

การวิเคราะห์กล่องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่องเปิดสำหรับผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์



นายปิยะพงษ์ แดงขำ

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

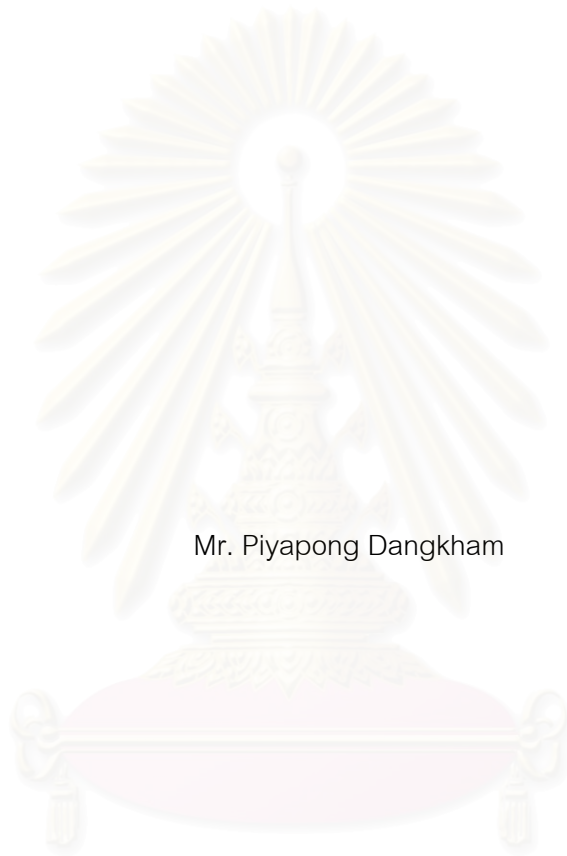
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF SHIELDING ENCLOSURE WITH AN APERTURE FOR ELECTRONIC
PRODUCTS



Mr. Piyapong Dangkham

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering


Faculty of Engineering

Academic Year 2006

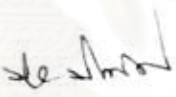
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์กล่องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่องเปิดสำหรับผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์
โดย	นายปิยะพงษ์ แดงขำ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ทีฆพุดมิ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ไกรสร อัญชลีวรรณธุ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ประพัฒน์มงคล)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ทีฆพุดมิ)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร.ไกรสร อัญชลีวรรณธุ์)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์)

ปิยะพงษ์ แดงขำ : การวิเคราะห์กล่องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่องเปิดสำหรับผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์. (ANALYSIS OF SHIELDING ENCLOSURE WITH AN APERTURE FOR ELECTRONIC PRODUCTS) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ทีฆพุมิ, อ. ที่ปรึกษา
ร่วม : ดร.ไกรสร อัญชสิทธิ์พันธ์, 101 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการคำนวณหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในกล่องปิดกั้นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมที่มีช่องเปิด การคำนวณแบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือทั้งในด้านของการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้า และคลื่นแม่เหล็ก เพื่อหาลักษณะของกล่องปิดกั้นคลื่นที่นำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยมีการแก้ปัญหาเรื่องความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีที่สุด การคำนวณได้นำวิธีวิเคราะห์ด้วยหลักเกณฑ์และระเบียบวิธีโมเมนต์มาใช้ ซึ่งจากการคำนวณจะพบว่าค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นทั้ง 2 รูปแบบขึ้นอยู่กับตัวแปรของความถี่ ขนาดของกล่องปิดกั้นคลื่น รูปร่างของช่องเปิด และตำแหน่งการจัดวางช่องเปิดในตำแหน่งต่างๆ ซึ่งวิธีการคำนวณทั้งสองให้ผลที่ใกล้เคียงกัน แต่ระเบียบวิธีโมเมนต์มีขีดความสามารถวิเคราะห์ได้หลากหลายกว่า ในการหาค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นนี้ ได้นำผลการวัดจริงมาเปรียบเทียบกับ โดยทั้งการคำนวณและการวัดจริงให้ผลออกมาในแนวทางเดียวกัน ในวิทยานิพนธ์ยังนำเสนอการแก้ปัญหาการเกิดรีโซแนนซ์ในกล่องปิดกั้นคลื่น โดยอาศัยการวางแผนโลหะภายในกล่องที่ตำแหน่งต่างๆ ผลการทดสอบสรุปได้ว่าแผ่นโลหะที่นำเสนอสามารถปรับความถี่รีโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นได้

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า.....
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า.....
ปีการศึกษา2549.....

ลายมือชื่อนิสิต..... *ปิยะพงษ์ แดงขำ*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *Pr*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... *[Signature]*

#4870385021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY / SHIELDING EFFECTIVENESS / ENCLOSURE / APERTURE

PIYAPONG DANGKHAM : ANALYSIS OF SHIELDING ENCLOSURE WITH AN APERTURE FOR ELECTRONIC PRODUCTS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. PRASIT TEEKAPUT, Ph.D., THESIS COADVISOR : KRAISON AUNCHALEEVARAPAN, Ph.D., 101 pp.

In this thesis, the shielding enclosure with aperture has been studied. It is frequently used to reduce the emission or to improve the immunity of the electronic equipment. An analytical formulation and Method of Moment (MoM) have been employed for the shielding effectiveness of a rectangular enclosure with an aperture. Both the magnetic and electric shielding may be calculated as a function of frequency, enclosure dimensions, aperture dimensions and orientation of apertures. Theoretical values of shielding effectiveness are in good agreement with measurements. To improve the shielding effectiveness, the use of metal piece inside enclosure is studied for removing the resonance frequency. Results show that the place of metal piece can be used to evaluate shielding effectiveness for design purposed.



Department.....	Electrical Engineering.....	Student's signature.....	<i>Piyapong Dangkham</i>
Field of study.....	Electrical Engineering.....	Advisor's signature.....	<i>P. Teekaput</i>
Academic year2006.....	Coadvisor's signature.....	<i>[Signature]</i>

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ เนื่องด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา
รศ. ดร.ประสิทธิ์ ทีฆพุมิ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. ไกรสร อัญชลีวรพันธุ์ ซึ่งช่วยประสิทธิ์
ประสาทวิชาความรู้ในการทำงานวิจัย เป็นผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผลงานวิจัยทั้งหมดสำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์ และสถานที่ใช้ทำ
วิจัย ณ ห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และที่ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและ
อิเล็กทรอนิกส์ (PTEC)

สุดท้ายขอขอบคุณกำลังใจจากครอบครัวและเพื่อนๆ ที่เป็นส่วนสำคัญอย่างมาก
ในความสำเร็จนี้



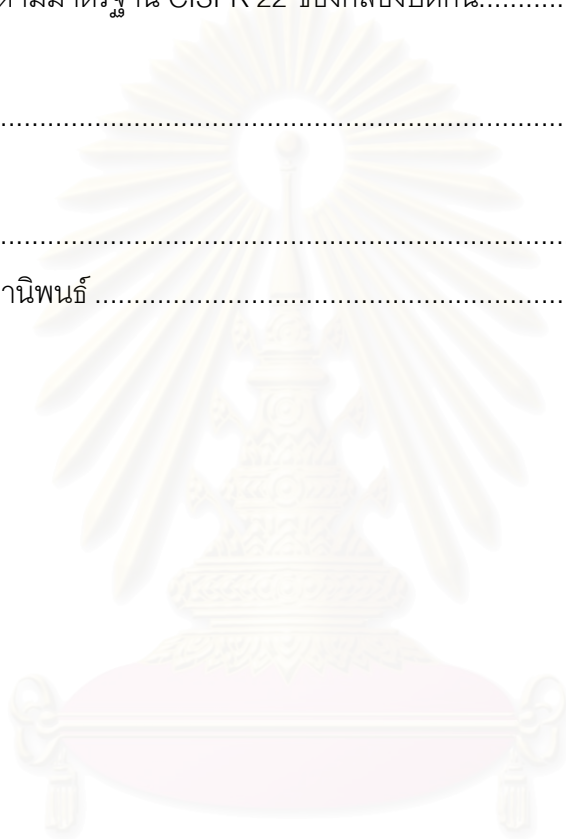
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 เป้าหมายและขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการ.....	3
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC).....	4
2.1.1 กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	4
2.1.2 มาตรฐานทางความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC Standard)	6
2.1.3 การทดสอบการแพร่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference Testing: EMI Testing).....	8
2.1.4 การทดสอบภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Susceptibility Testing: EMS).....	10
2.2 ทฤษฎีการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding Theory).....	13
2.2.1 ทฤษฎีสนาม (Field Theory)	14
2.2.3 อิมพีแดนซ์คลื่น (Wave impedance).....	16
2.2.4 อิมพีแดนซ์โลหะ (Metal impedance) และความลึกผิว (Skin depth)	17
2.2.5 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding Effectiveness: SE)	19
2.2.6 การสูญเสียจากการดูดซับ (Absorption loss).....	20

บทที่	หน้า
2.2.7 การสูญเสียจากการสะท้อน (Reflection loss and Re-Reflection loss)	21
2.3 แบบจำลองการปิดกั้นคลื่นของกล่องปิดกั้นที่มีช่องเปิด	24
2.3.1 แบบจำลองการวิเคราะห์ด้วยหลักเกณฑ์ (Analytical Formulation).....	25
2.3.2 แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method).....	28
2.4 ระเบียบวิธีโมเมนต์ (Method of Moments)	29
2.4.1 หลักการของวิธีโมเมนต์.....	29
2.4.2 ฟังก์ชันพื้นฐาน (Basis function) และฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (weighting function)	31
2.4.3 สมการเชิงอินทิกรัล	35
2.4.4 การสร้างสมการเชิงเส้นอินทิกรัล.....	38
2.4.5 โปรแกรมประยุกต์ FEKO.....	41
3. การวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการทดสอบ.....	43
3.1 การวัดการแผ่คลื่นรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Radiated EMI Measurement).....	43
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	43
3.1.2 การวัดประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นตามมาตรฐาน MIL-STD-285.....	44
3.2 การติดตั้งเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของกล่องปิดกั้นตามมาตรฐาน MIL-STD-285.....	46
3.3 การติดตั้งเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของกล่องปิดกั้นตามมาตรฐาน CISPR22.....	50
3.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกล่องปิดกั้นจากการวัดจริงและการคำนวณ.....	54
4. ผลการทดสอบประสิทธิภาพกล่องปิดกั้น.....	56
4.1 กล่องปิดกั้นที่มีช่องเปิดเดี่ยว (Single Aperture)	56
4.2 กล่องปิดกั้นที่มีหลายช่องเปิด (Array Apertures).....	62
4.3 รูปร่างของช่องเปิดในพื้นที่ขนาดเท่ากัน	65
4.4 ขนาดของกล่องปิดกั้นที่แตกต่างกัน.....	71
4.5 การปรับแก้รีโซแนนซ์ในกล่องปิดกั้น	73
4.5.1 การปรับขนาดด้านกว้าง (a)	74
4.5.2 การปรับขนาดด้านสูง (b).....	75
4.5.3 การปรับขนาดด้านลึก (d)	76
4.6 การวางชิ้นโลหะภายในกล่องเพื่อปรับแก้รีโซแนนซ์	77
4.6.1 การสร้างแบบจำลองเพื่อใช้คำนวณ	78

บทที่	หน้า
4.6.2 การปรับระยะห่างของชิ้นโลหะ	79
4.6.3 การปรับขนาดของชิ้นโลหะ.....	82
4.6.4 การจัดวางชิ้นโลหะที่ตำแหน่งต่าง ๆ.....	85
4.6.5 การแบ่งขนาดชิ้นโลหะเป็นส่วนย่อย	86
4.7 การแพร่คลื่นตามมาตรฐาน CISPR 22 ในกล่องคอมพิวเตอร์	89
4.8 การแพร่คลื่นตามมาตรฐาน CISPR 22 ของกล่องปิดกั้น.....	93
5. บทสรุป.....	97
รายการอ้างอิง.....	99
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	101



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงมาตรฐานระดับสากล ระดับภูมิภาค และระดับประเทศ.....	7
ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานสากลและของไทย	8
ตารางที่ 2.3 มาตรฐานการทดสอบทางด้านภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	12
ตารางที่ 2.4 แสดงค่าความลึกผิว (skin depth) ของวัสดุต่างๆ.....	18
ตารางที่ 2.5 รูปแบบต่างๆ ของแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	29
ตารางที่ 4.1 ความถี่ไซเรนซ์ที่แตกต่างกันตามระยะห่าง	92



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์.....	5
รูปที่ 2.2 กลุ่มที่ทำหน้าที่ดูแลมาตรฐานแบ่งตามภูมิภาคต่างๆ	6
รูปที่ 2.3 การจัดวางผลิตภัณฑ์เพื่อทำการทดสอบการแพร่รบกวนผ่านสายตัวนำ	8
รูปที่ 2.4 การจัดวางผลิตภัณฑ์เพื่อทำการทดสอบการแพร่รบกวนผ่านทางอากาศ.....	9
รูปที่ 2.5 ผลการทดสอบการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามมาตรฐาน CISPR 22	10
รูปที่ 2.6 การทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นวิทยุ	11
รูปที่ 2.7 สนามไฟฟ้าและแม่เหล็กจากกระแสตรง.....	15
รูปที่ 2.8 แสดงระยะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	16
รูปที่ 2.9 ค่าอิมพีแดนซ์คลื่นโดยเปรียบเทียบกับระยะทางจากแหล่งจ่าย	17
รูปที่ 2.10 ค่าความลึกผิวจะเป็นค่าระยะทางที่ขนาดสนามลดลง 37 เปรอร์เซ็นต์.....	18
รูปที่ 2.11 การแพร่ของคลื่นผ่านแผ่นปิดกั้น.....	20
รูปที่ 2.12 การสะท้อนกลับของคลื่นเมื่อผ่านพื้นผิวของวัสดุปิดกั้น.....	22
รูปที่ 2.13 a) กล่องปิดที่มีช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยม b) วงจรสมมูลของกล่องปิด	25
รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนวงจรสมมูลโดยใช้ทฤษฎีของเทเวนิน.....	27
รูปที่ 2.15 ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบซัดโดเมน ฟังก์ชันพีชไวส์แบบยูนิฟอร์ม ฟังก์ชันพีชไวส์แบบเชิงเส้น และฟังก์ชันพีชไวส์แบบซายน์ ตามลำดับ.....	33
รูปที่ 2.16 สนามที่จุด (x,y,z) และแหล่งกำเนิดที่จุด (x',y',z')	37
รูปที่ 2.17 วัตถุที่ได้รับสนามที่เป็นคลื่นระนาบ	38
รูปที่ 2.18 ลักษณะกล่องปิดกั้นที่มีช่องเปิด	42
รูปที่ 2.19 การสร้างเมส (mesh) เพื่อใช้ในการคำนวณ	42
รูปที่ 3.1 ห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Semi Anechoic Chamber).....	44
รูปที่ 3.2 สายอากาศที่ใช้ในการวัดโดยแสดงสายอากาศแบบ Biconical, Log-Periodic และ Bi-Log ตามลำดับ	44
รูปที่ 3.3 การวัดสัญญาณสนามไฟฟ้าในการหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่น.....	46
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์การวัดตามมาตรฐาน MIL-STD-285	46
รูปที่ 3.5 การใช้อุปกรณ์ในการวัดตามมาตรฐาน MIL-STD-285.....	47
รูปที่ 3.6 แสดงสายอากาศที่ใช้วัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	47

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.7 แสดงโพรบ (probe) ทั้ง 2 ชนิด.....	48
รูปที่ 3.8 แสดงการจัดวางโพรบ (probe) ในกล่องปิดกั้น.....	48
รูปที่ 3.9 แสดงผลการทดสอบทั้ง 2 แบบในกล่องปิดกั้น.....	49
รูปที่ 3.10 การจัดวางกล่องปิดเพื่อทำการทดสอบ	50
รูปที่ 3.11 แสดงแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในกล่อง	50
รูปที่ 3.12 ผลการทดสอบการแพร่ของคลื่นไฟฟ้าที่ไม่มีการปิดกั้น.....	51
รูปที่ 3.13 ผลการแพร่ของคลื่นไฟฟ้าที่มีการปิดกั้นของช่องเปิดขนาด 1x18 ตารางเซนติเมตร... 51	
รูปที่ 3.14 ผลการแพร่ของคลื่นไฟฟ้าที่มีการปิดกั้นของช่องเปิดขนาด 2x9 ตารางเซนติเมตร.....	52
รูปที่ 3.15 ผลการแพร่ของคลื่นไฟฟ้าที่มีการปิดกั้นของช่องเปิด 3x6 ตารางเซนติเมตร.....	52
รูปที่ 3.16 เปรียบเทียบการแพร่คลื่นของช่องเปิดทั้ง 3 กรณี	53
รูปที่ 3.17 ช่องเปิดแบบต่างๆ ที่ทำการทดสอบ	54
รูปที่ 3.18 กล่องปิดกั้นที่ไม่มีช่องเปิด.....	54
รูปที่ 3.19 กล่องปิดกั้นที่มีช่องเปิด 1x18 เซนติเมตร.....	55
รูปที่ 3.20 กล่องปิดกั้นที่มีช่องเปิด 3x6 เซนติเมตร.....	55
รูปที่ 3.21 กล่องปิดกั้นที่มีช่องเปิด 1x6 เซนติเมตร จำนวน 3 ช่อง	55
รูปที่ 4.1 ช่องเปิดแบบต่างๆ ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ.....	56
รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิด 1x18 cm.....	57
รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิด 2x9 cm.....	57
รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิด 3x6 cm.....	57
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิด 6x3 cm.....	58
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิด 9x2 cm.....	58
รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิด 18x1 cm.....	58
รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของช่องเปิดรูปแบบต่างๆ.....	59
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิดรูปแบบต่างๆ.....	59
รูปที่ 4.10 มุมโพลาริซที่แตกต่างกัน	60
รูปที่ 4.11 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นในมุมโพลาริซที่แตกต่างกัน	60
รูปที่ 4.12 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นในมุมโพลาริซที่แตกต่างกัน	61
รูปที่ 4.13 กล่องปิดกั้นคลื่นที่มีจำนวนช่องเปิดต่างๆ กัน.....	62
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิดที่มีขนาด 1 ช่อง	62

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิดที่มีขนาด 4 ช่อง	63
รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิดที่มีขนาด 9 ช่อง	63
รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิดที่มีขนาด 16 ช่อง	63
รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของช่องเปิดจำนวนต่างๆ	64
รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิดจำนวนต่างๆ	64
รูปที่ 4.20 ช่องเปิดแบบต่างๆ ที่นำมาคำนวณ	65
รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิด 1x9 cm.....	65
รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิด 3x3 cm.....	66
รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิด 9x1 cm.....	66
รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิดทั้งสามแบบ	66
รูปที่ 4.25 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของช่องเปิด 3x6 เซนติเมตร	67
รูปที่ 4.26 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของช่องเปิด 1x6 เซนติเมตร	67
รูปที่ 4.27 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของช่องเปิด 0.5x6 เซนติเมตร	68
รูปที่ 4.28 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของช่องเปิด 0.5x2 เซนติเมตร	68
รูปที่ 4.29 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของช่องเปิด 0.5x0.5 เซนติเมตร	68
รูปที่ 4.30 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของช่องเปิดแบบต่างๆ	69
รูปที่ 4.31 ระยะห่างของช่องเปิดทั้ง 2 แบบ	70
รูปที่ 4.32 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นระยะห่างของช่องเปิดทั้ง 2 แบบ	70
รูปที่ 4.33 กล่องปิดกั้นคลื่นในขนาดที่ต่างๆ กัน	71
รูปที่ 4.34 การปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของกล่องปิดขนาด 20x40x45 เซนติเมตร	71
รูปที่ 4.35 การปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของกล่องปิดขนาด 30x30x30 เซนติเมตร	72
รูปที่ 4.36 การปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของกล่องปิดขนาด 20x20x30 เซนติเมตร	72
รูปที่ 4.37 การปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของกล่องปิดทั้งสามขนาด	72
รูปที่ 4.38 กล่องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	73
รูปที่ 4.39 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของกรณีแรก	74
รูปที่ 4.40 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของกรณีที่สอง.....	75
รูปที่ 4.41 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของกรณีที่สาม	76
รูปที่ 4.42 การวางชิ้นโลหะภายในกล่องปิดกั้น	77
รูปที่ 4.43 แบบจำลองด้วยโปรแกรมประยุกต์ FEKO และการจัดวางเพื่อการวัดจริง ตามลำดับ	78

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.44 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าที่ระยะ 5 เซนติเมตร.....	78
รูปที่ 4.45 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าที่ระยะ 10 เซนติเมตร.....	79
รูปที่ 4.46 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของระยะทดสอบ 5 เซนติเมตร.....	80
รูปที่ 4.47 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของระยะทดสอบ 10 เซนติเมตร.....	80
รูปที่ 4.48 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของระยะทดสอบ 15 เซนติเมตร.....	80
รูปที่ 4.49 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของระยะทดสอบต่างๆ.....	81
รูปที่ 4.50 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของชิ้นโลหะ 5x5 เซนติเมตร.....	82
รูปที่ 4.51 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของชิ้นโลหะ 5x10 เซนติเมตร.....	82
รูปที่ 4.52 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของชิ้นโลหะ 10x10 เซนติเมตร.....	83
รูปที่ 4.53 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของชิ้นโลหะ 15x10 เซนติเมตร.....	83
รูปที่ 4.54 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของชิ้นโลหะขนาดต่างๆ.....	84
รูปที่ 4.55 การวางชิ้นโลหะที่ตำแหน่งชิดด้านซ้าย กึ่งกลาง และชิดด้านขวาของกล่องตามลำดับ	85
รูปที่ 4.56 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของกล่องเปิด และการวางชิ้นโลหะที่ตำแหน่ง ต่าง ๆ.....	85
รูปที่ 4.57 การวางชิ้นโลหะย่อยๆ ในลักษณะที่แตกต่างกัน.....	86
รูปที่ 4.58 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นของการจัดวางแบบต่างๆ.....	87
รูปที่ 4.59 การแบ่งชิ้นโลหะออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ โดยวางห่างกันเป็นระยะ 1 cm.....	88
รูปที่ 4.60 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นของการจัดวางชิ้นโลหะ.....	88
รูปที่ 4.61 การจัดวางชิ้นโลหะภายในกล่องคอมพิวเตอร์ที่ระยะห่าง 5, 10 และ 15 เซนติเมตร... ..	89
รูปที่ 4.62 ผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นของกล่องคอมพิวเตอร์.....	89
รูปที่ 4.63 การจัดวางโดยไม่มีแผ่นปิดกั้น.....	90
รูปที่ 4.64 การจัดวางโดยมีแผ่นปิดกั้นที่ตำแหน่ง 5 ซม.....	90
รูปที่ 4.65 การจัดวางโดยมีแผ่นปิดกั้นที่ตำแหน่ง 10 ซม.....	91
รูปที่ 4.66 การจัดวางโดยมีแผ่นปิดกั้นที่ตำแหน่ง 15 ซม.....	91
รูปที่ 4.67 อุปกรณ์และการจัดวางภายในกล่องปิดกั้น.....	93
รูปที่ 4.68 ช่องเปิดที่นำมาทดสอบ.....	93
รูปที่ 4.69 ผลการวัดการแพร่ของช่องเปิด 1x18 เซนติเมตร.....	94
รูปที่ 4.70 ผลการวัดการแพร่ของช่องเปิด 3x6 เซนติเมตร.....	94
รูปที่ 4.71 ผลการวัดการแพร่ของช่องเปิด 6x3 เซนติเมตร.....	95

ภาพประกอบ

หน้า

รูปที่ 4.72 ผลการวัดการแพร่ของช่องเปิด 1x6 เซนติเมตร จำนวน 3 ช่อง 95

รูปที่ 4.73 ผลการวัดการแพร่ของช่องเปิด 1x1 เซนติเมตร จำนวน 18 ช่อง 96



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการค้าสากลการผลิตสินค้าประเภทไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ เพื่อที่จะวางจำหน่ายในท้องตลาดจะต้องนำสินค้าดังกล่าวมาทำการทดสอบด้านการใช้งาน (functional test) ความปลอดภัยของผู้ใช้งาน (product safety test) ความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม (environmental test) การทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC) ก็เป็นอีกมาตรฐานหนึ่งซึ่งถูกกำหนดให้ทำการทดสอบสินค้าต่างๆจะต้องผ่านการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนดโดยตลาดที่ส่งไปจำหน่าย เช่น ผู้ผลิตต้องการส่งสินค้าของตนไปจำหน่ายในแถบประเทศยุโรป จะต้องติดเครื่องหมาย CE บนสินค้านั้นๆ ส่วนในตลาดสหรัฐอเมริกาสินค้าบางประเภท ต้องผ่านการทดสอบตามข้อกำหนดของคณะกรรมการกลางควบคุมการสื่อสารโทรคมนาคม (Federal Communication Commission: FCC) ก่อนจึงจะสามารถนำเข้าไปขายในสหรัฐอเมริกาได้ ปัจจุบันประเทศไทยก็ออกกฎหมายบังคับอุปกรณ์ประเภทส่องสว่าง เช่น อิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ หลอดไฟ บัลลาสต์แบบขดลวด และหลอดไฟแบบสมบูรณในตัวเอง (compact lamp) จะต้องทดสอบด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย การทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเรื่องหนึ่งซึ่งเข้ามามีบทบาทในการพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญมาก นับตั้งแต่ขั้นตอนของการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ต้องคำนึงถึง การใช้งานที่ต้องอยู่ภายใต้สภาวะการถูกรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ การทดลองเครื่องต้นแบบ การปรับปรุงเครื่องต้นแบบ ก่อนนำลงสู่สายการผลิตจะต้องผ่านทดสอบการทำงานว่าผลิตภัณฑ์นั้น ขณะที่ถูกใช้งานในสภาวะปกติจะต้องไม่เป็นตัวสร้าง สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าออกมารบกวนการทำงานของอุปกรณ์ที่อยู่ใกล้เคียง และในขณะเดียวกันก็ต้องสามารถทนต่อการรบกวนจากแหล่งอื่นๆ ได้ดีไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานด้อยลง โดยมีข้อกำหนดทางการค้าและมาตรฐานสากลเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น มาตรฐาน CISPR มาตรฐาน IEC มาตรฐาน EN/CENELEC เป็นต้น หากผู้ประกอบการไม่คำนึงถึงมาตรฐานที่บังคับใช้ในตลาดสากล จะทำให้ไม่สามารถจำหน่ายสินค้าไปยังประเทศคู่ค้าในตลาดสำคัญ เช่น สหรัฐอเมริกาและสหภาพยุโรปได้ เนื่องจากในประเทศเหล่านั้นมีระเบียบที่เข้มงวดในเรื่องมาตรฐานสินค้าประเภทนี้เป็นกฎหมายบังคับใช้กับผู้ผลิตและผู้จำหน่ายสินค้าในตลาด ตลอดจนมีผลบังคับใช้กับสินค้าที่นำเข้ามาจากต่างประเทศด้วย

คอมพิวเตอร์เป็นตัวอย่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นิยมใช้กันมาก ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แต่ละตัวก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) โดยมีมาตรฐานทางด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ต้องทำการทดสอบให้ผ่าน คือ EN55022:1998+A1+A2:2003 Information Technology Equipment แม้ว่าคอมพิวเตอร์จะมีกล่อง (case) ไว้สำหรับการป้องกันในด้านการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ด้วยข้อบังคับของการระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ด้านใน จึงทำให้มีช่องเปิดเพื่อทำการระบายอากาศ ซึ่งช่องเปิดเหล่านี้สามารถสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมารบกวนผู้ภายนอกได้ การศึกษาลักษณะของช่องเปิดจึงมีความสำคัญต่อการออกแบบกล่องของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อลดการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมา อีกทั้งการจัดวางอุปกรณ์ด้านในก็มีความสำคัญต่อการแพร่คลื่นด้วย นอกจากนี้การเกิดรีโซแนนซ์ (resonance) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่ง ที่ส่งผลต่อการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารั่วไหลออกมาอีกด้วย ดังนั้นนอกจากการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของคอมพิวเตอร์ให้เหมาะสมกับความต้องการที่จะใช้งานแล้ว จำเป็นต้องคำนึงถึงมาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอความสัมพันธ์ในปัจจัยแ่งต่างๆ ของช่องเปิดบนกล่องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อทำการลดปัญหาการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อหาลักษณะของกล่องปิดที่ใช้ในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมารบกวนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์รอบข้างได้น้อยที่สุด ซึ่งการจำลองเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการปิดกั้น (Shielding Effectiveness) โดยจะนำการแปลงให้อยู่ในรูปวงจรมุมมุล (equivalent circuit) ของสายส่ง (transmission line) และระเบียบวิธีโมเมนต์ (Method of Moment) มาใช้ และศึกษาถึงความสัมพันธ์ของช่องเปิดรูปแบบต่างๆ รวมไปถึงแก้ปัญหาการเกิดเรโซแนนซ์ของกล่องปิด เพื่อจะนำไปใช้ในการออกแบบให้ผ่านการทดสอบมาตรฐานเรื่องของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC)

1.3 เป้าหมายและขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. วิเคราะห์การแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านออกช่องเปิดแบบต่างๆ บนกล่องปิดกั้น
2. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของขนาด รูปร่าง จำนวน และการจัดวางของช่องเปิด เพื่อลดการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

3. วิเคราะห์การเกิดรีโซแนนซ์ของกล่อง และความความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น พร้อมหาวิธีแก้ไข เพื่อนำมาลดการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

4. นำเสนอต้นแบบกล่องปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถลดปัญหาความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้ด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า และมาตรฐานในการทดสอบ

2. ความสัมพันธ์ของช่องเปิดในกรณีต่างๆ เพื่อนำมาออกแบบกล่องปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

3. กล่องปิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมามีค่าต่ำ ผ่านมาตรฐานการทดสอบทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า

1.5 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการ

1. ศึกษาทฤษฎีความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2. ศึกษามาตรฐานต่างๆ ทางด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

3. ศึกษาทฤษฎีการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่น

4. ออกแบบลักษณะกล่องปิดแบบต่างๆ เพื่อใช้ในการทดสอบการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

5. ทำการทดสอบ จากนั้นนำผลมาเปรียบเทียบและสรุปผล

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC)

ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC) คือความสามารถของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถทำงานร่วมกันได้เป็นปกติในสิ่งแวดล้อมทางแม่เหล็กไฟฟ้า และมีความสัมพันธ์คือไม่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) และสามารถทนต่อการถูกรบกวนของปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Susceptibility: EMS) จากภายนอกด้วย ปรากฏการณ์ของปัญหาในเรื่องความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถพบได้ในชีวิตประจำวัน เช่น ปัญหาการรบกวนของคลื่นโทรศัพท์มือถือต่อหน้าจอบนคอมพิวเตอร์ หรือการรบกวนของคอมพิวเตอร์ต่อโทรทัศน์ ซึ่งจะสังเกตได้จากการคลื่นรบกวนบนหน้าจอ เป็นต้น ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Source), ส่วนที่ได้รับผลการรบกวน (Victim) และส่วนเชื่อมต่อ (Coupling) สัญญาณรบกวนระหว่างสองส่วนแรก โดยสัญญาณรบกวนในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะมีเส้นทางเดินจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนโดยตัวรับผลกระทบสามารถแบ่งออกได้เป็นสองรูปแบบด้วยกันคือ การแผ่กระจาย (Radiated Emission: RE) หรือการเชื่อมต่อโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศหรือวัตถุอื่นๆ และอีกรูปแบบคือการแผ่ผ่านทางสายตัวนำ (Conducted Emission: CE) ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โดยการแผ่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแทนให้อยู่ในรูปของไฟฟ้า (electrically) ซึ่งสามารถแทนให้อยู่ในรูปของตัวเก็บประจุ (capacitor) หรืออยู่ในรูปของแม่เหล็ก (magnetically) ก็สามารถแทนในรูปของตัวเหนี่ยวนำ (inductor)

2.1.1 กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

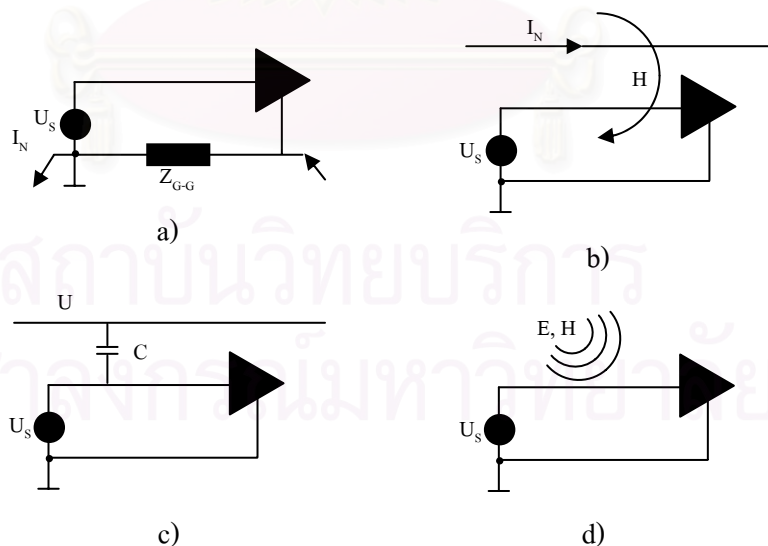
กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท [1] ดังนี้

- Common Ground Impedance Coupling การรบกวนประเภทนี้มีสาเหตุมาจากความต่างศักย์ระหว่างกราวด์ของระบบ โดยปกติแล้วระบบหลายๆ ระบบที่นำมาต่อกันเพื่อทำงานร่วมกันจะใช้กราวด์ของตัวเอง การแยกหรือการใช้งานกราวด์คนละระบบเมื่อนำมาต่อเชื่อมกันจะทำให้เกิดความต่างศักย์คร่อมระหว่างกราวด์ขึ้น ผลของความต่างศักย์ของระบบกราวด์นี้เองทำให้เกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 a)

- Inductive Coupling การรบกวนประเภทนี้มีสาเหตุมาจากกระแสสูงๆ เมื่อกระแสไหลผ่านเส้นลวดตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นโดยรอบตัวนำตามแนวรัศมี ผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะไปเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลของกระแสบนตัวนำหรือวงจรที่อยู่ใกล้เคียง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 b)

- Capacitive Coupling การรบกวนประเภทนี้มีสาเหตุมาจากแรงดันที่อยู่ข้างเคียง เมื่อนำแหล่งกำเนิดที่มีแรงดันสูงๆ มาวางไว้ใกล้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อากาศซึ่งมีความชื้นซาบแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดและวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะประพฤติตัวเสมือนเป็นตัวเก็บประจุขนาดเล็กและสามารถส่งถ่ายพลังงานจากแหล่งกำเนิดมายังวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 c)

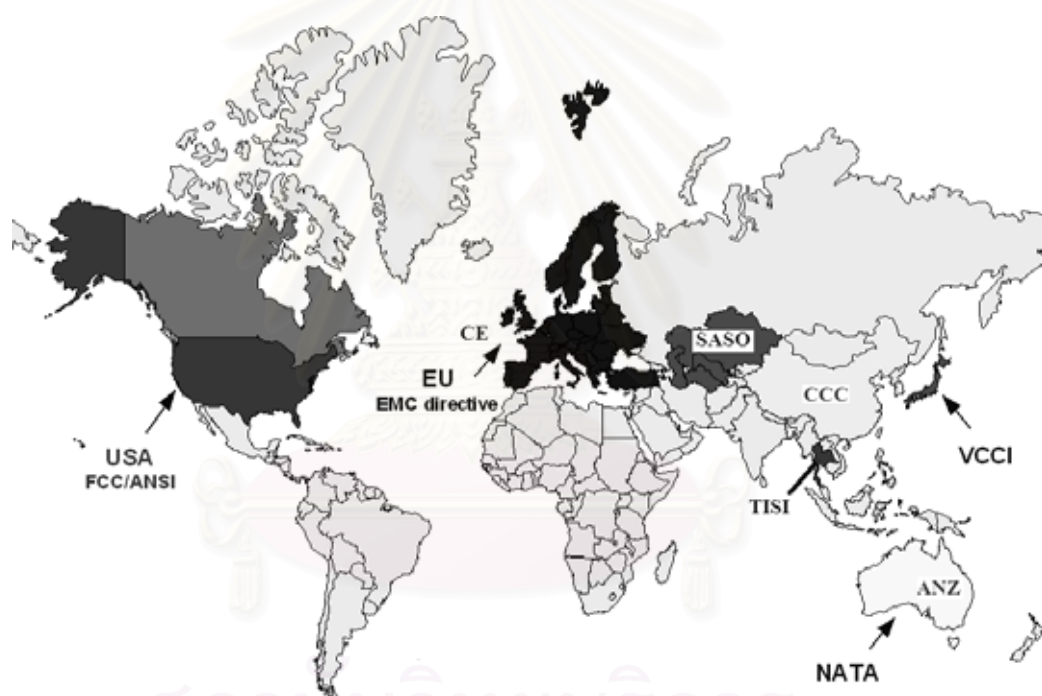
- Radiate Field Coupling การรบกวนประเภทนี้มีสาเหตุมาจากคลื่นระนาบ (plane wave) ซึ่งประกอบด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปรบกวนการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ข้างเคียง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 d) จากปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวัน แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 2 แหล่งคือ จากแหล่งกำเนิดทางธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า สนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์ และสนามแม่เหล็กโลก อีกแหล่งกำเนิดเกิดจากมนุษย์สร้างขึ้น เช่น เครื่องรับ-ส่งวิทยุ เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน รถยนต์ และเครื่องบิน เป็นต้น



รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

2.1.2 มาตรฐานทางความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC Standard)

เนื่องจากในแต่ละภูมิภาคของโลกมีการใช้งานระบบไฟฟ้าที่แตกต่างกันทั้งแรงดันและความถี่ เช่น 100 โวลต์, 110 โวลต์, 130 โวลต์, 220 โวลต์, 230 โวลต์ หรือ 240 โวลต์ และใช้ระดับความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ หรือ 60 เฮิร์ตซ์ นอกจากนี้ปัจจัยต่างๆในแต่ละภูมิภาคที่แตกต่างกัน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความดันบรรยากาศ ซึ่งมีผลทำให้การออกข้อกำหนดของมาตรฐาน EMC แตกต่างกัน หากจำแนกมาตรฐานทาง EMC ออกตามภูมิภาค จะสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ เช่น กลุ่มสหภาพยุโรปมี Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (CENELEC) เป็นผู้รับผิดชอบ ซึ่งมาตรฐานของ CENELEC ยกตัวอย่างเช่น EN 55022, EN55011, และ EN61000-4-2 โดยคำว่า EN หมายถึง European Norm



รูปที่ 2.2 กลุ่มที่ทำหน้าที่ดูแลมาตรฐานแบ่งตามภูมิภาคต่างๆ

ส่วนในกลุ่มอเมริกาเหนือจะมีหน่วยงานที่ส่วนใหญ่ยอมรับ คือ The Federal Communications Commission (FCC) เป็นผู้รับผิดชอบเช่นเดียวกับ The American National Standards Institute (ANSI) ตัวอย่างมาตรฐานเช่น FCC part 15 เป็นมาตรฐานเกี่ยวกับอุปกรณ์ความถี่วิทยุ หรือมาตรฐาน FCC part 18 จะเป็นมาตรฐานเกี่ยวกับอุปกรณ์อุตสาหกรรม เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเครื่องมือแพทย์ เป็นต้น ส่วนกลุ่มประเทศในทวีปออสเตรเลียก็มีองค์กรที่รับผิดชอบมาตรฐาน EMC ชื่อว่า AS/NZS คือ Australian Standard และ New Zealand

Standard ตัวอย่างเช่น AS/NZS 1044 เกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในบ้านโดยมีมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบ, AS/NZS 1053 เกี่ยวกับเครื่องรับวิทยุและโทรทัศน์ เป็นต้น ในประเทศอื่นๆเช่น ออสเตรเลีย ญี่ปุ่น เยอรมัน สหราชอาณาจักรได้อ้างอิงมาตรฐานกลุ่มสหภาพยุโรป โดยเพิ่มอักษรนำหน้ามาตรฐานของยุโรป CENELEC เช่น BS EN 61000-4-5 คำว่า BS หมายถึง British Standard โดยที่เนื้อหาของในมาตรฐานดังกล่าวจะเหมือนกับมาตรฐาน CENELEC จะสังเกตได้ว่ามาตรฐานในแต่ละภูมิภาคมีชื่อเรียกที่แตกต่างกัน แต่รายละเอียดของมาตรฐานจะคล้ายคลึงกัน ซึ่งสามารถเปรียบเทียบมาตรฐานสากล ยุโรป และสหรัฐอเมริกา โดยการแบ่งตามชนิดของผลิตภัณฑ์ ถูกแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงมาตรฐานระดับสากล ระดับภูมิภาค และระดับประเทศ

หัวข้อ/รายการ	International	European	USA
อุปกรณ์อุตสาหกรรมวิทยาศาสตร์ การแพทย์	CISPR11	EN55011	FCC Part 18
เครื่องรับสื่อสาร	CISPR 13	EN55013	FCC Part 15
มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องใช้ไฟฟ้าภายใน บ้าน	CISPR 14	EN55014	-
ปริมาตรที่ส่องสว่าง	CISPR 15	EN55015	-
อุปกรณ์เทคโนโลยีสารสนเทศ	CISPR 22	EN55022	FCC Part 15
ภูมิคุ้มกันไฟฟ้าสถิต	IEC 61000-4-2	EN61000-4-5	-
ภูมิคุ้มกันฟ้าผ่า	IEC 61000-4-5	EN61000-4-5	IEEE C 62.4
ภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กของความถี่ สายส่ง	IEC 61000-4-8	EN61000-4-8	-
ภูมิคุ้มกันแรงดันไฟตกและขาดช่วง	IEC 61000-4-11	EN61000-4-11	-

สำหรับในประเทศไทยทางกระทรวงอุตสาหกรรมได้ตั้งคณะกรรมการขึ้นทำงาน พิจารณาร่างมาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยอ้างอิงกับมาตรฐานสากล คือ CISPR และ IEC โดยเรียกชื่อว่า มาตรฐานอุตสาหกรรม หรือ มอก. สำหรับความสัมพันธ์ของ มาตรฐาน มอก. และ มาตรฐานสากลถูกแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานสากลและของไทย

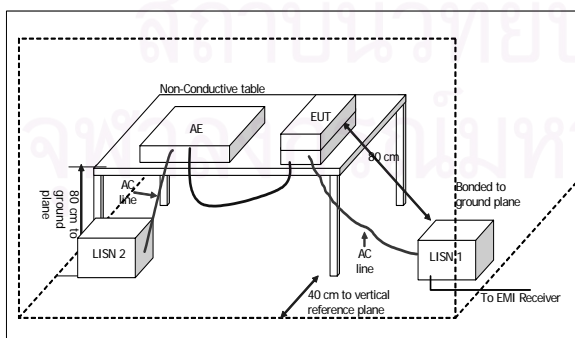
รายการ	มาตรฐานสากล	มาตรฐาน มอก.
บริภัณฑ์ส่องสว่าง	CISPR 15	1955
อุปกรณ์เทคโนโลยีสารสนเทศ	CISPR 22	1956
การแพร่สัญญาณจากสายส่งแรงสูง	CISPR 18-3	1520
ขีดจำกัดการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของอุปกรณ์วิทยาศาสตร์และ การแพทย์	CISPR 23	144

2.1.3 การทดสอบการแพร่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

(Electromagnetic Interference Testing: EMI Testing)

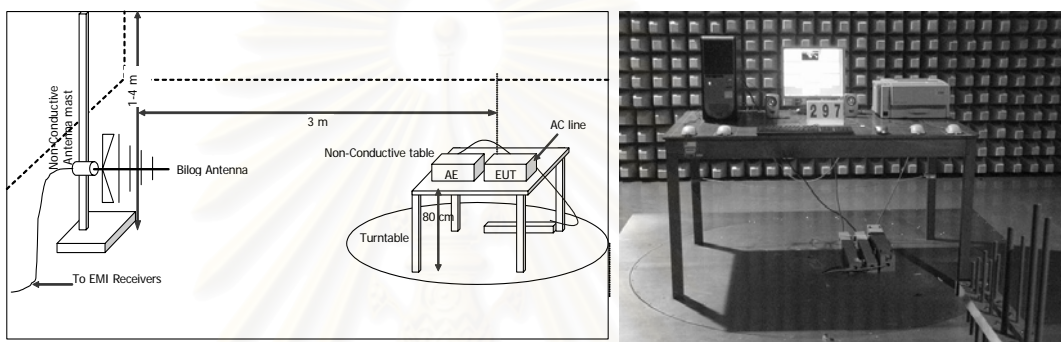
การทดสอบการแพร่รบกวนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

- การทดสอบการแพร่รบกวนผ่านสายตัวนำ (Conducted EMI Testing) เป็นการทดสอบหาระดับสัญญาณที่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ที่ย้อนกลับเข้าไปในแหล่งจ่ายไฟฟ้า (AC main supply) โดยมีสายตัวนำเป็นตัวกลางในการส่งผ่าน (coupling path) ในการทดสอบนี้ต้องนำตัวอย่างที่จะทำการทดสอบไปจัดวางในห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (shielded room) แล้ววัดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ที่ถูกทดสอบ โดยอ่านค่าที่วัดได้โดยใช้เครื่องวัดสัญญาณรบกวน (EMI receiver) ผ่านการตรวจวัดแล้วเทียบค่าที่วัดได้เทียบกับค่าขีดจำกัด (limit line) ของแต่ละมาตรฐาน สำหรับรูปแบบในการทดสอบหาระดับสัญญาณรบกวนโดยมีสายตัวนำเป็นตัวกลางในการส่งผ่านแสดงในรูปที่ 2.3



