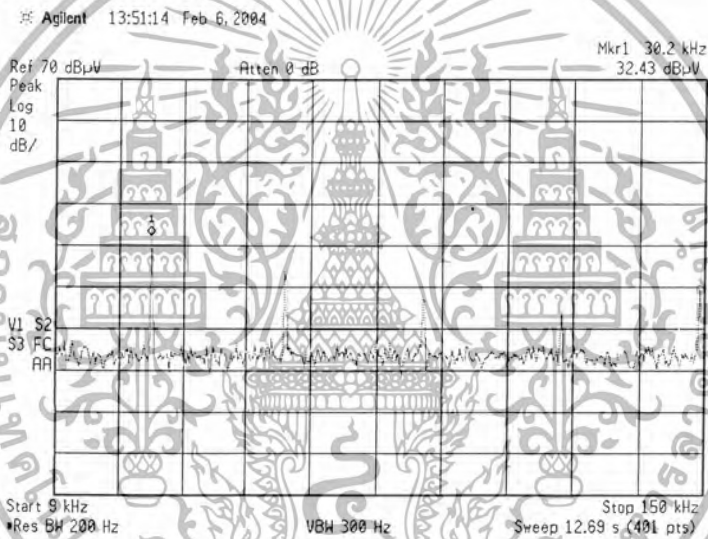


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

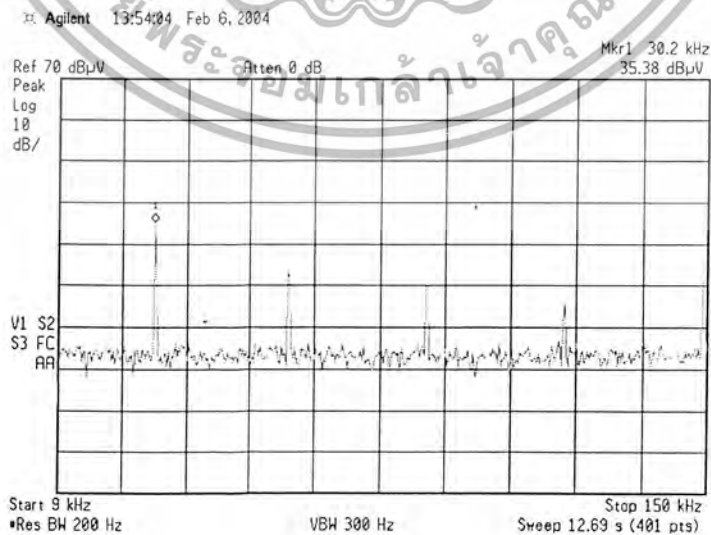
แนวแกน (X3, Y3.5)



แนวแกน (X3, Y4)

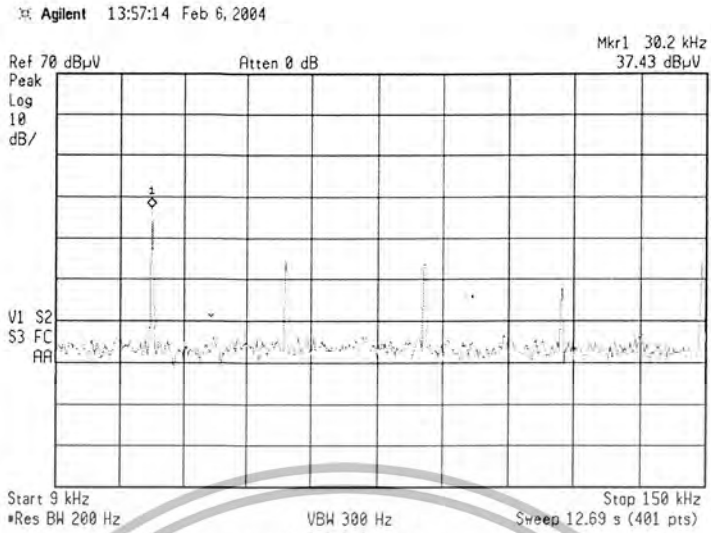


แนวแกน (X3, Y4.5)

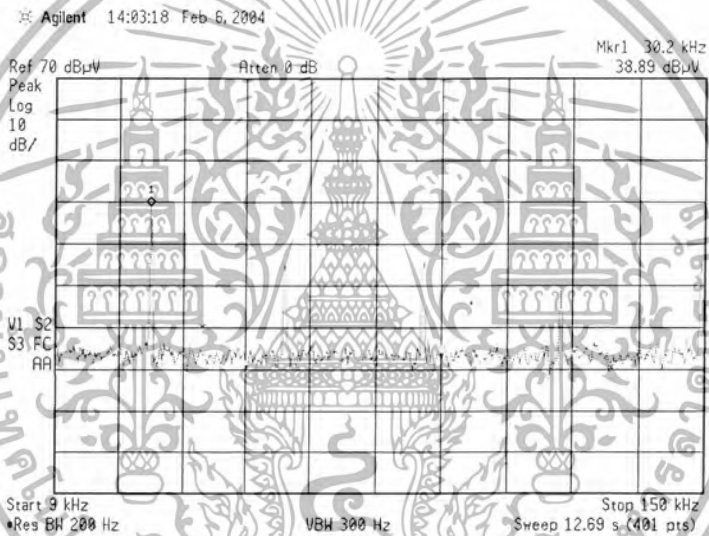


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

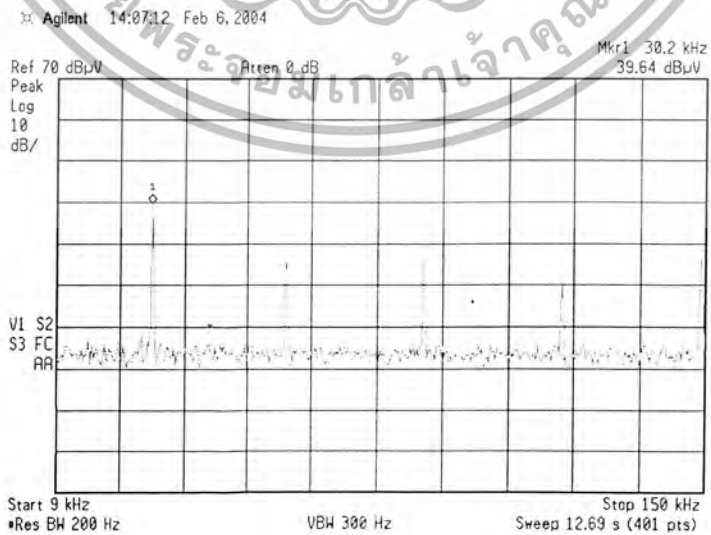
แนวแกน (X3, Y5)



แนวแกน (X3, Y5.5)

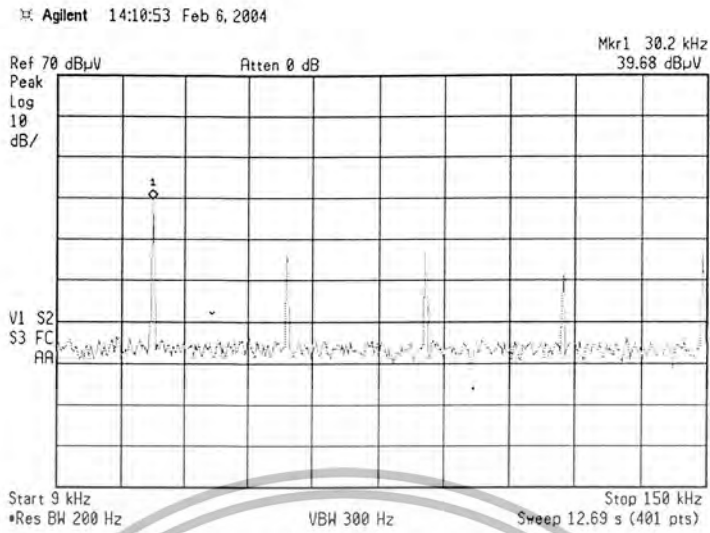


แนวแกน (X3, Y6)

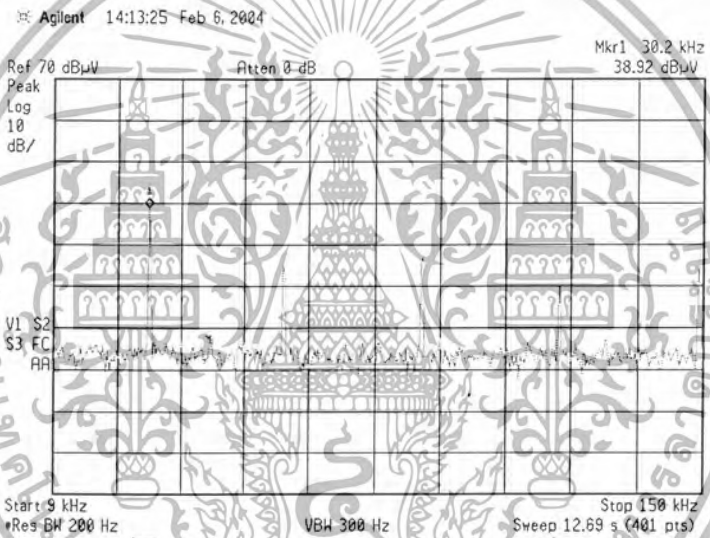


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวแกน (X3, Y6.5)



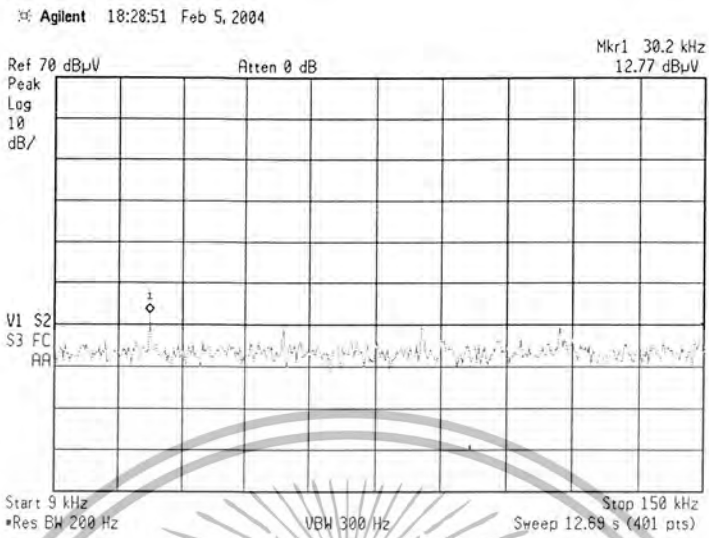
แนวแกน (X3, Y7)



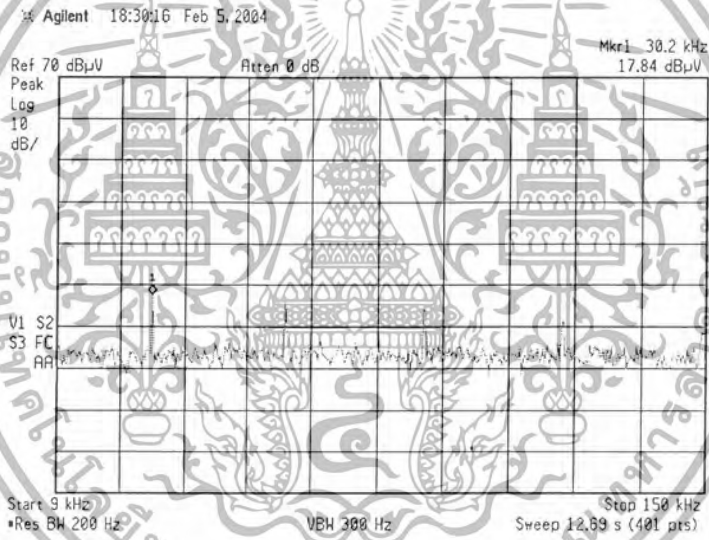
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปสัญญาณรบกวนแบบเปิดฝากรอบที่โหลด 95 W

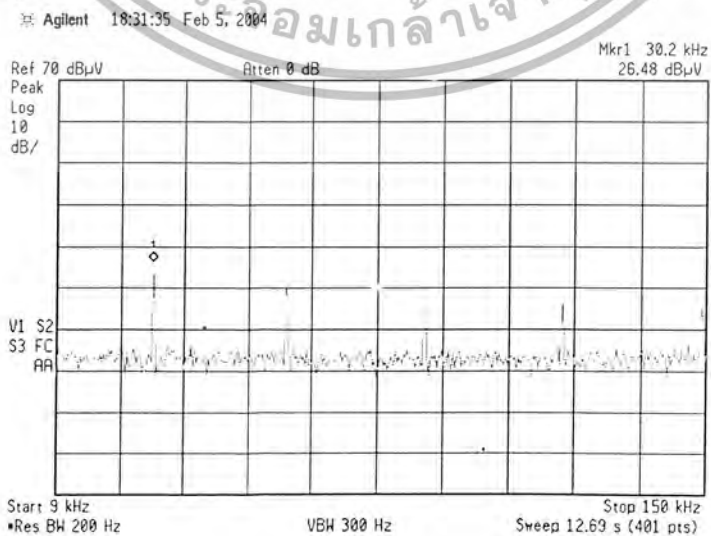
แนวแกน (X1, Y1)



แนวแกน (X1, Y2)

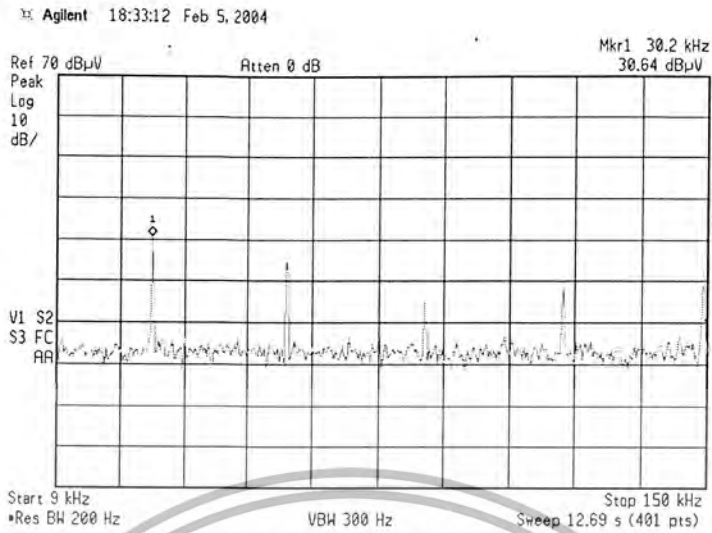


แนวแกน (X1, Y3)

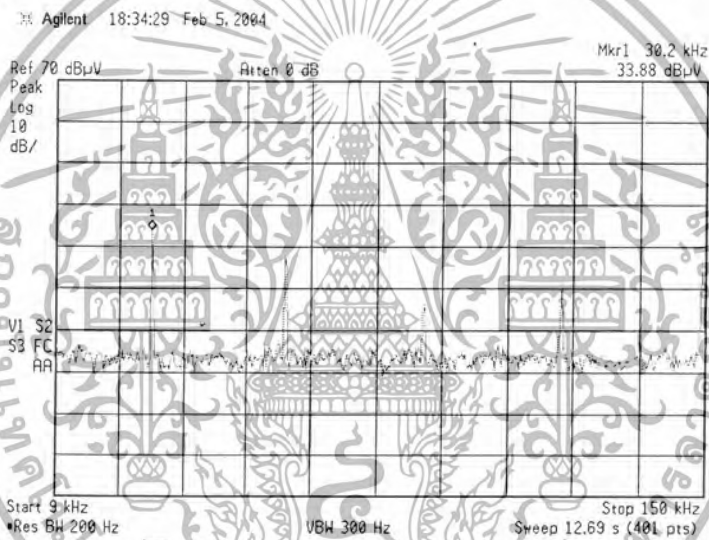


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

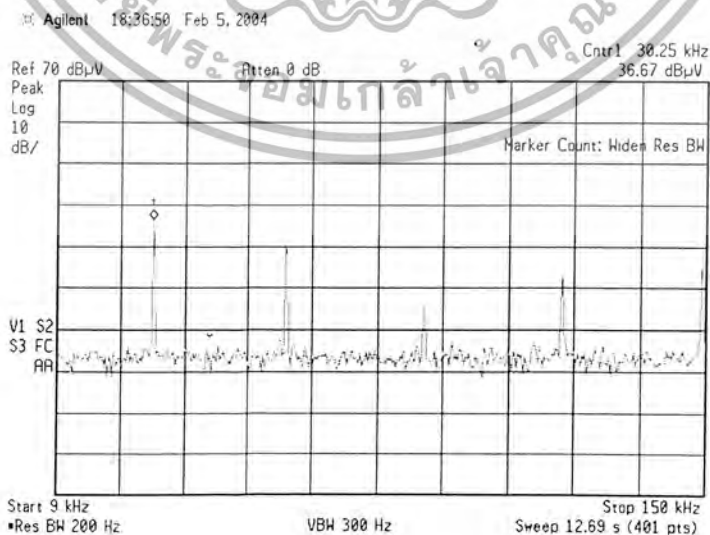
แนวแกน (X1, Y3.5)



แนวแกน (X1, Y4)

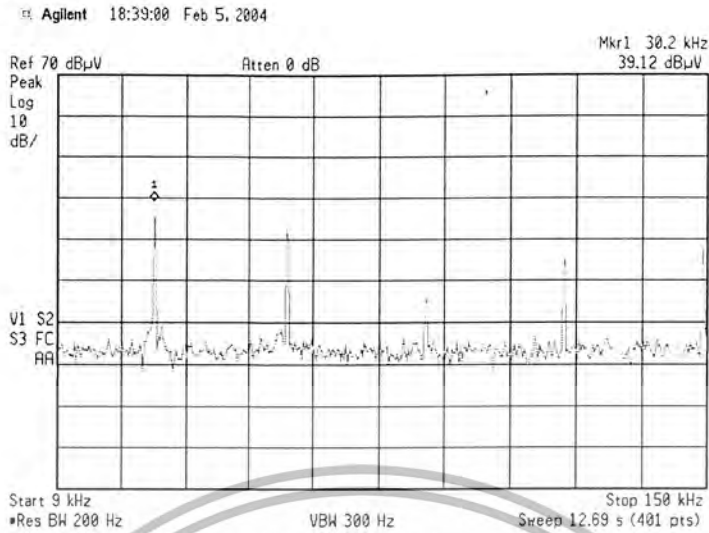


แนวแกน (X1, Y4.5)

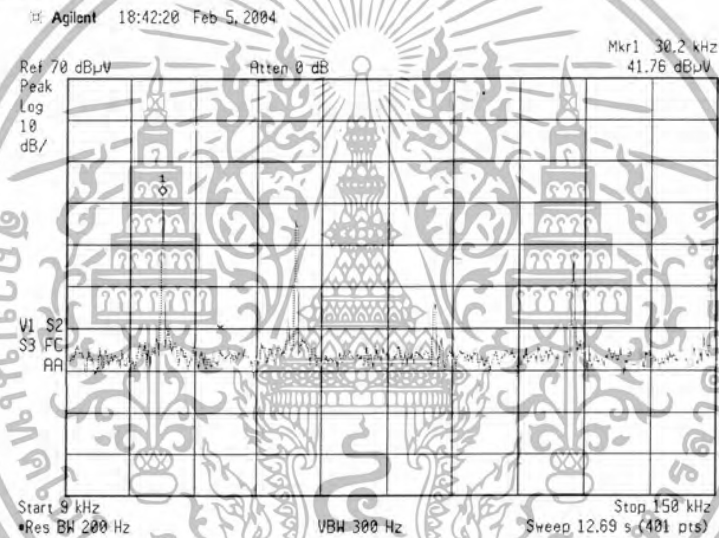


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

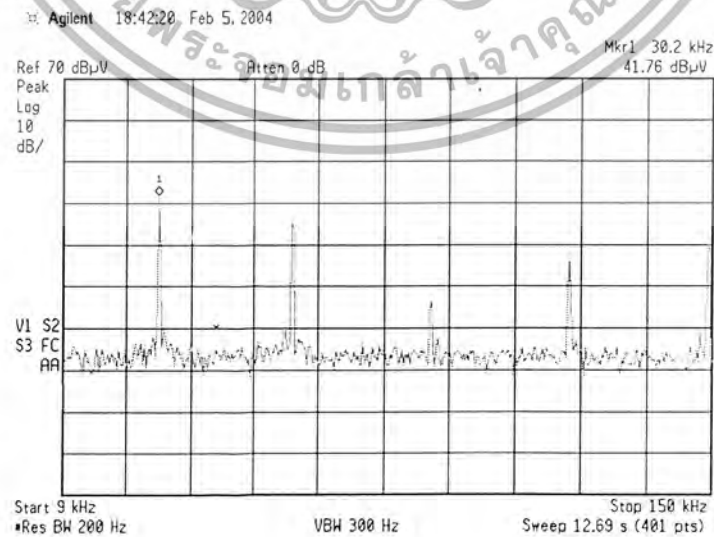
แนวแกน (X1, Y5)



แนวแกน (X1, Y5.5)

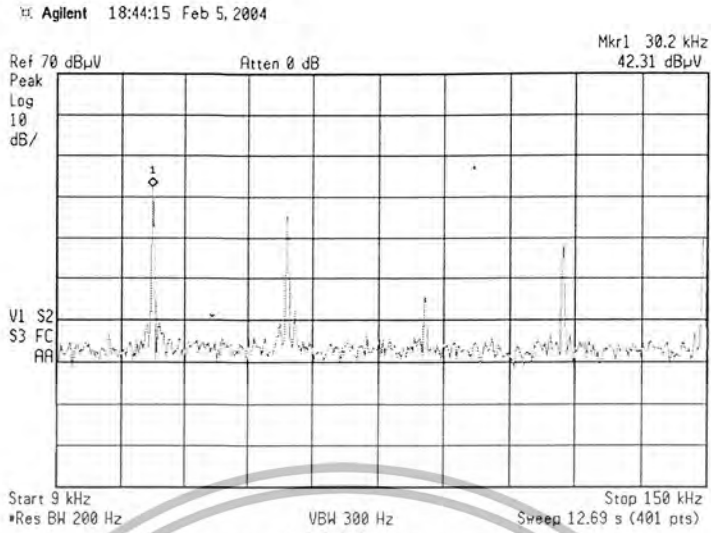


แนวแกน (X1, Y6)

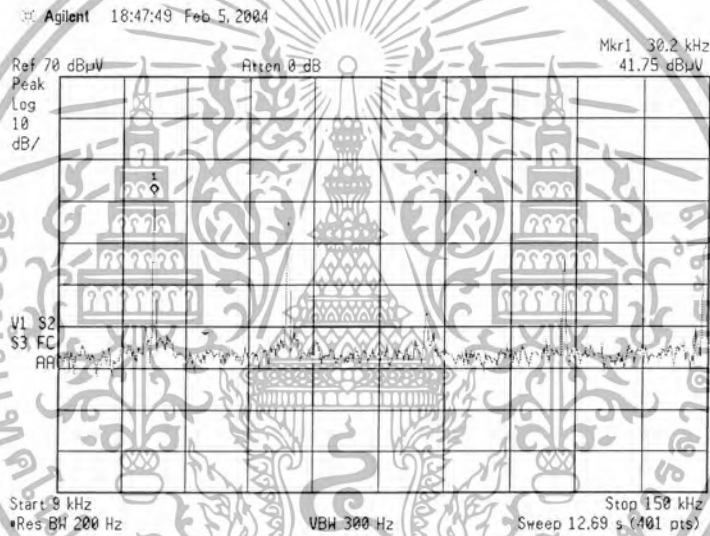


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวแกน (X1, Y6.5)