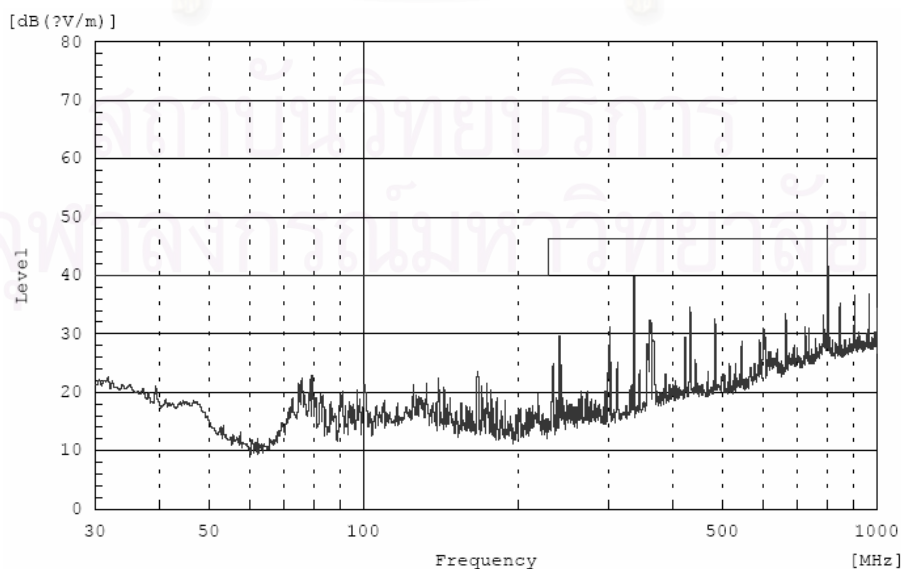
รูปที่ 2.3 การจัดวางผลิตภัณฑ์เพื่อทำการทดสอบการแพร่รบกวนผ่านสายตัวนำ

- การทดสอบการแผ่รบกวนผ่านทางอากาศ (Radiated EMI Testing) เป็นการทดสอบหาระดับสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ที่แพร่กระจายออกไปในอากาศโดยมีอากาศเป็นตัวกลางในการส่งผ่าน การทดสอบนี้จะต้องนำอุปกรณ์หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทดสอบไปจัดวางในห้องปิดกั้นคลื่นสนามไฟฟ้าแบบกึ่งไร้คลื่นสะท้อน (Semi-Anechoic Chamber) ที่มีขนาดระยะทดสอบ 3 เมตร และวัดสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากตัวอุปกรณ์โดยใช้สายอากาศชนิดพิเศษแบบไบ-ล็อก (Bi-log antenna) เป็นตัวรับสัญญาณและแสดงผลการวัดที่ได้ที่เครื่องวัดสัญญาณรบกวน และเทียบผลที่วัดได้กับค่าขีดจำกัดที่ระบุในมาตรฐานสำหรับการทดสอบในหมวดนี้จะเริ่มทดสอบที่ความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การจัดวางผลิตภัณฑ์เพื่อทำการทดสอบการแผ่รบกวนผ่านทางอากาศ

ในการทดสอบการแผ่รบกวนผ่านทางอากาศ จะมีมาตรฐานที่นำมาใช้ในการทดสอบคือ CISPR 22 เป็นตัวกำหนดว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แต่ละชิ้นจะผ่านหรือไม่ผ่าน ซึ่งจากรูปที่ 2.4 จะเป็นรูปการจัดวางการทดสอบของคอมพิวเตอร์เพื่อทดสอบการแผ่คลื่นออกมารบกวนภายนอก การทดสอบจะมีผลรายงานออกมาดังรูปข้างล่างนี้



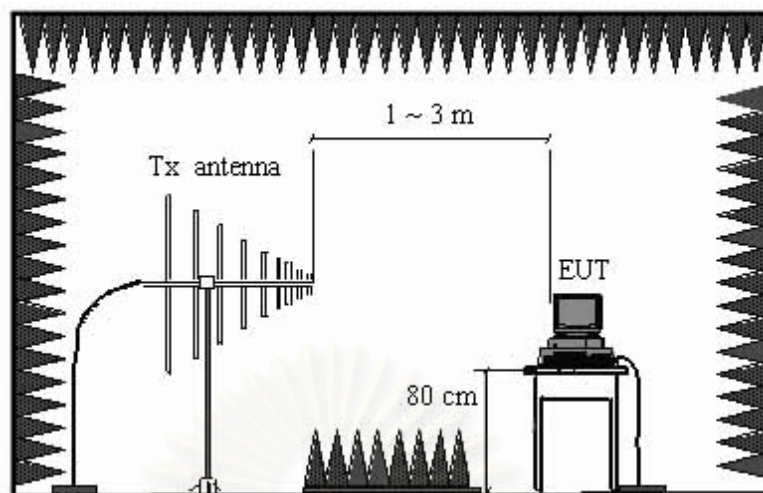
รูปที่ 2.5 ผลการทดสอบการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามมาตรฐาน CISPR 22

จากรูปที่ 2.5 จะสังเกตว่าจะมีเส้นขีดจำกัด (limit line) อยู่ 2 ช่วงคือ ช่วงความถี่ 30 – 230 MHz และช่วงความถี่ 230 – 1000 MHz ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ประมาณ 800 MHz จะพบว่าการแพร่มีค่าเกินเส้นขีดจำกัด โดยในกรณีนี้จะถือว่าอุปกรณ์ชิ้นนี้ไม่ผ่านการทดสอบ และในการทดสอบที่ผ่านมาพบว่าในการทดสอบคอมพิวเตอร์ส่วนมากจะมีการแพร่ที่สูงในช่วงความถี่ 650 – 900 MHz ซึ่งในบางครั้งทำให้เกินค่าเส้นขีดจำกัด ส่งผลให้อุปกรณ์ชิ้นนั้นๆ ทดสอบไม่ผ่าน

2.1.4 การทดสอบภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Susceptibility Testing: EMS)

การทดสอบในหมวดนี้จะเป็นการสร้างสภาวะแวดล้อมทางแม่เหล็กไฟฟ้าจำลอง ขึ้นไปรบกวนการทำงานของผลิตภัณฑ์หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้รับรู้ความสามารถในการต้านทานการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์หรือผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปแล้วระบบหรืออุปกรณ์ต่างๆ จะมีภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่แล้ว แต่การใช้งานบางกรณีหรือในบางสถานที่จะมีระดับความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสูง เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรม ในห้องเก็บข้อมูล หรือในสถานที่ที่อาจต้องการระดับภูมิคุ้มกันที่สูงกว่าระดับปกติ ตามมาตรฐานภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งระดับภูมิคุ้มกันออกเป็น 4 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 สามารถทำงานได้โดยปกติ ไม่มีผลกระทบเมื่อได้รับสัญญาณรบกวน กลุ่มที่ 2 มีอาการผิดปกติเมื่อได้รับสัญญาณรบกวน แต่เมื่อสัญญาณรบกวนหายไปแล้ว สามารถกลับไปทำงานได้ตามปกติ กลุ่มที่ 3 มีอาการผิดปกติเมื่อได้รับสัญญาณรบกวน แต่ไม่สามารถกลับไปทำงานตามปกติได้เอง และกลุ่มที่ 4 เครื่องเสียหายหรือถูกทำลาย ไม่สามารถใช้งานได้อีก ในการทดสอบเพื่อหาระดับภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ จึงเป็นการทดสอบว่าผลิตภัณฑ์นั้นๆ สามารถทนต่อการรบกวนได้ตามที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ โดยมาตรฐานการทดสอบทางด้านภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายหัวข้อ ดังนี้ [2]

การทดสอบทางด้านนี้จะทำในมาตรฐาน IEC 61000 ซึ่งมีการทดสอบอยู่หลายด้าน แต่มีการทดสอบตามมาตรฐานในหัวข้อการทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Radiated Immunity Testing: IEC 61000-4-3) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับการทดสอบในหัวข้อการทดสอบการแพร่รบกวนผ่านทางอากาศ (Radiated EMI Testing) โดยจะทำการวัดตรงข้ามกันคือ จะเปลี่ยนจากสายอากาศเป็นตัวรับการแพร่คลื่นมาเป็นตัวส่งคลื่นรบกวนแทน แล้วทำการวัดค่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตามระดับภูมิคุ้มกันทั้ง 4 กลุ่ม



รูปที่ 2.6 การทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นวิทยุ

ในการทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นวิทยุตามมาตรฐาน IEC 61000-4-3 จะต้องนำอุปกรณ์ที่ทดสอบไปวางในห้องทดสอบซึ่งสามารถปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเรียกว่า Anechoic chamber ห้องดังกล่าวจะป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จากภายในออกสู่ด้านนอกและลดการรบกวนจากสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกเข้าสู่ด้านในห้อง จากนั้นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งกำเนิดโดยเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ (signal generator) ที่ความถี่ 80 MHz ถึง 1 GHz จะถูกขยายกำลังให้มากขึ้นโดยใช้เครื่องขยายกำลัง (power amplifier) และถูกส่งออกอากาศในรูปของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการใช้สายอากาศตัวส่ง (transmitter antenna) ไปรบกวนการทำงานของผลิตภัณฑ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งวางอยู่ในห้อง ตัวอย่างของการทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นวิทยุของเครื่องคอมพิวเตอร์แสดงในรูปที่ 2.6 จากรูปจะเห็นว่าอุปกรณ์ทดสอบ (Equipment Under Test: EUT) ถูกวางอยู่บนโต๊ะสูง 80 เซนติเมตร และห่างจากสายอากาศตัวส่ง 3 เมตร จะพบว่าเครื่องมือในการทดสอบภูมิคุ้มกันนี้คล้ายกับการทดสอบการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ (radiated emission) แต่ต่างกันในเรื่องวิธีการในการทดสอบ คือ ในการทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นวิทยุ สายอากาศที่ใช้ จะเป็นตัวส่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกไปรบกวนการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ แต่การทดสอบการแผ่คลื่นของอุปกรณ์ สายอากาศที่ใช้จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ระดับของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งออกไปรบกวนการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะขึ้นอยู่กับย่านการใช้งาน ว่าเป็นย่านที่อยู่อาศัย ย่านอุตสาหกรรม หรือย่านการทหาร

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานการทดสอบทางด้านภูมิคุ้มกันทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ชื่อมาตรฐาน	รหัสมาตรฐาน
คำแนะนำ คำจำกัดความ และความเป็นมาของการทดสอบภูมิคุ้มกัน Overview of Immunity testing	IEC 61000-4-1
การทดสอบภูมิคุ้มกันทางไฟฟ้าสถิตย์ Electrostatic Discharge Immunity Testing (ESD)	IEC 61000-4-2
การทดสอบภูมิคุ้มกันคลื่นวิทยุ Radio Frequency Radiated Immunity Testing (RI)	IEC 61000-4-3
การทดสอบภูมิคุ้มกันการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วครู่แบบรวดเร็ว Electrical Fast Transient/Burst Immunity Testing	IEC 61000-4-4
การทดสอบภูมิคุ้มกันสัญญาณฟ้าผ่า Surge Immunity Testing	IEC 61000-4-5
การทดสอบภูมิคุ้มกันการรบกวนคลื่นวิทยุผ่านสายตัวนำไฟฟ้า Radio Frequency Conducted Immunity Testing	IEC 61000-4-6
การทดสอบฮาร์โมนิกส์บนแหล่งจ่ายกำลัง Harmonics on Power Supply	IEC 61000-4-7
การทดสอบภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กเชิงกำลัง Power Magnetic Field Immunity Testing	IEC 61000-4-8
การทดสอบภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กเชิงพัลส์ Pulse Magnetic Field Immunity Testing	IEC 61000-4-9
การทดสอบภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กแบบออสซิลเลต Damp Oscillatory Magnetic field Immunity	IEC 61000-4-10
การทดสอบภูมิคุ้มกันแรงดันไฟฟ้าตกและขาดหายชั่วขณะ Voltage Dips and Short Interruption	IEC 61000-4-11
การทดสอบภูมิคุ้มกันแบบคลื่นกระดิ่ง Ring Wave	IEC 61000-4-12

2.2 ทฤษฎีการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding Theory)

หลักของการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ การทำให้อิมพีแดนซ์ของเส้นทางในการแพร่คลื่นไม่ต่อเนื่องสามารถสะท้อนและดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาตกกระทบได้ หลักการของการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเหมือนกับการทำงานของตัวกรองสัญญาณ (filter) คือ ทำให้อิมพีแดนซ์ของสัญญาณรบกวนในตัวกลางไม่ต่อเนื่อง การปิดกั้นคลื่นจะนำไปใช้ในการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งจากภายนอกเข้าสู่ภายใน และป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายในออกสู่ภายนอก จะถูกนำไปใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อป้องกันปัญหาการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) โดยการปิดกั้นคลื่นจะช่วยลดทอนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมา เป็นการแก้ปัญหาขั้นตอนหนึ่งเพื่อให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตผ่านการทดสอบทางความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับตัวแปรที่ใช้พิจารณาคุณภาพของการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะขึ้นกับค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding Effectiveness: SE) ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลดพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไปรบกวนการทำงานของอุปกรณ์รอบข้าง ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำได้โดยหาจากการเทียบอัตราส่วนของการแพร่คลื่นในขณะที่มีไม่มีการปิดกั้นต่อการแพร่คลื่นในขณะที่มีแผงปิดกั้นคลื่น ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (2.1)-(2.2) ดังนี้ [2]

$$SE_E (dB) = 20 \log(E_0/E) \quad (2.1)$$

$$SE_H (dB) = 20 \log(H_0/H) \quad (2.2)$$

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

- Passive shielding เป็นรูปแบบการปิดกั้นคลื่นโดยอาศัยคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งจะประกอบไปด้วยค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability) และค่าความนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ในวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) เช่น ซิลิกอนสตีล (silicon steel) จะช่วยเบนทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็กไปในทิศทางที่ไม่ต้องการได้ ซึ่งก็จะเป็นการช่วยปิดกั้นคลื่นในบริเวณที่ต้องการได้ ส่วนในวัสดุประเภทที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูง เช่น ทองแดง จะช่วยในการเกิดปรากฏการณ์กระแสวน (eddy current) ที่บริเวณผิวหน้าวัสดุ โดยจะมี

ประสิทธิภาพที่ดีในกรณีนี้วัสดุนี้มีทั้งค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ และค่าความนำไฟฟ้าที่สูงด้วยกันทั้งคู่

- Active shielding รูปแบบนี้เป็นการใช้เรื่องของกรรนำกระแสจากตัวนำมาทำให้เกิดการหักล้าง (cancel) ของสนามด้วยตัวเอง โดยจะใช้การที่กระแสไหลผ่านคอยล์ (coil) ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และกระแสจะถูกควบคุมให้เกิดรูปแบบสนามที่แตกต่างกันไป โดยปกติแล้ววิธีการปิดกั้นนี้จะใช้กันมากในบริเวณที่จำกัดเท่านั้น

ในการพิจารณาการปิดกั้นคลื่นจะพบว่า คุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุเป็นเรื่องสำคัญสำหรับการคำนวณหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่น ดังนั้นหัวข้อถัดไปจึงจะนำเสนอทฤษฎีสนามเพื่อให้ทราบถึงที่มาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และเรื่องของค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ของวัสดุชนิดต่างๆ เพื่อนำไปคำนวณหาความลึกผิว (skin depth) ซึ่งมีผลต่อการปิดกั้นคลื่น

2.2.1 ทฤษฎีสนาม (Field Theory)

สนามไฟฟ้า (Electric fields) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic fields) มีความสัมพันธ์กันตามสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) ซึ่งการศึกษาการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของสนามทั้ง 2 แบบ นอกจากนี้ต้องยังเกี่ยวข้องกับระยะทางของการแพร่ในสนามระยะใกล้ (Near fields) และสนามระยะไกล (Far fields) ด้วย โดยสามารถอธิบายสนามทั้ง 2 ที่เกิดจากมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำแบบ short wire ซึ่งมีความยาว (D) ที่น้อยกว่าความยาวคลื่น (λ) ได้ดังนี้

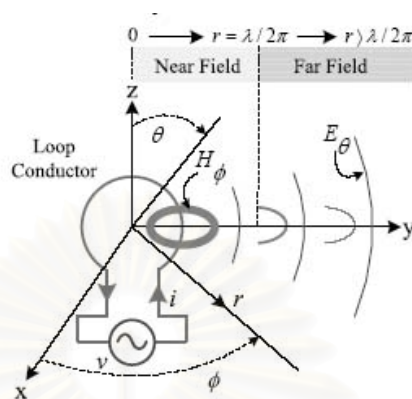
$$E_{\theta} = \frac{Z_0 I D \pi \sin \theta}{\lambda^2} \left[-\left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^3 \cos \varphi - \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^2 \sin \varphi + \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right) \cos \varphi \right] \quad (2.3)$$

$$E_r = \frac{2Z_0 I D \pi \cos \theta}{\lambda^2} \left[\left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^3 \cos \varphi + \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^2 \sin \varphi \right] \quad (2.4)$$

$$H_{\phi} = \frac{I D \pi \sin \theta}{\lambda^2} \left[\left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^2 \sin \varphi + \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right) \cos \varphi \right] \quad (2.5)$$

เมื่อ Z_0 คือ อิมพีแดนซ์ของอากาศมีค่า 370 โอห์ม, I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลใน short wire, θ คือ ขนาดของมุมในการแพร่, r คือ ระยะทางถึงจุดทดสอบ และ φ คือ ตัวแปร

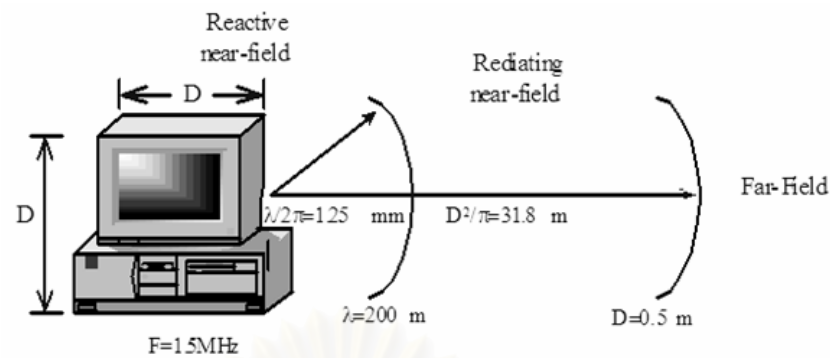
เฟสมีค่าเป็น $(2\pi r/\lambda) - \omega t$ และจากสมการข้างต้นจะสังเกตว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจะมีแต่
 ละเทอมที่แปรผกผันกับระยะทาง ซึ่งแต่ละเทอมมีชื่อเรียก คือ $E \propto 1/r^3$ เรียกว่า Quasi-
 stationary term, $E \propto 1/r^2$ เรียกว่า Induction term และ $E \propto 1/r$ เรียกว่า Radiation term



รูปที่ 2.7 สนามไฟฟ้าและแม่เหล็กจากกระแสวง

2.2.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้และระยะไกล (Near field and far field)

การศึกษาพฤติกรรมการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งกรณีศึกษาออกได้
 ตามลักษณะของแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยทั่วไปจะทำให้ทฤษฎีของสายอากาศไดโพลและ
 สายอากาศแบบลูบดังแสดงในรูปที่ 2.7 บริเวณรอบๆ ของสายอากาศหรือแหล่งกำเนิดอื่นๆ ถูก
 แบ่งออกเป็น 3 บริเวณคือ บริเวณสนามระยะใกล้แบบ Reactive (reactive near field) บริเวณ
 สนามระยะใกล้แบบ Radiating (radiating near field) และแบบสุดท้ายคือบริเวณสนามระยะไกล
 (far field) โดยบริเวณสนามระยะใกล้แบบ Reactive ลักษณะของสนามลดลงตามค่า $E \propto 1/r^m$
 และ $H \propto 1/r^n$ เมื่อ $m, n > 1$ และขอบด้านนอกของสนามแบบนี้ เป็น $r = \lambda/2\pi$ เมื่อ λ เป็น
 ความยาวคลื่น ส่วนบริเวณสนามระยะใกล้แบบ Radiating (radiating near field) จะพบว่า การ
 ทำนายสนามในระยะนี้ไม่สามารถทำได้เพราะสนามจะแกว่งแบบไม่คงที่ โดยมีขอบด้านนอกอยู่ที่
 $D^2/4\lambda$ ระยะนี้อยู่ระหว่าง บริเวณสนามระยะใกล้แบบ Reactive และสนามระยะไกล บริเวณนี้
 จะไม่เกินระยะ $D \ll \lambda$ เมื่อ D เป็นค่ามากที่สุดของมิติของแหล่งกำเนิด และแบบสุดท้ายคือ
 บริเวณสนามระยะไกล (far field) สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางการ
 แพร่กระจายคลื่นและตั้งฉากต่อกันตามระนาบคลื่น สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กลดลงตาม
 ระยะ $1/r$ โดยสนามระยะต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงระยะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

2.2.3 อิมพีแดนซ์คลื่น (Wave impedance)

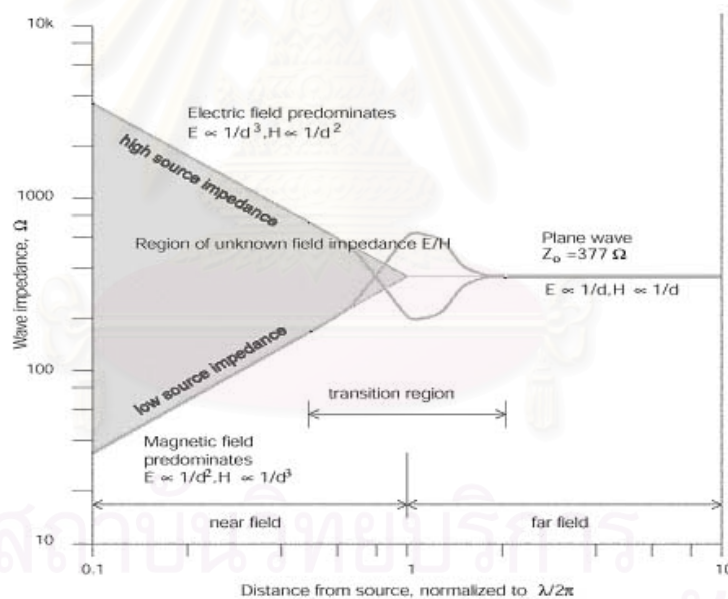
ถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก โดย
 มี $Z_w = E/H$ และอิมพีแดนซ์คลื่นระนาบ หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางจะถูกกำหนดให้
 เป็น $Z_w = \sqrt{\mu/\epsilon}$ โดยอิมพีแดนซ์คลื่นระนาบในอากาศมีค่าเป็น 120π หรือ 377 โอห์ม และใน
 การหาอิมพีแดนซ์คลื่นที่เคลื่อนที่บนอากาศยังแบ่งออกได้ตามระยะของการแพร่ด้วย โดยค่า
 120π คือค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดในสนามระยะไกล ในรูปที่ 2.9 แสดงค่าอิมพีแดนซ์คลื่นที่สนาม
 ระยะใกล้และไกล จะสังเกตว่าที่สนามระยะไกลจะมีค่าอิมพีแดนซ์คลื่นคงที่ตลอด 377 โอห์ม แต่
 ในสนามระยะใกล้จะพบว่ามีการแบ่งแยกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่แสดงสนามไฟฟ้ามากกว่าเรียกว่า
 high source impedance เพราะมีค่าของอิมพีแดนซ์มีค่ามากกว่าคลื่นระนาบ ซึ่งคำนวณได้จาก
 สมการที่ (2.6)

$$Z_w = Z_0 (\lambda / (2\pi r)) \quad (2.6)$$

ซึ่งจะพบว่าที่ส่วนนี้ สนามไฟฟ้าจะแปรผกผันกับระยะทางกำลังสามในขณะที่สนามแม่เหล็กจะ
 แปรผกผันกับระยะทางกำลังสอง นั่นแสดงว่า ส่วนนี้จะแสดงค่าของสนามไฟฟ้ามากกว่า
 สนามแม่เหล็ก ในกรณีนี้แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นสายอากาศแบบเส้นตรง อีกส่วน
 หนึ่งจะถูกเรียกว่า low source impedance เนื่องจากมีค่าอิมพีแดนซ์ที่น้อยกว่าส่วนคลื่นระนาบ
 สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.7)

$$Z_w = Z_0 (2\pi r / \lambda) \quad (2.7)$$

ซึ่งในส่วนนี้สนามไฟฟ้าแปรผกผันกับระยะทางกำลังสอง ในขณะที่ สนามแม่เหล็กจะแปรผกผันกับระยะทางกำลังสาม ซึ่งส่วนนี้จะแสดงค่าของสนามแม่เหล็กมากกว่าสนามไฟฟ้า จะสังเกตว่าอิมพีแดนซ์คลื่นจะขึ้นอยู่กับระยะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย จากสนามระยะใกล้จะพบว่าอิมพีแดนซ์จะคงที่อยู่ที่ค่า 377 โอห์ม ในขณะที่สนามระยะใกล้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักที่แบ่งตามการแสดงอำนาจของประเภทสนามออกมา โดยจะแบ่งออกเป็นช่วง high impedance ที่แสดงค่าของความต่างศักย์สูงแต่ค่าของกระแสต่ำ จึงแสดงประเภทเป็นสนามไฟฟ้าออกมา และอีกช่วงหนึ่งคือ low impedance ที่แสดงค่าตรงกันข้าม กล่าวคือจะมีค่าความต่างศักย์ต่ำแต่ค่าของกระแสสูง จึงแสดงประเภทของสนามแม่เหล็กออกมา จะพบว่าในกรณีของสนามระยะใกล้ประเภทของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กจะต้องพิจารณาแยกกัน เนื่องจากว่าค่าอัตราส่วนของสนามทั้งสองไม่คงที่ จึงแสดงประเภทของสนามที่แตกต่างกัน แต่ในขณะที่สนามระยะไกลอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กคงที่ (377 โอห์ม) ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงคลื่นระนาบจึงมักจะหมายถึงการพิจารณาที่สนามระยะไกล แต่ถ้าต้องการแยกพิจารณาเป็นสนามทั้งสองประเภท จะหมายถึงการทำกรวัดที่สนามระยะใกล้



รูปที่ 2.9 ค่าอิมพีแดนซ์คลื่นโดยเปรียบเทียบกับระยะทางจากแหล่งจ่าย

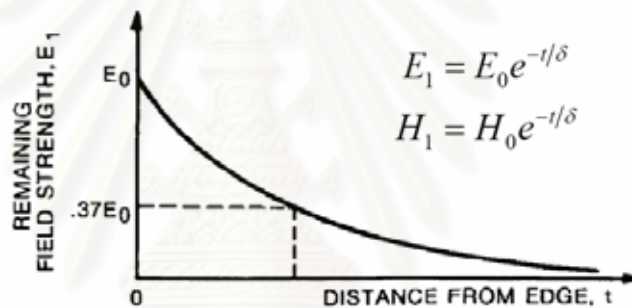
2.2.4 อิมพีแดนซ์โลหะ (Metal impedance) และความลึกผิว (Skin depth)

คุณสมบัติของโลหะแต่ละชนิด จะทำให้ค่าของการแพร่คลื่นที่ได้แตกต่างกันไป อิมพีแดนซ์โลหะเป็นตัวแปรหนึ่งในการปิดกั้นคลื่น โดยค่าของมันจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของโลหะแต่ละชนิด ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติและค่าอิมพีแดนซ์ดังนี้

$$Z_m = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \approx \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} \quad (\Omega) \quad \text{for metal } \sigma \gg \omega\epsilon \quad (2.8)$$

ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์จะเป็นตัวแปรที่สำคัญ ในการพิจารณานำวัสดุมาใช้ในการทำแผ่นปิดกั้นคลื่น นอกจากค่าอิมพีแดนซ์ของโลหะแล้วยังมีค่าของความลึกผิว ซึ่งค่าความลึกผิว คือ ระยะทางจากผิวที่ความเข้มกระแสลดลงไป $1/e$ หรือประมาณ 37 เปอร์เซ็นต์จากที่ผิวโดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.9) ซึ่งค่าความลึกผิวนี้นำไปใช้ในการคำนวณการสูญเสียแบบดูดซับ ซึ่งจะสังเกตว่าค่าความลึกผิวจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก และค่าความนำไฟฟ้า นอกจากนี้ยังจะสังเกตได้อีกว่าค่าของความถี่ก็มีผลต่อค่าความลึกผิวอีกด้วย จากตารางที่ 2.4 จะแสดงถึงค่าความลึกผิวของวัสดุต่างๆ

$$\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.10 ค่าความลึกผิวจะเป็นค่าระยะทางที่ขนาดสนามลดลง 37 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าความลึกผิว (skin depth) ของวัสดุต่างๆ

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

2.2.5 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding Effectiveness: SE)

Effectiveness: SE)

การปิดกั้นคลื่นจะพิจารณาจากตัวแปรที่สูญเสียใน 3 แบบด้วยกันคือ การสูญเสียจากการสะท้อน (Reflection loss) การสูญเสียจากการดูดซับ (Absorption loss) และการสูญเสียจากการสะท้อนกลับ (Re-Reflection loss) ซึ่งการสูญเสียทั้ง 3 แบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงทิศทางการแพร่คลื่นจากทางด้านซ้ายมาทางด้านขวา โดยการสูญเสียแบบแรกจะเกิดจากการที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านอากาศ และมาสะท้อนที่แผ่นปิดกั้นพลังงานส่วนหนึ่งจึงเกิดการสูญเสียไป ต่อมาเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านแผ่นปิดกั้นจะเกิดการลดทอนขึ้น นั่นก็คือการสูญเสียแบบที่ 2 คือ การสูญเสียแบบการดูดซับ การสูญเสียแบบนี้จะขึ้นอยู่กับความหนา และค่าซึมซาบแม่เหล็ก (permeability) ของวัสดุที่ใช้ ส่วนแบบสุดท้าย คือการสูญเสียแบบการสะท้อนกลับอีกครั้ง เนื่องจาก คลื่นจะเคลื่อนที่ออกจากแผ่นโลหะเข้าสู่อากาศจึงมีส่วนหนึ่งที่เกิดการสะท้อนกลับอีกครั้ง โดยการหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นสามารถกำหนดได้จากความสัมพันธ์อีกแบบได้ดังนี้ [4]

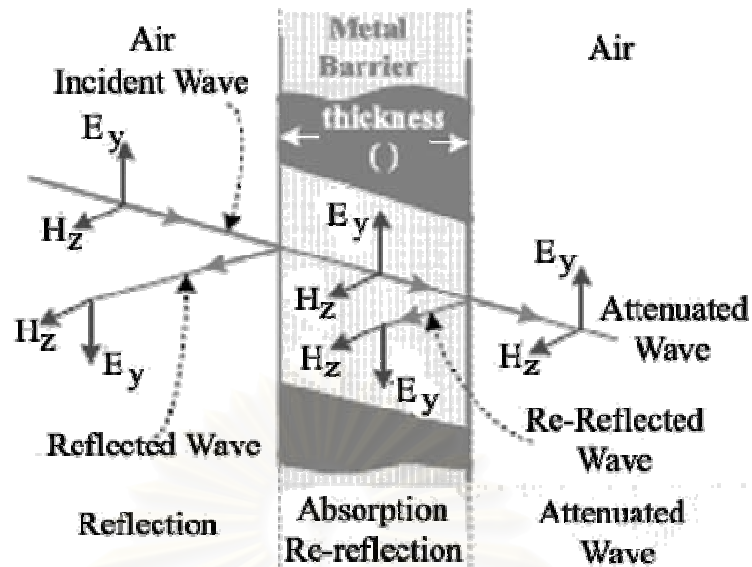
$$SE_{dB} = A_{dB} + R_{dB} + RR_{dB} \quad (2.10)$$

$$A_{dB} = 131.4t_{mm} \sqrt{f_{MHz} \mu_r \sigma_r} \quad (2.11)$$

$$R_{dB} = 20 \log \left| \frac{(1+k)^2}{4k} \right| \quad (2.12)$$

$$RR_{dB} = 20 \log \left| 1 - \left(\frac{k-1}{k+1} \right)^2 e^{-0.23 A_{dB} (1+j)} \right| \quad (2.13)$$

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



รูปที่ 2.11 การแพร่ของคลื่นผ่านแผ่นปิดกั้น

2.2.6 การสูญเสียจากการดูดซับ (Absorption loss)

เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ทะลุผ่านตัวกลางจะทำให้ขนาดของแอมพลิจูดลดลงแบบเอกโพเนนเชียล (exponential) ปรากฏการณ์นี้เป็นเพราะว่ามีการเปลี่ยนพลังงานเป็นพลังงานความร้อนซึ่งสามารถแสดงได้ตามความสัมพันธ์ดังนี้ $E_1 = E_0 e^{-t/\delta}$ สำหรับคลื่นไฟฟ้าและ $H_1 = H_0 e^{-t/\delta}$ สำหรับคลื่นแม่เหล็ก โดย E_1 และ H_1 เป็นความเข้มของสนามที่ระยะทาง t ในตัวกลางที่ทำให้พลังงานลดลงไปที่ $1/e$ หรือ 37 เปอร์เซ็นต์ซึ่งนั่นก็คือค่าของความลึกผิว (skin depth) นั่นเอง ค่าความลึกผิวจะแตกต่างกันไปตามคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ คือ ค่าความหนา (t) ค่าความนำสัมพัทธ์ (relative conductivity: σ_r) และค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability: μ_r) นอกจากนี้ค่าความลึกผิวยังขึ้นอยู่กับค่าความถี่ที่นำแผ่นปิดกั้นไปใช้อีกด้วย เพื่อให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของค่าความลึกผิวกับค่าการสูญเสียจากการดูดซับสามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบของความสัมพันธ์ได้จากสมการดังนี้

$$A = 20 \left(\frac{t}{\delta} \right) \log(e) = 8.69 \left(\frac{t}{\delta} \right) \text{ dB} \quad (2.14)$$

จากสมการข้างต้นจะพบว่า การสูญเสียจากการดูดซับในแผ่นปิดกั้นของ 1 ช่วงความลึกผิวจะประมาณ 9 dB ซึ่งถ้าใช้แผ่นกั้นที่หนาขึ้นก็สามารถทำให้เกิดการสูญเสียได้เพิ่มขึ้นเช่นกัน กล่าวคือเมื่อเพิ่มความหนาให้เพิ่มเป็น 2 ช่วงความลึกผิว ค่าการสูญเสียจากการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอีก 9 dB นอกจากนี้จะต้องการปิดกั้นคลื่นให้มากตามต้องการแล้วจะต้องคำนึงถึงการแพร่ของความร้อนด้วย

2.2.7 การสูญเสียจากการสะท้อน (Reflection loss and Re-Reflection loss)

การสูญเสียแบบนี้จะเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง 2 ตัวที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่างกัน และค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นไปตามสมการดังนี้

$$E_1 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E_0 \quad (2.15)$$

$$H_1 = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} H_0 \quad (2.16)$$

E_0, H_0 เป็นค่าความเข้มสนามของคลื่นตกกระทบ ในขณะที่ E_1, H_1 เป็นค่าความเข้มสนามของคลื่นที่ผ่านออกไป และเนื่องจากคลื่นจะเคลื่อนที่ออกจากแผ่นปิดกั้นออกสู่ภายนอกจึงมีการสะท้อนเกิดขึ้นอีกครั้งจากตัวกลางที่เป็นแผ่นปิดกั้นออกสู่อากาศ ในส่วนนี้จะยังไม่คำนึงถึงการสูญเสียจากการดูดซับของคลื่นเนื่องจากความหนาของตัวกลาง ดังนั้นความเข้มของสนามคลื่นทั้งสองที่เคลื่อนที่ออกไปสู่ภายนอกจะเป็นตามสมการดังนี้

$$E_t = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} E_1 \quad (2.17)$$

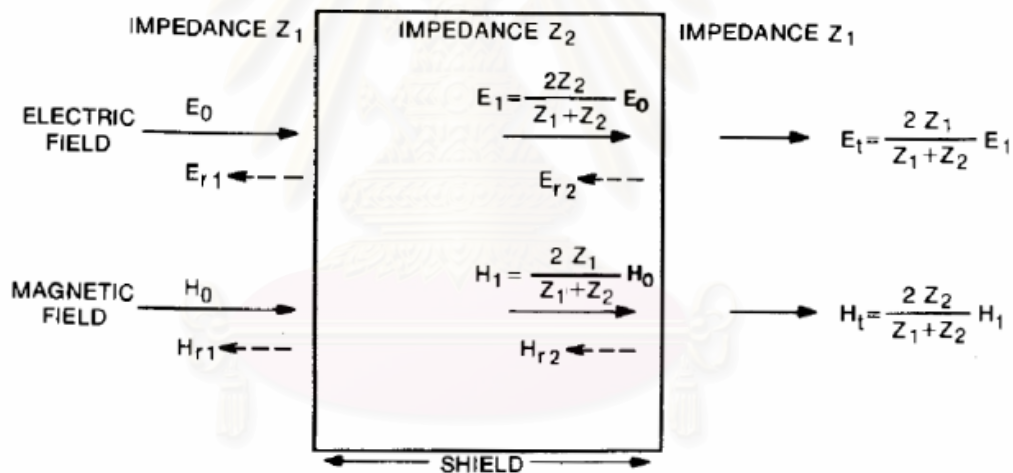
$$H_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} H_1 \quad (2.18)$$

โดยสมการแสดงความสัมพันธ์ของการสูญเสียจากการสะท้อนจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวกลางทั้ง 2 ตัวที่คลื่นเดินทางผ่าน เมื่อแผ่นปิดกั้นเป็นโลหะและพื้นที่โดยรอบเป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้วจะพบว่า $Z_1 \gg Z_2$ ซึ่งภายใต้เงื่อนไขในกรณีของสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดการสะท้อนเกิดขึ้นอย่างมากในขอบเขตแรก (จากอากาศเข้าสู่แผ่นปิดกั้น) แต่ในกรณีของสนามแม่เหล็กจะพบว่าเกิดการสะท้อนกลับขึ้นในส่วนขอบเขตที่สอง (จากแผ่นปิดกั้นออกสู่อากาศ) โดยการเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ทำให้สรุปได้ว่า ในกรณีของสนามไฟฟ้าวัสดุที่บางจะสามารถทำให้เกิดการสูญเสียจากการสะท้อนได้เป็นอย่างดี และในกรณีที่กำหนดให้ $Z_1 \gg Z_2$ จะได้ความสัมพันธ์ของความเข้มสนามของทั้ง 2 ประเภทย่อยออกสู่ภายนอกดังนี้

$$E_t = \frac{4Z_2}{Z_1} E_0 \quad (2.19)$$

$$H_t = \frac{4Z_2}{Z_1} H_0 \quad (2.20)$$

เมื่อนำความสัมพันธ์ของความเข้มสนามคลื่นที่เข้ามากระทบ และความเข้มของสนามที่แพร่ออกไป (E_0 กับ E_t และ H_0 กับ H_t) จะทำให้ได้ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแบบการสูญเสียจากการสะท้อนตามสมการที่ (2.12) โดยที่กล่าวมาตั้งแต่ต้นเป็นการคำนวณการสูญเสียจากการสะท้อนของคลื่นระนาบที่ทำมุมตั้งฉากกับพื้นผิวแผ่นปิดกั้น ซึ่งการสูญเสียแบบนี้จะเพิ่มมากขึ้นตามมุมที่ตกกระทบ โดยจากความสัมพันธ์ของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นเนื่องจากการสูญเสียในการสะท้อนจะได้ว่า เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของโลหะที่นำมาทำแผ่นปิดกั้นมีค่าน้อยจะทำให้เกิดการสูญเสียจากการสะท้อนมีค่ามากขึ้น และการใช้วัสดุที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำๆ สามารถเลือกได้จากคุณสมบัติของวัสดุที่มีค่าความนำไฟฟ้าที่สูงๆ และมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กที่ต่ำๆ ในส่วนของสนามในระยะใกล้ (near field) การพิจารณาจะแตกต่างออกไปเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ไม่ได้อิงที่ 377 โอห์มเหมือนในสนามระยะไกล (far field) แต่ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้ออิมพีแดนซ์คลื่น ดังนั้นเมื่อมีค่าอิมพีแดนซ์ที่สูง (สนามจะแสดงเป็นคลื่นไฟฟ้า) จะเกิดการสูญเสียจากการสะท้อนมากกว่าคลื่นระนาบ ในทางเดียวกันเมื่อมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำ (สนามจะแสดงเป็นคลื่นแม่เหล็ก) จะเกิดการสูญเสียที่น้อยกว่า



รูปที่ 2.12 การสะท้อนกลับของคลื่นเมื่อผ่านพื้นผิวของวัสดุปิดกั้น

โดยทั่วไปแล้วแผ่นโลหะซึ่งมีความหนามากกว่า 0.5 มิลลิเมตรมีค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 1 MHz ถึง 100 MHz ปัญหาที่พบจากการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือไม่สามารถกรองสัญญาณรบกวนที่ความถี่ต่ำๆ ได้ รูปร่างของกล่องปิดกั้นมีผลต่อการปิดกั้นด้วย กล่องที่ใช้ในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีจะต้องมีขนาดใหญ่ โดยจะต้องมีระยะห่างระหว่างวงจรถับผิวด้านในของกล่องมีค่ามากๆ เพื่อที่จะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากวงจรถูกกักอยู่ในกล่องนอกจากนี้จะต้องไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์รีโซแนนซ์ขึ้นภายในกล่อง โดยต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้ผนังของกล่องขนานกับทิศทางการแพร่คลื่นนิ่ง (standing wave) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดรีโซแนนซ์ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการกรองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าลดลง

โดยทั่วไปสำหรับรูปร่างของกล่องปิดกั้นที่ดีควรมีเหลี่ยมมุมมาก ๆ เพื่อป้องกันการเกิดรีโซแนนซ์ หรือหลีกเลี่ยงการขนานกันของผนังปิดกั้นจากความกว้าง ความยาว และความสูงของผนังปิดกั้น ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงกล่องแบบที่มีความกว้าง ความยาว และความสูงเท่ากัน กำหนดให้ด้านยาวของกล่องยาวกว่าด้านกว้าง ตัวอย่างเช่น ด้านยาวของกล่องปิดกั้นยาวกว่าด้านกว้าง 1.5 เท่า จะทำให้ฮาร์มอนิกรีโซแนนซ์ที่ 2 ของด้านกว้างทับกับฮาร์มอนิกที่ 3 ของด้านยาว ดังนั้นจึงควรจัดให้ด้านยาวและด้านกว้างไม่เป็นอัตราส่วนกัน ในกรณีของปรากฏการณ์ทางผิว (skin effect) ก็มีผลต่อการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยเหมือนกันสนามแพร่ผ่านจากอากาศมาจากสองส่วนหลัก คือ สนามไฟฟ้า (E-Field) และสนามแม่เหล็ก (H-Field) โดยที่ระยะทางห่างจากแหล่งกำเนิดมากกว่า $\lambda/2\pi$ อัตราส่วนของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กจะมีค่าเท่ากับ 377 โอห์ม หรือเรียกอัตราส่วนนี้ว่า อิมพีแดนซ์คลื่น (wave impedance) สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะรวมกันกลายเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave: EM) โดยสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก และตั้งฉากกับทิศทางการแพร่คลื่น ตามปกติเราสามารถกั้นสนามไฟฟ้าได้โดยการใช้แผ่นโลหะบางๆ เช่น ฟลอยด์ เพราะแผ่นฟลอยด์ที่นำมาใช้กับสนามไฟฟ้า จะทำให้เกิดเส้นทางในการเคลื่อนที่ของประจุใกล้ขึ้นดังนั้นการใช้วัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง ๆ (ความต้านทานต่ำ ๆ) มานั้นจะทำให้อิมพีแดนซ์ของการแพร่คลื่นลดลง ที่ความถี่สูงๆ กระแสก็เคลื่อนที่เฉพาะที่บริเวณผิวเท่านั้น การปิดกั้นสนามไฟฟ้าที่ความถี่สูงๆ จึงทำได้ง่าย โดยการใช้เพียงแผ่นอลูมิเนียมฟลอยด์เท่านั้น แต่การปิดกั้นสนามแม่เหล็กทำได้ยากกว่า เพราะขณะที่วัสดุที่ใช้ปิดกั้น เช่น โลหะมาขวางทางของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสวน (eddy current) ที่ผิวด้านในของกล่อง และทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำเข้าสู่ภายในกล่อง ดังนั้นการปิดกั้นสนามแม่เหล็กโดยการใช้แผ่นอลูมิเนียมฟลอยด์จึงไม่สามารถปิดกั้นสนามแม่เหล็กได้ นอกจากนี้ความลึกผิว (skin depth) ของกระแสในพื้นผิวของวัสดุที่ใช้ทำกล่องปิดกั้นยังขึ้นกับความถี่ของสนามแม่เหล็กด้วย ถ้าความลึกผิวของวัสดุที่ใช้ทำกล่องปิดกั้นคลื่นทำให้สนามแม่เหล็กลดลง 9 dB ดังนั้นถ้าเพิ่มความหนาของผิววัสดุปิดกั้นขึ้น 3 เท่า จะทำให้สามารถกรองสนามแม่เหล็กได้ลดลง 27 dB ด้วย ค่าปรากฏการณ์ทางผิวจะมีความสำคัญมากเมื่อความถี่มีค่าต่ำ ๆ เพราะที่ระยะนี้สนามแม่เหล็กจะมีค่ามากกว่าสนามไฟฟ้า และอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำกว่า 377 โอห์ม การปิดกั้นสนามแม่เหล็กในระยะใกล้ๆ นี้จำเป็นต้องใช้แผ่นโลหะที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงๆ หรือความต้านทานต่ำมาก ๆ