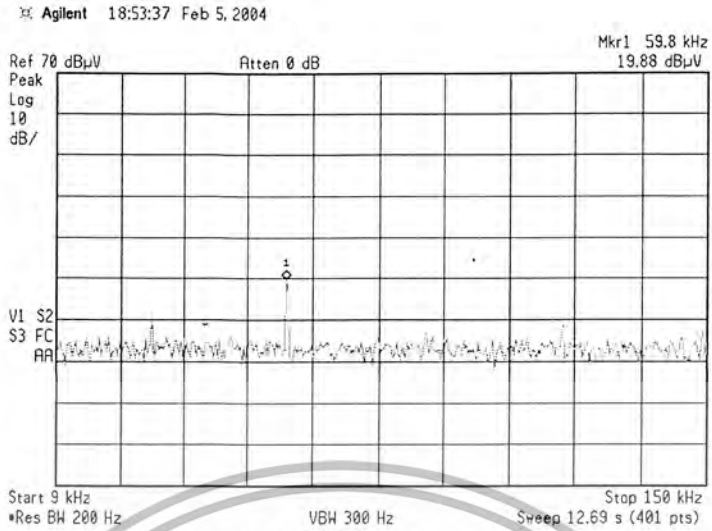


แนวแกน (X1, Y7)

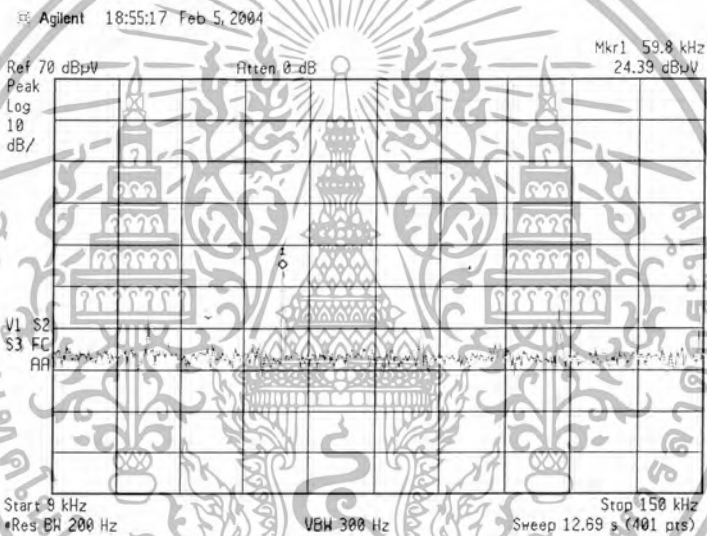


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

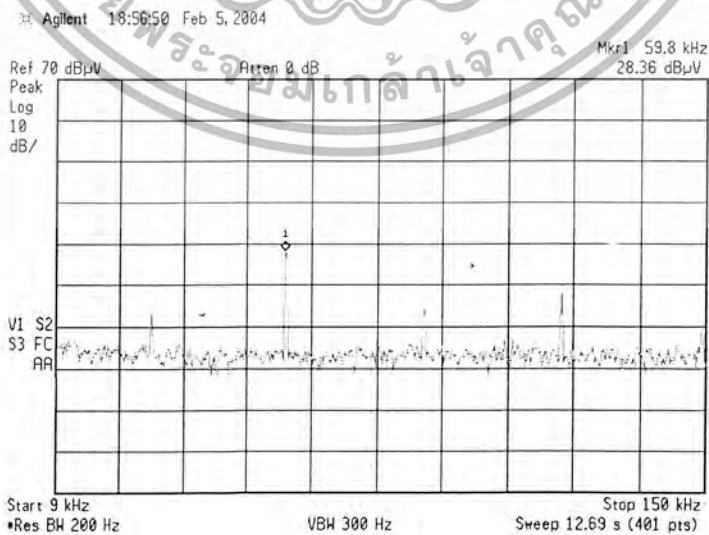
แนวแกน (X2, Y1)



แนวแกน (X2, Y2)

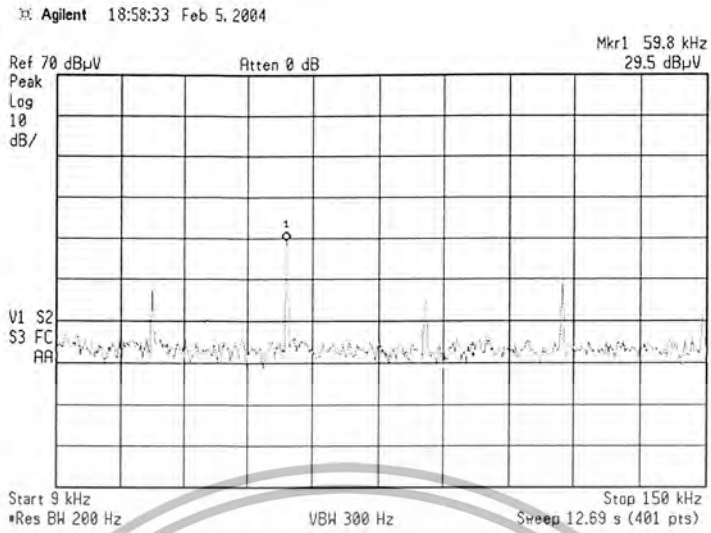


แนวแกน (X2, Y3)

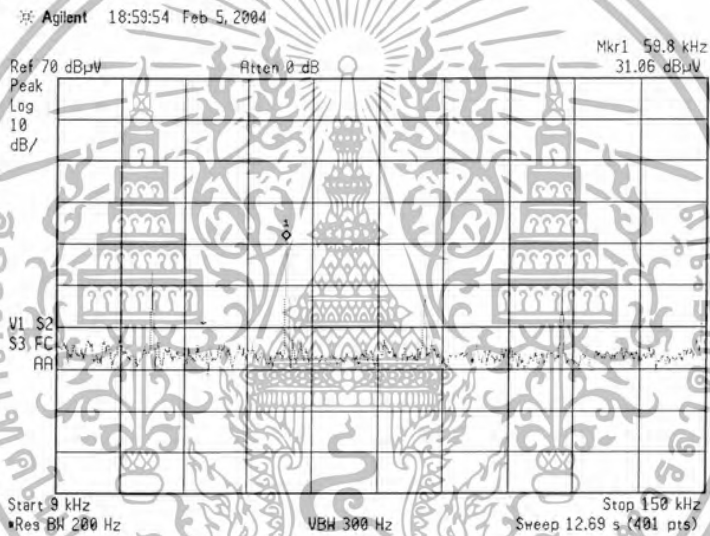


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

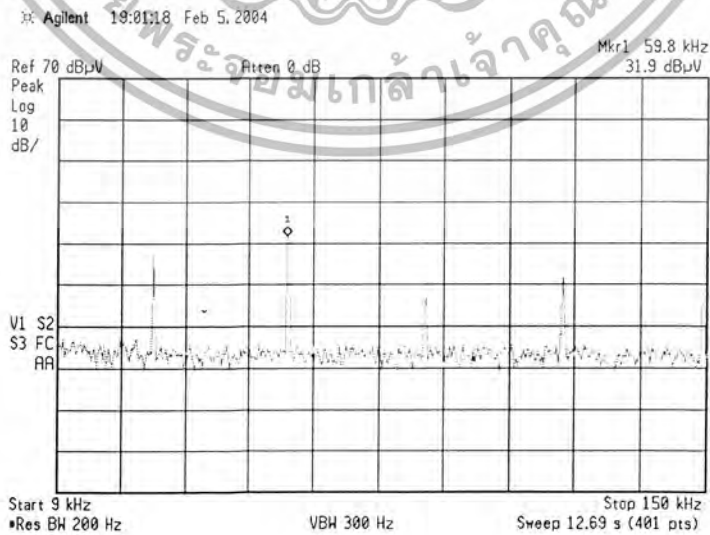
แนวแกน (X2, Y3.5)



แนวแกน (X2, Y4)

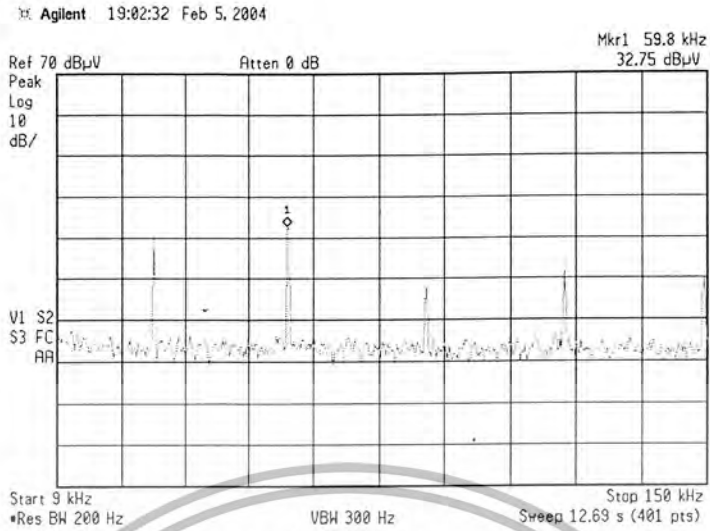


แนวแกน (X2, Y4.5)

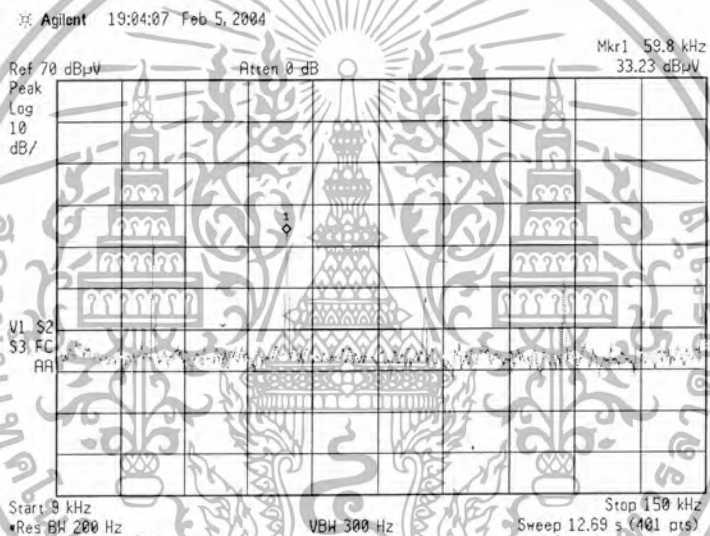


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

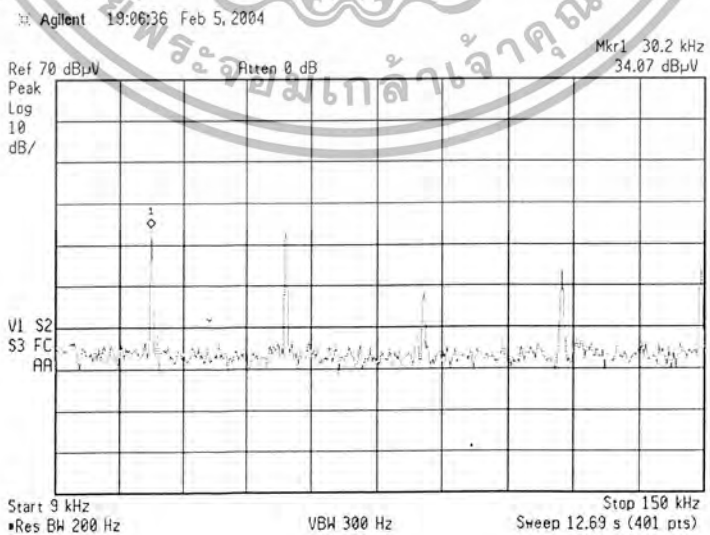
แนวแกน (X2, Y5)



แนวแกน (X2, Y5.5)

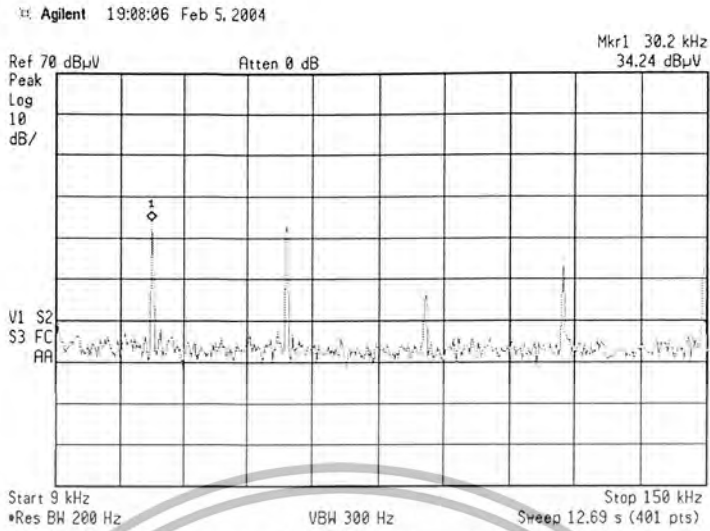


แนวแกน (X2, Y6)

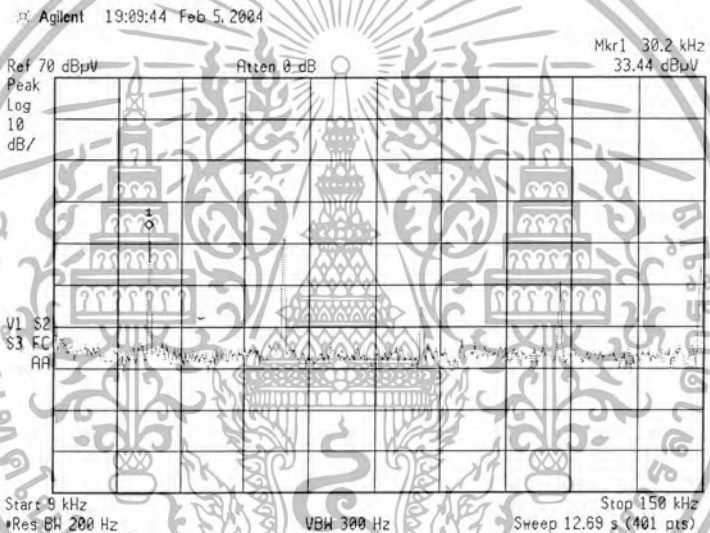


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวแกน (X2, Y6.5)

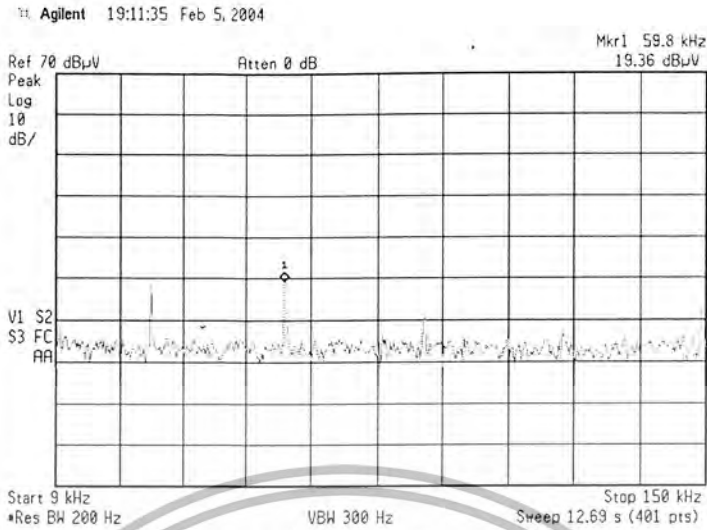


แนวแกน (X2, Y7)

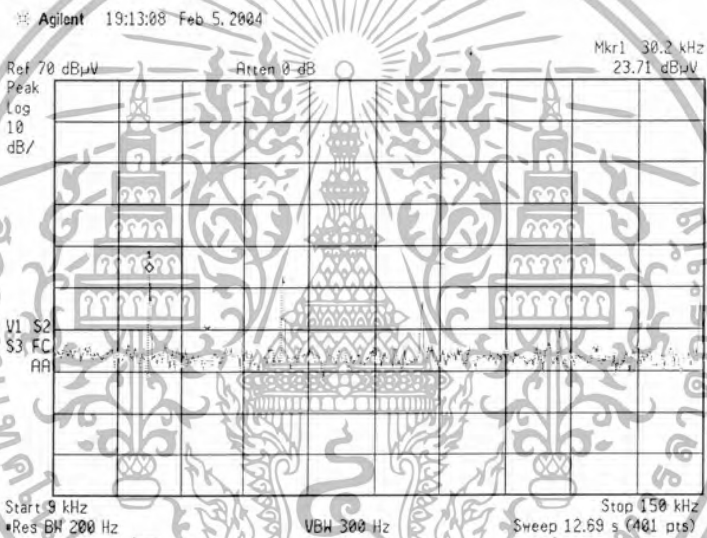


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

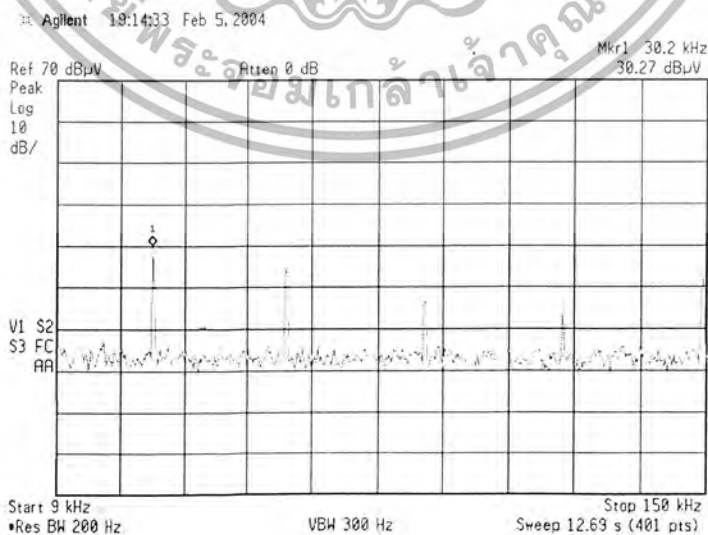
แนวแกน (X3, Y1)



แนวแกน (X3, Y2)

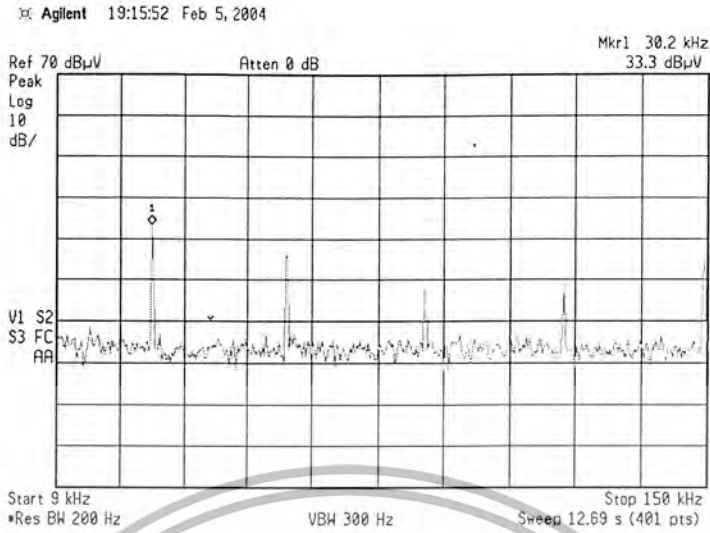


แนวแกน (X3, Y3)

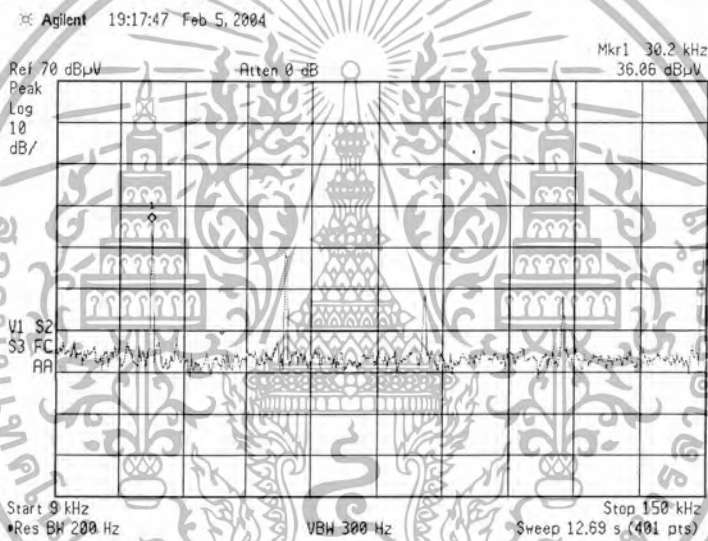


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

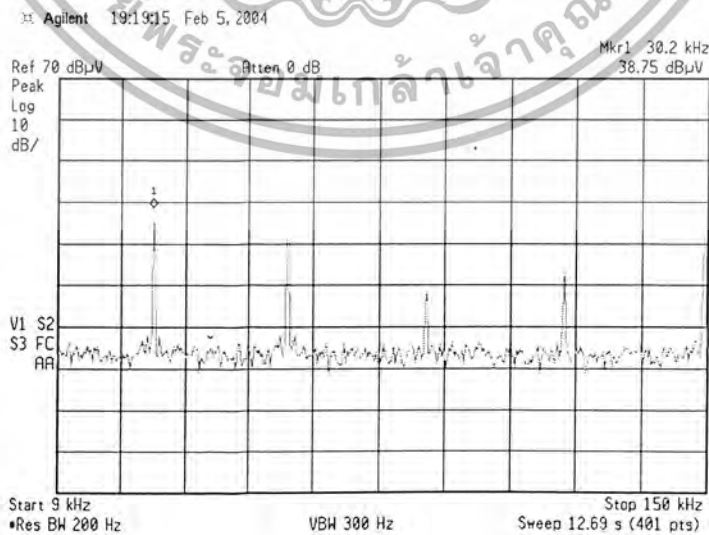
แนวแกน (X3, Y3.5)



แนวแกน (X3, Y4)

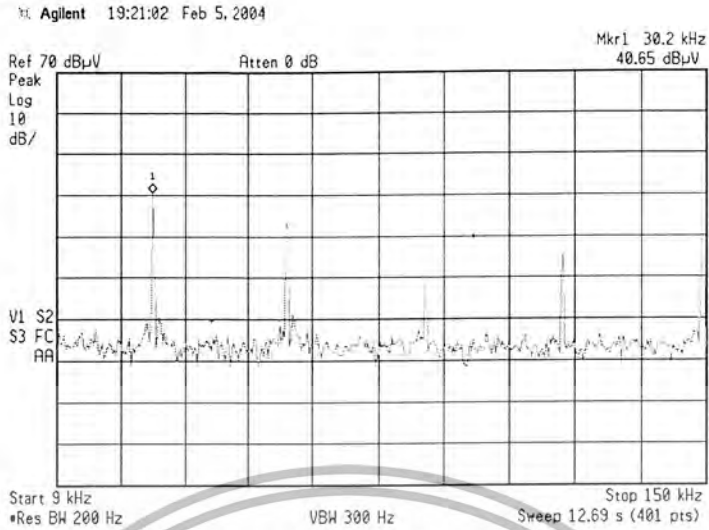


แนวแกน (X3, Y4.5)

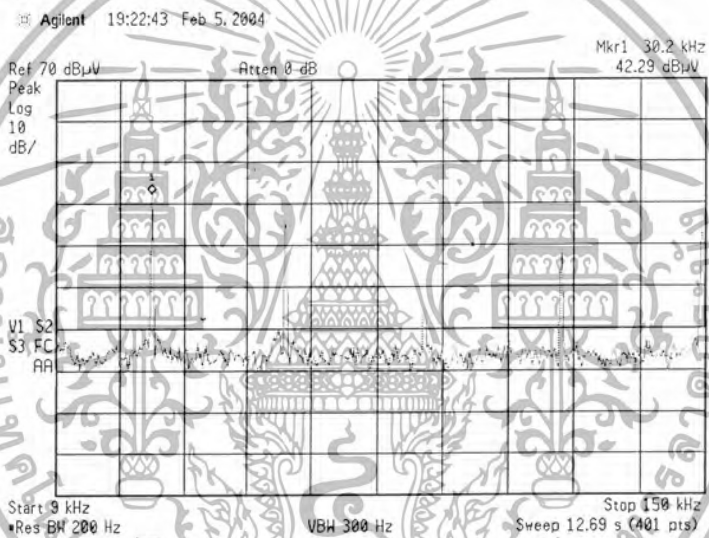


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

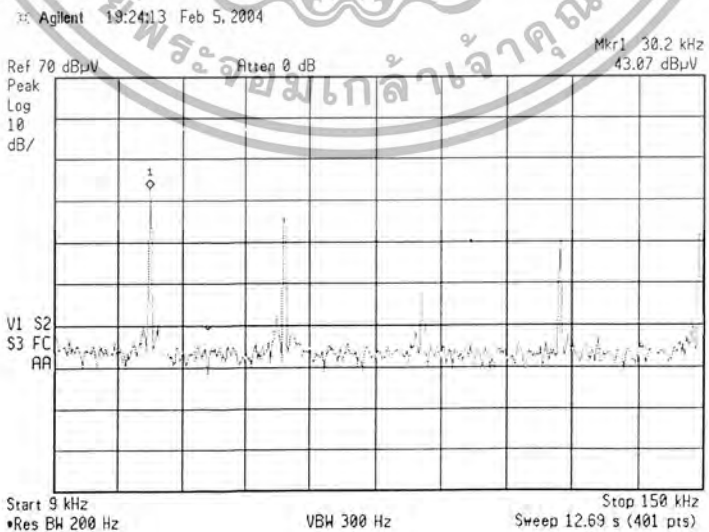
แนวแกน (X3, Y5)



แนวแกน (X3, Y5.5)



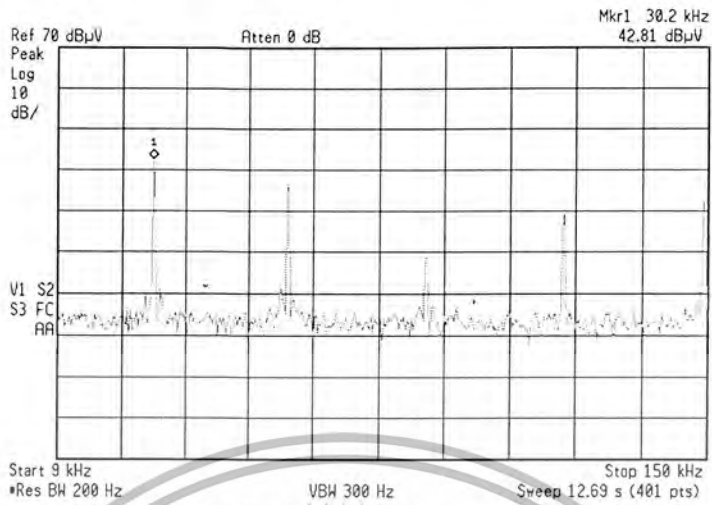
แนวแกน (X3, Y6)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

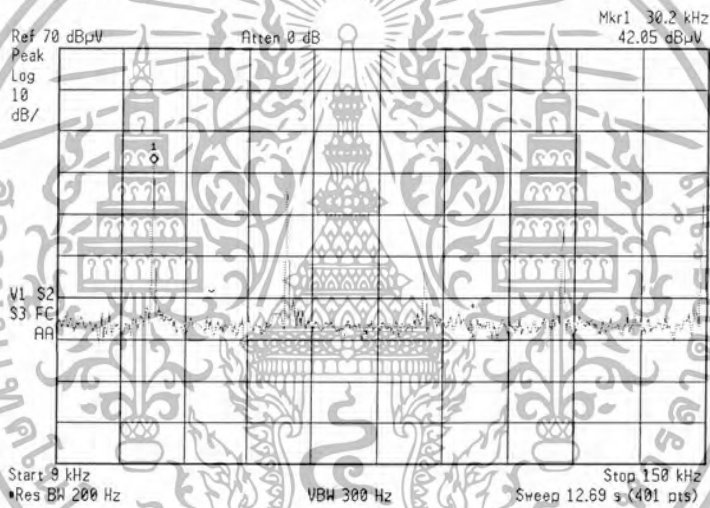
แนวแกน (X3, Y6.5)

Agilent 19:25:58 Feb 5, 2004



แนวแกน (X3, Y7)

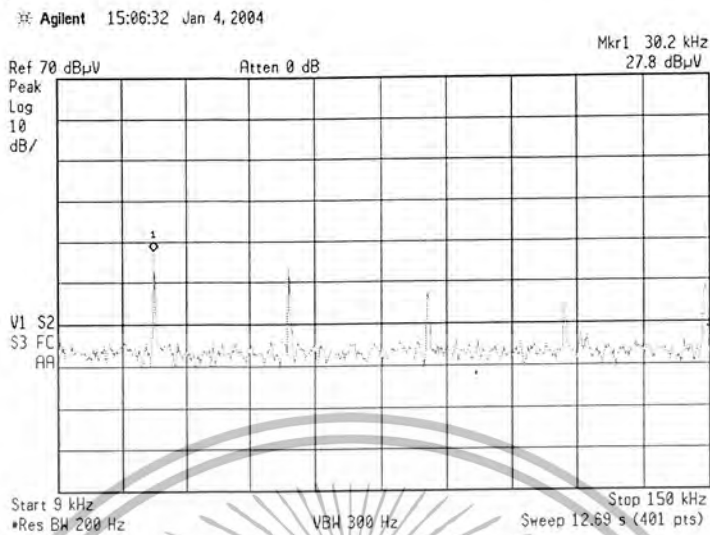
Agilent 19:27:30 Feb 5, 2004



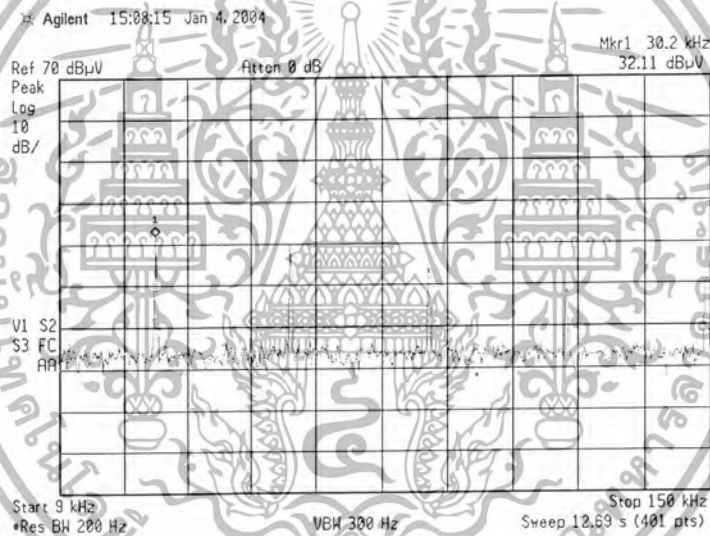
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปสัญญาณรบกวนแบบเปิดฝากรอบที่โหลด 147 W

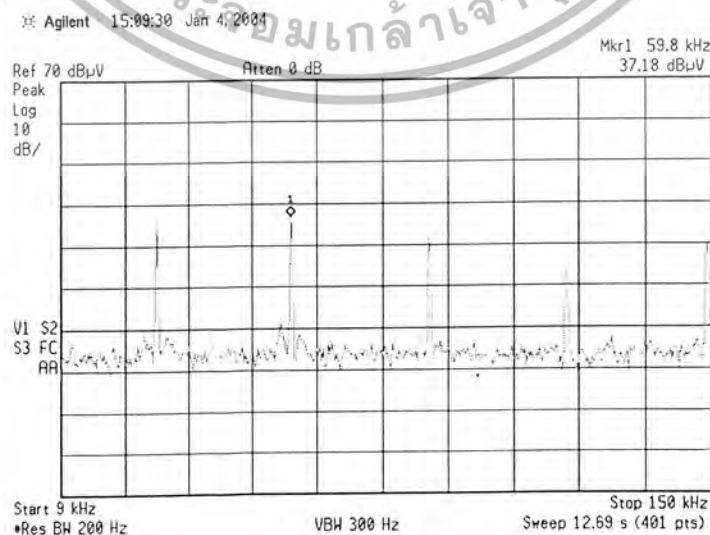
แนวแกน (X1, Y1)



แนวแกน (X1, Y2)

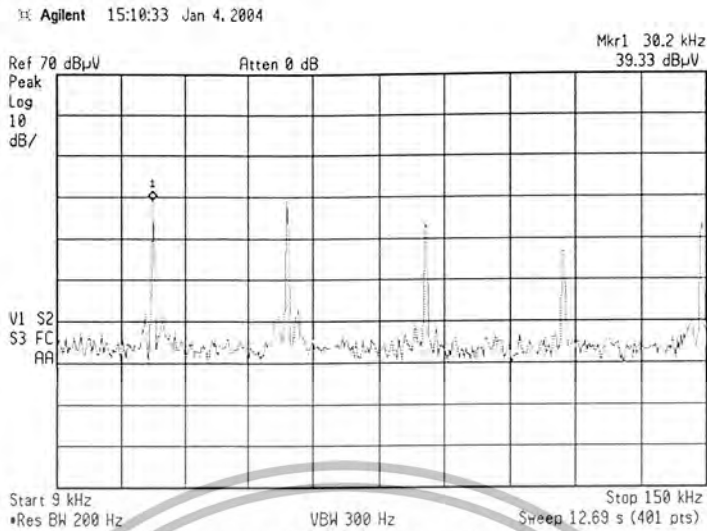


แนวแกน (X1, Y3)

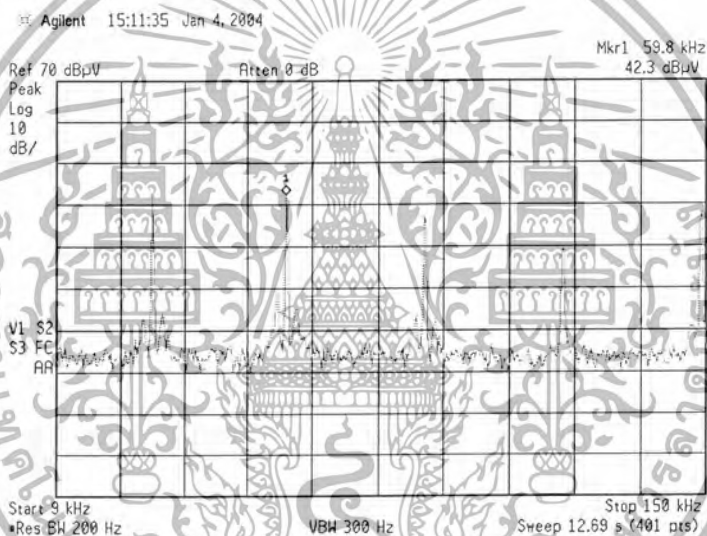


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

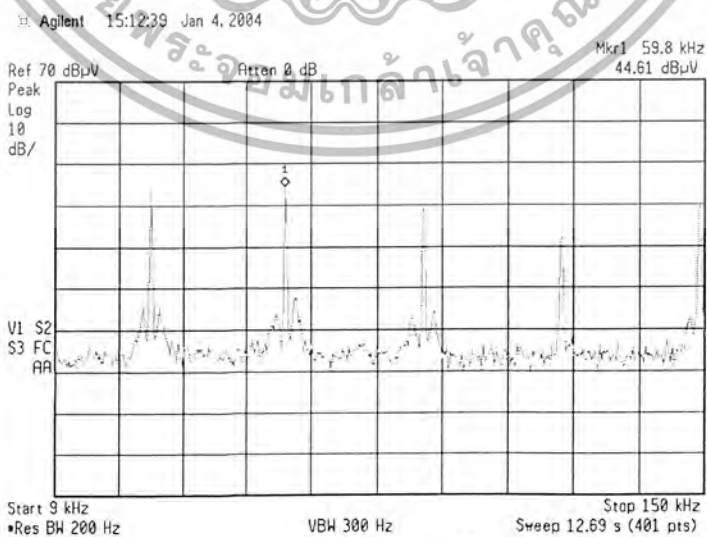
แนวแกน (X1, Y3.5)



แนวแกน (X1, Y4)

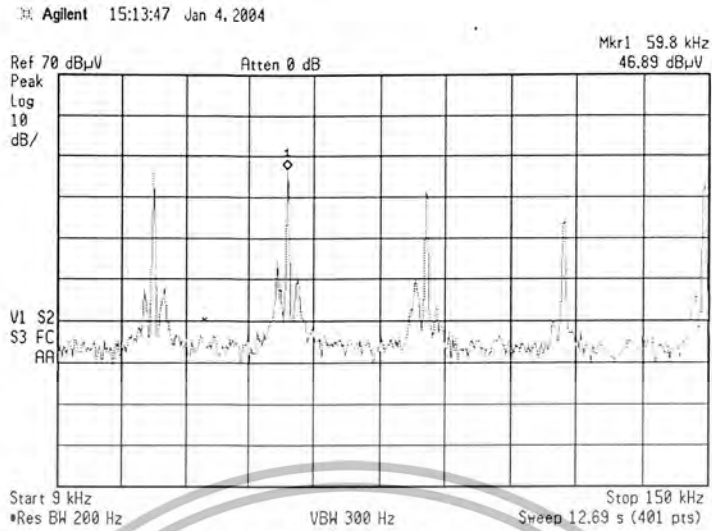


แนวแกน (X1, Y4.5)

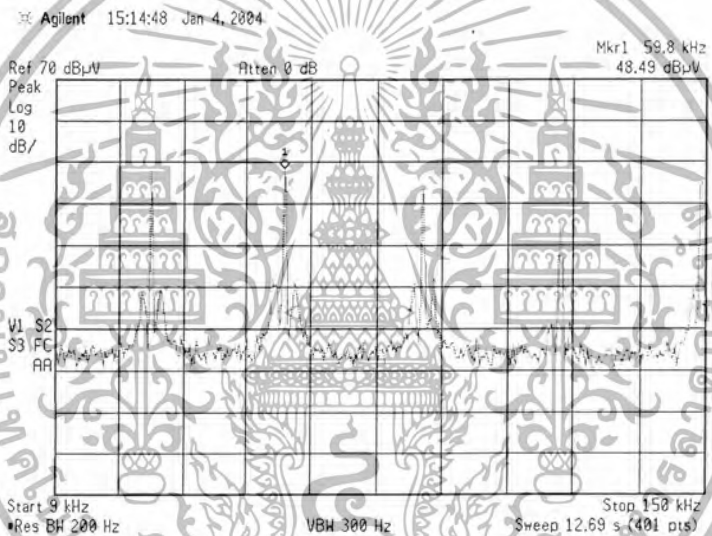


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

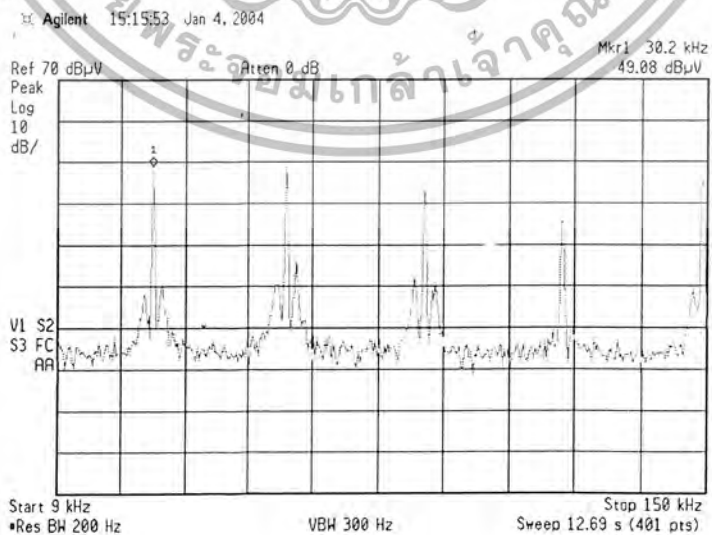
แนวแกน (X1, Y5)



แนวแกน (X1, Y5.5)

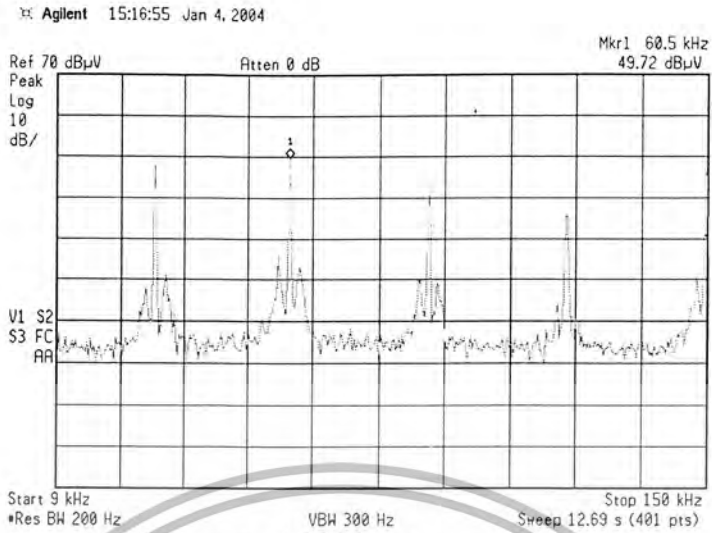


แนวแกน (X1, Y6)

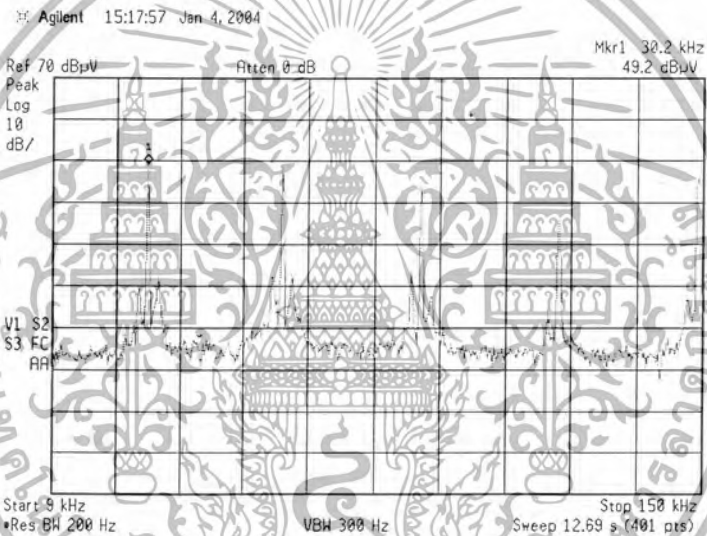


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวแกน (X1, Y6.5)

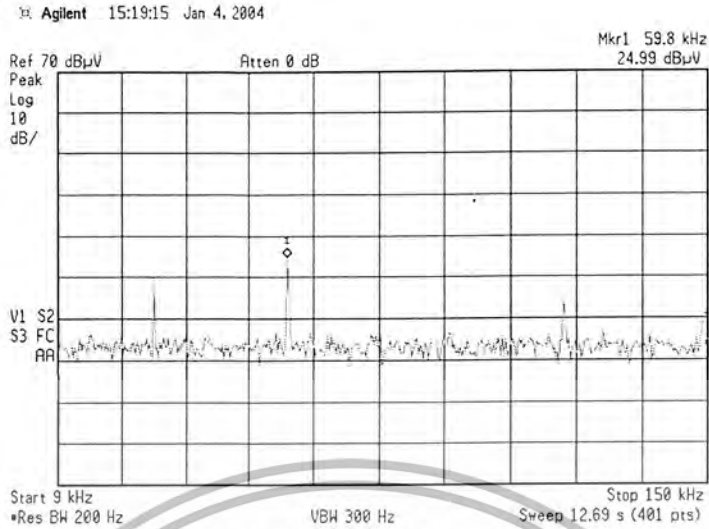


แนวแกน (X1, Y7)

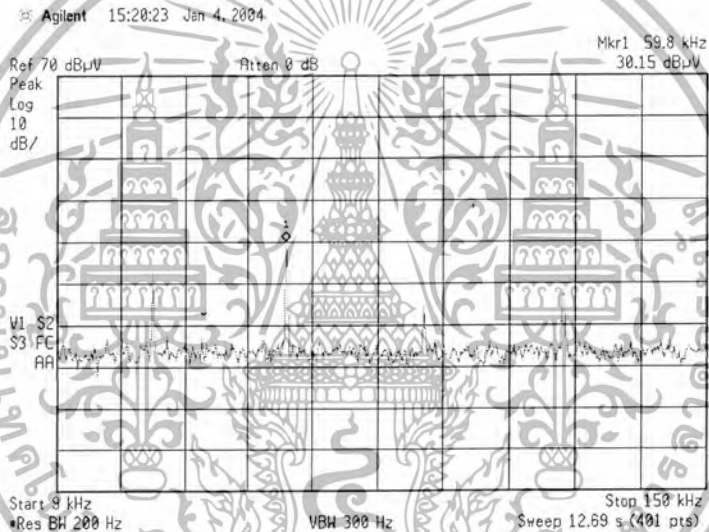


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

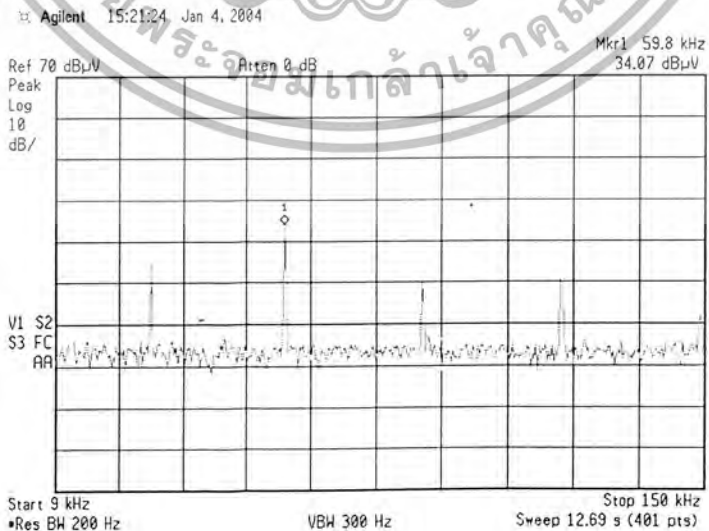
แนวแกน (X2, Y1)