แผ่นทองแดง และแผ่นอลูมิเนียมมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าแผ่นเหล็กมากกว่า 5 เท่า ดังนั้นการใช้แผ่นทองแดงและแผ่นอลูมิเนียมจึงเพียงพอสำหรับการปิดกั้นสนามไฟฟ้า แผ่นทองแดงและอลูมิเนียมมีค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (permeability) มีค่าประมาณ 1 หรือเท่ากับของอากาศ ในขณะที่แผ่นโลหะมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กประมาณ 300 ที่ความถี่ต่ำ และจะลดลงเมื่อ

ความถี่สูงขึ้นจนมีค่าเป็น 1 เมื่อความถี่สูงขึ้นมากกว่า 100 kHz ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูง ๆ จะลดค่าความลึกผิวลง ดังนั้นการใช้วัสดุที่มีความหนาหลายๆ เช่น เหล็ก จะสามารถกรองสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่ำได้ดีกว่าของทองแดงและอลูมิเนียม วัสดุที่ใช้ในการกรองสนามแม่เหล็กที่ดีจะต้องมีค่าความนำไฟฟ้าสูงและมีความหนาของผิวมากกว่าความลึกผิวที่ความถี่ต่ำที่สุด โดยแผ่นโลหะหนา 1 มิลลิเมตรที่เคลือบผิวด้วยสังกะสีนิยมนำไปประยุกต์ใช้ปิดกันสนามแม่เหล็กในงานทั่วไป

2.3 แบบจำลองการปิดกั้นคลื่นของกล่องปิดกั้นที่มีช่องเปิด

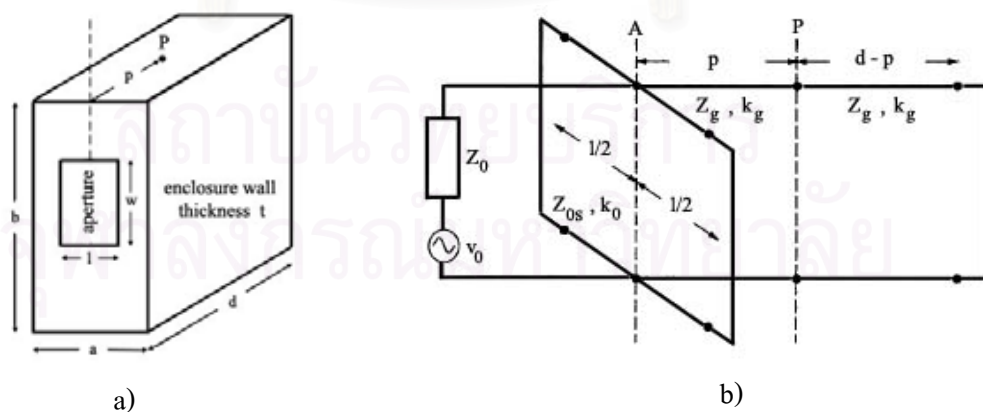
จากการใช้กล่องปิดกั้นคลื่นเพื่อลดการแพร่ของสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า แต่การนำมาใช้งานจริงมักจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการมีบรรยากาศ หรือช่องสำหรับสายไฟหรือสายเชื่อมต่อต่างๆ ดังนั้นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนมากจึงจะพบว่ามีช่องเปิดต่างๆ ปรากฏอยู่ด้วยการแพร่คลื่นที่ออกมาจากช่องเปิดเหล่านี้ทำให้เกิดปัญหาการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการปิดกั้นสามารถคำนวณได้ทั้งจากการวัดจริง และคำนวณโดยการนำหลักการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ได้แบ่งแยกออกเป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ วิเคราะห์ด้วยหลักเกณฑ์ (Analytical Formulation) และระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ซึ่งแต่ละประเภทยังข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป เช่น การวิเคราะห์ด้วยหลักเกณฑ์จะใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยกว่า แต่ในขณะที่ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะสามารถสร้างรูปทรงของการคำนวณได้หลากหลายกว่า ทั้งนี้ทำให้เวลาการคำนวณต้องใช้มากกว่าด้วย วิธีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้วิธีหนึ่ง โดยจะต้องทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์เนื่องจากต้องใช้การคำนวณที่ซับซ้อนมาก โดยปัญหาส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation: PDE) หรือสมการเชิงอินทิกรัล (Integral Equation) สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยโดยปกติจะถูกแก้สมการโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงอนุพันธ์จำกัด (Finite Differential Method) [8]-[10] หรือระเบียบวิธีขึ้นประกอบจำกัด (Finite Element Method: FEM) [11] ส่วนสมการอินทิกรัลจะใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ (Moment of Method: MoM) [13] ซึ่งจะสะดวกมากกว่า ในปัญหาทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีผู้นำเสนอการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบต่างๆ ไว้เพื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่น ซึ่งวิธีการหนึ่งที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้วงจรสมมูลของสายส่ง โดยวิธีการนี้เป็นรูปแบบหนึ่งของการวิเคราะห์ด้วยหลักเกณฑ์ และระเบียบวิธีโมเมนต์ ซึ่งได้ใช้โปรแกรมประยุกต์ FEKO ในการคำนวณ

2.3.1 แบบจำลองการวิเคราะห์ด้วยหลักเกณฑ์ (Analytical Formulation)

การวิเคราะห์ด้วยหลักเกณฑ์เป็นการจัดหาสมการมาอธิบายโดยค่าความถูกต้องไม่ได้แม่นยำมากนัก แต่ต้องการเน้นแนวโน้ม (trend) ของประสิทธิภาพการปิดกั้นมากกว่า ซึ่งเป็นบางครั้งใช้ได้ไม่ครอบคลุมทุกกรณี แต่สามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็ว เช่น งานวิจัยของ Hill et al. หรือจากการสมการของ Ott [3] ที่เสนอไว้ว่าประสิทธิภาพการปิดกั้นค้นหาได้จากสมการ $SE_E = 20 \log_{10}(\lambda/2l)$ เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น และ l คือความยาวของช่องเปิด นอกจากนี้ยังมีสมการของการแพร่คลื่นในระยะไกล (far field) ดังนี้

$$|E_{far}| = 4.0 \times 10^{-13} \frac{NV_s L^3 f^{3/2}}{\ln(1 + 0.66\alpha)r} \sqrt{\frac{Q}{R_s V}} \quad (2.21)$$

เมื่อ N คือ จำนวนของช่องเปิด, V_s คือ ศักย์ไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด, L คือ ความยาวของช่องเปิด, f คือ ความถี่, α คือ อัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของช่องเปิด, r คือระยะทางของแหล่งกำเนิดกับจุดวัด และ R_s คือ อิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการใช่วงจรสมมูลของสายส่ง โดยวิธีการนี้เป็นรูปแบบหนึ่งของการวิเคราะห์ด้วยหลักเกณฑ์ โดยช่องเปิดที่เป็นรูสี่เหลี่ยมในกล่องปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมสามารถแทนได้ด้วย วงจรเสมือนสมมูลโดยนำทฤษฎีในด้านสายส่ง (Transmission Lines) และท่อนำคลื่น (Waveguides) มาใช้ โดยจุดที่วัดค่าประสิทธิภาพการปิดกั้น คือ จุด P [6] ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 a) กล่องปิดที่มีช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยม

b) วงจรสมมูลของกล่องปิด

จากวงจรสมมูล จะหาประสิทธิภาพการปิดกั้นทางด้านไฟฟ้าหาได้จากการวัด ศักย์ไฟฟ้าที่จุด P และหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นทางด้านแม่เหล็กได้จากการวัดกระแสที่ไหล ผ่านจุด P นั่นเอง ซึ่งการแพร่ของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแทนด้วย v_0 ในขณะที่ค่า อิมพีแดนซ์ Z_0 คือค่าอิมพีแดนซ์ของอากาศมีค่าประมาณ 377 โอห์ม และในกล่องจะมีค่า characteristic impedance เป็น Z_0 ขณะที่ propagation constant เป็น k_g ที่ช่องเปิดของกล่อง จะใช้หลักการของสายส่งสตรีปโดยทำการลัดวงจรที่ด้านปลายแต่ละด้านเพราะต้องการพิจารณา กระแสของสายส่งบนด้านหน้าของกล่อง ความกว้างของกล่องมีขนาด b และความกว้างของช่อง เปิดมีขนาด w ทำให้ characteristic impedance มีค่าเป็น

$$Z_{0s} = 120\pi K(k_e)/K'(k_e) \quad (2.22)$$

โดย $k_e = w_e/b$ ซึ่งฟังก์ชัน $K(k_e)/K'(k_e)$ นิยามโดยสมการที่ (2.20) [7]

$$\frac{K(k_e)}{K'(k_e)} = \pi \left[\ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{1 - k_e^2}}{1 - \sqrt{1 - k_e^2}} \right) \right]^{-1} \quad (2.23)$$

ในขณะที่ effective width: w_e สามารถหาได้จากสมการที่ (2.21)

$$w_e = w - \frac{5t}{4\pi} \left(1 + \ln \frac{4\pi w}{t} \right) \quad (2.24)$$

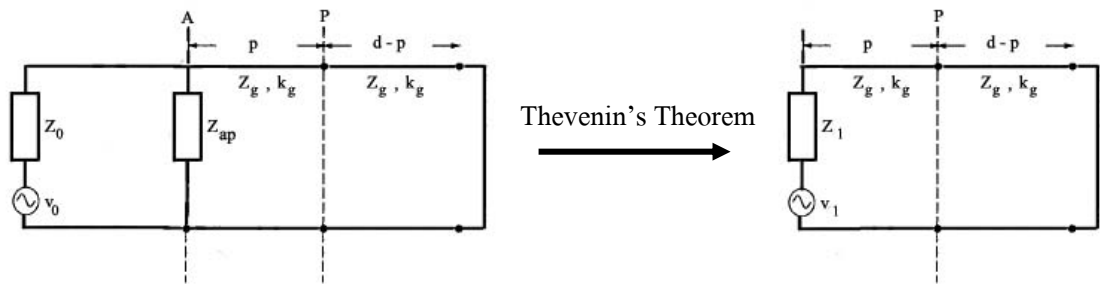
หลังจากนั้นทำการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของช่องเปิด (aperture impedance: Z_{ap}) โดยทำการ ลัดวงจรที่ปลายของช่องเปิดที่ระยะห่าง $l/2$ จากจุดกึ่งกลาง ซึ่งแสดงไว้ในรูปวงจรสมมูลที่จุด A นอกจากนั้นความสัมพันธ์ของช่องเปิดและตัวกล่องจำเป็นจะต้องนำค่าอัตราส่วนของ l และ a มาร่วมคำนวณด้วย ซึ่งจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของช่องเปิดดังสมการที่ (2.25)

$$Z_{ap} = \frac{l}{2a} jZ_{0s} \tan \frac{k_0 l}{2} \quad (2.25)$$

ซึ่งในขณะนี้ได้วงจรสมมูลที่ประกอบได้ด้วย v_0 , Z_0 และ Z_{ap} ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยสามารถนำ ทฤษฎีของเทเวนิน (Thevenin's Theorem) มาแปลงวงจรสมมูลให้ง่ายขึ้น โดยจะได้ศักย์ไฟฟ้าของ แหล่งกำเนิดและค่าอิมพีแดนซ์ใหม่เป็น

$$v_1 = v_0 Z_{ap} / (Z_0 + Z_{ap}) \quad (2.26)$$

$$Z_1 = Z_0 Z_{ap} / (Z_0 + Z_{ap}) \quad (2.27)$$



รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนวงจรสมมูลโดยใช้ทฤษฎีของเทเวนิน

โดยสำหรับค่าของ characteristic impedance จากสภาวะของภายในกล่องจะได้ว่า $Z_g = Z_0 / \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}$ ขณะที่ค่าคงที่ของ propagation constant จากสมการจะมีค่าเท่ากับ $k_g = k_0 \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}$ โดยค่า k_0 คือ ค่า propagation constant ของอากาศซึ่งมีค่าเป็น $k_0 = 2\pi/\lambda$ จากนั้นทำการแปลงค่า v_1 และ Z_1 รวมกับค่าอิมพีแดนซ์ในกล่อง จะได้วงจรสมมูลที่มีศักย์ไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด v_2 โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด Z_2 รวมทั้งค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดที่จุด P คือ Z_3 ได้จากสมการดังนี้

$$v_2 = \frac{v_1}{\cos k_g p + j(Z_1/Z_g) \sin k_g p} \quad (2.28)$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 + jZ_g \tan k_g p}{1 + j(Z_1/Z_g) \tan k_g p} \quad (2.29)$$

$$Z_3 = jZ_g \tan k_g (d - p) \quad (2.30)$$

ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุด P จึงมีค่าเท่ากับ $v_p = v_2 Z_3 / (Z_2 + Z_3)$ และกระแสที่ไหลผ่านจุด P จะมีค่าความสัมพันธ์เท่ากับ $i_p = v_p / (Z_2 + Z_3)$ ส่วนในกรณีที่เปิดด้านหนึ่งของกล่องไว้ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดมีค่าเป็น Z_0 ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุด P มีค่าเป็น $v'_p = v_0 / 2$ และมีกระแสไหลผ่านที่จุด P เป็น $i'_p = v_0 / 2Z_0$ เมื่อได้ทั้งกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุด P แล้วทำให้สามารถหาค่าประสิทธิภาพของการปิดกั้นไฟฟ้าและแม่เหล็กได้ดังนี้

$$S_E = -20 \log_{10} |v_p / v'_p| = -20 \log_{10} |2v_p / v_0| \quad (2.31)$$

$$S_M = -20 \log_{10} |i_p / i'_p| = -20 \log_{10} |2i_p Z_0 / v_0| \quad (2.32)$$

การแทนช่องเปิดและกล่องที่ใช้ปิดกั้นคลื่นด้วยวงจรสมมูลทางไฟฟ้านี้สามารถใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพในการปิดกั้นได้ถูกต้องในระดับหนึ่ง แต่ยังมีข้อจำกัด เช่น รูปร่าง

ของช่องเปิดที่ใช้ได้จำกัด เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้สมการของช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยม มาคำนวณหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของช่องเปิดรูปร่างกลมได้จากสมการ (2.33) ดังนี้

$$w = l = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \times D \quad (2.33)$$

เมื่อ D คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม และยังสามารถประยุกต์ใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพของช่องเปิดที่มีหลายช่องซึ่งมีขนาดที่เท่ากัน โดยปรับค่าอิมพีแดนซ์ของช่องเปิดให้มีจำนวนเท่ากับจำนวนช่องเปิด ซึ่งจะได้สมการการคำนวณหาประสิทธิภาพของช่องเปิด n ช่องแสดงได้ดังสมการที่ (2.34)

$$Z_{ap} = n \frac{l}{2a} jZ_{0s} \tan \frac{k_0 l}{2} \quad (2.34)$$

2.3.2 แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method)

เมื่อความซับซ้อนของสูตรในเชิงทฤษฎีเป็นตัวสร้างผลเฉลยวิเคราะห์ที่ค่อนข้างจะยุ่งยาก ดังนั้นจึงอาศัยระเบียบวิธีที่ไม่ได้เกิดจากการวิเคราะห์ เช่น ระเบียบวิธีเชิงกราฟ (Graphical method) ระเบียบวิธีเชิงการทดลอง (Experimental method) และระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) โดย 2 วิธีแรกจะใช้แก้ปัญหาที่ไม่ซับซ้อนมาก แต่การคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) จะถูกใช้เป็นกระบวนการในแบบจำลองของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสภาวะทางกายภาพของวัตถุจริง รวมถึงสิ่งแวดล้อมในขณะนั้น โดยปกติการจำลองรูปแบบนี้จะนำสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations) มาใช้ในการคำนวณในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น สายอากาศ เรดาร์ การแพร่กระจายของคลื่น รวมไปถึงเรื่องความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าอีกด้วย

การจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมีการพัฒนาไปในหลายรูปแบบ แต่ละแบบจะมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกัน อีกทั้งบางวิธียังถูกพัฒนามาใช้ในทางเฉพาะด้าน โดยรวมแล้วสามารถแบ่งแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขตามรูปแบบสมการได้ 3 รูปแบบดังตารางที่ 2.5 โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในรูปแบบของระเบียบวิธีโมเมนต์ (Method of Moments) ในการคำนวณประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ตารางที่ 2.5 รูปแบบต่างๆ ของแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

Integral equation solvers	Differential equation solvers	Other methods
- Method of Moments (MoM)	- Finite Difference Time Domain (FDTD)	- Physical Optics (PO)
- Fast Multipole Method (FMM)	- Multiresolution Time Domain (MRTD)	- Geometric Theory of Diffraction (GTD)
- Recursive T-Matrix Algorithms (RTMA)	- Pseudo Spectral Time Domain (PSTD)	- Physical Theory of Diffraction (PTD)
	- Transmission Line Matrix (TLM)	- Uniform Theory of Diffraction (UTD)
		- Method of lines

2.4 ระเบียบวิธีโมเมนต์ (Method of Moments)

ระเบียบวิธีโมเมนต์ (Method of Moments) เป็นวิธีการแก้ปัญหาเรื่องสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของสมการเชิงอินทิกรัลแบบเชิงเส้นที่ได้มาจากสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations) ของเงื่อนไขขอบเขต วิธีโมเมนต์เป็นขบวนการที่ใช้ในการแก้ปัญหาสมการเชิงเส้น กระบวนการที่ใช้ในวิธีโมเมนต์จะทำการคูณกันของค่าที่เหมาะสมของค่าฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักและการอินทิกรัล

2.4.1 หลักการของวิธีโมเมนต์

วิธีโมเมนต์เป็นวิธีการโดยทั่วไปในการแก้สมการเชิงเส้น โดยพิจารณาจากสมการในรูปแบบที่ไม่เป็นเอกพันธ์ (Inhomogeneous) ดังนี้ [17]

$$L(f) = g \quad (2.35)$$

โดย L เป็นตัวกระทำเชิงเส้น (linear operator) และ g เป็นตัวแปรที่ทราบค่า และกำลังพิจารณาค่า f โดยการกระจาย f ให้อยู่ในรูปของอนุกรมของฟังก์ชัน f_1, f_2, \dots ในโดเมนของ L ดังนี้

$$f = \sum_n a_n f_n \quad (2.36)$$

เมื่อ a_n เป็นค่าคงตัวใดๆ และ f_n คือ expansion functions หรือ basis functions

เพื่อเป็นการประมาณค่าสมการที่ (2.35) ให้เป็น finite summation ทำได้โดยการแทนสมการที่ (2.36) กลับไปในสมการที่ (2.35) ซึ่งจะได้

$$\sum_n a_n L(f_n) = g \quad (2.37)$$

จากนั้นกำหนดชุดของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (weighting functions) ในรูปของ w_1, w_2, \dots ในช่วงของ L จะได้

$$\sum_n a_n \langle w_m, Lf_n \rangle = \langle w_m, g \rangle \quad (2.38)$$

โดยที่ $m = 1, 2, 3, \dots$ และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$[I_{mn}][a_n] = [g_m] \quad (2.39)$$

เมื่อกำหนดให้

$$[I_{mn}] = \begin{bmatrix} \langle w_1, Lf_1 \rangle & \langle w_1, Lf_2 \rangle & \dots \\ \langle w_2, Lf_1 \rangle & \langle w_2, Lf_2 \rangle & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

$$[a_n] = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

และ

$$[g_m] = \begin{bmatrix} \langle w_1, g \rangle \\ \langle w_2, g \rangle \\ \langle w_3, g \rangle \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

ถ้าเมตริกซ์ $[I]$ เป็น non-singular จะทำให้หาค่าเมตริกซ์ผกผัน (inverse) ได้และทำให้

$$[a_n] = [I_{mn}]^{-1} [g_m] \quad (2.43)$$

สามารถหาผลลัพธ์ของ f ได้จากสมการที่ 2.36 ซึ่งเขียนเป็นเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$[f] = [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad \dots] \quad (2.44)$$

และสามารถเขียนในรูปของเมตริกซ์ได้เป็น

$$f = [f_n][a_n] = [f_n][I_{mn}]^{-1} [g_m] \quad (2.45)$$

โดยคำตอบที่ได้จะขึ้นอยู่กับค่าการเลือกค่า basis function (f_n) และค่า weighting function (w_n) ในกรณีเฉพาะที่เลือกให้ basis function กับ weighting function เหมือนกันจะถูกเรียกว่า Galerkin's method

2.4.2 ฟังก์ชันพื้นฐาน (Basis function) และฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (weighting function)

จากสมการเชิงอินทิกรัลที่เหมาะสม จะทำสมการเชิงอินทิกรัลให้อยู่ในรูปของชุดของสมการเชิงเส้นที่ไม่ทราบค่าจะถูกประมาณด้วยค่าชุดของ $f_n(z)$ ของฟังก์ชันพื้นฐานด้วยค่าขนาดที่ไม่ทราบค่า ดังสมการที่ (2.46)

$$f(z) = \sum_{n=1}^N a_n f_n(z) \quad (2.46)$$

โดยที่ N เป็นจำนวนของฟังก์ชันพื้นฐาน (basis function) ที่ครอบคลุมบริเวณทั้งหมดของฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่า และค่าสัมประสิทธิ์ของการขยาย a_n คือสิ่งที่ต้องการทราบค่า ฟังก์ชัน $f_n(z)$ ที่นำมาใช้จะต้องเป็นฟังก์ชันอิสระแบบเชิงเส้น ฟังก์ชันพื้นฐานที่นำมาใช้โดยปกติแล้วจะนำมาเพื่อ

ใช้แก้ปัญหาสายอากาศและการกระจายมีสองแบบด้วยกัน แบบแรกเรียกว่า ฟังก์ชันแบบทั้งโดเมน แบบที่สองเรียกว่าฟังก์ชันซับโดเมน แบบทั้งโดเมนจะมีค่าอยู่ระหว่าง $-1/2 < z < 1/2$ ตัวอย่างเช่น

$$\text{ฟูรีเยร์} \quad f_n(z) = \frac{v}{2} \cos(n-1) \quad (2.47)$$

$$\text{เชฟปีเซฟ} \quad f_n(z) = T_{2n-2}(v) \quad (2.48)$$

$$\text{แมคคอลลอริน} \quad f_n(z) = v^{2n-2} \quad (2.49)$$

$$\text{เลเจนดรี} \quad f_n(z) = P_{2n-2}(v) \quad (2.50)$$

$$\text{เฮอร์มิท} \quad f_n(z) = H_{2n-2}(v) \quad (2.51)$$

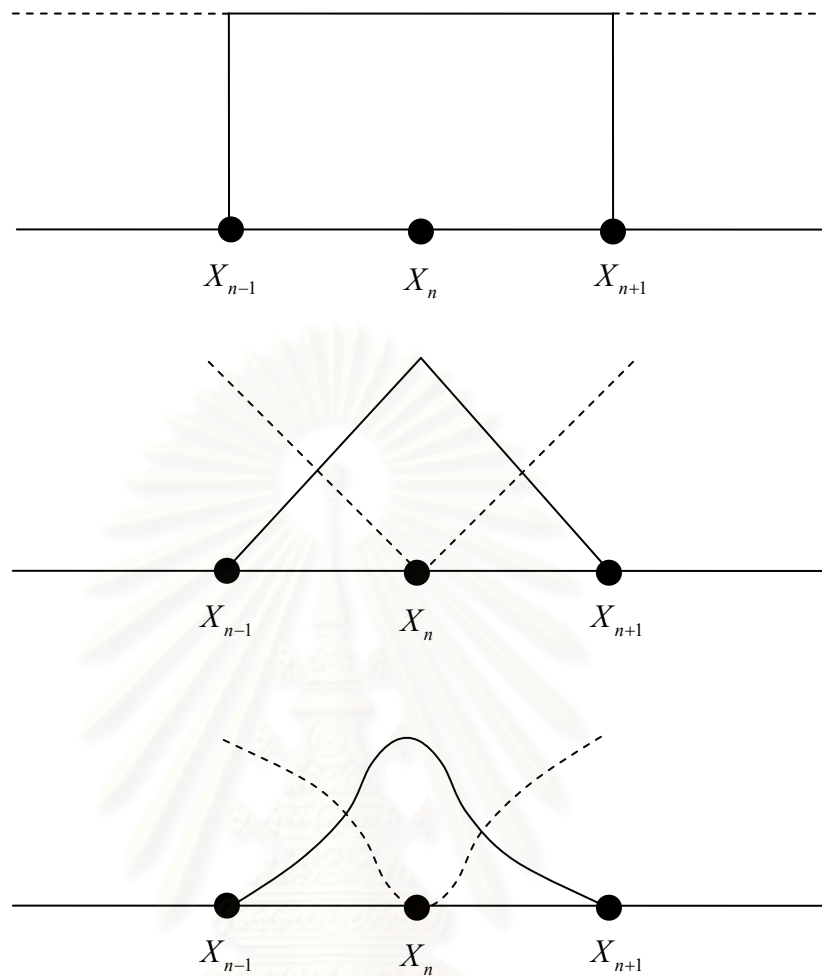
โดยที่ $v = 2z/l$ และ $n = 1, 2, \dots, N$ ฟังก์ชันซับโดเมนจะใช้ช่วงหนึ่งของ N ส่วนที่ไม่ซ้อนทับกัน ตัวอย่างเช่น

$$\begin{array}{l} \text{ฟังก์ชันพีชไมล์แบบคงที่} \\ \text{Piecewise Constant} \end{array} \quad u_n(z) = \begin{cases} 1, & z_{n-1/2} < z < z_{n+1/2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.52)$$

$$\begin{array}{l} \text{ฟังก์ชันพีชไมล์แบบเชิงเส้น} \\ \text{Piecewise Linear} \end{array} \quad u_n(z) = \begin{cases} \frac{\Delta - |z - z_n|}{\Delta}, & z_{n-1} < z < z_{n+1} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.53)$$

$$\begin{array}{l} \text{ฟังก์ชันพีชไมล์แบบซายน์} \\ \text{Piecewise Sinusoid} \end{array} \quad u_n(z) = \begin{cases} \frac{\sin(k(\Delta - |z - z_n|))}{\sin k\Delta}, & z_{n-1} < z < z_{n+1} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.54)$$

โดยที่ $\Delta = l/N$ โดยสมมติให้เท่ากับแต่ละช่วงที่แบ่งย่อย และกำหนดค่า $u_n(z)$ คือ ฟังก์ชันพื้นฐาน (basis function: $f_n(z)$) รูปที่ 2.15 แสดงการแบ่งซับโดเมน



รูปที่ 2.15 ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบซัดโดเมน ฟังก์ชันพีชโวลท์แบบยูนิฟอร์ม ฟังก์ชันพีชโวลท์แบบเชิงเส้น และฟังก์ชันพีชโวลท์แบบซายน์ ตามลำดับ

ฟังก์ชันซัดโดเมนจะถูกใช้เป็นส่วนใหญ่เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้ความรู้ด้านอื่นเข้ามาเสริม อีกทั้งยังสะดวกกับการเขียนโปรแกรม เพื่อทำการคำนวณ เมื่อแทนค่าฟังก์ชันพื้นฐานลงในสมการอินทิกรัลของพอดคลิงตันแล้วจะได้ดังสมการ

$$\int_{-l/2}^{l/2} \sum_{n=1}^N I_n u_n(z') K(z_m, z') dz' \approx E_z(z_m) \quad (2.55)$$

โดยที่

$$K(z_m, z') = \frac{1}{j\omega\epsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) G(z_m, z') \quad (2.56)$$

m เป็นจำนวนส่วนย่อยที่แบ่ง สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\sum_{n=1}^N \int_{\Delta z'_n} K(z_m, z') u_n(z') dz' \approx E_z(z_m) \quad (2.57)$$

หรือ

$$\sum_{n=1}^N I_n g_m = E_z(z_m) \quad (2.58)$$

โดยที่

$$g_m = \int_{\Delta z'_n} K(z_m, z') u_n(z') dz' \quad (2.59)$$

เพื่อที่จะหาค่าขนาดของกระแสที่ไม่ทราบค่า N ค่าจำเป็นจะต้องมี N สมการเพื่อจะหาค่าให้ได้ ดังนั้นจึงใช้สมการ (2.59) ด้วยค่าฟังก์ชันน้ำหนัก $w_n (n=1, 2, \dots, n)$ และทำการอินทิเกรตตลอดทั้งบริเวณที่ต้องการหาค่า จึงเกิดรูปแบบของผลคูณภายในระหว่างแต่ละค่าของฟังก์ชันน้ำหนักกับ g_m ได้ดังสมการ

$$\sum_{n=1}^N I_n \langle w_n, g_m \rangle = \langle w_n, E_z \rangle \quad m = 1, 2, \dots, N \quad (2.60)$$

ดังนั้นสามารถเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} \langle w_1, g_1 \rangle & \cdots & \langle w_1, g_N \rangle \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle w_N, g_1 \rangle & \cdots & \langle w_N, g_N \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle w_1, E_{z1} \rangle \\ \vdots \\ \langle w_1, E_{zN} \rangle \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

หรือ

$$[Z][I] = [V] \quad (2.62)$$

โดยที่ $z_{mn} = \langle w_m, g_n \rangle$ และ $V_m = \langle w_m, E_z \rangle$ สมการดังกล่าวสามารถหาได้ด้วยการทำเมตริกซ์

ผกผัน

$$[I] = [Z]^{-1}[V] \quad (2.63)$$

ในการเลือกใช้ฟังก์ชันน้ำหนักต้องเป็นอิสระเชิงเส้น และไม่ต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก บางครั้งมีการใช้ฟังก์ชันน้ำหนักเป็น $w_n = u_n$ ซึ่งก็คือวิธีพอยน์แมตชิ่ง (point matching) วิธีดังกล่าวง่ายและสามารถแก้ปัญหาสนามแม่เหล็กได้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะได้ผลล่าช้ากว่า

2.4.3 สมการเชิงอินทิกรัล

สมการเชิงอินทิกรัล เป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่า Φ ที่อยู่ในรูปของการอินทิเกรต ตัวอย่างของสมการเชิงอินทิกรัลได้แก่ สมการฟูรีเยร์ สมการลาปราช และสมการแองเกิล โดยมีรายละเอียดดังนี้ [18]

2.4.3.1 ประเภทของสมการเชิงอินทิกรัล

สมการเชิงอินทิกรัลเชิงเส้นส่วนใหญ่แล้วจะแบ่งออกได้เป็นสองประเภทซึ่งตั้งชื่อตาม Fredholm และ Volterra ประเภทแรกมีชื่อว่า สมการของ Fredholm โดยมีสมการลำดับที่หนึ่ง สอง และสาม ตามลำดับ

$$f(x) = \int_a^b K(x,t)\Phi(t)dt \quad (2.64)$$

$$f(x) = \Phi(x) - \lambda \int_a^b K(x,t)\Phi(t)dt \quad (2.65)$$

$$f(x) = a(x)\Phi(x) - \lambda \int_a^b K(x,t)\Phi(t)dt \quad (2.66)$$

โดยที่ λ เป็นค่าที่มีเฉพาะขนาดหรือเป็นค่าเชิงซ้อน ฟังก์ชัน $K(x,t)$ และ ฟังก์ชัน $f(x)$ และขอบเขตของการอินทิเกรต a และ b เป็นค่าที่ทราบอยู่แล้ว ขณะที่ $\Phi(x)$ นั้นไม่ทราบค่า ฟังก์ชัน $K(x,t)$ เรียกว่า เคอเนล (kernel) ของสมการเชิงอินทิกรัล ส่วนค่าของ λ จะมีค่าเป็นหนึ่งหน่วย

สมการเชิงอินทิกรัลประเภทที่สองเรียกว่า Volterra โดยมีสมการลำดับที่หนึ่ง สอง และสาม ตามลำดับ

$$f(x) = \int_a^x K(x,t)\Phi(t)dt \quad (2.67)$$

$$f(x) = \Phi(x) - \lambda \int_a^x K(x,t)\Phi(t)dt \quad (2.68)$$

$$f(x) = a(x)\Phi(x) - \lambda \int_a^x K(x,t)\Phi(t)dt \quad (2.69)$$

สมการเชิงอินทิกรัลแบบที่สองนั้น ค่าขอบเขตบนของการอินทิเกรตนั้นจะเป็นตัวแปร ถ้าค่าของ $f(x) = 0$ สมการที่ (3.2) ถึง (3.7) จะกลายเป็นสมการแบบเอกพันธ์ ในสมการที่ (3.2) ถึง (3.7) ทั้งหมดเป็นสมการเชิงเส้น แต่ในกรณีที่ฟังก์ชัน $\Phi(x)$ ที่อยู่ในการอินทิเกรตมีค่ายกกำลังมากกว่าหนึ่ง สมการนั้นจะไม่ใช่สมการเชิงเส้น เช่น

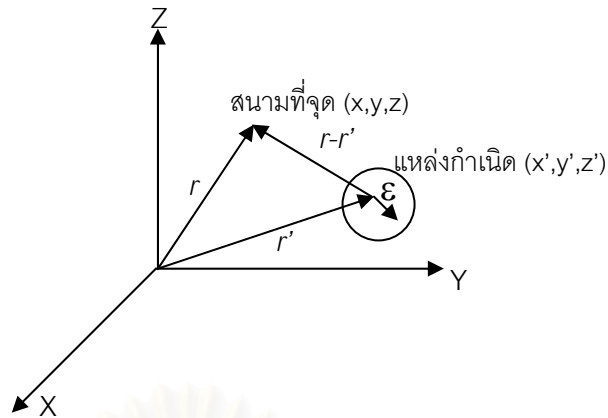
$$f(x) = \Phi(x) - \lambda \int_a^x K(x,t)\Phi^2(t)dt \quad (2.70)$$

ฟังก์ชันในสมการที่ (2.70) ไม่ใช่ฟังก์ชันเชิงเส้น ถ้าค่า a หรือ b หรือค่า $K(x,t)$ มีค่าไม่จำกัด สามารถกล่าวได้ว่าสมการเชิงอินทิกรัลนี้เป็นแบบซิงกูลาร์ (Singular) ซึ่งทำให้ค่าของ $K(x,t)$ มีค่าสมมาตร $K(x,t) = K(t,x)$

2.4.3.2 ฟังก์ชันของกรีน (Green's function)

ฟังก์ชันของกรีน สามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่ง คือ ฟังก์ชันของแหล่งกำเนิด (Source Function) ซึ่งก็คือเคอเนล (kernel) ฟังก์ชันที่ได้จากปัญหาของค่าขอบเขตเชิงเส้นและทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างการดิฟเฟอเรนเชียลและอินทิกรัล นอกจากนี้ฟังก์ชันของกรีนยังเตรียมวิธีการแก้ปัญหาในรูปของแหล่งกำเนิด ในสมการดิฟเฟอเรนเชียลบางส่วน (Partial Differential equation) หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าฟังก์ชันของกรีนคือวิธีการแก้ปัญหาอนุกรมขยาย (Series Expansion) สำหรับแก้ปัญหาขอบเขตที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogeneous) โดยลดรูปของปัญหาขอบเขตที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันให้อยู่ในรูปของปัญหาเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)

เพื่อให้ได้ค่าสนามที่แพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดที่มาจากฟังก์ชันของกรีน ถ้า $G(r,r')$ เป็นค่าสนามไฟฟ้าที่จุดสังเกต r ที่เป็นผลมาจากแหล่งกำเนิดที่จุด r' ดังนั้นสนามที่จุด r เนื่องจากแหล่งกำเนิด $g(r')$ คือค่าอินทิกรัล $g(r')G(r,r')$ ที่ระยะ r' ดังนั้นในเชิงกายภาพแล้วฟังก์ชันของกรีนแสดงถึงความต่างศักย์ที่จุด r เนื่องจากประจุหนึ่งหน่วยที่วางอยู่ที่จุด r' ดังรูปที่ 2.16 หรือหมายความว่า การตอบสนองในระบบเชิงเส้นต่อการใส่ค่าอิมพัลส์มีค่าหนึ่งหน่วยที่ระยะ $r=r'$



รูปที่ 2.16 สนามที่จุด (x, y, z) และแหล่งกำเนิดที่จุด (x', y', z')

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.35) เราสามารถนิยามฟังก์ชันของกรีนให้สอดคล้องกับตัวดำเนินการเชิงอนุพันธ์ L เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของสมการที่ไม่เป็นเอกพันธ์แหล่งกำเนิดดังสมการ

$$LG(r, r') = \delta(r, r') \quad (2.71)$$

โดยที่ r และ r' เป็นเวกเตอร์ของตำแหน่งของสนามที่จุด (x, y, z) และแหล่งกำเนิดที่จุด (x', y', z') ตามลำดับ และค่า $\delta(r, r')$ เป็นค่าไดแรกเดลต้าฟังก์ชันซึ่งจะมีค่าเฉพาะเมื่อ $r = r'$ ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\int \delta(r, r') g(r, r') dv' = g(r) \quad (2.72)$$

ดังนั้น ความหมายของ $G(r, r')$ ในเชิงกายภาพแสดงถึงการตอบสนองของระบบเชิงเส้นต่อการได้รับอิมพัลส์ขนาดหนึ่งหน่วยที่ระยะ $r=r'$ ฟังก์ชันของกรีนมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. G สอดคล้องกับสมการ $LG(r, r') = 0$ ยกเว้นที่จุดแหล่งกำเนิด r'

$$LG(r, r') = \delta(r, r') \quad (2.73)$$

2. G มีค่าสมมาตร

$$G(r, r') = G(r', r) \quad (2.74)$$

3. G สอดคล้องกับค่าขอบเขต f ที่อยู่บน B

$$G = f \quad \text{ที่อยู่บน } B \quad (2.75)$$

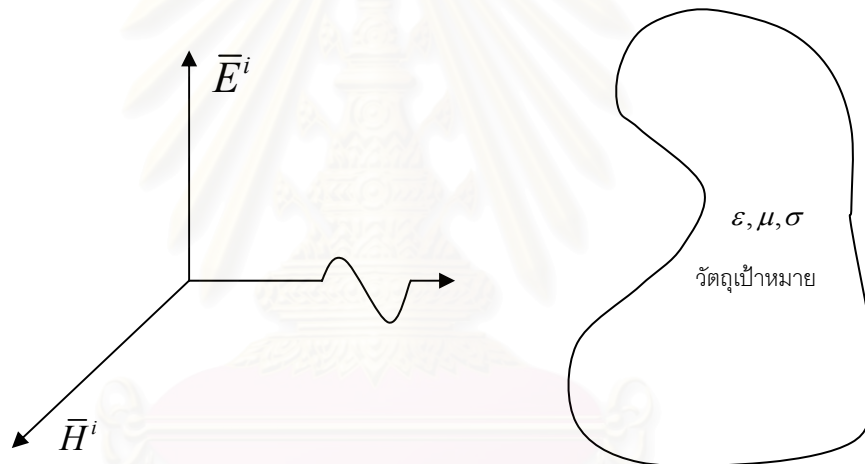
4. G มีค่าต่อเนื่องใน r, r' แต่ทิศทางของอนุพันธ์ $\frac{\partial G}{\partial n}$ มีค่าไม่ต่อเนื่องที่ r' ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \int_S \frac{\partial G}{\partial n} dS = 1 \quad (2.76)$$

โดยที่ n เป็นจุดตั้งฉากกับทรงกลมรัศมี ϵ และ $\epsilon^2 = |r-r'|$

2.4.4 การสร้างสมการเชิงเส้นอินทิกรัล

โดยทั่วไปแล้วการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัตถุนั้นพบว่ายากที่จะสามารถคำนวณ เพื่อให้ง่ายขึ้นจึงสมมุติว่าสนามที่ตกกระทบวัตถุเป็นคลื่นระนาบ



รูปที่ 2.17 วัตถุที่ได้รับสนามที่เป็นคลื่นระนาบ

พิจารณาวัตถุที่ค่าพารามิเตอร์ ϵ, μ, σ คือค่าสภาพยอม, ค่าความซึมซาบ และค่าความนำของวัตถุตามลำดับ ได้รับสนามที่เป็นแหล่งกำเนิดที่เป็นคลื่นระนาบ สนามที่เหนี่ยวนำภายในวัตถุจะทำให้เกิดสนามที่แตกกระจาย \bar{E}^s ซึ่งจะแทนที่ด้วยความหนาแน่นเสมือนของกระแสที่อวกาศว่าง \bar{J}_{eq} ซึ่งจะทำให้ได้สมการ

$$\bar{J}_{eq}(\bar{r}) = (\sigma(\bar{r}) + j\omega[\epsilon(\bar{r}) - \epsilon_0])\bar{E}(\bar{r}) = \tau(\bar{r})\bar{E}(\bar{r}) \quad (2.77)$$

โดยที่ปัจจัยที่เกี่ยวข้องของกับเวลา $e^{j\omega t}$ นั้นจะไม่นำมาคิด เทอมแรกของสมการ (2.77) เป็นค่าความหนาแน่นของกระแสเนื่องมาจากความนำ เทอมที่สองเป็นค่าความหนาแน่นกระแสโพลาไรซ์ด้วยค่า

\bar{J}_{eq} ดังกล่าวสามารถหาค่าสนามที่แตกกระจาย \bar{E}^s และ \bar{H}^s โดยการแก้ปัญหาสสมการของแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times \bar{E}^s = -\bar{J}_{eq} - j\omega \bar{H}^s \quad (2.78)$$

$$\nabla \times \bar{H}^s = j\omega \bar{E}^s \quad (2.79)$$

โดยที่ค่าของ \bar{E}^s , \bar{H}^s และ \bar{J}_{eq} ทั้งหมดเป็นค่าเชิงซ้อน และด้วยวิธีการกำจัดค่า \bar{E}^s หรือ \bar{H}^s ทำให้ได้สมการ

$$\nabla \times \nabla \times \bar{E}^s - k_0^2 \bar{E}^s = -j\omega \mu_0 \bar{J}_{eq} \quad (2.80)$$

$$\nabla \times \nabla \times \bar{H}^s - k_0^2 \bar{H}^s = \nabla \times \bar{J}_{eq} \quad (2.81)$$

โดยที่ $k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$ ผลของสมการ (2.80) และ (2.81) จะได้สมการ

$$\bar{E}^s = j\omega \left[1 + \frac{1}{k_0^2} \nabla \nabla \cdot \right] A \quad (2.82)$$

$$\bar{H}^s = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times A \quad (2.83)$$

โดยที่

$$\bar{A} = \mu_0 \int_v \bar{G}_0(\bar{r}, \bar{r}') \bar{J}_{eq}(\bar{r}') dv' \quad (2.84)$$

และ

$$\bar{G}_0(\bar{r}, \bar{r}') = \frac{e^{-jk_0(r-r')}}{4\pi|r-r'|} \quad (2.85)$$

คือค่าฟังก์ชันของกรีนในอวกาศว่าง โดยที่ตัวดำเนินการ $\nabla \nabla \cdot$ หมายถึง $\nabla \nabla \cdot A = \nabla(\nabla \cdot A)$. จากสมการ (2.82) และ (2.83) ค่าของ \bar{E}^s และ \bar{H}^s ขึ้นอยู่กับค่า \bar{J}_{eq} สมมติให้ค่า \bar{J}_{eq} มีค่าน้อยมาก และแหล่งกำเนิดมีค่าเฉพาะในแกน x เท่านั้น ดังนั้น

$$\bar{J}_{eq} = \delta(\bar{r} - \bar{r}') \bar{a}_x \quad (2.86)$$

จากสมการ (2.84) จะได้

$$\bar{A} = \mu_0 \bar{G}_0(\bar{r}, \bar{r}') \bar{a}_x \quad (2.87)$$

ถ้า $\bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}')$ คือค่าสนามไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากแหล่งกำเนิดหลัก ดังนั้น $\bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}')$ ต้องสอดคล้องสมการ

$$\nabla \times \nabla \times \bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}') - k_0^2 \bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}') = -j\omega\mu_0 \delta(\bar{r}, \bar{r}') \quad (2.88)$$

ทำให้ได้ผลลัพธ์ดังสมการ

$$\bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}') = -j\omega\mu_0 \left(1 + \frac{1}{k_0^2} \nabla \nabla \cdot \right) \bar{G}_0(\bar{r}, \bar{r}') \quad (2.89)$$

$\bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}')$ เป็นค่าเวกเตอร์ของฟังก์ชันของกรีนในอวกาศว่างที่ได้มาจากแหล่งกำเนิดแบบจุดในแกน x ซึ่งทำให้สามารถหาค่า $\bar{G}_{0y}(\bar{r}, \bar{r}')$ และ $\bar{G}_{0z}(\bar{r}, \bar{r}')$ ที่สอดคล้องกับแหล่งกำเนิดแบบจุดในแกน y และแกน z ได้ ค่าของ $\bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}')$, $\bar{G}_{0y}(\bar{r}, \bar{r}')$ และ $\bar{G}_{0z}(\bar{r}, \bar{r}')$ จะจัดอยู่ในรูปของฟังก์ชันไดแอดิก ซึ่งสามารถหาได้ดังสมการ

$$\bar{G}_0(\bar{r}, \bar{r}') = \bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}') \bar{a}_x + \bar{G}_{0y}(\bar{r}, \bar{r}') \bar{a}_y + \bar{G}_{0z}(\bar{r}, \bar{r}') \bar{a}_z \quad (2.90)$$

สมการ (2.90) เรียกว่าฟังก์ชันไดแอดิกของกรีนที่อวกาศว่าง ซึ่งก็คือผลลัพธ์ของฟังก์ชันไดแอดิกดิฟเฟอเรนเชียล

$$\nabla \times \nabla \times \bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}') - k_0^2 \bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}') = \tilde{I} \delta(\bar{r}, \bar{r}') \quad (2.91)$$

โดยที่ \tilde{I} คือค่าไดแอดหนึ่งหน่วย

$$\tilde{I} = \bar{a}_x \bar{a}_x + \bar{a}_y \bar{a}_y + \bar{a}_z \bar{a}_z \quad (2.92)$$