แนวแกน (X2, Y2)

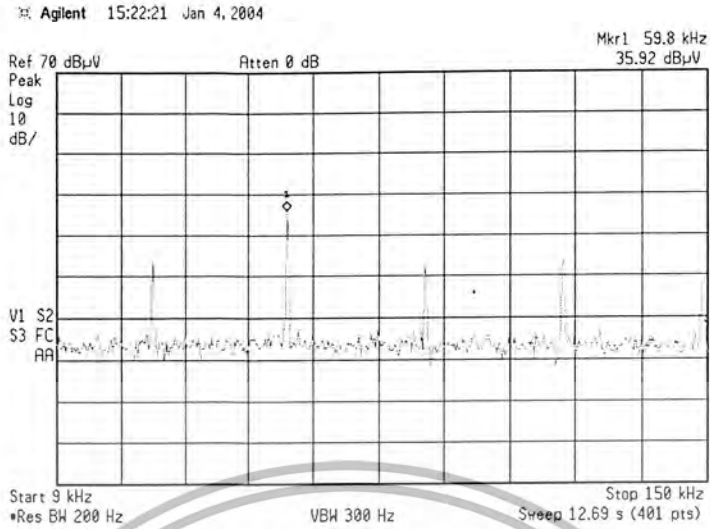


แนวแกน (X2, Y3)

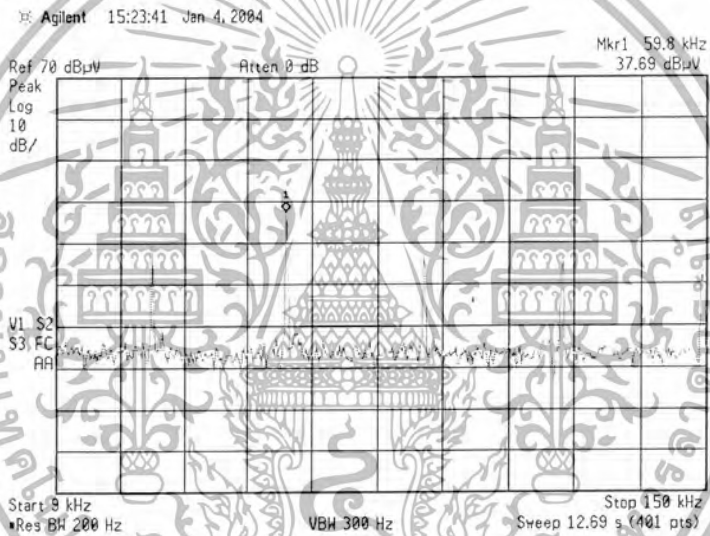


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

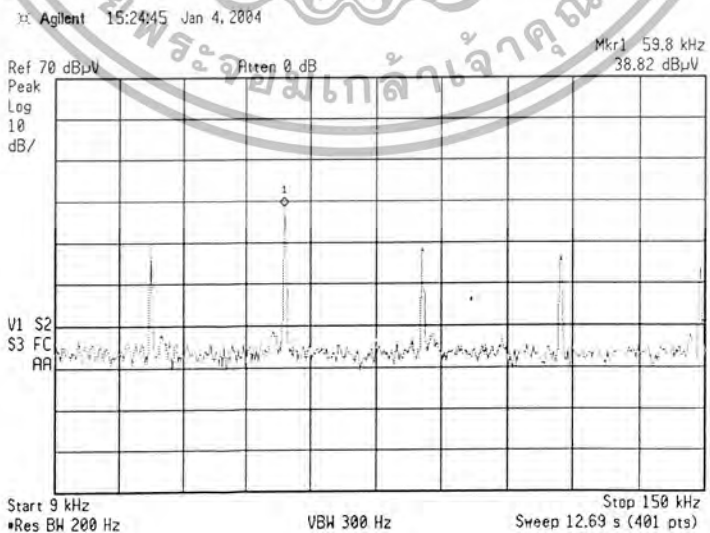
แนวแกน (X2, Y3.5)



แนวแกน (X2, Y4)

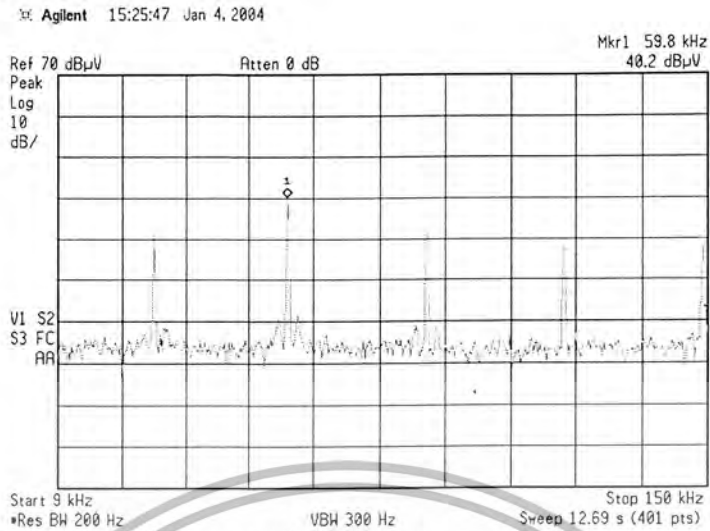


แนวแกน (X2, Y4.5)

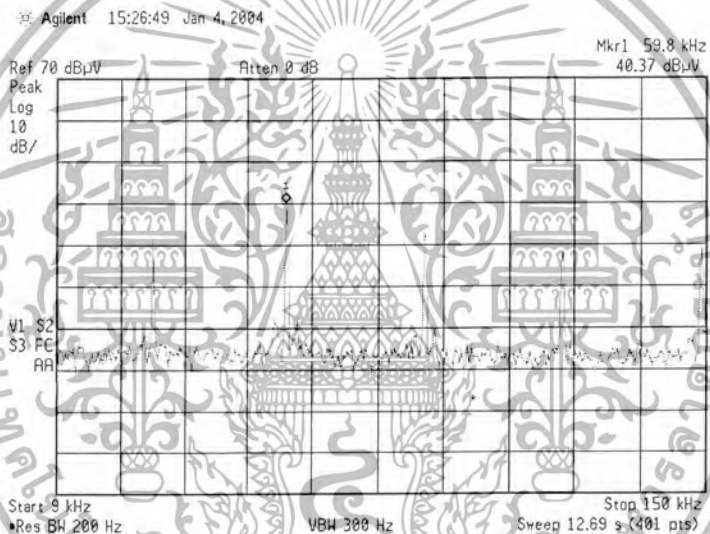


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

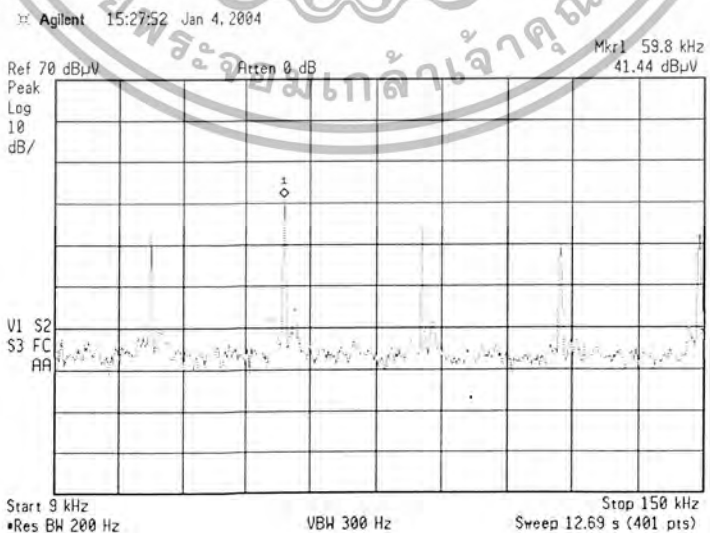
แนวแกน (X2, Y5)



แนวแกน (X2, Y5.5)

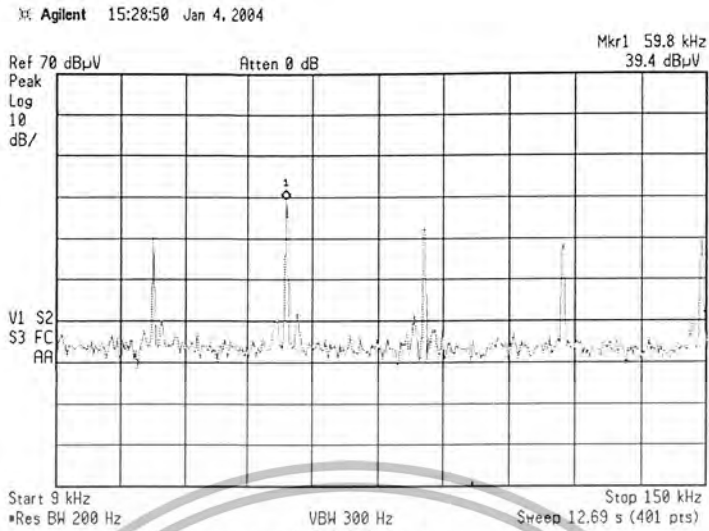


แนวแกน (X2, Y6)

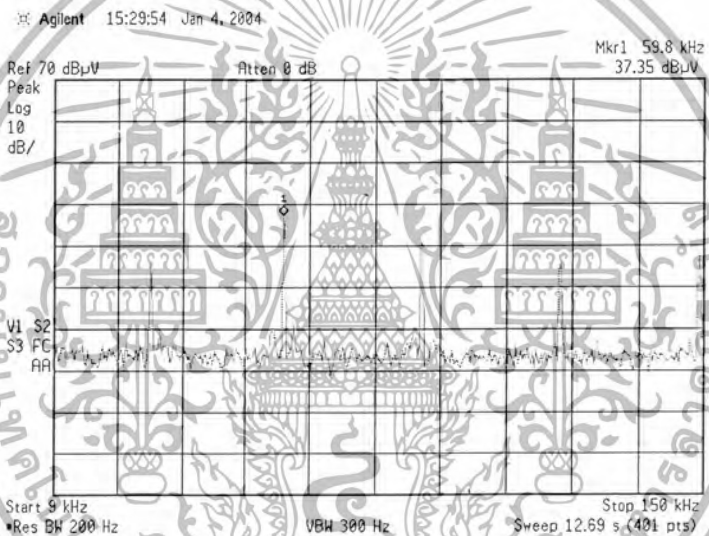


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวแกน (X2, Y6.5)

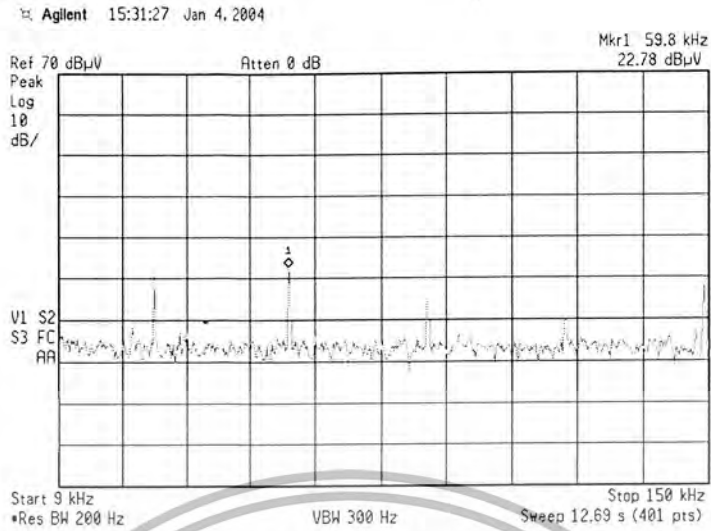


แนวแกน (X2, Y7)

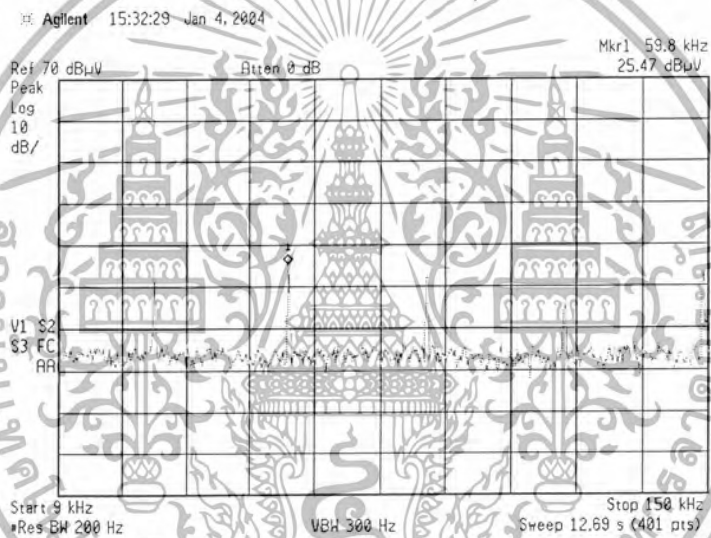


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

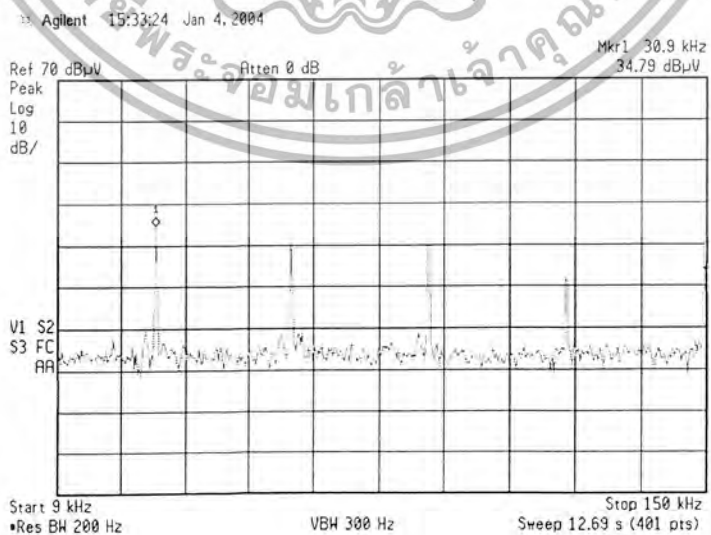
แนวแกน (X3, Y1)



แนวแกน (X3, Y2)

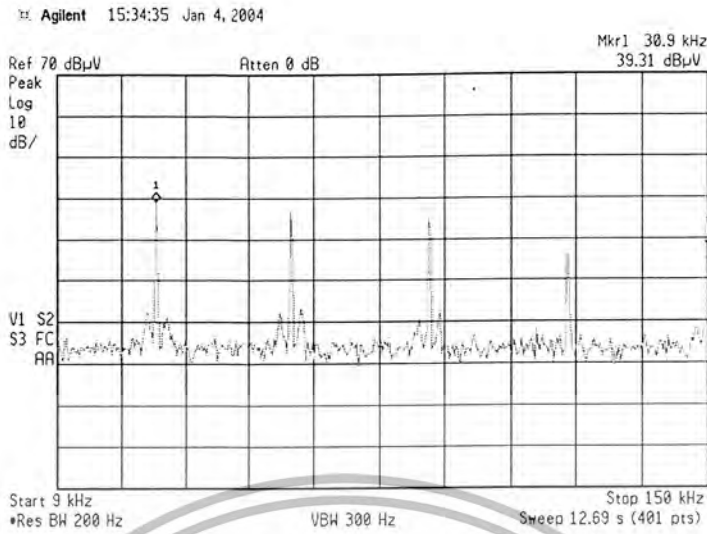


แนวแกน (X3, Y3)

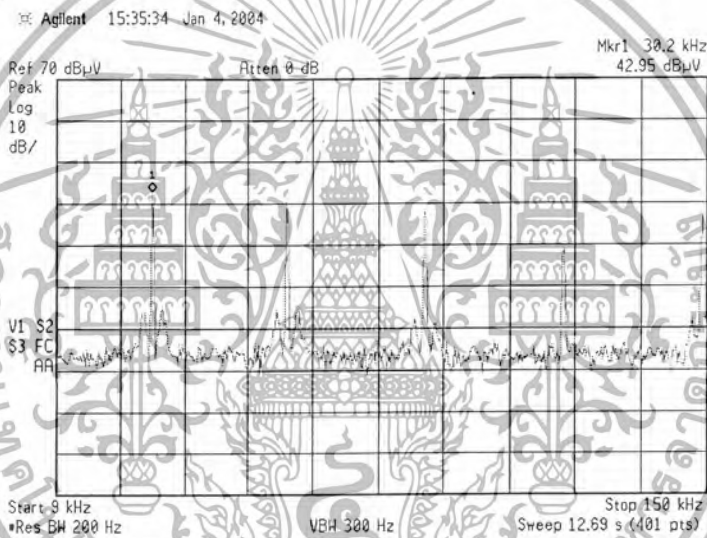


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

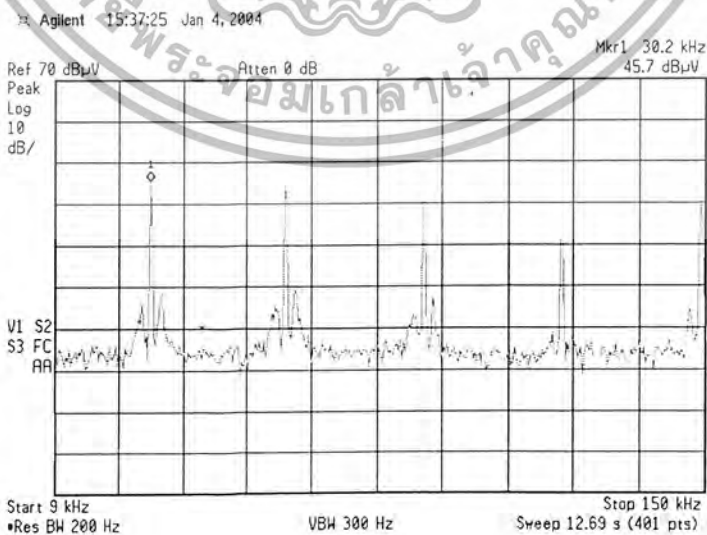
แนวแกน (X3, Y3.5)



แนวแกน (X3, Y4)

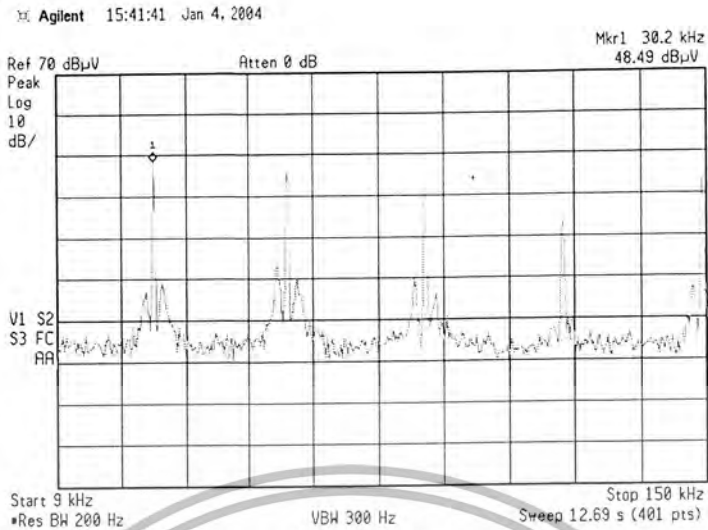


แนวแกน (X3, Y4.5)

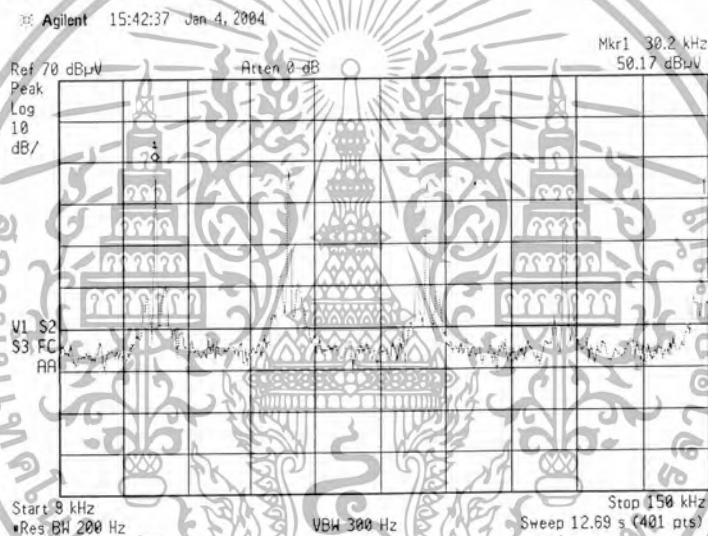


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

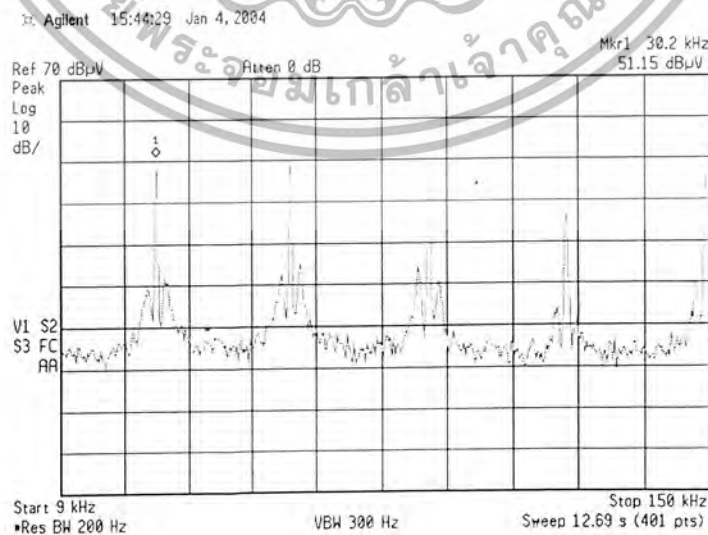
แนวแกน (X3, Y5)



แนวแกน (X3, Y5.5)

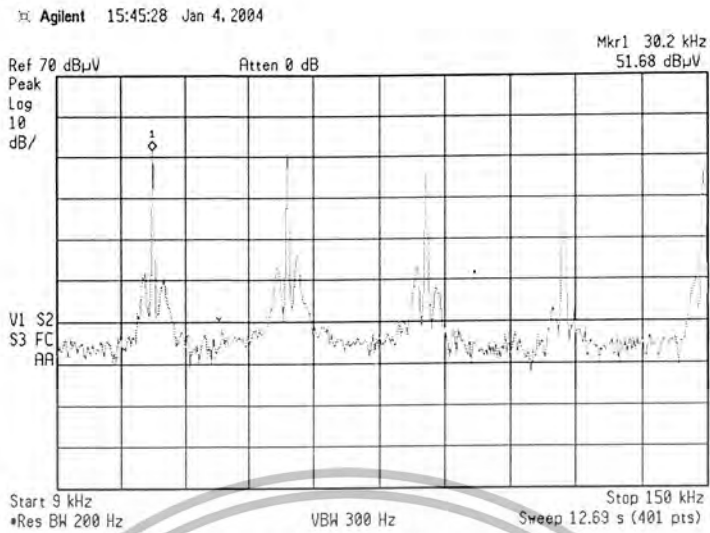


แนวแกน (X3, Y6)

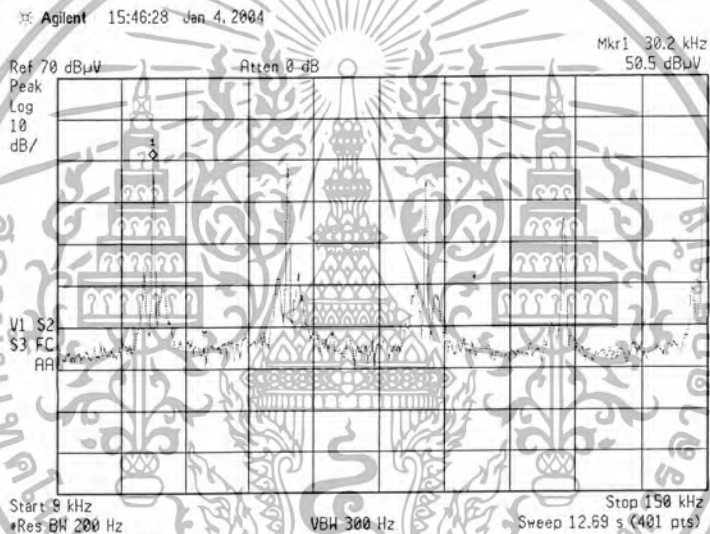


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวแกน (X3, Y6.5)



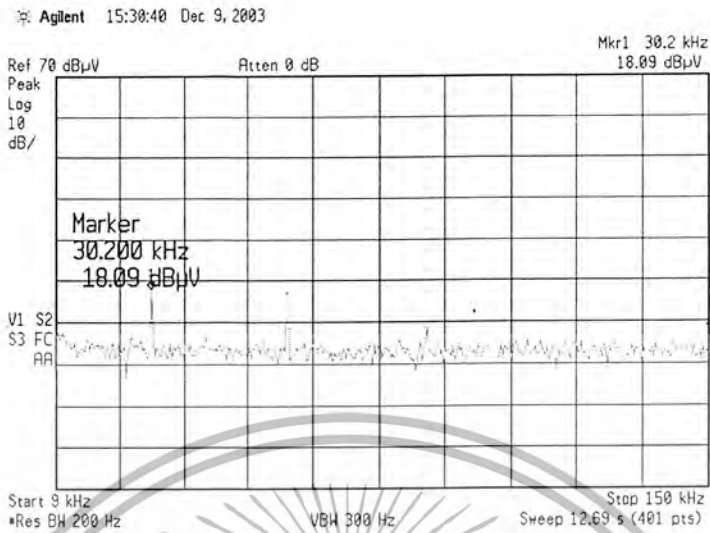
แนวแกน (X3, Y7)



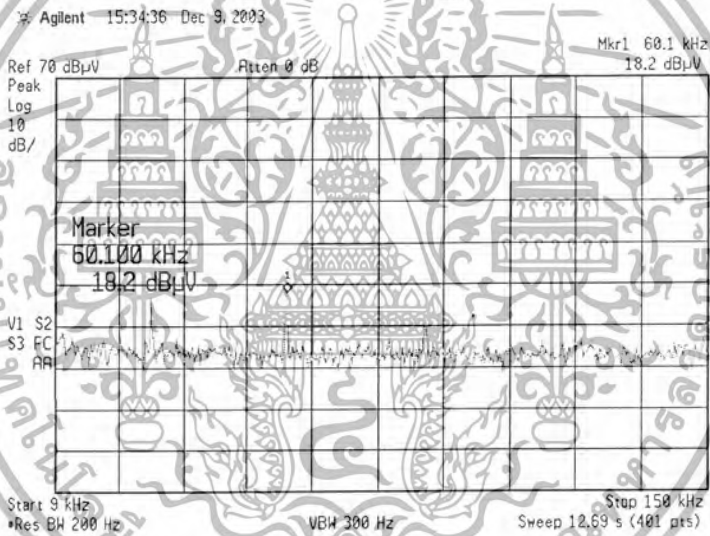
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปสัญญาณรบกวนแบบปิดฝาครอบที่โหลด 147 W

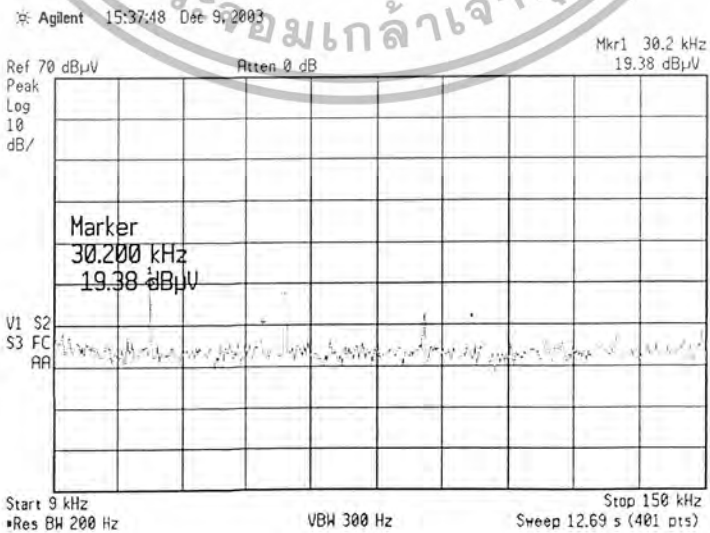
แนวแกน(X1, Y1)



แนวแกน(X1, Y2)

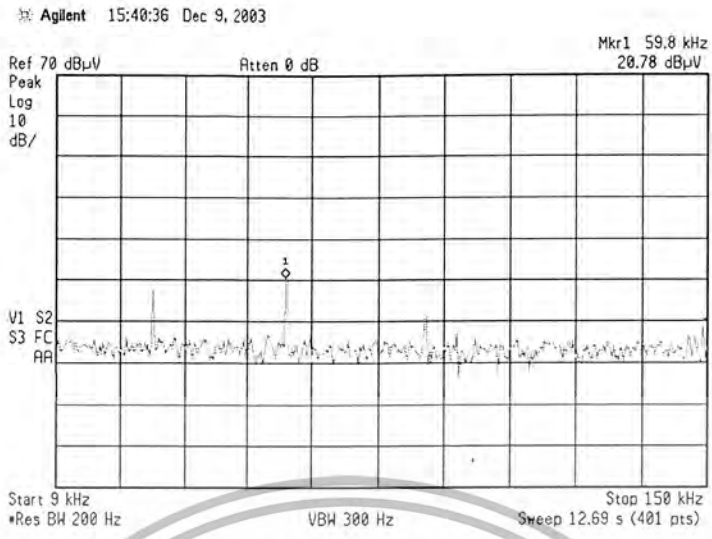


แนวแกน(X1, Y3)

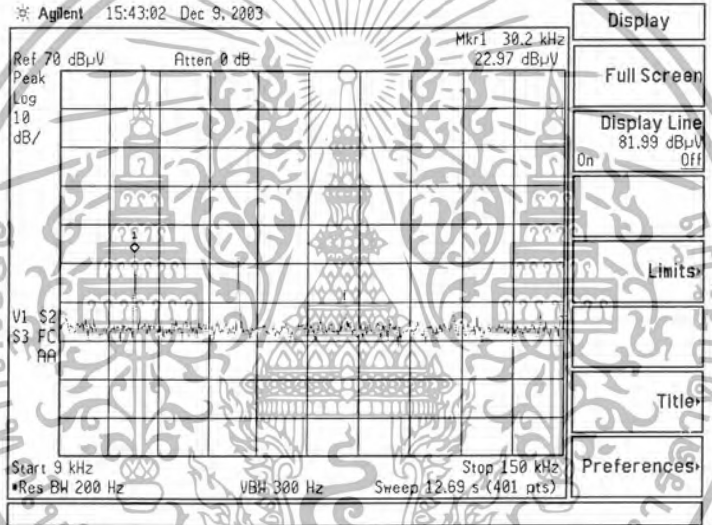


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

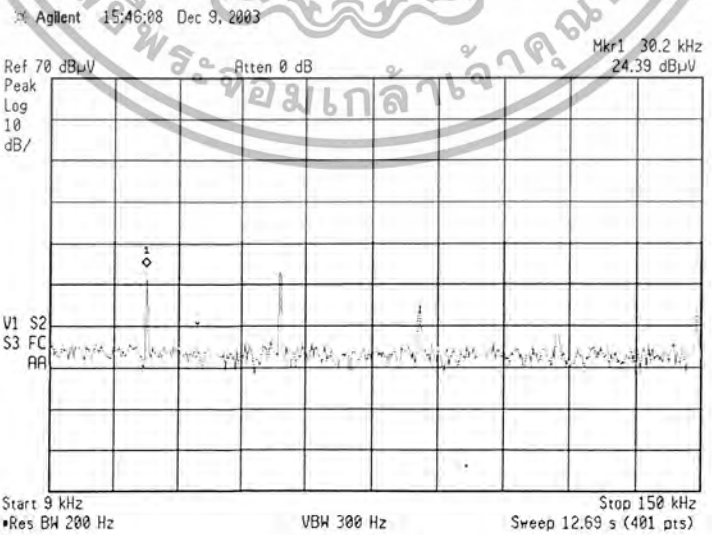
แนวแกน(X1, Y3.5)



แนวแกน(X1, Y4)

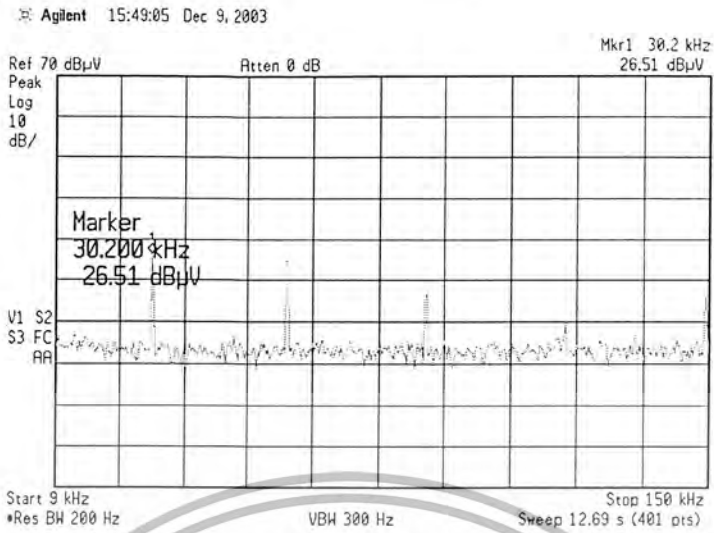


แนวแกน(X1, Y4.5)

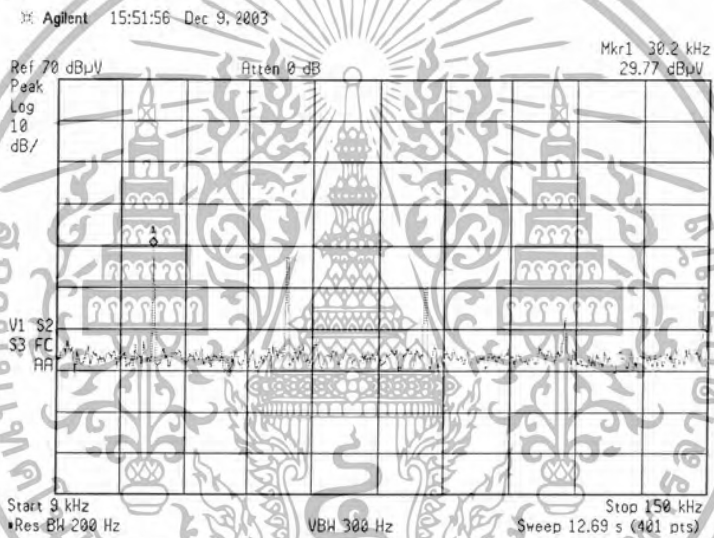


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

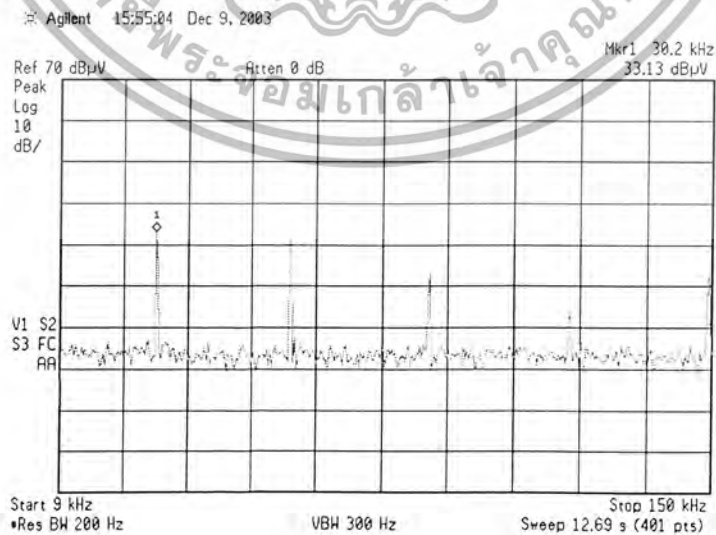
แนวแกน(X1, Y5)



แนวแกน(X1, Y5.5)

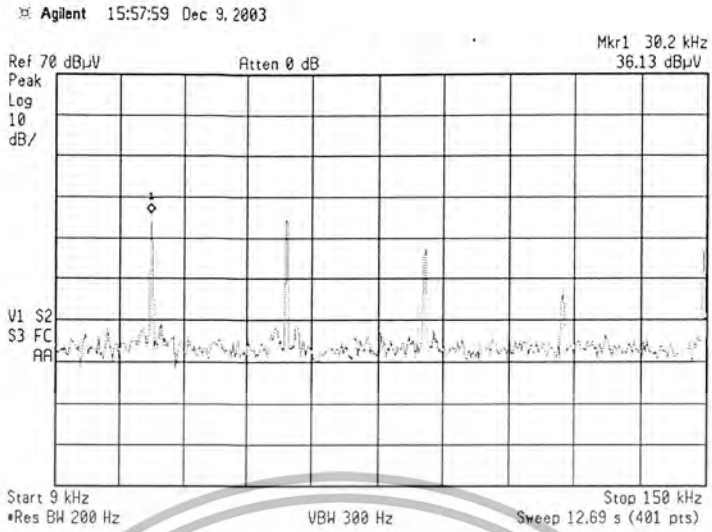


แนวแกน(X1, Y6)

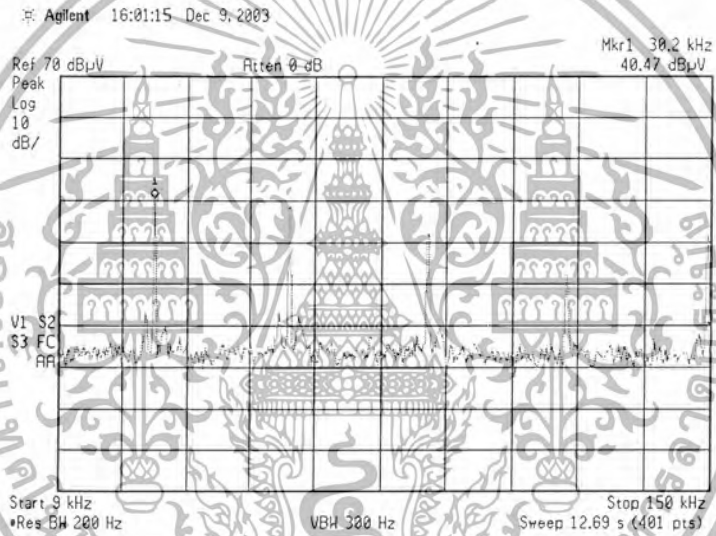


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวแกน(X1, Y6.5)

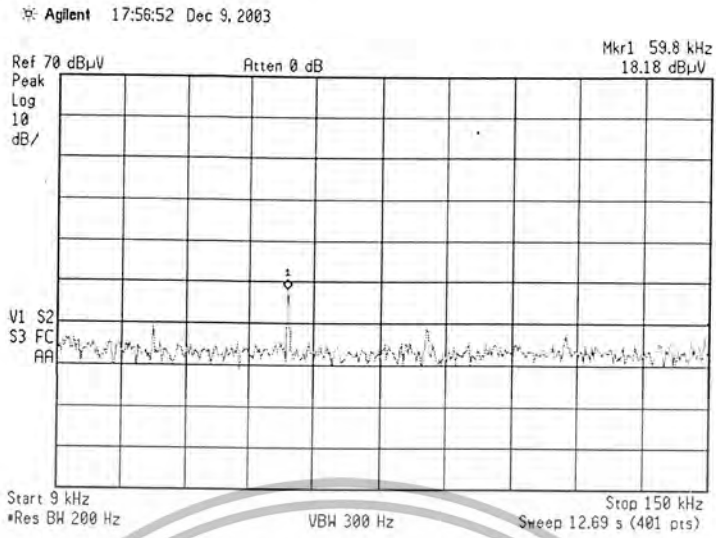


แนวแกน(X1, Y7)

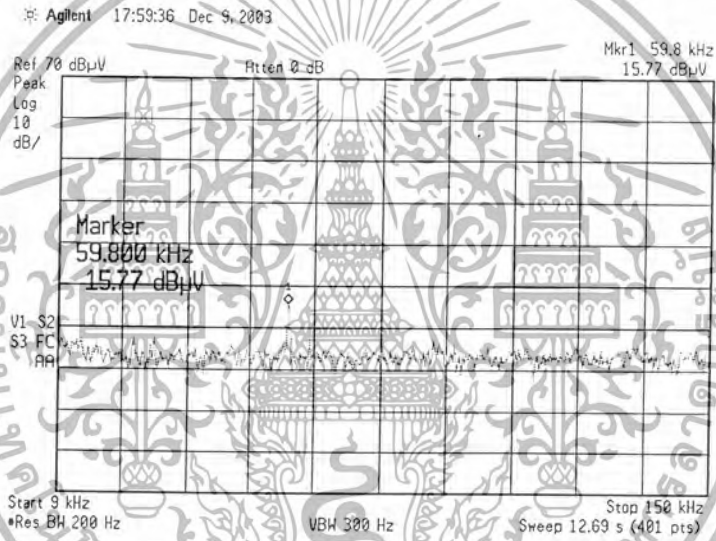


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

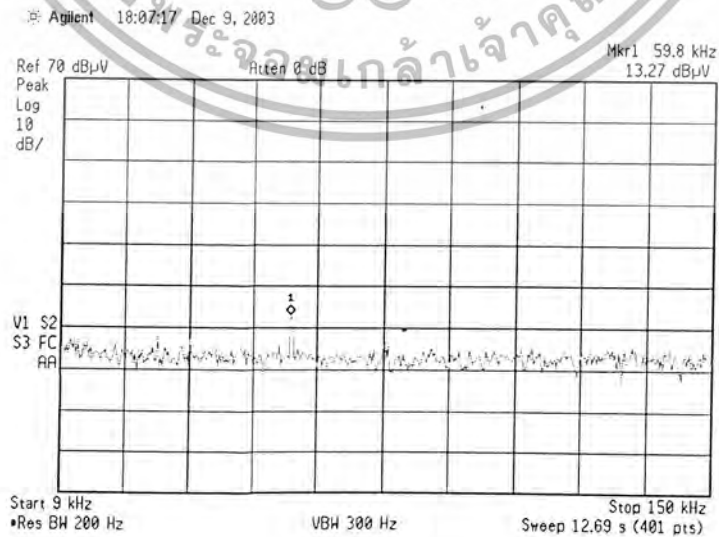
แนวแกน(X2, Yi)



แนวแกน(X2, Y2)

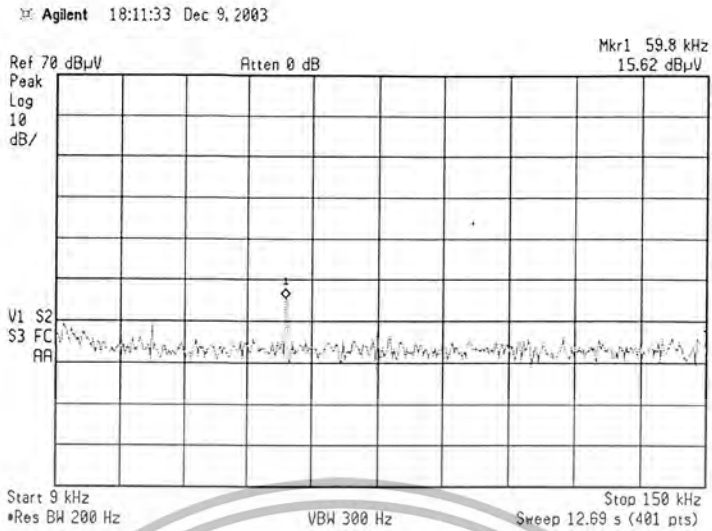


แนวแกน (X2, Y3)