ความหมายในเชิงกายภาพของ $\bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}')$ หมายถึงค่าสนามที่จุด r อันเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดที่เล็กมากที่อยู่ห่างออกไปเป็นระยะ r'

จากสมการ (2.80), (2.81) และ (2.91) ผลของสนามไฟฟ้าจะได้ดังสมการ

$$\bar{E}^s(\bar{r}) = -j\omega\mu_0 \int \bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{J}_{eq}(\bar{r}') dv' + [\bar{E}^s(\bar{r})]_{correction} \quad (2.93)$$

เทอมที่ใช้แก้ไขข้อผิดพลาดได้กำหนดโดย ให้เป็น $\frac{J_{eq}(\bar{r}')}{3j\omega\epsilon_0}$ ดังนั้นจะได้สมการ

$$\bar{E}^s(\bar{r}) = -j\omega\mu_0 \int \bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{J}_{eq}(\bar{r}') dv' + \frac{\bar{J}_{eq}(\bar{r})}{3j\omega\epsilon_0} \quad (2.94)$$

ดังนั้นค่าสนามรวมที่เกิดขึ้นภายในวัตถุจะเป็นผลรวมของสนามที่ตกกระทบ \bar{E}^i และสนามที่แตกกระจาย \bar{E}^s ดังสมการ

$$\bar{E}(\bar{r}) = \bar{E}^i(\bar{r}) + \bar{E}^s(\bar{r}) \quad (2.95)$$

เมื่อนำสมการ (2.77), (2.94) และ (2.95) มาพิจารณาจะได้เทนเซอร์ของสมการเชิงอินทิกรัลสำหรับ \bar{E} ดังสมการ

$$\left[1 + \frac{\tau(\bar{r})}{3j\omega\epsilon_0} \right] \bar{E}(\bar{r}) - PV \int_v \tau(\bar{r}') \bar{E}(\bar{r}') \cdot \bar{G}_{0x}(\bar{r}, \bar{r}') dV' = \bar{E}^i(\bar{r}) \quad (2.96)$$

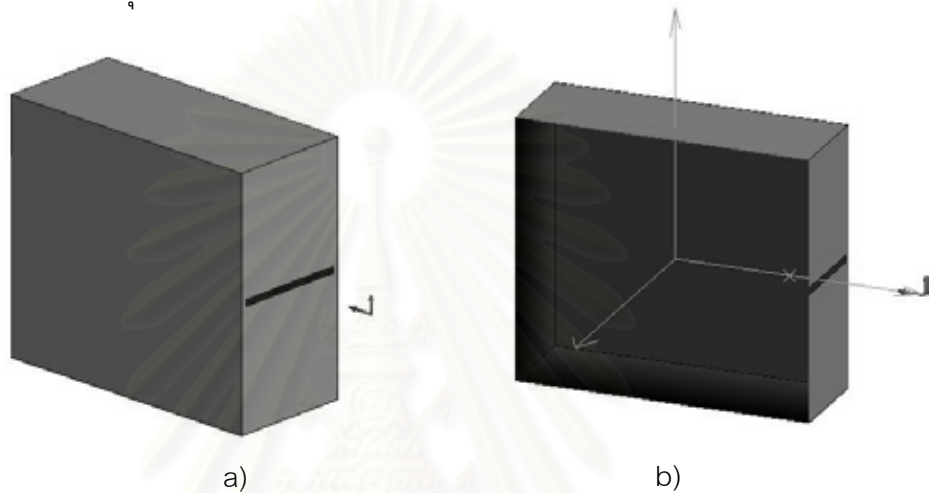
ในสมการ (2.96) $\tau(\bar{r}) = \sigma(\bar{r}) + j\omega[\epsilon(\bar{r}) - \epsilon_0]$ และค่าสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ \bar{E}^i เป็นส่วนที่ทราบค่าทำให้สามารถหาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัตถุ \bar{E} ได้

2.4.3 โปรแกรมประยุกต์ FEKO

โปรแกรมประยุกต์ FEKO เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาโดยมีพื้นฐานการคำนวณของระเบียบวิธีโมเมนต์ (Method of Moment: MoM) ซึ่งสามารถคำนวณในลักษณะของรูปทรง 3 มิติได้อีกด้วย โปรแกรมประยุกต์ FEKO สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการประยุกต์ใช้งานในด้านของการวิเคราะห์สายอากาศเป็นหลัก เช่น การออกแบบสายอากาศ (antenna design), การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริป (microstrip antennas analysis) และการวิเคราะห์การกระจาย (scattering analysis) เป็นต้น ซึ่งนอกจากจะมีการคำนวณบนพื้นฐานของระเบียบวิธีโมเมนต์แล้ว โปรแกรมประยุกต์ FEKO ยังพัฒนาให้มีการใช้วิธีการคำนวณร่วมกับระเบียบวิธีอื่น (hybrid) อีกด้วย เช่น ระเบียบวิธีจุ่มจำกัด (Finite Element Method: FEM), Physical Optics (PO) หรือ Uniform Theory of Diffraction (UTD) เป็นต้น

การใช้งานโปรแกรมนี้สามารถใช้งานได้หลายรูปแบบ คือ การซื้อลิขสิทธิ์ (license) หรือสามารถดาวน์โหลดรุ่นทดลองใช้ (trial) ซึ่งสามารถใช้งานได้ 45 วัน โดยรายละเอียดสามารถดูเพิ่มเติมได้ที่ <http://www.feko.info>

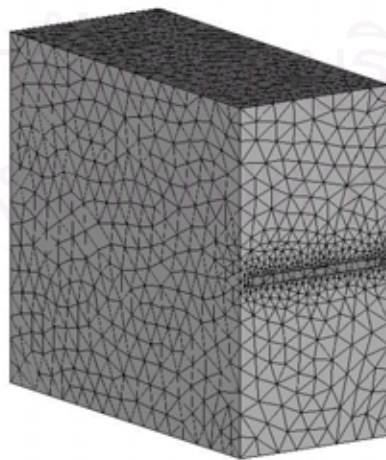
ในการใช้งานโปรแกรมประยุกต์ FEKO เพื่อใช้ในเรื่องของการหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถทำได้โดยอาศัยส่วนประกอบ (component) ที่ส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (GUI) โดยจะสร้างกล่องปิดกั้นขึ้นมาก่อน และโปรแกรมประยุกต์ FEKO ได้กำหนดค่าของวัสดุให้เลือกใช้โดยกำหนดจากค่าคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ จากนั้นจึงกำหนดขนาดของช่องเปิดขึ้นมาที่ด้านหน้าของกล่องปิดกั้นคลื่นที่สร้างไว้แล้ว ในขณะที่สามารถกำหนดคลื่นระนาบ (plane wave) ไว้ที่ด้านหน้าของกล่องปิดกั้น ซึ่งภายในกล่องปิดกั้นได้กำหนดจุดทำการวัดระดับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไว้ตามจุดที่ต้องการ



รูปที่ 2.18 ลักษณะกล่องปิดกั้นที่มีช่องเปิด

a) ตำแหน่งลูกศรคือ plane wave และ b) ตำแหน่งจุดวัดสัญญาณ

นอกจากนี้ยังต้องกำหนดเมส (mesh) เพื่อเป็นการแบ่งส่วนย่อยในการคำนวณ และเพื่อความละเอียดในผลลัพธ์ที่ได้ จึงต้องกำหนดเมสในบริเวณช่องเปิดให้มีความละเอียดมากกว่าบริเวณกล่องปิดกั้นคลื่นส่วนอื่นๆ โดยแสดงได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การสร้างเมส (mesh) เพื่อใช้ในการคำนวณ

บทที่ 3

การวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการทดสอบ

3.1 การวัดการแผ่คลื่นรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Radiated EMI Measurement)

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

วิธีการวัดหาระดับสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ที่แพร่กระจายออกไปในอากาศโดยมีอากาศเป็นตัวกลางในการส่งผ่าน จะต้องนำอุปกรณ์หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทำการทดสอบไปจัดวางในห้องปิดกั้นคลื่นสนามไฟฟ้าแบบกึ่งไร้คลื่นสะท้อน (Semi-Anechoic Chamber) ที่มีขนาดระยะทดสอบ 3 เมตร และวัดสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากตัวอุปกรณ์ โดยใช้สายอากาศชนิดพิเศษแบบไบ-ล็อก (Bi-log antenna) เป็นตัวรับสัญญาณและแสดงผลการวัดได้ที่เครื่องวัดสัญญาณรบกวน และเทียบผลที่วัดได้กับค่าขีดจำกัดที่ระบุในมาตรฐานสำหรับการทดสอบในหมวดนี้จะเริ่มทดสอบที่ความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz ในการทดสอบการแผ่กระจายสัญญาณคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางอากาศ ตามมาตรฐานสากลจะใช้โครงสร้างสำคัญของการวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าแตกต่างกันขึ้นกับขึ้นส่วน หรืออุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบ ความสะดวกในการใช้งาน ซึ่งมีอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ คือ ห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Semi Anechoic Chamber) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เป็นอุปกรณ์หรือห้องที่ใช้ปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกสู่ภายนอก และป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าและสัญญาณวิทยุ จากภายนอกเข้ามารบกวนอุปกรณ์ภายใต้การทดสอบ ภายในห้องประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- ฉนวนปิดกั้น เป็นโลหะซึ่งมีค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กไฟฟ้าสูง ใช้กั้นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกเข้าสู่ภายในห้องทดสอบ
- ฉนวนเฟอร์ไรต์ เป็นออกไซด์ของโลหะหลายชนิด ใช้ในการดูดซับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสะท้อนภายในห้อง โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกดูดซับและไม่มีการสะท้อนในห้อง
- แผ่นโฟมผสมผงเฟอร์ไรต์จะถูกดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำ ภายในห้องไม่ให้เกิดการสะท้อน
- พื้นซึ่งเป็นกราวด์เพลนแบบเรียบใช้ในการสะท้อนสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- สายอากาศใช้ในการรับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งแผ่ออกจากอุปกรณ์ทดสอบ สายอากาศจะถูกติดตั้งอยู่บนเสาอากาศเคลื่อนที่ได้ความสูง 4 เมตร

- แท่นหมุน เป็นจานโลหะรัศมี 1.5 เมตร ถึง 3 เมตร ใช้ในการวางอุปกรณ์ทดสอบ สามารถปรับมุมการหมุนได้ตั้งแต่ 0 องศาถึง 360 องศา เพื่อใช้ในการหาตำแหน่งที่อุปกรณ์การทดสอบ (Equipment Under Test: EUT) แพร่สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าออกมามากที่สุด



รูปที่ 3.1 ห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Semi Anechoic Chamber)

- สายอากาศ (Antenna) ในการทดสอบหาระดับสัญญาณรบกวนแพร่กระจายผ่านอากาศจะใช้สายอากาศเป็นตัววัดสัญญาณ โดยจะรับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกจากผลิตภัณฑ์ แล้วแปลงค่าที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้าจากนั้นป้อนเข้าสู่เครื่องตรวจวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI receiver) การทดสอบในหมวดนี้จะเริ่มทดสอบที่ความถี่ตั้งแต่ 30 MHz จนถึง 1 GHz ตามมาตรฐานสากล สายอากาศที่นำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดสัญญาณรบกวนแพร่กระจายผ่านอากาศมีหลายชนิด เช่น สายอากาศแบบ Biconical (30 MHz – 300 MHz) แบบ Log-Periodic (300 MHz-1GHz) แบบ Bi-Log (30 MHz- 1GHz) เป็นต้น



รูปที่ 3.2 สายอากาศที่ใช้ในการวัดโดยแสดงสายอากาศแบบ

Biconical, Log-Periodic และ Bi-Log ตามลำดับ

3.1.2 การวัดประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นตามมาตรฐาน MIL-STD-285

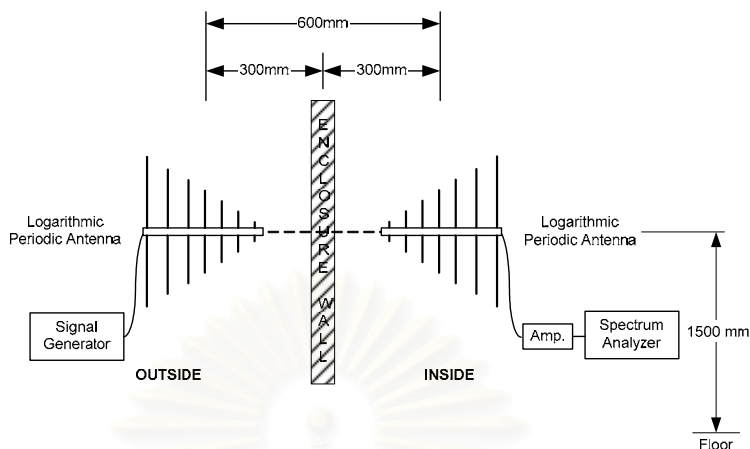
ปัจจุบันได้มีการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์กันอย่างแพร่หลาย การติดต่อสื่อสารทางคลื่นความถี่วิทยุ การออกอากาศของสถานีวิทยุ โทรทัศน์ รวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เช่น สายไฟฟ้าแรงสูง หม้อแปลง คอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ในตัวอาคารสำนักงานที่มีเครื่องใช้สำนักงานอยู่ ทำให้เกิดการรบกวนกันขึ้นระหว่างเครื่องที่แพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับเครื่องที่ถูกรบกวน ดังนั้นในการใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้าที่เสี่ยงต่อการถูกรบกวนได้ง่ายที่มีความสำคัญต่อความมั่นคง ความปลอดภัยและความเสียหายทางเศรษฐกิจ เครื่องมือเหล่านี้ควรจะใช้งานในสถานที่ที่ปลอดภัยจากสัญญาณรบกวนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ขั้นตอนและรูปแบบปฏิบัติการทดสอบประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding Effectiveness) นี้อ้างอิงกับมาตรฐานการทดสอบ MIL-STD-285 ซึ่งมาตรฐานที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กในระดับสากล โดยวิธีการทดสอบสามารถทำได้โดยติดตั้งเครื่องมือโดยไม่มีผนังชนิดปิดกั้น ตัวส่งสัญญาณ และตัวรับเป็นสายอากาศชนิดเดียวกัน โดยให้ความถี่ที่ต้องการวัดอยู่ในย่านความถี่ของสายอากาศ ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางสายอากาศทั้งสอง 600 mm และจุดกึ่งกลางของสายอากาศแต่ละตัวสูงจากพื้นตามที่ระบุดังรูป

1. ตั้งขั้วสายอากาศตัวส่งเป็น แนวตั้ง (Vertical polarization)
2. ป้อนสัญญาณจาก Signal Generator ความถี่ที่ต้องการทดสอบ ขนาด 18 dBm (125 dBuV)
3. อ่านค่าที่ได้จาก Spectrum Analyzer และบันทึกผล
4. ตั้งขั้วสายอากาศตัวส่งเป็น แนวนอน (Horizontal polarization) และอ่านค่าที่ได้จาก Spectrum Analyzer และบันทึกผล
5. ค่าที่อ่านได้ คือ สัญญาณระดับอ้างอิง (Reference level)
6. ทำซ้ำตามข้อ 1-5 แต่จะเพิ่มผนังของห้องชนิดที่ต้องการทดสอบไว้ตรงกลางระหว่างสายอากาศทั้งสอง ดังรูปที่ 3.3
7. ค่าที่อ่านได้ คือ ระดับสัญญาณของตัวรับ (Receiver signal)
8. เลื่อนจุดทดสอบไปตำแหน่งต่อไป และทำซ้ำตามข้อ 1-8

และในการทดสอบจะทำการวัดการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากกล่องปิดที่มีขนาด 20x40x40 cm โดยทำการเปิดช่องด้านหนึ่งไว้เพื่อทำการเปลี่ยนขนาดช่องเปิด การวัดทำในห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Semi Anechoic Chamber) และมีเครื่องมือที่ใช้ในการวัด คือ เครื่องวิเคราะห์ความถี่ (Spectrum Analysis), Bi-log antenna, เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่แบบพัลส์ (pulse generator), dipole antenna ซึ่งจะใช้สัญญาณรูปไซน์ที่มีย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1 GHz โดยทำการเพิ่มความถี่ในลำดับละ 10 MHz มีขนาด amplitude

เป็น 1.2 V ซึ่งการจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 17 โดยภายในกล่องปิดจะมีสายอากาศไดโพลเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 การวัดสัญญาณสนามไฟฟ้าในการหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่น

3.2 การติดตั้งเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของกล่องปิดกั้นตามมาตรฐาน MIL-STD-285

ทำการวัดการแผ่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากกล่องปิดที่มีขนาด 20x40x40 cm โดยทำการเปิดช่องด้านหนึ่งไว้เพื่อทำการเปลี่ยนขนาดช่องเปิด การวัดทำในห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Semi Anechoic Chamber) และมีเครื่องมือที่ใช้ในการวัด คือ EMI receiver, Bi-log antenna, เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่แบบพัลส์ (pulse generator), dipole antenna ซึ่งจะใช้สัญญาณรูปไซน์ที่ความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz โดยเพิ่มความถี่ครั้งละ 10 MHz มีขนาด amplitude เป็น 1 V ซึ่งการจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 ทางด้านซ้ายมือ คือ เครื่องวิเคราะห์ความถี่ (spectrum analysis) และด้านขวาคือ เครื่องกำเนิดสัญญาณ (signal generator) โดยภายในกล่องปิดจะมีสายอากาศไดโพลเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



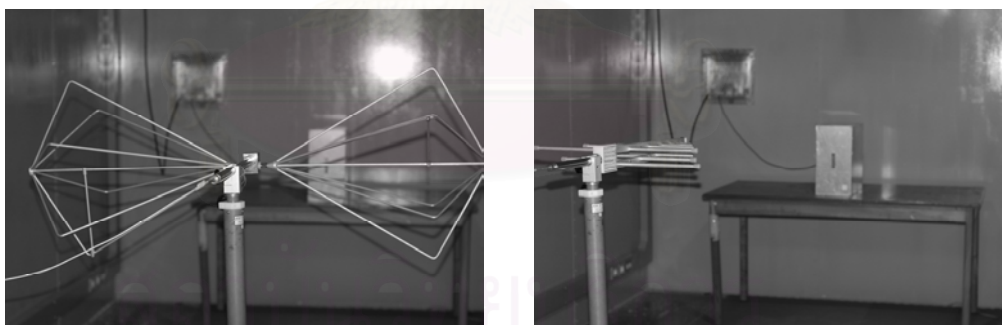
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์การวัดตามมาตรฐาน MIL-STD-285

โดยการวัดประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นตามมาตรฐาน MIL-STD-285 สามารถทำได้ในห้องปิดกั้น (shielding room) ซึ่งระยะห่างของสายอากาศจะอยู่ห่างจากกล่องปิดกั้นที่ระยะ 3 เมตร และอุปกรณ์ต่างๆ จะอยู่ภายนอกห้องปิดกั้น และทำการปรับความถี่ของเครื่องกำเนิดสัญญาณจาก 30 MHz ถึง 1 GHz โดยค่าของ step คือ 10 MHz โดยปรับความถี่ของเครื่องวิเคราะห์ความถี่ตามค่าของเครื่องกำเนิดสัญญาณดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การใช้อุปกรณ์ในการวัดตามมาตรฐาน MIL-STD-285

นอกจากนี้ในการใช้สายอากาศยังแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ Biconical และ Log-Periodic เพราะย่านความถี่ที่ทำการวัดคือ 30 MHz ถึง 1 GHz และสายอากาศที่ใช้มีขีดจำกัดในการรับย่านความถี่ที่แตกต่างกัน โดย Biconical จะใช้วัดความถี่ย่าน 30 MHz ถึง 300 MHz และย่านความถี่ 300 MHz ถึง 1 GHz จะใช้สายอากาศแบบ Log-Periodic ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงสายอากาศที่ใช้วัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

นอกจากนี้ การทดสอบการปิดกั้นคลื่นยังสามารถทำได้อีกแบบเมื่อต้องการเน้นที่ความสามารถในการป้องกันการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก คือการจัดให้มีตัวตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากภายนอกไว้ในกล่องปิดกั้นที่ต้องการทดสอบ แล้วทำการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาจากสายอากาศที่ตั้งไว้ภายนอก การทดสอบรูปแบบนี้จะทำในลักษณะกลับกันจากการทดสอบที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

สายอากาศที่นำมาใส่เพื่อทำการวัดระดับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นโพรบ (probe) 2 ชนิดที่ใช้วัดคลื่นไฟฟ้า และคลื่นแม่เหล็กแยกกัน โดยทางซ้ายมือจะเป็นโพรบที่ใช้วัดคลื่นไฟฟ้า ส่วนทางขวามือจะเป็นโพรบวัดคลื่นแม่เหล็ก

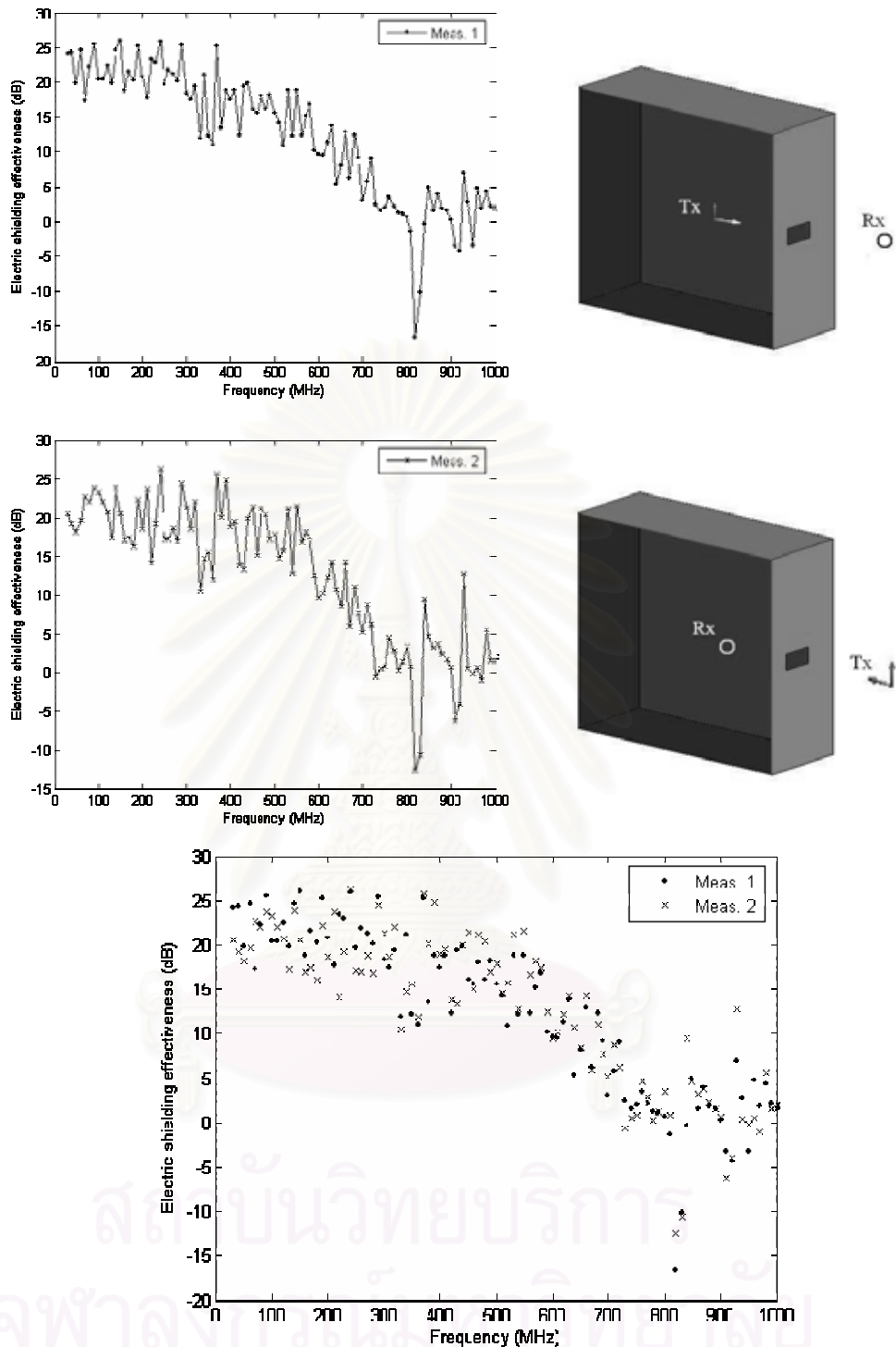


รูปที่ 3.7 แสดงโพรบ (probe) ทั้ง 2 ชนิด

โดยการจัดวางโพรบจะทำในลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 3.8 คือ วางไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของกล่องปิดกั้น และอยู่ห่างจากด้านฝากล่องที่จัดเตรียมไว้เป็นช่องเปิดเป็นระยะเท่ากับ 5 เซนติเมตร ในขณะที่ด้านหลังจะทำการวางตัวเชื่อมต่อ (connector) แบบ BNC เพื่อใช้เชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์ความถี่ (spectrum analysis) ในการรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งภายในห้องปิดกั้นที่ใช้ในการทดสอบจะมีตัวเชื่อมต่อออกสู่ภายนอกห้อง เพื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบที่ต้องใช้อีก คือ เครื่องวิเคราะห์ความถี่ และเครื่องกำเนิดความถี่ที่ใช้สำหรับเป็นคลื่นแหล่งกำเนิดซึ่งแพร่ออกจากสายอากาศที่ตั้งไว้ในห้องทดสอบ โดยผลการทดสอบการวัดประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นของการทดสอบทั้ง 2 รูปแบบแสดงไว้ในรูปที่ 3.9 ซึ่งการจัดวางโดยใช้สายอากาศวางไว้ด้านในแทนด้วย Meas. 1 และการทดสอบโดยการจัดวางโพรบไว้ภายในแทนด้วย Meas. 2



รูปที่ 3.8 แสดงการจัดวางโพรบ (probe) ในกล่องปิดกั้น

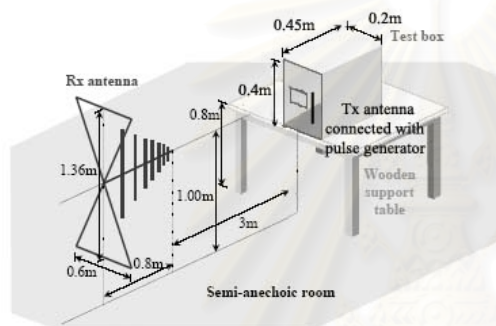


รูปที่ 3.9 แสดงผลการทดสอบทั้ง 2 แบบในกล่องปิดกั้น

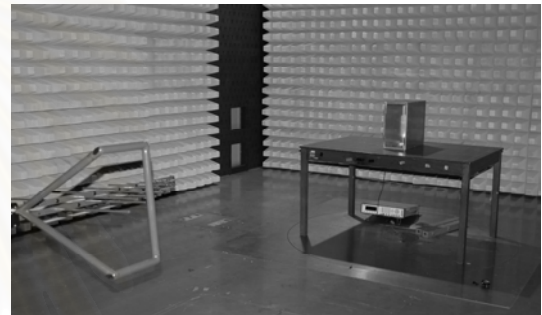
จากรูปที่ 3.9 จะพบว่าการจัดวางเพื่อการทดสอบทั้ง 2 รูปแบบมีผลประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นเพื่อสะดวกในการใช้แบบจำลองที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2 จึงจะทำการทดสอบในรูปแบบที่ 2 คือ การจัดวางโพรบไว้ภายในเพื่อทำการวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แล้วจึงนำผลมาวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ของช่องเปิดที่ได้

3.3 การติดตั้งเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของกล่องปิดกั้นตามมาตรฐาน CISPR22

ในหัวข้อนี้จะทำการวัดการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามมาตรฐาน CISPR 22 จากกล่องปิดที่มีขนาด 20x40x40 cm โดยทำการเปิดช่องด้านหนึ่งไว้เพื่อทำการเปลี่ยนขนาดช่องเปิด การวัดทำในห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Semi Anechoic Chamber) และมีเครื่องมือที่ใช้ในการวัด คือ EMI receiver, Bi-log antenna, เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่แบบพัลส์ (pulse generator), dipole antenna ซึ่งจะใช้สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ 30 MHz มีค่า rise time เป็น 50 ns มีขนาด amplitude เป็น 5 V ซึ่งการจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 17 โดยภายในกล่องปิดจะมีสายอากาศไดโพลเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



(a)

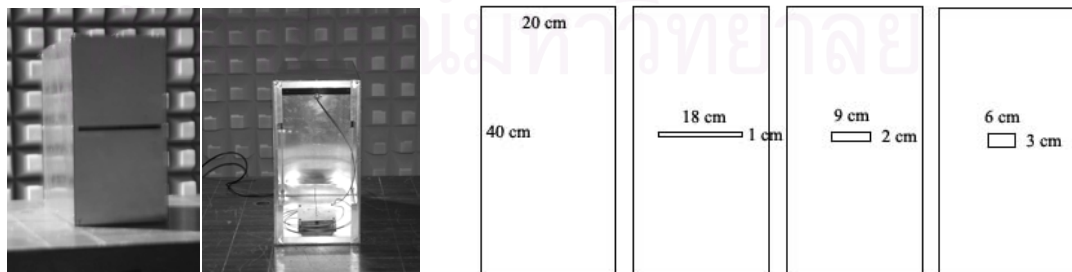


(b)

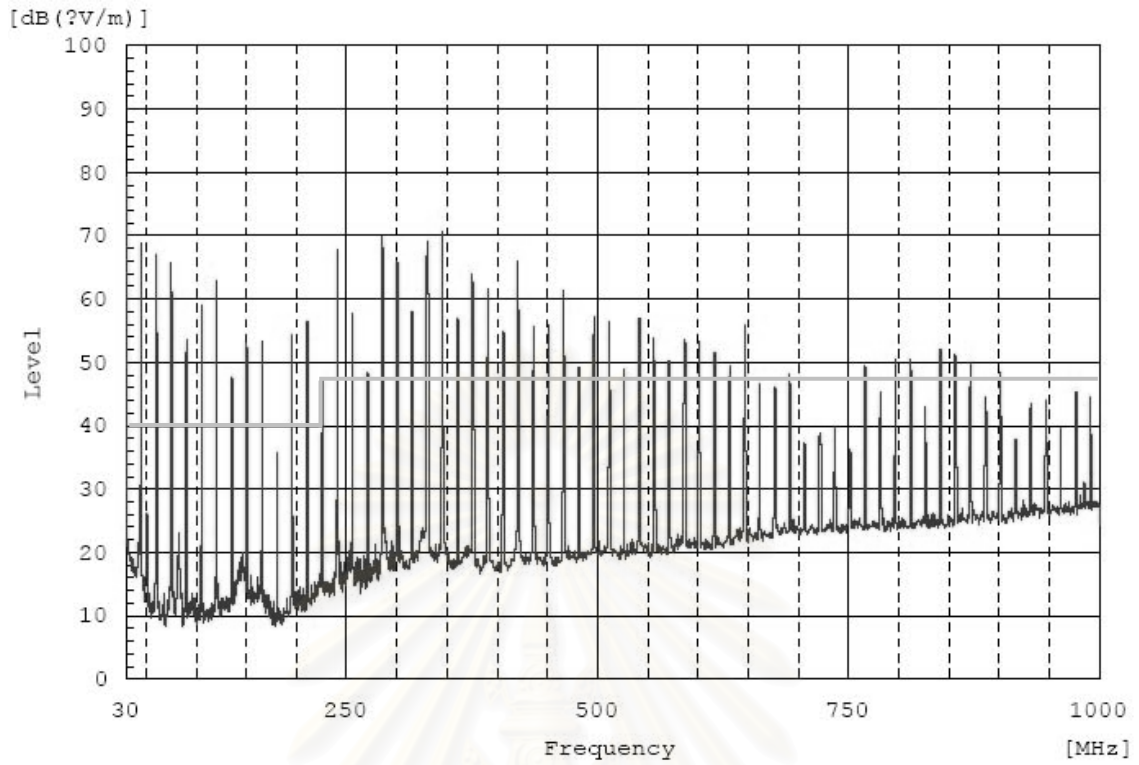
รูปที่ 3.10 การจัดวางกล่องปิดเพื่อทำการทดสอบ

(a) แผนผังการจัดวางเพื่อการทดสอบ (b) การจัดวางเพื่อการทดสอบ

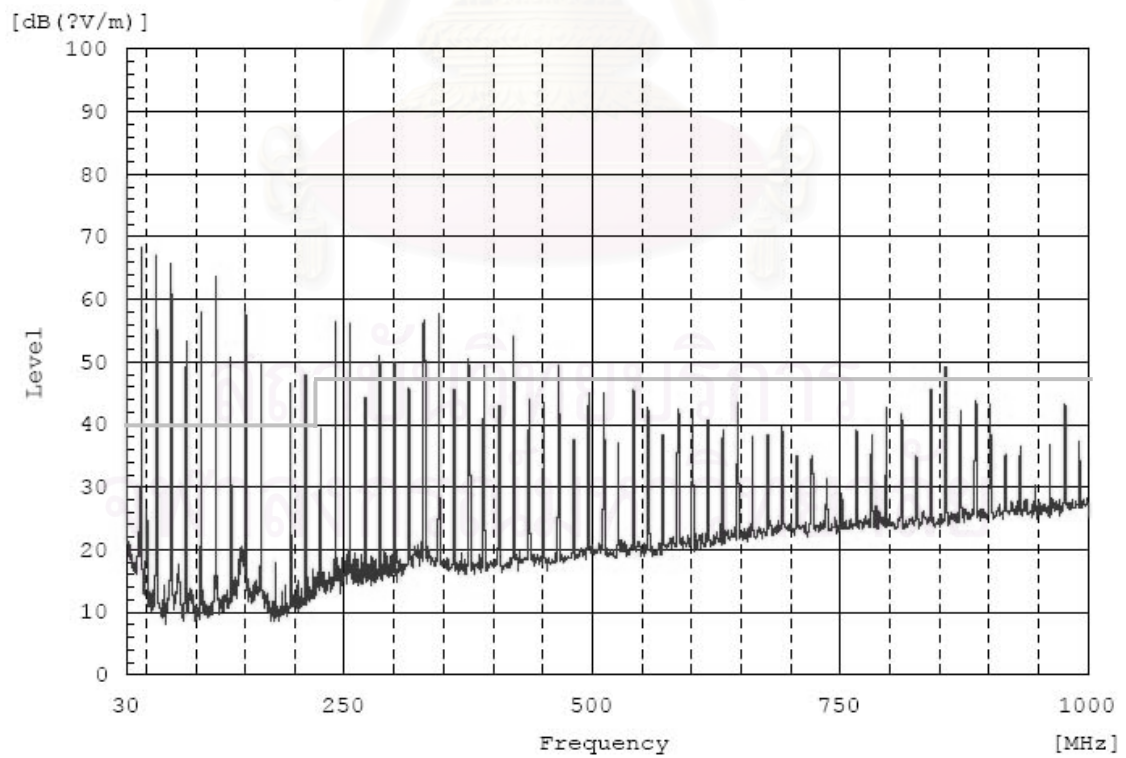
ในการทดสอบที่ได้ทำไปแล้วได้ใช้ช่องเปิดที่มีขนาดพื้นที่เท่ากัน คือ 18 ตารางเซนติเมตร แต่มีรูปแบบที่แตกต่างกันไปดังนี้ 1x18, 2x9 และ 3x6 ตารางเซนติเมตร และกล่องที่ไม่มีการปิดกั้นด้านหน้า ซึ่งในการวัดได้จัดให้ภายในกล่องปิดจะมีสายอากาศไดโพลเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างดแสดงในรูปที่ 3.9 ผลการทดสอบได้ผลดังนี้



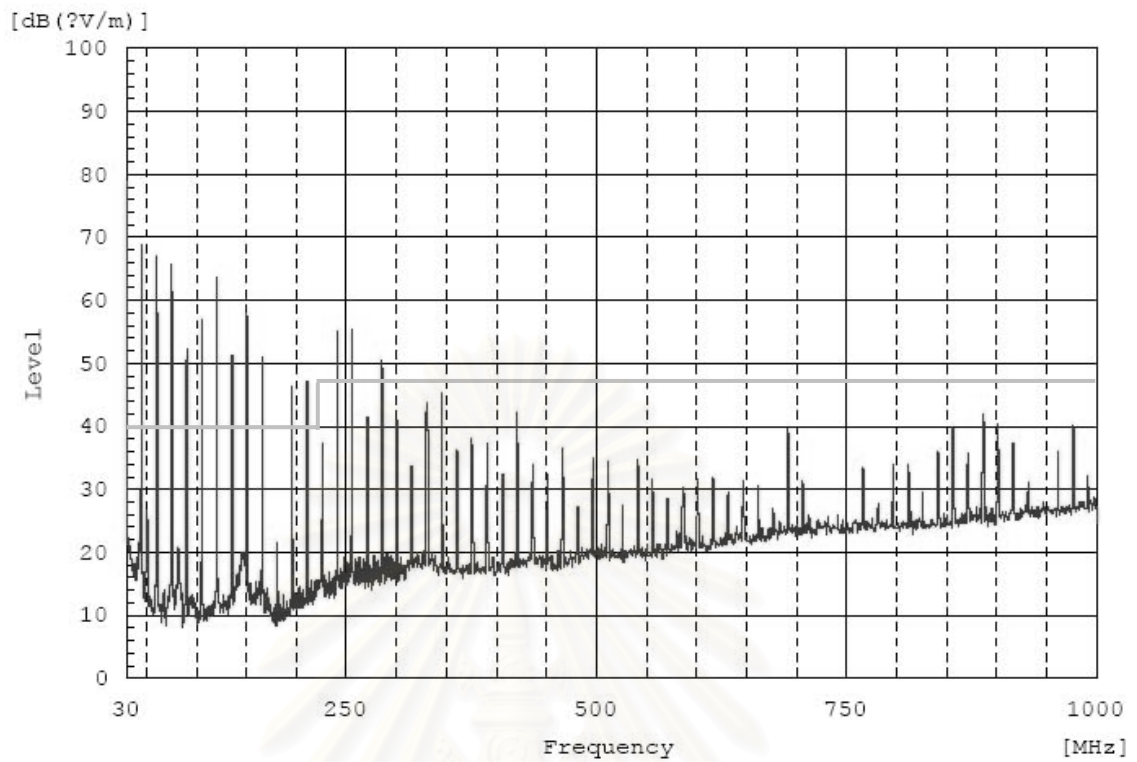
รูปที่ 3.11 แสดงแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในกล่อง และตัวอย่างช่องเปิดที่ทำการทดสอบ



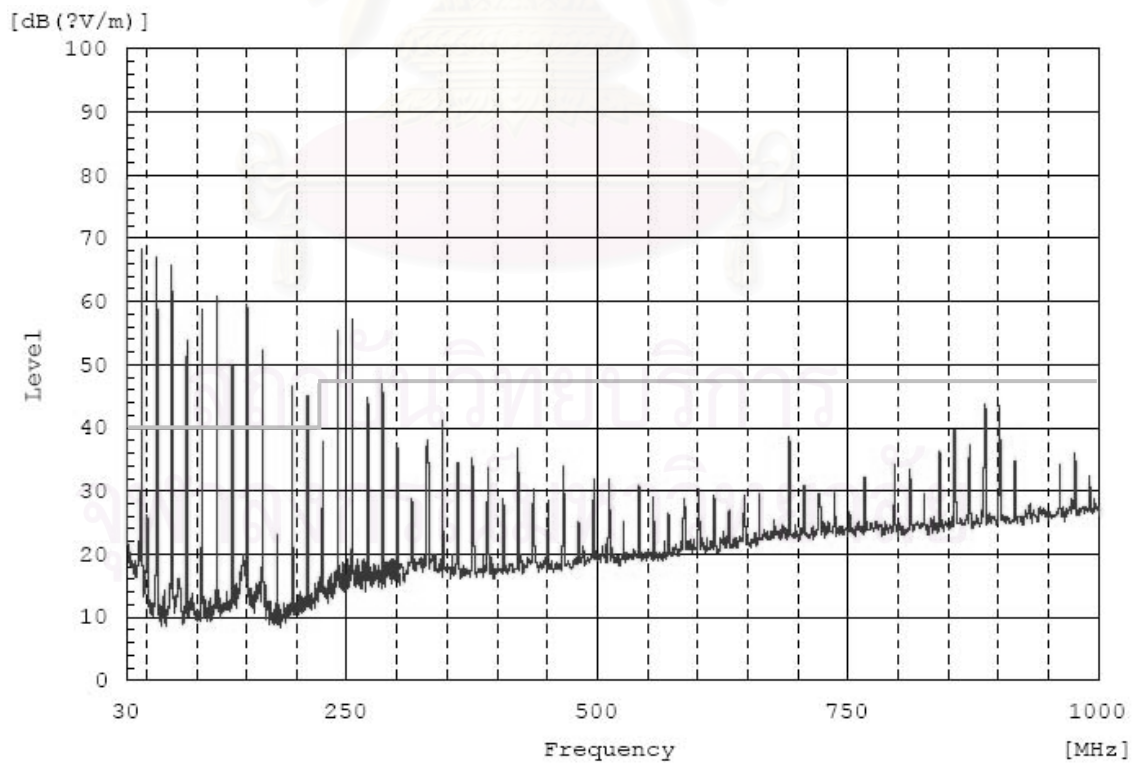
รูปที่ 3.12 ผลการทดสอบการแผ่ของคลื่นไฟฟ้าที่ไม่มีการปิดกั้น



รูปที่ 3.13 ผลการแผ่ของคลื่นไฟฟ้าที่มีการปิดกั้นของช่องเปิดขนาด 1x18 ตารางเซนติเมตร

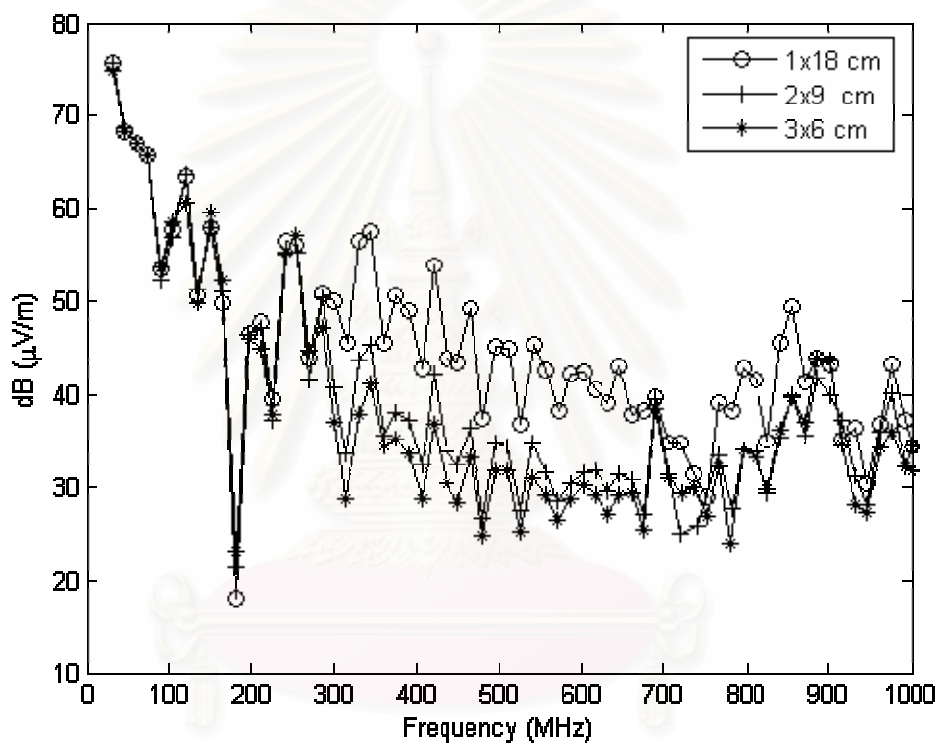


รูปที่ 3.14 ผลการแพร่ของคลื่นไฟฟ้าที่มีการปิดกั้นของช่องเปิดขนาด 2x9 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 3.15 ผลการแพร่ของคลื่นไฟฟ้าที่มีการปิดกั้นของช่องเปิด 3x6 ตารางเซนติเมตร

จากรูปที่ 3.16 ผลการทดสอบจะพบว่า การแพร่ของคลื่นไฟฟ้าจะมีขนาดลดลงตามขนาดของช่องเปิด โดยจะสังเกตว่าช่องเปิดแบบ 1x18 มีการแพร่คลื่นออกมามากที่สุด ถัดมาคือช่องเปิดแบบ 2x9 และที่แพร่คลื่นออกมาน้อยที่สุดคือช่องเปิดแบบ 3x6 โดย 2 รูปแบบหลังสุดมีการแพร่คลื่นออกมาใกล้เคียงกัน นอกจากนี้จะพบว่าที่ความถี่ประมาณ 700 MHz มีการแพร่คลื่นออกมาได้ใกล้เคียงกันทั้งหมดทั้ง 3 รูปแบบ และจะมีความแตกต่างที่ชัดเจนในช่วงระหว่างความถี่ประมาณ 300 - 700 MHz ทั้งนี้จากกล่าวได้ว่าอัตราส่วนของความกว้างต่อความยาว (w/l) แปรผกผันกับการแพร่คลื่นไฟฟ้าที่ออกมาจากช่องเปิด