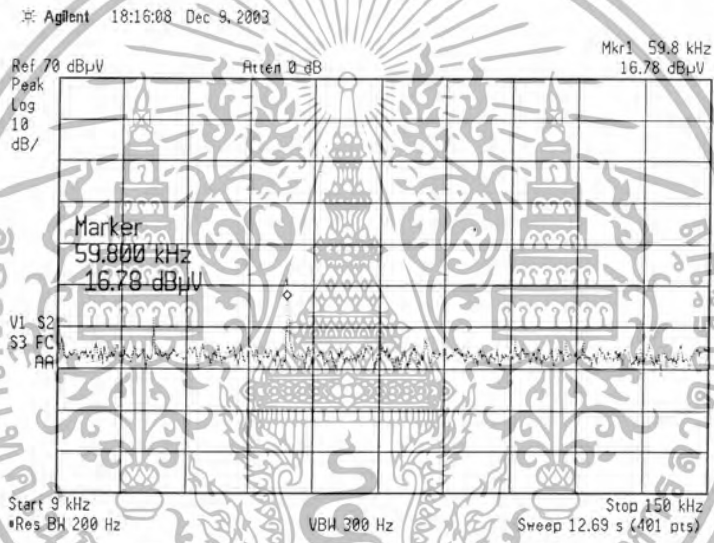


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

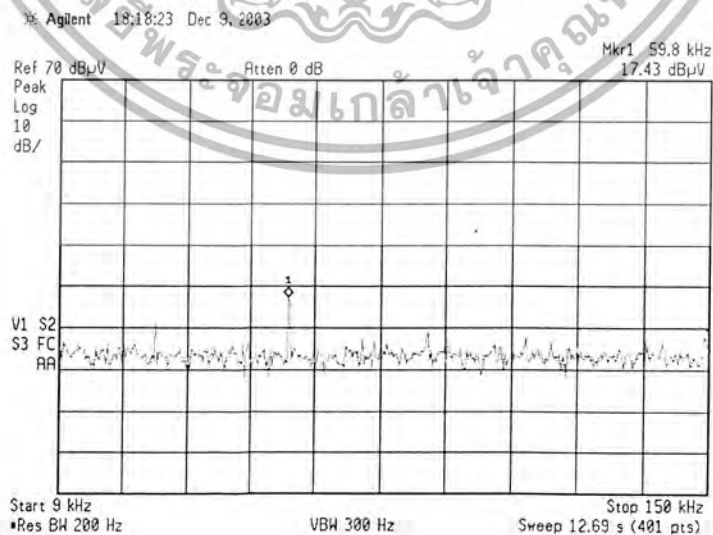
แนวแกน (X2, Y3.5)



แนวแกน (X2, Y4)

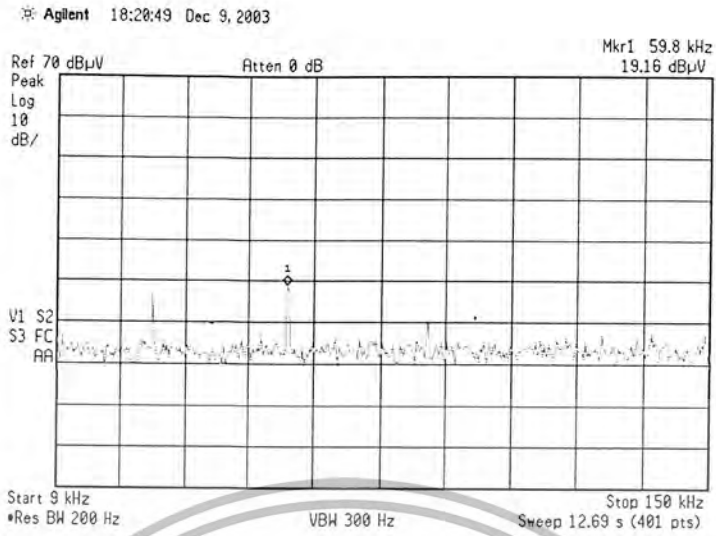


แนวแกน (X2, Y4.5)

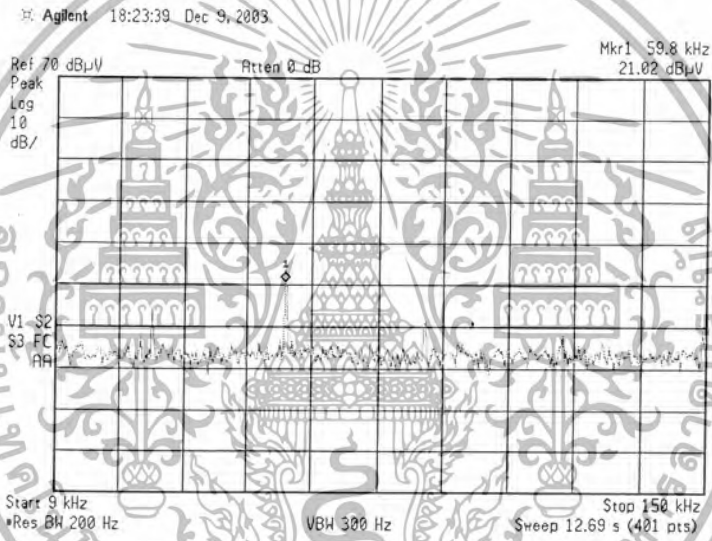


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

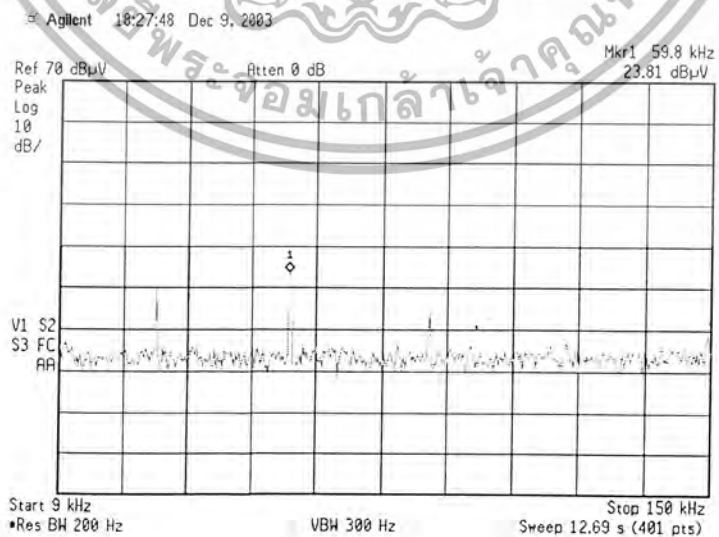
แนวแกน (X2, Y5)



แนวแกน (X2, Y5.5)

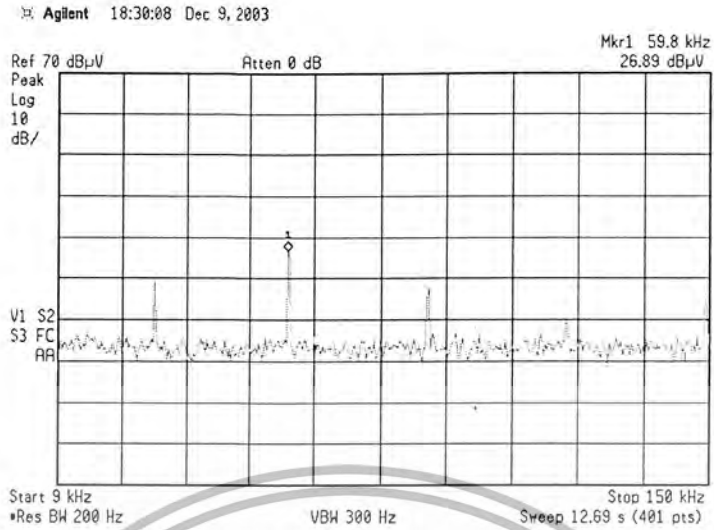


แนวแกน (X2, Y6)

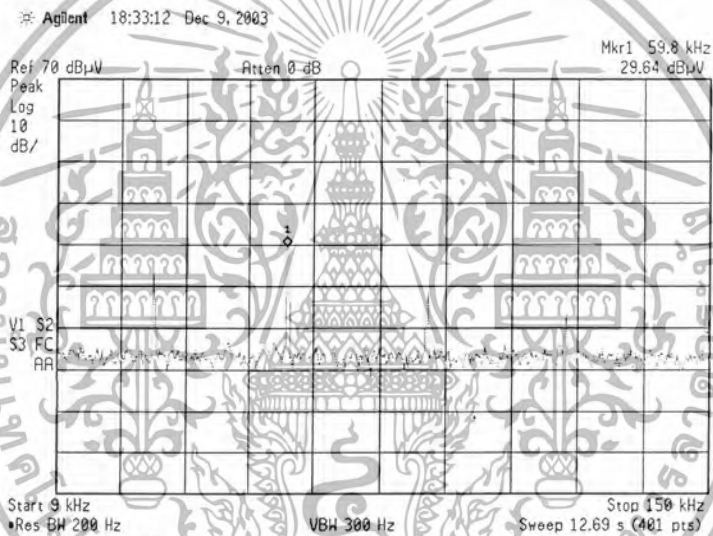


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวแกน (X2, Y6.5)

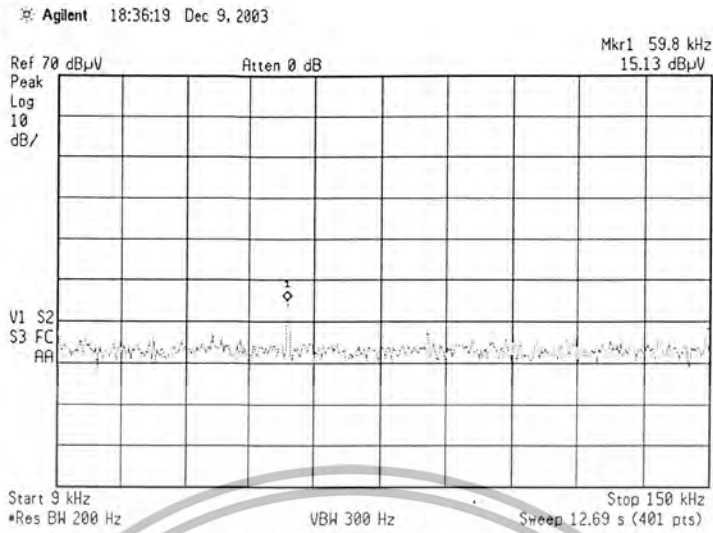


แนวแกน (X2, Y7)

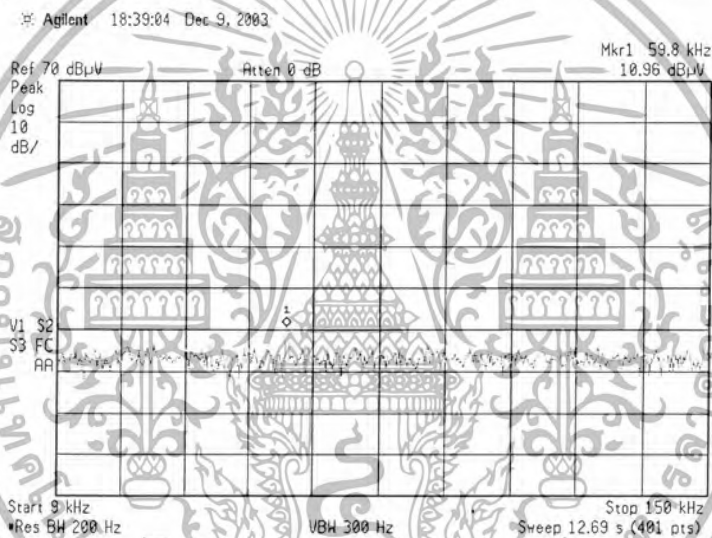


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

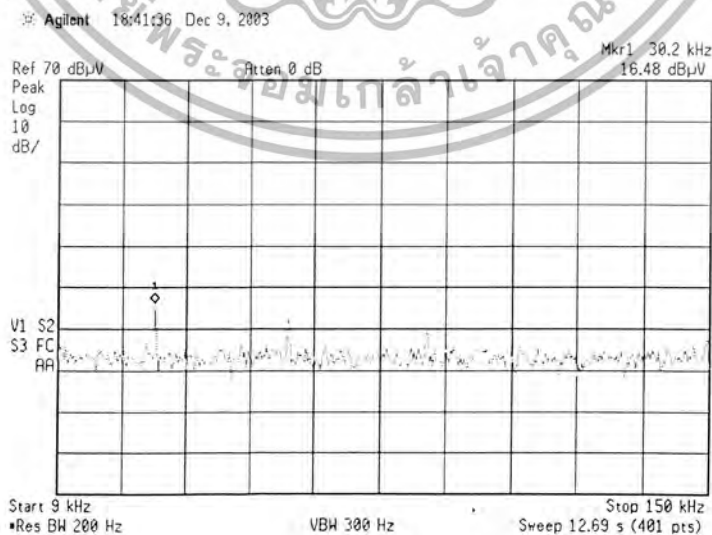
แนวแกน (X3, Y1)



แนวแกน (X3, Y2)

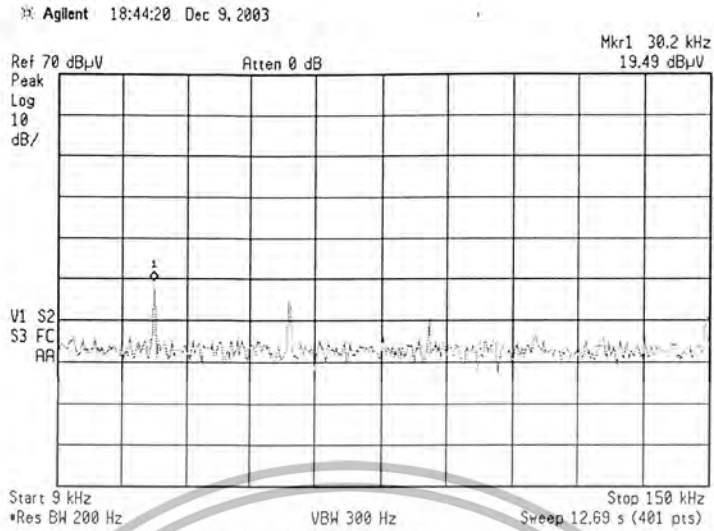


แนวแกน (X3, Y3)

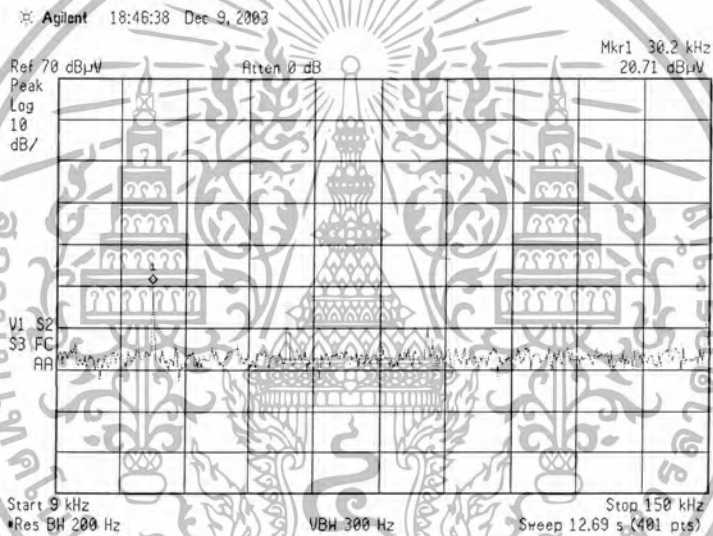


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

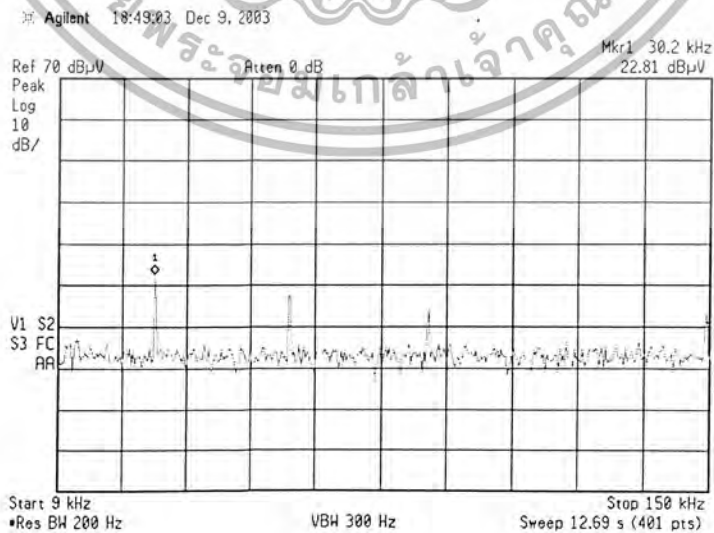
แนวแกน (X3, Y3.5)



แนวแกน (X3, Y4)

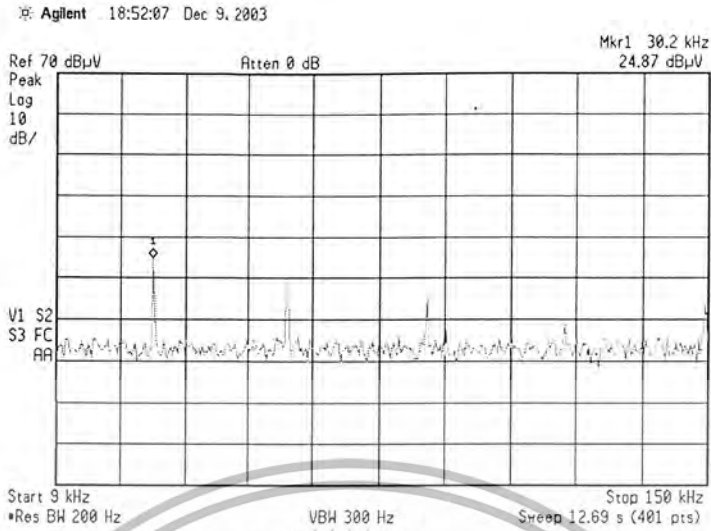


แนวแกน (X3, Y4.5)

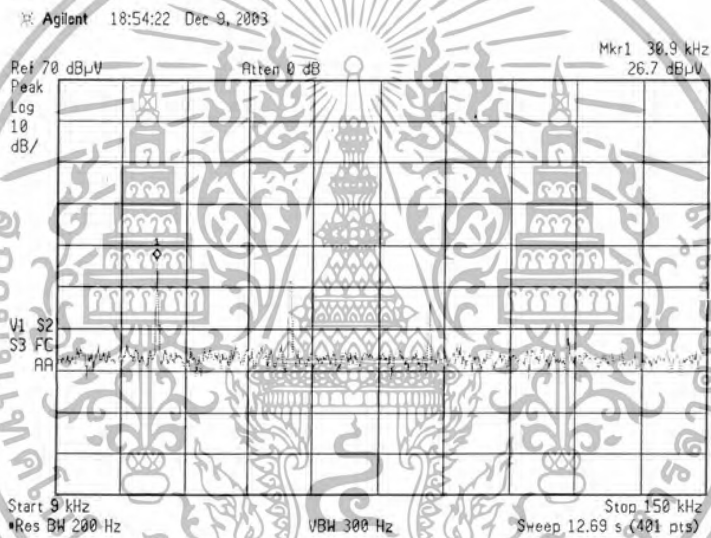


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

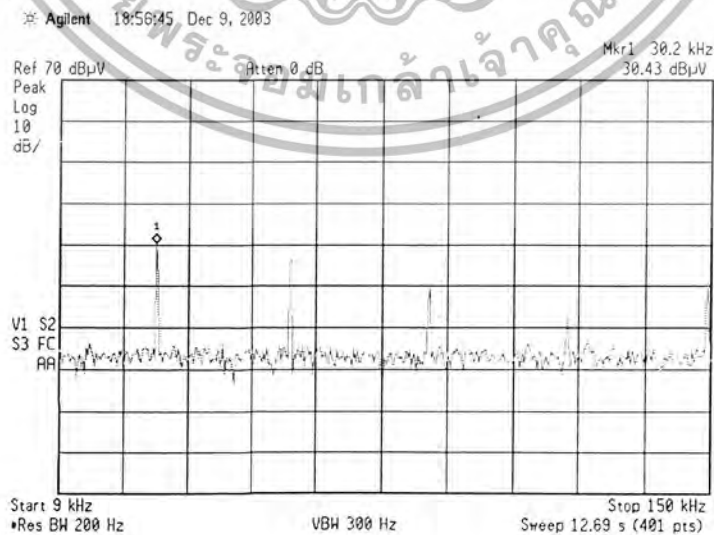
แนวแกน (X3, Y5)



แนวแกน (X3, Y5.5)



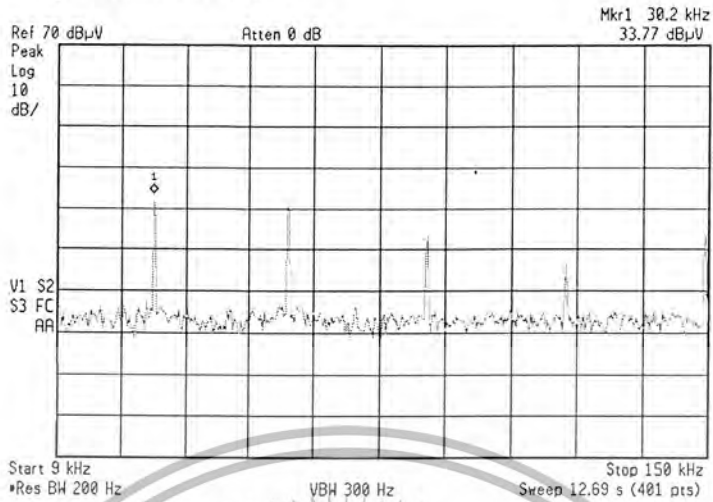
แนวแกน (X3, Y6)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

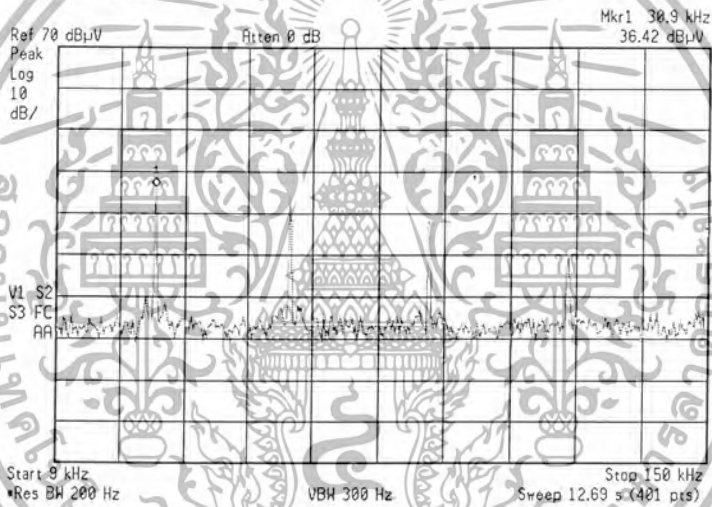
แนวแกน (X3, Y6.5)

Agilent 18:59:18 Dec 9, 2003



แนวแกน (X3, Y7)

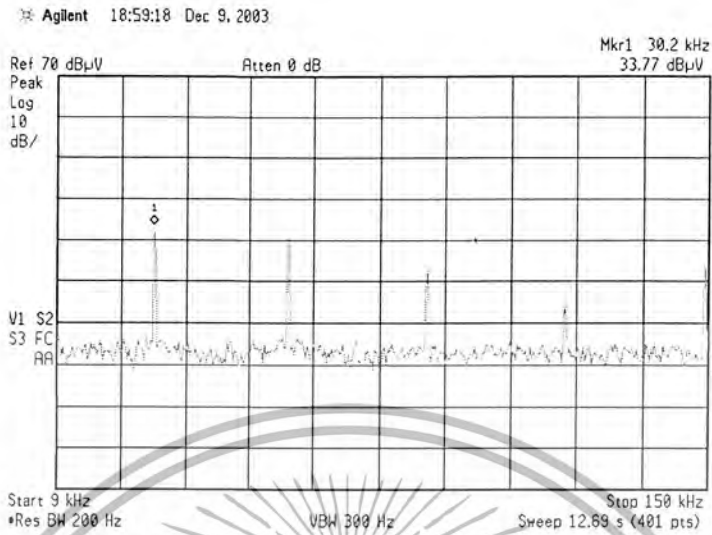
Agilent 19:02:03 Dec 9, 2003



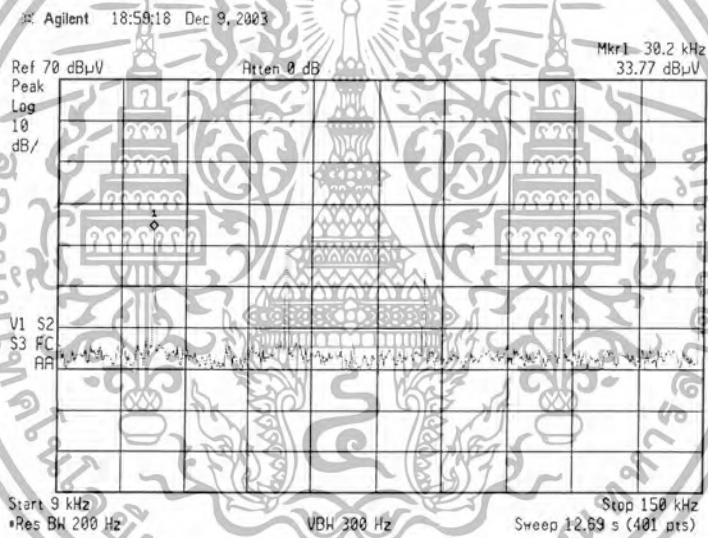
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 รูปสัญญาณรบกวนที่ความหนาต่างๆ ขณะจ่ายโหลด 147 W

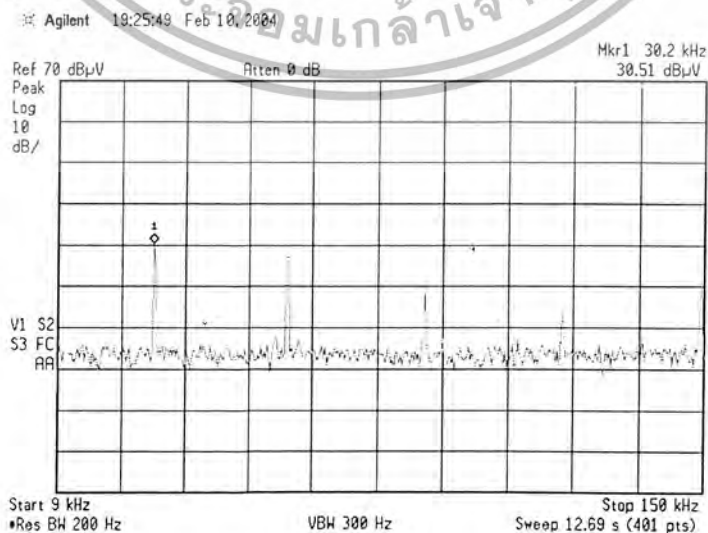
แนวแกน (X3,Y6.5) หน้า 0 mm.



แนวแกน (X3,Y6.5) หน้า 0.5 mm.



แนวแกน (X3,Y6.5) หน้า 1 mm

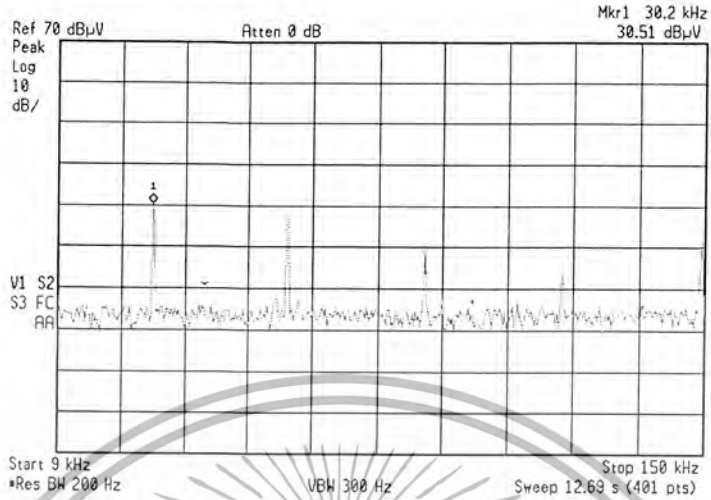


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 รูปสัญญาณรบกวนที่แนวการวางต่างๆ ขณะจ่ายโหลด 147 W

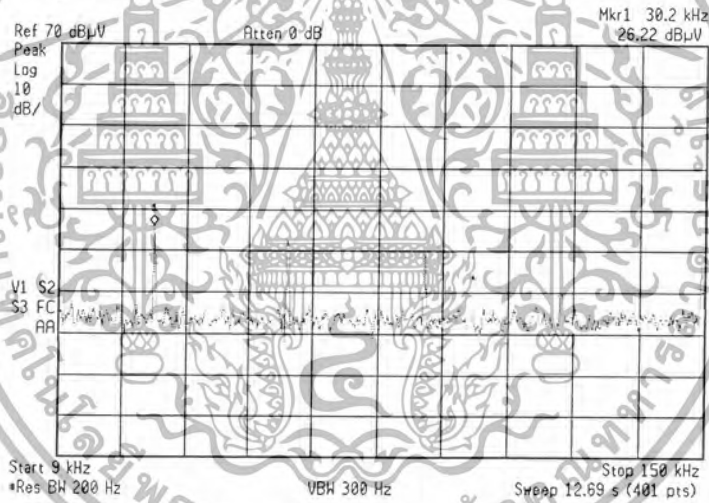
แนวแกน (X3, Y6.5) วางตามกัน

Agilent 19:25:49 Feb 10, 2004



แนวแกน (X3, Y6.5) วางขวางกัน

Agilent 16:09:34 Feb 11, 2004

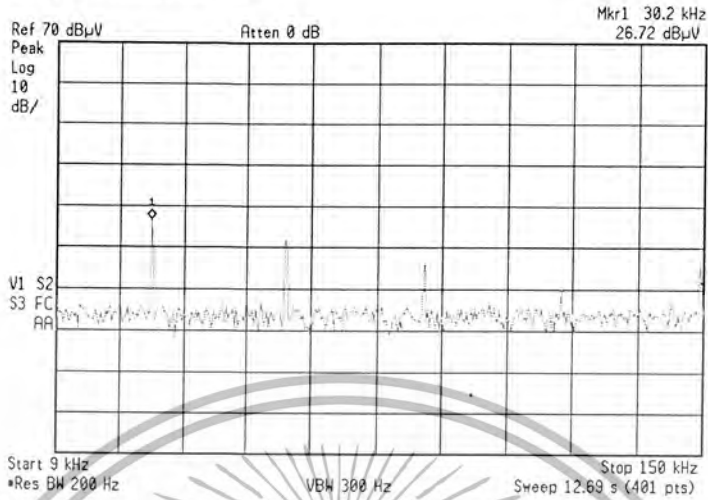


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.4 รูปสัญญาณรบกวนของแผ่นโลหะชนิดต่างๆ ขณะจ่ายโหลด 147 W

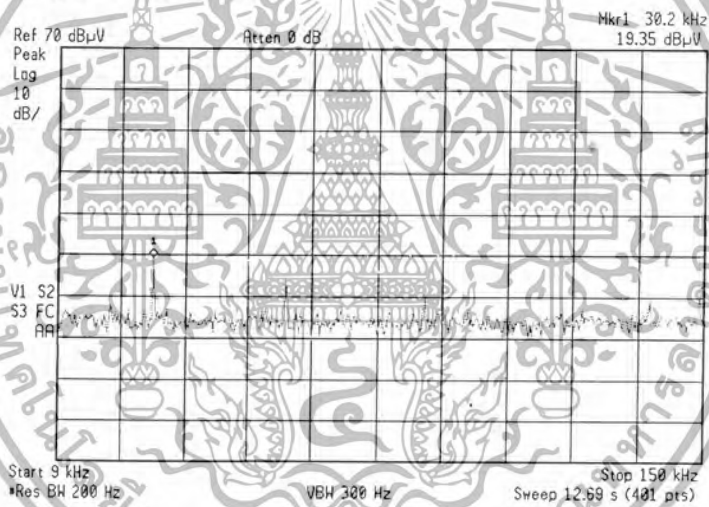
แนวแกน (X3, Y6.5) ท่อเหลือง

Agilent 16:17:05 Feb 6, 2004



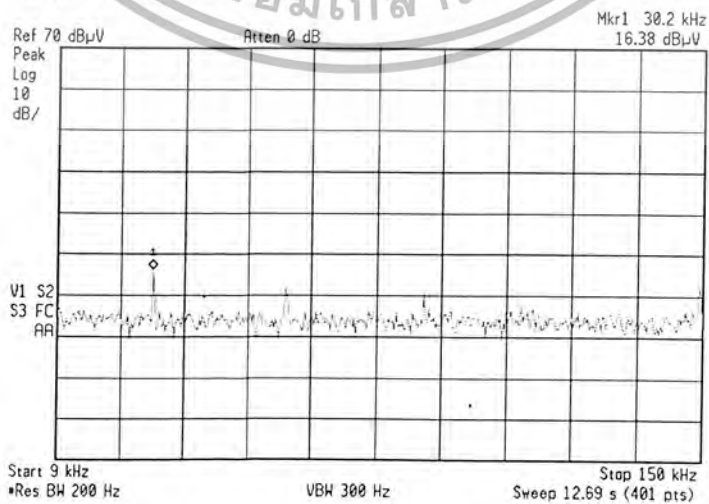
แนวแกน (X3, Y6.5) อลูมิเนียม

Agilent 16:55:22 Mar 4, 2004



แนวแกน (X3, Y6.5) ทองแดง

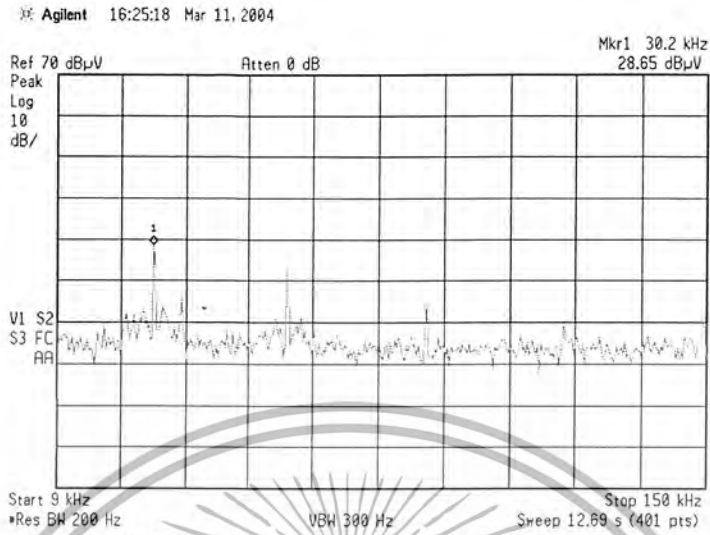
Agilent 15:40:20 Mar 4, 2004



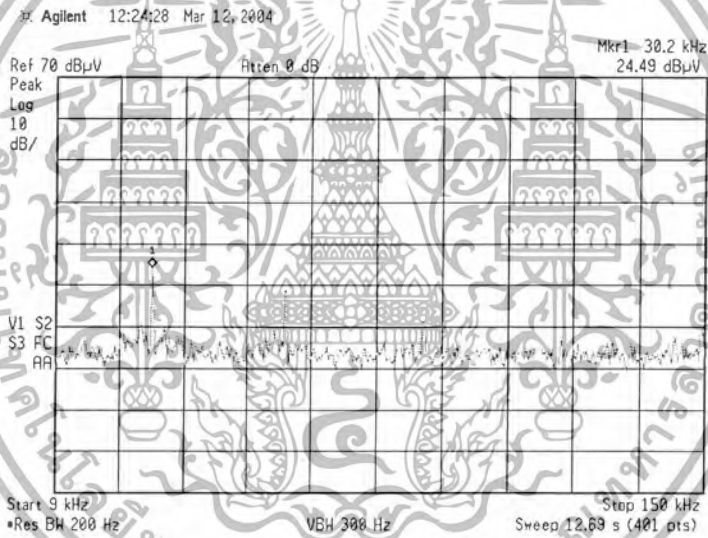
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.5 รูปสัญญาณรบกวนของกล่องโลหะชนิดต่างๆ ขณะจ่ายโหลด 147 W

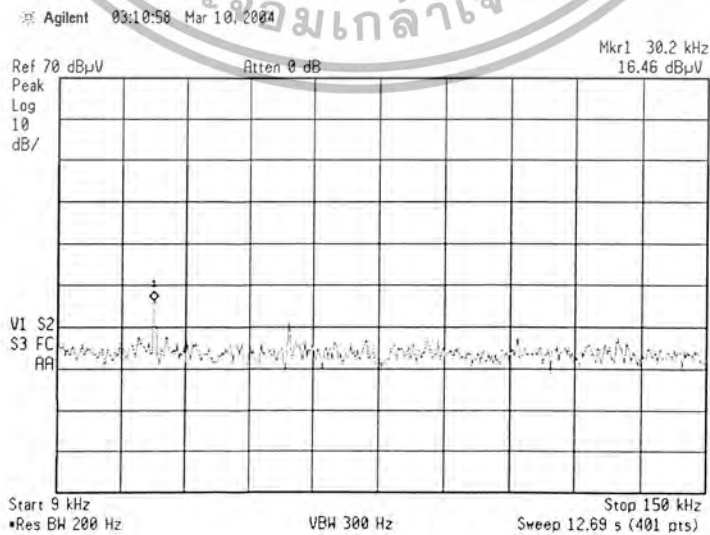
แนวแกน (X3, Y6.5) กล่องทองเหลือง



แนวแกน (X3, Y6.5) กล่องอลูมิเนียม



แนวแกน (X3, Y6.5) กล่องทองแดง

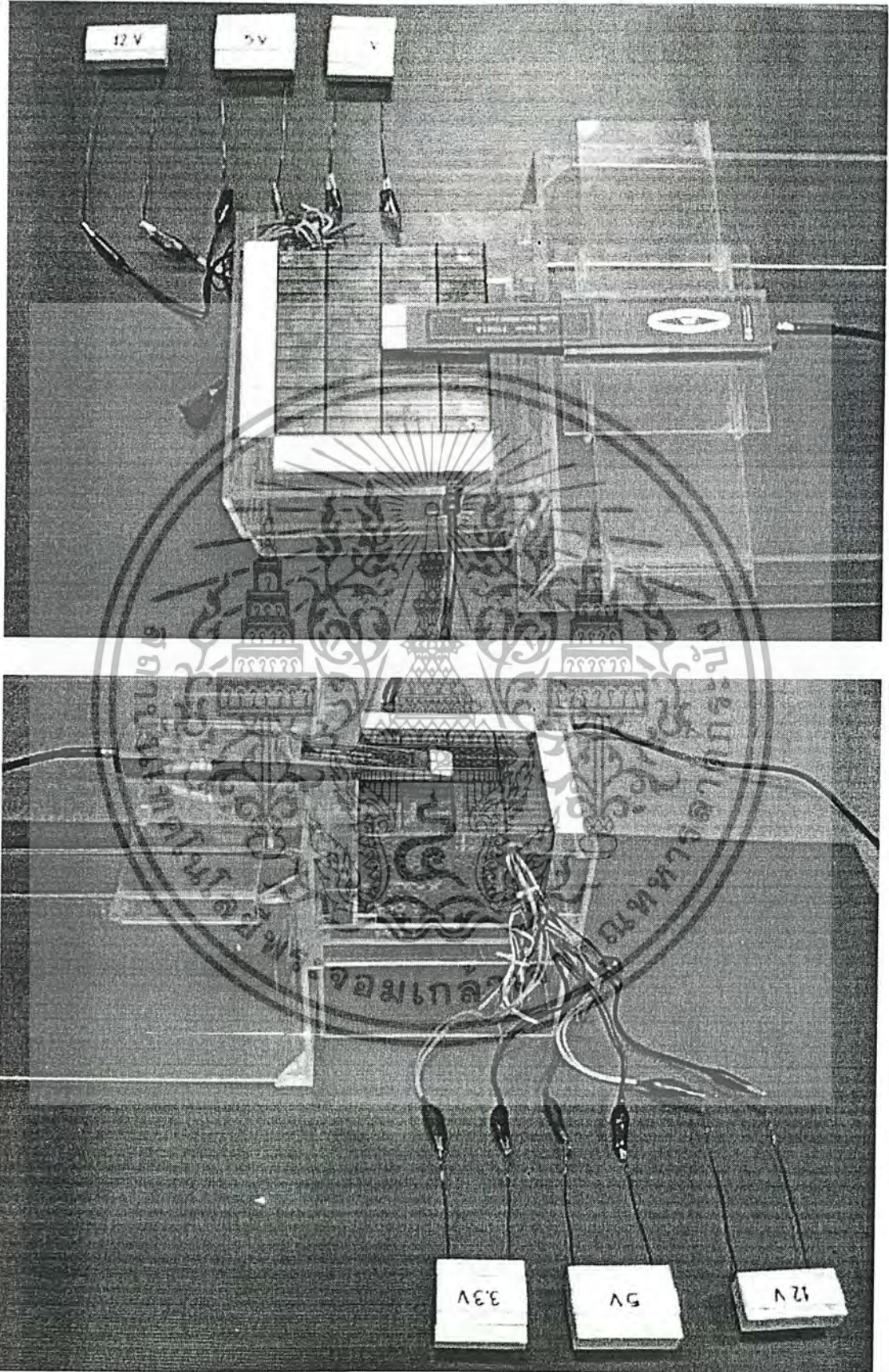


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

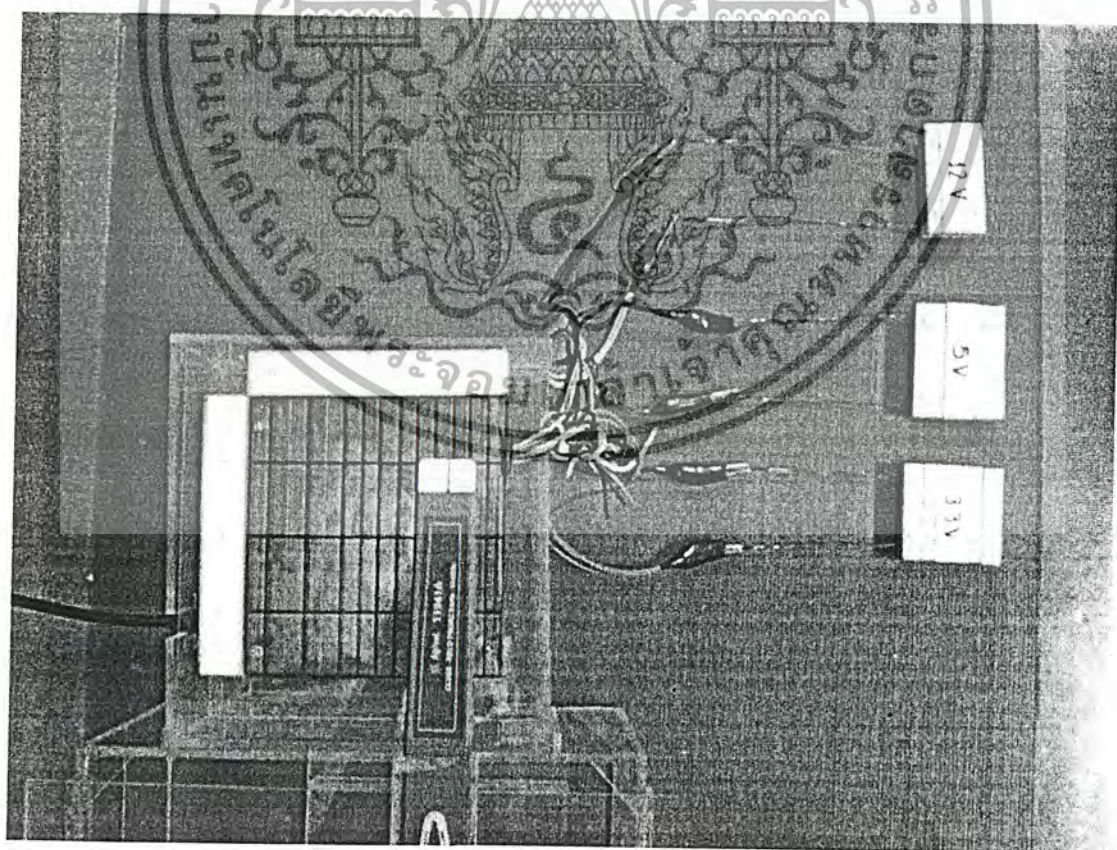
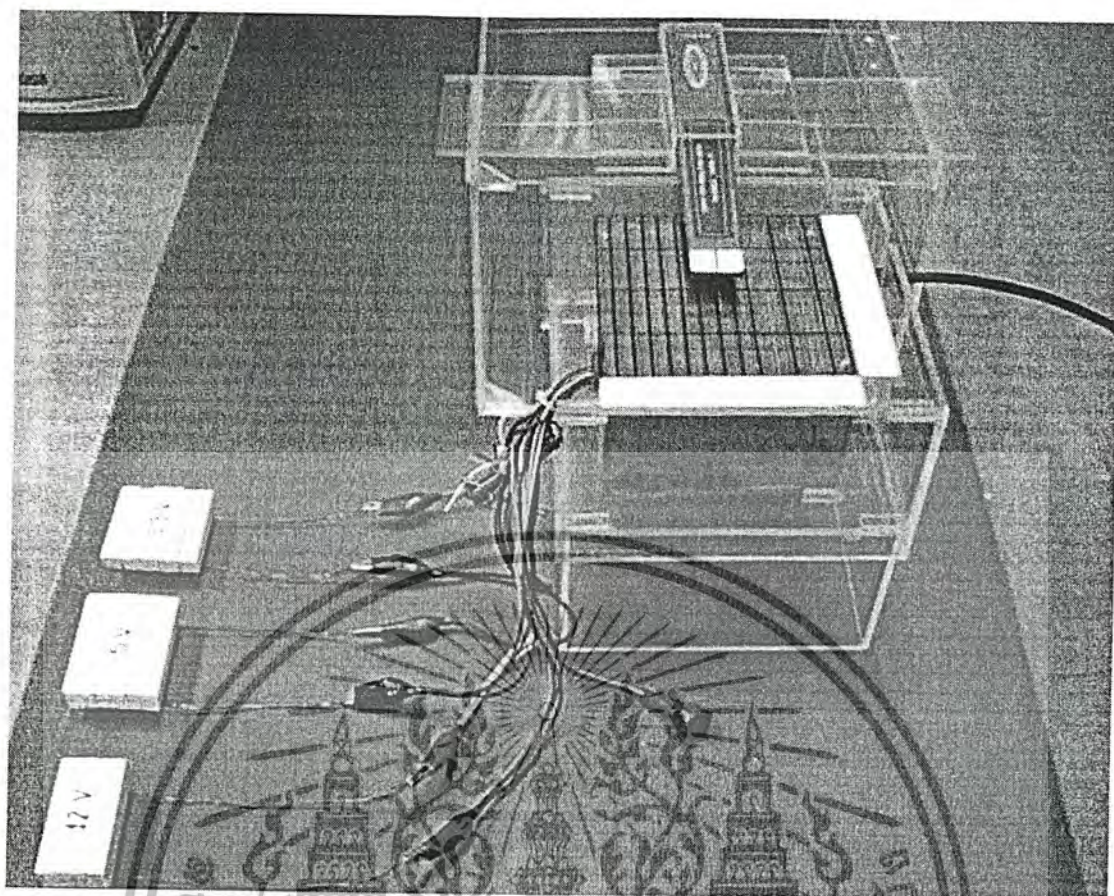


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 ภาพแสดงการทดลองวัดสัญญาณรบกวน



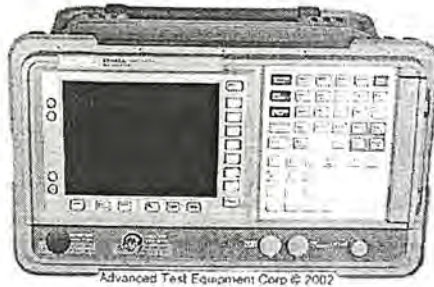
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๒.2 EMI Analyzer

EMI Analyzer HP / Agilent E7401A



Specifications:

Rear Panel Connector

Earphone: 1/8" monaural jack

Interface: GPIB

High Sweep In/Out: BNC, high TTL = sweep

Aux Video Out: 50W BNC, 0-1 V

Aux IF Output: 50W BNC, -10 to 60 DBM, 21.4MHz

Ext. Trigger Input: BNC TTL levels, positive edge trigger

Ext. Ref. In: 50W BNC, 10 MHz, -2 to +10 dBm

10 MHz Ref. Output: 50W BNC, 10 MHz, 0 dBm

Aux Interface: 9 pin "D" subminiature

Monitor Out: 50W BNC, NTSC, 15.75 kHz, 60 Hz

Weight: 12.6 kg (27.7 lbs.)