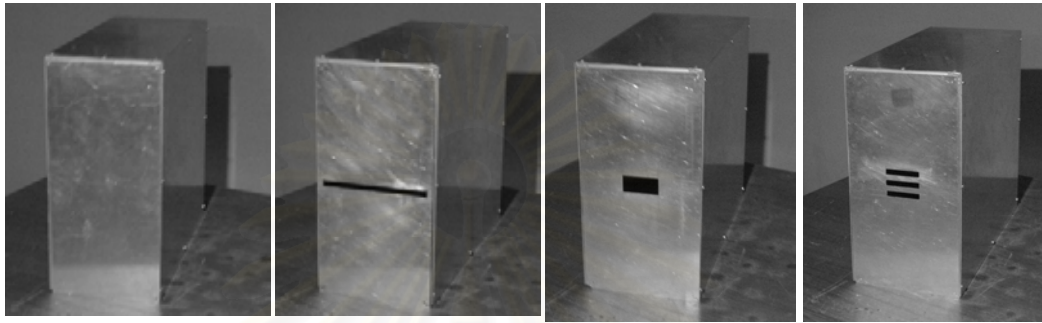


รูปที่ 3.16 เปรียบเทียบการแพร่คลื่นของช่องเปิดทั้ง 3 กรณี

การทดสอบตามมาตรฐาน CISPR 22 จะเป็นการจัดทดสอบเพื่อหาระดับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากแหล่งกำเนิด และเนื่องจากแบบจำลองที่มีอยู่เป็นการคำนวณหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้น ในการวิจัยนี้จึงจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน MIL-STD-285 เปรียบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ของช่องเปิดที่มีผลต่อการปรับค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของกล่องปิดกั้นให้มีประสิทธิภาพที่ดีต่อไป

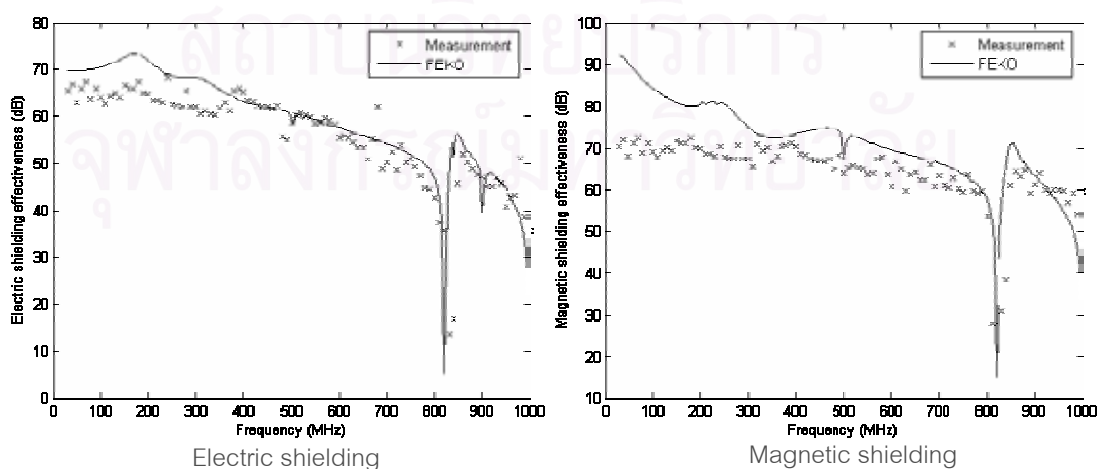
3.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกล่องปิดกั้นจากการวัดจริงและการคำนวณ

เพื่อการเปรียบเทียบให้เห็นถึงลักษณะของประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งทางทฤษฎี และในทางวัดจริง จึงทำการวัดค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นในห้องปิดกั้นคลื่น และทำการวัดตามหัวข้อ 3.2 โดยใช้กล่องปิดกั้นที่มีขนาด 20x40x45 เซนติเมตร ซึ่งมีช่องเปิดขนาดต่างๆ กัน ในรูปที่ 3.17 แสดงกล่องแบบต่างๆ ที่ทำการวัดเพื่อนำมาเปรียบเทียบ

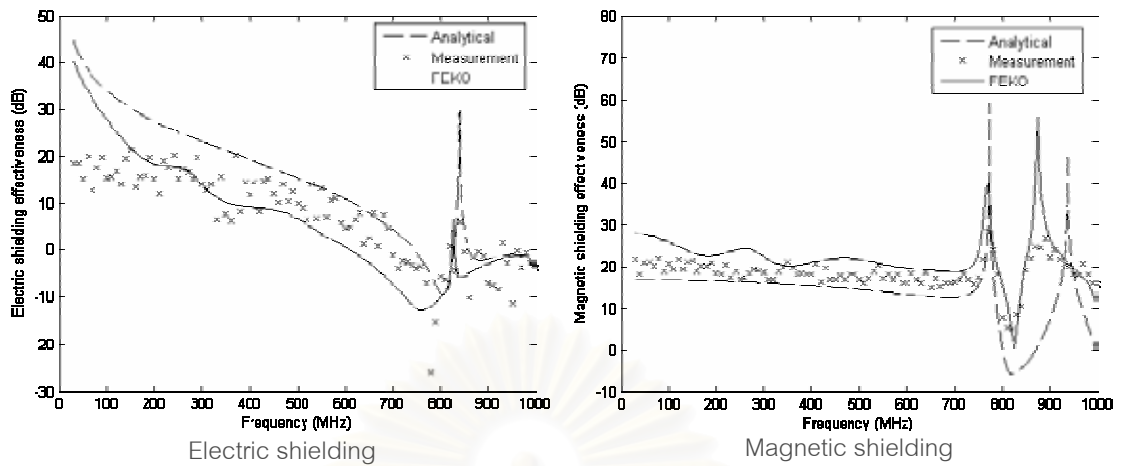


รูปที่ 3.17 ช่องเปิดแบบต่างๆ ที่ทำการทดสอบ

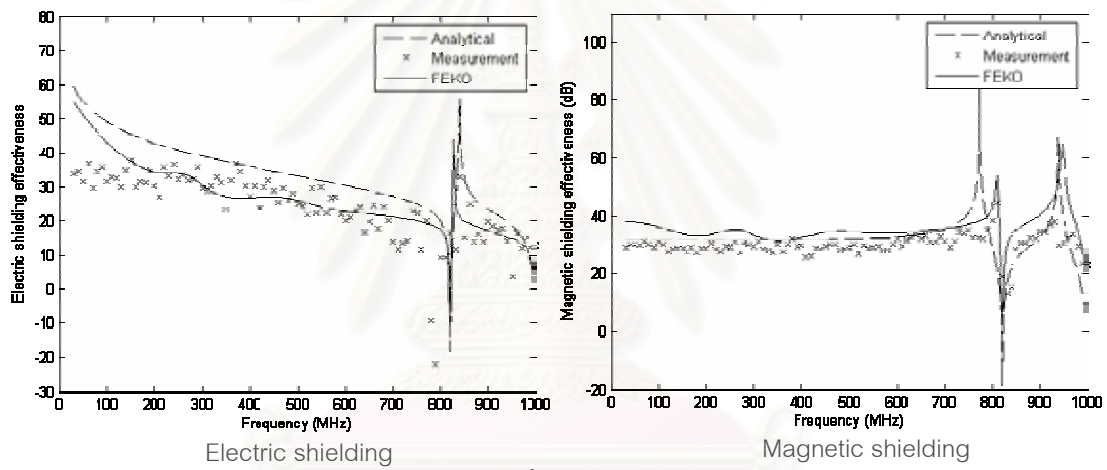
จากรูปที่ 3.17 โดยเรียงจากด้านซ้ายมือ จะเป็นกล่องปิดกั้นที่ใช้ในการทดสอบแบบไม่มีช่องเปิด ต่อมาคือ ช่องเปิดขนาด 1x18 เซนติเมตร, ช่องเปิดขนาด 3x6 เซนติเมตร และสุดท้ายเป็นช่องเปิดที่มีขนาด 1x6 เซนติเมตร จำนวน 3 ช่อง ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้า และคลื่นแม่เหล็กจากการวัดจริง การคำนวณด้วยหลักเกณฑ์ และการคำนวณด้วยโปรแกรมประยุกต์ FEKO สามารถแสดงได้ดังนี้ :ซึ่งจะพบว่าผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แม้ว่าที่ความถี่ต่างๆ จะมีค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่เมื่อสังเกตที่จุดความถี่เรโซแนนซ์จะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งการวัดจริง และการคำนวณจากวิธีที่เหลือทั้งสอง



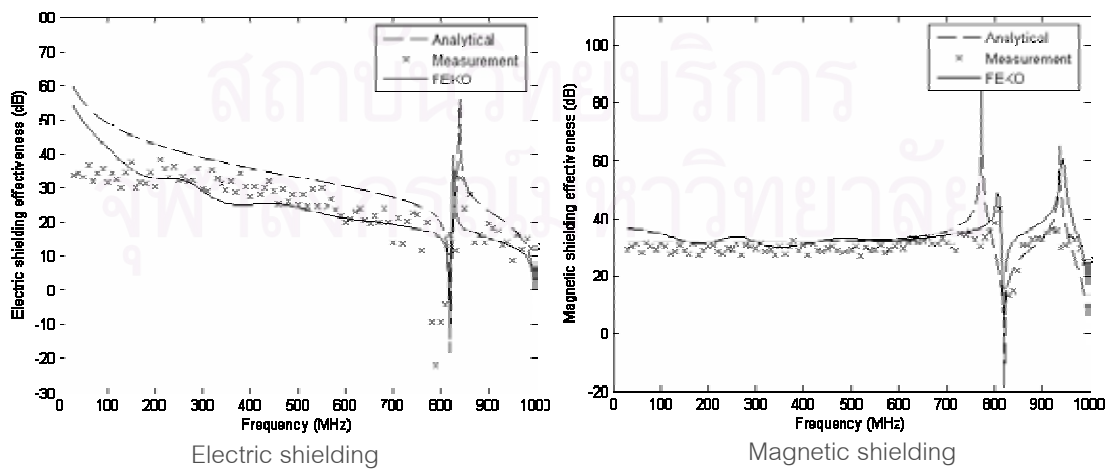
รูปที่ 3.18 กล่องปิดกั้นที่ไม่มีช่องเปิด



รูปที่ 3.19 กล่องปิดกั้นที่มีช่องเปิด 1x18 เซนติเมตร



รูปที่ 3.20 กล่องปิดกั้นที่มีช่องเปิด 3x6 เซนติเมตร



รูปที่ 3.21 กล่องปิดกั้นที่มีช่องเปิด 1x6 เซนติเมตร จำนวน 3 ช่อง

บทที่ 4

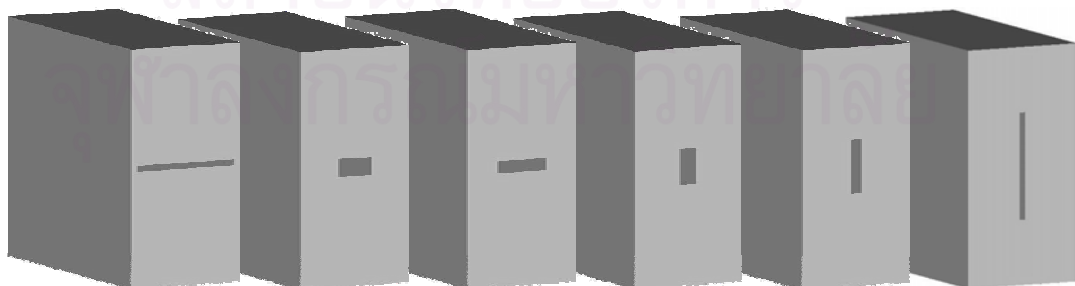
ผลการทดสอบประสิทธิภาพกล่องปิดกั้น

จากบทที่ 3 ซึ่งได้นำเสนอวิธีการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในห้องทดสอบ เพื่อทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลอง พบว่ามีความสัมพันธ์ใกล้เคียงและนำมาใช้เพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพในกล่องปิดกั้นได้ ดังนั้น จึงสามารถนำแบบจำลองดังกล่าวมาค้นหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในกล่องปิดกั้นที่มีช่องเปิดแบบต่างๆ ได้ ซึ่งในแบบจำลองจะใช้กล่องปิดกั้นที่มีขนาด 20x40x45 เซนติเมตร โดยมีผนังด้านหน้าเป็นช่องเปิด และจัดวางสายอากาศไว้ภายในกล่องที่ตำแหน่ง 5 เซนติเมตรจากผนังด้านหน้าเพื่อทำการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การจัดวางเป็นไปตามการทดสอบในบทที่ 3 ที่ได้กล่าวไว้

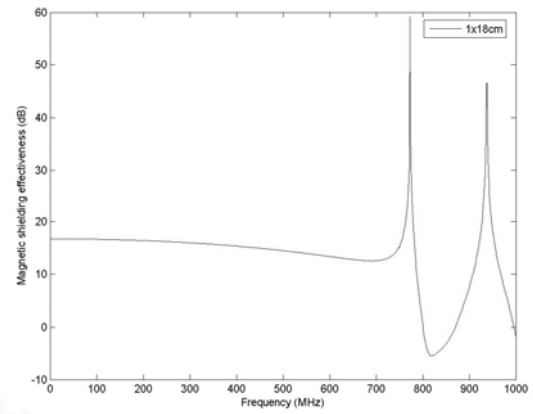
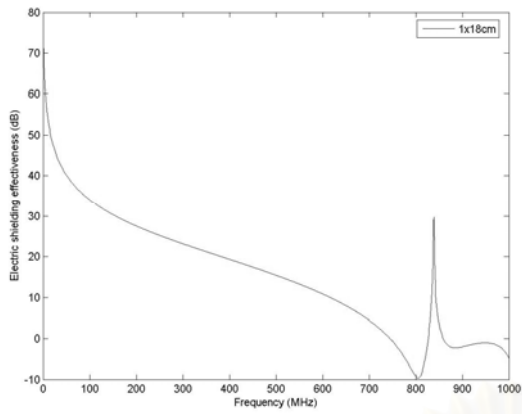
ในบทนี้จะทำการเปรียบเทียบกล่องปิดกั้นที่มีช่องเปิดแบบต่างๆ และทำการเปรียบเทียบขนาดของกล่องที่มีผลต่อการเกิดรีโซแนนซ์อีกด้วย โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อการเปรียบเทียบต่างๆ ดังนี้

4.1 กล่องปิดกั้นที่มีช่องเปิดเดี่ยว (Single Aperture)

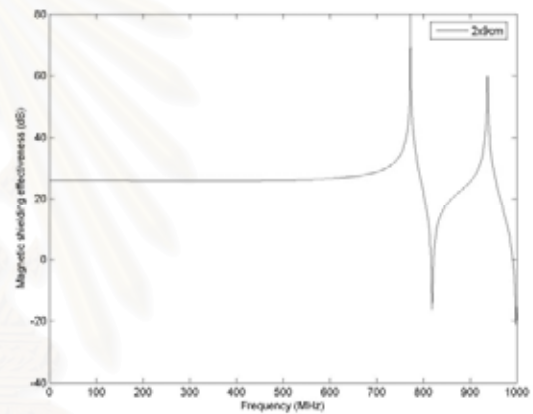
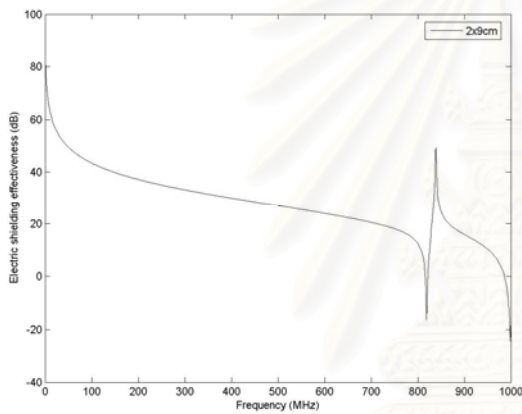
ช่องเปิดเดี่ยว (Single Aperture) มีผลต่อการแพร่สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งรูปแบบที่ต่างกันจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นด้วย โดยในการเปรียบเทียบนี้ จะทำการเปรียบเทียบช่องเปิดที่มีขนาดเท่ากันคือ 18 ตารางเซนติเมตร แต่ทำการเปลี่ยนขนาดของด้านกว้างและด้านยาวต่างๆ กัน ซึ่งขนาดของช่องเปิดกว้างxยาว ที่ทำการเปรียบเทียบคือ 1x18, 2x9, 3x6, 6x3, 9x2, 18x1 เซนติเมตร โดยสามารถแสดงได้ตามลำดับดังรูปที่ 4.1



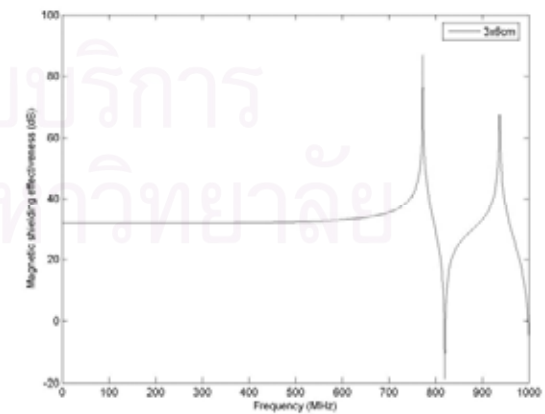
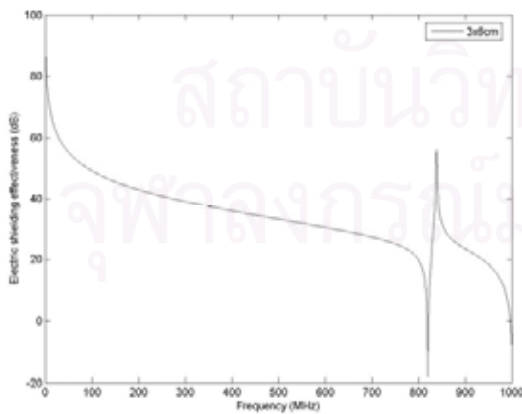
รูปที่ 4.1 ช่องเปิดแบบต่างๆ ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ



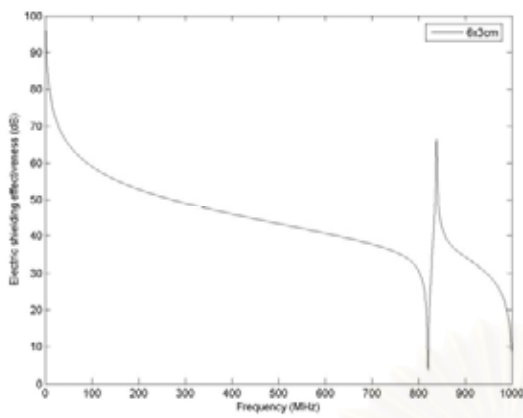
Electric shielding
 Magnetic shielding
 รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิด 1x18 cm



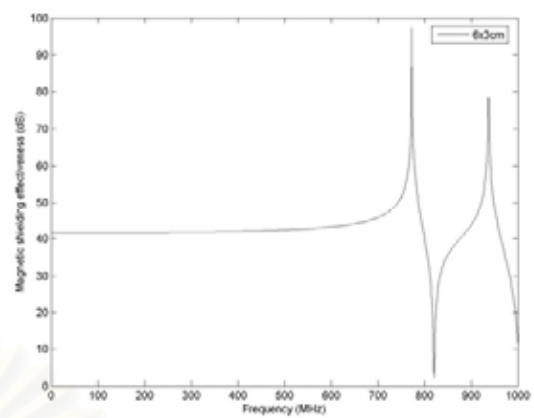
Electric shielding
 Magnetic shielding
 รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิด 2x9 cm



Electric shielding
 Magnetic shielding
 รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิด 3x6 cm

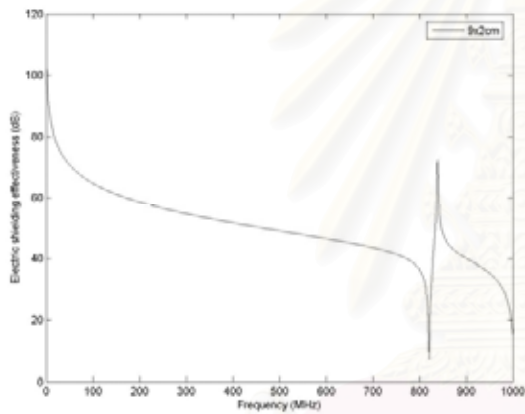


Electric shielding

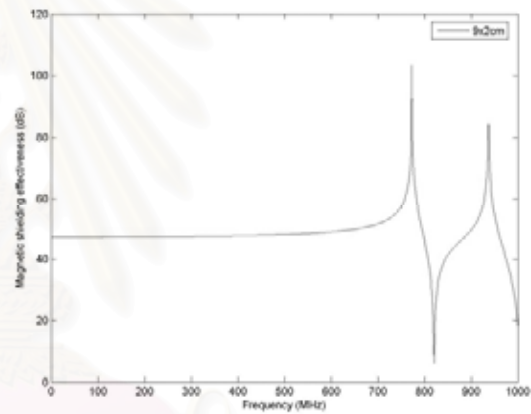


Magnetic shielding

รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิด 6x3 cm

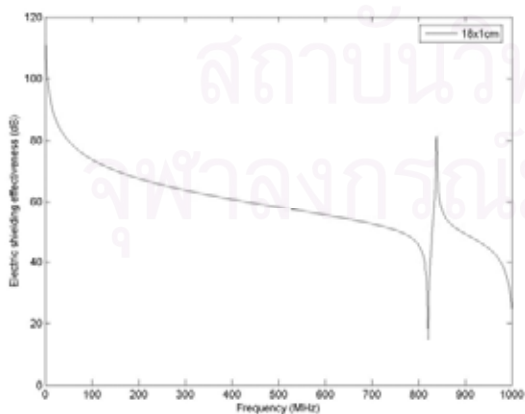


Electric shielding

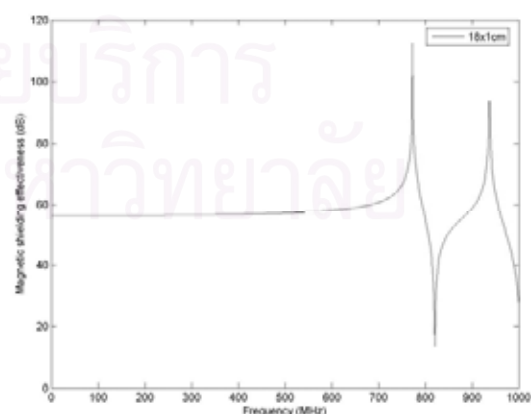


Magnetic shielding

รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิด 9x2 cm



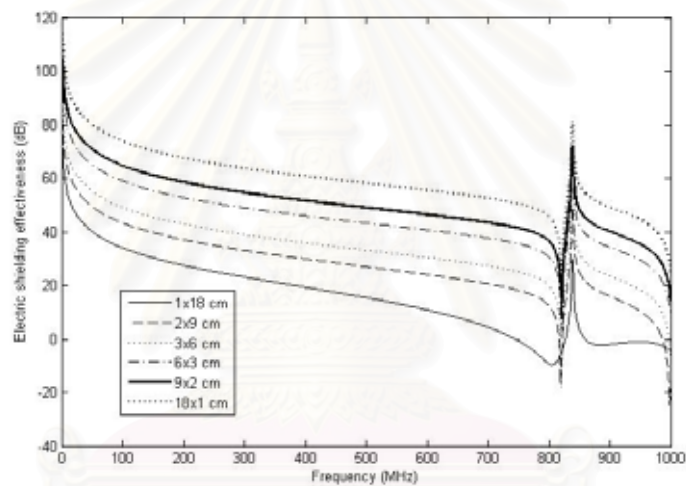
Electric shielding



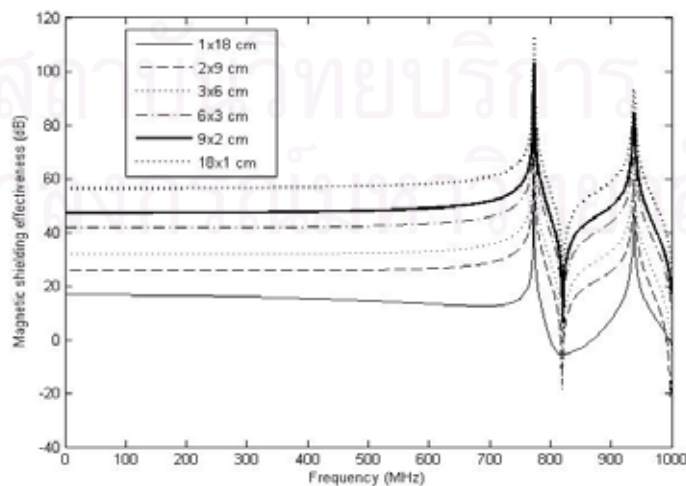
Magnetic shielding

รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิด 18x1 cm

จากรูปที่แสดงข้างต้น จะพบว่าช่องเปิดแต่ละแบบมีค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้า และคลื่นแม่เหล็กที่ต่างกัน ในการปิดกั้นของคลื่นไฟฟ้าจะพบว่ามีความถี่ที่เพิ่มขึ้น และมีค่าต่ำสุดซึ่งจะเรียกว่า ค่ารีโซแนนซ์ของกล่องปิด จากผลการคำนวณพบว่า ที่ขนาดกล่อง 20x40x45 เซนติเมตร ในช่วงความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz จะมีค่ารีโซแนนซ์เพียงค่าเดียว ส่วนในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็ก จะพบว่ามีความถี่ที่คงที่มาจากความถี่ต่ำจนเมื่อถึงความถี่ค่าหนึ่งจึงมีการเปลี่ยนแปลง โดยช่องเปิดแบบ 18x1 เซนติเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพในการปิดกั้นได้ดีที่สุดทั้งในคลื่นไฟฟ้า และคลื่นแม่เหล็ก นอกจากนี้ยังพบว่าในช่องเปิดแต่ละแบบให้ค่ารีโซแนนซ์ที่ใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 820 MHz ดังนั้น การเกิดรีโซแนนซ์จึงอยู่ที่ขนาดของกล่องปิด ซึ่งทำให้ค่ารีโซแนนซ์ที่ใกล้เคียงกัน โดยจะสังเกตได้ว่าช่องเปิดรูปแบบต่างๆ มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นเพียงเท่านั้น



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของช่องเปิดรูปแบบต่างๆ



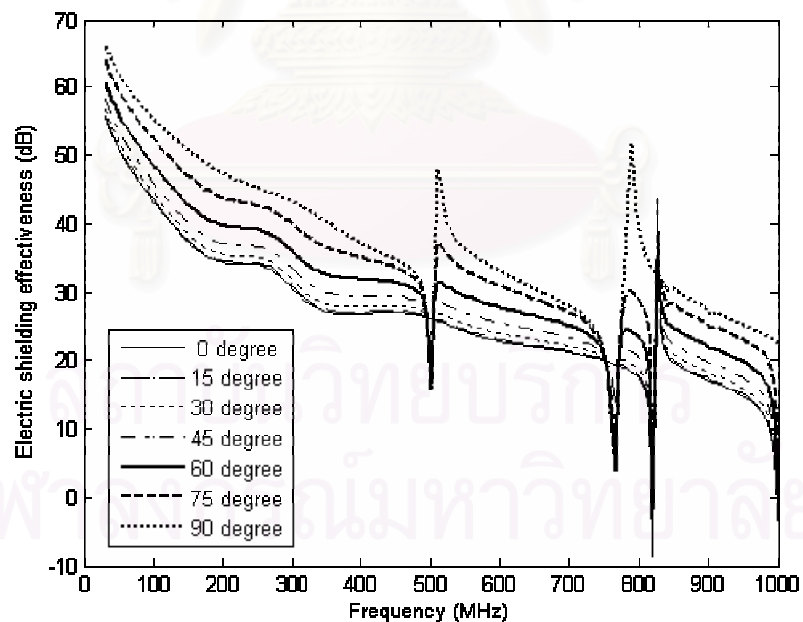
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิดรูปแบบต่างๆ

นอกจากนี้ โพลาริเซชัน (Polarization) ของคลื่นไฟฟ้าที่แพร่เข้ามาก็มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นด้วย ในผลการคำนวณที่ผ่านมากำหนดให้คลื่นมีทิศทางตั้งฉากกับช่องเปิดทั้งหมด ซึ่งกำหนดให้เป็นโพลาริเซชันที่ 0 องศา และจะมีการปรับเปลี่ยนมุมที่ขนาด 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา โดยแสดงตัวอย่างการเปลี่ยนโพลาริเซชันต่างๆ ได้ดังนี้



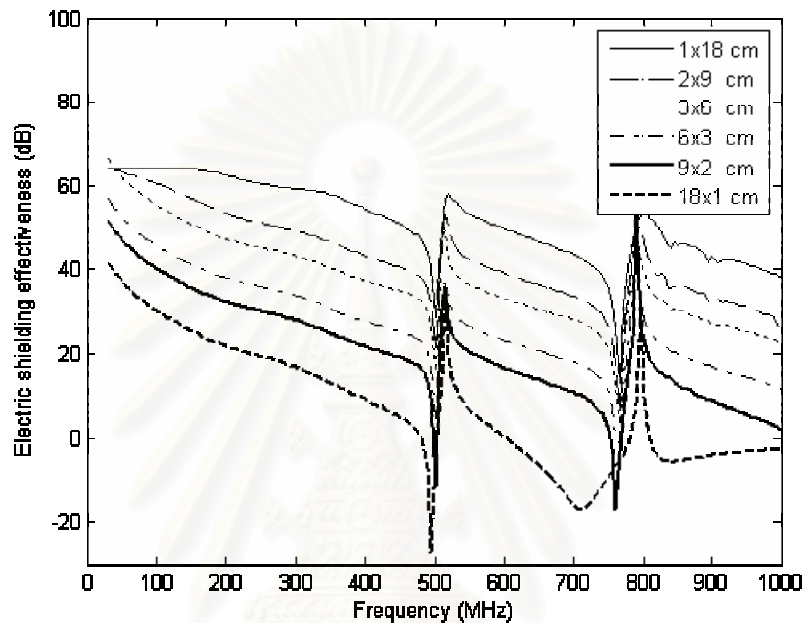
รูปที่ 4.10 มุมโพลาริเซชันที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.10 ทิศทางในการแพร่คลื่นจะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เพียงแต่มุมโพลาริเซชันจะแตกต่างกันไป ซึ่งในมุมที่ 0 องศา และ 180 องศาจะเป็นมุมโพลาริเซชันเดียวกัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.10 ดังนั้น เพื่อหาความสัมพันธ์ของมุมโพลาริเซชันของคลื่นต่อการวางตัวของช่องเปิด จึงทำการคำนวณหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นในมุมขนาดระหว่าง 0 ถึง 90 องศา และจะนำช่องเปิดขนาด 3x6 เซนติเมตร มาทำการทดสอบ โดยแสดงค่าที่คำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 4.11 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นในมุมโพลาริเซชันที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่ามุมที่เปลี่ยนไปทำให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งขนาดมุมที่ 90 องศาทำให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นมีค่าสูงสุด เพราะฉะนั้นนอกจากการวางตัวของช่องเปิดแล้ว ขนาดของมุมโพลาริซชันก็จะมีผลต่อค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นด้วย จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าช่องเปิดขนาด 18x1 เซนติเมตร มีค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นที่ดีที่สุด ในมุม 0 องศา แต่หากเปลี่ยนขนาดของมุมเป็น 90 องศา จะมีผลลัพธ์ดังนี้

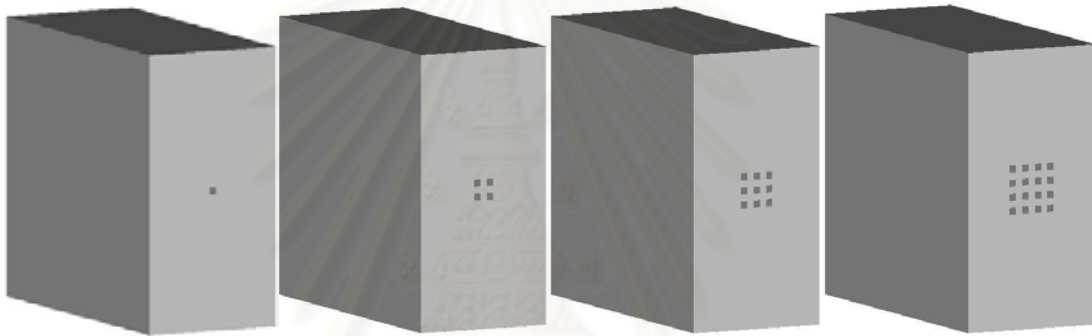


รูปที่ 4.12 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นในมุมโพลาริซชันที่แตกต่างกัน

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมโพลาริซชันทำให้ช่องเปิดขนาด 1x18 เซนติเมตร มีค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นที่ดีที่สุด ดังนั้นในการออกแบบช่องเปิดจึงต้องคำนึงถึงมุมของการแพร่คลื่นด้วย ไม่ใช่เพียงแต่การจัดวางรูปแบบของช่องเปิดเท่านั้น และเพื่อการหลีกเลี่ยงในการเปลี่ยนแปลงมุมของการแพร่คลื่น จึงควรสร้างช่องเปิดที่มีขนาดเป็นจตุรัสจะเหมาะสมกว่า เนื่องจากจะได้ไม่ต้องคำนึงถึงมุมของการแพร่คลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ ซึ่งจะแสดงให้เห็นในหัวข้อที่ 4.3 อีกครั้งหนึ่ง โดยในการวิจัยในตอนนี้จะกำหนดให้มุมของการแพร่คลื่นเป็น 0 องศา ตลอด เพื่อให้สะดวกต่อการทำงานวิจัย และในการเปรียบเทียบกรณีต่างๆ

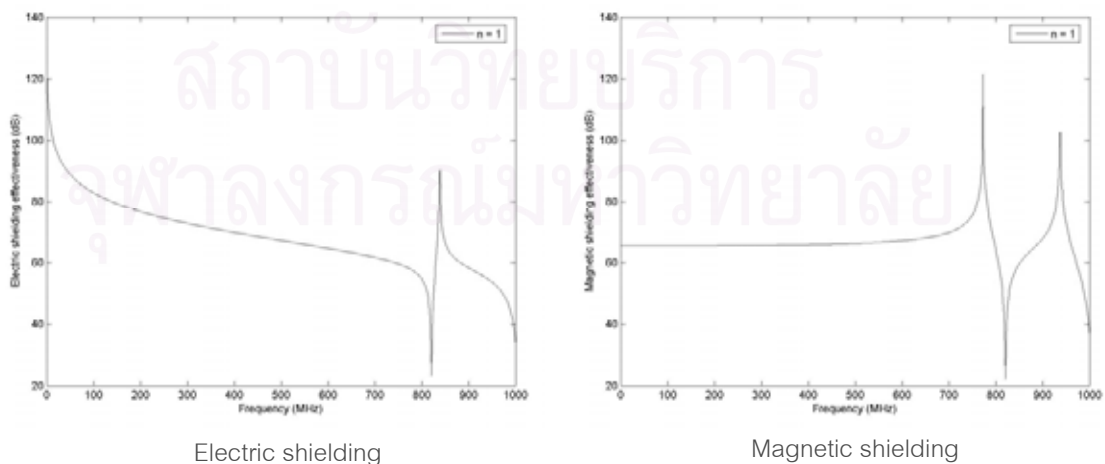
4.2 กล่องปิดกั้นที่มีหลายช่องเปิด (Array Apertures)

จากการเปรียบเทียบที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า ช่องเปิดที่มีด้านกว้างและยาวที่แตกต่างกัน ส่งผลให้การแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแตกต่างกันด้วย ซึ่งต่อเนื่องไปถึงค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นที่ไม่เท่ากัน และในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าปิดกั้นคลื่นต่อจำนวนช่องเปิดที่มีมากกว่า 1 ช่อง โดยการทดสอบนี้จะใช้กล่องที่มีขนาด 20x40x45 เซนติเมตรเช่นเดิม และใช้ขนาดของช่องเปิดที่ 1x1 เซนติเมตร ซึ่งทำการหาค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้า และคลื่นแม่เหล็กในช่องเปิดเพียงช่องเดียวที่มีจำนวนแตกต่างกันไป โดยจำนวนช่องเปิดที่ทำการทดสอบมีดังนี้ ช่องเปิดเพียงช่องเดียว ช่องเปิดจำนวน 4, 9 และ 16 ช่อง ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.13

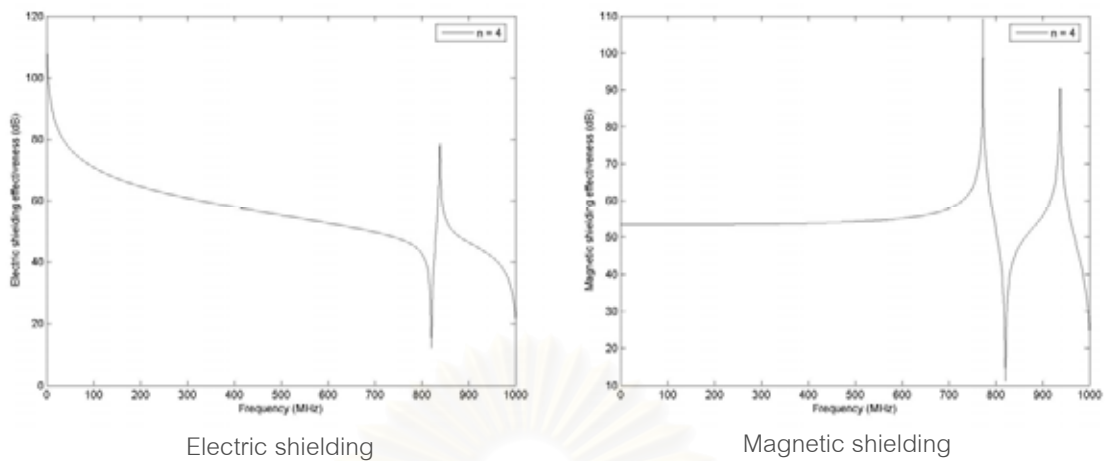


รูปที่ 4.13 กล่องปิดกั้นคลื่นที่มีจำนวนช่องเปิดต่างๆ กัน

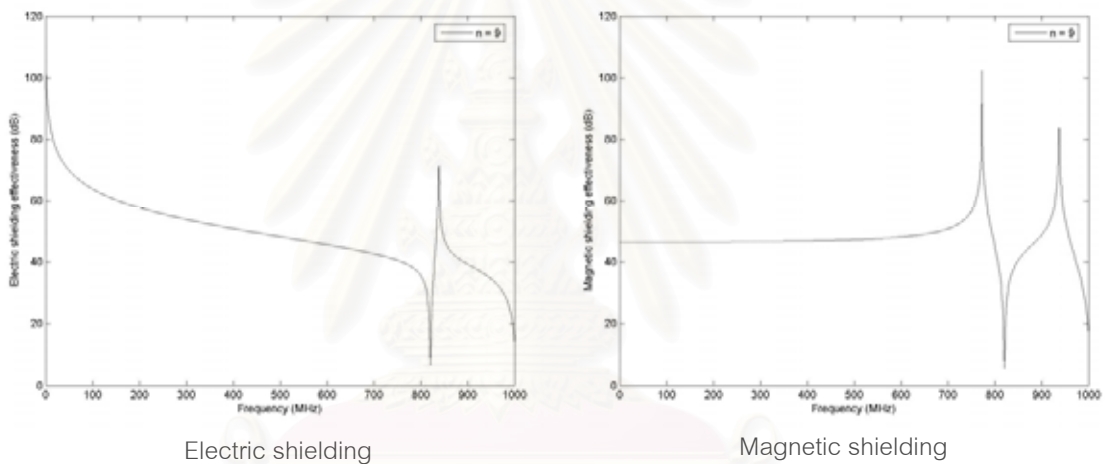
โดยผลการคำนวณหาประสิทธิภาพของช่องเปิดช่องเดียว และช่องเปิดหลายช่องเป็นจำนวน 4, 9 และ 16 ช่องแสดงได้ดังนี้



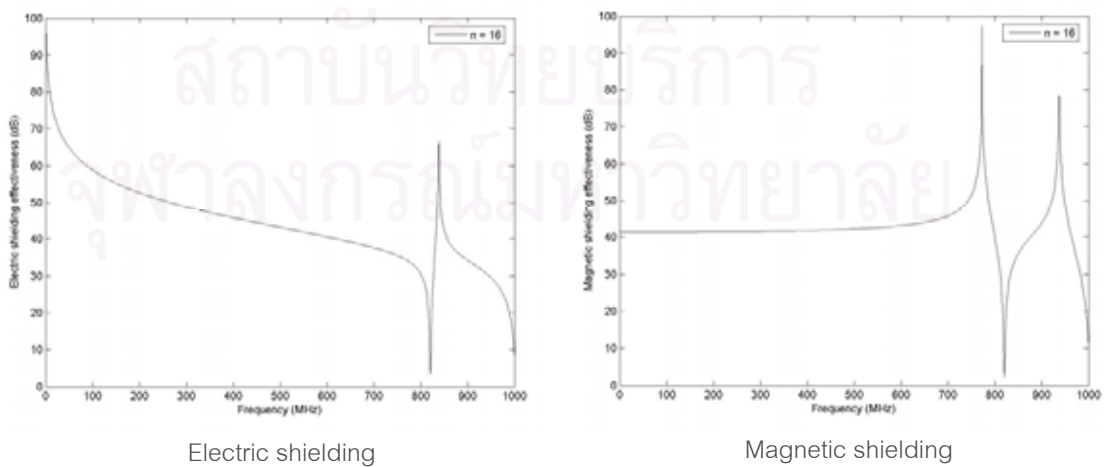
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิดที่มีขนาด 1 ช่อง



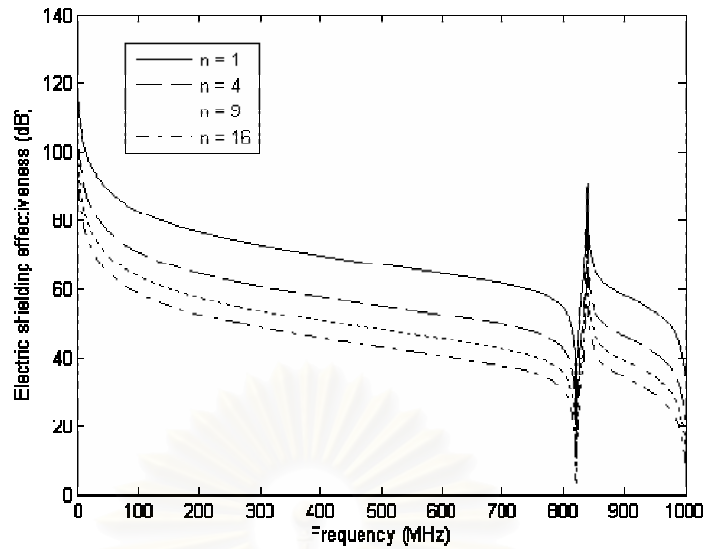
รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิดที่มีขนาด 4 ช่อง



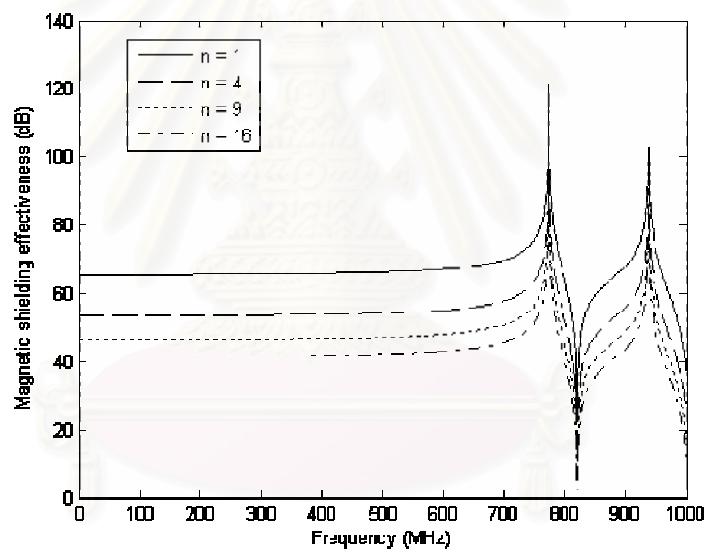
รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิดที่มีขนาด 9 ช่อง



รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิดที่มีขนาด 16 ช่อง



รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของช่องเปิดจำนวนต่างๆ

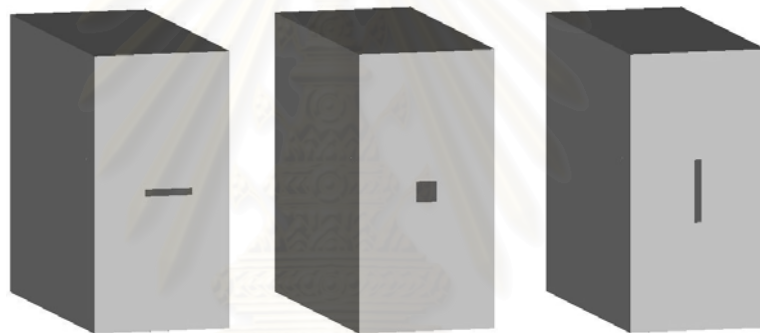


รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิดจำนวนต่างๆ

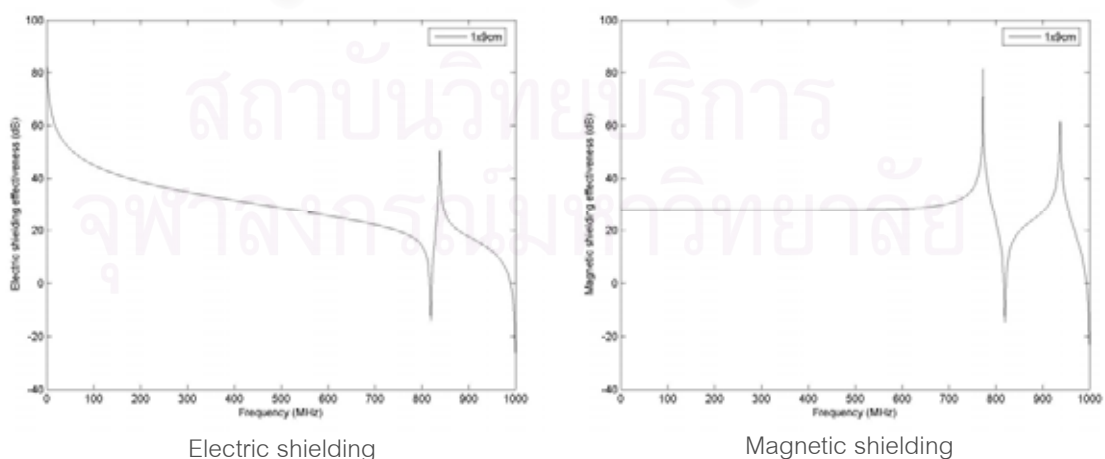
จากรูปที่ 4.18 และ 4.19 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นทั้งสองชนิด คือ การปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กว่า ค่าของประสิทธิภาพดังกล่าวจะมีค่าลดลงตามจำนวนช่องเปิดที่เพิ่มมากขึ้น โดยประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นจะมีรูปแบบเหมือนเดิมทั้ง ลักษณะการลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น และจะพบว่ามีจำนวนรีโซแนนซ์เท่าเดิม อีกทั้งความถี่ที่เกิดรีโซแนนซ์ก็ยังคงเหมือนเดิมอีกด้วย แสดงให้เห็นว่าขนาดของกล่องปิดกั้นจะทำให้เกิดรีโซแนนซ์ที่เหมือนกัน แต่การลดลงของประสิทธิภาพการปิดกั้นขึ้นอยู่กับรูปร่างของช่องเปิด และจำนวนของช่องเปิด

4.3 รูปร่างของช่องเปิดในพื้นที่ขนาดเท่ากัน

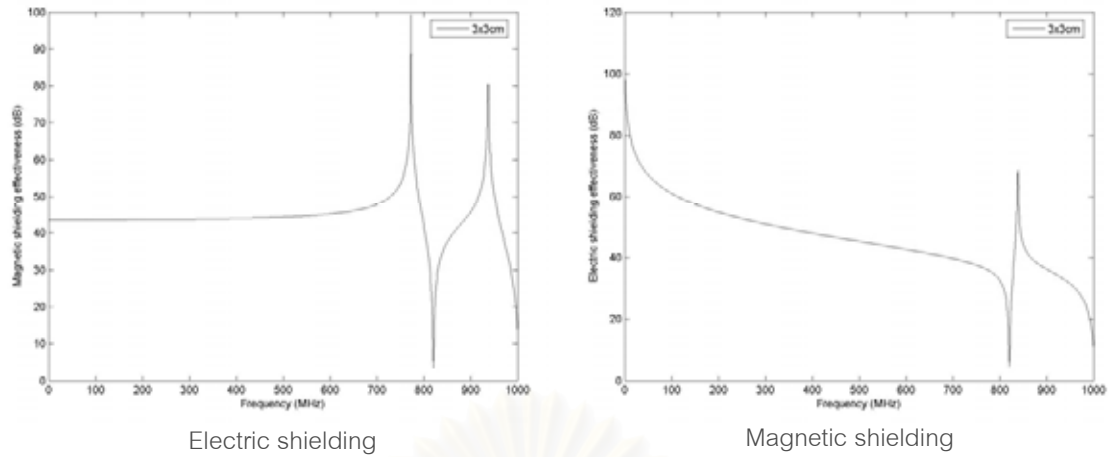
จากหัวข้อ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยรูปร่างช่องเปิดที่เป็นไปตามสายอากาศพบว่ามีการปิดกั้นที่ดีที่สุด เนื่องจากมีการกรองคลื่นที่แพร่ผ่านออกมาได้มากกว่ารูปร่างที่ขวงเส้นแนวสายอากาศภายในกล่องปิดกั้นคลื่น และในหัวข้อนี้จะทำการคำนวณหา ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีช่องเปิดมีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า และรูปร่างจัตุรัส เพื่อทำการเปรียบเทียบให้ได้ข้อสรุปว่ารูปร่างที่ดีในการออกแบบช่องเปิดในการปิดกั้น โดยทำการคำนวณในขนาดของกล่องปิดกั้นคือ 20x40x45 เซนติเมตร มีช่องเปิดขนาด 1x9, 3x3, 9x1 เซนติเมตร ซึ่งรูปที่ 4.20 ได้แสดงช่องเปิดที่นำมาเปรียบเทียบตามลำดับ และจุดทำการทดสอบคือ 5 เซนติเมตร ผลการคำนวณประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้า และคลื่นแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 4.21 – 4.24



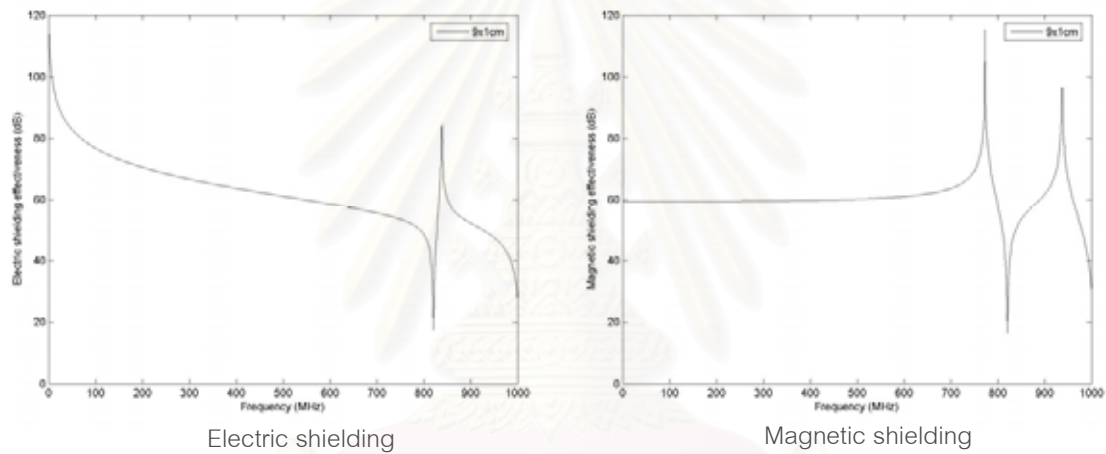
รูปที่ 4.20 ช่องเปิดแบบต่างๆ ที่นำมาคำนวณ



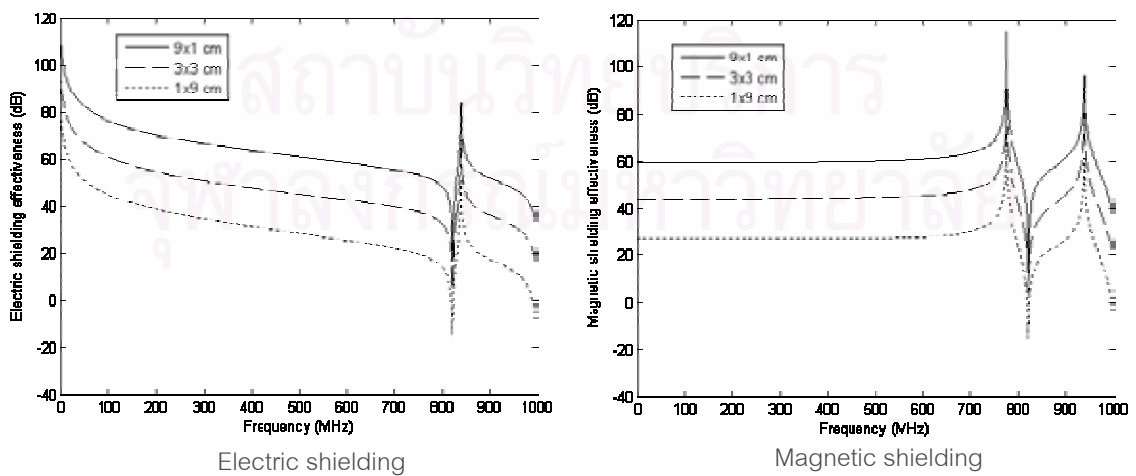
รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิด 1x9 cm



รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิด 3x3 cm



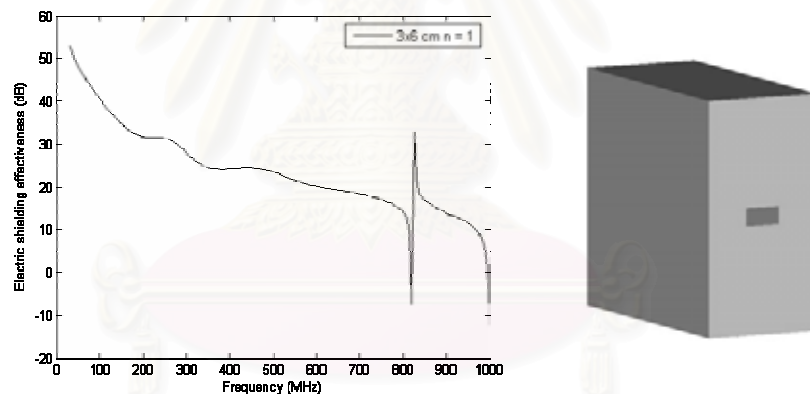
รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิด 9x1 cm



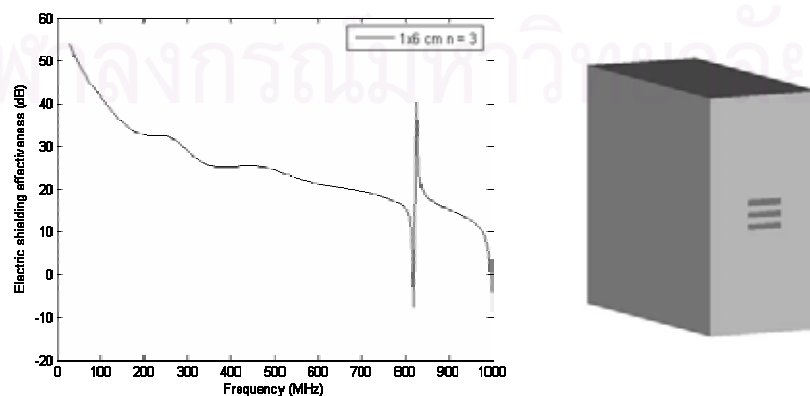
รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของช่องเปิดทั้งสามแบบ

จากรูปที่ 4.24 แสดงค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กที่ช่องเปิดแตกต่างกันทั้งสามคือ 9×1 , 3×3 , 1×9 เซนติเมตร ผลปรากฏออกมาใกล้เคียงกับหัวข้อที่ 4.1 กล่าวคือ ช่องเปิดที่มีขนาดความกว้าง (w) ที่มีค่ามากกว่าจะให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นที่ดีกว่า ในขณะที่เดียวกันยังพบข้อสรุปที่น่าสนใจอีกคือ ในกล่องปิดที่มีขนาดเท่ากัน แต่มีช่องเปิดที่แตกต่างกัน จะมีความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่เดียวกัน จากการทดสอบกล่องปิดกั้นที่มีขนาด $20 \times 40 \times 45$ เซนติเมตร จะพบว่ามีความถี่เรโซแนนซ์อยู่ที่ประมาณ 800 MHz แต่ความแตกต่างของช่องเปิดจะมีผลให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นมีค่ามากน้อยต่างกัน

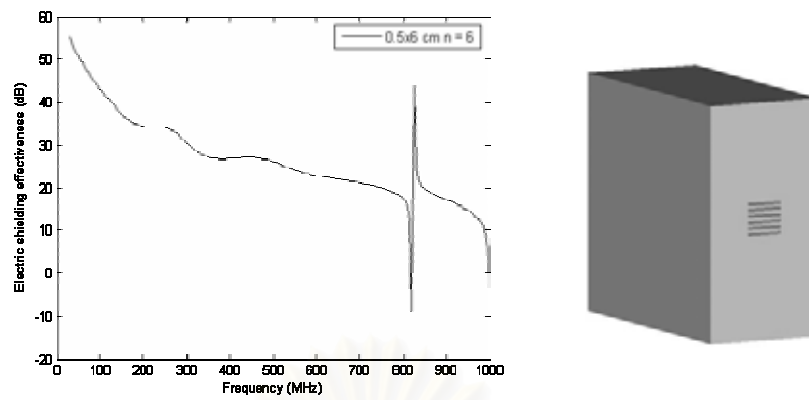
นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของช่องเปิดที่มีขนาดพื้นที่เท่ากัน แต่มีการจัดวางให้แตกต่างกัน กล่าวคือจัดวางให้มีช่องเปิดที่เล็กลง แต่เพิ่มจำนวนช่องเปิดให้มากขึ้นก็มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นอีกด้วย โดยทำการหาค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นของช่องเปิด 3×6 เซนติเมตร จำนวน 1 ช่อง, 1×6 เซนติเมตร จำนวน 3 ช่อง, 0.5×6 เซนติเมตร จำนวน 6 ช่อง, 0.5×2 เซนติเมตร จำนวน 18 ช่อง และ 0.5×0.5 เซนติเมตร จำนวน 72 ช่อง ผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพของแต่ละช่องเปิดแสดงได้ดังรูปที่ 4.25 – 4.29



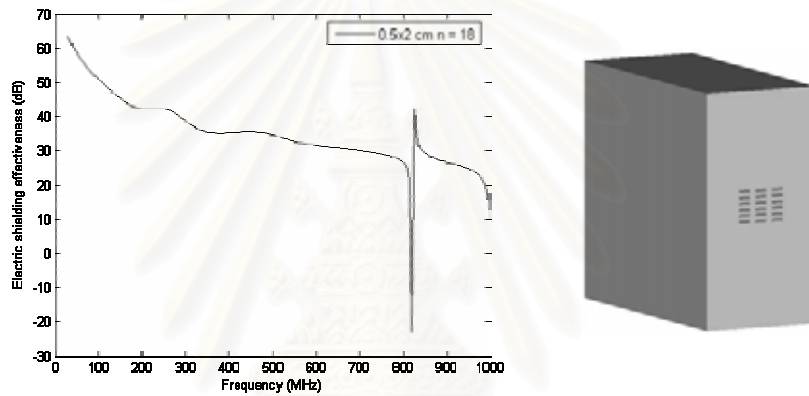
รูปที่ 4.25 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของช่องเปิด 3×6 เซนติเมตร



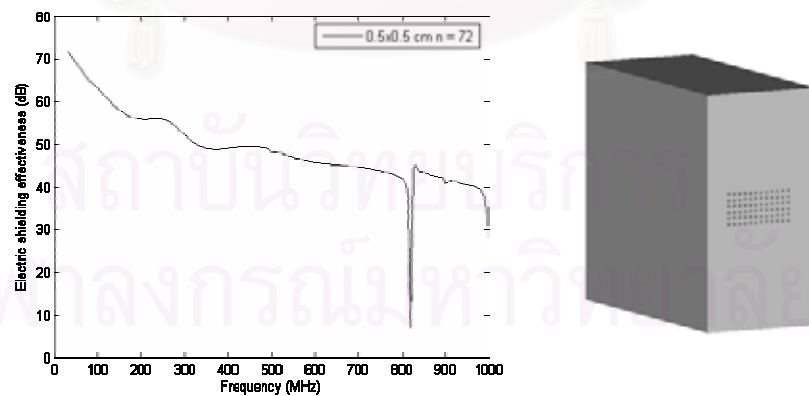
รูปที่ 4.26 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของช่องเปิด 1×6 เซนติเมตร



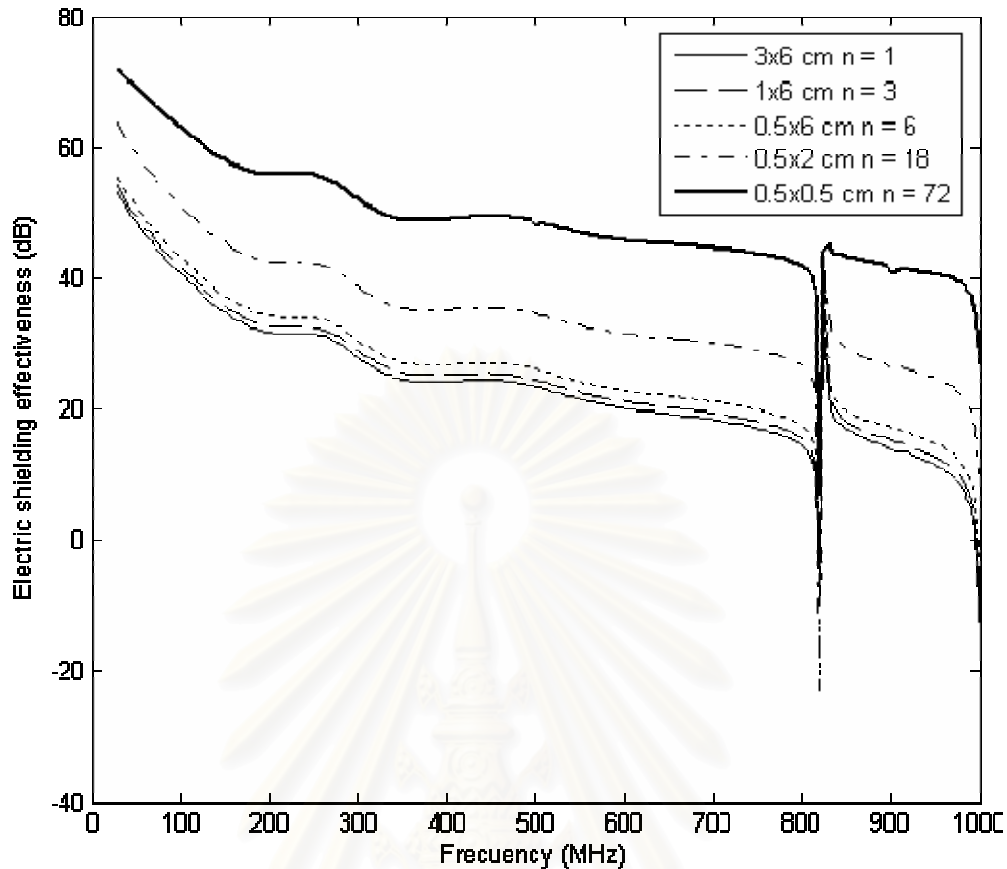
รูปที่ 4.27 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของช่องเปิด 0.5x6 เซนติเมตร



รูปที่ 4.28 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของช่องเปิด 0.5x2 เซนติเมตร



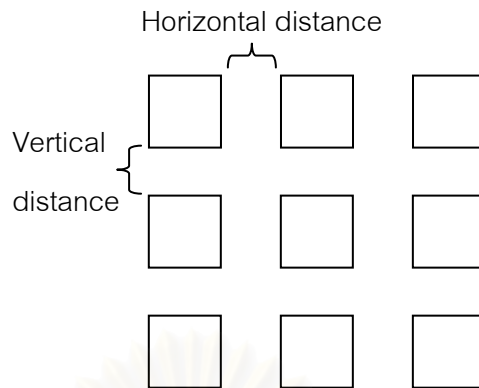
รูปที่ 4.29 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของช่องเปิด 0.5x0.5 เซนติเมตร



รูปที่ 4.30 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของช่องเปิดแบบต่างๆ

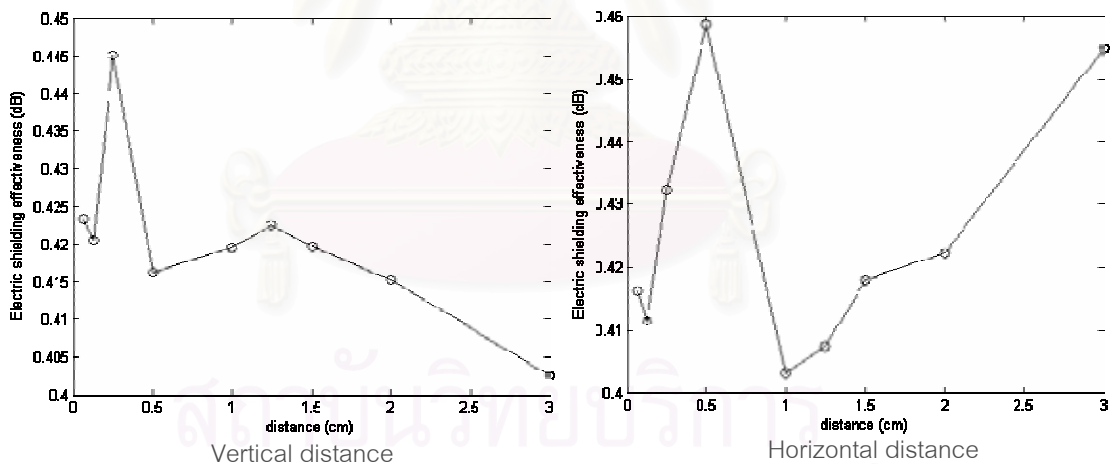
จากรูปที่ 4.30 จะพบว่าขนาดของช่องเปิด 3x6, 1x6 และ 0.5x6 เซนติเมตร มีค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าใกล้เคียงกัน แต่ช่องเปิดขนาด 3x6 เซนติเมตร จะมีค่าประสิทธิภาพน้อยที่สุด และช่องเปิดขนาด 0.5x6 เซนติเมตร จะมีค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้ามากที่สุดในกลุ่มของช่องเปิดทั้งสาม ในขณะที่ช่องเปิดขนาด 0.5x2 และ 0.5x0.5 เซนติเมตร จะมีประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นที่มีค่ามากแตกต่างออกไปอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยช่องเปิดขนาด 0.5x0.5 เซนติเมตรจะมีค่ามากที่สุด โดยจะสังเกตได้ว่าขนาดของด้านยาว (l) ที่ลดลงทำให้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการคำนวณเป็นไปในแนวทางเดียวกับหัวข้อที่ 4.1 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ในขนาดรวมทั้งหมดของช่องเปิดที่มีเนื้อที่เท่ากัน เมื่อช่องเปิดมีการแบ่งให้มีขนาดเล็กลง จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าได้

นอกจากนี้ ระยะห่างของช่องเปิดในแต่ละช่อง ยังเป็นเรื่องที่น่าสนใจในการคำนึงถึงค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นด้วย โดยระยะห่างสามารถแบ่งออกเป็น 2 แนวด้วยกันคือ ในแนวตั้ง (vertical) และในแนวนอน (horizontal) ดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ระยะห่างของช่องเปิดทั้ง 2 แบบ

ในการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นจะทำในช่องเปิดขนาด 0.5x0.5 เซนติเมตร จำนวน 9 ช่อง โดยมีระยะห่างแตกต่างกันคือ 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 1.25, 1.5, 2 และ 3 เซนติเมตร และทำการทดสอบที่ความถี่ 820 MHz ผลการคำนวณแสดงได้ดังรูปที่ 4.32 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที่ระยะช่องเปิดในแนวตั้งเพิ่มขึ้นจะมีค่าประสิทธิภาพที่ลดลง แต่ในขณะที่ระยะช่องเปิดในแนวนอนจะตรงข้ามกัน ซึ่งทั้งสองจะให้ค่าสูงสุดที่ระยะห่าง 0.25 และ 0.5 เซนติเมตร ตามลำดับ

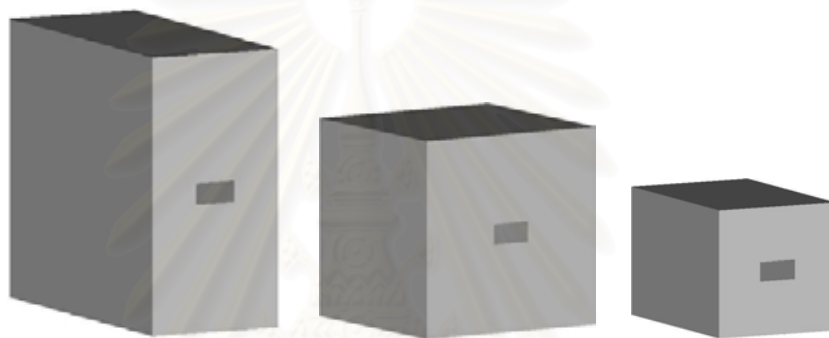


รูปที่ 4.32 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นระยะห่างของช่องเปิดทั้ง 2 แบบ

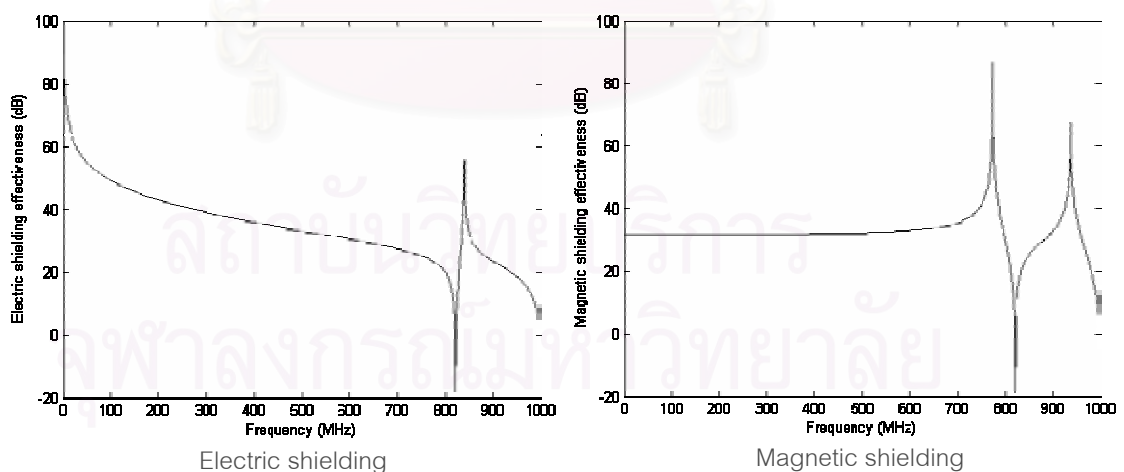
ในหัวข้อที่ผ่านมาข้างต้น เป็นการเปรียบเทียบช่องเปิดแบบต่างๆ ที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่น แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของช่องเปิดเดี่ยว และช่องเปิดที่เป็นกลุ่ม อีกทั้งยังแสดงให้เห็นว่า เมื่อแบ่งช่องเปิดขนาดใหญ่ออกเป็นช่องเปิดขนาดเล็กลงจะทำให้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยหัวข้อถัดไปจากนี้ จะแสดงให้เห็นถึงขนาดของกล่องที่มีผลต่อค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้น

4.4 ขนาดของกล่องปิดกั้นที่แตกต่างกัน

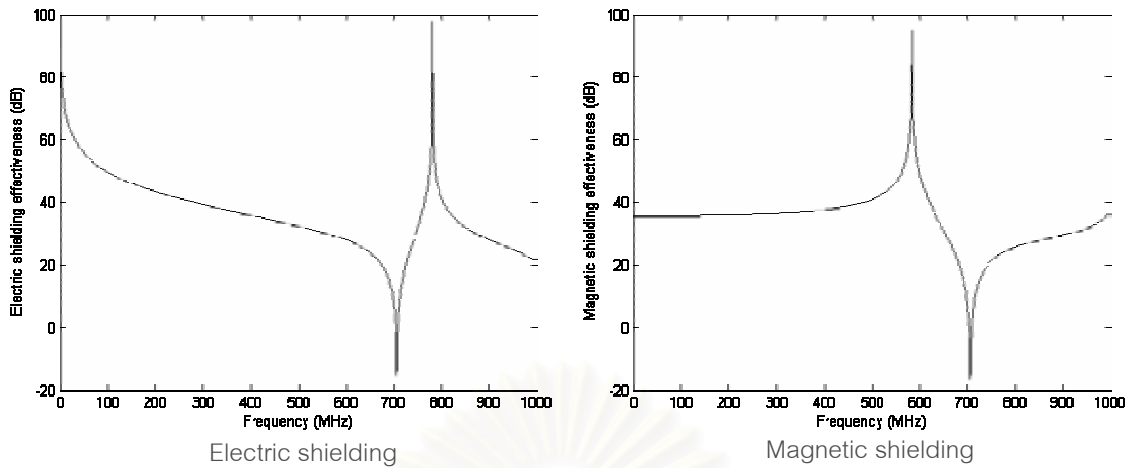
จากหัวข้อที่ผ่านมาจะพบว่าถ้ากล่องปิดกั้นที่มีขนาดเท่ากันจะส่งผลทำให้ความถี่รีโซแนนซ์เกิดที่ความถี่เท่ากัน แต่จะมีค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นที่แตกต่างกัน ในหัวข้อนี้จะทำการคำนวณหาประสิทธิภาพการปิดกั้นในกล่องปิดกั้นที่แตกต่างกันของขนาด เพื่อแสดงให้เห็นว่า กล่องปิดกั้นขนาดต่างๆ จะทำให้เกิดรีโซแนนซ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะคำนวณค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นของกล่องปิดกั้นขนาด 20x40x45, 30x30x30, 20x20x30 เซนติเมตร โดยมีขนาดช่องเปิดที่ขนาด 3x6 เซนติเมตร รูปที่ 4.33 แสดงขนาดกล่องปิดกั้นที่นำมาเปรียบเทียบตามลำดับ



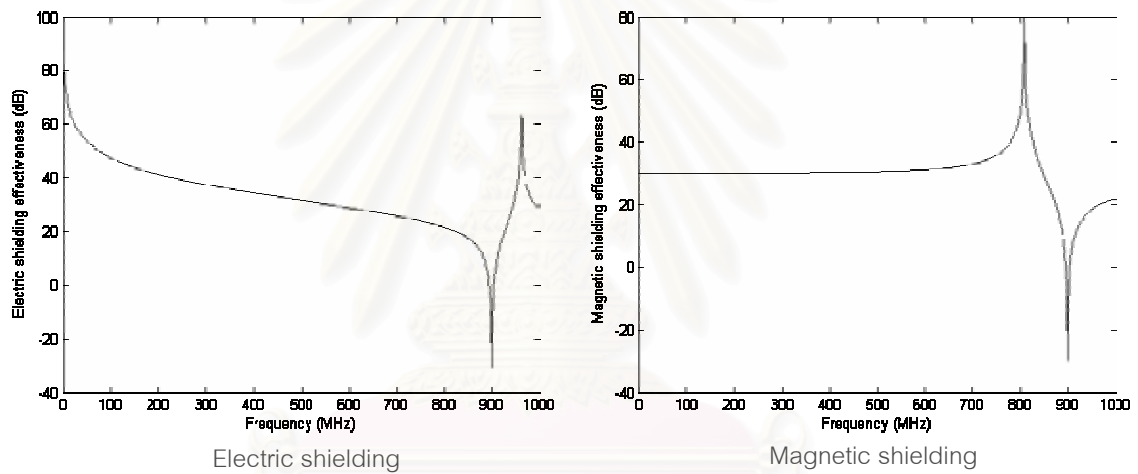
รูปที่ 4.33 กล่องปิดกั้นคลื่นในขนาดที่ต่างๆ กัน



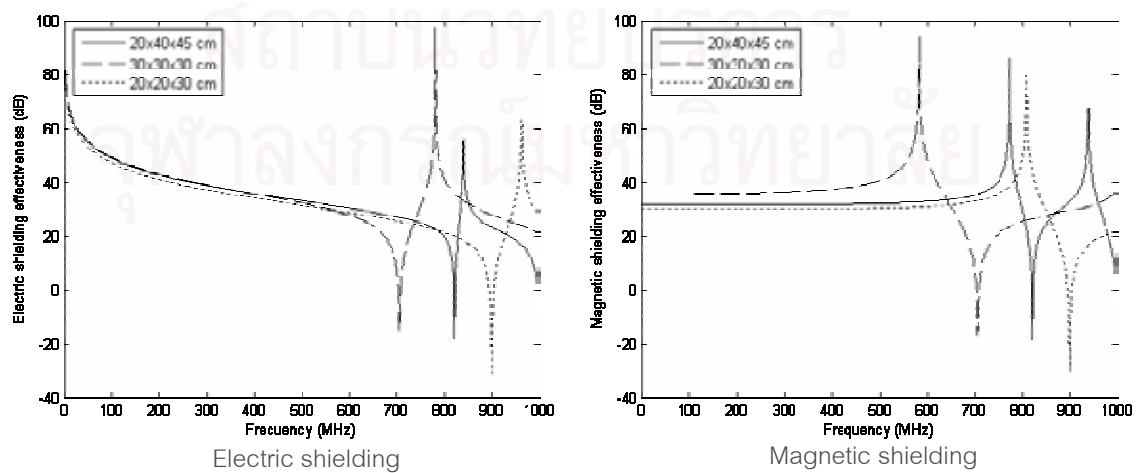
รูปที่ 4.34 การปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของกล่องปิดขนาด 20x40x45 เซนติเมตร



รูปที่ 4.35 การปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของกล่องปิดขนาด 30x30x30 เซนติเมตร



รูปที่ 4.36 การปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของกล่องปิดขนาด 20x20x30 เซนติเมตร

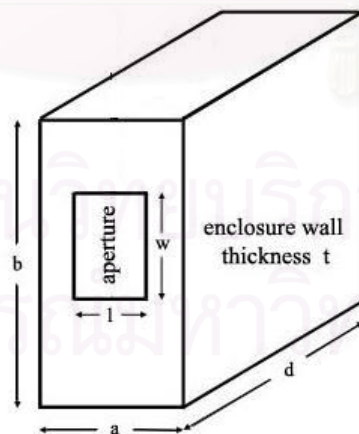


รูปที่ 4.37 การปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กของกล่องปิดทั้งสามขนาด

จากรูปที่ 4.37 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าและแม่เหล็กของกล่องทั้งสามขนาด ทำให้พบว่าความถี่รีโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นมีค่าที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ที่ความถี่รีโซแนนซ์ที่ต่ำที่สุดมีขนาด 700 MHz เป็นของกล่องปิดกั้น 30x30x30 เซนติเมตร ความถี่รีโซแนนซ์ที่สูงถัดมาคือ กล่องปิดกั้นที่มีขนาด 20x40x45 เซนติเมตร ซึ่งมีความถี่รีโซแนนซ์อยู่ที่ประมาณ 800 MHz และความถี่รีโซแนนซ์ที่มากที่สุดได้แก่ กล่องปิดกั้นขนาด 20x20x30 เซนติเมตร ซึ่งมีความถี่ที่ปรากฏคือ 900 MHz ทำให้สามารถสรุปได้ว่าความถี่รีโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นมาจากขนาดกล่องปิดกั้นคลื่นที่มีขนาดต่างๆกัน และช่องเปิดแต่ละรูปแบบสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นได้

4.5 การปรับแก้รีโซแนนซ์ในกล่องปิดกั้น

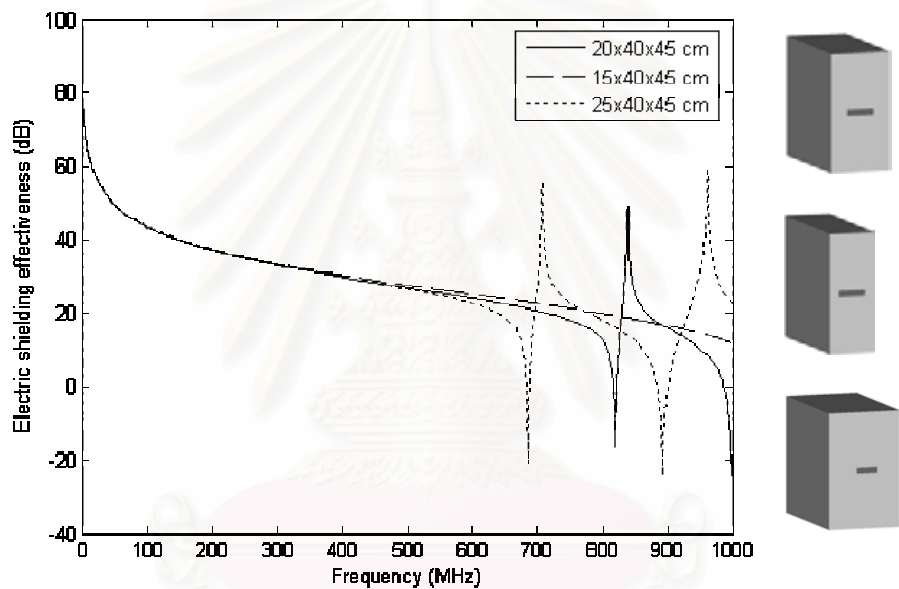
จากหัวข้อที่ 4.4 พบว่าขนาดของกล่องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีผลต่อความถี่ของรีโซแนนซ์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงจะนำมาพิจารณาคำนวณหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะกล่าวอ้างถึงกล่องปิดกั้นที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 4.38 และมีตัวแปรที่สำคัญคือ a , b และ d ซึ่งเป็นด้านกว้าง สูง และลึกตามลำดับ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรของกล่องปิดกั้นแต่ละตัวมีผลต่อค่าความถี่รีโซแนนซ์ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.38 กล่องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

4.5.1 การปรับขนาดด้านกว้าง (a)

ในลำดับแรกจะทำการหาความสัมพันธ์ของด้านกว้างของกล่องปิดกั้นคลื่น (a) เพื่อทำการศึกษาความถี่รีโซแนนซ์ที่เกิดขึ้น โดยนำกล่องที่มีขนาด 20x40x45, 15x40x45 และ 25x40x45 เซนติเมตร โดยมีช่องเปิดขนาด 2x9 เซนติเมตรเหมือนกันทั้งสามกล่อง และจุดทดสอบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระยะห่างจากด้านหน้ากล่องปิดกั้นที่ 5 เซนติเมตร ในกรณีที่กำลังจะศึกษานี้ ต้องการจะแยกตัวแปรของกล่องปิดกั้นทั้งสาม เพื่อทำการศึกษาการแก้ปัญหาการเกิด รีโซแนนซ์ ภายในกล่องปิดกั้น ซึ่งรูปที่ 4.39 แสดงให้เห็นถึงผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของกล่องปิดกั้นทั้งสามแบบ

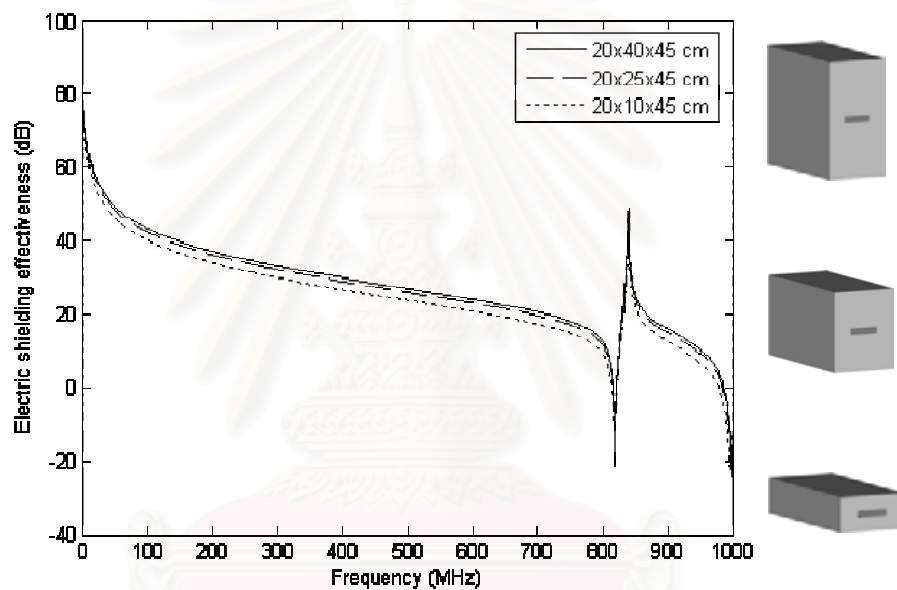


รูปที่ 4.39 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของกรณีแรก

จากรูปที่ 4.39 จะพบว่าที่ขนาดของกล่อง 20x40x45 เซนติเมตรจะพบความถี่รีโซแนนซ์ประมาณ 800 MHz กล่องขนาด 15x40x45 เซนติเมตรจะเกิดความถี่รีโซแนนซ์ที่เกินกว่าย่านความถี่ที่ทำการทดสอบคือมากกว่า 1 GHz และกล่องขนาดสุดท้ายคือ 25x40x45 เซนติเมตรปรากฏว่าความถี่รีโซแนนซ์เกิดที่ความถี่ประมาณ 700 MHz ซึ่งเรียงลำดับของขนาดด้านกว้างของกล่อง (a) ที่เกิดความถี่รีโซแนนซ์ต่ำไปสูงคือ 25, 20 และ 15 เซนติเมตร ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า การปรับขนาดของด้านกว้างของกล่องปิดกั้นสามารถทำการแก้ไขปัญหาการเกิดรีโซแนนซ์ในกล่องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้

4.5.2 การปรับขนาดด้านสูง (b)

ในลำดับต่อมา จะทำการหาความสัมพันธ์ของด้านสูงของกล่องปิดกั้นคลื่น (b) เพื่อทำการศึกษาความถี่รบกวนที่เกิดขึ้น โดยนำกล่องที่มีขนาด 20x40x45, 20x25x45 และ 20x10x45 เซนติเมตร โดยมีช่องเปิดขนาด 2x9 เซนติเมตรเหมือนกันทั้งสามกล่อง และจุดทดสอบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระยะห่างจากด้านหน้ากล่องปิดกั้นที่ 5 เซนติเมตร ในกรณีที่กำลังจะศึกษานี้ ต้องการจะแยกตัวแปรของกล่องปิดกั้นทั้งสาม เพื่อทำการศึกษาการแก้ปัญหาการเกิด รบกวนภายนอก ภายในกล่องปิดกั้น ซึ่งรูปที่ 4.40 แสดงให้เห็นถึงผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของกล่องปิดกั้นทั้งสามชนิด

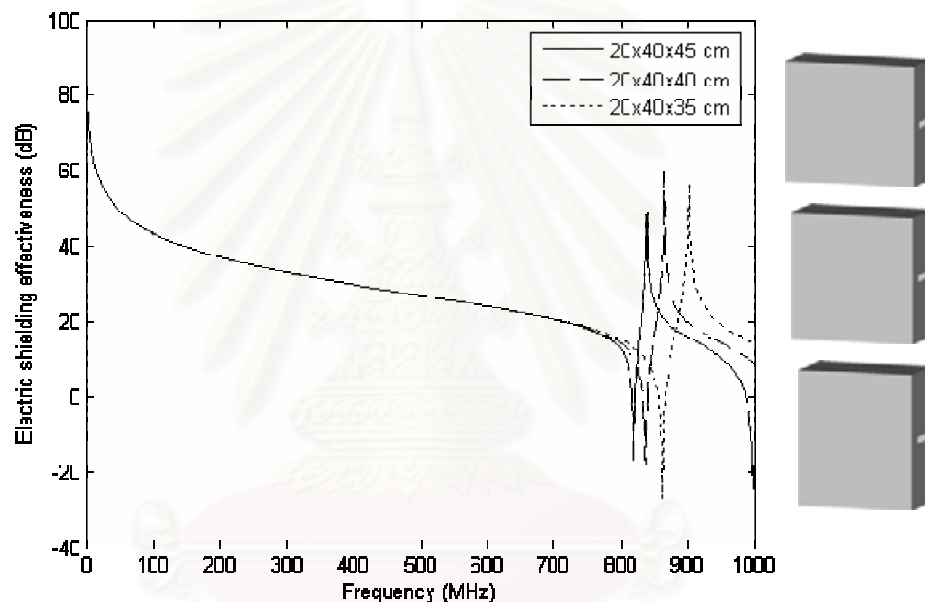


รูปที่ 4.40 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของกรณีที่สอง

จากรูปที่ 4.40 จะพบว่าที่ขนาดของกล่องที่มีด้านทั้งสาม 20x40x45, 20x25x45 และ 20x10x45 เซนติเมตร จะเกิดความถี่รบกวนที่ความถี่ประมาณ 800 MHz ซึ่งเป็นความถี่ค่าเดียวกัน เพียงแต่ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้ามีความแตกต่างกัน ซึ่งเรียงลำดับของขนาดด้านสูงของกล่อง (b) ที่มีค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นจากต่ำไปสูงคือ 40, 25 และ 10 เซนติเมตร ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า การปรับขนาดของด้านสูงของกล่องปิดกั้นไม่สามารถทำการแก้ไขปัญหาการเกิดรบกวนภายในกล่องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ เพียงแต่การปรับค่าขนาดความสูงของกล่องปิดกั้นคลื่นสามารถช่วยลดการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหมือนกับที่ช่องเปิดรูปแบบต่างๆ สามารถทำให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นมีค่าที่ต่างๆ กันตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อข้างต้น ซึ่งยังเหลืออีกตัวแปรที่จะนำมาพิจารณา คือ ด้านลึกของกล่อง (c) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.5.3 การปรับขนาดด้านลึก (d)

ในหัวข้อสุดท้าย จะทำการหาความสัมพันธ์ของด้านลึกของกล่องปิดกั้นคลื่น (d) เพื่อทำการศึกษาความถี่รีโซแนนซ์ที่เกิดขึ้น โดยนำกล่องที่มีขนาด 20x40x45, 20x40x40 และ 20x40x35 เซนติเมตร โดยมีช่องเปิดขนาด 2x9 เซนติเมตรเหมือนกันทั้งสามกล่อง และจุดทดสอบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระยะห่างจากด้านหน้ากล่องปิดกั้นที่ 5 เซนติเมตร ในกรณีที่กำลังจะศึกษานี้ ต้องการจะแยกตัวแปรของกล่องปิดกั้นทั้งสาม เพื่อทำการศึกษาการแก้ปัญหาการเกิด รีโซแนนซ์ ภายในกล่องปิดกั้น ซึ่งรูปที่ 4.41 แสดงให้เห็นถึงผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของกล่องปิดกั้นทั้งสามชนิด