Please contact us for additional information or available options.

Portable EMC Analyzer, 9 kHz to 1.5 GHz

Frequency Specifications:

Frequency Range:

* 50 ohms: 9 kHz to 1.5 GHz

Sweep Time:

* Span > 0 Hz: 1 ms to 4000 s

* Span = 0 Hz: 10 μ s to 4000 s

* Option AYX: 50 ns to 4000 s

Resolution Bandwidth: 10 Hz to 3 MHz (-3 dB) in 1-3-10 sequence

Video Bandwidth Range: 30 Hz to 3 MHz in 1-3-10 sequence

Amplitude Specifications:

Amplitude Measurement Range: Displayed average noise level (DANL) to maximum safe input level

Maximum Safe Input Level:

* Average Continuous Power: +30 dBm (1 W)

* Peak Pulse Power: +30 dBm (1 W)

* DC: 100 Vdc

Displayed Average Noise Level (dBm): (Input terminated, 0 dB attenuation, sample-detector

* 1 kHz RBW; 30 Hz VBW

* 10 Hz RBW; 1 Hz VBW

* 1 Hz RBW; 1 Hz VBW (Option 1D5)

Input / Output

Front Panel Connectors

Input: 50 W type N (female) (Option BAB W 50 APC 3.5 m)

RF Output: 50 W BNC (female)

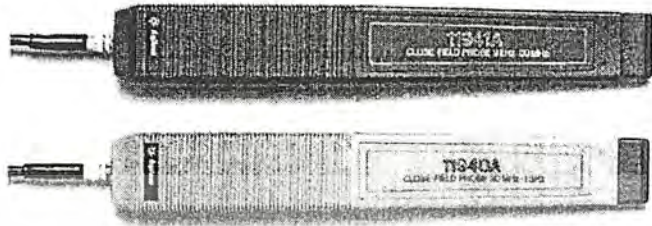
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๖.3 Magnetic Field Probes

Magnetic Field Probes

Agilent 11940A and 11941A Close Field Probes

These hand-held probes are specially designed to measure magnetic field radiation from surface currents, slots, cables, and ICs for EMC diagnostic and troubleshooting measurements. Their unique design results in a high level of electric field rejection. This significantly reduces errors, allowing calibrated and repeatable measurements. Each probe is calibrated and comes with a two-meter, RG-223 coaxial cable, an SMA(F) to Type-N(m) adapter, and an SMA(F) to Type-N(m) adapter.



Frequency Range	11940A: 30 MHz - 1 GHz 11941A: 94 Hz - 30 MHz
Maximum Input Power	100 W
Temperature Range	Variation over 0° C to +30° C
Dielectric Breakdown	± 1 dB, typical
Connector	SMA, replaceable barrel
VSWR	< 3:1, typical for 11940A only
Antenna Factor Accuracy	Individually calibrated to within ± 0.5 dB in a 327 Ω field impedance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 แผ่นโลหะที่ใช้ในการขีด

- แผ่นทองแดง
- แผ่นทองเหลือง
- แผ่นอลูมิเนียม

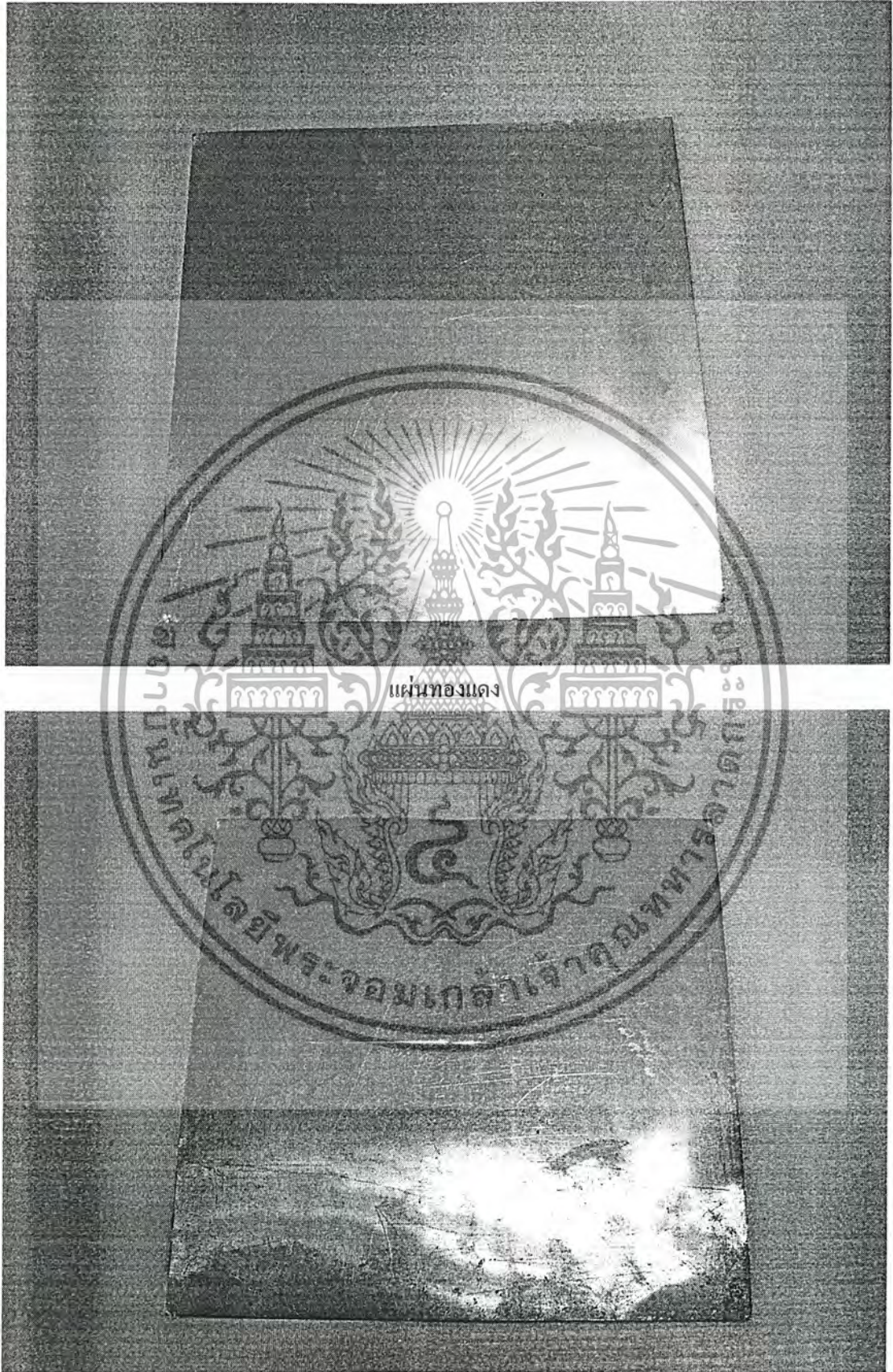
ก.2 ก่อโลหะที่ใช้ในการขีด

- ก่อทองแดง
- ก่อทองเหลือง
- ก่ออลูมิเนียม



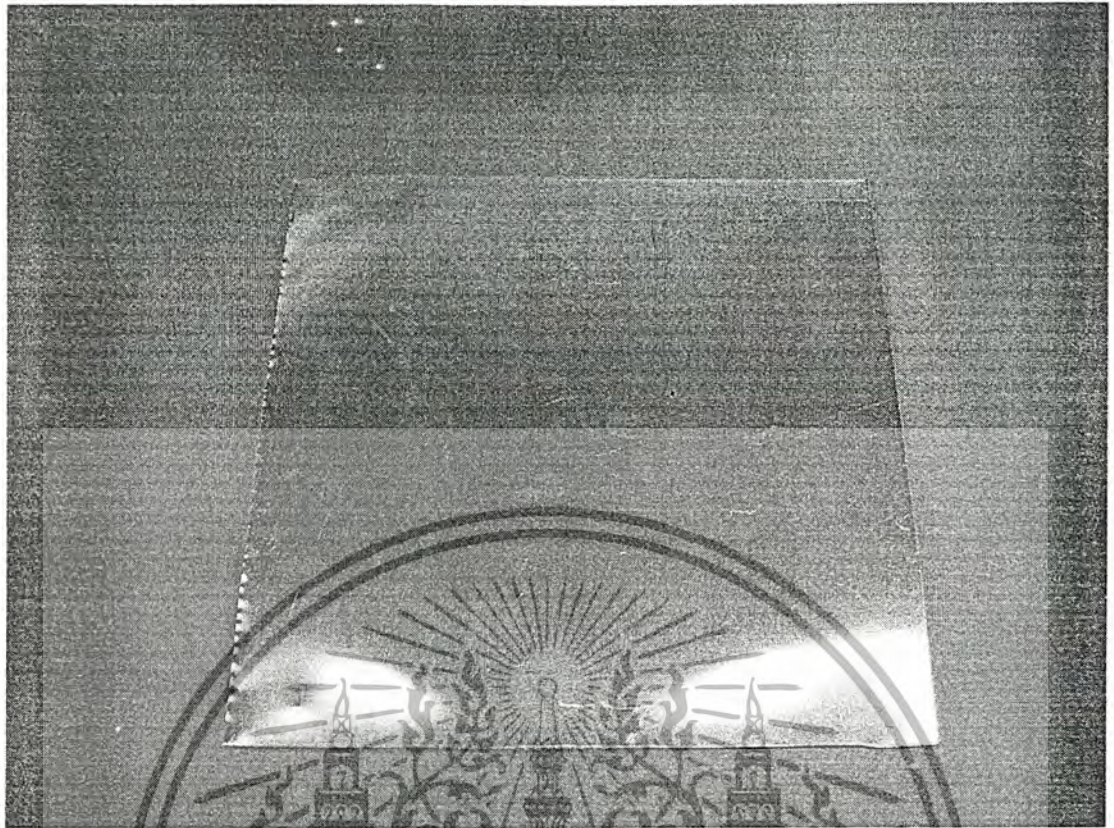
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 แผ่นโลหะที่ใช้ในการขีด



แผ่นทองเหลือง

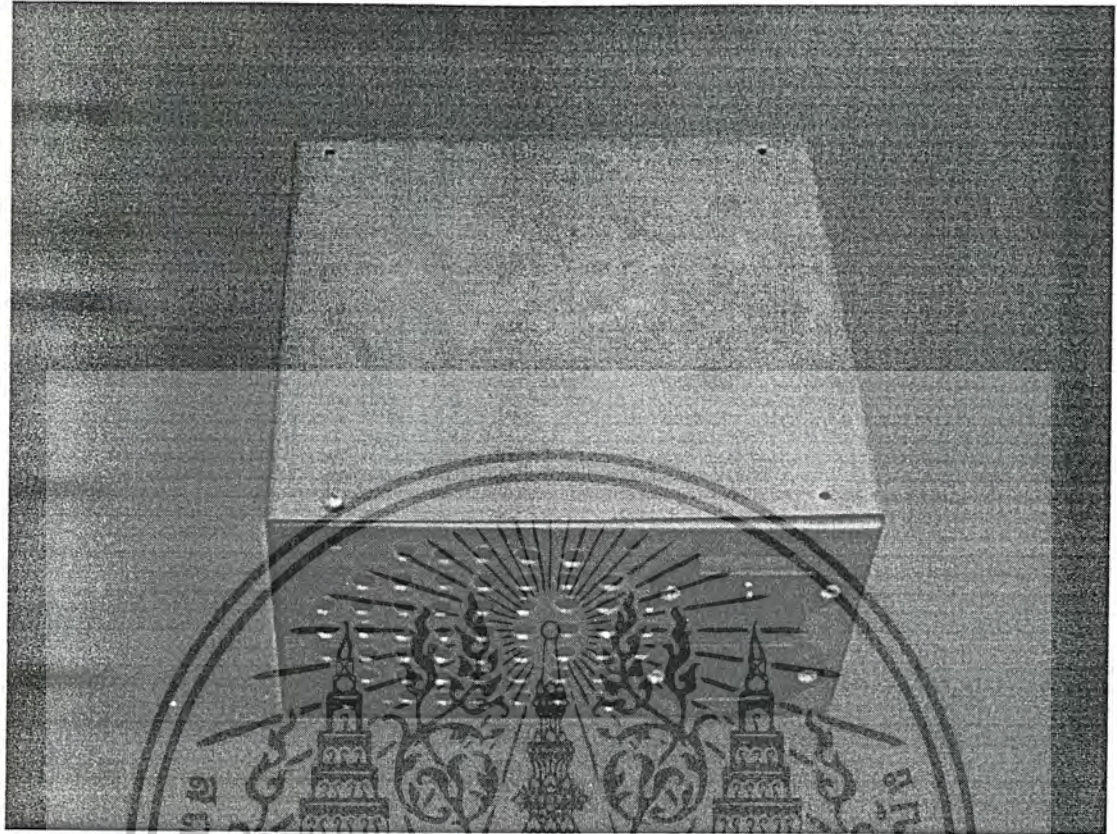
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



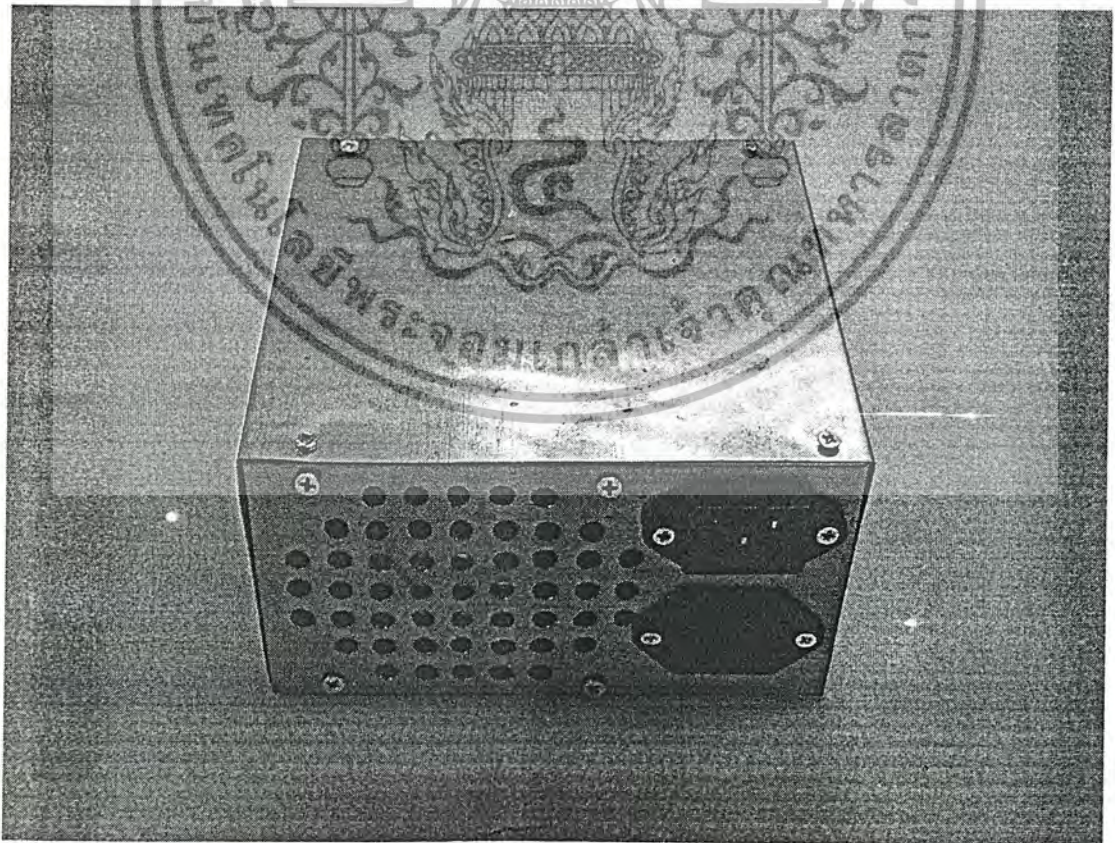
แผ่นอนุมัติแนบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 ก่องโลหะที่ใช้ในการขีดดี

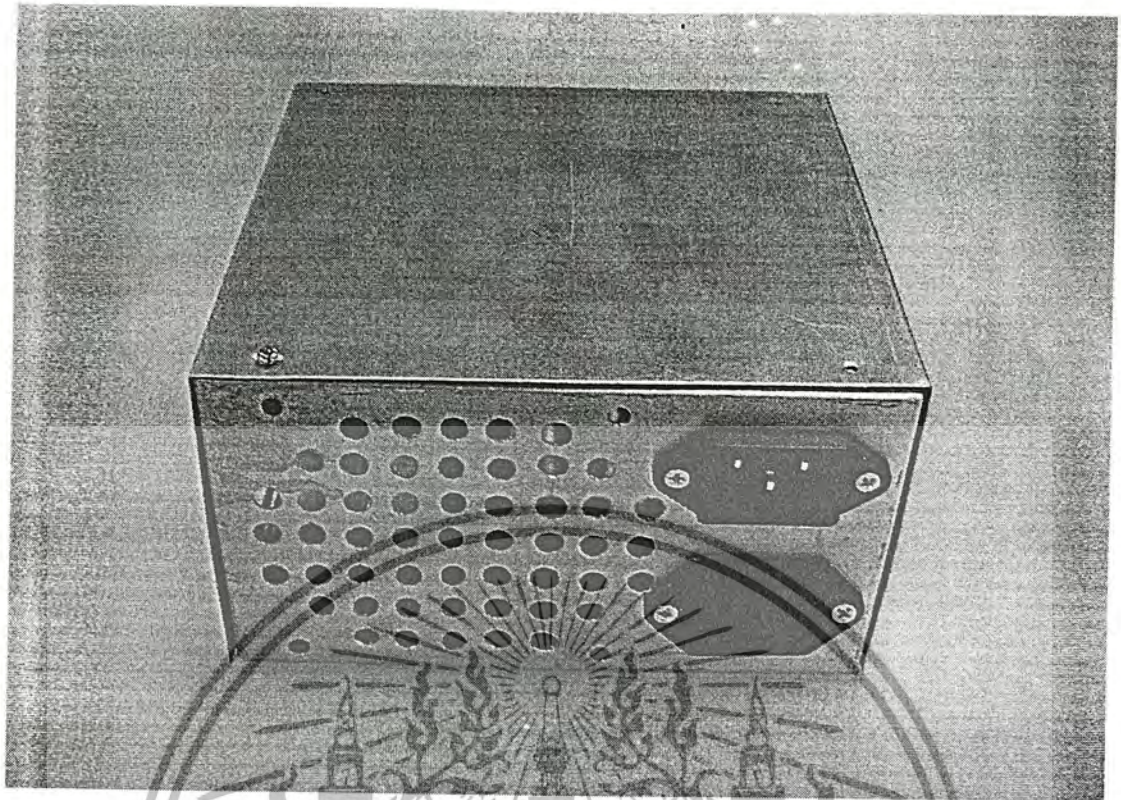


ก่องทองแดง



ก่องทองเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กล่องอคูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kodali, V.Prasad., "Engineering Electromagnetic Compatibility : Principles, Measurements, and Technologies", IEEE Press, 1996.
- [2] Tihanyi, László., "Electromagnetic Compatibility in Power Electronics", IEEE Press., 1995.
- [3] Paul, Clayton R., "Introduction to electromagnetic compatibility", John Wiley & Sons, 1992.
- [4] Hewlett Packard, "Electromagnetic Compatibility Measurements Seminar", Revised for 1995.
- [5] Tim Williams, "EMC for Product Designers", Newnes, 2nd edition, 1998.
- [6] Reinaldo Perez, "Handbook of Electromagnetic Compatibility", ACADEMIC PRESS, 1995.
- [7] Werachet Khan-ngern, "Electromagnetic Compatibility for Engineers", material training course for LG Electronics (Thailand) Co., Ltd., July 14th – 15th, 2003.
- [8] Henry W.Ott "Noise Reduction Techniques in Electronic System", 2nd Ed. Singapore : JOHN WILEY & SONS. Inc. 1998.
- [9] Tim Williams and Keith Armstrong, "EMC for System and Installations", Oxford : Newnes. Inc. 2000.
- [10] Jasper Goedbloed, "Electromagnetic compatibility", Singapore : Prentice Hall. Inc. 1992.
- [11] Pierre Degauque and Joel Hamelin, "Electromagnetic compatibility", Oxford : Oxford University Press, 1993.
- [12] Donald R. J. White, "Electromagnetic Shielding Materials and Performance", 2nd Edition. DWCI Published. 1980.
- [13] Michel Mardiguan, "Controlling Radiated Emissions by Design", New York, VNR, 1992.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้