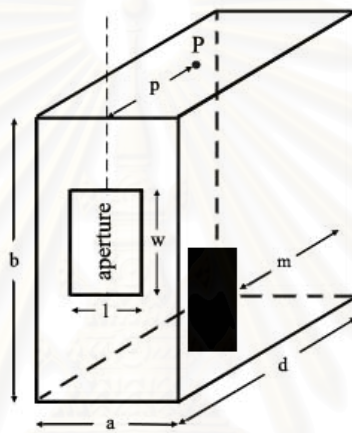


รูปที่ 4.41 ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของกรณีทั้งสาม

จากรูปที่ 4.41 จะพบว่าที่ขนาดของกล่อง 20x40x45 เซนติเมตรจะพบความถี่รีโซแนนซ์ประมาณ 800 MHz กล่องขนาด 20x40x40 เซนติเมตรจะเกิดความถี่รีโซแนนซ์ความถี่ที่ประมาณ 850 MHz และกล่องขนาดสุดท้ายคือ 20x40x35 เซนติเมตรปรากฏว่าความถี่รีโซแนนซ์เกิดที่ความถี่ประมาณ 880 MHz ซึ่งเรียงลำดับของขนาดด้านลึกของกล่อง (d) ที่เกิดความถี่รีโซแนนซ์ต่ำไปสูงคือ 45, 40 และ 35 เซนติเมตร ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า การปรับขนาดของด้านลึกของกล่องปิดกั้น สามารถทำการแก้ไขปัญหาการเกิดรีโซแนนซ์ในกล่องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ และจะได้ดีกว่ากล่องปิดกั้นที่มีขนาดเล็กกว่าจะทำให้เกิดค่าความถี่รีโซแนนซ์ที่มีค่าสูงกว่ากล่องปิดกั้นที่มีขนาดใหญ่กว่าอีกด้วย

4.6 การวางขึ้นโลหะภายในกล่องเพื่อปรับแก้รีโซแนนซ์

จากหัวข้อที่ 4.5 กล่าวถึงการปรับแก้รีโซแนนซ์ในกล่องปิดกั้นคลื่น โดยอาศัยการปรับเปลี่ยนขนาดของกล่อง ซึ่งพบว่าการปรับเปลี่ยนขนาดของด้านกว้าง และด้านลึกในกล่องมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรีโซแนนซ์ โดยปกติกล่องปิดกั้นมักจะถูกสร้างให้มีขนาดตามที่คุณผลิตกำหนด ดังนั้นการแก้ไขขนาดของกล่องจึงทำได้ยาก ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่ใช้หลักการเดียวกับการจูนของท่อนำคลื่น (wave guide) ที่มีไว้เพื่อกรองความถี่ในช่วงที่ต้องการ ซึ่งได้ปรับมาใช้วิธีการวางขึ้นโลหะ (อะลูมิเนียม) ไว้ในกล่อง แล้วทำการเลื่อนออกห่างจากผนังกล่องไปเรื่อยๆ แทนการปรับขนาดของกล่อง โดยแสดงการวางขึ้นโลหะได้ดังรูปที่ 4.42

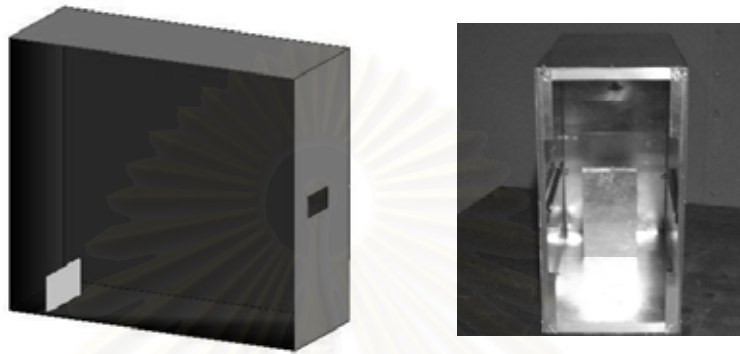


รูปที่ 4.42 การวางขึ้นโลหะภายในกล่องปิดกั้น

จากรูปที่ 4.42 เป็นการวางขึ้นโลหะไว้ภายในกล่อง โดยมีระยะห่างจากด้านหลังของกล่องปิดกั้นเป็นระยะห่าง m เซนติเมตร ซึ่งระยะห่าง m เซนติเมตรนี้จะมีความหมายใกล้เคียงกับการลดขนาดด้านลึกของกล่องปิดกั้น กล่าวคือ เมื่อมีการเลื่อนให้ขึ้นโลหะแผ่นนี้ออกห่างจากผนังด้านหลัง (m มีค่ามากขึ้น) จะเสมือนว่าขนาดของกล่องได้มีการปรับด้านลึกให้ลดลงไปด้วย ถึงแม้ว่าขึ้นโลหะจะไม่ได้มีขนาดใหญ่เท่าด้านที่เป็นผนังของกล่องปิดกั้น แต่เป็นการจำลองเพื่อให้เหมือนว่าด้านลึกของกล่องถูกลดลงจริงๆ ทั้งนี้เพื่อทำการศึกษาว่า เมื่อมีการปรับระยะห่าง m แล้วจะส่งผลทำให้ความถี่รีโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเพียงใด ซึ่งในการวิจัยฉบับนี้เน้นในการปรับระยะห่างของด้านลึกมากกว่าด้านกว้างของกล่อง เนื่องจากขนาดของกล่องปิดกั้นที่ทำการศึกษามาตั้งแต่ต้น มีช่องเปิดที่อยู่ในแนวของด้านลึก ดังนั้นจึงสะดวกในการปรับเปลี่ยนระยะห่างของขึ้นโลหะ และง่ายต่อการตรวจวัดสัญญาณในการวัดค่าจริงเพื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณโดยโปรแกรมประยุกต์ FEKO

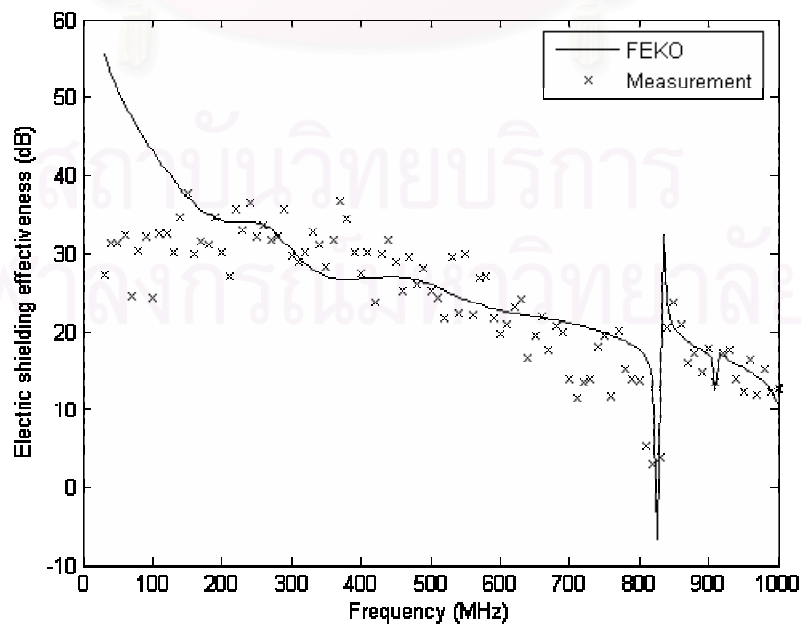
4.6.1 การสร้างแบบจำลองเพื่อใช้คำนวณ

จากแนวความคิดวางชิ้นโลหะไว้ในกล่องปิดกั้นคลื่น เพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้น จึงต้องสร้างชิ้นโลหะขึ้นเพื่อทำการทดสอบในการวัดค่าจริง และสร้างแบบจำลองที่เพิ่มขึ้นโลหะไว้ในกล่องปิดกั้นคลื่น โดยแสดงการวางชิ้นโลหะไว้ในกล่องเพื่อการวัดจริง และการคำนวณด้วยโปรแกรมประยุกต์ FEKO ได้ดังรูปที่ 4.43

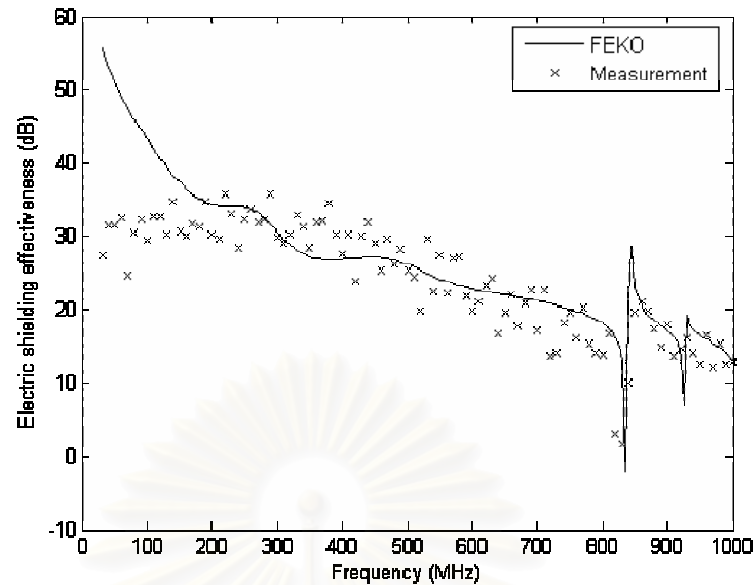


รูปที่ 4.43 แบบจำลองด้วยโปรแกรมประยุกต์ FEKO และการจัดวางเพื่อการวัดจริง ตามลำดับ

ในการทดสอบได้นำกล่องปิดกั้นคลื่นขนาดเท่าเดิม คือ 20x40x45 เซนติเมตรมาใช้เช่นเดิม ขณะที่ช่องเปิดที่นำมาใช้จะเป็นขนาด 3x6 เซนติเมตร และนำไปวางไว้ที่ตำแหน่ง 5 และ 10 เซนติเมตร โดยวัดจากผนังกล่องด้านหลัง และชิ้นส่วนโลหะที่นำมาวางภายในกล่องปิดกั้นมีขนาด 10x10 เซนติเมตร ถูกจัดวางในกึ่งกลางของกล่องปิดกั้น ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.44 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าที่ระยะ 5 เซนติเมตร

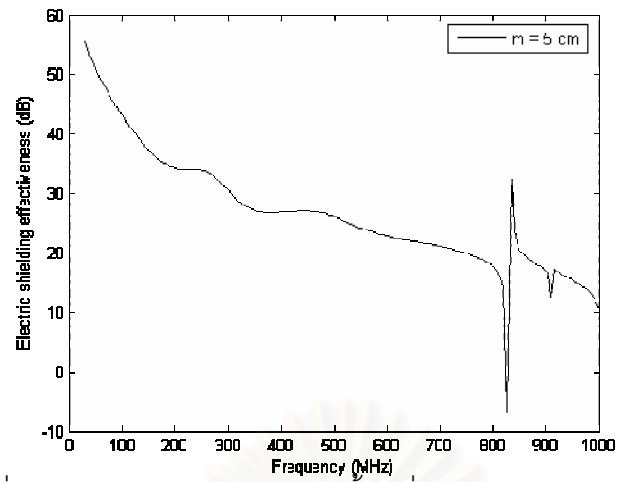


รูปที่ 4.45 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าที่ระยะ 10 เซนติเมตร

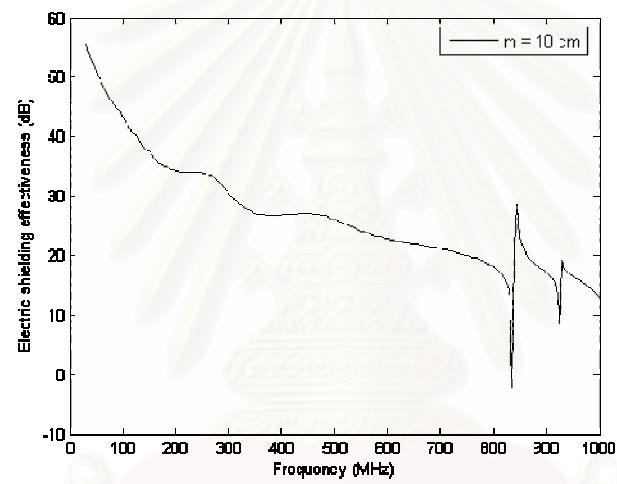
จากรูปที่ 4.44 และ 4.45 แสดงการวัดผลจริงเพื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณ ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าจากโปรแกรมประยุกต์ FEKO ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า แนวโน้มของทั้งสองวิธีให้ผลไปในแนวทางเดียวกัน เพียงแต่ช่วงความถี่ไอโซเนนซ์ช่วง 900 – 1000 MHz ให้ผลที่แตกต่างกันออกไปบ้าง ซึ่งต่อไปจะใช้โปรแกรมประยุกต์ FEKO ในการจำลองรูปแบบ กล่องปิดกั้นคลื่นที่มีชิ้นส่วนโลหะไว้ภายในกล่อง โดยปรับระยะห่างเป็นค่าต่างๆ เพื่อทำการ ทดสอบค่าไอโซเนนซ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ นอกจากนั้น จะทำการปรับขนาดของชิ้นโลหะที่ วางภายในกล่องปิดกั้น เพื่อสังเกตค่าไอโซเนนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไป

4.6.2 การปรับระยะห่างของชิ้นโลหะ

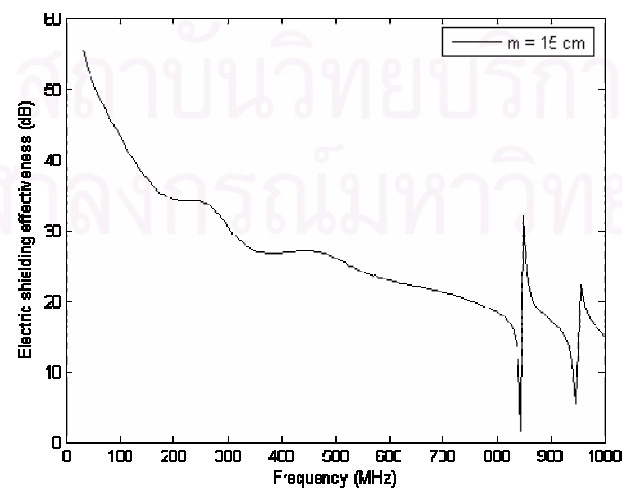
เพื่อเป็นการทดสอบให้เห็นว่า การปรับระยะของชิ้นโลหะมีการเปลี่ยนแปลงต่อ ค่าความถี่ไอโซเนนซ์ที่เกิดขึ้นจึงทำการจำลองแบบกล่องปิดกั้นคลื่นที่มีขนาดเท่าเดิมคือ 20x40x45 เซนติเมตร และมีช่องเปิดขนาด 3x6 เซนติเมตร ซึ่งได้จัดชิ้นโลหะไว้กึ่งกลางของกล่อง โดยชิ้นโลหะ มีขนาด 10x10 เซนติเมตร ในขณะที่ระยะห่างของชิ้นโลหะจัดให้ห่างจากผนังด้านหลังของกล่อง เป็นระยะ 5, 10 และ 15 เซนติเมตร ผลของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.46 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของระยะทดสอบ 5 เซนติเมตร

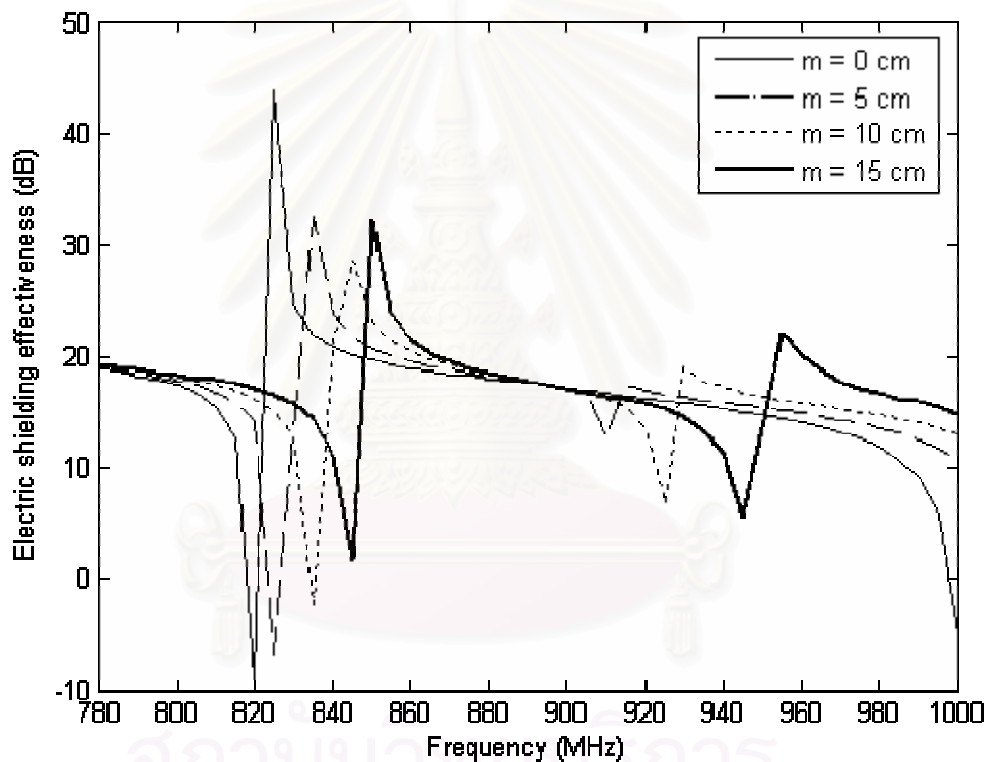


รูปที่ 4.47 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของระยะทดสอบ 10 เซนติเมตร



รูปที่ 4.48 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของระยะทดสอบ 15 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.46, 4.47 และ 4.48 แสดงให้เห็นว่าระยะของชั้นโลหะที่วางอยู่ในกล่องปิดกั้นคลื่น มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่เรโซแนนซ์ โดยเมื่อมีการปรับระยะของชั้นโลหะให้เพิ่มขึ้น (m มีค่าเพิ่ม) ค่าเรโซแนนซ์จะขยับเลื่อนไปทางความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกับการลดขนาดความถี่ของกล่องปิดกั้นในหัวข้อข้างต้น ดังได้กล่าวไปแล้วนั้น นอกจากนี้ การจำลองด้วยโปรแกรมประยุกต์ FEKO ยังแสดงให้เห็นว่าเรโซแนนซ์ที่ความถี่สูงเกิน 1 GHz มีการขยับเข้ามาในช่วงความถี่ที่ต่ำลง และอยู่ในช่วงที่ทำการทดสอบ อย่างไรก็ตาม การวางแผ่นโลหะไว้ในกล่องปิดกั้น และปรับระยะห่างจะมีผลต่อค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้า รูปที่ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่าง m กับความถี่เรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไป

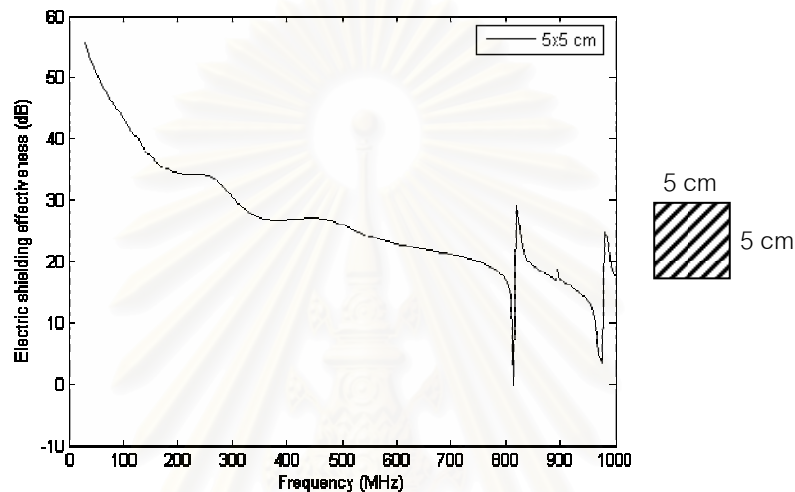


รูปที่ 4.49 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของระยะทดสอบต่างๆ

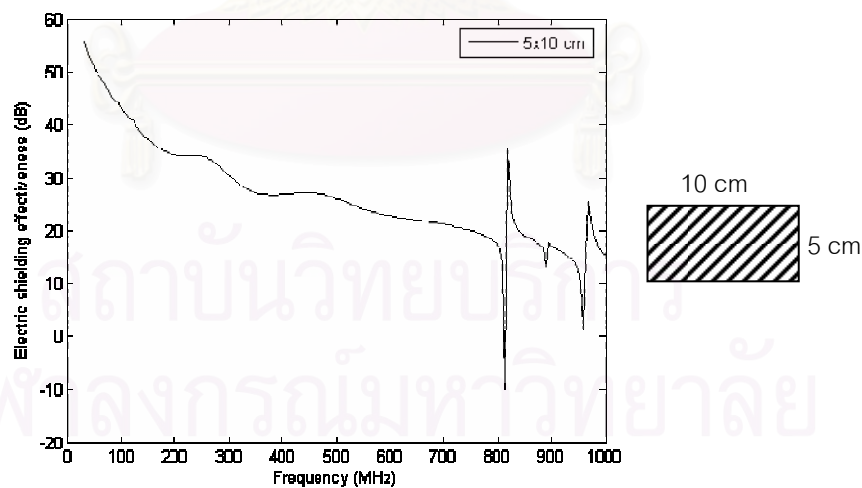
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6.3 การปรับขนาดของชิ้นโลหะ

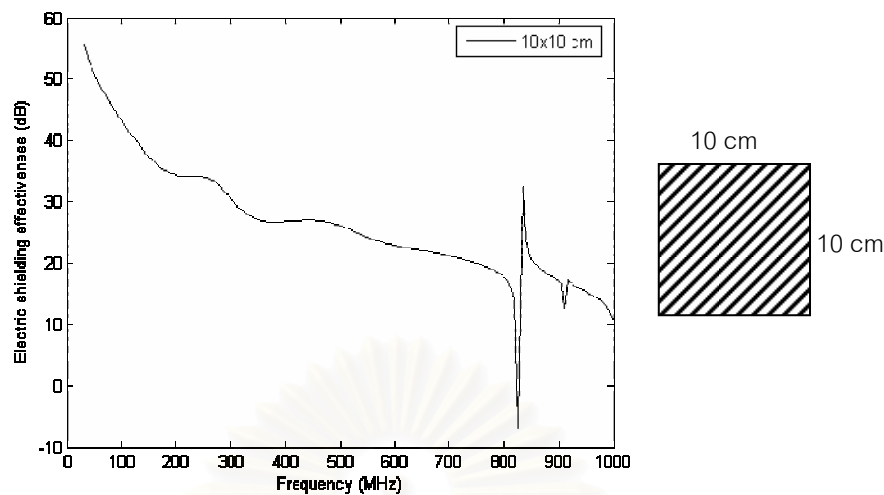
จากหัวข้อที่ 4.6.2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการวางชิ้นโลหะไว้ในกล่องจะมีผลต่อการเกิดควมถี่ไอโซแนนท์ด้วย โดยระยะทาง m จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เกิดขึ้นนี้ และในหัวข้อนี้จะนำเสนอการปรับขนาดของชิ้นโลหะ เพื่อตรวจสอบผลกระทบต่อการเกิดควมถี่ไอโซแนนท์ ซึ่งได้ทดสอบในชิ้นโลหะ 5×5 , 5×10 , 10×10 และ 15×10 เซนติเมตร ผลการทดสอบแสดงได้ดังนี้



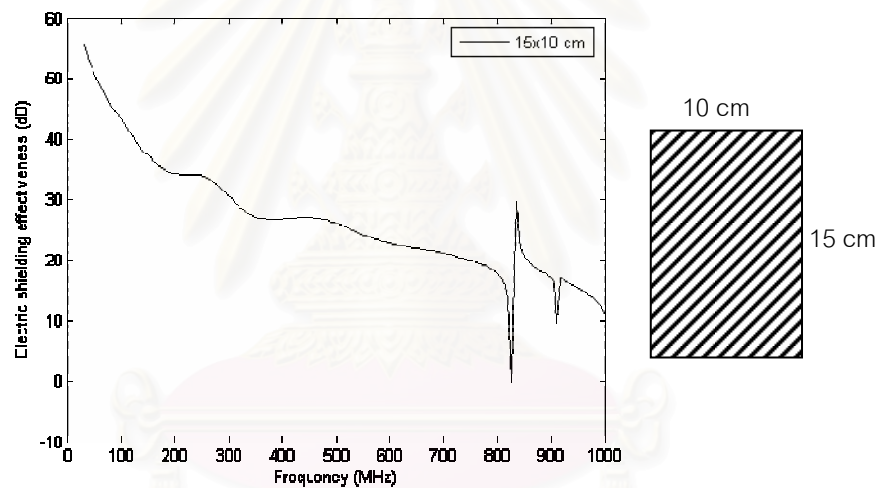
รูปที่ 4.50 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของชิ้นโลหะ 5×5 เซนติเมตร



รูปที่ 4.51 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของชิ้นโลหะ 5×10 เซนติเมตร

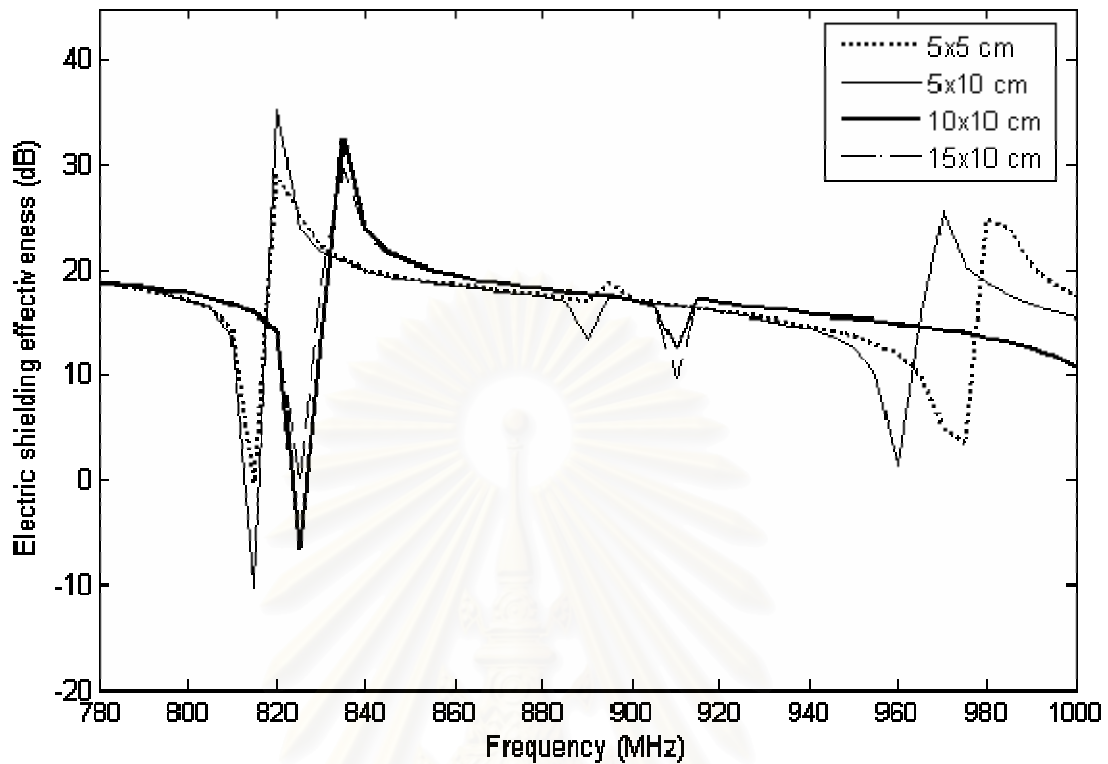


รูปที่ 4.52 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของชิ้นโลหะ 10x10 เซนติเมตร



รูปที่ 4.53 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของชิ้นโลหะ 15x10 เซนติเมตร

จากการคำนวณชิ้นส่วนที่มีขนาดแตกต่างกัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ กัน โดยขนาด 5x5 และ 5x10 เซนติเมตร จะมีความถี่เรโซแนนซ์ที่จุดใกล้เคียงกัน ในขณะที่ขนาด 10x10 และ 15x10 เซนติเมตร ค่าความถี่เรโซแนนซ์จะเกิดขึ้นใกล้เคียงกัน ดังนั้น ขนาดของชิ้นที่วางไว้ภายในกล่องจะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นด้วย

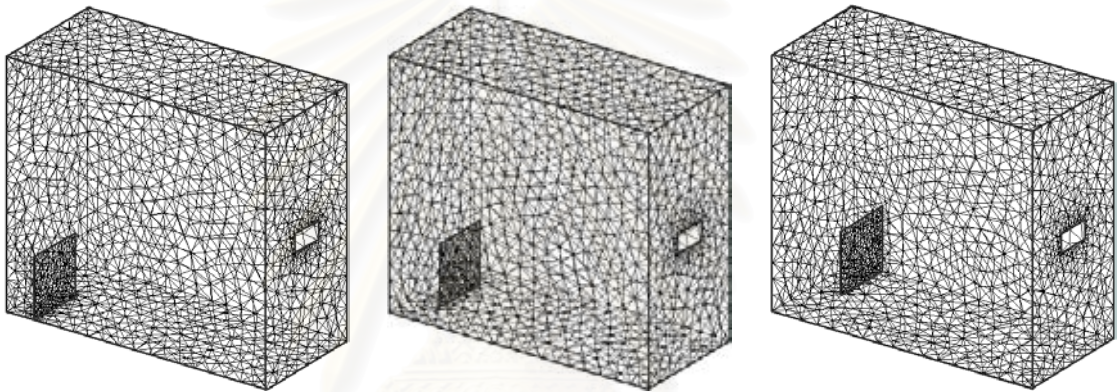


รูปที่ 4.54 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของขึ้นโลหะขนาดต่างๆ

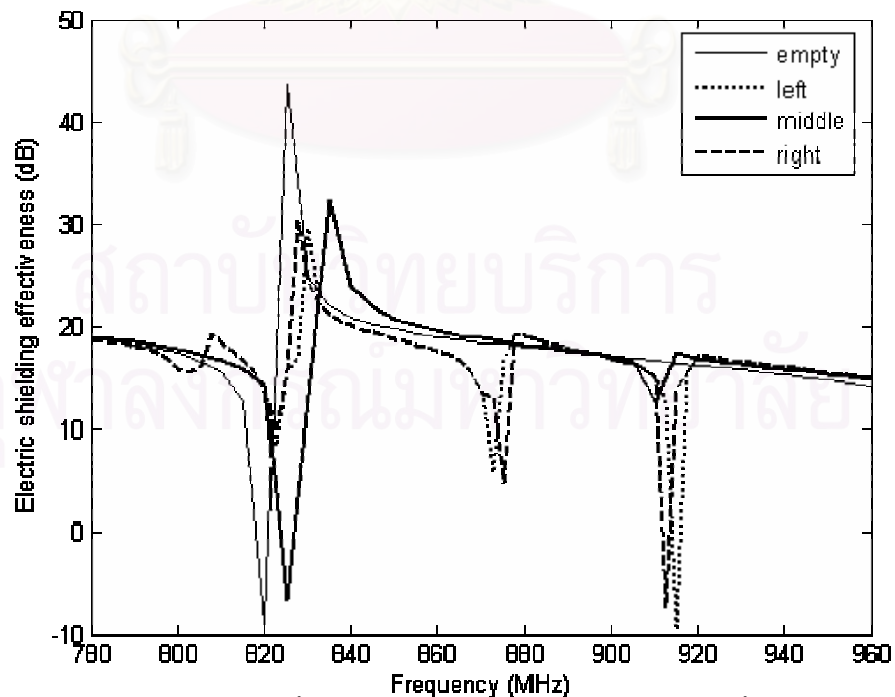
จากการทดสอบทั้งหมดจะพบว่า รูปร่างของช่องเปิดที่แตกต่างกันจะส่งผลถึงค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นด้วย ในการทดสอบครั้งนี้พบว่าช่องเปิดที่มีด้านกว้าง (w) มากกว่าจะมีค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นที่ดีกว่าด้วย นอกจากนี้ การแบ่งช่องเปิดออกเป็นช่องที่เล็กลงในขณะที่พื้นที่ของช่องเปิดเท่าเดิม ก็สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นได้อีกด้วย จากการทดสอบยังพบอีกว่าขนาดของกล่องส่งผลถึงค่าความถี่ไซเรนซ์ที่เกิดขึ้น กล่องที่มีด้านเล็ก (d) น้อยกว่าจะส่งผลให้ค่าความถี่ไซเรนซ์สูงกว่าเดิม และยังสามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ไซเรนซ์ที่เกิดขึ้นโดยการนำขึ้นโลหะไปวางไว้ภายในกล่องปิดกั้น ซึ่งถ้าระยะห่างของขึ้นโลหะกับผนังด้านหลังมีค่ามากขึ้น ความถี่ไซเรนซ์ที่เกิดขึ้นก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

4.6.4 การจัดวางชิ้นโลหะที่ตำแหน่งต่างๆ

จากหัวข้อที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าชิ้นโลหะที่วางในตำแหน่ง ระยะห่างจากผนังต่างๆ กัน จะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ตามไปด้วย อีกทั้งขนาดของชิ้นโลหะก็ยังส่งผลต่อค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้น ในการทดสอบหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเปลี่ยนตำแหน่งการวางของชิ้นโลหะในตำแหน่งที่แตกต่างกัน โดยจะใช้ชิ้นโลหะที่มีขนาดเท่ากันคือ 10x10 เซนติเมตร วางไว้ในตำแหน่งกึ่งกลางกล่อง ซิดผนังด้านซ้าย และซิดผนังด้านขวา โดยทั้งหมดได้วางชิ้นโลหะไว้ห่างจากผนังด้านหลัง 5 เซนติเมตร และกล่องปิดกั้นที่ใช้มีขนาด 20x40x45 เซนติเมตร โดยมีช่องเปิดขนาด 3x6 เซนติเมตร ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.55 และผลของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าแสดงไว้ในรูปที่ 4.56



รูปที่ 4.55 การวางชิ้นโลหะที่ตำแหน่งซิดด้านซ้าย กึ่งกลาง และซิดด้านขวาของกล่องตามลำดับ

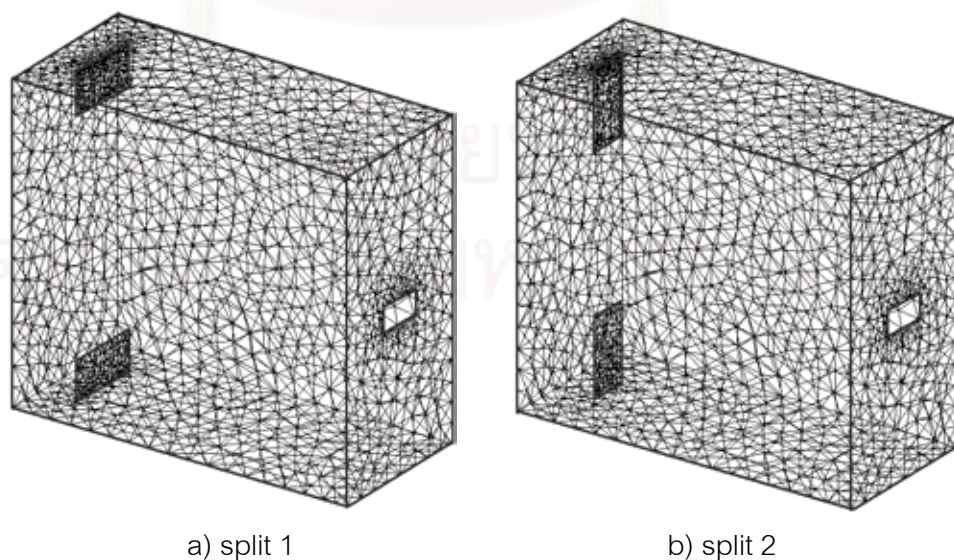


รูปที่ 4.56 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของกล่องเปิดและการวางชิ้นโลหะที่ตำแหน่งต่างๆ

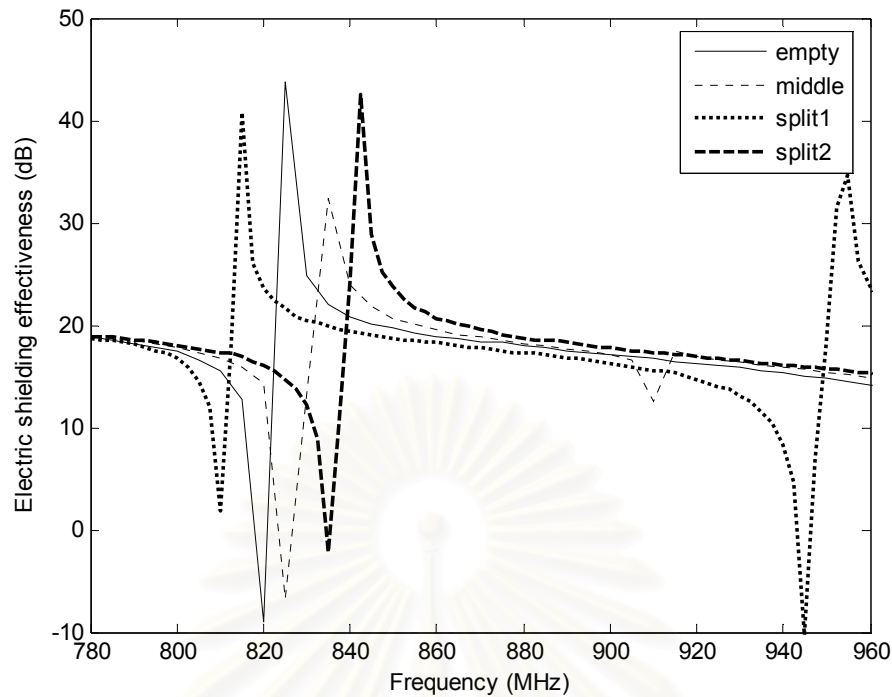
จากรูปที่ 4.56 แสดงค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้าของตำแหน่งทั้ง 3 ของ ชั้นโลหะ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการวางชั้นโลหะทางด้านซ้าย และด้านขวาของผนังจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังสามารถสังเกตถึงความถี่ไอโซเนนซ์ที่เกิดขึ้นว่ามีจำนวนมากกว่าอีกด้วย โดยจะพบว่าที่ความถี่ช่วง 820 – 830 MHz และช่วง 910 – 930 MHz จะเหมือนกับการวางชั้นโลหะที่กึ่งกลางกล่อง แต่การวางชั้นโลหะที่ด้านข้างของกล่องยังทำให้เกิดความถี่ไอโซเนนซ์ที่ค่าความถี่ประมาณ 870 – 880 MHz อีกด้วย ดังนั้นการวางชั้นโลหะที่ตำแหน่งกึ่งกลางจะทำให้เกิดความถี่ไอโซเนนซ์ที่น้อยกว่าการจัดวางที่ตำแหน่งด้านข้างของกล่อง

4.6.5 การแบ่งขนาดชั้นโลหะเป็นส่วนย่อย

ในการนำหลักการวางชั้นโลหะ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ไอโซเนนซ์ของกล่องปิดกั้นไปใช้งานจริง ต้องคำนึงถึงขนาดของชั้นโลหะที่เหมาะสมในการจัดวางในกล่องปิดกั้น ซึ่งไม่ทำให้การวางแผงวงจรที่ถูกจัดวางภายในเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไป การแบ่งชั้นโลหะจากชั้นใหญ่ออกเป็นชั้นส่วนย่อยๆ โดยที่ขนาดพื้นที่รวมยังมีค่าเท่าเดิม จึงเป็นสิ่งที่จะทำการศึกษาในหัวข้อนี้ จากการทดสอบที่ผ่านมาพบว่า การวางชั้นโลหะที่ตำแหน่งกึ่งกลางกล่องจะสร้างความถี่ไอโซเนนซ์ขึ้นมาเพิ่มน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรวางชั้นโลหะในตำแหน่งชิดซ้ายและขวา ดังนั้นจึงจะนำชั้นโลหะมาแบ่งย่อยออกเป็น 2 ชั้นส่วนเท่าๆ กันคือ มีขนาด 5x10 เซนติเมตร และเปลี่ยนแนวการวางให้อยู่ในรูป 10x5 เซนติเมตร โดยแสดงการจัดวางชั้นโลหะทั้งสองแบบได้ดังนี้

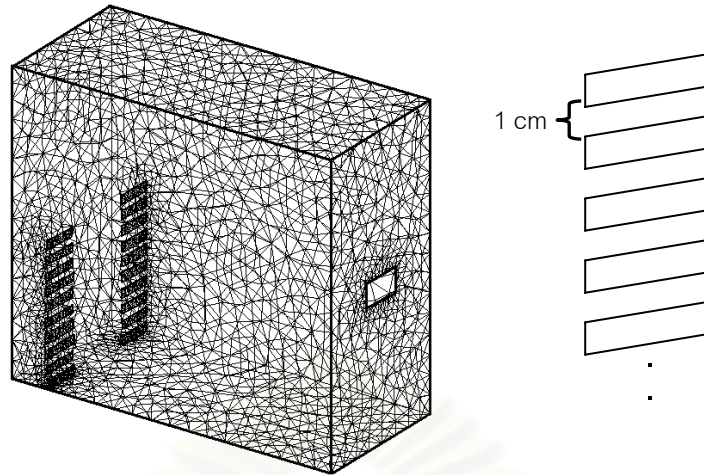


รูปที่ 4.57 การวางชั้นโลหะย่อยๆ ในลักษณะที่แตกต่างกัน



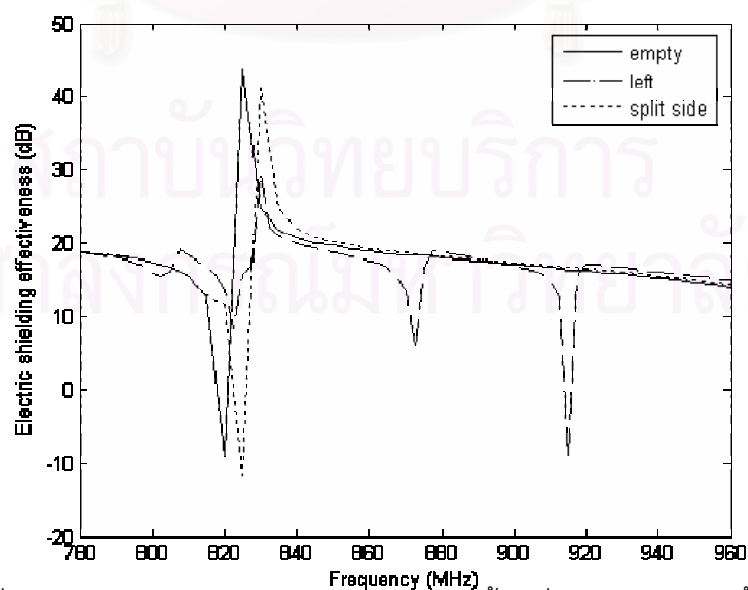
รูปที่ 4.58 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นของการจัดวางแบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.58 สามารถแสดงให้เห็นถึงผลการคำนวณประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นเปรียบเทียบในกรณีทั้งสี่แบบ คือ แบบกล่องที่ไม่ได้ใส่ชิ้นโลหะ การวางชิ้นโลหะที่ตำแหน่งกึ่งกลาง การแบ่งชิ้นโลหะออกเป็นชิ้นส่วนย่อยแบบที่ 1 และการวางชิ้นส่วนย่อยแบบที่ 2 (ซึ่งแสดงการจัดวางได้ดังรูปที่ 4.57) จะสังเกตได้ว่าความถี่รีโซแนนซ์ช่วง 810 - 840 MHz มีการเปลี่ยนแปลงทุกกรณี เมื่อพิจารณาที่การวางชิ้นโลหะย่อยไว้ที่กึ่งกลาง จะพบว่ามีเกิดการเกิดรีโซแนนซ์เกิดเพิ่มขึ้นที่ความถี่ประมาณ 910 MHz อีกด้วย ซึ่งในการวางแบบ split1 ก็ทำให้เกิดความถี่รีโซแนนซ์ออกเป็น 2 ช่วงเหมือนกันอีกด้วยคือที่ความถี่ประมาณ 810 MHz และที่ความถี่ประมาณ 945 MHz แต่ในขณะที่กล่องว่างเปล่าเกิดรีโซแนนซ์เพียงความถี่เดียวคือช่วง 820 MHz โดยจะคล้ายกับกรณีของการวางแบบ split2 ที่เกิดความถี่รีโซแนนซ์เพียงช่วงเดียวคือประมาณ 830 MHz แต่มีค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นที่สูงกว่าแบบเดิมอีกด้วย ดังนั้นในการวางแผ่นโลหะไว้ที่ตำแหน่งกลางกล่อง หากมีการแบ่งออกเป็นชิ้นย่อย วางไว้ที่ด้านบนและด้านล่างจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่น นอกจากนี้ชิ้นส่วนโลหะที่มีขนาด 10x10 เซนติเมตร ที่วางไว้ในตำแหน่งกึ่งกลางของกล่องปิดกั้นยังถูกนำมาแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ขนาด 1x5 เซนติเมตร และนำไปวางในตำแหน่งชิดด้านซ้ายและด้านขวาของผนังกล่องปิดกั้น เป็นจำนวนด้านละ 10 ชิ้น ซึ่งแต่ละชิ้นวางห่างกันเป็นระยะ 1 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.59 เพื่อศึกษาว่าการจัดวางแบบนี้สามารถช่วยเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นในการวางแผ่นโลหะแบบที่วางเป็นแผ่นใหญ่ๆ และการวางแผ่นโลหะเป็นชิ้นย่อยๆ



รูปที่ 4.59 การแบ่งชิ้นโลหะออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ โดยวางห่างกันเป็นระยะ 1 cm

ผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นของการจัดวางในรูปที่ 4.59 แสดงได้ดังรูปที่ 4.60 ซึ่งจะพบว่าเมื่อกล่องปิดกั้นที่ว่างเปล่าจะให้ค่าความถี่รีโซแนนซ์เพียงค่าเดียว แต่เมื่อมีชิ้นโลหะวางไว้ที่ด้านซ้ายของก่องจะทำให้มีค่าความถี่รีโซแนนซ์เพิ่มขึ้น แม้ว่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่น แต่การเพิ่มความถี่รีโซแนนซ์ก็ทำให้เกิดปัญหาในการป้องกันการแพร่คลื่นอีกด้วย เมื่อทำการแบ่งชิ้นโลหะออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ แล้วทำการจัดวางไว้ที่ด้านข้างทั้งซ้ายและขวาของผนังก่อง โดยเว้นช่องห่างแต่ละส่วนเป็นระยะ 1 เซนติเมตร ผลการคำนวณออกมาปรากฏว่า ความถี่ รีโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นมีเพียงความถี่เดียว และมีการเลื่อนความถี่ที่เกิดออกไปด้านความถี่ที่สูงขึ้น ดังนั้น การแบ่งชิ้นส่วนใหญ่ออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ จึงช่วยลดการเกิดปัญหาความถี่รีโซแนนซ์ได้



รูปที่ 4.60 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นของการจัดวางชิ้นโลหะ

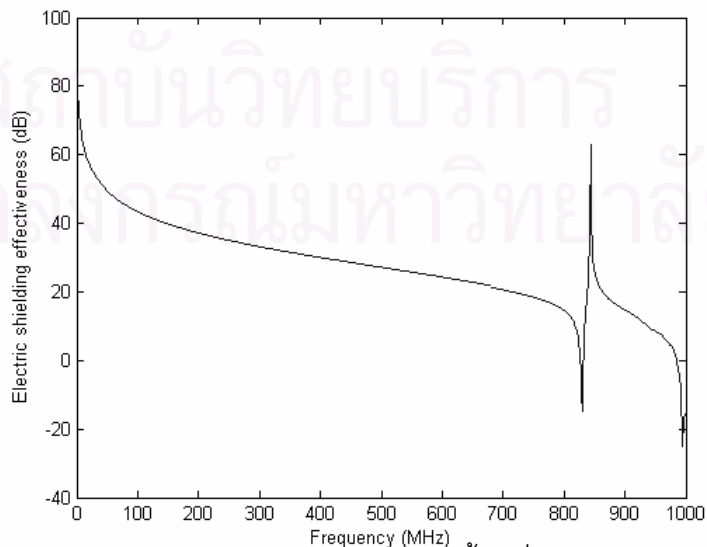
4.7 การแพร่คลื่นตามมาตรฐาน CISPR 22 ในกล่องคอมพิวเตอร์

ในการทดสอบการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านมา ได้ทำการทดสอบจากการกำเนิดคลื่นที่มีเพียงความถี่เดียว และทำการวัดระดับสัญญาณคลื่นในความถี่ค่านั้นๆ โดยในการทดสอบในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบในมาตรฐาน CISPR 22 ซึ่งเป็นมาตรฐานในการทดสอบการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าผ่านอากาศ โดยวัดตั้งแต่ความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz และทำการวัดในห้องปิดกั้นไร้คลื่นสะท้อน (anechoic chamber) ตามมาตรฐานในการวัดที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 โดยภายในกล่องคอมพิวเตอร์ได้นำชิ้นโลหะมาวางเพิ่มเติม เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงการเกิดควมถี่รบกวนด้วย

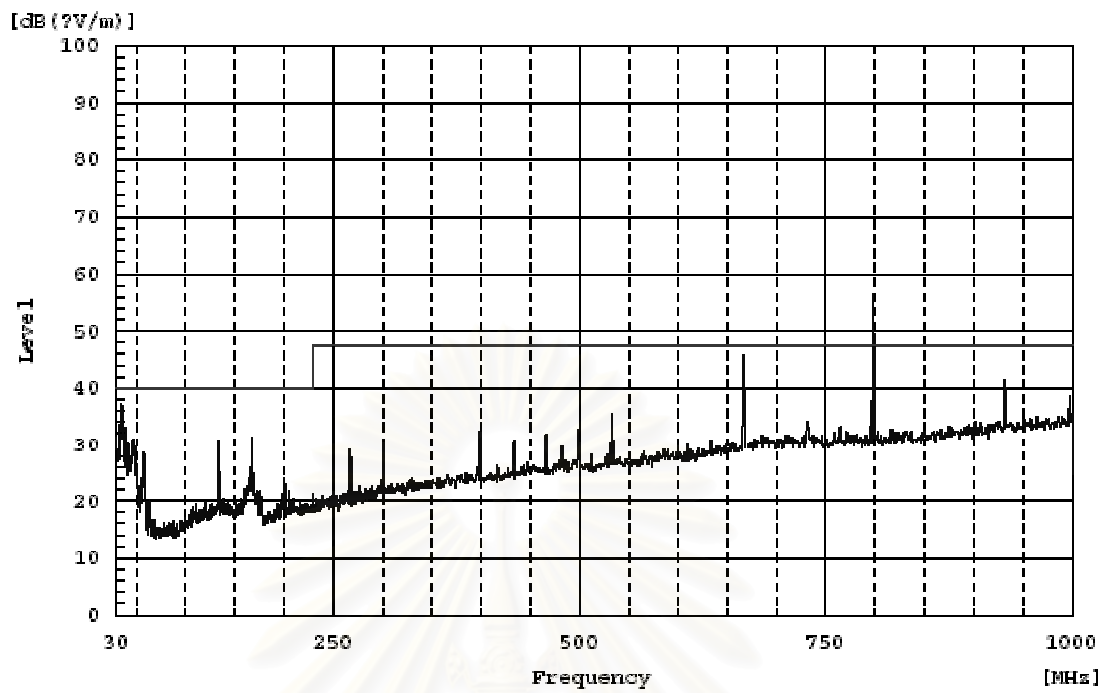


รูปที่ 4.61 การจัดวางชิ้นโลหะภายในกล่องคอมพิวเตอร์ที่ระยะห่าง 5, 10 และ 15 เซนติเมตร

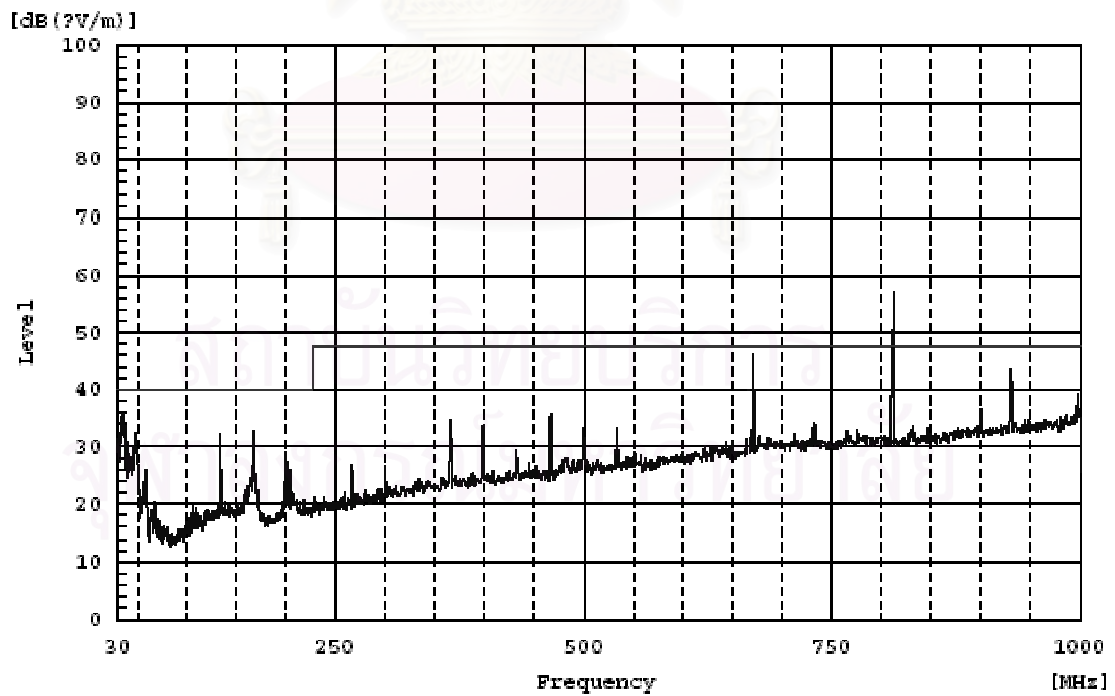
การทดสอบในครั้งนี้ได้ใช้กล่องคอมพิวเตอร์ที่มีขนาด 19x42x49 เซนติเมตร ซึ่งผลการคำนวณได้ให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นออกมามักรูปที่ 4.62 จะเห็นว่าที่กล่องปิดกั้นขนาดนี้จะให้ค่ารีโซแนนซ์ที่ต่ำสุดออกมาที่ความถี่ประมาณ 840 MHz แต่จากการทดสอบในกล่องคอมพิวเตอร์ที่มีแผงวงจรต่างๆ อยู่ด้วย ปรากฏว่าค่าความถี่รบกวนอยู่ที่ประมาณ 800 MHz ตามรูปที่ 4.63



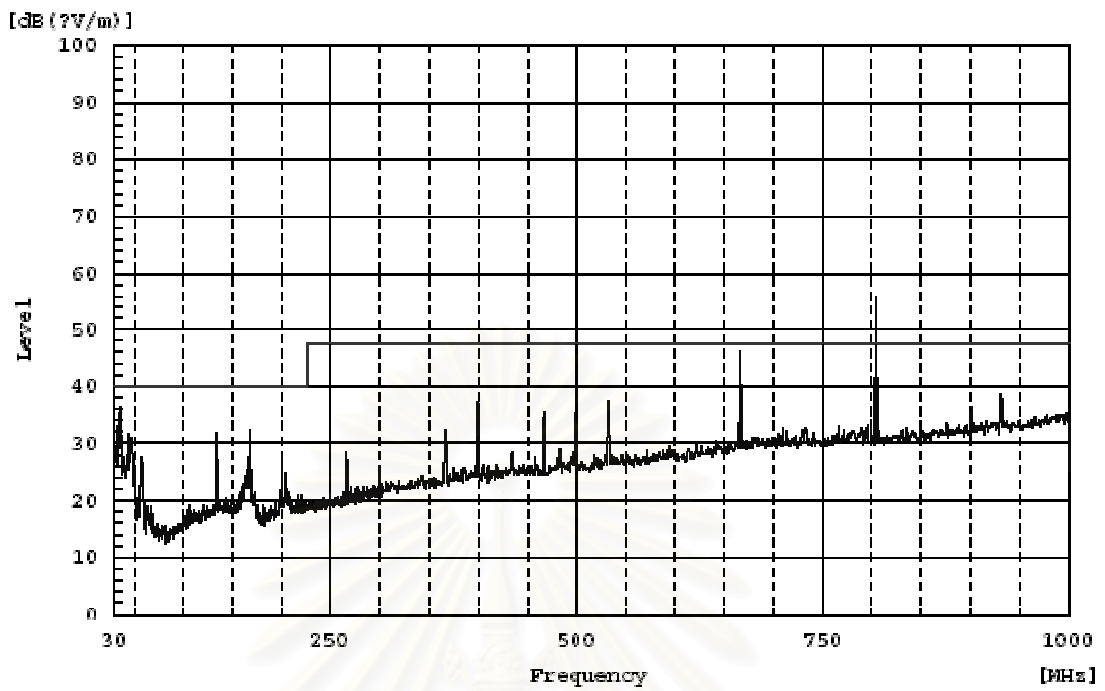
รูปที่ 4.62 ผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นของกล่องคอมพิวเตอร์



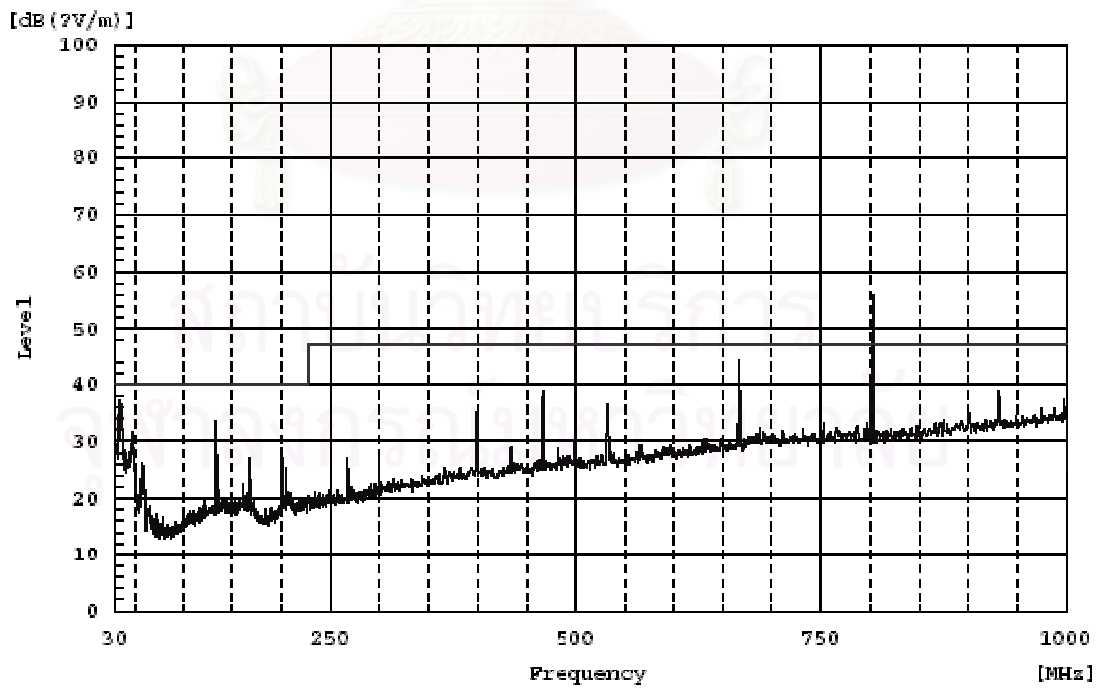
รูปที่ 4.63 การจัดวางโดยไม่มีแผ่นปิดกั้น



รูปที่ 4.64 การจัดวางโดยมีแผ่นปิดกั้นที่ตำแหน่ง 5 ซม.



รูปที่ 4.65 การจัดวางโดยมีแผ่นปิดกั้นที่ตำแหน่ง 10 ซม.



รูปที่ 4.66 การจัดวางโดยมีแผ่นปิดกั้นที่ตำแหน่ง 15 ซม.

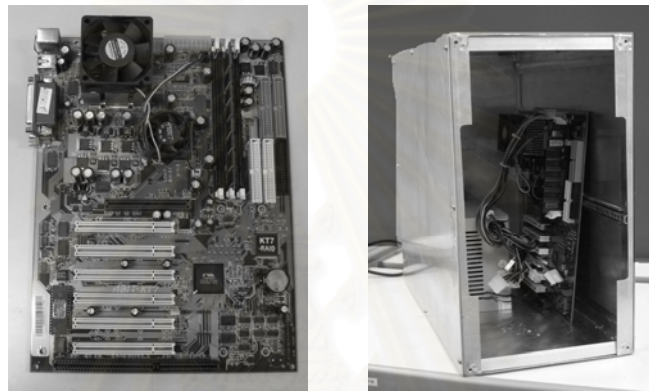
จากรูปที่ 4.63-4.66 แสดงให้เห็นผลการวัดค่าการแพร่ของคลื่นออกมาจากกล่อง คอมพิวเตอร์จากการวางขึ้นโลหะในระยะที่แตกต่างกัน ในรูปที่ 4.63 เป็นการวัดการแพร่คลื่นของ กล่องคอมพิวเตอร์โดยไม่มีกรวางขึ้นโลหะภายในกล่อง จะสังเกตได้ว่าที่ความถี่ประมาณ 800 MHz จะพบว่ามี การแพร่คลื่นออกมามากที่สุด และแพร่ออกมามากเกินไประดับเส้นจำกัด (limit line) ของมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งในการแพร่คลื่นที่ออกมาที่มากที่สุดนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่า ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นจะพบว่าเป็นจุดที่เกิดรีโซแนนซ์ เนื่องจากเมื่อค่าประสิทธิภาพการปิด กั้นคลื่นที่เกิดรีโซแนนซ์ต่ำ หมายถึงเกิดการแพร่คลื่นออกมาที่มากที่สุด ดังนั้นในกล่องคอมพิวเตอร์ ที่ไม่มีกรวางขึ้นโลหะไว้ภายในจะทำให้เกิดความถี่รีโซแนนซ์ที่ 798.024 MHz แต่จากการคำนวณ ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นให้ผลค่าความถี่รีโซแนนซ์ที่ 840 MHz จะพบว่าการคำนวณและ การวัดการแพร่คลื่นให้ค่าความถี่รีโซแนนซ์ที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากในกล่องคอมพิวเตอร์จะมีการวาง แผงวงจรต่างๆ วางไว้ด้วย จึงทำให้มีความแตกต่างไปจากการคำนวณ ในรูปที่ 4.64 เป็นผลการวัด การแพร่คลื่นของคอมพิวเตอร์ โดยมีการวางขึ้นโลหะไว้ที่ตำแหน่ง 5 เซนติเมตรจากผนังด้านหลัง ผลปรากฏพบว่าความถี่ที่มีการแพร่มากที่สุดขยับออกไปเป็น 812.75 MHz นั่นหมายถึงความถี่รี โซแนนซ์เปลี่ยนแปลงไปที่ 812.75 MHz จากเดิมคือ 798.024 MHz ในรูปที่ 4.65 เป็นผลการวัด การแพร่คลื่นโดยมีการวางขึ้นโลหะไว้ที่ตำแหน่ง 10 เซนติเมตรจากผนังด้านหลัง ผลการวัดให้ ค่าความถี่รีโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปที่ 808.185 MHz และในรูปที่ 4.66 เป็นผลการวัดการแพร่ คลื่นของคอมพิวเตอร์ โดยมีการวางขึ้นโลหะไว้ภายในที่ตำแหน่ง 15 เซนติเมตร ให้ค่าความถี่รี โซแนนซ์เป็น 802.356 MHz ซึ่งการทดสอบทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า เมื่อวางขึ้นโลหะไว้ภายในกล่อง ปิดกั้นจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความถี่รีโซแนนซ์ตามไปด้วย และจะพบว่าในการวัดผลการแพร่ จากกล่องคอมพิวเตอร์ที่มีแผงวงจรต่างๆ จัดวางไว้ภายใน จะทำให้ค่าความถี่รีโซแนนซ์ที่ได้ไม่ เท่ากับการคำนวณ เนื่องจากแผงวงจรต่างๆ ที่ถูกจัดเรียงไว้นั้นเปรียบเสมือนขึ้นโลหะที่นำมา ทดสอบ และขึ้นโลหะที่วางในตำแหน่งต่างๆ ก็ส่งผลถึงค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นแผงวงจร ที่วางไว้ภายในจึงส่งผลกระทบต่อความถี่รีโซแนนซ์ที่เกิดขึ้น ตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นผลการวัดที่ ทำการทดสอบของขึ้นโลหะที่วางไว้ตำแหน่งต่างๆ กัน

ตารางที่ 4.1 ความถี่รีโซแนนซ์ที่แตกต่างกันตามระยะห่าง

ตำแหน่งของแผ่นโลหะ	ความถี่รีโซแนนซ์ที่ปรากฏ	ระดับคลื่น
0 ซม.	798.024	57.8
5 ซม.	812.75	56
10 ซม.	808.185	59.4
15 ซม.	802.356	56.9

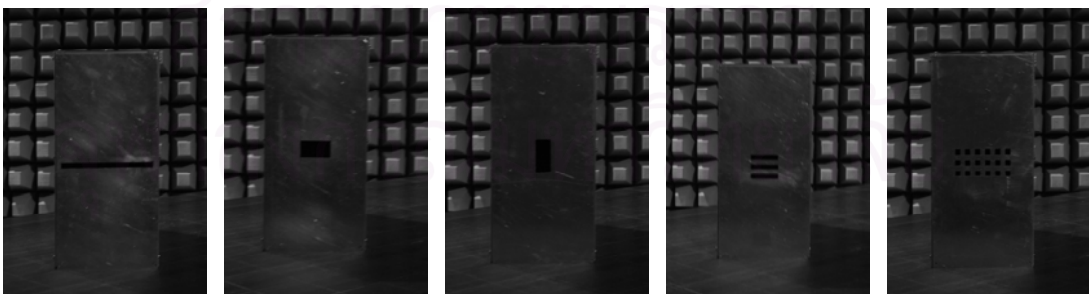
4.8 การแพร่คลื่นตามมาตรฐาน CISPR 22 ของกล่องปิดกั้น

จากหัวข้อที่ผ่านมาทั้งหมด การทดสอบประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของกล่องปิดกั้น ได้ทำตามมาตรฐาน MIL-STD-285 ทั้งหมด ซึ่งผลปรากฏว่ารูปร่างของช่องเปิดมีผลต่อค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นด้วย และในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบตามมาตรฐาน CISPR 22 ซึ่งเป็นการทดสอบการแพร่คลื่นของอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะใช้ main board ของคอมพิวเตอร์มาทำการจัดวางในกล่องปิดกั้นที่ได้ทำการทดสอบที่ผ่านมา ซึ่งภายในกล่องจะจัดวางแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (power supply) เข้าไปด้วย โดยแสดงได้ดังรูปที่ 4.67

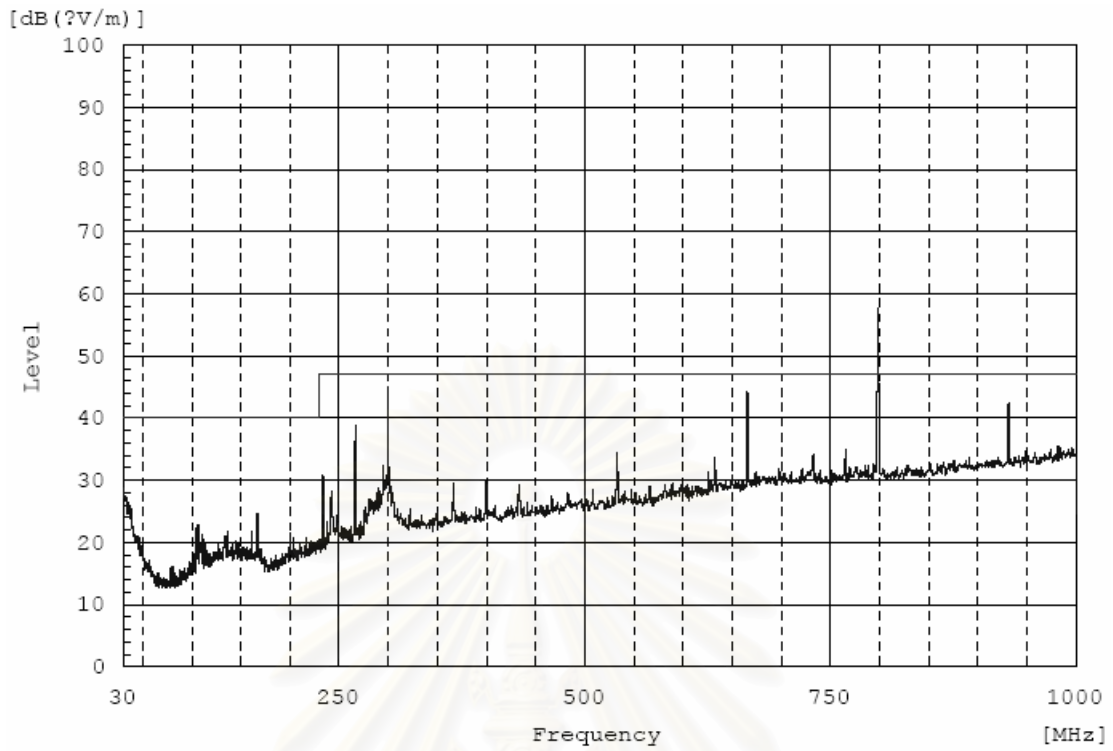


รูปที่ 4.67 อุปกรณ์และการจัดวางภายในกล่องปิดกั้น

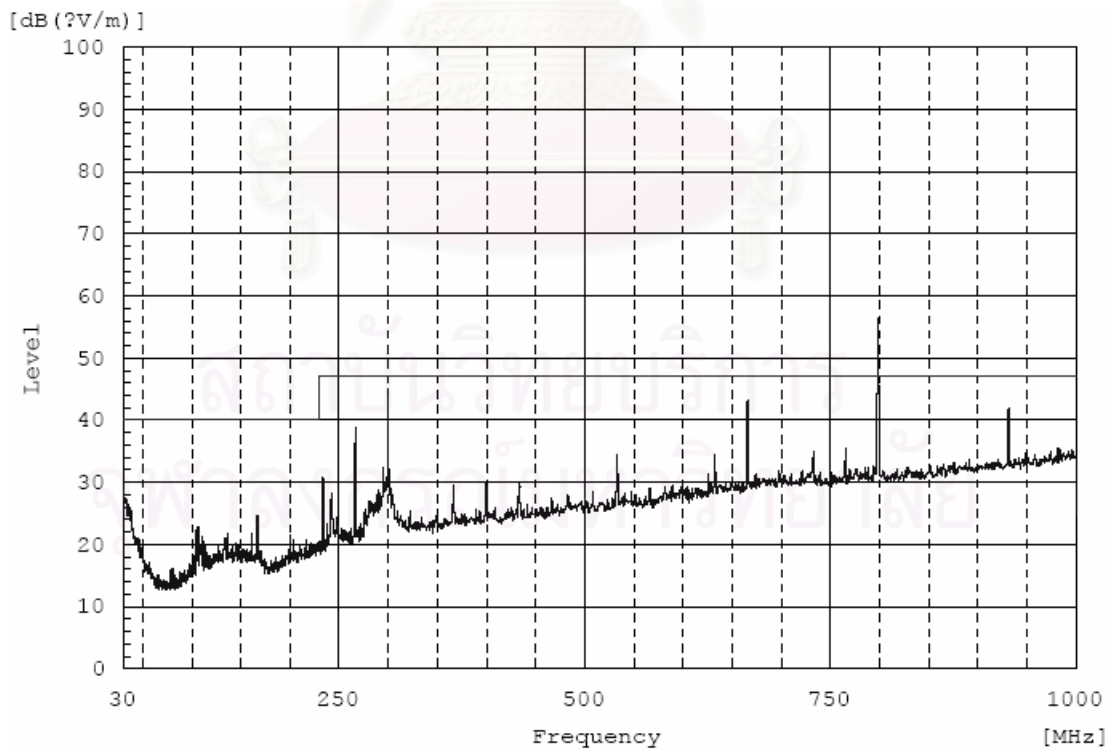
นอกจากนี้ยังใช้ช่องเปิดที่จัดทำขึ้นเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของกล่องมาใช้ ซึ่งช่องเปิดที่เลือกมาทำการทดสอบคือ ช่องเปิดเดี่ยวขนาด 1x18, 3x6, 6x3 เซนติเมตร และช่องเปิดกลุ่มที่มีขนาด 1x6 เซนติเมตร จำนวน 3 ช่อง ช่องเปิดขนาด 1x1 เซนติเมตร จำนวน 18 ช่อง นำไปวัดผลการแพร่คลื่นจากอุปกรณ์ที่อยู่ภายใน ซึ่งช่องเปิดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.68



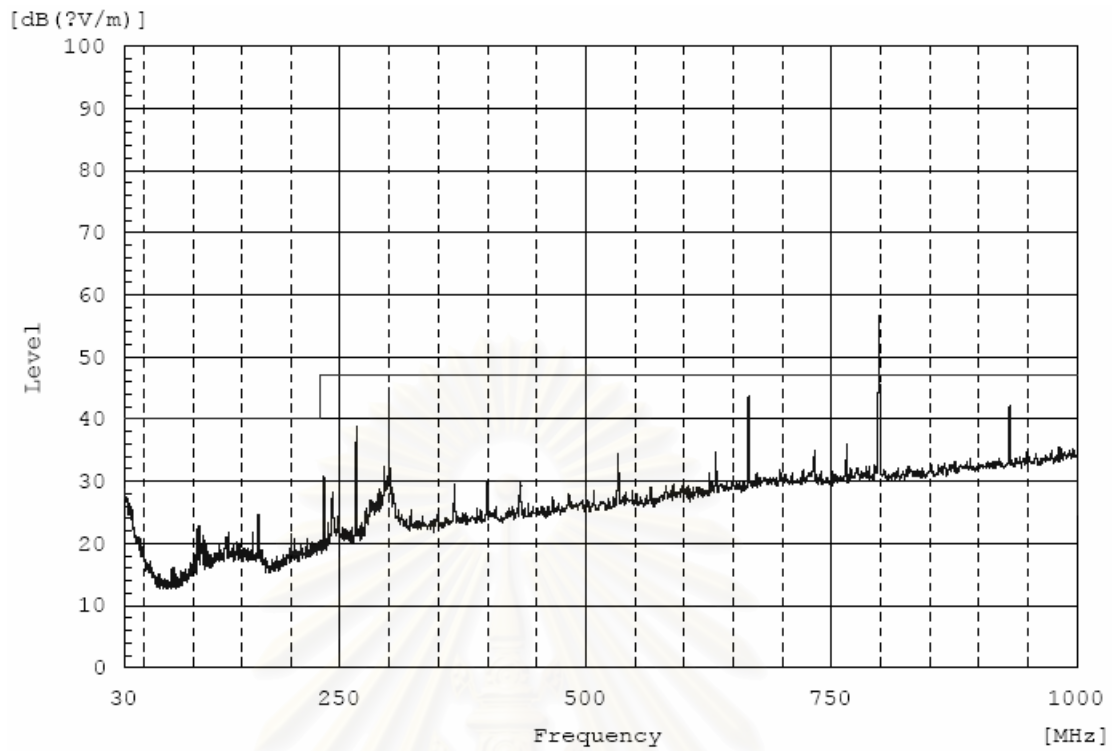
รูปที่ 4.68 ช่องเปิดที่นำมาทดสอบ



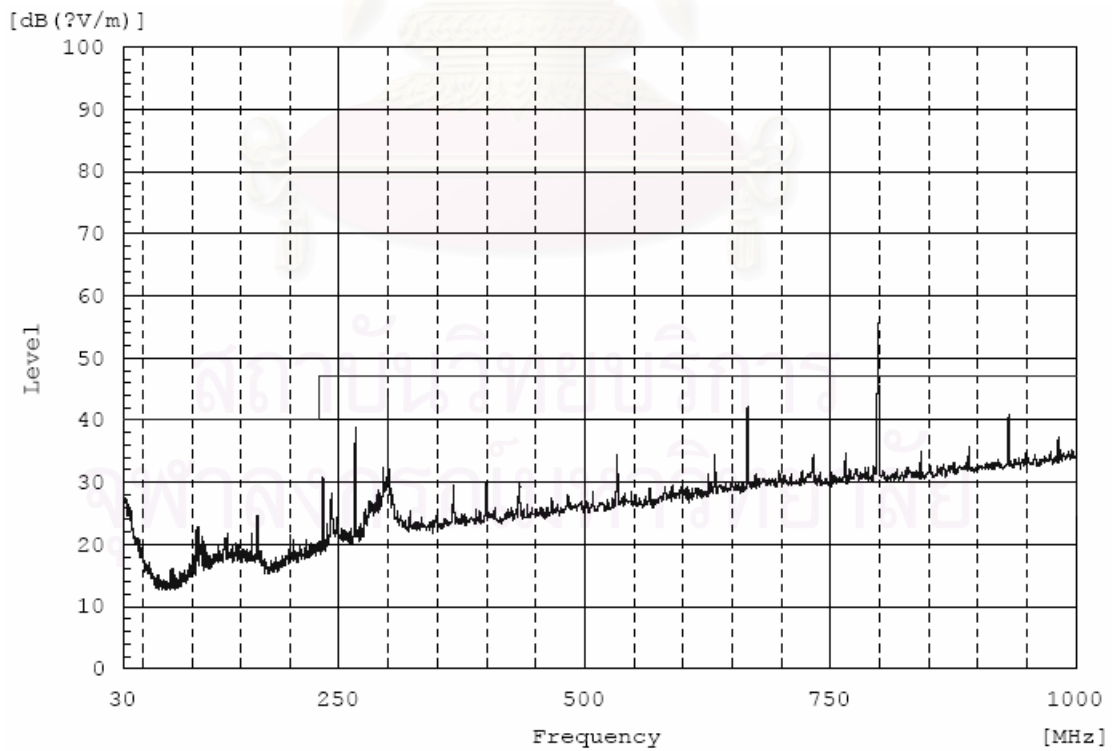
รูปที่ 4.69 ผลการวัดการแผ่รังสีของช่องเปิด 1x18 เซนติเมตร



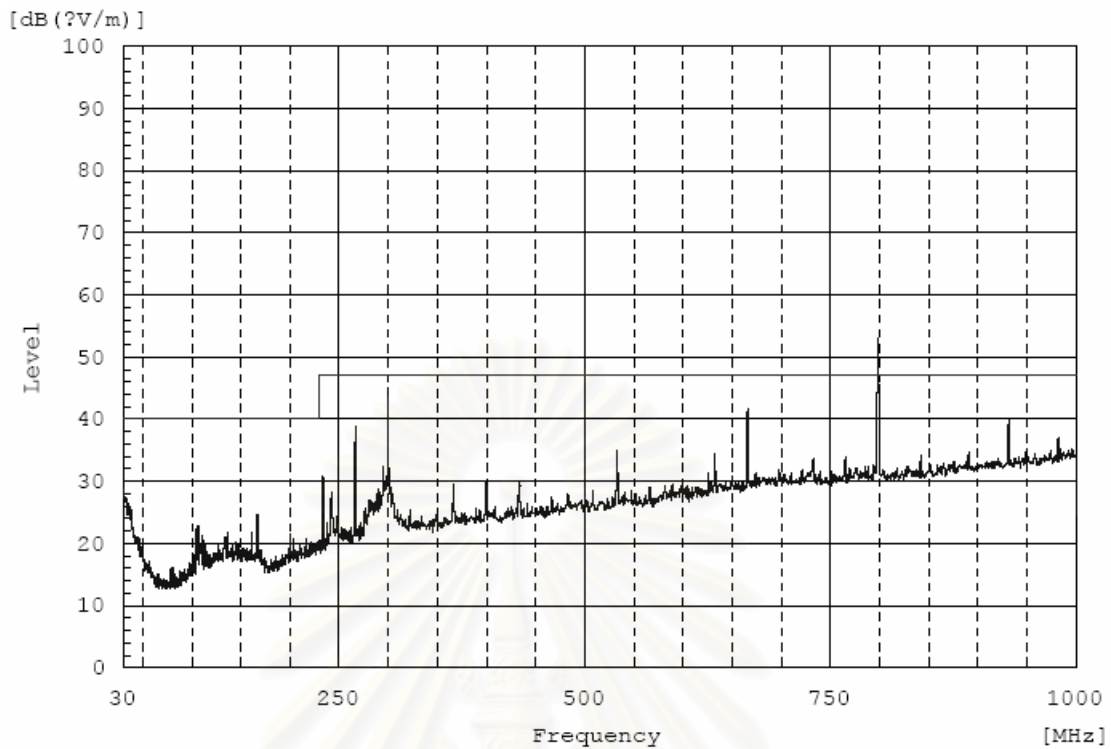
รูปที่ 4.70 ผลการวัดการแผ่รังสีของช่องเปิด 3x6 เซนติเมตร



รูปที่ 4.71 ผลการวัดการแผ่รังสีของช่องเปิด 6x3 เซนติเมตร



รูปที่ 4.72 ผลการวัดการแผ่รังสีของช่องเปิด 1x6 เซนติเมตร จำนวน 3 ช่อง



รูปที่ 4.73 ผลการวัดการแผ่ของช่องเปิด 1x1 เซนติเมตร จำนวน 18 ช่อง

จากการวัดการแผ่ของวงจรที่ใส่ไว้ภายในกล่องปิดกั้น จะพบว่ากลุ่มแรกที่มีช่องเปิดเพียงช่องเปิดเดียวจะมีค่าการแผ่ที่ความถี่ประมาณ 800 MHz มากที่สุด และสามารถเรียงลำดับการแผ่คลื่นจากมากไปน้อยได้ดังนี้ ช่องเปิดแบบ 1x18 เซนติเมตร มีการแผ่ประมาณ 58 dB μ V/m รองลงมาคือ ช่องเปิดแบบ 3x6 เซนติเมตร และแบบ 6x3 เซนติเมตร มีการแผ่ประมาณ 56 dB μ V/m ซึ่งช่องเปิดทั้งสองแบบหลังจะมีค่าการแผ่ที่ใกล้เคียงกันมาก ในขณะที่เมื่อทำการแบ่งช่องเปิดให้มีขนาดเล็กลงแต่ยังคงมีพื้นที่เท่าเดิมจะพบว่าช่องเปิดแบบ 1x6 เซนติเมตร จำนวน 3 ช่อง จะช่วยลดค่าระดับสัญญาณคลื่นที่ความถี่ 800 MHz ลดลงอยู่ที่ประมาณ 55 dB μ V/m แต่จะพบว่าที่ความถี่สูง (750 MHz – 1 GHz) จะมีค่าระดับความเข้มเพิ่มขึ้นบางความถี่ เช่นเดียวกับช่องเปิดแบบ 1x1 เซนติเมตร จำนวน 18 ช่อง ซึ่งที่ความถี่ 800 MHz ระดับความเข้มจะลดลงมาอีกที่ประมาณ 52 dB μ V/m และที่บางความถี่ในช่วง 750 MHz – 1 GHz จะมีการเพิ่มระดับขึ้นมากกว่าช่องเปิดแบบช่องเดียว โดยทั้งหมดจะเห็นได้ว่าการทดสอบในหัวข้อนี้สอดคล้องกับการทดสอบตามมาตรฐานที่ทำการทดสอบหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่น MIL-STD-285 ซึ่งจะพบว่ารูปร่างของช่องเปิดมีผลต่อการแผ่คลื่นออกมา อีกทั้งการแบ่งช่องเปิดออกเป็นช่องเปิดย่อยๆ จะช่วยลดการแผ่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาสู่ภายนอก

บทที่ 5

บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในกล่องปิดกั้นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ซึ่งกล่องปิดกั้นจะมีช่องเปิดอยู่ด้วย เนื่องมาจากการที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต้องมีการระบายความร้อนที่เกิดจากการทำงาน อีกทั้งยังมีช่องสำหรับเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกอีกด้วย โดยได้นำเสนอการหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นที่ใช้ในเรื่องของการเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า คือ Analytical Formula ซึ่งเป็นการแปลงวงจรเสมือนจากกล่องปิดกั้นเป็นวงจรไฟฟ้า และนำเรื่องของท่อนำคลื่นมาใช้ ในการทดสอบการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนการปิดกั้นคลื่นไฟฟ้า และการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็ก โดยเริ่มต้นได้ทำการเปรียบเทียบการคำนวณตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ กับการวัดจริง ซึ่งการวัดจริงได้ใช้ห้องปฏิบัติการของสถาบันทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) ซึ่งเป็นหน่วยงานของ สวทช. ให้การร่วมมือในการทดสอบในห้องปิดกั้นกึ่งไร้การสะท้อน (Anechoic room) และการวัดเป็นไปตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้องคือ MIL-STD-285 และ CISPR 22 หลังจากนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มาคือ สามารถใช้สมการตามทฤษฎีในการคำนวณหาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นได้

โดยการวัดประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นในกล่องปิดกั้นที่มีช่องเปิดนั้น ได้ทำการคำนวณหาภายใต้เงื่อนไขต่างๆ กัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

1. รูปร่างของช่องเปิดที่มีขนาดพื้นที่เท่ากันจะมีผลต่อการลดลงของประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องมาจากการวางตัวของช่องเปิดเองต่อทิศทางการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศ

2. จำนวนช่องเปิดจะมีผลต่อการแพร่คลื่นเป็นอย่างมาก ซึ่งการทดสอบจะแสดงให้เห็นว่าจำนวนของช่องเปิดที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา มากกว่าจำนวนช่องเปิดที่มีจำนวนน้อยกว่า โดยเมื่อมีการแพร่คลื่นออกมามากทำให้ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้ เมื่อขนาดของช่องเปิดที่เท่ากันแล้ว ถ้านำช่องเปิดมาแบ่งเป็นช่องเปิดที่มีขนาดเล็กลง จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นได้อีกด้วย

3. การแก้ปัญหาไรโซแนนซ์ในกล่องปิดกั้น สามารถทำการแก้ปัญหาได้โดยใช้การเปลี่ยนแปลงของกล่องปิดกั้น โดยการทดสอบที่ผ่านมาทำให้สรุปได้ว่าช่องเปิดสามารถช่วยในการลดการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของไรโซแนนซ์ที่เกิดในกล่อง ซึ่งใน

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรทั้ง 3 ของขนาดกล่องคือ ด้านกว้าง สูง และลึก ไม่ได้ช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรีโซแนนซ์ได้ทั้งหมด โดยการเปลี่ยนแปลงความสูงของกล่องเป็นตัวแปรเดียวที่ไม่ทำให้ความถี่รีโซแนนซ์มีการเปลี่ยนแปลงได้ เพียงแต่ช่วยเพิ่มหรือลดประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหมือนกับช่องเปิดแบบต่างๆ นั่นเอง ดังนั้น จึงนำเสนอการวางชั้นโลหะไว้ภายใน เพื่อแก้ปัญหาการเกิดรีโซแนนซ์ การวางชั้นโลหะนี้จะวางไว้ห่างจากผนังด้านหลังของกล่อง แล้วทำการเลื่อนเพื่อปรับค่ารีโซแนนซ์ ผลการทดสอบปรากฏว่า เมื่อเลื่อนระยะห่างออกจากผนังกล่องจะทำให้ค่าความถี่รีโซแนนซ์มีการเปลี่ยนแปลงด้วย

จากข้อสรุปที่ได้กล่าวไว้แล้ว การแก้ปัญหาของกล่องปิดกั้นยังต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมขึ้นอีก เพราะนอกจากจะต้องการแก้ปัญหาในเรื่องของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าของกล่องปิดกั้นที่มีช่องเปิดแล้ว ยังควรมีการพัฒนาต่อในเรื่องของวัสดุที่ใช้ทำกล่องปิดกั้น หรือแม้กระทั่งการจัดวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในกล่อง สามารถเป็นหัวข้อที่น่าสนใจในการทำวิจัยในลำดับต่อไปอีกด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] ประสิทธิ์ ทีฆพุมิ และ ไกรสร อัญชลีวรพันธุ์. EMC 1: มาตรฐานอุปกรณ์ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ มาตรฐานและการทดสอบ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [2] ประสิทธิ์ ทีฆพุมิ และ ไกรสร อัญชลีวรพันธุ์. EMC 2: มาตรฐานอุปกรณ์ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ มาตรฐานและการติดตั้ง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [3] B.R. Archambeault. PCB design for real-world EMI control. Kluwer Academic, 2002.
- [4] T. Dumrongkittigule, P. Khamphakdi, W. Khan-ngern, and C. Chat-uthai. The study of low frequency magnetic field shielding causing by power transformer. Conference on Electromagnetic Compatibility, ICEMC. 2005.
- [5] S.M. Ward, J.F. Dawson, and A.C. Marvin. Towards an improved definition of electromagnetic shielding effectiveness. Proc. of the 4th European Symp. on EMC Sep. 2000: 493-498.
- [6] M.P. Robinson, T.M. Benson, C. Chistopoulos, J.F. Dawson, M.C. Ganley, A.C. Marvin, S.J. Porter, and D.W.P. Thomas. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures. IEEE Trans. Electromagn. Compat. 40(Aug. 1998): 240-247.
- [7] K.C. Gupta, R. Garg, and I.J. Bahl. Microstrip lines and slotlines. MA: Artech House, 1979.
- [8] M. A. Shuangwu. Analysis of enclosure with an aperture using FDTD method. IEEE Symp. Electromagn. Compat. 2002: 242-245.
- [9] R. Azaro, S. Caorsi, M. Donelli, and G.L. Gragnani. Evaluation of the effects of an external incident electromagnetic wave on metallic enclosures with rectangular apertures. Microwave and Optical Technology Letters 28,5(Mar. 2001): 289-293.
- [10] M. Li, J. Nuebel, J.L. Drewniak, R.E. DuBroff, T.H. Hubing, and T.P. Van Doren. EMI from cavity modes of shielding enclosures—FDTD modeling and measurements. IEEE Trans. Electromagn. Compat. 42(Feb. 2000).

- [11] W.P. Carpes, G.S. Ferreira, A. Raizer, L. Pichon, and A. Razek. TLM and FEM methods applied in the analysis of electromagnetic coupling. IEEE Trans. Magn. 36(Apr. 2000): 982–985.
- [12] M. Lin, J.L. Drewniak, S. Radu, J. Nuebel, T.H. Hubing, R.E. DuBroff, and T.P. Van Doren. An EMI estimate for shielding-enclosure evaluation. IEEE Trans. Electromagn. Compat. 43(Aug. 2001): 295–304.
- [13] S. Ali, D. S. Weile, and T. Clupper. Effect of near field radiators on the radiation leakage through perforated shields. IEEE Trans. Electromagn. Compat. 47,2(May. 2005): 367-373.
- [14] A. Rocznik, E. M. Petriu, and G. I. Costache. 3D Electromagnetic field modeling base on near-field measurements. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf. Brussels June 1996: 890-896.
- [15] J. J. Laurin, Z. Ouadhiri, and J. Colinas. Near-field imaging of radiated emission source on printed-circuit boards. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility 2001: 368-373.
- [16] V. Ramani, C.J. Reddy, A.Q. Martin. Analysis of a narrow slot backed by a rectangular cavity using FEKO. IEEE International Conference on Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics April 2005.
- [17] เดือนเพ็ญ พัฒนาวงศ์ธรรม. การใช้วิธีของโมเมนต์ในการหาเมตริกซ์การกระจายของท่อนำคลื่น. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2544.
- [18] ศราชัย แสงนิยม. การวัดค่าความเป็นฉนวนของวัตถุโดยวิธีการวัดการกระจายแบบย้อนกลับด้วยวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบน. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [19] CISPR22. Information technology equipment Radio disturbance characteristic Limit and methods of measurement. Amendment 2, 2002-10.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปิยะพงษ์ แดงขำ เกิดวันที่ 11 สิงหาคม พ.ศ. 2526 จังหวัดสิงห์บุรี สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ ภาควิชาวิศวกรรม สารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี การศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย