

การเปรียบเทียบคุณสมบัติการกำบังของสียูทกานรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย
สารละลายโปร่งใส

COMPARISON OF EMI SHIELDING WITH TRANSPARENCY LIQUID

ทศพร อุดมสินศิริกุล
THOSSAPHORN UDOMSINSIRIKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

การเปรียบเทียบคุณสมบัติการกำบังของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย
สารละลายโปร่งใส

COMPARISON OF EMI SHIELDING WITH TRANSPARENCY LIQUID



ทศพร อุดมสินศิริกุล

THOSSAPHORN UDOMSINSIRIKUL

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 75116
วัน,เดือน,ปี..... 19 ต.ค. 2550

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบคุณสมบัติการกำบังของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยสารละลายโปรงใส
นักศึกษา	นายทศพร อุดมสินศิริกุล
รหัสประจำตัว	46060702
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์คุณสมบัติการกำบังหรือการชิลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศด้วยสารละลายน้ำเกลือ (NaCl) และสารละลายค่างทับทิม (KMnO_4) โดยการศึกษาจะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาระดับความเข้มข้นของเกลือที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ในสารละลายว่ามีผลกระทบต่อการชิลด์สัญญาณรบกวนอย่างไร โดยอาศัยการวิเคราะห์คุณสมบัติการชิลด์ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งทำการทดสอบภายในห้องปิดกั้นคลื่นกึ่งการสะท้อน (Semi-anechoic chamber) และวิเคราะห์โดยใช้ Commercial software package ผลการวิจัยพบว่าสารละลายเกลือมีประสิทธิผลการชิลด์ดีกว่าสารละลายค่างทับทิมในภาพรวม ซึ่งสามารถที่จะนำไปพัฒนาและประยุกต์วัสดุเพื่อใช้ในการชิลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้

Thesis Title	Comparison of EMI shielding with transparency liquid
Student	Mr. Thossaphorn Udomsinsirikul
Student ID.	46060702
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern

ABSTRACT

This research presents the analysis of properties of electromagnetic interference (EMI) shielding with transparency liquid of salt (NaCl) and Potassium permanganate (KMnO_4). The research will be focused on effect of radiated EMI attenuation with transparency liquid in many cases of quantity of salt concentrate solution using the comparison of test result in semi-anechoic chamber. Then the commercial software package will comply to analyze the effect of shielding effectiveness. The summary result found shielding effectiveness of salt concentrate solution better than Potassium Permanganate concentrate solution which shows the possibility for material development for EMI reduction.

คำสำคัญของวิทยานิพนธ์

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ
คุณสมบัติการกำบัง หรือคุณสมบัติการชีลด์

Keywords

Radiated EMI

Shielding effectiveness

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี จากคำแนะนำ จาก รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งให้ทั้งโอกาสและความรู้รวมถึงประสบการณ์ในหลายๆด้าน ที่ได้จากอาจารย์รวมถึงคำแนะนำต่างๆ ที่มีคุณค่าทั้งในด้านวิชาการและในด้านการดำเนินชีวิต สำหรับอาจารย์ที่ปรึกษา ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณสถาบัน ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านแก่ผู้เขียน

ขอขอบคุณ คุณคมกริช กระจะนันท์ เพื่อนร่วมงานที่ช่วยเหลือและคอยให้คำแนะนำ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี คุณดำรง สกุลศิริรักษ์ ที่ให้การสนับสนุนและให้ความช่วยเหลือตลอดมา

ขอขอบคุณคุณดำรง สกุลศิริรักษ์ ที่ให้การสนับสนุนและให้ความช่วยเหลือตลอดมา

ขอขอบคุณ พี่ๆ และน้องๆ ในห้องวิจัยความเข้มข้นได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าทุกๆ คน และทุกท่านที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือ ซึ่งไม่อาจกล่าวถึงได้หมดในที่นี้

สุดท้ายนี้ผมขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้มีพระคุณยิ่ง ผู้ให้กำลังใจ สนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ให้ความรัก ความเชื่อใจและเข้าใจ รวมถึงทุกๆ คนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจและเข้าใจผมตลอดมา

ทศพร อุดมสินศิริกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
คำสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎี และแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	6
บทที่ 2 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	8
2.1 นิยามที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	8
2.2 องค์ประกอบและปรากฏการณ์ของ EMC.....	9
2.2.1 องค์ประกอบของ EMC.....	9
2.2.2 ปรากฏการณ์ EMC.....	11
2.3 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	14
2.3.1 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	14
2.3.1.1 FCC REGULATIONS.....	14
2.3.1.2 CISPR.....	15
2.3.1.3 มาตรฐานทงกเรทท เร (Military standard).....	15
2.3.1.4 VDE.....	15
2.3.1.5 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.).....	16
2.4 การทดสอบคุณสมบัติความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ.....	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 สถานีทดสอบคุณสมบัติความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ.....	18
2.4.1.1 คุณสมบัติของสถานีทดสอบคุณสมบัติความเข้ากันได้ทาง แม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ.....	18
2.4.1.2 การตรวจค่าสถานีทดสอบ.....	20
2.4.1.2.1 ชนิดของ Site attenuation และ NSA.....	20
2.4.1.2.2 ค่าเบี่ยงเบนสถานีทดสอบ ΔNSA	22
2.4.1.3 ประเภทของสถานีทดสอบคุณสมบัติความเข้ากันได้ทาง แม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ.....	27
2.4.1.3.1 สถานีทดสอบชนิดเปิดโล่ง.....	27
2.4.1.3.2 ห้องปิดกั้นกึ่งการสะท้อน.....	28
2.4.1.3.3 ห้องปิดกั้นการสะท้อน.....	28
2.4.2 สายอากาศ.....	29
2.4.2.1 สายอากาศชนิด Biconical.....	29
2.4.2.2 สายอากาศชนิด Log-periodic.....	30
2.4.2.3 สายอากาศชนิด Bilog.....	30
2.4.3 เครื่องมือวัดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ.....	31
2.4.3.1 Spectrum analyzer.....	32
2.4.4 การจัดวางอุปกรณ์.....	34
2.4.5 การวัดและเครื่องมือวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศที่ใช้ใน งานวิจัย.....	36
2.4.6 หน่วยสำหรับการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ.....	38
2.4.7 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้จริงในการวิจัย.....	39
2.4.7 สารที่ใช้ในการทดสอบการชีลด์ผ่านอากาศ.....	41
2.4.7.1 เกลือ.....	41
2.4.7.2 ค่างทับทิม.....	42
2.4.7.3 น้ำ.....	42
2.5 บทสรุป.....	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การกำบังคลื่นหรือการชีลด์.....	44
3.1 สนามใกล้และสนามไกล.....	45
3.2 คุณลักษณะและความต้านทานคลื่น.....	47
3.3 คุณสมบัติการกำบังคลื่นหรือการชีลด์.....	49
3.4 ค่าสูญเสียการดูดกลืน.....	51
3.5 ค่าสูญเสียการสะท้อน.....	54
3.6 ส่วนประกอบของค่าสูญเสียการดูดกลืนและการสะท้อน.....	63
3.7 ภาพรวมของสมการชีลด์.....	65
3.8 บทสรุป.....	66
บทที่ 4 การทดลอง และการจำลองแบบ.....	68
4.1 บทนำ.....	68
4.2 วัตถุประสงค์.....	68
4.3 ขอบเขตการทดลอง.....	68
4.4 รูปแบบที่ทำการทดลองและจำลองด้วยโปรแกรม.....	72
4.4.1 รูปแบบการกำหนดเงื่อนไขการทดลองและการจำลองในการวิจัย.....	73
4.4.2 รูปแบบการทดสอบ.....	77
4.4.2.1 สำหรับการวัดแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยตรง.....	77
4.4.2.2 สำหรับกล่องพลาสติกแบบปิด.....	80
4.4.2.3 สำหรับกล่องพลาสติกแบบเปิด.....	81
4.4 โปรแกรมสำหรับการจำลองความชันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (FLO/EMC).....	83
4.5 บทสรุป.....	88
บทที่ 5 การทดลองและการวิเคราะห์.....	89
5.1 แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการจำลองโดยใช้โปรแกรมFLO/EMC.....	89
5.2 ผลการทดลอง การจำลอง และวิเคราะห์การกำบังหรือการชีลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ.....	93
5.2.1 การกำบังหรือการชีลด์ด้วยกล่องพลาสติกแบบปิด.....	96

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.1.1 ผลการทดสอบและจำลองการซีลด้วยน้ำหรือที่สารละลาย 0%.....	96
5.2.1.2 ผลการทดสอบและการจำลองการซีลด้วยสารละลายเกลือ.....	98
5.2.1.3 ผลการทดสอบและการจำลองการซีลด้วยสารละลายต่างทับทิม... ..	105
5.2.2 การก้ำบั้งหรือการซีลด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่ บรรจุสารละลายกว้างหนา 2.5 เซนติเมตร.....	110
5.2.2.1 ผลการทดสอบและจำลองการซีลด้วยน้ำหรือที่สารละลาย 0%.....	110
5.2.2.2 ผลการทดสอบและการจำลองการซีลด้วยสารละลายเกลือ.....	111
5.2.2.3 ผลการทดสอบและการจำลองการซีลด้วยสารละลายต่างทับทิม... ..	118
5.2.3 การก้ำบั้งหรือการซีลด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่ บรรจุสารละลายกว้างหนา 5 เซนติเมตร.....	124
5.2.3.1 ผลการทดสอบและจำลองการซีลด้วยน้ำหรือที่สารละลาย 0%.....	124
5.2.3.2 ผลการทดสอบและการจำลองการซีลด้วยสารละลายเกลือ.....	125
5.2.3.3 ผลการทดสอบและการจำลองการซีลด้วยสารละลายต่างทับทิม... ..	132
5.2.4 การก้ำบั้งหรือการซีลด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่ บรรจุสารละลายกว้างหนา 7.5 เซนติเมตร.....	138
5.2.4.1 ผลการทดสอบและจำลองการซีลด้วยน้ำหรือที่สารละลาย 0%.....	138
5.2.4.2 ผลการทดสอบและการจำลองการซีลด้วยสารละลายเกลือ.....	139
5.2.4.3 ผลการทดสอบและการจำลองการซีลด้วยสารละลายต่างทับทิม... ..	146
5.3 การเปรียบเทียบผลของการซีลด้วยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ.....	151
5.3.1 เปรียบเทียบตามภาชนะที่บรรจุ.....	151
5.3.1.1 การซีลด้วยกล่องพลาสติกแบบปิด.....	153
5.3.1.2 การซีลด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุ สารละลายกว้างหนา 2.5 เซนติเมตร.....	162
5.3.1.3 การซีลด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุ สารละลายกว้างหนา 5 เซนติเมตร.....	171
5.3.1.4 การซีลด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุ สารละลายกว้างหนา 7.5 เซนติเมตร.....	180
5.3.2 เปรียบเทียบตามชนิดของสารละลาย.....	188

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.2.1 น้ำ	189
5.3.2.2 สารละลายเกลือ	190
5.3.2.3 สารละลายต่างทับทิม	197
5.3.3 ความแตกต่างระหว่างผลการทดลองและการจำลองแบบ	202
5.4 บทสรุป	203
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	205
6.1 สรุปผลการวิจัย	205
6.1.1 ประสิทธิภาพการฉีดตามระดับความเข้มข้น	206
6.1.2 ประสิทธิภาพการฉีดตามลักษณะภาชนะที่บรรจุ	207
6.1.3 ประสิทธิภาพการฉีดตามประเภทของสาร	210
6.2 ข้อเสนอแนะ	213
6.2.1 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย	213
6.2.2 แนวทางในการวิจัยต่อไป	214
6.2.3 ข้อเสนอแนะอื่นๆ	214
บรรณานุกรม	215
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย	217
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	220
ประวัติผู้เขียน	231

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	เงื่อนไขการทดสอบการชี้ลค์ของสารละลายในภาชนะต่าง ๆ..... 5
1.2	แสดงค่าความเป็นตัวนำของเกลือเมื่ออยู่ในรูปของสารละลาย..... 5
1.3	แสดงค่าความเป็นตัวนำของค่างทับทิมเมื่ออยู่ในรูปของสารละลาย..... 5
2.1	มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า..... 16
2.2	ค่า NSA มาตรฐาน..... 24
2.3	การวัดของเครื่องวัดตามมาตรฐาน CISPR..... 32
3.1	แสดงค่าความเข้มข้นของวัสดุ และค่าความเป็นตัวนำของวัสดุชนิดต่าง ๆ..... 48
3.2	ค่า Skin Depths ของวัสดุต่าง ๆ..... 52
3.3	ค่าคงที่ที่ใช้ในสมการ 3.35..... 61
4.1	เงื่อนไขการทดสอบการกำบังหรือการชี้ลค์ของสารละลายในภาชนะต่าง ๆ..... 70
4.2	แสดงค่าความเป็นตัวนำของเกลือเมื่ออยู่ในรูปของสารละลาย..... 70
4.3	แสดงค่าความเป็นตัวนำของค่างทับทิมเมื่ออยู่ในรูปของสารละลาย..... 71
5.1	แสดงค่าความเป็นตัวนำของเกลือเมื่ออยู่ในรูปของสารละลาย..... 91
5.2	แสดงค่าความเป็นตัวนำของค่างทับทิมเมื่ออยู่ในรูปของสารละลาย..... 91
5.3	สรุปประสิทธิผลการชี้ลค์ของเกลือในประเด็นที่ 1..... 155
5.4	สรุปประสิทธิผลการชี้ลค์ของค่างทับทิมในประเด็นที่ 1..... 159
5.5	สรุปประสิทธิผลการชี้ลค์ของเกลือในประเด็นที่ 2..... 164
5.6	สรุปประสิทธิผลการชี้ลค์ของค่างทับทิมในประเด็นที่ 2..... 168
5.7	สรุปประสิทธิผลการชี้ลค์ของเกลือในประเด็นที่ 3..... 173
5.8	สรุปประสิทธิผลการชี้ลค์ของค่างทับทิมในประเด็นที่3..... 177
5.9	สรุปประสิทธิผลการชี้ลค์ของเกลือในประเด็นที่4..... 182
5.10	สรุปประสิทธิผลการชี้ลค์ของค่างทับทิมในประเด็นที่4..... 186

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การทดสอบอัตราการดูดกลืนจำเพาะ (Specific Absorption Rate-SAR)	2
1.2 ภาชนะแบบปิดทุกด้านเท่ากัน	4
1.3 ภาชนะแบบเปิดด้านบนที่มีความหนาสำหรับบรรจุสารละลาย (ก) และ (ข)	4
1.4 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	7
2.1 องค์ประกอบและรูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	10
2.2 ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	12
2.3 หลักการเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า	13
2.4 ตัวอย่างเส้นขีดจำกัด ย่านความถี่ของข้อกำหนดและมาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	17
2.5 ระยะเวลาที่ว่างในการทดสอบ	19
2.6 ระยะเวลาในการทดสอบ	19
2.7 การวัด NSA (ก) และ (ข)	21
2.8 การวัด NSA	22
2.9 ตำแหน่งในการวัดค่า NSA	26
2.10 ตัวอย่างของค่าเบี่ยงเบน ΔNSA ที่ระยะการวัดห่าง 3 เมตร	26
2.11 แสดงสถานีทดสอบชนิดเปิด โล่ง (ก) และการติดตั้งการทดสอบ (ข)	27
2.12 ห้องปิดกั้นกึ่งการสะท้อน (Semi-Anechoic Chamber)	28
2.13 ห้องปิดกั้นการสะท้อน (Fully-Anechoic Chamber)	29
2.14 สายอากาศชนิด Biconical	29
2.15 สายอากาศชนิด Log-periodic ทั้งสองแบบ (ก) และ (ข)	30
2.16 สายอากาศชนิด Bilog	31
2.17 ตัวอย่างค่าแก้ไขของสายอากาศชนิด Bilog (Bilog correction factor)	31
2.18 แกนในการแสดงรูปสัญญาณของ Spectrum analyzer	32
2.19 ตัวอย่าง Spectrum Analyzer แบบต่าง ๆ (ก) และ (ข)	33
2.20 การตรวจจับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องวัด Spectrum Analyzer	34
2.21 โครงแบบทดสอบอุปกรณ์วางบน โต๊ะ (การวัดสัญญาณรบกวนผ่านอากาศ)	35
2.22 โครงแบบทดสอบอุปกรณ์วางบน โต๊ะ (การวัดสัญญาณรบกวนผ่านอากาศ)	35
2.23 แสดงรูปแบบการติดตั้งการทดสอบ โดยมองจากมุมบน (ก) และด้านข้าง (ข)	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ.....	39
2.25 เครื่องมือสำหรับวัดค่าความเป็นตัวนำของสารละลาย.....	40
2.26 แหล่งกำเนิดสัญญาณ (ก) และวงจรมูลฐานของแหล่งกำเนิดสัญญาณ (ข).....	40
2.27 ผลึกเกลือ (ก) และ โครงสร้าง โมเลกุลของเกลือ (ข).....	41
2.28 ผลึกของด่างทับทิม (ก) และ โครงสร้างทางโมเลกุลของด่างทับทิม (ข).....	42
2.29 น้ำ (ก) และ โครงสร้างทางโมเลกุลของน้ำ (ข).....	43
3.1 รูปแบบการซัดด์ที่มีแหล่งกำเนิดสัญญาณบรรจุภายในเพื่อไม่ให้แพร่ออกไปภายนอก.....	44
3.2 รูปแบบการซัดด์เพื่อปกป้องแหล่งกำเนิดสัญญาณจากภายนอก.....	44
3.3 แสดงคุณสมบัติของสนามที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างจากแหล่งกำเนิด ซึ่งแบ่งสนามใกล้และสนามไกล (Near and far field) ด้วย $\lambda/2\pi$	45
3.4 แสดงค่าความต้านทานคลื่น (Wave impedance) ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ ทั้งแบบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก.....	46
3.5 สนามรบกวน (Noise field) เหนี่ยวนำกระแสในส่วนที่ซัดด์และกระแสเหล่านี้วนเป็นรอบสร้างสนามเพิ่มเติมซึ่งหักล้างกับสนามดั้งเดิมในพื้นที่ผิว.....	49
3.6 รูปเมื่อคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านวัตถุ ค่าของแอมพลิจูดจะลดลงเป็นอัตราส่วน เลขยกกำลัง.....	51
3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียการดูดกลืนในหน่วยเดซิเบลกับอัตราส่วน r/δ ซึ่งเป็นรูปกราฟที่ใช้สำหรับคลื่นพื้นราบ สนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็ก.....	53
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูญเสียการดูดกลืนกับความถี่ของทองแดงและเหล็กกล้าที่ความหนา 2 แบบ คือ 0.020 นิ้ว และ 0.125 นิ้ว.....	54
3.9 ความเข้มของคลื่นที่ส่งผ่านออกมาจากวัตถุด้วยค่าความต้านทาน Z_1 ไปสู่วัตถุที่มีค่าความต้านทาน Z_2	55
3.10 แสดงสะท้อนและดูดกลืนบางส่วนที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวซัดด์ทั้งสองด้าน.....	55
3.11 ค่าสูญเสียสะท้อนจะสำหรับ Plane wave จะมีค่าสูงสุดที่ความถี่ค่าสำหรับวัตถุที่มีค่าความเป็นตัวนำสูง.....	58
3.12 ค่าสูญเสียการสะท้อนในซัดด์ทองแดงตามความถี่ ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดและชนิดของคลื่น.....	59
3.13 แสดงการสะท้อนซ้ำซ้อนที่เกิดในซัดด์บาง.....	62

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ค่าแก้ของการสูญเสียการสะท้อนซ้ำซ้อน (B) สำหรับแผ่นชีลด์บาง สำหรับสนามแม่เหล็ก.....	63
3.15 คุณสมบัติการชีลด์ของชีลด์ทองแดงหนา 0.02 นิ้วในสนามไกล (Far field).....	64
3.16 การใช้วัสดุแม่เหล็กด้วยส่วนที่มีค่ารีลักซ์แตนซ์ต่ำสำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก.....	65
3.17 แสดงคุณสมบัติการชีลด์ของสนามไฟฟ้า คลื่นพื้นราบ(Plane wave) และสนามแม่เหล็กของแผ่นอลูมิเนียมหนา 0.02 นิ้ว.....	66
3.18 ภาพรวมของสมการที่ใช้ในการอธิบายคุณสมบัติการชีลด์ภายใต้ภาวะต่าง ๆ กัน.....	67
4.1 ภาชนะแบบปิดทุกด้านเท่ากัน.....	69
4.2 ภาชนะแบบเปิดด้านบนที่มีความหนาสำหรับบรรจุสารละลาย (ก) และ (ข).....	69
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มข้นและค่าความเป็นตัวนำของสารละลายเกลือ.....	72
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มข้นและค่าความเป็นตัวนำของสารละลายต่างหทัย.....	72
4.5 เงื่อนไขการทดลองและการจำลองการชีลด์ด้วยสารละลายในรูปแบบต่าง ๆ.....	73
4.6 รูปแหล่งกำเนิดสัญญาณ (ก) สายวงจร (ข) และการจำลองด้วยโปรแกรม (ค และ ง).....	74
4.7 อุปกรณ์ของวงจรแหล่งกำเนิดสัญญาณ และระดับแรงดันในแต่ละตำแหน่ง.....	75
4.8 กล่องพลาสติกที่ใช้ในการทดสอบ.....	76
4.9 กล่องพลาสติกชนิดขาว.....	77
4.10 รูปแบบการติดตั้งการทดสอบโดยมองจากมุมบน (ก) และด้านข้าง (ข).....	78
4.11 รูปแบบการทดสอบจริง.....	78
4.12 รูปแบบกลไกของสัญญาณแบบ Time domain และ Frequency domain จากแหล่งกำเนิดสัญญาณภายหลังจากวัดด้วยสายอากาศ Bilog.....	79
4.13 การทดสอบสำหรับกล่องพลาสติกปิดทุกด้าน.....	80
4.14 รูปแบบการจำลองการชีลด์ด้วยกล่องพลาสติกแบบปิด (ก และ ข).....	81
4.15 รูปแบบการติดตั้งการทดสอบ.....	82
4.16 การทดสอบสำหรับกล่องพลาสติกเปิด.....	82
4.17 รูปแบบการจำลอง.....	83
4.18 หน้าต่างเมื่อเริ่มเปิดโปรแกรม FLO/EMC.....	84

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19	หน้าต่างสำหรับป้อนค่าความเป็นตัวนำและค่าความซึมซาบให้กับโปรแกรม..... 85
4.20	หน้าต่างแสดงการจำลองภายหลังจากการกำหนดรูปแบบให้กับโปรแกรม..... 86
5.1	แสดงรูปแหล่งกำเนิดสัญญาณ (ก) และวงจร (ข)..... 89
5.2	แสดงรูปแหล่งกำเนิดสัญญาณจากการจำลองด้วยโปรแกรม FLO/EMC (ก) และ (ข)..... 90
5.3	สรุปรูปแบบการทดสอบการซัดส์ทั้งหมด..... 92
5.4	รูปแบบการทดสอบจริงของแหล่งกำเนิดสัญญาณ..... 93
5.5	รูปแบบการเดินทางของสนามไฟฟ้าที่จุดความถี่ต่าง ๆ ของแหล่งกำเนิดสัญญาณ..... 94
5.6	การเปรียบเทียบคุณสมบัติการซัดส์ของน้ำที่บรรจุภายในภาชนะปิด..... 96
5.7	ค่าการวัดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยตรง..... 97
5.8	ค่าการวัดที่ได้จากการซัดส์ด้วยน้ำหรือที่สารละลาย 0%..... 98
5.9	การเปรียบเทียบคุณสมบัติการซัดส์ของสารละลายเกลือ 5% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด..... 98
5.10	การเปรียบเทียบคุณสมบัติการซัดส์ของสารละลายเกลือ 10% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด..... 99
5.11	การเปรียบเทียบคุณสมบัติการซัดส์ของสารละลายเกลือ 15% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด..... 100
5.12	การเปรียบเทียบคุณสมบัติการซัดส์ของสารละลายเกลือ 20% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด..... 101
5.13	การเปรียบเทียบคุณสมบัติการซัดส์ของสารละลายเกลือ 25% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด..... 102
5.14	การเปรียบเทียบคุณสมบัติการซัดส์ของสารละลายเกลือ 30% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด..... 103
5.15	การเปรียบเทียบคุณสมบัติการซัดส์ของสารละลายเกลือ 35% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด..... 104
5.16	การเปรียบเทียบคุณสมบัติการซัดส์ของสารละลายค่างทับทิม 5% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด..... 105
5.17	การเปรียบเทียบคุณสมบัติการซัดส์ของสารละลายค่างทับทิม 10% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด..... 106
5.18	การเปรียบเทียบคุณสมบัติการซัดส์ของสารละลายค่างทับทิม 15% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด..... 107
5.19	การเปรียบเทียบคุณสมบัติการซัดส์ของสารละลายค่างทับทิม 20% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด..... 108
5.20	การเปรียบเทียบคุณสมบัติการซัดส์ของน้ำที่บรรจุภายในภาชนะที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร..... 110

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
5.49	เปรียบเทียบคุณสมบัติการซึดค้ของสารละลายเกลือ 25% ที่บรรจุภายใน ภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร.....	143
5.50	เปรียบเทียบคุณสมบัติการซึดค้ของสารละลายเกลือ 30% ที่บรรจุภายใน ภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร.....	144
5.51	เปรียบเทียบคุณสมบัติการซึดค้ของสารละลายเกลือ 35% ที่บรรจุภายใน ภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร.....	145
5.52	เปรียบเทียบคุณสมบัติการซึดค้ของสารละลายต่างทับทิม 5% ที่บรรจุภายใน ภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร.....	146
5.53	เปรียบเทียบคุณสมบัติการซึดค้ของสารละลายต่างทับทิม 10% ที่บรรจุภายใน ภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร.....	147
5.54	เปรียบเทียบคุณสมบัติการซึดค้ของสารละลายต่างทับทิม 15% ที่บรรจุภายใน ภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร.....	148
5.55	เปรียบเทียบคุณสมบัติการซึดค้ของสารละลายต่างทับทิม 20% ที่บรรจุภายใน ภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร.....	149
5.56	ประเด็นในการเปรียบเทียบการทดสอบวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวนำ.....	151
5.57	เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการซึดค้จำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ.....	153
5.58	การเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการซึดค้การทดลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ.....	154
5.59	รูปแบบการเดินทางของสนามไฟฟ้าที่ถูกซึดค้ด้วยพลาสติกแบบปิด โดยภายในบรรจุสารละลายเกลือ.....	156
5.60	เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการซึดค้จำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของต่างทับทิม.....	157
5.61	การเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการซึดค้การทดลองในแต่ละระดับความ เข้มข้นของต่างทับทิม.....	158
5.62	รูปแบบการเดินทางของสนามไฟฟ้าที่ถูกซึดค้ด้วยพลาสติกแบบปิด โดยภายในบรรจุสารละลายต่างทับทิม.....	160
5.63	เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการซึดค้จำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ.....	162
5.64	การเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการซึดค้การทดลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ.....	163
5.65	รูปแบบการเดินทางของสนามไฟฟ้าที่ถูกซึดค้ด้วยกล่องพลาสติกแบบเปิดด้านบน ที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 2.5 เซนติเมตร โดยภายในบรรจุสารละลายเกลือ.....	165

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.66	เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการซึดจําลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของค่างทับทิม.....166
5.67	การเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการซึดการทดลองในแต่ละระดับ ความเข้มข้นของค่างทับทิม.....167
5.68	รูปแบบการเดินทางของสนามไฟฟ้าที่ถูกซึดด้วยกล่องพลาสติกแบบเปิดด้านบนที่มี พื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 2.5 เซนติเมตร โดยภายในบรรจุสารละลายค่างทับทิม.....169
5.69	เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการซึดจําลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ.....171
5.70	การเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการซึดการทดลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ.....172
5.71	รูปแบบการเดินทางของสนามไฟฟ้าที่ถูกซึดด้วยกล่องพลาสติกแบบเปิดด้านบนที่มี พื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 5 เซนติเมตร โดยภายในบรรจุสารละลายเกลือ.....174
5.72	เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการซึดจําลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของค่างทับทิม.....175
5.73	การเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการซึดการทดลองในแต่ละระดับความ เข้มข้นของค่างทับทิม.....176
5.74	รูปแบบการเดินทางของสนามไฟฟ้าที่ถูกซึดด้วยกล่องพลาสติกแบบเปิดด้านบนที่มี พื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 5 เซนติเมตร โดยภายในบรรจุสารละลายค่างทับทิม.....178
5.75	เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการซึดจําลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ.....180
5.76	การเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการซึดการทดลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ.....181
5.77	รูปแบบการเดินทางของสนามไฟฟ้าที่ถูกซึดด้วยกล่องพลาสติกแบบเปิดด้านบนที่มี พื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 7.5 เซนติเมตร โดยภายในบรรจุสารละลายเกลือ.....183
5.78	เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการซึดจําลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของค่างทับทิม.....184
5.79	การเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการซึดการทดลองในแต่ละระดับความ เข้มข้นของค่างทับทิม.....185
5.80	รูปแบบการเดินทางของสนามไฟฟ้าที่ถูกซึดด้วยกล่องพลาสติกแบบเปิดด้านบนที่มี พื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 7.5 เซนติเมตร โดยภายในบรรจุสารละลายค่างทับทิม.....187
5.81	สรุปรูปแบบการทดสอบและจําลอง.....188
5.82	คุณสมบัติการซึดของน้ำในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ.....189
5.83	คุณสมบัติการซึดของน้ำในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการจําลอง.....189
5.84	คุณสมบัติการซึดของสารละลายเกลือ 5% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ.....190

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.85 คุณสมบัติการซึดของสารละลายเกลือ 5% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลอง.....	191
5.86 คุณสมบัติการซึดของสารละลายเกลือ 10% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ.....	191
5.87 คุณสมบัติการซึดของสารละลายเกลือ 10% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลอง.....	192
5.88 คุณสมบัติการซึดของสารละลายเกลือ 15% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ.....	192
5.89 คุณสมบัติการซึดของสารละลายเกลือ 15% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลอง.....	193
5.90 คุณสมบัติการซึดของสารละลายเกลือ 20% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ.....	193
5.91 คุณสมบัติการซึดของสารละลายเกลือ 20% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลอง.....	194
5.92 คุณสมบัติการซึดของสารละลายเกลือ 25% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ.....	194
5.93 คุณสมบัติการซึดของสารละลายเกลือ 25% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลอง.....	195
5.94 คุณสมบัติการซึดของสารละลายเกลือ 30% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ.....	195
5.95 คุณสมบัติการซึดของสารละลายเกลือ 30% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลอง.....	196
5.96 คุณสมบัติการซึดของสารละลายเกลือ 35% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ.....	196
5.97 คุณสมบัติการซึดของสารละลายเกลือ 35% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลอง.....	197
5.98 คุณสมบัติการซึดของสารละลายต่างทับทิม 5% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ.....	198

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.99 คุณสมบัติการซึบซึมของสารละลายต่างหัตถิม 5% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลอง.....	198
5.100 คุณสมบัติการซึบซึมของสารละลายต่างหัตถิม 10% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ.....	199
5.101 คุณสมบัติการซึบซึมของสารละลายต่างหัตถิม 10% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลอง.....	199
5.102 คุณสมบัติการซึบซึมของสารละลายต่างหัตถิม 15% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ.....	200
5.103 คุณสมบัติการซึบซึมของสารละลายต่างหัตถิม 15% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลอง.....	200
5.104 คุณสมบัติการซึบซึมของสารละลายต่างหัตถิม 20% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ.....	201
5.105 คุณสมบัติการซึบซึมของสารละลายต่างหัตถิม 20% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลอง.....	201
5.106 วัสดุอุดกั้นที่ใช้ภายในห้อง Semi-anechoic chamber.....	202
6.1 เปรียบเทียบประสิทธิผลการซึบซึมของเกลือที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน.....	206
6.2 เปรียบเทียบประสิทธิผลการซึบซึมของต่างหัตถิมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน.....	207
6.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติการซึบซึมของเกลือในภาชนะต่าง ๆ.....	208
6.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติการซึบซึมของต่างหัตถิมในภาชนะต่าง ๆ.....	209
6.5 ประสิทธิภาพการซึบซึมระหว่างเกลือและต่างหัตถิมในภาชนะปิด.....	210
6.6 ประสิทธิภาพการซึบซึมระหว่างเกลือและต่างหัตถิมในภาชนะเปิดด้านบนหนา 2.5 ซม.....	211
6.7 ประสิทธิภาพการซึบซึมระหว่างเกลือและต่างหัตถิมในภาชนะเปิดด้านบนหนา 5 ซม.....	212
6.8 ประสิทธิภาพการซึบซึมระหว่างเกลือและต่างหัตถิมในภาชนะเปิดด้านบนหนา 7.5 ซม.....	213

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการเปิดการค้าเสรีกับนานาประเทศ หรือที่เรียกว่า FTA ซึ่งย่อมาจาก Free Trade Area ทำให้อุปสรรคการค้า อาทิเช่น พิธีการด้านภาษีต่าง ๆ ลดลง แต่ขณะเดียวกัน ได้มีการกีดกันการค้าชนิดอื่นของประเทศคู่ค้าเกิดขึ้น การกีดกันการค้าประเภทหนึ่งที่เกิดขึ้นคือการกีดกันทางด้านเทคนิค โดยการกีดกันประเภทนี้ได้มีการพัฒนาเป็นรูปแบบของมาตรฐานในการทดสอบของผลิตภัณฑ์ประเภทต่าง ๆ เพื่อให้เป็นการยอมรับของประเทศคู่ค้านั้น ๆ

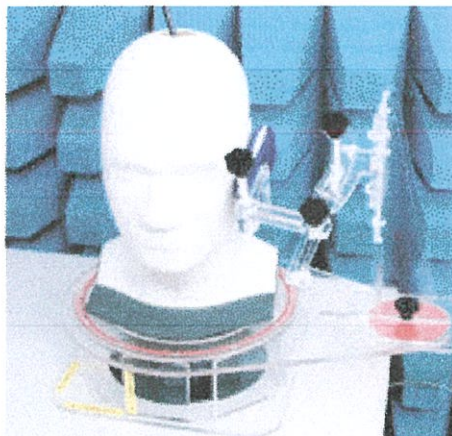
ณ ปัจจุบันสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference-EMI) เป็นหัวข้อหนึ่งในมาตรฐานทดสอบคุณสมบัติความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility-EMC) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ได้มีการบังคับใช้ทั้งในประเทศและต่างประเทศ โดยทั้งนี้หัวข้อการทดสอบ EMC เป็นส่วนหนึ่งของข้อบังคับในการนำเข้า-ออกของประเทศต่าง ๆ ซึ่งเป็นการใช้มาตรฐานเป็นมาตรการป้องกันทางการค้าที่มีใช้ภาษี (Non-tariff Measures) ของประเทศสมาชิกในกลุ่ม ซึ่งได้แก่ กฎระเบียบทางเทคนิค (Technical Regulation) หรือมาตรฐานบังคับ (Mandatory Standard)

ในการพัฒนาและปรับปรุงสินค้าผลิตภัณฑ์ประเภทไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ให้ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดในหัวข้อสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (Radiated Emission) อาทิเช่น มาตรฐาน CISPR 22 [1] นอกจากจะต้องมีการออกแบบวงจรการทำงานของผลิตภัณฑ์รวมถึงภาชนะที่บรรจุเพื่อลดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กจากตัวผลิตภัณฑ์ขณะเริ่มต้นแล้วระหว่างการทดสอบผลิตภัณฑ์ให้ผ่านตามมาตรฐานที่กำหนด หากผลิตภัณฑ์ดังกล่าวไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด สามารถใช้วัสดุที่ช่วยกับังสัญญาณหรือการชีลด์ ห่อหุ้มส่วนของวงจรภายในตัวผลิตภัณฑ์เพื่อให้ผ่านการทดสอบได้ อาทิเช่น แผ่นทองแดง

วัสดุที่ใช้ในการกับังสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่เป็นวัสดุของแข็ง แต่ ณ ปัจจุบัน ได้มีการนำของเหลวที่เป็นสารละลายของเหลวที่มีความเข้มข้นเทียบเท่ากับเนื้อเยื่อภายในกะโหลกของมนุษย์บรรจุภายในรูปกะโหลกจำลอง และทำการวัดสัญญาณที่แพร่ออกมาจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งการจำลองรูปแบบการทดลองดังกล่าวเรียกว่า อัตราการดูดกลืนจำเพาะ (Specific Absorption Rate-SAR) [2, 3]

จากหลักการในการใช้ของเหลวที่ความเข้มข้นมาจำลองแทนเนื้อเยื่อภายในกะโหลกของมนุษย์ดังกล่าวข้างต้น จึงนำมาเป็นแนวทางในการศึกษาถึงการกับังสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของสารละลายโปร่งใสซึ่งใช้เกลือและด่างทับทิมเป็นสารละลายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อนำ

ประโยชน์ของสารละลายดังกล่าวมาใช้ในงานพัฒนาผลิตภัณฑ์อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป



รูปที่ 1.1 การทดสอบอัตราการดูดกลืนจำเพาะ (Specific Absorption Rate-SAR)

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์ผลการก่อกำบังหรือการชีดส์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของสารละลายเกลือและต่างทับทิม ที่บรรจุในภาชนะรูปแบบต่าง ๆ กัน โดยในแต่ละรูปแบบภาชนะที่บรรจุสารละลาย จะบรรจุสารละลายสารดังกล่าวข้างต้นที่ความเข้มข้นต่างกัน จนถึงจุดอิ่มตัวของสารละลายนั้น ๆ หรือถึงจุดที่ไม่สามารถละลายได้อีกในของเหลว นอกจากนี้ศึกษาในด้านของการชีดส์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าแล้ว ยังทำการศึกษาในด้านประสิทธิภาพการชีดส์ของภาชนะที่บรรจุเช่นเดียวกัน

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ณ ปัจจุบันการพัฒนาและวิจัยวัสดุที่นำมาใช้ในการชีดส์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่เป็นวัสดุของแข็ง อาทิเช่น ทองแดง อีกทั้งมีราคาค่อนข้างสูง หากเป็นวัสดุชนิดผสมที่มีการนำข้อดีของสารแต่ละชนิดมาทำการผสมในการช่วยให้คุณสมบัติการชีดส์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าดีขึ้น ราคา ก็จะยิ่งสูงขึ้นตามลำดับ

จากปัญหาดังที่กล่าวมา งานวิจัยนี้จึงนำหลักการในการใช้สารละลายเป็นตัวแทนเนื้อเยื่อในกะโหลกมนุษย์สำหรับทดสอบอัตราการดูดกลืนจำเพาะ (Specific Absorption Rate-SAR) ดังรูปที่ 1.1 ดังได้แสดงข้างต้นมาใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัย โดยใช้สารละลายความเข้มข้นเกลือและต่างทับทิมมาทดสอบเพื่อวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติการชีดส์สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [4, 5, 6, 7]

อีกทั้งวิเคราะห์ถึงรูปแบบภาชนะที่บรรจุสารละลาย เพื่อนำประโยชน์ของสารละลายดังกล่าวมาใช้ในงานพัฒนาผลิตภัณฑ์อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำแนวคิดจากการศึกษาคุณสมบัติการชิลด์สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding) ของสารต่าง ๆ อาทิเช่น ทองแดง เป็นต้น และการใช้สารละลายเป็นตัวแทนเนื้อเยื่อในกะโหลกมนุษย์สำหรับทดสอบอัตราการดูดกลืนจำเพาะ (Specific Absorbing Rate-SAR) มาประยุกต์เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติของสารละลายเกลือที่มีผลต่อการชิลด์สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ รวมทั้งรูปแบบของภาชนะที่บรรจุ และชนิดของสารอื่น ๆ อาทิเช่น ต่างทับทิมที่นำมาเป็นสารละลาย ซึ่งจากการทดลองได้พบว่าสารละลายแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการชิลด์สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าต่างกัน และยิ่งมีความเข้มข้นมากขึ้นคุณสมบัติการชิลด์สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ายิ่งเพิ่มมากขึ้น

1.5 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาและวิเคราะห์ถึงการชิลด์ของน้ำ สารละลายเกลือ และต่างทับทิม [8, 9, 10, 11] ที่ความเข้มข้นต่างกัน รวมถึงในด้านประสิทธิภาพของการชิลด์เมื่อบรรจุภาชนะที่ใช้บรรจุสารละลายดังกล่าว

ภาชนะที่ใช้ในการบรรจุสารละลายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่

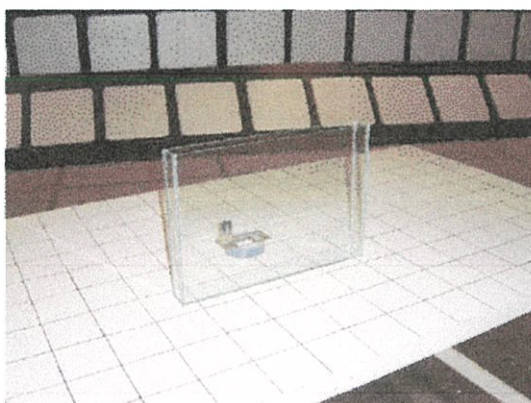
1.5.1) ภาชนะแบบปิดทุกด้านเท่ากัน

1.5.2) ภาชนะแบบเปิดด้านบนที่มีความหนาสำหรับบรรจุสารละลาย โดยจะมีขนาดความกว้างในการบรรจุสารละลายดังต่อไปนี้

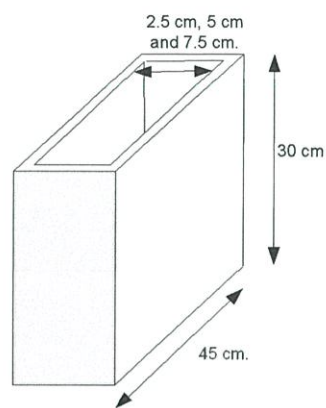
- 2.5 เซนติเมตร
- 5 เซนติเมตร
- 7.5 เซนติเมตร



รูปที่ 1.2 ภาชนะแบบปิดทุกด้านเท่ากัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.3 ภาชนะแบบเปิดด้านบนที่มีความหนาสำหรับบรรจุสารละลาย (ก) และ (ข)

เมื่อทำการกำหนดภาชนะที่ใช้ในการทดสอบข้างต้น ขึ้นต้นถัดมาเป็นการกำหนดความเข้มข้นของสารละลายที่ระดับต่าง ๆ ในการศึกษาและวิเคราะห์การซึ่ดของสารนั้น ๆ โดยกำหนดความเข้มข้นของสารละลายดังต่อไปนี้ ที่สารละลาย $x\%$ แสดงว่ามี เนื้อสาร x กรัม ในของเหลว 100 มิลลิลิตร อาทิเช่น สารละลายเกลือ 5% แสดงว่า ในสารละลายนั้นมีเกลือละลายอยู่ 5 กรัมอยู่ในของเหลว 100 มิลลิลิตร เป็นต้น

ในขั้นถัดมาเป็นการกำหนดเงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายในแต่ละรูปแบบของการทดสอบในรูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เงื่อนไขการทดสอบการซึ่ลค์ของสารละลายในภาชนะต่าง ๆ

ประเภทสาร	ภาชนะแบบปิด	ภาชนะเปิดหนา 2.5 ซม.	ภาชนะเปิดหนา 5 ซม.	ภาชนะเปิดหนา 7.5 ซม.
เกลือ	0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% และ 35%			
ค้างทับทิม	0%, 5%, 10%, 15% และ 20%			

โดยที่สารละลายแต่ละชนิดและแต่ละระดับความเข้มข้นจะมีค่าความเป็นตัวนำที่ต่างกัน โดยทำการวัดค่าความเป็นตัวนำที่ระดับความเข้มข้นด้วยเครื่องมือวัดค่าความเป็นตัวนำ [12, 13] ซึ่งภายหลังจากการวัดค่าความเป็นตัวนำของสารละลายที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ แล้ว ได้แสดงค่าความเป็นตัวนำในตารางที่ 1.2 สำหรับเกลือ และตารางที่ 1.3 สำหรับค้างทับทิม

ตารางที่ 1.2 แสดงค่าความเป็นตัวนำของเกลือเมื่ออยู่ในรูปของสารละลาย

ระดับความเข้มข้น	ค่าความเป็นตัวนำของเกลือ (Conductivity - mS/cm)	หมายเหตุ
0%	0.247	-
5%	81.6	-
10%	136.3	-
15%	181.5	-
20%	214.0	-
25%	229.0	เกลือตกตะกอน ไม่สามารถละลายได้อีก
30%	248.0	เกลือตกตะกอน ไม่สามารถละลายได้อีก
35%	253.0	เกลือตกตะกอน ไม่สามารถละลายได้อีก

ตารางที่ 1.3 แสดงค่าความเป็นตัวนำของค้างทับทิมเมื่ออยู่ในรูปของสารละลาย

ระดับความเข้มข้น	ค่าความเป็นตัวนำของค้างทับทิม (Conductivity-mS/cm)	หมายเหตุ
0%	0.247	-
5%	32.5	-
10%	44.4	ค้างทับทิมตกตะกอน ไม่สามารถละลายได้อีก
15%	46.1	ค้างทับทิมตกตะกอน ไม่สามารถละลายได้อีก
20%	46.8	ค้างทับทิมตกตะกอน ไม่สามารถละลายได้อีก

โดยค่าความเป็นตัวนำที่ได้จากการวัดนี้ จะนำไปใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม FLO/EMC [14] เพื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายที่เงื่อนไขต่าง ๆ กับการทดสอบจริงต่อไป หนึ่ง เนื่องจากติดขัดด้วยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าพารามิเตอร์ค่าความซึมซาบของสารละลายดังกล่าว ดังนั้นการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการจำลองโดยอาศัยค่าความเป็นตัวนำของสารที่ได้จากการวัดมา ทำการจำลองด้วยโปรแกรม FLO/EMC เพียงค่าเดียวเท่านั้น ส่วนค่าความซึมซาบของสารละลายที่ต้อง ใช้ในการป้อนค่าพารามิเตอร์ให้กับโปรแกรมกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าความซึมซาบของน้ำ

สำหรับการวัดนั้นได้อ้างอิงวิธีการจากมาตรฐาน CISPR 22 โดยกำหนดระยะห่างระหว่าง สายอากาศและแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ระยะ 3 เมตร ภายในห้องปิดกั้นกึ่งการสะท้อน (Semi anechoic chamber) มาตรฐาน และย่านความถี่ที่ใช้ในการวัดตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1,000 MHz

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนในการศึกษาวิจัยในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลัก ดังแผนภูมิในรูปที่ 1.4 โดยครอบคลุมเนื้อหาสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งมีทั้งหมด 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความจำเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

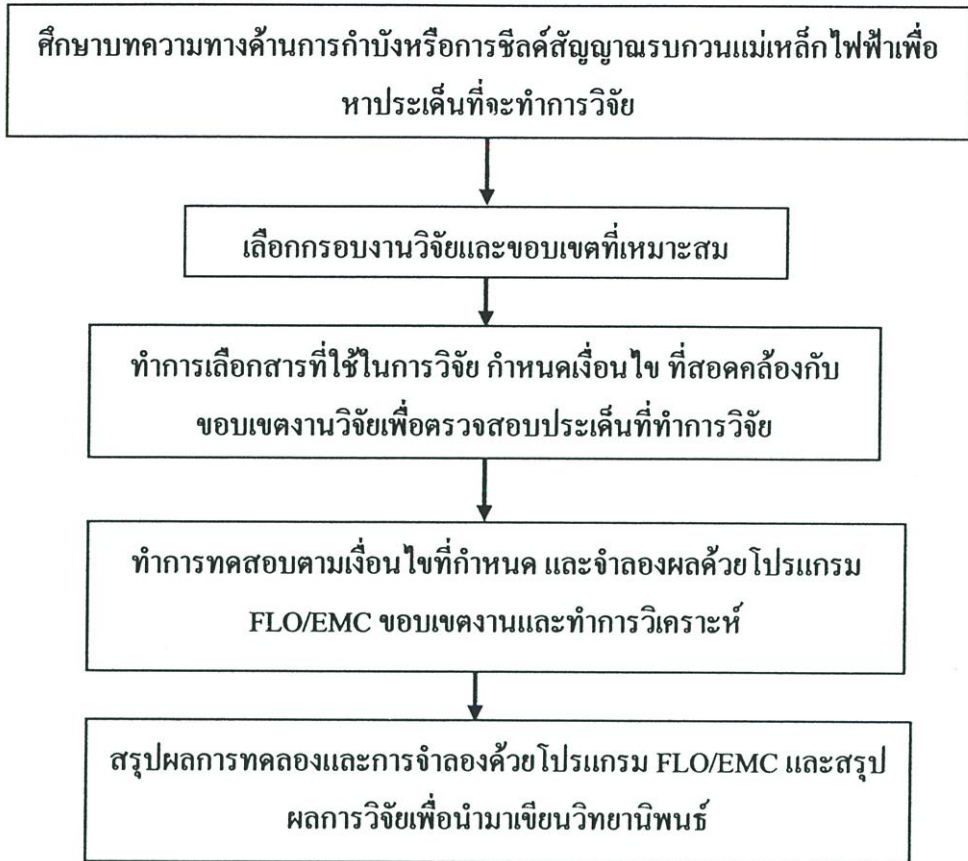
บทที่ 2 กล่าวถึงความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า นิยามและที่มาของสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้าแบบต่างๆ เงื่อนไขจำกัดสำหรับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆ การวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ เครื่องมือวัด และหน่วยของการวัด

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของการกำบังหรือการชีลด์สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า

บทที่ 4 กล่าวถึงวัตถุประสงค์และขอบเขตที่ทำการทดลองและจำลองด้วยโปรแกรม FLO/EMC โดยแบ่งเป็นการสรุปรูปเงื่อนไขต่างๆ ที่จะทำการทดสอบทางด้านสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้า

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดลองและการจำลองด้วยโปรแกรม FLO/EMC การวิเคราะห์ผล โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองจริงและการจำลองด้วยโปรแกรม FLO/EMC

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ



รูปที่ 1.4 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

บทที่ 2

ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ขอบเขตในบทนี้เริ่มต้นด้วยการอธิบายความหมายของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC) เบื้องต้น [15] นิยาม ส่วนประกอบ และมาตรฐานของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเน้นที่ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ อีกทั้งจะอธิบายถึงคุณสมบัติการชีลด์ (Shielding effectiveness) ที่เกี่ยวข้อง

ซึ่งในบทนี้ขอเรียกทับศัพท์คำว่า EMC (อีเอ็มซี) แทนความหมายของคำว่า ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าในหนังสือเล่มนี้ เพื่อความสะดวกและกระชับในความเข้าใจ

2.1 นิยามที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

EMC

ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC) หมายถึง ความสามารถของอุปกรณ์ (Device) เครื่องมือ (Equipment) หรือระบบ (System) ที่สามารถทำงานร่วมกันได้เป็นปกติในสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้า โดยไม่ก่อให้เกิดผลเสีย หรือผลกระทบใด ๆ ต่อ อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบ ที่ทำงานในสภาวะสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้าเดียวกัน

EMD

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic disturbance: EMD) หมายถึงปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าใด ๆ ที่อาจจะก่อให้เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบ ประเด็นสำคัญคือเป็นสาเหตุของการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า

EMI

การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า หรือสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference: EMI) หมายถึง การที่อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบ เกิดการทำงานที่ผิดพลาดหรือได้รับความเสียหาย ซึ่งมีสาเหตุมาจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ประเด็นสำคัญคือเป็นผลที่เกิดขึ้นจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

Emission

การปล่อยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา

Immunity

ภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

Susceptibility

ความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

Conducted emission

การปล่อยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาทางสายตัวนำ

Radiated emission

การปล่อยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการแผ่กระจายคลื่นทางอากาศ

2.2 องค์ประกอบและปรากฏการณ์ของ EMC**2.2.1 องค์ประกอบของ EMC**

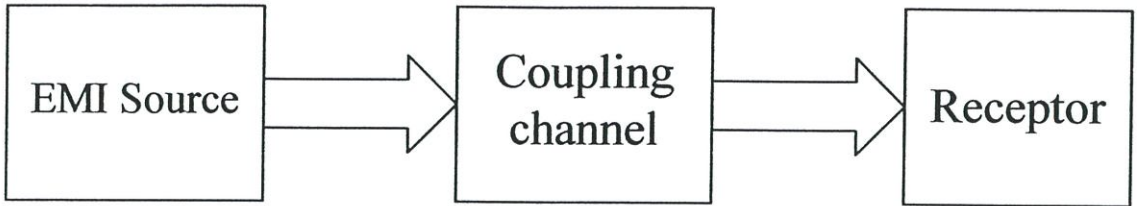
โดยมีรูปแบบและความสัมพันธ์กันแต่ละส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.1(ก) EMC ประกอบด้วยองค์ประกอบสามส่วนคือ

ส่วนแรก คือ แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (EMI source) เช่น เครื่องส่งวิทยุ เครื่องเชื่อมไฟฟ้า วงจรจุดระเบิด คอมพิวเตอร์และระบบต่อพ่วง ฟ้าผ่า เป็นต้น

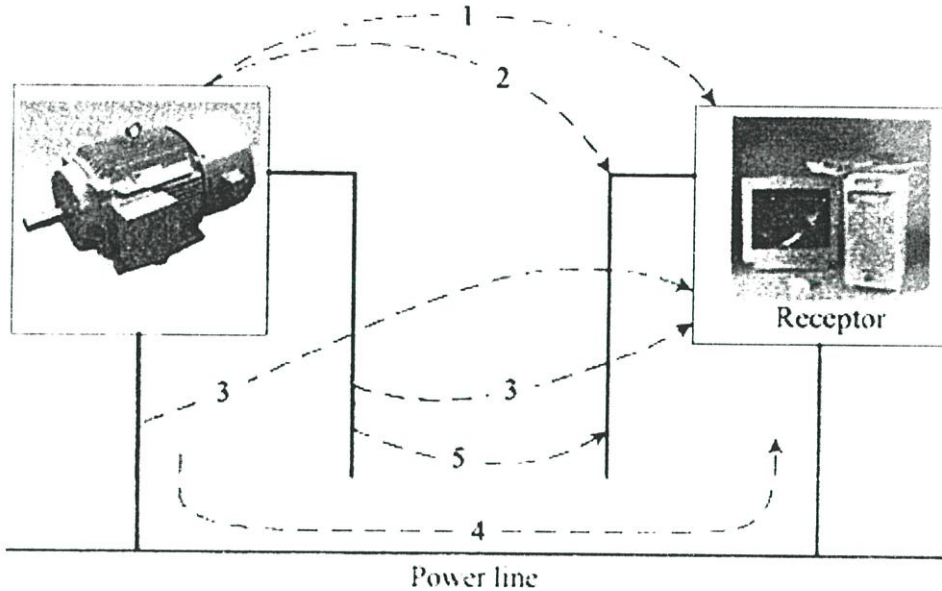
ส่วนที่สอง คือ ส่วนที่ได้รับผลการรบกวน (Receptor หรือ Victim) เช่น เครื่องรับวิทยุ วงจรตรวจจับสัญญาณ คอมพิวเตอร์ สิ่งมีชีวิต เป็นต้น

และส่วนที่สาม คือ ส่วนเชื่อมต่อ (Coupling) สัญญาณรบกวนระหว่างสองส่วนแรก เช่น โดยการแผ่กระจายไปทางอากาศ การเหนี่ยวนำหรือทางตัวนำ ดังเส้นทางที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ดังรูปที่ 2.1(ข)

โดยปกติส่วนที่กำเนิดสัญญาณมักจะสร้างสัญญาณไปรบกวนส่วนอื่น ๆ แต่ในทางปฏิบัติส่วนที่กำเนิดสัญญาณอาจจะได้รับสัญญาณรบกวนจากแหล่งอื่นก็ได้ จึงอาจเรียกได้ว่าเป็นทั้งตัวกำเนิดสัญญาณรบกวนและตัวได้รับสัญญาณรบกวนในเวลาเดียวกันก็ได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 องค์ประกอบและรูปแบบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [4]

ในรูปที่ 2.1(ข) ส่วนที่กำเนิดสัญญาณมักจะสร้างสัญญาณรบกวนไปยังตัวรับผลกระทบมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน โดยสรุปได้ดังนี้

รูปแบบที่ 1 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านทางอากาศไปยังตัวรับผลกระทบ โดยตรง (Radiated emission)

รูปแบบที่ 2 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยผ่านทางอากาศไปยังสายตัวนำกำลัง/สัญญาณ/ควบคุมที่เชื่อมต่อกับตัวรับผลกระทบ โดยที่สายตัวนำดังกล่าวจะเป็นตัวนำสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นไปยังตัวรับผลกระทบ (Indirect-conducted emission)

รูปแบบที่ 3 สายตัวนำกำลัง/สัญญาณ/ควบคุม ที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังตัวรับผลกระทบ (Indirect-radiated emission)

รูปแบบที่ 4 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนส่งผลกระทบต่อตัวรับผลกระทบโดยผ่านทางสายตัวนำกำลัง/สัญญาณ/ควบคุม ที่เชื่อมต่อถึงกันกับตัวรับผลกระทบ (Conducted emission)

รูปแบบที่ 5 สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในสายตัวนำกำลัง/สัญญาณ/ควบคุมที่ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดสัญญาณ เหนี่ยวนำไปยังสายตัวนำกำลัง/สัญญาณ/ควบคุม ที่ต่ออยู่กับตัวรับผลกระทบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสายดังกล่าวอยู่ใกล้ชิดกันมากเท่าไรก็จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตัวรับผลกระทบมากขึ้นเท่านั้น (Semi-conducted emission)

สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนที่มีขนาดเกินกว่าภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic field immunity) ของตัวรับผลกระทบที่สามารถทนได้ ก็จะทำให้ตัวรับผลกระทบนั้นเกิดความเสียหายหรือเกิดความผิดพลาดในการทำงานขึ้น ซึ่งนั่นก็หมายถึงการไม่สามารถเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นคำว่า “ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility) หรือ EMC” ก็จะหมายถึงความสามารถของตัวรับผลกระทบ (อุปกรณ์ เครื่องมือ ระบบ) ที่สามารถทำงานได้โดยปกติในสิ่งแวดล้อมแม่เหล็กไฟฟ้า และในขณะเดียวกันตัวรับผลกระทบดังกล่าวจะต้องไม่ก่อให้เกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มากเกินไปภูมิคุ้มกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถทนได้ของอุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบอื่น ๆ ด้วย

2.2.2 ปรากฏการณ์ EMC

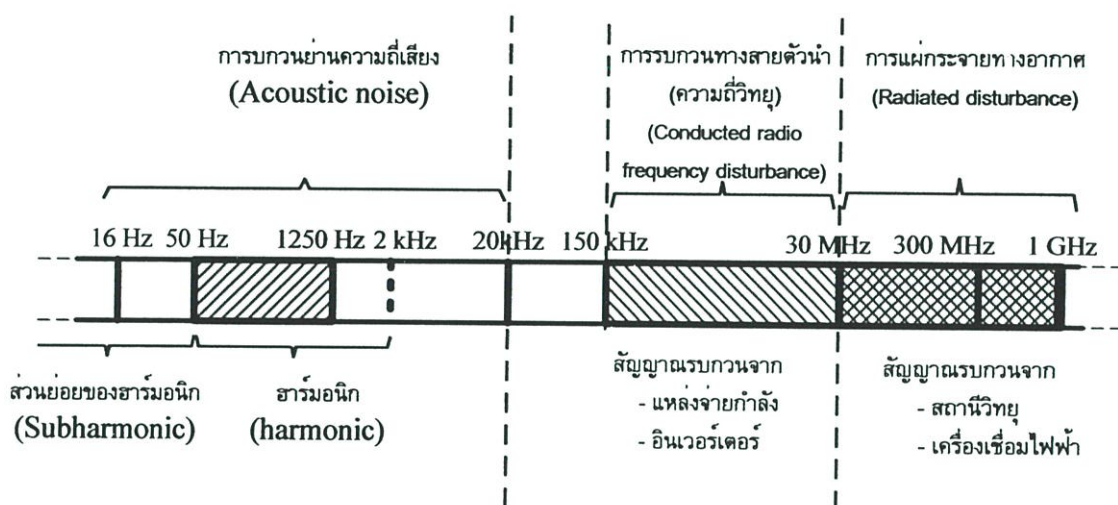
สัญญาณรบกวนที่เชื่อมต่อในรูปที่ 2.1 สามารถจำแนกตามลักษณะสัญญาณได้ดังนี้ คือ

- ก) หากวัดสัญญาณที่มาจากสายตัวนำจะวัดสัญญาณรบกวนในรูปของแรงดัน (V) หรือกระแสไฟฟ้า (A)
- ข) หากวัดสัญญาณที่มาทางอากาศจะวัดสัญญาณรบกวนในรูปสนามไฟฟ้า (V/m) หรือสนามแม่เหล็ก (A/m) หรือความหนาแน่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Plan wave: W/m^2) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างต่อความยาวคลื่น (r/λ)

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic disturbance) อาจจะทำให้การทำงานของอุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบมีความผิดพลาดหรือเกิดความเสียหายได้ ซึ่งเมื่อใดก็ตามที่การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าง่ายกว่าก่อให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานหรือเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบ การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าง่ายกว่าจะเรียกว่าเป็น สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าหรือการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference: EMI) ซึ่งก็หมายถึงสัญญาณที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระบบนั่นเอง

โดยทั่วไปการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้หลายรูปแบบตามย่านความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ในย่าน 0 Hz ถึงประมาณ 2 kHz น่าจะจัดอยู่ในย่านการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำหรือที่นิยมเรียกกันว่า “ฮาร์โมนิก (Harmonics)” ซึ่งจะมีผลทำให้สัญญาณรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากำลังมีความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์และนอกจากนั้นยังเพิ่มความสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังอีกด้วย

สำหรับความถี่ในย่าน 1.25 kHz ถึง 150 kHz ในปัจจุบัน (ค.ศ. 2004) ยังไม่จัดว่าเป็นปัญหาที่จะต้องแก้ไขด้วยวิศวกรทางด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC Engineers) แต่อย่างไรก็ตามมาตรฐานนานาชาติหลายฉบับได้ขยายย่านความถี่ฮาร์โมนิก ให้ครอบคลุมถึงย่านความถี่ดังกล่าวข้างแล้ว



รูปที่ 2.2 ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

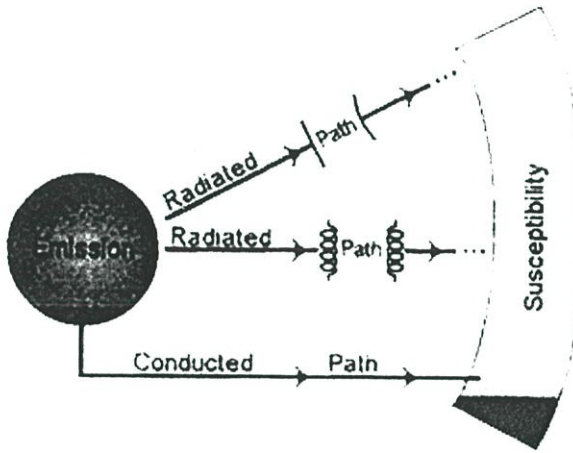
ส่วนย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือบางครั้งจะเรียกแทนว่าการรบกวนความถี่วิทยุ (Radio frequency disturbance) จะจัดอยู่ในการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง โดยเริ่มพิจารณาความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 1 GHz สามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบด้วยกันคือ ที่ความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 30 MHz จะพิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (Conducted EMI) และย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1 GHz จะพิจารณาว่าเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (Radiated EMI) ซึ่งทั้งสองแบบจะมีรูปแบบในการรบกวนและวิธีการในการตรวจจับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าไม่เหมือนกัน อย่างไรก็ตามโดยแท้จริงแล้วคำว่า “การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า” กับ “การรบกวนความถี่วิทยุ” จะไม่สามารถนำมาใช้แทนกันได้เพราะการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเพียงส่วนหนึ่งในย่านความถี่วิทยุเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2

กล่าวในทำนองเดียวกัน สำหรับการแก้ไขปัญหารบกวนอนิกของวงจรหนึ่ง จะนับว่าเป็นการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำที่ความถี่ถึง 2 kHz เท่านั้น ยังไม่ถือว่าเป็นการป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์

อีกกรณีหนึ่ง คือ การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบ ไม่ถือว่าเป็นการป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์เช่นกัน เพราะเป็นการแก้ปัญหาในย่านความถี่ 50 Hz ถึง ประมาณ 2 kHz (ย่านความถี่ฮาร์โมนิก) ซึ่งเป็นรูปแบบของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ต่ำ ซึ่งจะไม่ครอบคลุมถึงการแก้ไขสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่สูง (150 kHz ถึง 30 MHz)

เครื่องมือหรือระบบบางแบบจะเป็นได้ทั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนและตัวรับผลกระทบดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยเส้นทางเดินของสัญญาณรบกวนระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน ไปยังตัวรับผลกระทบสามารถแบ่งออกได้เป็นสองรูปแบบด้วยกันคือ

1. การแผ่กระจาย (Radiation) หรือการเชื่อมต่อโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศหรือวัตถุอื่นๆ
2. การเชื่อมต่อผ่านทางสายตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน



รูปที่ 2.3 หลักการเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

การเชื่อมต่อของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปที่ 2.3 สามารถแทนให้อยู่ในรูปของไฟฟ้า (Electrically) ซึ่งสามารถแทนในรูปของตัวเก็บประจุ (Capacitor) หรืออยู่ในรูปของแม่เหล็ก (Magnetically) ก็สามารแทนในรูปของตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ได้ ยกตัวอย่างเช่น กรณีที่ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเหล่านี้เป็นตัวเชื่อมต่อในการนำสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายตัวนำที่มีสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าให้สามารถส่งผ่านสัญญาณรบกวนดังกล่าวไปยังสายตัวนำอื่น

2.3 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.3.1 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

สาเหตุสำคัญที่ต้องมีการกำหนดขีดจำกัด และมาตรฐานสำหรับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำก็เพราะว่าต้องการจำกัดกระแสสัญญาณรบกวน (Noise current) ที่เกิดจากตัวผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าที่ผ่านออกมาทางสายไฟฟ้า (AC power cord) ผ่านเต้ารับ และจากนั้นจะรวมกันอยู่เป็นกลุ่มที่จุดรวมสายไฟฟ้า (Common power disturbance system) ซึ่งในสถานะดังกล่าวจะเปรียบเสมือนกับเป็นสายอากาศขนาดใหญ่ (Antenna) เป็นผลทำให้กระแสสัญญาณรบกวนดังกล่าวสามารถแผ่กระจายและเกิดการรบกวนต่อระบบโดยรวมได้ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การผ่านการทดสอบตามมาตรฐานดังกล่าว มิได้เป็นการรับประกันว่าสินค้าที่ผ่านการทดสอบนั้นจะไม่ก่อให้เกิดการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า แต่เพียงแต่เป็นการยอมรับหรือจำกัดการสร้างสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของสินค้านั้นให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

2.3.1.1 FCC REGULATIONS

FCC ย่อมาจาก Federal Communication Commission ซึ่งเป็นองค์ประกอบของประเทศสหรัฐอเมริกาที่ทำการออกข้อบังคับสำหรับอุปกรณ์สื่อสาร (Wire and radio commissions) ซึ่งก่อตั้งในปี ค.ศ.1927 และสามารถแบ่งออกได้เป็นสามส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกัน กล่าวคือ Part 15 สำหรับอุปกรณ์ความถี่วิทยุ (Radio-frequency devices) Part 18 สำหรับอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และ อุปกรณ์ทางการแพทย์ (ISM) และ Part 68 สำหรับอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับระบบโทรศัพท์ (Telephone network)

สำหรับ Part 15 จะแบ่งมาตรฐานออกเป็น 4 ฉบับ และยังได้นิยามความหมายของอุปกรณ์ความถี่วิทยุว่าคือ อุปกรณ์ใด ๆ ก็ตามที่การทำงาน ทำให้เกิดการแผ่กระจายพลังงานที่ความถี่วิทยุ (Radio-frequency energy) ไม่ว่าจะเป็นทางสาย (Conduction) หรือทางอากาศ (Radiation) ก็ตาม โดย FCC ได้นิยามพลังงานที่ความถี่วิทยุว่า คือ พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ย่านความถี่วิทยุ (9 kHz - 3,000 GHz) โดยมีจุดประสงค์ในการออกมาตรฐานเพื่อกำหนดการทำงานของตัวส่งสัญญาณ (Transmitters) ที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำซึ่งไม่ได้มีใบอนุญาตในการติดตั้ง (Radio station license) และเพื่อควบคุมสัญญาณรบกวนที่เกิดจากตัวสินค้าที่จะส่งผลกระทบต่อการใช้สื่อสารด้วยความถี่วิทยุ (Radio communications) โดยอุปกรณ์ดิจิทัล (Digital electronics) ก็จัดอยู่ในหมวดดังกล่าว

2.3.1.2 CISPR

CISPR ย่อมาจาก International Special Committee on Radio Interference (ในความจริงแล้วย่อมาจากคำเต็มซึ่งเป็นภาษาฝรั่งเศสคือ Comite International Special des Perturbations Radioelectrique) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อปี ค.ศ.1933 เพื่อหาวิธีการวัดและขีดจำกัดของการรบกวนย่านความถี่วิทยุสำหรับนานาชาติ นอกจากนั้นแล้วตัว CISPR ไม่ได้เป็นกฎข้อบังคับหรือมาตรฐานบังคับใช้แต่อย่างใด แต่มาตรฐานดังกล่าวถูกคัดแปลงโดยรัฐบาลของแต่ละประเทศให้เป็นมาตรฐานบังคับใช้ภายในของแต่ละประเทศ จึงกลายเป็นมาตรฐานสากลไปโดยปริยาย โดยมาตรฐาน CISPR Publication 22 เป็นการออกมาเพื่อควบคุมสัญญาณรบกวนที่เกิดจากกรณีของเทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology Equipment) ซึ่งก็หมายถึงอุปกรณ์ดิจิทัล (Digital electronics) ซึ่งได้เกิดขึ้นในปี ค.ศ.1985 และหลังจากนั้นหลาย ๆ ประเทศทางยุโรป หรืออาจจะกล่าวได้ว่าทั่วโลกได้นำมาตรฐานดังกล่าวออกบังคับใช้เป็นมาตรฐานประจำชาติของตน (National standard) เช่น ประเทศญี่ปุ่น ได้ออกมาตรฐาน VCCI โดยใช้เส้นขีดจำกัดตาม CISPR Publication 22 เว้นเพียงแต่แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนแก่อุปกรณ์ภายใต้การทดสอบ (Equipment Under Test: EUT) จะแตกต่างกัน โดยที่ VCCI จะทดสอบที่แรงดันด้านเข้าของอุปกรณ์ภายใต้การทดสอบเท่ากับ 100 โวลต์ เป็นต้น

2.3.1.3 มาตรฐานทางการทหาร (Military standard)

MIL-STD-461B และ MIL-STD-462 เป็นมาตรฐานที่ออกโดยการทหารของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยที่ MIL-STD-461B กำหนดเส้นขีดจำกัด (Limit) และ MIL-STD-462 จะกำหนดขั้นตอนและวิธีการทดสอบ โดยที่มาตรฐานดังกล่าวจะมีรายละเอียดและเข้มข้นกว่า FCC เพราะมาตรฐานดังกล่าวพิจารณาถึง “ความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Susceptibility) และย่านความถี่ที่พิจารณาซึ่งกว้างกว่าอีกด้วย (30 Hz – 40 GHz)

2.3.1.4 VDE

VDE ย่อมาจาก Verband Deutscher Elektrotechniker ซึ่งเป็นมาตรฐานของประเทศเยอรมัน ซึ่งในประเทศเยอรมันได้กำหนดไว้ว่าอุปกรณ์ที่มีความถี่ในการทำงานสูงกว่า 10 kHz จะไม่สามารถนำมาใช้ได้ถ้าไม่มีใบอนุญาต ทำให้โรงงานในประเทศเยอรมันทั้งหมดต้องมีการทดสอบสินค้าตามมาตรฐานดังกล่าว โดย VDE 0875 ใช้สำหรับอุปกรณ์ที่มีย่านความถี่รบกวนที่กว้าง (Broadband interference) เช่น อุปกรณ์ที่ใช้ภายในบ้าน เป็นต้น ในขณะที่ VDE 0871 ใช้สำหรับย่านความถี่รบกวนที่กว้างและแคบ (Broadband and Narrow band) ซึ่งได้แก่อุปกรณ์สารสนเทศ (Information Technology Equipments) เป็นต้น ซึ่งมาตรฐานของประเทศเยอรมัน

ดังกล่าวจะมีภาพรวมคล้ายกับมาตรฐานของยุโรป EN 55014 และ EN 55022 ตามลำดับยกเว้นเพียงแต่ย่านความถี่ที่พิจารณาจะมีความแตกต่างกัน

2.3.1.5 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)

ในด้านการเกี่ยวข้องกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยเพิ่งได้มีการเริ่มต้นนำมาตรฐานนานาชาติ (IEC) มาปรับใช้เป็นมาตรฐานภายในประเทศอย่างเป็นทางการตั้งแต่วันที่ พ.ศ.2541 โดยได้มีการนำมาปรับปรุงแก้ไข CISPR 15 และ CISPR 22 เป็นมาตรฐานไทยแล้ว ได้แก่ มอก. 1955-2542 (บริษัทส่งสว่างและบริษัทที่คล้ายกัน: ชีดจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ) ซึ่งเป็นมาตรฐานบังคับใช้ และ มอก.1956-2542 (บริษัทเทคโนโลยีสารสนเทศ: ชีดจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ) ซึ่งอยู่ในระหว่างดำเนินการให้มีการบังคับใช้

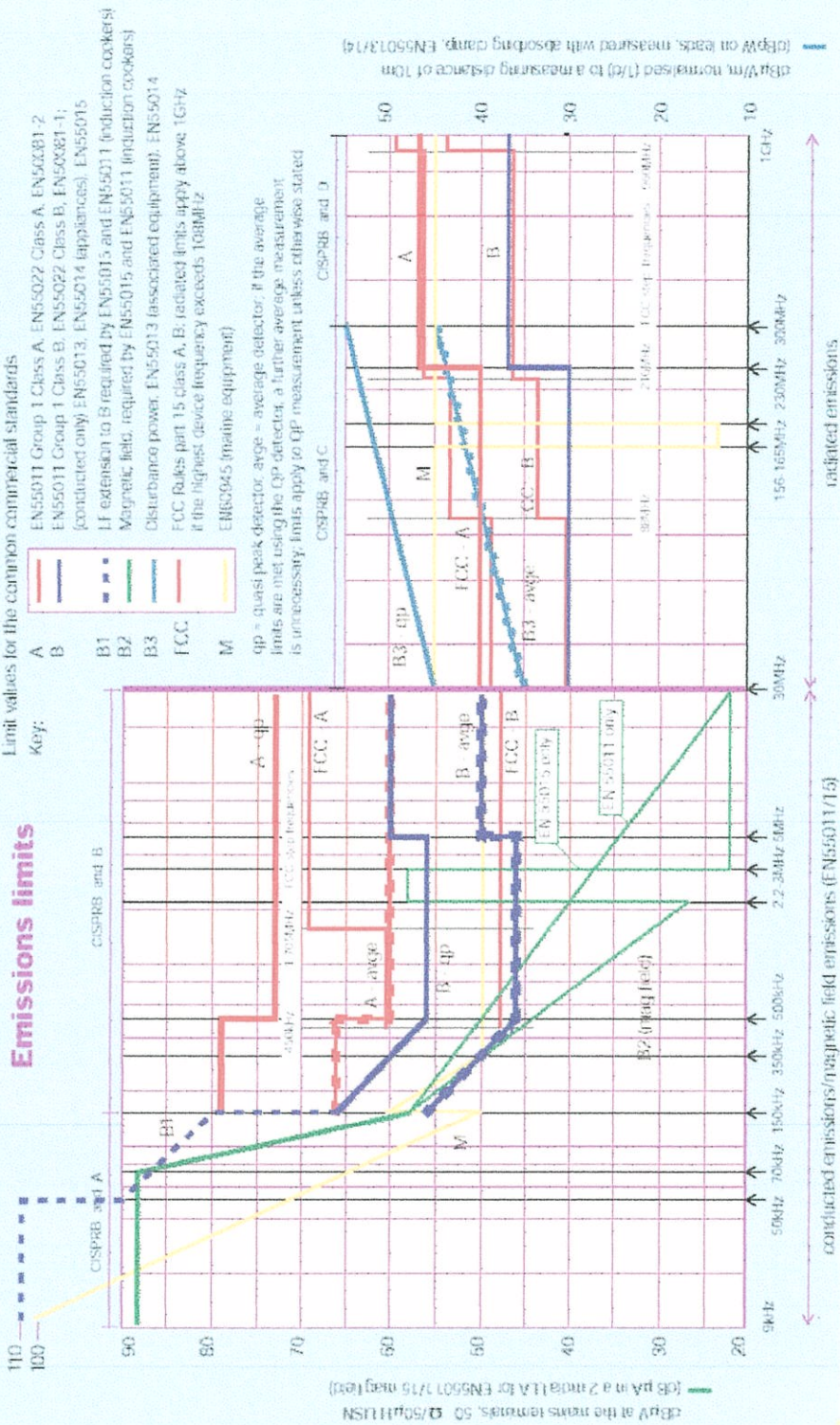
อนึ่ง มาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย มีแนวทางและได้นำมาตรฐานด้าน EMC ของ IEC เช่น เทคนิคการทดสอบ ด้านสิ่งแวดล้อม มาใช้โดยออกเป็นประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม โดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.)

ตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.14 ตารางสรุปมาตรฐานนานาชาติ ภูมิภาคและเส้นขีดจำกัดตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

International Regulations Summary (Emissions)			
CISPR	FCC	EN's	Description
11	Part 18	EN 55011	Industrial, Scientific and Medical
12	(SAE)		Automotives
13	Part 15	EN 55013	Broadcast Receivers
14		EN 55014	Household Appliances/tools
15		EN 55015	Fluorescent lights/luminaries
16			Measurement apparatus/methods
22	Part 15	EN 55022	Information technology equipment
		EN 50081-1, 2	Generic emission standards

Emissions Limits



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างเส้นขีดจำกัด ย่านความถี่ของข้อกำหนดและมาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า [16]

2.4 การทดสอบคุณสมบัติความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ

การทดสอบคุณสมบัติความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศเป็นการทดสอบรูปแบบหนึ่งของการทดสอบทั้งหมดของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility-EMC) ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการผลิตผลิตภัณฑ์หรือสินค้าเพื่อจำหน่ายในท้องตลาด โดยมีวัตถุประสงค์ในการทดสอบเพื่อให้ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน และปลอดภัยต่อผู้ใช้งานหรือผู้บริโภค โดยในการทดสอบมีองค์ประกอบเกี่ยวข้องกันดังต่อไปนี้

2.4.1 สถานีทดสอบคุณสมบัติความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ [17]

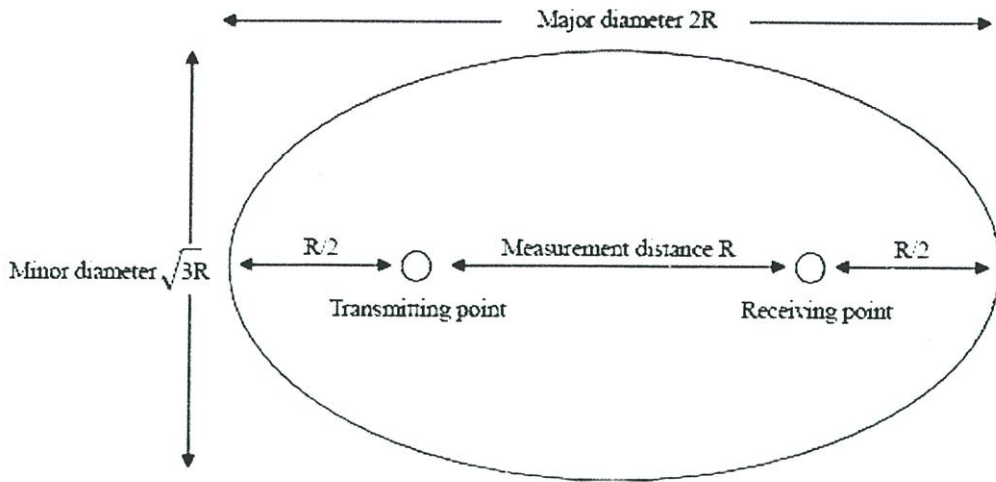
สถานีสำหรับทดสอบคุณสมบัติความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศถือว่าเป็นองค์ประกอบหลักที่ใช้ในการทดสอบ ลักษณะโดยทั่วไปมีดังต่อไปนี้

2.4.1.1 คุณสมบัติของสถานีทดสอบคุณสมบัติความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ

คุณสมบัติขั้นต้นของสถานีทดสอบคุณสมบัติความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศได้มีการระบุไว้ในมาตรฐาน CISPR 16-1-4 [18] และในมาตรฐาน CISPR 22 ซึ่งเป็นสภาวะแวดล้อมที่ขั้นต้นที่จำเป็นต้องมี เพื่อใช้ในการทดสอบซ้ำเพื่อประกันผลการทดสอบต่อผลิตภัณฑ์นั้น ๆ

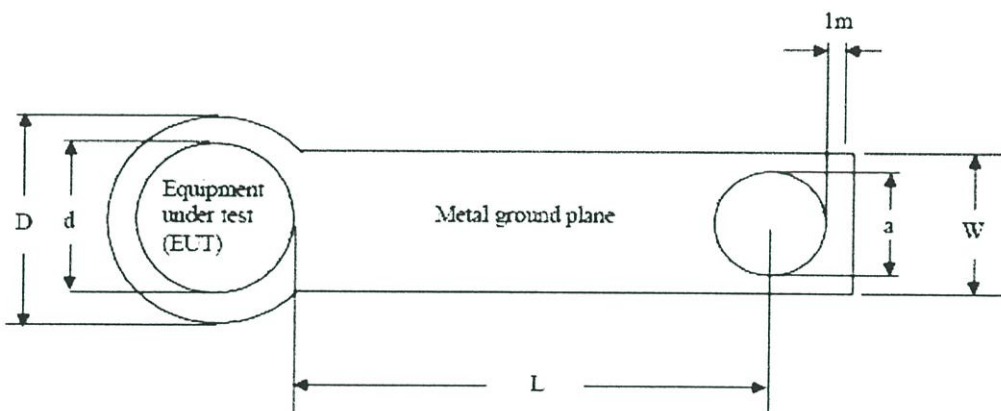
สถานที่ที่ใช้ในการทดสอบต้องปลอดจากคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนรอบข้าง และมีพื้นที่ใหญ่เพียงพอ โดยไม่มีสิ่งใดกีดขวาง และ/หรือสิ่งใดสะท้อนคลื่นในการวัดด้วยสายอากาศ

เนื่องจากขนาดของคลื่นที่แพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบ (อาทิเช่น ขนาดของแหล่งกำเนิด ระยะห่างในการทดสอบ มุมในการวัด ค่าความนำไฟฟ้าและความซึมทราบของแหล่งกำเนิดสัญญาณ ความถี่ และอื่น) ดังนั้นขนาดที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่โล่งว่างจะมีลักษณะเป็นวงรี โดยที่มีแกนตั้งมีระยะห่าง R แกนนอนมีระยะห่าง $2R$ และระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณกับสายอากาศมีระยะห่าง R ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระยะพื้นที่ว่างในการทดสอบ

พื้นที่ของสถานีทดสอบสำหรับการทดสอบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต้องเป็นแผ่นกราวนด์ที่เป็นวัสดุโลหะที่มีค่าความเป็นตัวนำสูง และต้องผ่านการตรวจค่าสถานีทดสอบที่เรียกว่า “Normalized Site Attenuation” หากสถานีไม่ใช่วัสดุโลหะในการทำพื้นกราวนด์ ควรระวังการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการสะท้อนที่เกิดขึ้นจากเวลา อุณหภูมิหรือรอยต่อของวัสดุ เช่น ข้อต่อ ท่อ เป็นต้น โดยขนาดของพื้นกราวนด์มีขนาดแสดงดังรูปที่ 2.6



$D \cong d + 2m$ (d is the maximum dimension of the EUT.)

$W \cong a + 2m$ (a is the maximum dimension of the antenna.)

$L = 3m, 10m, 30m$

รูปที่ 2.6 ระยะในการทดสอบ

2.4.1.2 การตรวจค่าสถานีทดสอบ “Normalized Site Attenuation-NSA”

สถานีทดสอบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอุดมคติ จะมีเพียงคลื่นสัญญาณที่แพร่จากแหล่งกำเนิดโดยตรงและคลื่นสัญญาณที่สะท้อนจากพื้นกราวด์โลหะที่ถูกวัดด้วยสายอากาศ หากคุณสมบัติการสะท้อนของพื้นกราวด์เสื่อมลง หรือมีอาคารและสายไฟฟ้าง่าลังใกล้เคียงสะท้อนคลื่นสัญญาณรอบข้างแล้ว สถานีนั้นจะไม่สามารถวัดคลื่นสัญญาณที่แท้จริงได้ ดังนั้นสถานีที่ใช้สำหรับทดสอบจำเป็นต้องมีการตรวจค่าสถานีและนำค่าเหล่านั้นไปเปรียบเทียบกับค่าของสถานีในอุดมคติ

มี 3 วิธีในการตรวจสอบสถานีที่ใช้วัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1,000 MHz วิธีแรกโดยการวางสายอากาศตัวส่งสัญญาณ (Transmitting antenna) ที่กำหนดความสูงแทนที่ในตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยหันหน้าเข้าหาสายอากาศตัวรับสัญญาณ (Receiving antenna) ซึ่งจะทำการเลื่อนความสูงที่ระยะ 1 ถึง 4 เมตร สำหรับการวัดที่ระยะห่าง 3 เมตร หรือ 10 เมตร แต่หารระยะที่ใช้ในการวัดมีระยะห่าง 30 เมตร สายอากาศตัวรับจะทำการเลื่อนที่ความสูง 2 ถึง 6 เมตรแทน โดยคุณสมบัติลดทอนสถานี (Site attenuation characteristic) จะคำนวณจากค่าแรงดันสูงสุดที่รับสัญญาณได้ วิธีที่สองเป็นการหาคุณสมบัติแบบความสูงด้วยการพล็อตการเปลี่ยนค่าลดทอนที่รับได้ในขณะที่ความสูงของสายอากาศตัวรับสัญญาณเปลี่ยนแปลง วิธีที่สามเป็นการวัดจากคุณสมบัติลดทอนตามระยะห่างของสายอากาศทั้งสอง

2.4.1.2.1 ชนิดของ Site attenuation และ NSA

ค่า Site attenuation สามารถหาได้จากการใช้ทฤษฎีคำนวณหรือจากการวัดดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท โดยที่ค่าแรงดันสูงสุดที่รับสัญญาณได้จากเครื่องรับสัญญาณ เมื่อสายอากาศตัวรับเคลื่อนที่ขึ้นลงในระยะที่กำหนด (เช่น ที่ความสูงจาก 1 เมตรถึง 4 เมตร) ในการหาค่า NSA สามารถใช้สมการดังต่อไปนี้

ก) Site Attenuation (SA)

$$SA = \frac{\text{ค่าที่อ่านได้จากการต่อสายสัญญาณ โดยตรง}}{\text{ค่าแรงดันสูงสุดที่รับสัญญาณ ได้}} \quad (2.1)$$

ข) Classical Site Attenuation (CSA)

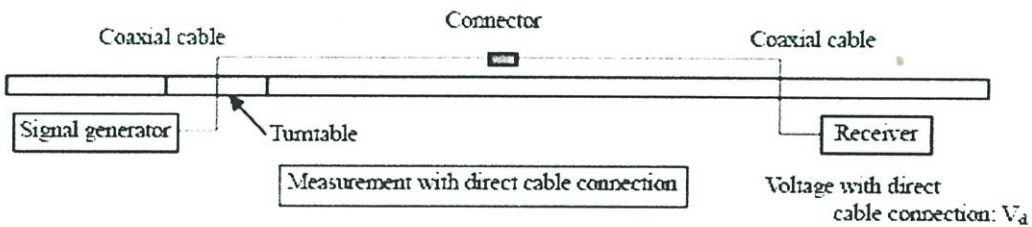
$$CSA = \frac{\text{ค่าที่อ่านได้จากการต่อสายสัญญาณ โดยตรง}}{\text{ค่าแรงดันสูงสุดที่รับสัญญาณ ได้ * ค่าสูญเสียสายอากาศ Balun ตัวส่งและรับ}} \quad (2.2)$$

หรือ

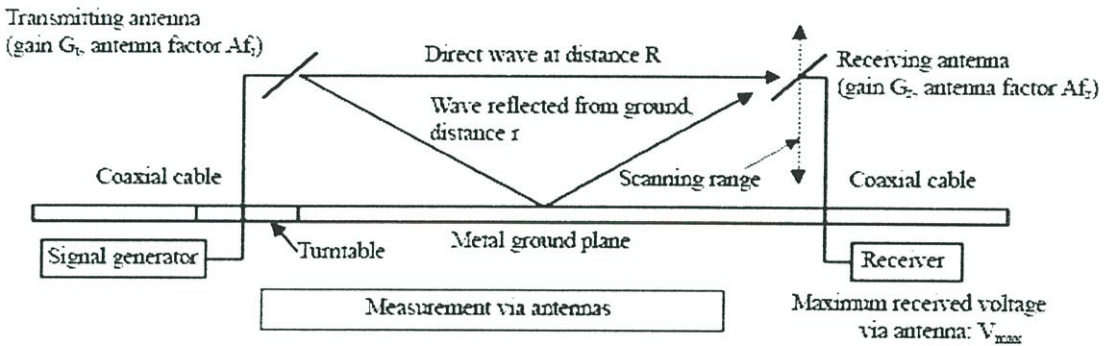
$$CSA = \frac{SA}{\text{ค่าสูญเสียสายอากาศ Balun ตัวส่งและรับ}} \quad (2.3)$$

ค) Normalized Site Attenuation (NSA)

$$NSA = \frac{SA}{\text{ค่าแก้ของสายอากาศของตัวส่งและรับ}} \quad (2.4)$$



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.7 การวัด NSA (ก) และ(ข)

จากการวัดดังแสดงในรูปที่ 2.7 ถ้ากำหนดให้ค่าแรงดันที่อ่านได้จากการวัดโดยตรงผ่านสายเคเบิล ดังรูปที่ 2.7 (ก) เป็น V_d ส่วนค่าแรงดันสูงสุดที่อ่านได้ผ่านสายอากาศทั้งสองด้าน กำหนดให้เป็น V_{max} และค่าแก้ของสายอากาศ (Antenna factor) ตัวส่งและตัวรับกำหนดให้เป็น Af_t และ Af_r ตามลำดับ ดังนั้นค่า Site attenuation (SA) มีค่าดังแสดงสมการที่ 2.1 โดยไม่นับรวมสัญญาณรบกวนระหว่างสายอากาศทั้งสองด้าน หรือสัญญาณรบกวนจากพื้นกราวนด์

$$SA = \frac{V_d}{V_{\max}} \quad (2.5)$$

ในกรณีที่ใช้สายอากาศชนิด Balun ที่ความถี่ใดความถี่หนึ่ง โดยกำหนดให้ค่าแก๊งของสายอากาศตัวส่งและตัวรับเป็น bl_t และ bl_r ดังนั้นค่า Classical Site Attenuation (CSA) มีค่าดังสมการที่ 2.2

$$CSA = \frac{SA}{bl_t \times bl_r} \quad (2.6)$$

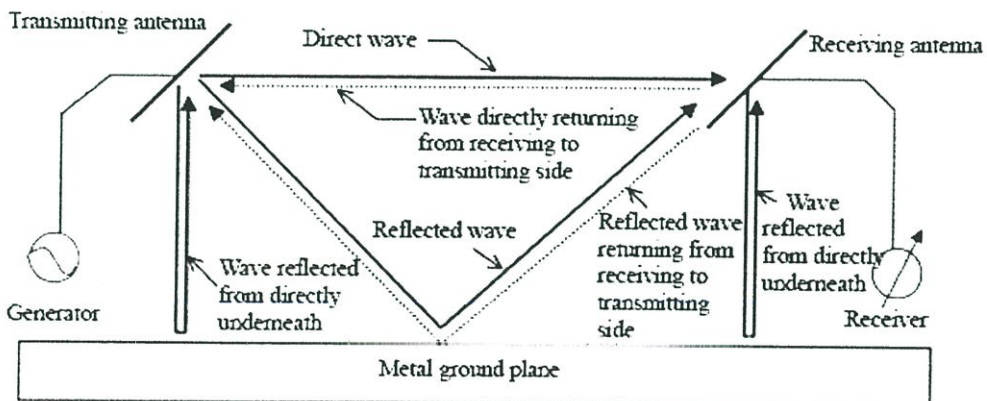
หากใช้สายอากาศชนิด Broadband โดยกำหนดให้ค่าแก๊งของสายอากาศตัวส่งและตัวรับเป็น Af_t และ Af_r ตามลำดับ ดังนั้น ค่า Normalized Site Attenuation (NSA) มีค่าดังสมการที่ 2.3

$$NSA = \frac{SA}{Af_t \times Af_r} \quad (2.7)$$

ซึ่งในการตรวจค่าสถานีในการทดสอบจะทำการหาค่า Normalized Site Attenuation หรือค่า NSA และนำไปเปรียบเทียบกับค่า NSA มาตรฐานต่อไป

2.4.1.2.2 ค่าเบี่ยงเบนสถานีทดสอบ ΔNSA

ค่า NSA ที่ได้จากสมการที่ 2.3 ในกรณีนี้ไม่นับรวมผลกระทบจากสัญญาณรบกวนจากสายอากาศตัวส่งและตัวรับ หรือสัญญาณรบกวนจากพื้นกราวนด์ แต่ในความเป็นจริงในการวัดจะมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่เกิดจากสายอากาศตัวส่งและตัวรับ และสัญญาณรบกวนที่เกิดจากสายอากาศตกกระทบกับพื้นกราวนด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.8 การวัด NSA

เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากทางทฤษฎีกับค่าที่วัดได้จริง ทำให้เกิดค่าเบี่ยงเบนขึ้น โดยค่าเบี่ยงเบนจะเป็นผลรวมของค่าผกผันทั้งหมดที่เกิดจากการวัดของสายอากาศ และสถานีวัด ดังนั้น จึงอยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$NSA' = \frac{SA'}{Af_t' \times Af_r' \times \Delta NSA} \quad (2.8)$$

เมื่อจัดให้อยู่ในรูปของลอกการิทึม เป็น

$$NSA'(dB) = 20 \log_{10} SA' - 20 \log_{10} Af_t' - 20 \log_{10} Af_r' - 20 \log_{10} \Delta NSA \quad (2.9)$$

ค่าของ NSA มาตรฐานที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับกรวัดเพื่อหาค่า ΔNSA จะมีการกำหนดแกนในการวัดของสายอากาศ ระยะห่างของสายอากาศในการวัด รวมทั้งความสูงของสายอากาศทั้งสองต้น ค่าดังกล่าวแสดงในตารางที่ 2.2

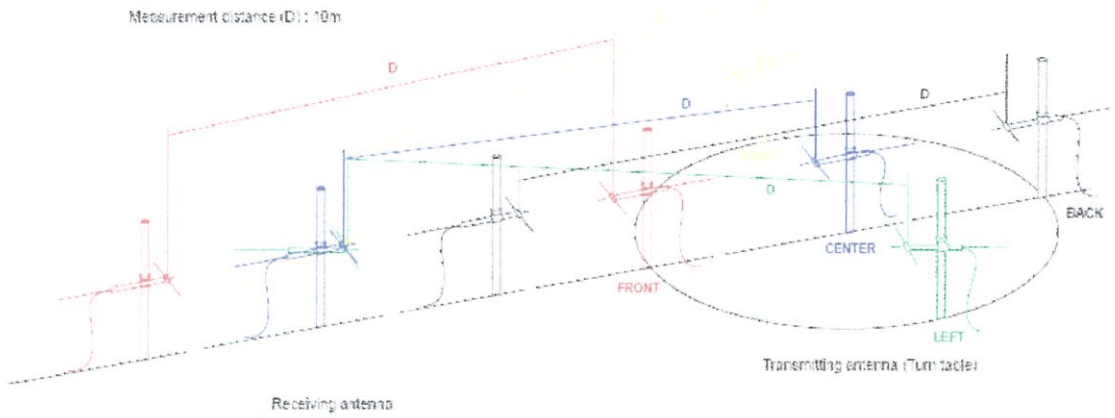
ตารางที่ 2.2 ค่า NSA มาตรฐาน

Polarization	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical
R meters	3	10	30	3	3	10	10	10	30	30	30
h_1 meters	1	1	1	1	1.5	1	1.5	1	1	1.5	1.5
h_2 meters	1-4	1-4	1-4	1-4	1-4	1-4	1-4	1-4	1-4	1-4	1-4
f_M	ΔN (dB)										
30	15.8	29.8	47.7	8.2	9.3	15.7	16.8	15.7	26.0	26.0	26.0
35	13.4	27.1	45.0	6.9	8.0	15.4	15.5	15.4	24.7	24.7	24.7
40	11.3	24.9	42.7	5.8	7.0	14.2	14.4	14.2	23.5	23.5	23.5
45	9.4	22.9	40.7	4.9	6.1	13.2	13.4	13.2	22.5	22.5	22.5
50	7.8	21.1	38.8	4.0	5.4	12.3	12.5	12.3	21.6	21.6	21.6
60	5.0	18.0	35.7	2.6	4.1	10.7	10.9	10.7	20.0	20.0	20.0
70	2.8	15.5	33.0	1.5	3.2	9.4	9.6	9.4	18.7	18.7	18.7
80	0.9	13.3	30.7	0.6	2.6	8.3	8.5	8.3	17.5	17.5	17.5
90	-0.7	11.4	28.7	-0.1	2.1	7.3	7.6	7.3	16.5	16.5	16.5
100	-2.0	9.7	26.9	-0.7	1.9	6.4	6.8	6.4	15.6	15.6	15.6
120	-4.2	7.0	23.8	-1.5	1.3	4.9	5.4	4.9	14.0	14.0	14.0
125	-4.7	6.4	23.1	-1.6	0.5	4.6	5.1	4.6	13.6	13.6	13.7
140	-6.0	4.8	21.1	-1.8	-1.5	3.7	4.3	3.7	12.7	12.7	12.7
150	-6.7	3.9	20.0	-1.8	-2.6	3.1	3.8	3.1	12.1	12.1	12.1
160	-7.4	3.1	18.9	-1.7	-3.7	2.6	3.4	2.6	11.5	11.5	11.6

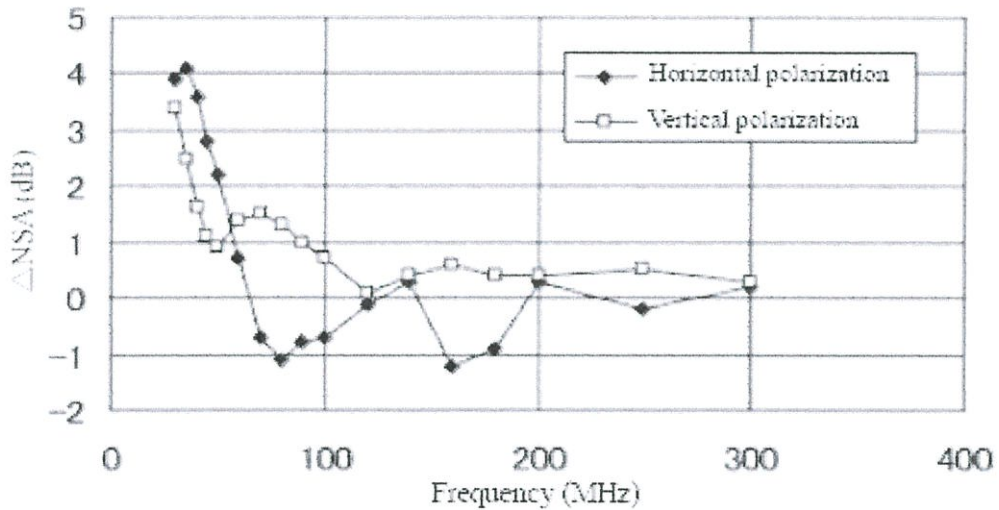
ตารางที่ 2.2 ค่า NSA มาตรฐาน (ต่อ)

Polarization	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical
R meters	3	10	30	3	3	10	10	10	30	30	30
h_1 meters	1	1	1	1	1.5	1	1.5	1	1	1.5	1.5
h_2 meters	1-4	1-4	1-4	1-4	1-4	1-4	1-4	1-4	1-4	1-4	1-4
f_M	ΔN (dB)										
175	-8.3	2.0	17.4	-1.4	-4.9	2.6	3.1	10.8	10.8	10.8	10.8
180	-8.6	1.7	16.9	-1.3	-5.3	1.8	2.7	10.5	10.5	10.6	10.6
200	-9.6	0.5	15.2	-3.6	-6.7	1.0	2.1	9.6	9.6	9.7	9.7
250	-11.7	-1.6	11.6	-7.7	-9.1	-0.5	0.3	7.7	7.7	7.9	7.9
300	-12.8	-3.3	8.7	-10.5	-10.9	-1.5	-1.9	6.2	6.2	6.4	6.4
400	-14.8	-5.9	4.5	-14.0	-12.6	-4.1	-5.0	3.9	3.9	4.3	4.3
500	-17.3	-7.9	1.8	-15.4	-15.1	-6.7	-7.2	2.1	2.1	2.8	2.8
600	-19.1	-9.5	0.0	-16.3	-16.9	-8.7	-8.9	0.8	0.8	1.8	1.8
700	-20.0	-10.8	-1.3	-18.4	-18.4	-10.2	-10.3	-0.3	-0.3	-0.8	-0.8
800	-21.3	-12.0	-2.5	-20.0	-19.3	-11.5	-11.6	-1.1	-1.1	-2.2	-2.2
900	-22.5	-12.8	-3.5	-21.3	-20.4	-12.6	-12.6	-1.7	-1.7	-3.3	-3.3
1000	-23.5	-13.8	-4.5	-22.4	-21.4	-13.6	-13.6	-3.6	-3.6	-4.3	-4.3

ภายหลังจากได้ค่าตรวจสถานีเรียบร้อยแล้ว จะนำค่าดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับค่าสถานีมาตรฐาน หรือหาค่า ΔNSA โดยค่าที่ได้ต้องมีค่าไม่เกิน ± 4 dB จึงจะผ่านการตรวจสอบค่าสถานีทดสอบและใช้สถานีนั้นในการทดสอบได้



รูปที่ 2.9 ตำแหน่งในการวัดค่า NSA [19]



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของค่าเบี่ยงเบน ΔNSA ที่ระยะการวัดห่าง 3 เมตร [20]

2.4.1.3 ประเภทของสถานีทดสอบคุณสมบัติความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ

สถานีที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศโดยทั่วไป มี 2 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่

2.4.1.3.1 สถานีทดสอบชนิดเปิดโล่ง (Open Area Test Site-OATS) เป็นสถานีประเภทหนึ่งที่ใช้ทดสอบในพื้นที่โล่งกว้าง โดยมีพื้นเป็นแผ่นกรวด ในการทดสอบจำเป็นต้องใช้สถานที่ที่มีการรบกวนของสัญญาณรอบข้างต่ำ เพื่อให้ได้สัญญาณที่มาจากแหล่งสัญญาณ โดยไม่มีการรบกวนของสัญญาณรอบข้าง



(ก)

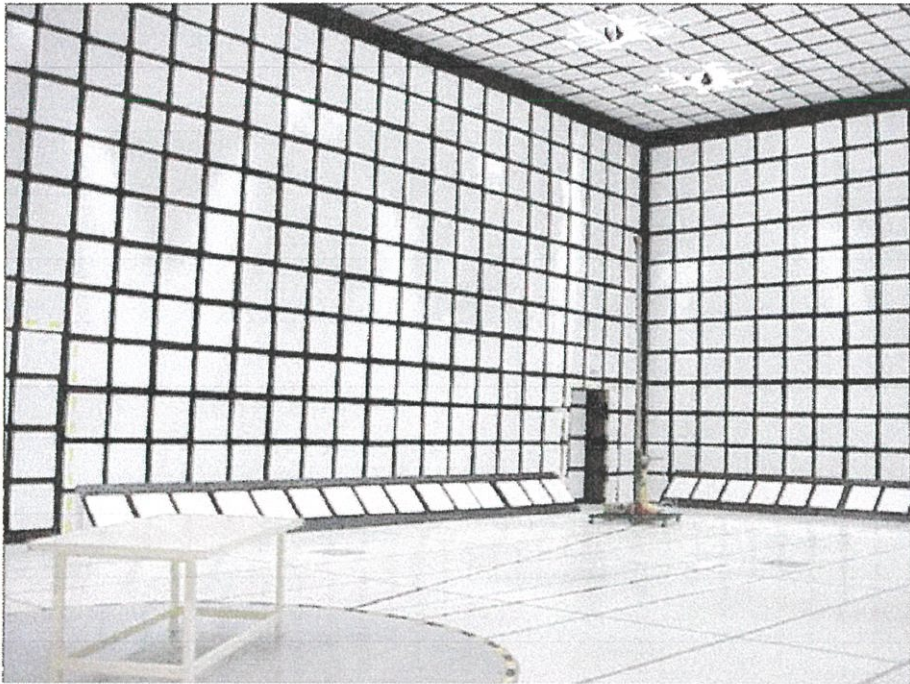


(ข)

รูปที่ 2.11 แสดงสถานีทดสอบชนิดเปิดโล่ง (ก) และการติดตั้งการทดสอบ (ข)

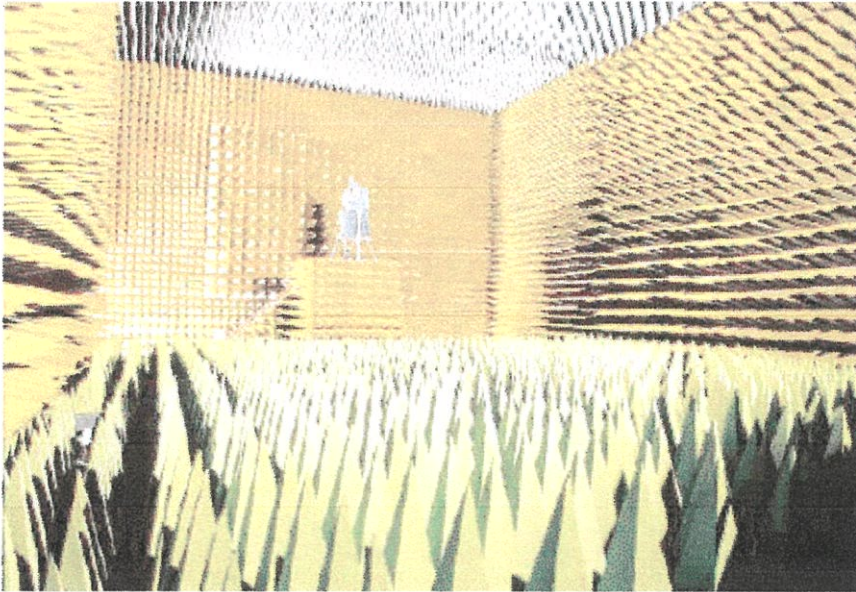
2.4.1.3.2 ห้องปิดกั้นกึ่งการสะท้อน (Semi-Anechoic Chamber) เนื่องจากในปัจจุบันการทดสอบแบบสถานีทดสอบชนิดเปิดโล่งมีการรบกวนจากสัญญาณรอบข้างเพิ่มมากขึ้น อาทิเช่น จากเครื่องบิน จากถนนหนทางที่ตัดเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีการสร้างห้องทดสอบเพื่อลดปัญหาจากสัญญาณรบกวนรอบข้างที่เรียกว่าห้องปิดกั้นกึ่งการสะท้อน

ห้องปิดกั้นกึ่งการสะท้อนจะมีพื้นเป็นแผ่นกรวดเช่นเดียวกับสถานีทดสอบชนิดเปิดโล่ง แต่ผนังล้อมรอบจะถูกซึบซับด้านและติดตั้งอุปกรณ์ดูดคลื่นสัญญาณหรือที่เรียกกันว่า Absorber ไว้รอบเพื่อดูดซับสัญญาณที่แพร่กระจายออกมาจากแหล่งสัญญาณและไม่มีการสะท้อนของสัญญาณกลับ หรือมีให้น้อยที่สุด โดยต้องเป็นไปตามเกณฑ์ที่มาตรฐานระบุไว้



รูปที่ 2.12 ห้องปิดกั้นกึ่งการสะท้อน (Semi-Anechoic Chamber)

2.4.1.3.3 ห้องปิดกั้นการสะท้อน (Fully-Anechoic Chamber) เป็นสถานีที่มีลักษณะเช่นเดียวกับชนิดห้องปิดกั้นกึ่งการสะท้อน (Semi-Anechoic Chamber) แต่มีการเพิ่มอุปกรณ์ดูดคลื่นสัญญาณ (Absorber) ไว้ที่พื้นเพื่อป้องกันการสะท้อนจากพื้น สถานีประเภทนี้ใช้ในการทดสอบผลิตภัณฑ์ที่มีการสร้างสัญญาณที่ความถี่สูง อาทิเช่น เตาอบไมโครเวฟ เป็นต้น



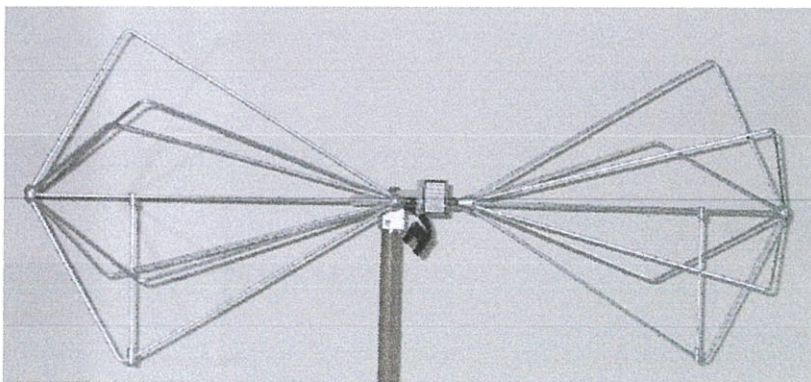
รูปที่ 2.13 ห้องปิดกั้นการสะท้อน (Fully-Anechoic Chamber)

2.4.2 สายอากาศ (Antenna) [21]

สายอากาศที่ใช้ในการทดสอบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงาน EMC นั้น จะครอบคลุมงานย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1,000 MHz ขึ้นอยู่กับลักษณะของสายอากาศ และงานทดสอบนั้น ๆ

2.4.2.1 สายอากาศชนิด Biconical (Biconical antenna)

เป็นสายอากาศที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.14 มีลักษณะแตกต่างบ้างขึ้นอยู่กับผู้ผลิต แต่โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นรูปกรวย โดยมีแกนใช้สำหรับยึดกรวยทั้งสองข้าง ใช้ในการทดสอบในย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 300 MHz



รูปที่ 2.14 สายอากาศชนิด Biconical

2.4.2.2 สายอากาศชนิด Log-periodic (Log-periodic antenna)

สายอากาศชนิด Log-periodic จะใช้สำหรับวัดงานทดสอบในย่านความถี่ตั้งแต่ 300 MHz ถึง 1,000 MHz ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก) และ 2.15 (ข)



(ก)



(ข)

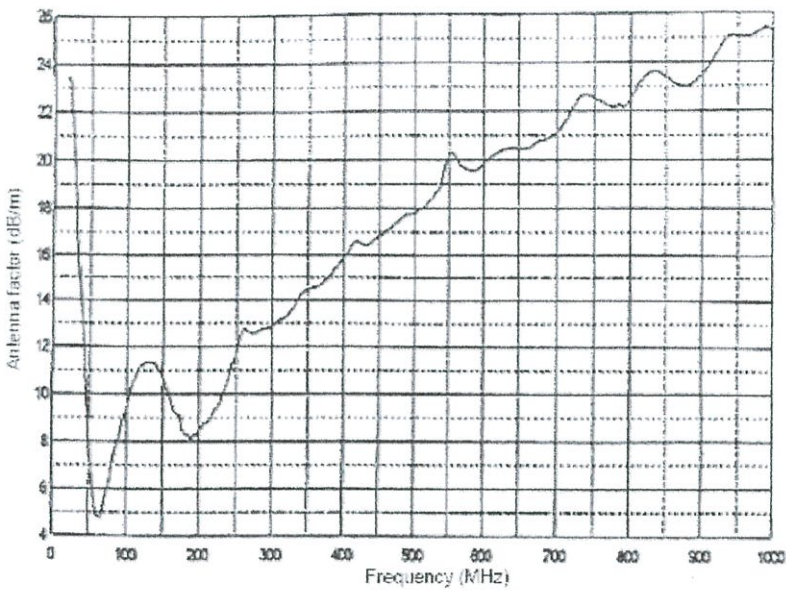
รูปที่ 2.15 สายอากาศชนิด Log-periodic ทั้งสองแบบ (ก) และ (ข)

2.4.2.3 สายอากาศชนิด Bilog (Bilog antenna)

เป็นสายอากาศที่นิยมใช้ในงานวัดด้าน EMC เนื่องจากเป็นสายอากาศที่รวมคุณสมบัติของสายอากาศสองชนิด ได้แก่ สายอากาศชนิด Biconical และสายอากาศชนิด Log-periodic ซึ่งใช้ใน งานทดสอบย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1,000 MHz หรือมากกว่าขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสายอากาศนั้น ๆ



รูปที่ 2.16 สายอากาศชนิด Bilog



Antenna factor: Antenna model: Chase CD46111

รูปที่ 2.17 ตัวอย่างค่าแก้ไขของสายอากาศชนิด Bilog (Bilog correction factor)

2.4.3 เครื่องมือวัดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ [20, 22]

ในการวัดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ จำเป็นต้องมีการตรวจจับความแรงของสัญญาณตามย่านความถี่ที่มาตรฐานกำหนด

สำหรับในการวัดสัญญาณรบกวนในย่านความถี่วิทยุ ได้แบ่งย่านความถี่ออกเป็น 4 แถบความถี่คือ คือแถบ (Band) A และ B (9 kHz – 30 MHz) เป็นการวัดสัญญาณรบกวนทาง

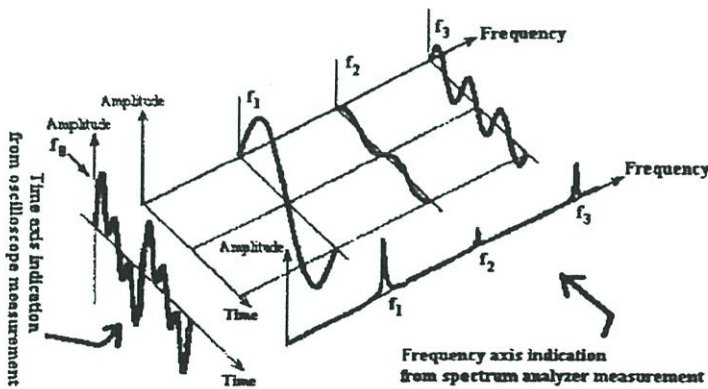
แม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ แถบ C และ D (30 MHz – 1000 MHz) เป็นการวัดสัญญาณรบกวนที่แพร่ทางอากาศ โดยได้แสดงในตารางที่ 2.1 และมีการแบ่งลักษณะของการตรวจจับดังนี้คือ การตรวจจับยอดคลื่น (peak) การตรวจจับยอดคลื่นเสมือน (quasi-peak) การตรวจจับยอดคลื่นเฉลี่ย (average) โดยรายละเอียดจะอยู่ในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 2.3 การวัดของเครื่องวัดตามมาตรฐาน CISPR

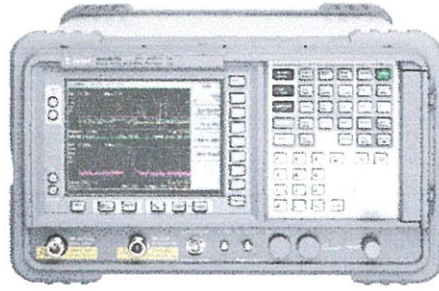
	แถบ A	แถบ B	แถบ C	แถบ D
ย่านความถี่ในการวัด	9 kHz – 150 kHz	150 kHz – 30 MHz	30 MHz – 300 MHz	300 MHz – 1000 MHz

2.4.3.1 Spectrum Analyzer

เป็นเครื่องมือที่พัฒนามาจาก Oscilloscope ซึ่งแสดงค่าระดับของแรงดันในแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเปลี่ยนจากเวลาเป็นความถี่โดยแปลงจากสมการ ($T = 1/F$) โดยค่าสัญญาณที่ตรวจจับได้จะนำไปบันทึกและทำการเปรียบเทียบกับค่าลิมิตของมาตรฐานเพื่อตัดสินผลการทดสอบนั้น ๆ



รูปที่ 2.18 แกนในการแสดงรูปสัญญาณของ Spectrum analyzer [20]



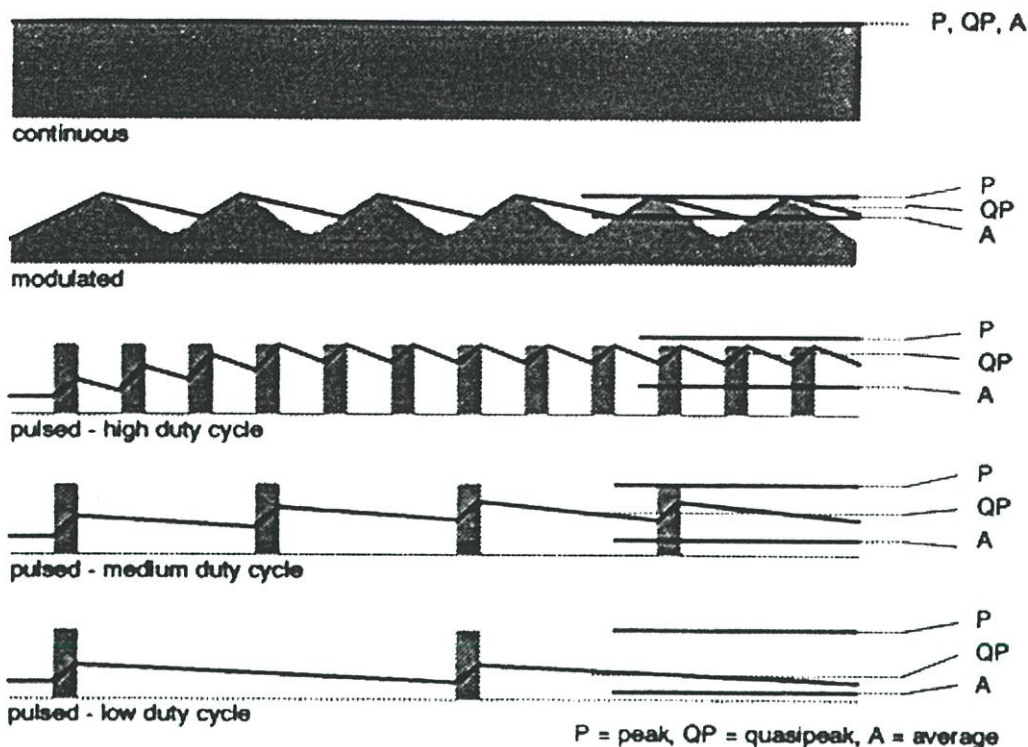
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.19 ตัวอย่าง Spectrum Analyzer แบบต่าง ๆ (ก) และ (ข)

โดยที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมต้องมีความสามารถในการวัดในย่านความถี่ตามตารางที่ 2.3 และมีความสามารถในการตรวจจับลักษณะของสัญญาณที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น และในการวัดสัญญาณรบกวนด้วยเครื่องวัด Spectrum Analyzer จะมีการตรวจจับสัญญาณเพื่อทำการวัด (Detector Function) ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปจะมีอยู่สามรูปแบบได้แก่ Peak (P), Quasi Peak (QP) และ Average (A) ซึ่งมีแต่ละแบบก็จะตรวจจับสัญญาณในรูปแบบที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2.20 โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดโดยสรุปเท่านั้นส่วนรายละเอียดที่ครอบคลุมกว่านี้จะสามารถศึกษาจาก [20] และสรุปได้ดังนี้



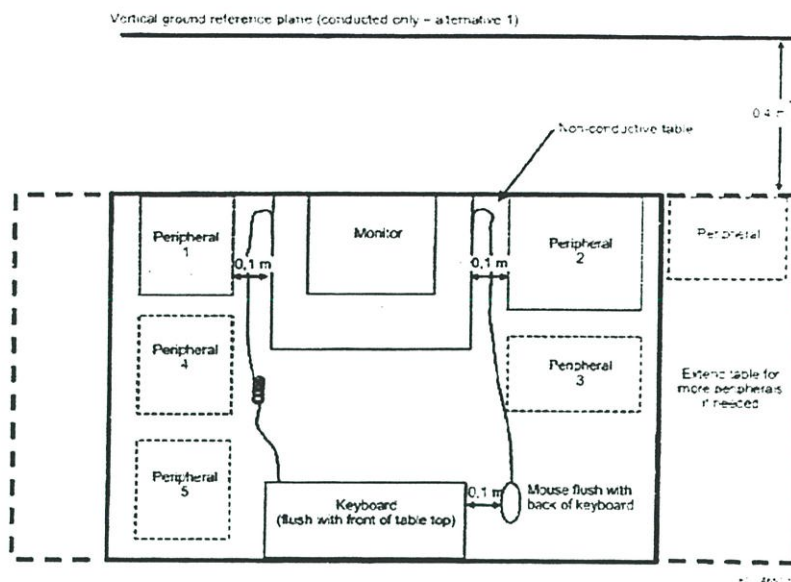
รูปที่ 2.20 การตรวจจับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องวัด Spectrum Analyzer

การตรวจจับสัญญาณแบบ Peak หรือแบบ P ในรูปที่ 2.13 เป็นการตรวจจับค่าสูงสุดของสัญญาณ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.20 ว่าทุกกรณีที่ใช้การตรวจจับแบบ P จะตรวจจับค่าที่มากกว่าหรือสูงกว่าแบบ QP และ แบบ A เสมอ ยกเว้นกรณีที่สัญญาณที่ตรวจจับเป็นลักษณะของสัญญาณที่มีค่าคงที่ และเมื่อตรวจจับแล้วเครื่องวัดก็จะปล่อยสัญญาณนั้นอย่างรวดเร็วเพื่อตรวจจับใหม่ ทำให้การวัดแบบนี้จะมีความรวดเร็วในการวัดมากกว่าแบบ QP และแบบ A ในขณะที่แบบ A จะเป็นการวัดค่าเฉลี่ยของสัญญาณ ส่วนแบบ QP จะตรวจจับสัญญาณโดยมีการเฉลี่ยสัญญาณช่วงเวลาที่สัญญาณมีการ charge และ discharge หรือนำช่วงเวลาสัญญาณเพิ่มขึ้นและลดลงมาพิจารณาด้วย ทำให้การวัดแบบ A และ QP จะใช้เวลามากกว่าแบบ P และจากรูปที่ 2.20 จะเห็นได้ว่า ยิ่งสัญญาณมี duty cycle มาก การวัดแบบ A และ QP ก็จะสูงขึ้นและใกล้เคียงกับค่าสูงสุดมากขึ้นแต่ในทางตรงกันข้ามถ้าสัญญาณมีค่าเฉลี่ยต่ำ (duty cycle) ต่ำ การวัดแบบ A และ Q จะมามีค่าต่ำกว่า P อย่างชัดเจน

2.4.4 การจัดวางอุปกรณ์ (ตามมาตรฐาน CISPR 22:2005 ข้อ 10)

ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศนั้น จำเป็นต้องมีการจัดวางอุปกรณ์ให้เป็นไปตามมาตรฐานการวัด ซึ่งในที่นี้จะอ้างอิงตามมาตรฐาน CISPR 22:2005 ข้อ 10 ที่ว่าด้วยการจัดวางอุปกรณ์

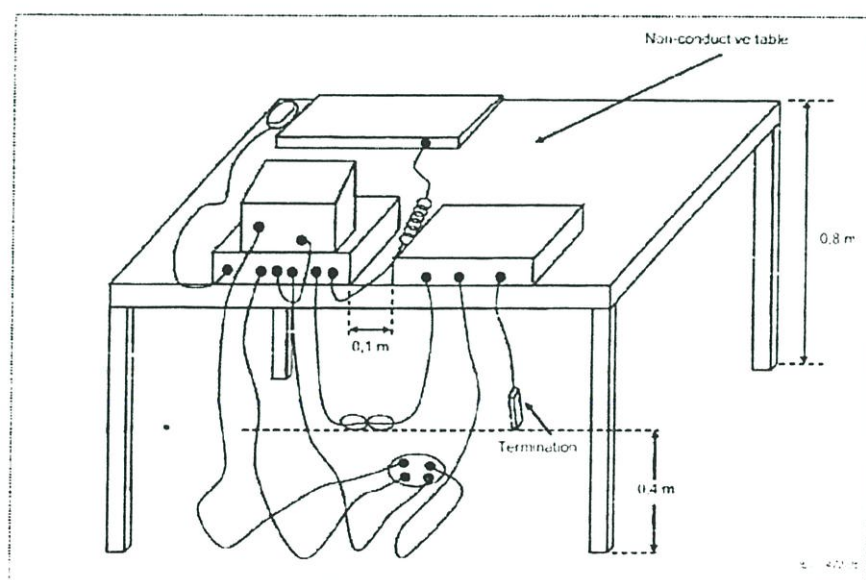
ในการจัดโครงแบบของ EUT ให้จัดตามรูปที่ 2.21 และรูปที่ 2.22 สำหรับบริษัทที่วางบนโต๊ะ โดยต้องวาง EUT แบบวางบนโต๊ะให้อยู่เหนือระนาบพื้นโลหะแนวระดับของสถานีทดสอบความแรงสนาม 0.8 เมตร สายเคเบิลทุกสายที่ออกจาก EUT แบบวางบนโต๊ะเพื่อการต่อภายนอกสถานีทดสอบ (เช่น สายเคเบิลแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าประธาน สายโทรศัพท์ อุปกรณ์ต่อที่ต่อไปยังบริษัทช่วยที่ตั้งอยู่นอกสถานีทดสอบ)



NOTES:

1. For conducted emission measurements, mains power is provided via an AMN.
2. Cables have been removed for clarity (except where shown).

รูปที่ 2.21 โครงแบบทดสอบอุปกรณ์วางบนโต๊ะ (การวัดสัญญาณรบกวนผ่านอากาศ)



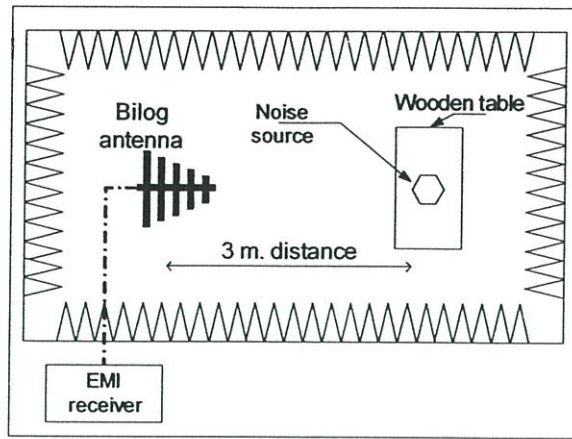
รูปที่ 2.22 โครงแบบทดสอบอุปกรณ์วางบนโต๊ะ (การวัดสัญญาณรบกวนผ่านอากาศ)

เมื่อ	Peripheral	คือ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง
	EUT	คือ อุปกรณ์ที่ทำการทดสอบ

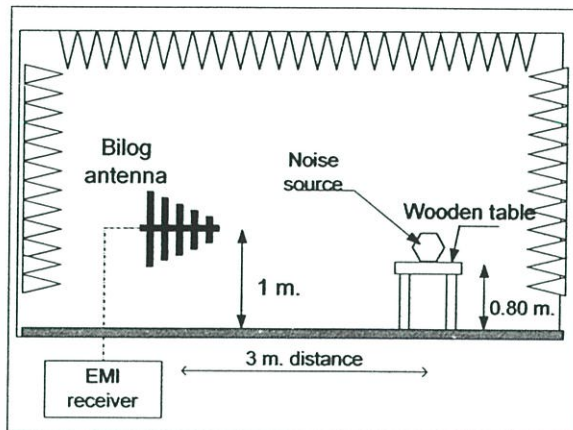
1. ถ้าสายเคเบิลที่ห้อยอยู่ใกล้ระนาบพื้น โลหะแนวระดับในระยะต่ำกว่า 40 เซนติเมตร และไม่สามารถทำให้สั้นลงมีความยาวที่เหมาะสมได้ ส่วนที่เกินต้องม้วนทาบให้เป็นมัดที่ยาว 30 ถึง 40 เซนติเมตร
2. สายอ่อนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าประธานที่ยาวเกินต้องม้วนทาบให้เป็นมัดที่กลางสาย หรือทำให้สั้นลงจนมีความยาวเหมาะสม
3. สายเคเบิลของอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยมือ เช่น แผงเป็นอักขระ เมาส์ ฯลฯ ต้องวางในลักษณะใช้งานปกติ
4. อุปกรณ์รอบข้างต้องวางที่ระยะ 10 เซนติเมตรจากเครื่องอื่นๆ และจากตัวควบคุม ยกเว้นจอภาพซึ่งถ้ายอมรับได้ในทางปฏิบัติเกี่ยวกับการติดตั้งก็ให้วางบนตัวควบคุม โดยตรง
5. สายเคเบิลสัญญาณเข้า/ออกซึ่งมีไว้สำหรับการต่อภายนอก

2.4.5 การวัดและเครื่องมือวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศที่ใช้ในงานวิจัย

ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศจำเป็นต้องมีอุปกรณ์หรือเครื่องมือต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยรูปที่ 2.23 แสดงรูปแบบการวัดที่ใช้ในการวิจัยนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.23 แสดงรูปแบบการติดตั้งการทดสอบ โดยมองจากมุมบน (ก) และด้านข้าง (ข)

โดยในงานวิจัยนี้จะทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำด้วยเครื่อง Spectrum Analyzer หรือ EMI Receiver ซึ่งจะใช้การตรวจจับสัญญาณแบบ P เนื่องจากสามารถวัดสัญญาณรบกวนได้อย่างรวดเร็ว และเป็นการเปรียบเทียบค่าสูงสุดของสัญญาณรบกวนในย่านความถี่ต่างๆ และแบบที่นำเสนอในย่านความถี่ที่พิจารณาคือ 30 MHz – 1,000 MHz สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ นั้นจะวาง EUT หรือแหล่งกำเนิดสัญญาณไว้บนกึ่งกลาง โต๊ะจนวน

ในการวัดสัญญาณรบกวนตามมาตรฐานนั้นจะต้องทำการทดสอบภายในห้องปิดกึ่งการสะท้อน (Semi-anechoic chamber) โดยในแต่ละด้านของห้องจะมีวัสดุดูดกลืนสัญญาณ (Absorber) ทำหน้าที่ดูดกลืนสัญญาณทุกด้าน ยกเว้นที่พื้นซึ่งจะทำจากวัสดุโลหะซึ่งมีคุณสมบัติสะท้อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการวัดสัญญาณรบกวนผ่านอากาศโดยทำการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่วัดได้ ขณะที่ไม่มีการกำบังหรือชีลด์และภายหลังจากการชีลด์ด้วยสารละลายเพื่อนำมาเปรียบเทียบหาค่าคุณสมบัติการชีลด์ของวัสดุนั้น ๆ

2.4.6 หน่วยสำหรับการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ [23, 24]

ในการทดสอบคุณสมบัติความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือ EMC ปริมาณการวัดจะอ้างอิงด้วยค่า เดซิเบล (decibels-dBs) ซึ่งเป็นค่าที่แทนด้วยอัตราส่วนลอการิทึมฐานสิบระหว่างปริมาณสองจำนวนและไม่มีหน่วย หากอัตราส่วนนั้นอ้างอิงถึงปริมาณเฉพาะสามารถเพิ่มเติมในส่วนท้ายได้ เช่น dBV อ้างถึง 1 V (1 โวลต์), dBm ก็อ้างอิงถึง 1 mW (1 มิลลิวัตต์)

ค่าของเดซิเบลเกิดจากอัตราส่วนของค่ากำลังจากสมการ

$$x \text{ dB} = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (2.10)$$

ค่ากำลังเป็นสัดส่วนรากของแรงดัน ซึ่งสามารถหาได้จากค่าแรงดันและกระแสได้ดังนี้

$$x \text{ dB} = 20 \log \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \text{ หรือ } 20 \log \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \quad (2.11)$$

การแปลงค่าระหว่างแรงดัน dBV และกำลัง dBm สำหรับค่าอิมพีแดนซ์ Z โอห์ม ได้แก่

$$V(\text{dB}\mu\text{V}) = 90 + 100 \log(Z) + P(\text{dBm}) \quad (2.12)$$

ในการหาค่าแรงดัน กระแส หรือกำลัง สามารถหาได้ด้วยการถอดค่าลอการิทึมของเดซิเบลได้ดังนี้

$$V = \log^{-1}(\text{dBV} / 20) \quad \text{Volts} \quad (2.13)$$

$$I = \log^{-1}(\text{dBA} / 20) \quad \text{Amps} \quad (2.14)$$

$$P = \log^{-1}(\text{dBw} / 10) \quad \text{Watts} \quad (2.15)$$

เนื่องด้วยในวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศอุปกรณ์ที่ใช้ในการดักจับสัญญาณได้แก่สายอากาศ โดยความเข้มสนาม (E) สามารถหาได้จากค่ากำลังไฟฟ้าที่แพร่ออกจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ (P_t มีหน่วยเป็นวัตต์) เช่น สายอากาศไดโพล ดังนั้นค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ที่ระยะห่าง R มีค่าดังนี้

$$E = \frac{\sqrt{49.23 P_t}}{R} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ได้ เพื่อความสะดวกในการวัดค่าสัญญาณในห้องปฏิบัติการจึงสามารถหาได้ดังนี้

$$E(dBV/m) = V(dBV) + AF(dB/m) + A(dB) \quad (2.16)$$

เมื่อ V คือ ค่าของแรงดันที่วัดได้จากเครื่องรับสัญญาณ

AF คือ ค่าแก้ไขของสายอากาศ (Antenna factor)

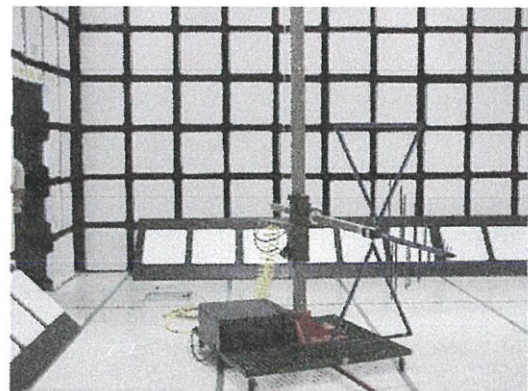
A คือ ค่าผลรวมของค่าความสูญเสียในระบบทั้งหมดระหว่างสายอากาศและเครื่องรับสัญญาณ

2.4.7 เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้จริงในการวิจัย

1. EMC Analyzer รุ่น Agilent E7405A ดังในรูปที่ 2.24 (ก) ซึ่งทำหน้าที่เป็น Spectrum Analyzer โดยย่านความถี่ที่สามารถวัดได้คือ 9 kHz – 26.5 GHz
2. สายอากาศของ CHASE รุ่น CBL6111B ย่านความถี่ 30MHz – 1,000 MHz โดยทำการวัดโดยที่สายอากาศห่างจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ 3 เมตร ในแกนนอน
3. เครื่องมือสำหรับวัดค่าความเป็นตัวนำของสารละลาย รุ่น WTW inoLab pH/Cond 720 ซึ่งใช้ในการวัดค่าความเป็นตัวนำของสารละลายเกลือและด่างทับทิมที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ
4. EUT คือ วงจรที่ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณรบกวน ในงานวิจัยนี้ EUT คือวงจรที่ใช้สัญญาณความถี่นาฬิกา (Clock frequency signal) เป็นตัวขับ โดยมีความถี่หลักที่ 16 MHz วงจรมาตรฐานแสดงในรูปที่ 2.26 โดยหลักการทำงานของวงจรจะทำการสร้างสัญญาณนาฬิกาซึ่งเดินทางตามลายทองแดงบนแผ่น PCB ซึ่งทำหน้าที่เหมือนสายอากาศที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณออกไป

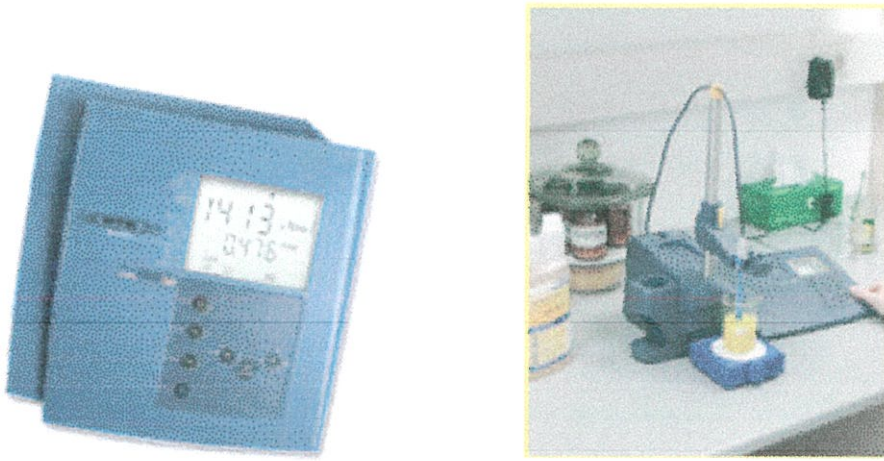


(ก) EMC Analyzer

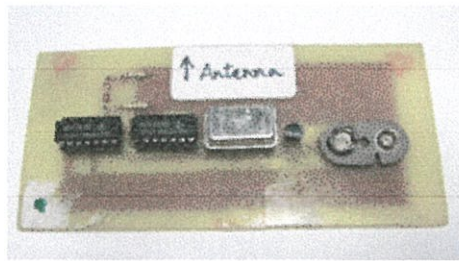


(ข) สายอากาศ Bilog

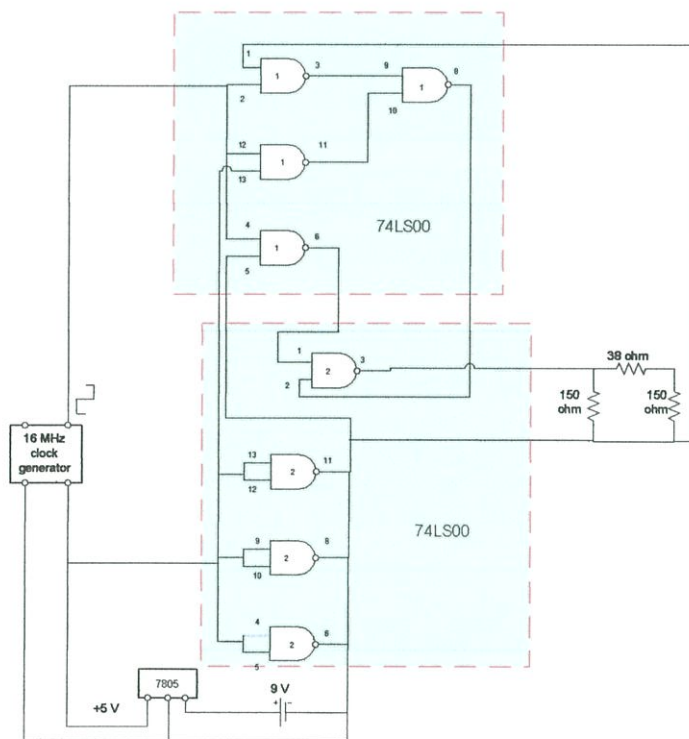
รูปที่ 2.24 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ



รูปที่ 2.25 เครื่องมือสำหรับวัดค่าความเป็นตัวนำของสารละลาย



(ก)



(ข)

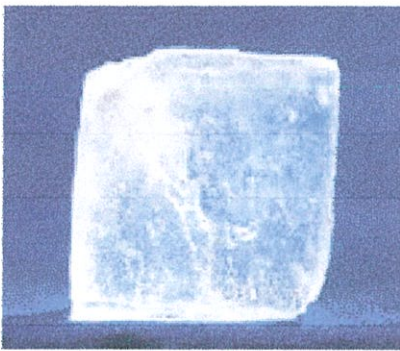
รูปที่ 2.26 แหล่งกำเนิดสัญญาณ (ก) และวงจรมูลฐานของแหล่งกำเนิดสัญญาณ (ข)

2.4.7 สารที่ใช้ในการทดสอบการซึ่ดผ่านอากาศ

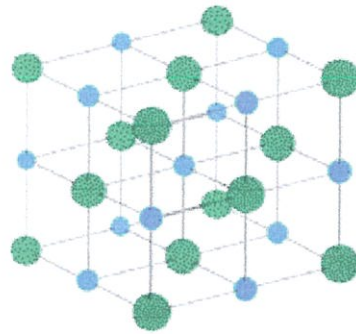
สารที่นำมาใช้ในการศึกษานี้มีสองชนิด ได้แก่

2.4.7.1 เกลือ (Salt)

เกลือมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, สูตรเคมี :NaCl) มีชื่อที่เรียกทั่วไปดังนี้ เกลือแกงหรือเกลือโต๊ะ เป็นสารประกอบทางเคมี มีบทบาทต่อความเค็มของมหาสมุทร และ ของเหลวภายนอกเซลล์ของสิ่งมีชีวิตหลายเซลล์ เป็นส่วนประกอบหลักใน เกลือที่ใช้สำหรับรับประทาน ได้จะถูกใช้อย่างกว้างขวางในการเป็นเครื่องปรุงรส และใช้ในการถนอมอาหาร



(ก)



(ข)

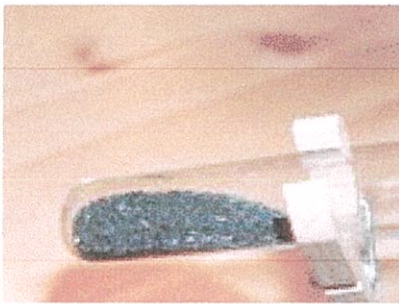
รูปที่ 2.27 ผลึกเกลือ (ก) และ โครงสร้างโมเลกุลของเกลือ (ข)

เกลือมีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตบนโลกในเนื้อเยื่อชีวภาพ และของเหลวในร่างกาย ปัจจุบันเกลือถูกผลิตโดย การระเหยของน้ำทะเลหรือน้ำเค็ม (Brine) จากแหล่งอื่นๆ เช่น บ่อน้ำเค็ม ทะเลสาบน้ำเค็ม (salt lake) และการทำเหมืองเกลือ เกลือใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น

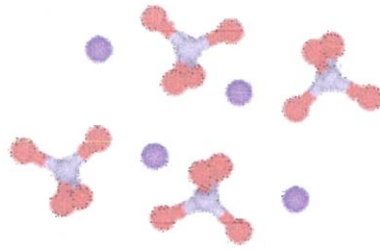
- ใช้ในการผลิตกระดาษ
- ใช้ในหมักพิมพ์ผ้าในอุตสาหกรรมเท็กไทล์
- ใช้ในอุตสาหกรรมผลิต สบู่และผงซักฟอก
- ใช้ในการละลายน้ำแข็งที่เกาะบนพื้นถนน ใน แคนาดาและสหรัฐอเมริกา ในช่วงฤดูหนาวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ
- ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต คลอรีน พีวีซี และยาฆ่าแมลง

2.4.7.2 ค่างทับทิม

ค่างทับทิมมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนท (Potassium permanganate, สูตรเคมี $KMnO_4$) เป็นสารที่มีสถานะเป็นของแข็ง มีรูปร่าง และปริมาตรคงที่ โมเลกุลของสารจะอยู่ชิดกัน และยึดกันแน่น เพราะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมากที่สุด หากรับประทานเกร็ดหรือน้ำค่างทับทิมเข้มข้นจะทำให้กัดเนื้อเยื่อในปาก กล่องเสียงบวม ซิฟจรदनข้ และซ้อก ค่างทับทิมเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างแรง สามารถฆ่าเชื้อโรคและแบคทีเรียต่าง ๆ ได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.28 ผลึกของค่างทับทิม (ก) และ โครงสร้างทางโมเลกุลของค่างทับทิม (ข)

ประสิทธิภาพของค่างทับทิมนิยมใช้ในอุตสาหกรรมเลี้ยงสัตว์น้ำ อาทิเช่น ปลาสวยงาม โดยใช้อย่างต่อไปนี้

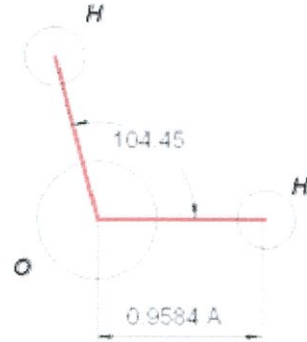
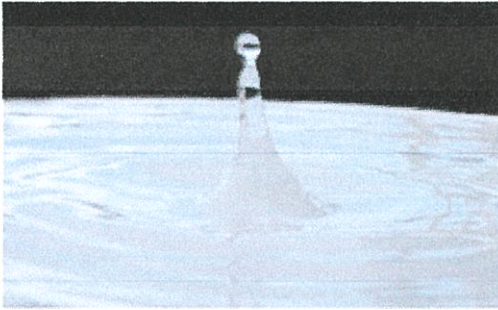
- ใช้ในการกำจัดปรสิตภายนอกในบ่อปูนหรือบ่อดินที่น้ำใส
- ใช้ฆ่าเชื้อ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
- ใช้ในการกำจัดปรสิต เชื้อรา และแบคทีเรียในอาหารสัตว์น้ำมีชีวิต
- ใช้ลดปริมาณแพลงตอนและสารอินทรีย์ในน้ำ

2.4.7.3 น้ำ

น้ำเป็นของเหลวชนิดหนึ่งซึ่งถ้าบริสุทธิ์จะไม่มีรส ไม่มีกลิ่น และไม่มีสี น้ำเป็นของเหลวที่มีอยู่มากที่สุดบนผิวโลก และเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดที่มนุษย์รู้จัก เราสามารถพบน้ำได้ในหลายๆ สถานที่ อาทิ ทะเล ทะเลสาบ แม่น้ำ ห้วย หนอง คลอง บึง และในหลายๆ รูปแบบ เช่น น้ำแข็ง หิมะ ฝน ลูกเห็บ เมฆ และไอน้ำ

น้ำมีสูตรเคมี H_2O , หมายถึงหนึ่ง โมเลกุล ของน้ำประกอบด้วยสองอะตอมของ ไฮโดรเจน และหนึ่งอะตอมของ ออกซิเจน เป็นสารประกอบบริสุทธิ์ชนิดเดียวเท่านั้นที่พบในธรรมชาติทั้ง 3 สถานะ ได้แก่

- สถานะของแข็ง คือ น้ำแข็ง (ice)
- สถานะก๊าซ (gaseous state) รู้จักกันในชื่อ ไอน้ำ (water vapor หรือ steam)
- สถานะของเหลว คือ น้ำ



รูปที่ 2.29 น้ำ (ก) และ โครงสร้างทางโมเลกุลของน้ำ (ข)

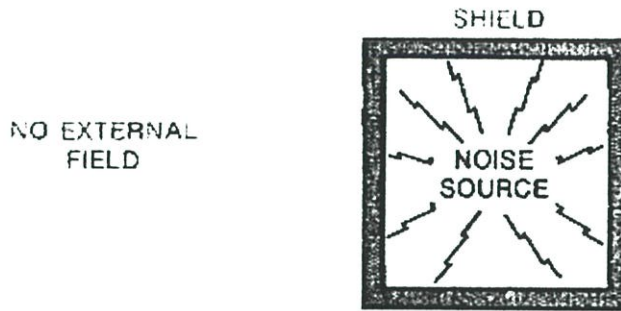
2.5 บทสรุป

ในบทนี้เป็นการแนะนำพื้นฐานและทำความเข้าใจเกี่ยวกับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า และการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ โดยมีกล่าวถึงการเกิดการรบกวนในโหมดต่างๆ แหล่งการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และแนะนำมาตรฐานที่เกี่ยวข้องในการวัดและทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยสังเขป และได้อธิบายถึงวิธีการวัดและเครื่องมือวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ รวมทั้งสารที่ใช้ในงานวิจัยนี้

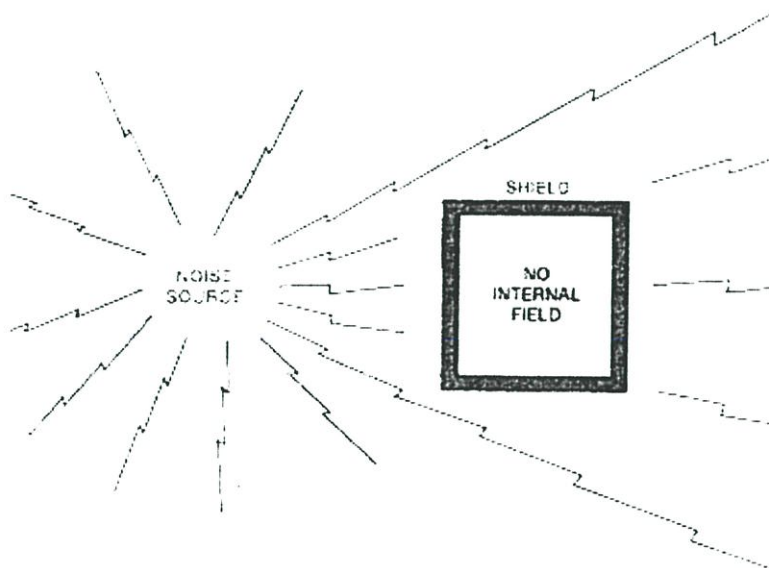
บทที่ 3

การกำบังคลื่นหรือการชิลด์ (Shielding)

การกำบังหรือการชิลด์ คือการนำชิ้นส่วนโลหะวางกั้นระหว่างช่องว่างของสองพื้นผิว ซึ่งใช้ในการควบคุมการกระจายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากพื้นผิวด้านหนึ่งไปยังพื้นผิวอีกด้านหนึ่ง การชิลด์อาจรวมถึงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ถ้าหากการชิลด์นั้นปกคลุมรอบแหล่งกำเนิดสัญญาณดังรูปที่ 3.1 จากรูปเป็นการป้องกันอุปกรณ์ภายนอกจากพื้นผิวที่ถูกชิลด์ และการชิลด์อาจจะหมายถึงการป้องกันพื้นผิวบางส่วนภายใต้สถานะที่ถูกรบกวนดังรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นการป้องกันเฉพาะส่วนภายใต้พื้นที่ที่มีการชิลด์ จากภาพรวมทั้งหมด จะพบว่า การชิลด์แหล่งกำเนิดสัญญาณย่อมมีประสิทธิภาพมากกว่าการชิลด์ส่วนรับ อย่างไรก็ตาม ก็ยังมีบางกรณีที่แหล่งกำเนิดจำเป็นต้องอยู่ภายใต้สถานะที่มีการรบกวน อาทิเช่น ภายใต้สถานีกระจายเสียงวิทยุ ดังนั้นส่วนรับบางส่วนจึงต้องการการชิลด์



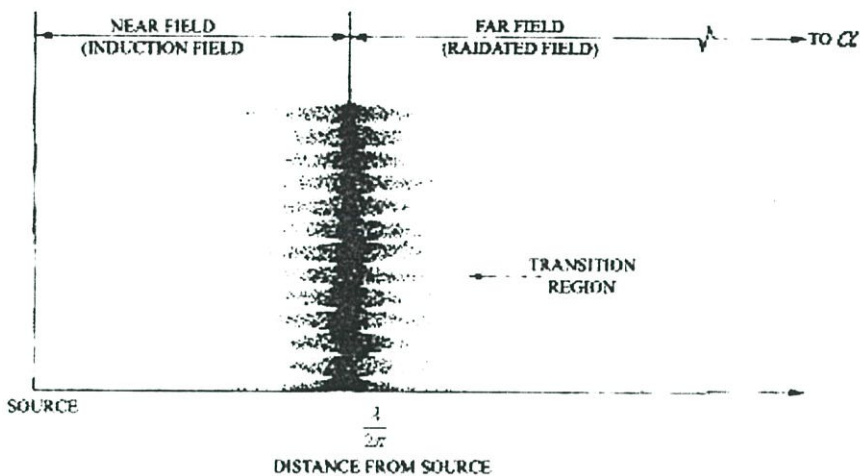
รูปที่ 3.1 รูปแบบการชิลด์ที่มีแหล่งกำเนิดสัญญาณบรรจุภายในเพื่อไม่ให้แพร่ออกไปภายนอก



รูปที่ 3.2 รูปแบบการชิลด์เพื่อปกป้องแหล่งกำเนิดสัญญาณจากภายนอก

3.1 สนามใกล้และสนามไกล (Near fields and Far fields)

คุณสมบัติของสนามสามารถอธิบายด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณ สี่รอบ ๆ แหล่งกำเนิดสัญญาณ และระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณและจุดสังเกต ที่ตำแหน่งติดกับแหล่งกำเนิดสัญญาณ คุณสมบัติของสนามถูกกำหนดขึ้นด้วยคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดสัญญาณ ส่วนตำแหน่งที่ห่างจากแหล่งกำเนิด คุณสมบัติหลักของสนามขึ้นอยู่กับสื่อที่สนามนั้นกำลังแพร่ไปรอบ ๆ ดังนั้นที่ว่างรอบ ๆ แหล่งกำเนิดสัญญาณสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ส่วนที่ติดกับแหล่งกำเนิดคือ สนามใกล้หรือสนามเหนี่ยวนำ (The near, or induction, field) ส่วนตำแหน่งที่ห่างมากกว่าค่าความยาวคลื่น (λ) หรือด้วย 2π (ประมาณหนึ่งในหกของความยาวคลื่น) เป็นสนามไกลหรือสนามแพร่กระจาย (The far, or radiation, field) ดังนั้นพื้นที่ว่างรอบ ๆ $\lambda/2\pi$ เป็นขอบเขตการเปลี่ยนระหว่างสนามใกล้และไกล

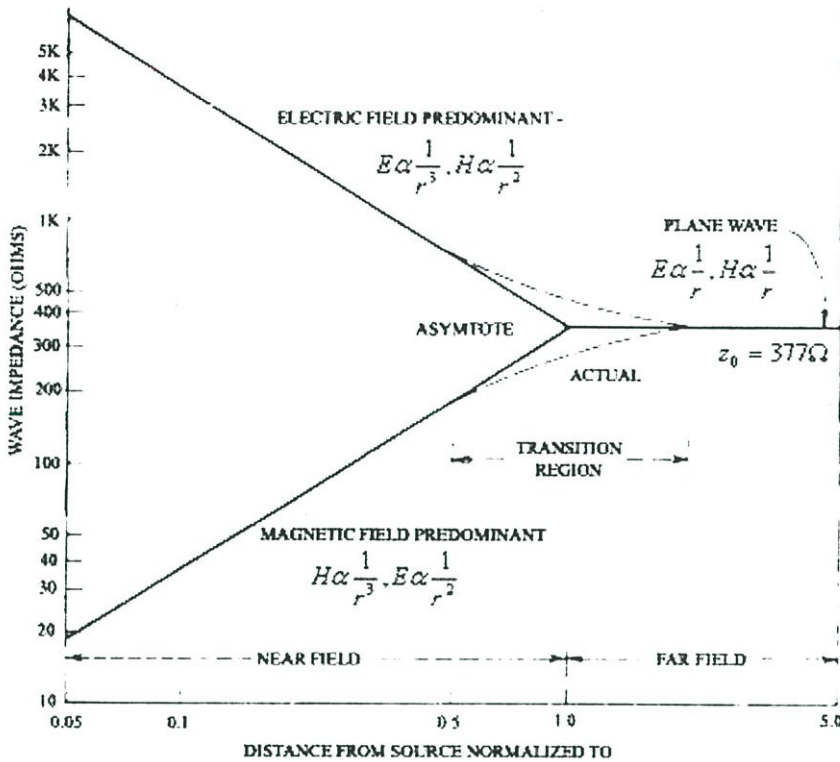


รูปที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติของสนามที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างจากแหล่งกำเนิดซึ่งแบ่งสนามใกล้และสนามไกล (Near and far field) ด้วย $\lambda/2\pi$

อัตราส่วนของสนามไฟฟ้า (E) ต่อสนามแม่เหล็ก (H) คือค่าความต้านทานคลื่น ที่สนามไกลอัตราส่วนของ E/H จะมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานคุณสมบัติของสื่อ นั้น ๆ (ตัวอย่างเช่น $E/H = Z_0 = 377 \Omega$ สำหรับอากาศหรือพื้นที่ว่าง) ในขณะที่สนามใกล้ นั้น ค่าอัตราส่วนถูกกำหนดโดยคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดและระยะห่างจากแหล่งกำเนิดถึงจุดตำแหน่งสังเกต ถ้าแหล่งกำเนิดมีกระแสสูงและแรงดันต่ำ ($E/H < 377 \Omega$) สนามใกล้จะมีอำนาจสูงทางแม่เหล็ก ในทางกลับกัน ถ้าแหล่งกำเนิดมีกระแสต่ำและแรงดันสูง ($E/H > 377 \Omega$) สนามใกล้มีอำนาจสูงทางไฟฟ้า

สำหรับสายอากาศแบบแท่งหรือชนิดสายตรงที่มีความต้านทานของแหล่งกำเนิดสูง ค่าความต้านทานคลื่นที่อยู่ใกล้สายอากาศ หรือสนามไฟฟ้าก็จะมีค่าสูงด้วยเช่นกัน สนามไฟฟ้าสูญเสียความเข้มไปกับการสร้างสนามแม่เหล็ก ที่สนามใกล้จะมีค่าสนามไฟฟ้าลดลงเป็นอัตราส่วนของ

$(1/r)^3$ ในขณะที่สนามแม่เหล็กจะลดลงด้วยอัตราส่วนของ $(1/r)^2$ ด้วยเหตุนี้ค่าความต้านทานคลื่นจากสายอากาศชนิดสายตรงจะมีค่าลดลงด้วยระยะห่างและเกี่ยวเนื่องกับค่าความต้านทานของพื้นที่ว่างอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงค่าความต้านทานคลื่น (Wave impedance) ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสัญญาณทั้งแบบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

สำหรับสนามแม่เหล็กที่มีอำนาจสูงจะถูกสร้างด้วยสายอากาศชนิดวง ค่าความต้านทานคลื่นใกล้สายอากาศจะมีค่าต่ำ เมื่อระยะห่างจากแหล่งกำเนิดเพิ่มขึ้น สนามแม่เหล็กจะมีค่าลดลงด้วยอัตราส่วน $(1/r)^3$ และสนามไฟฟ้าจะลดลงด้วยอัตราส่วน $(1/r)^2$ ค่าความต้านทานคลื่นจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากระยะห่างและเมื่อเข้าใกล้พื้นที่ว่างอิสระที่ระยะ $\lambda/2\pi$ ในขณะที่สนามไกลทั้งสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กจะมีค่าลดลงด้วยอัตราส่วน $1/r$

ในขณะที่สนามไกล สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต้องพิจารณาแยกจากกัน เนื่องจากอัตราส่วนของทั้งสองแบบไม่เป็นค่าคงที่ แต่ในขณะที่สนามไกลทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถคิดรวมเป็นคลื่นระนาบ (Plane wave) ที่มีค่าความต้านทาน 377 โอห์ม ดังนั้น เมื่อกล่าวถึงคลื่นระนาบจะหมายความรวมถึงสนามไกล ในขณะที่กล่าวถึงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะหมายความรวมถึงสนามใกล้

3.2 คุณลักษณะและความต้านทานคลื่น (Characteristic and wave impedances)

ค่าคุณลักษณะคงที่ของสื่อมีดังต่อไปนี้

ค่าความซึมทราบ (Permeability)	μ ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m สำหรับพื้นที่ว่างอิสระ)
ค่าความเป็นฉนวน (Dielectric constant)	ϵ (8.85×10^{-12} F/m สำหรับพื้นที่ว่างอิสระ)
ค่าความเป็นตัวนำ (Conductivity)	σ (5.82×10^7 S/m สำหรับพื้นที่ว่างอิสระ)

สำหรับคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใด ๆ ค่าความต้านทานคลื่นมีค่าดังสมการ

$$Z_w = \frac{E}{H} \quad (3.1)$$

คุณลักษณะค่าความต้านทานของสื่อ (Hayt, 1974) สามารถอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (3.2)$$

ในกรณีพื้นที่ว่างอิสระในสนามไกล Z_0 มีค่าเท่ากับค่าความต้านทานคลื่น Z_w สำหรับฉนวน ($\sigma \ll j\omega\epsilon$) คุณลักษณะความต้านทานมีค่าที่อิสระจากความถี่และสมการที่ได้คือ

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3.3)$$

สำหรับพื้นที่ว่างอิสระ Z_0 มีค่าเท่ากับ 377 โอห์ม ในกรณีของตัวนำ ($\sigma \gg j\omega\epsilon$) คุณลักษณะความต้านทานซึ่งเรียกว่าค่าความต้านทานซีลด์ Z_s จะมีค่าดังต่อไปนี้

$$Z_s = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}(1 + j) \quad (3.4.a)$$

$$|Z_s| = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \quad (3.4.b)$$

สำหรับตัวนำใด ๆ มีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$|Z_s| = 3.68 \times 10^{-7} \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r}} \sqrt{f} \quad (3.5)$$

เมื่อ μ_r คือ ค่าซึมซาบของวัสดุ
 σ_r คือ ค่าความเป็นตัวนำของวัสดุ
 f คือ ความถี่

ค่าความซึมซาบของวัสดุ และค่าความเป็นตัวนำของวัสดุชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่

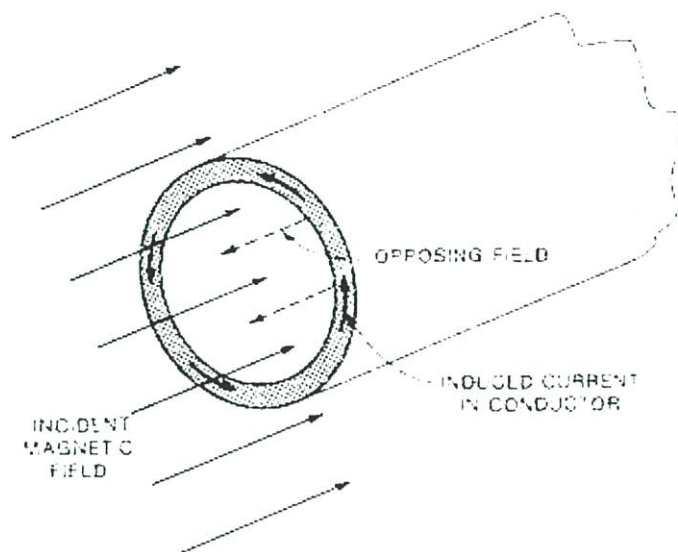
3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความซึมซาบของวัสดุ และค่าความเป็นตัวนำของวัสดุชนิดต่าง ๆ

Material	Relative conductivity	Relative permeability
	σ_r	μ_r
Silver	1.05	1
Copper-annealed	1.00	1
Gold	0.7	1
Chromium	0.664	1
Aluminum (soft)	0.61	1
Aluminum (tempered)	0.4	1
Zinc	0.32	1
Beryllium	0.28	1
Brass	0.26	1
Cadmium	0.23	1
Nickel	0.20	100
Bronze	0.18	1
Platinum	0.18	1
Tin	0.15	1
Steel (SAE 1045)	0.10	1,000
Lead	0.08	1
Monel	0.04	1
Conetic (1 kHz)	0.03	25,000
Mumetal (1 kHz)	0.03	20,000
Stainless steel (430)	0.02	500

3.3 คุณสมบัติการกำบังคลื่นหรือการชิลด์ (Shielding effectiveness)

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติการชิลด์ทั้งสนามใกล้และไกล คุณสมบัติการชิลด์สามารถอธิบายปัญหาได้ถึงสองปัญหา วิธีแรกเป็นใช้สำหรับทฤษฎีวงจร และวิธีที่สองใช้สำหรับทฤษฎีสนาม ในส่วนของทฤษฎีวงจรถูกกล่าวถึงสนามรบกวน (Noise field) เหนี่ยวนำกระแสในส่วนที่ชิลด์และกระแสเหล่านี้วนเป็นรอบสร้างสนามเพิ่มเติมซึ่งหักล้างกับสนามดั้งเดิมในพื้นที่ขั้ว ยกตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 สนามรบกวน (Noise field) เหนี่ยวนำกระแสในส่วนที่ชิลด์และกระแสเหล่านี้วนเป็นรอบสร้างสนามเพิ่มเติมซึ่งหักล้างกับสนามดั้งเดิมในพื้นที่ขั้ว

การชิลด์สามารถอธิบายในรูปของการลดลงของความเข้มสนามแม่เหล็กและไฟฟ้าซึ่งเป็นสาเหตุของการชิลด์ เพื่อความสะดวกค่าคุณสมบัติการชิลด์จึงกำหนดเป็นเดซิเบล (dB) ในการใช้หน่วยเป็นเดซิเบลนี้เปิดโอกาสให้มีการรวมผลที่หลากหลายของผลกระทบของการชิลด์ทั้งหมด คุณสมบัติการกำบังคลื่น (Shielding effectiveness-SE) สามารถอธิบายในรูปของสนามไฟฟ้าได้ดังนี้

$$SE = 20 \log \frac{E_0}{E_1} \quad \text{dB} \quad (3.6)$$

และสำหรับสนามแม่เหล็ก

$$SE = 20 \log \frac{H_0}{H_1} \quad \text{dB} \quad (3.7)$$

จากสมการ $E_0(H_0)$ คือ ความเข้มสนามที่ตกกระทบ และ $E_1(H_1)$ เป็นความเข้มสนามของคลื่นที่ส่งผ่านออกมาจากส่วนที่ซัด

ในการออกแบบภาชนะซัด มีสองประเด็นหลักในการพิจารณา หนึ่งคือคุณสมบัติการซัดของวัสดุที่นำมาใช้ในตัวเอง และสองคุณสมบัติการซัดที่ไม่สม่ำเสมอและรูปร่าง ๆ ในพื้นที่ของการซัด

คุณสมบัติการซัดแปรเปลี่ยนตามความถี่ รูปทรงของวัสดุซัด ตำแหน่งภายในวัสดุซัดที่อยู่ภายใต้สนามที่ทำการวัด ชนิดของสนาม ทิศทางของการตกกระทบ และแกนของแม่เหล็ก ในบทนี้จะกล่าวถึงการซัดด้วยแผ่นวัสดุตัวนำที่มีรูปทรงทั่วไปเพื่อใช้เป็นแนวคิดเบื้องต้นของการซัด และแสดงถึงคุณสมบัติของวัสดุที่มีผลต่อคุณสมบัติการซัด แต่ไม่รวมถึงผลกระทบที่มีต่อรูปทรงต่าง ๆ ของการซัด คุณสมบัติประโยชน์ของผลการคำนวณแผ่นราบช่วยให้ประมาณความสัมพันธ์ความสามารถในการซัดกับวัสดุต่าง ๆ ได้

การสูญเสียสองชนิดที่กระทบกัน โดยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่พื้นผิวของโลหะ คลื่นบางส่วนจะถูกสะท้อนออกจากพื้นผิว และคลื่นบางส่วนที่จะทะลุผ่านสารออกไป ผลกระทบหลังนี้เรียกว่าการดูดกลืนหรือการลอคทะลุ ซึ่งจะปรากฏเหมือนกันทั้งสนามไกลหรือสนามใกล้ และทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก สำหรับการสูญเสียจากการสะท้อนจะขึ้นอยู่กับชนิดของสนามและความต้านทานคลื่น

คุณสมบัติการซัดทั้งหมดของวัสดุมีค่าเท่ากับผลรวมของค่าสูญเสียจากการดูดกลืน (A) กับค่าสูญเสียจากการสะท้อน (R) และค่าแก้ (B) ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$SE = A + R + B \quad \text{dB} \quad (3.8)$$

เมื่อ

- A = ค่าสูญเสียการดูดกลืนของวัสดุ (dB)
- R = ค่าสูญเสียการสะท้อนทั้งสองด้าน (dB)
- B = ค่าแก้ (Correction factor) ของการสะท้อนคลื่นของวัสดุ (dB)

ทุกเทอมในสมการ (3.8) มีหน่วยเป็น dB ซึ่งผลรวมในสมการดังกล่าวสามารถตัดค่าแก้ B ออกจากสมการได้หากค่าสูญเสียการดูดกลืน (A) มีค่ามากกว่า 9 dB ดังนั้นแสดงว่าค่าแก้ B สามารถตัดออกได้ในกรณีที่สนามไฟฟ้าและคลื่นระนาบ

3.4 ค่าสูญเสียการดูดกลืน (Absorption loss)

เมื่อคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านวัตถุ ค่าของแอมพลิจูดจะลดลงเป็นอัตราส่วนเลขยกกำลังดังแสดงในรูปที่ 2.10 การลดลงนี้ปรากฏขึ้นเนื่องจากกระแสได้เหนี่ยวนำในวัตถุซึ่งถูกสร้างเป็นความสูญเสียจากความต้านทานและความร้อนในสาร ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

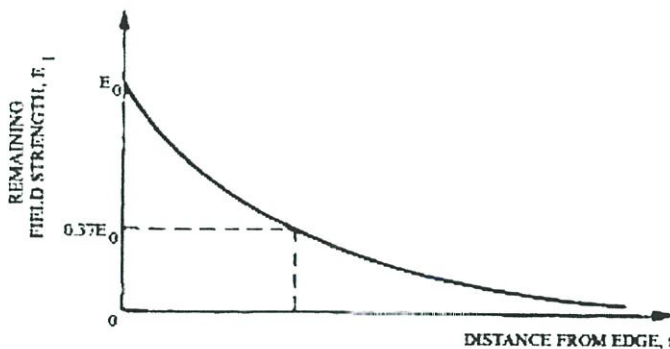
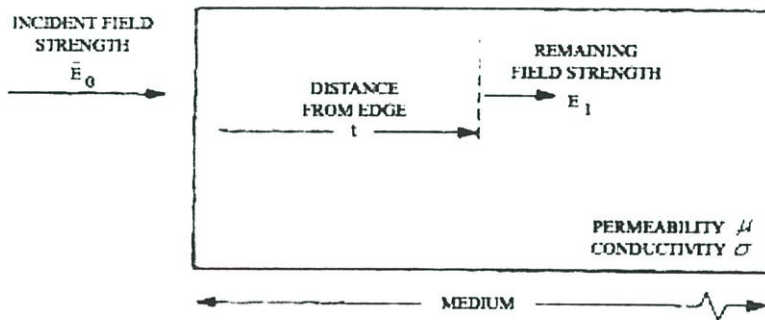
$$E_1 = E_0 e^{-\frac{t}{\delta}} \quad (3.9)$$

และ

$$H_1 = H_0 e^{-\frac{t}{\delta}} \quad (3.10)$$

เมื่อ $E_1(H_1)$ คือ ความแรงคลื่นที่ระยะห่าง t ภายในสารดังแสดงในรูปที่ 3.6 ระยะห่างสำหรับคลื่นที่ทำให้ค่าลดลง $1/e$ หรือ 37% ของค่าดั้งเดิมเป็นค่าที่กำหนดที่ความลึกผิว (Skin depth) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad \text{m} \quad (3.11)$$



รูปที่ 3.6 รูปเมื่อคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านวัตถุ ค่าของแอมพลิจูดจะลดลงเป็นอัตราส่วนเลขยกกำลัง

เพื่อความสะดวกในการคิดค่าความลึกผิวสำหรับวัสดุจริง สมการที่ 3.11 สามารถปรับปรุงใหม่ แทนค่าตัวเลขสำหรับค่า μ และ σ ดังนั้นความลึกผิวเปลี่ยนหน่วยได้ดังต่อไปนี้

$$\delta = \frac{2.6}{\sqrt{f\mu_r\sigma_r}} \quad \text{in.} \quad (3.12)$$

ตัวอย่างสำหรับค่าความลึกผิวสำหรับทองแดง อลูมิเนียม เหล็ก และโลหะผสม ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่า Skin Depths ของวัสดุต่าง ๆ

Frequency		Copper (in.)	Aluminum (in.)	Steel (in.)	Mumetal (in.)
60	Hz	0.335	0.429	0.034	0.014
100	Hz	0.260	0.333	0.026	0.011
1	kHz	0.082	0.105	0.008	0.003
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	0.0001	-
100	MHz	0.00026	0.0003	0.00008	-
1000	MHz	0.00008	0.0001	0.00004	-

ค่าสูญเสียการดูดกลืนผ่านซิลด์สามารถเขียนได้เป็น

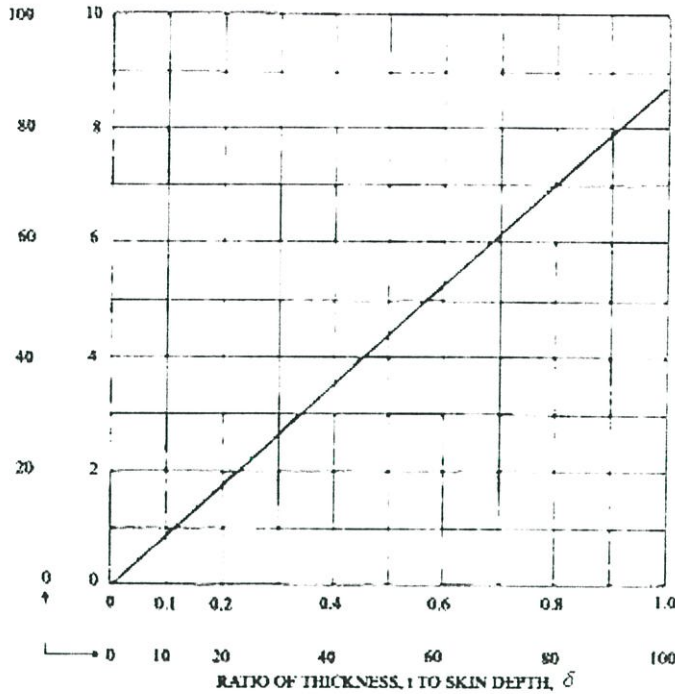
$$A = 20 \left(\frac{t}{\delta} \right) \log(e) \quad \text{dB} \quad (3.13)$$

$$A = 8.69 \left(\frac{t}{\delta} \right) \quad \text{dB} \quad (3.14)$$

เมื่อ t = ความหนา (thickness)

จากสมการก่อนหน้า ค่าสูญเสียการดูดกลืนในซิลด์ที่ค่าความลึกผิวหนึ่งมีค่าประมาณ 9 เดซิเบล ยิ่งค่าความหนาเพิ่มขึ้นสองเท่า ค่าซิลด์ก็มีค่าเพิ่มสองเท่าในหน่วยเดซิเบลเช่นกัน

รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียการคูดกลืนในหน่วยเดซิเบลกับอัตราส่วน t/δ ซึ่งเป็นรูปกราฟที่ใช้สำหรับคลื่นระนาบ สนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็ก



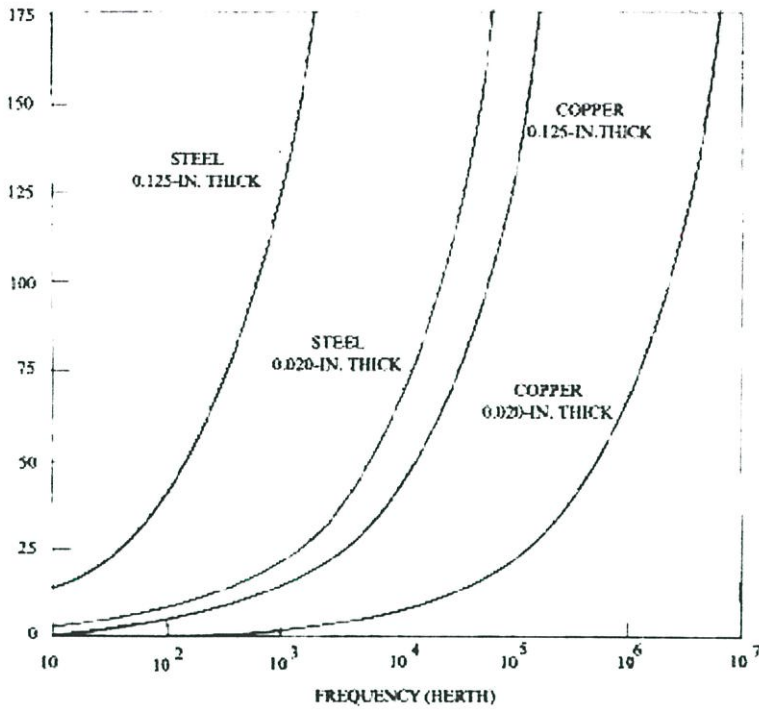
รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียการคูดกลืนในหน่วยเดซิเบลกับอัตราส่วน t/δ ซึ่งเป็นรูปกราฟที่ใช้สำหรับคลื่นระนาบ สนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็ก

เมื่อแทนสมการ 3.12 ด้วยสมการ 3.14 ค่าสูญเสียการคูดกลืนสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$A = 3.34t\sqrt{f\mu_r\sigma_r} \quad \text{dB} \quad (3.15)$$

ในสมการ t มีค่าเท่ากับความหนาของส่วนที่ซึ่ลต์ในหน่วยนิ้ว สมการ 3.15 แสดงความสูญเสียการคูดกลืนในหน่วยเดซิเบล ซึ่งเป็นสัดส่วนของค่ารากที่สองของผลคูณระหว่างค่าซึ่ลตราบของวัสดุและค่าความเป็นตัวนำของวัสดุ ตารางที่ 3.2 แสดงค่าซึ่ลตราบของวัสดุและค่าความเป็นตัวนำของวัสดุของวัสดุต่าง ๆ

รูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูญเสียการคูดกลืนกับความถี่ของทองแดงและเหล็กกล้าที่ความหนา 2 แบบ คือ 0.020 นิ้ว และ 0.125 นิ้ว ซึ่งจะพบว่าที่แผ่นทองแดงหนา 0.02 นิ้ว จะมีคุณสมบัติการคูดกลืน 66 เดซิเบลที่ความถี่ 1 MHz แต่ไม่มีคุณสมบัติการคูดกลืนที่ความถี่ต่ำกว่า 1,000 Hz จากรูปดังกล่าวจะพบว่าเหล็กกล้าจะมีข้อดีมากกว่าทองแดงในคุณสมบัติการคูดกลืนที่ย่านความถี่ต่ำกว่า 1,000 Hz



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูญเสียคูลคกับความถี่ของทองแดงและเหล็กกล้าที่ความหนา 2 แบบ คือ 0.020 นิ้ว และ 0.125 นิ้ว

3.5 ค่าสูญเสียการสะท้อน (Reflection loss)

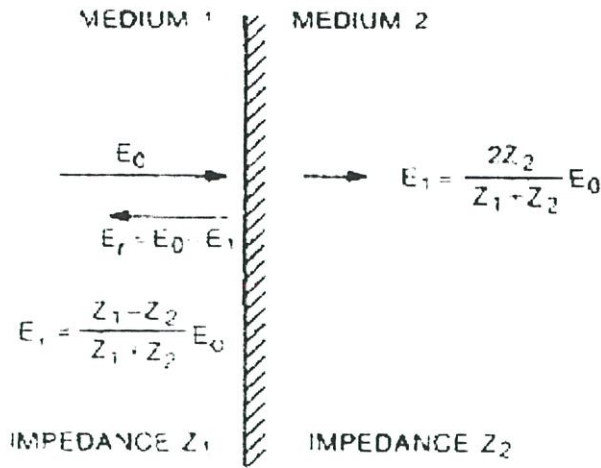
ค่าสูญเสียการสะท้อนที่ผิวระหว่างวัตถุ 2 ชนิด เป็นความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของคุณสมบัติของความต้านทานระหว่างวัตถุทั้งสองแสดงในรูปที่ 3.9 ความเข้มของคลื่นที่ส่งผ่านออกมาจากวัตถุด้วยค่าความต้านทาน Z_1 ไปสู่วัตถุที่มีค่าความต้านทาน Z_2 คือ

$$E_1 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E_0, \quad (3.16)$$

และ

$$H_1 = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} H_0 \quad (3.17)$$

เมื่อ $E_0(H_0)$ คือ ความเข้มสนามที่ตกกระทบ และ $E_1(H_1)$ เป็นความเข้มสนามของคลื่นที่ส่งผ่านออกมาจากส่วนที่ชิด



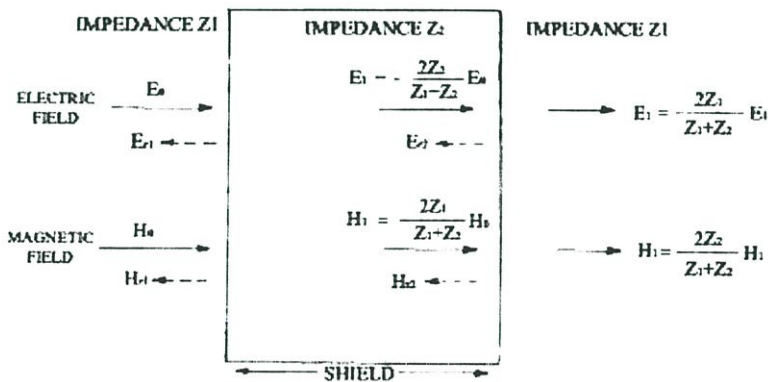
รูปที่ 3.9 ความเข้มของคลื่นที่ส่งผ่านออกมาจากวัตถุด้วยความต้านทาน Z_1 ไปสู่วัตถุที่มีความต้านทาน Z_2

เมื่อคลื่นผ่านส่วนที่ซัดและปะทะระหว่างทั้งสองพื้นผิวแล้ว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 พื้นผิววัตถุส่วนที่สองอยู่ระหว่างวัตถุที่มีความต้านทาน Z_2 และวัตถุที่มีความต้านทาน Z_1 คลื่นที่ส่งผ่านออกมาจากส่วนที่ซัด $E_t (H_t)$ ผ่านพื้นผิวนี้นี้จะมีค่าเท่ากับ

$$E_t = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} E_1 \quad (3.18)$$

และ

$$H_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} H_1 \quad (3.19)$$



รูปที่ 3.10 แสดงสะท้อนและดูดกลืนบางส่วนที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวซัดทั้งสองด้าน

ถ้าส่วนที่ซัลด์มีความหนาเปรียบเทียบกับความลึกผิว (Skin depth) ความเข้มสนามของคลื่นที่ส่งผ่านออกมาจากส่วนที่ซัลด์สามารถหาได้จากการแทนสมการที่ 3.16 และ 3.17 ด้วยสมการที่ 3.19 และ 3.20 ตามลำดับ ดังนั้นการซัลด์จะมีคลื่นที่ส่งผ่านออกมามีค่าเท่ากับ

$$E_t = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} E_0 \quad (3.20)$$

และ

$$H_t = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} H_0 \quad (3.21)$$

โดยหมายเหตุว่าเมื่อสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถูกสะท้อนออกจากกันในแต่ละพื้นผิวของวัตถุแล้ว ผลกระทบทั้งหมดข้ามพื้นผิวทั้งสองเหมือนกันทั้งสองรูปแบบของสนาม ถ้าส่วนที่ซัลด์เป็นโลหะและพื้นที่รอบ ๆ เป็นฉนวน ฉะนั้น $Z_1 \gg Z_2$ ภายใต้เงื่อนไขของการสะท้อนมากเกิดขึ้นเมื่อสัญญาณผ่านเข้าสู่ส่วนที่ซัลด์หรือพื้นผิวของวัตถุส่วนแรกสำหรับสนามไฟฟ้า และเมื่อคลื่นที่เหลือออกจากส่วนซัลด์สำหรับในกรณีของสนามแม่เหล็ก หรือหมายความว่า การสะท้อนครั้งแรกจะเกิดที่พื้นผิวแรกในกรณีของสนามไฟฟ้า ยิ่งวัตถุยิ่งบางการสูญเสียจากการสะท้อนจะดี ส่วนสนามแม่เหล็กการสะท้อนครั้งแรกจะเกิดที่พื้นผิวที่สอง เมื่อ $Z_1 \gg Z_2$ สมการที่ 3.20 และ 3.21 สามารถลดเหลือ

$$E_t = \frac{4Z_2}{Z_1} E_0 \quad (3.22)$$

และ

$$H_t = \frac{4Z_2}{Z_1} H_0 \quad (3.23)$$

เมื่อแทนค่าความต้านทาน Z_1 ด้วยค่าความต้านทานของคลื่น Z_w และแทนค่าความสูญเสียการสะท้อน (Z_2) ด้วยค่าความต้านทานซัลด์ Z_s ทั้งค่า E และ H สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$R = 20 \log \frac{|Z_w|}{4|Z_s|} \quad \text{dB} \quad (3.24)$$

เมื่อ

Z_w คือ ค่าความต้านทานของคลื่นก่อนกระทบเข้าสู่วัตถุชี้ลด์ (จากสมการที่ 3.1)

Z_s คือ ค่าความต้านทานชี้ลด์ (จากสมการที่ 3.5)

สมการการสูญเสียการสะท้อนเหล่านี้มีไว้เพื่อคำนวณคลื่นระนาบ (Plan wave) ที่เข้าใกล้พื้นผิวสำหรับการตกกระทบทั่วไป ถ้าคลื่นเข้าใกล้การตกกระทบในรูปแบบอื่น ๆ การสูญเสียการสะท้อนจะเพิ่มขึ้นตามมุมของการตกกระทบ ผลจากการกระทบแบบนี้มีผลกระทบเช่นเดียวกับรูปแบบของคลื่นระนาบชนิดอื่น ๆ ที่แตกต่างกันออกไป อาทิเช่นผิวทรงกลมก็มีความสูญเสียการสะท้อนมากกว่าความลึกผิว (Skin depth)

- ค่าความสูญเสียการสะท้อนต่อพื้นราบ (Reflection Loss to Plane Waves)

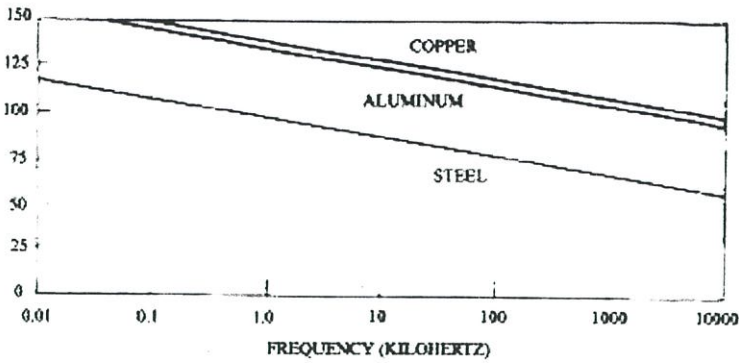
ในกรณีของพื้นราบ (Far filed) ค่าความต้านทานคลื่น Z_w มีค่าเท่ากับคุณสมบัติความต้านทานของพื้นที่ว่างอิสระ (Free space) หรือ Z_0 (ซึ่งมีค่าเท่ากับ 377 โอห์ม) ดังนั้นสมการที่ 3.24 จึงกลายเป็น

$$R = 20 \log \frac{94.25}{|Z_s|} \quad \text{dB} \quad (3.25)$$

ดังนั้น ค่าความต้านทานชี้ลด์มีค่าต่ำ ค่าความสูญเสียการสะท้อนก็จะมีค่ามาก เมื่อแทนสมการที่ 3.5 ด้วย $|Z_s|$ และจัดสมการที่ 3.25 ได้เป็น

$$R = 168 + 10 \log(\sigma_r / \mu_r f) \quad \text{dB} \quad (3.26)$$

รูปที่ 3.11 แสดงค่าความสูญเสียการสะท้อนสำหรับวัตถุสามชนิด ได้แก่ ทองแดง อลูมิเนียม และเหล็กกล้า เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับรูปที่ 3.8 จะพบว่าเหล็กกล้าจะมีค่าความสูญเสียการดูดกลืนมากกว่าทองแดง หรือกล่าวได้ว่ามีค่าความสูญเสียการสะท้อนน้อยกว่านั่นเอง



รูปที่ 3.11 ค่าสูญเสียสะท้อนจะสำหรับ Plane wave จะมีค่าสูงที่สุดที่ความถี่ต่ำสำหรับวัตถุที่มีค่าความเป็นตัวนำสูง

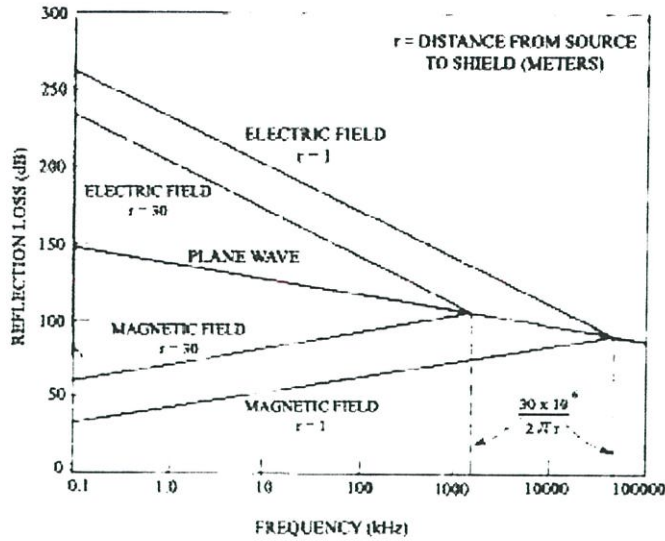
- ค่าความสูญเสียการสะท้อนในสนามใกล้ (Reflection Loss in Near Field)

ในสนามใกล้ อัตราส่วนระหว่างสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กไม่สามารถกำหนดได้ด้วยคุณสมบัติความต้านทานของสาร ทว่าอัตราส่วนระหว่างสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดซึ่งทำหน้าที่คล้ายสายอากาศ ถ้าแหล่งกำเนิดมีแรงดันสูงและกระแสต่ำ ค่าความต้านทานคลื่นจะมีค่ามากกว่า 377 โอห์ม สนามที่เกิดขึ้นจะมีค่าความต้านทานสูงหรือสนามไฟฟ้า แต่หากแหล่งกำเนิดมีแรงดันต่ำและกระแสสูง ค่าความต้านทานคลื่นจะมีค่าน้อยกว่า 377 โอห์ม สนามที่เกิดขึ้นจะมีค่าความต้านทานต่ำหรือสนามแม่เหล็ก

เนื่องจากค่าความสูญเสียการสะท้อน (ตามสมการที่ 3.24) เป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนระหว่างความต้านทานคลื่น และความต้านทานซีลด์ ความสูญเสียการสะท้อนแปรเปลี่ยนตามค่าความต้านทานคลื่น เนื่องจากสนามความต้านทานสูงหรือสนามไฟฟ้ามีความสูญเสียการสะท้อนมากกว่าที่พื้นราบ (Plan wave) ทำนองเดียวกันสนามความต้านทานต่ำหรือสนามแม่เหล็กมีความสูญเสียสะท้อนน้อยกว่าพื้นราบเช่นกัน สภาวะดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งใช้ทองแดงทำการซีลด์แยกจากแหล่งกำเนิดที่ระยะห่าง 1 เมตรและ 30 เมตร

จากรูปที่ 3.12 จะพบว่าที่ระยะห่างใด ๆ ของแหล่งจ่ายและซีลด์ รูปกราฟจะเกี่ยวข้องกับความถี่ ซึ่งการแบ่งระยะห่างทั้งสองมีค่าเท่ากับ $\lambda/2\pi$ อาทิเช่น ที่ระยะ 30 เมตรเส้นกราฟของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีจุดตัดที่ ความถี่ 1.6 MHz

จากรูปที่ 3.12 จะพบว่าความสูญเสียการสะท้อนของสนามไฟฟ้าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น จะกระทั่งถึงจุดแบ่งที่ $\lambda/2\pi$ ถัดออกมาจะพบว่าความสูญเสียการสะท้อนจะลดลงเช่นเดียวกันที่สนามราบ (Plan wave) ในขณะที่ความสูญเสียการสะท้อนของสนามแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นที่ความถี่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดแบ่งที่ $\lambda/2\pi$ เช่นเดียวกัน ถัดจากนั้นความสูญเสียจะเริ่มลดลงที่อัตราส่วนเดียวกันกับพื้นราบ (Plan wave)



รูปที่ 3.12 ค่าสูญเสียการสะท้อนในชีลด์ทองแดงตามความถี่ ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดและชนิดของคลื่น

- ค่าความสูญเสียการสะท้อนในสนามไฟฟ้า (Electric Field Reflection Loss)

สนามไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดความต้านทานคลื่นสามารถประมาณได้โดยสมการดังต่อไปนี้

เมื่อ $r < \lambda/2\pi$;

$$|Z_w|_e = \frac{1}{2\pi f \epsilon r} \quad (3.27)$$

เมื่อ r คือระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดและชีลด์ในหน่วยเมตร และ ϵ คือค่าคงที่ฉนวน (Dielectric constant) ความสูญเสียการสะท้อนสามารถอธิบายได้โดยแทนสมการที่ 2.27 ในสมการที่ 2.24 ดังนี้

$$R_e = 20 \log \frac{1}{8\pi f \epsilon r |Z_s|} \quad \text{dB} \quad (3.28)$$

หรือเมื่อแทนค่าพื้นที่ว่างอิสระ (Free space) ด้วยค่า ϵ

$$R_e = 20 \log \frac{4.5 \times 10^9}{f r |Z_s|} \quad \text{dB} \quad (3.29)$$

เมื่อ r มีค่าเป็นหน่วยเมตร เมื่อแทนสมการที่ 3.5 ด้วย $|Z_s|$ และนำมาแทนในสมการที่ 3.29 จะได้เป็น

$$R_e = 322 + 10 \log \frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 r^2} \quad \text{dB} \quad (3.30)$$

จากรูปที่ 3.12 เส้นที่เป็นตัวแทนสนามไฟฟ้า (Electric field) สามารถร่างได้จากสมการที่ 3.30 สำหรับการชี้ลัดด้วยทองแดงด้วย r ที่ระยะ 1 เมตรและ 30 เมตร สมการสามารถร่างความสูญเสียการสะท้อนที่ระยะที่กำหนดจากแหล่งกำเนิดที่สร้างสนามไฟฟ้าเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าจะมีส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กบ้างเล็กน้อยที่รวมอยู่ในสนามไฟฟ้า ดังนั้นจึงทำให้มีความสูญเสียสะท้อนบางพื้นที่บนเส้นระหว่างสนามไฟฟ้า (Electric field line) และเส้นพื้นราบ (Plane wave line) ดังแสดงในรูปที่ 3.12

- ค่าความสูญเสียการสะท้อนในสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Reflection Loss)

สนามแม่เหล็กของแหล่งกำเนิดความต้านทานคลื่นสามารถประมาณได้โดยสมการดังต่อไปนี้เมื่อ $r < \lambda/2\pi$;

$$|Z_w|_m = 2\pi f \mu r \quad (3.31)$$

เมื่อ r คือระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดและชี้ลัดในหน่วยเมตร และ μ คือค่าซึมทราบของวัสดุ ความสูญเสียการสะท้อนสามารถอธิบายได้โดยแทนสมการที่ 2.31 ในสมการที่ 2.24 ดังนี้

$$R_m = 20 \log \frac{2\pi f \mu r}{4|Z_s|} \quad \text{dB} \quad (3.32)$$

หรือเมื่อแทนค่าพื้นที่ว่างอิสระ (Free space) ด้วยค่า μ

$$R_m = 20 \log \frac{1.97 \times 10^{-6} fr}{|Z_s|} \quad \text{dB} \quad (3.33)$$

เมื่อ r มีค่าเป็นหน่วยเมตร เมื่อแทนสมการที่ 3.5 ด้วย $|Z_s|$ และนำมาแทนในสมการที่ 3.29 จะได้เป็น

$$R_m = 14.6 + 10 \log \left(\frac{fr^2 \sigma_r}{\mu_r} \right) \quad \text{dB} \quad (3.34)$$

จากรูปที่ 3.12 เส้นที่เป็นตัวแทนสนามแม่เหล็ก (Magnetic field) สามารถร่างได้จากสมการที่ 3.34 สำหรับการชี้ลัดด้วยทองแดงด้วย r ที่ระยะ 1 เมตรและ 30 เมตร สมการสามารถร่างความสูญเสียการสะท้อนที่ระยะที่กำหนดจากแหล่งกำเนิดที่สร้างสนามแม่เหล็กเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กจะมีส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าบ้างเล็กน้อยที่รวมอยู่ใน

สนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงทำให้มีความสูญเสียสะท้อนบางพื้นที่บนเส้นระหว่างสนามแม่เหล็ก (Magnetic field line) และเส้นพื้นราบ (Plane wave line) ดังแสดงในรูปที่ 3.12

ในกรณีที่ไม่ทราบระยะห่างของแหล่งกำเนิด ค่าความสูญเสียการสะท้อนแม่เหล็กในสนามไกลสามารถหาค่าเท่ากับศูนย์ได้ที่ค่าความถี่ต่ำ

- สมการทั่วไปสำหรับความสูญเสียการสะท้อน

หากไม่นับการสะท้อนซ้ำซ้อนภายในตัววัตถุแล้ว สมการทั่วไปสำหรับความสูญเสียการสะท้อนสามารถเขียนได้เป็น

$$R = C + 10 \log \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r} \right) \left(\frac{1}{f^n r^m} \right) \quad (3.35)$$

เมื่อค่าคงที่ C, n และ m มาจากตารางที่ 3.3 สำหรับคลื่นระนาบ (Plane wave) สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก

ตารางที่ 3.3 ค่าคงที่ที่ใช้ในสมการ 3.35

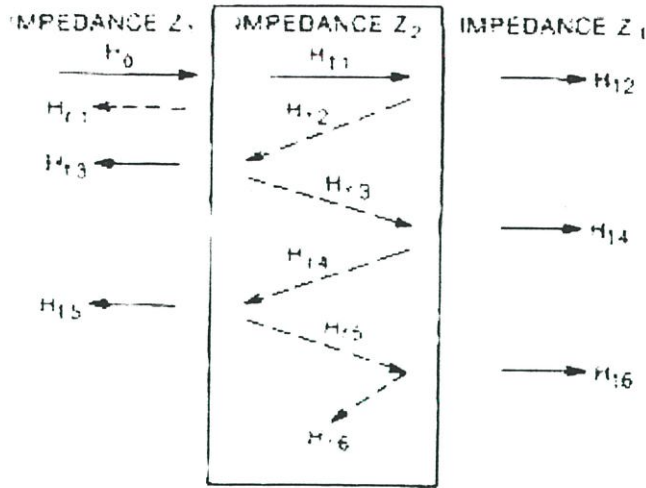
Type of Field	C	n	m
Electric field	322	3	2
Plane wave	168	1	0
Magnetic field	14.6	-1	-2

สมการที่ 3.35 มีค่าเท่ากับสมการที่ 3.26 สำหรับคลื่นระนาบ (Plane wave) สมการที่ 3.30 สำหรับสนามไฟฟ้า และสมการที่ 3.34 สำหรับสนามแม่เหล็ก จากสมการที่ 3.35 แสดงให้เห็นว่าความสูญเสียการสะท้อนเป็นฟังก์ชันของค่าซิมทราปของวัสดุหารด้วยค่าความเป็นตัวนำของวัสดุที่ใช้ในการชิลด์นั่นเอง

- การสะท้อนซ้ำซ้อนในวัสดุชิลด์บาง

ถ้าวัสดุชิลด์บาง คลื่นสะท้อนจากพื้นผิวที่สองจะทำให้เกิดการสะท้อนซ้ำซ้อนที่พื้นผิวแรก และคลื่นจะสะท้อนกลับมาที่พื้นผิวที่สองซึ่งจะทำให้เกิดการสะท้อนอีกครั้งดังแสดงในรูปที่ 3.13 สำหรับในกรณีวัสดุชิลด์หนา การสะท้อนซ้ำซ้อนไม่ต้องนำมาคำนวณเนื่องจากความสูญเสียการดูดกลืนมีค่าสูง ในขณะที่เดียวกัน เมื่อคลื่นผ่านถึงพื้นผิวที่สองในครั้งที่สอง ค่าแอมพลิจูดของคลื่นจะเหลือเพียงเล็กน้อย เนื่องจากคลื่นดังกล่าวผ่านความหนาของชิลด์ถึงสามครั้ง

สำหรับสนามไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่ของคลื่นที่ตกกระทบจะถูกสะท้อนที่พื้นผิวแรก และมีเพียงเล็กน้อยที่ผ่านซึลด์ไปได้ ดังจะเห็นได้จากสมการที่ 3.16 เมื่อ $Z_2 \ll Z_1$ ดังนั้นการสูญเสียซ้ำซ้อนในซึลด์จึงไม่นำมาคิดคำนวณสำหรับสนามไฟฟ้า



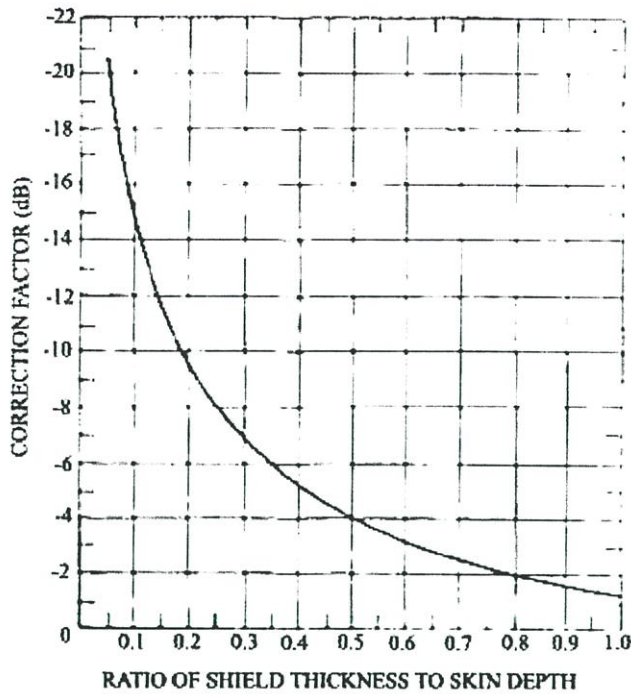
รูปที่ 3.13 แสดงการสะท้อนซ้ำซ้อนที่เกิดในซึลด์บาง

สำหรับสนามแม่เหล็ก โดยส่วนใหญ่ของคลื่นที่ผ่านตัวซึลด์ที่พื้นผิวแรก ดังแสดงในสมการที่ 3.17 เมื่อ $Z_2 \ll Z_1$ ค่าของคลื่นที่ส่งผ่านจะมีค่าสองเท่าของส่วนที่ตกกระทบ เนื่องจากค่าของสนามแม่เหล็กจะมีค่ามากในวัสดุซึลด์ ดังนั้นผลกระทบของการสะท้อนซ้ำซ้อนภายในซึลด์จำเป็นต้องนำมาใช้ในการคำนวณ

ค่าแก้ (Correction factor) สำหรับการสะท้อนซ้ำซ้อนของสนามแม่เหล็กในซึลด์ที่มีความหนา t และค่าความลึกผิว (Skin depth) δ ได้แก้

$$B = 20 \log(1 - e^{-2t/\delta}) \text{ dB} \quad (3.36)$$

รูปที่ 3.14 แสดงกราฟของค่าแก้ B ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ t/δ โดยค่าของค่าแก้เป็นค่าติดลบซึ่งมีความหมายว่าการซึลด์ลดลงจากการสะท้อนของวัสดุซึลด์บาง



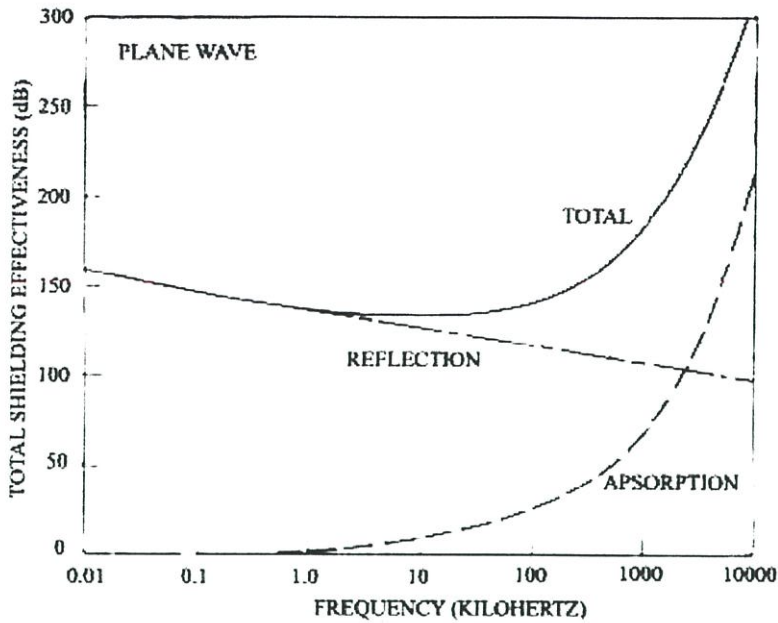
รูปที่ 3.14 ค่าแก้ไขของการสูญเสียการสะท้อนซ้ำซ้อน (B) สำหรับแผ่นชีลด์บาง สำหรับสนามแม่เหล็ก

3.6 ส่วนประกอบของค่าสูญเสียการดูดกลืนและการสะท้อน (Composite absorption and reflection loss)

- คลื่นระนาบ (Plane wave)

ค่าสูญเสียทั้งหมดสำหรับคลื่นระนาบในสนามไกลเป็นผลรวมระหว่างค่าสูญเสียการดูดกลืนและการสะท้อนดังที่ได้อธิบายในสมการที่ 3.8 ค่าแก้ไขการสะท้อนซ้ำซ้อนในเทอม B สามารถละทิ้งได้ในคลื่นระนาบ เนื่องจากค่าสูญเสียการสะท้อนมีค่าสูงกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับในเทอมของค่าแก้ไข อาทิเช่น ถ้าค่าสูญเสียการดูดกลืนมีค่ามากกว่า 1 เดซิเบล ในเทอมของค่าแก้ไขจะมีค่าน้อยกว่า 11 เดซิเบล แต่ถ้าหากว่าถ้าค่าสูญเสียการดูดกลืนมีค่ามากกว่า 4 เดซิเบล ในเทอมของค่าแก้ไขจะมีค่าน้อยกว่า 2 เดซิเบล

รูปที่ 3.15 แสดงคุณสมบัติการชีลด์โดยรวมของแผ่นทองแดงหนา 0.020 นิ้ว จากรูปจะพบว่าค่าสูญเสียการสะท้อนจะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าความต้านทานชีลด์ Z_s เพิ่มขึ้นพร้อมกับความถี่ อย่างไรก็ตามค่าสูญเสียการดูดกลืนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ แต่จะลดลงเมื่ออยู่ในภาวะความลึกผิว (Skin depth) คุณสมบัติการชีลด์มีค่าต่ำสุดที่ความถี่ปานกลาง ๆ จากรูปที่ 3.15 ในกรณีที่ความถี่ 10 kHz ปรากฏว่าเป็นคลื่นระนาบ (Plane wave) ที่ความถี่ต่ำ ความสูญเสียการสะท้อนเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ชีลด์เป็นส่วนใหญ่ แต่ในขณะที่การชีลด์ที่ความถี่สูงจะมาจากความสูญเสียการดูดกลืน



รูปที่ 3.15 คุณสมบัติการชิลด์ของชิลด์ทองแดงหนา 0.02 นิ้วในสนามไกล (Far field)

- สนามไฟฟ้า

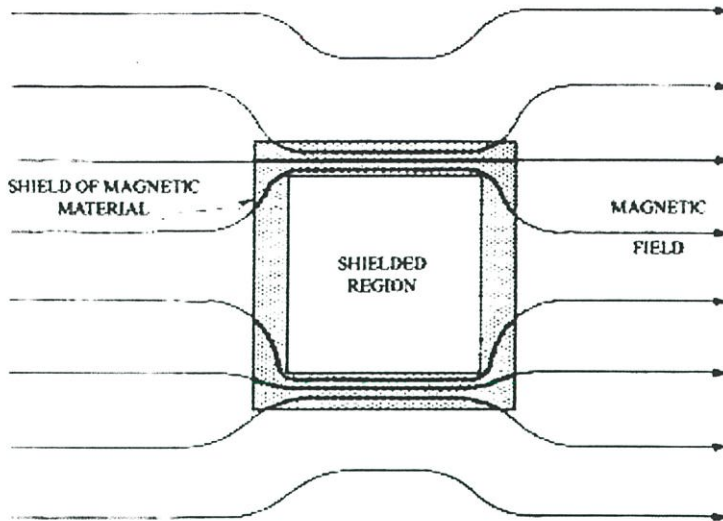
ค่าสูญเสียทั้งหมดสำหรับสนามไฟฟ้า เป็นผลรวมระหว่างค่าสูญเสียการดูดกลืนจากสมการที่ 3.15 และค่าสูญเสียการสะท้อนจากสมการที่ 3.30 ดังที่ได้อธิบายด้วยสมการที่ 3.8 ค่าแก้การสะท้อนซ้ำซ้อนในเทอม B สามารถตั้งได้ในสนามไฟฟ้า เนื่องจากค่าสูญเสียการสะท้อนมีค่าสูงกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับในเทอมของค่าแก้ ที่ความถี่ต่ำ ค่าสูญเสียการสะท้อนเป็นส่วนหลักในการชิลด์สำหรับสนามไฟฟ้า ส่วนที่ความถี่สูง ค่าสูญเสียการดูดกลืนจะเป็นส่วนหลักในการชิลด์แทน

- สนามแม่เหล็ก

ค่าสูญเสียทั้งหมดสำหรับสนามแม่เหล็ก เป็นผลรวมระหว่างค่าสูญเสียการดูดกลืนจากสมการที่ 3.15 และค่าสูญเสียการสะท้อนจากสมการที่ 3.30 ดังที่ได้อธิบายด้วยสมการที่ 3.8 ถ้าส่วนที่ชิลด์หนา (ค่าสูญเสียการดูดกลืนมีค่ามากกว่า 9 เดซิเบล) ค่าแก้การสะท้อนซ้ำซ้อนในเทอม B สามารถตั้งได้หากส่วนที่ชิลด์บาง ค่าแก้จากสมการที่ 3.36 หรือจากรูปที่ 3.14 ต้องนำมาคิดคำนวณรวม

ในสนามใกล้ (Near field) ค่าสูญเสียการสะท้อนของสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่ำมีค่าน้อย ขณะที่การสะท้อนซ้ำซ้อนมีผลกระทบอย่างมากต่อชิลด์แบบบาง ดังนั้นค่าความสูญเสียหลักสำหรับสนามแม่เหล็กคือค่าสูญเสียการดูดกลืน เนื่องจากทั้งการสูญเสียแบบดูดกลืนและการสะท้อนมีค่าน้อยที่ย่านความถี่ต่ำ ดังนั้นคุณสมบัติการชิลด์ทั้งหมดก็มีค่าต่ำด้วย จึงเป็นการยากที่จะทำการชิลด์

สนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่ำ การเพิ่มส่วนป้องกันเพื่อต่อต้านสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำสามารถทำได้ด้วยการแบ่งส่วนแม่เหล็กที่มีค่ารีลักแตนซ์ต่ำ (Low-reluctance) เพื่อเบี่ยงสนามรอบวงจร ดังแสดงในรูปที่ 3.16



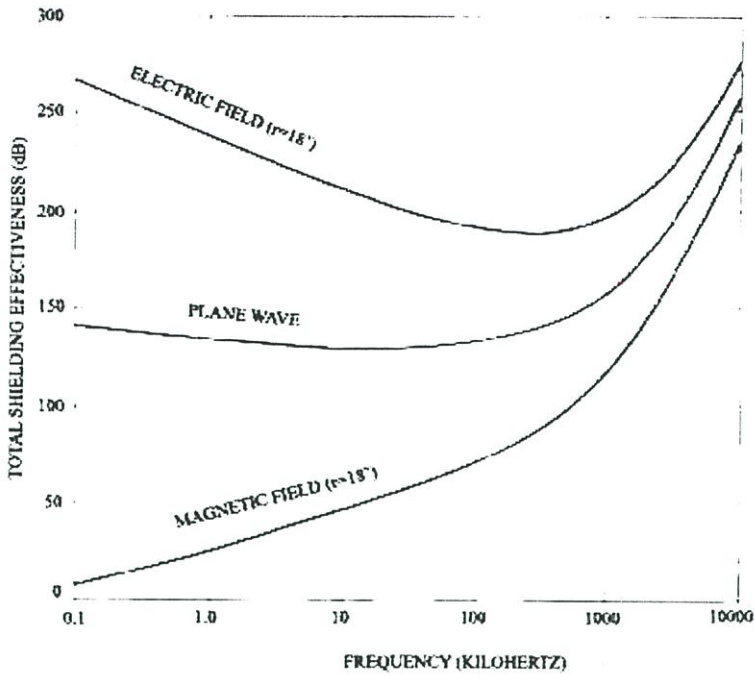
รูปที่ 3.16 การใช้วัสดุแม่เหล็กด้วยส่วนที่มีค่ารีลักแตนซ์ต่ำสำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก

3.7 ภาพรวมของสมการการชิลด์

รูปที่ 3.17 แสดงส่วนประกอบของคุณสมบัติการชิลด์ของแผ่นอลูมิเนียมหนา 0.02 นิ้ว สำหรับสนามไฟฟ้า คลื่นระนาบ และสนามแม่เหล็ก จากรูปจะพบว่าการชิลด์ที่สำคัญสำหรับสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำ

ที่ความถี่สูง (มากกว่า 10 MHz) ความสูญเสียการดูดกลืนมีค่าสูงสุด และชิลด์ที่เป็นโลหะที่มีความหนาเพียงพอเหมาะสมสำหรับการชิลด์ในการใช้งานทั่วไป

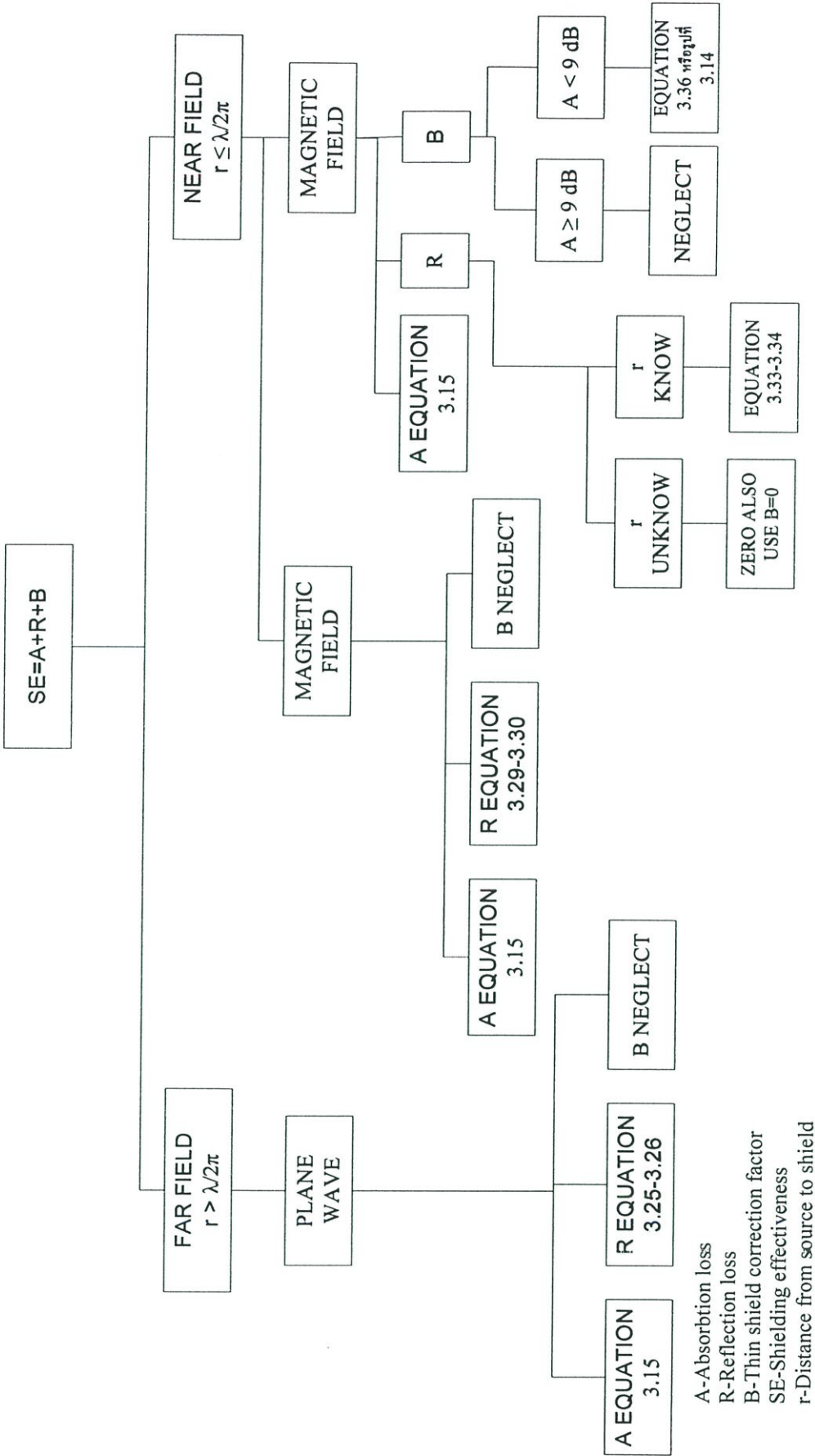
รูปที่ 3.18 เป็นภาพรวมของสมการที่ใช้ในการอธิบายคุณสมบัติการชิลด์ภายใต้ภาวะต่าง ๆ กัน



รูปที่ 3.17 แสดงคุณสมบัติการชดเชยของสนามไฟฟ้า คลื่นระนาบ(Plane wave) และสนามแม่เหล็กของแผ่นอลูมิเนียมหนา 0.02 นิ้ว

3.8 บทสรุป

ในบทนี้เป็นการแนะนำพื้นฐาน และทำความเข้าใจเกี่ยวกับการกำบังคลื่นหรือการชดเชยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยกล่าวถึงคลื่นสนามใกล้ (Near fields) คลื่นสนามไกล (Far fields) คุณลักษณะและความต้านทานคลื่น ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาคุณสมบัติกำบังคลื่น ได้แก่ ค่าความเป็นตัวนำ ค่าความซึมซาบ และค่าความเป็นฉนวน รวมทั้งส่วนประกอบของค่าสูญเสียของการดูดกลืนและการสะท้อนของวัสดุ ส่วนรูปแบบการทดสอบทั้งหมดจะกล่าวโดยละเอียดในบทที่ 4 ถัดไป



รูปที่ 3.18 ภาพรวมของสมการที่ใช้ในการอธิบายคุณสมบัติการชดเชยได้ภาวะต่าง ๆ กัน

บทที่ 4

การทดลอง และการจำลองแบบ

4.1 บทนำ

บทนี้เป็นกรกล่าวถึงการทดลองและการจำลองด้วยโปรแกรม FLO/EMC โดยสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อหลักๆ ด้วยกัน 3 หัวข้อได้แก่ หัวข้อที่ 4.2 กล่าวถึงวัตถุประสงค์ที่ทำการทดลองและการจำลองด้วย โปรแกรม ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจถึงเหตุผลที่ทำการทดลอง หัวข้อที่ 4.3 กล่าวถึงขอบเขตที่ทำการทดลองและการจำลองในวิทยานิพนธ์นี้ และ หัวข้อที่ 4.4 กล่าวถึงรูปแบบและการติดตั้งวงจรเพื่อทำการทดลองรวมทั้งการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการจำลองด้วยโปรแกรม

4.2 วัตถุประสงค์

การทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติการกำบังหรือการชีลด์ของสารละลายโดยสารที่ใช้ได้แก่ เกลือและด่างทับทิม โดยนำเสนอว่า เมื่อสารละลายดังกล่าวมีความเข้มข้นต่างกัน รวมทั้งเมื่อทำการบรรจุในภาชนะต่างกันรูป จะมีคุณสมบัติการชีลด์ต่างกัน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขและขอบเขตดังในหัวข้อที่ 4.3 โดยที่รูปแบบที่ทำการทดลองจะเป็นไปตามหัวข้อที่ 4.4

4.3 ขอบเขตของการทดลอง

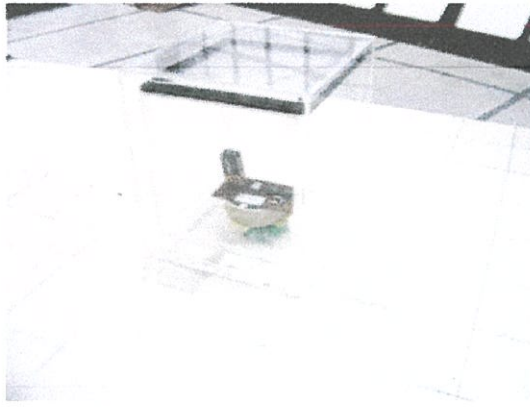
วิทยานิพนธ์มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาและวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ และด่างทับทิมที่ความเข้มข้นต่างกัน รวมถึงในด้านประสิทธิผลการชีลด์เมื่อบรรจุภาชนะที่ใช้บรรจุสารละลายดังกล่าว

ภาชนะที่ใช้ในการบรรจุสารละลายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่

1.5.1) ภาชนะแบบปิดทุกด้านเท่ากัน

1.5.2) ภาชนะแบบเปิดด้านบนที่มีความหนาสำหรับบรรจุสารละลาย โดยจะนำภาชนะดังกล่าวมาบรรจุสารละลายและนำไปวางวางระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณ และสายอากาศสำหรับทำหน้าที่รับสัญญาณ โดยขนาดความกว้างในการบรรจุสารละลายจะมีความกว้างดังต่อไปนี้

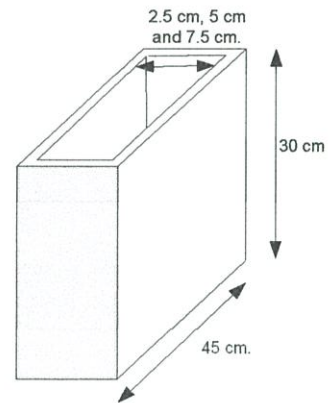
- 2.5 เซนติเมตร
- 5 เซนติเมตร
- 7.5 เซนติเมตร



รูปที่ 4.1 ภาชนะแบบเปิดทุกด้านเท่ากัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 ภาชนะแบบเปิดด้านบนที่มีความหนาสำหรับบรรจุสารละลาย (ก) และ (ข)

เมื่อทำการกำหนดภาชนะที่ใช้ในการทดสอบข้างต้น ขั้นตอนถัดมาเป็นการกำหนดความเข้มข้นของสารละลายที่ระดับต่าง ๆ ในการศึกษาและวิเคราะห์การซึ่ดของสสารนั้น ๆ โดยกำหนดความเข้มข้นของสารละลายดังต่อไปนี้ ที่สารละลาย $x\%$ แสดงว่ามี เนื้อสาร x กรัม ในของเหลว 100 มิลลิลิตร อาทิเช่น สารละลายเกลือ 5% แสดงว่า ในสารละลายนั้นมีเกลือละลายอยู่ 5 กรัมอยู่ในของเหลว 100 มิลลิลิตร เป็นต้น

ในขั้นถัดมาเป็นการกำหนดเงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายในแต่ละรูปแบบของการทดสอบในรูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

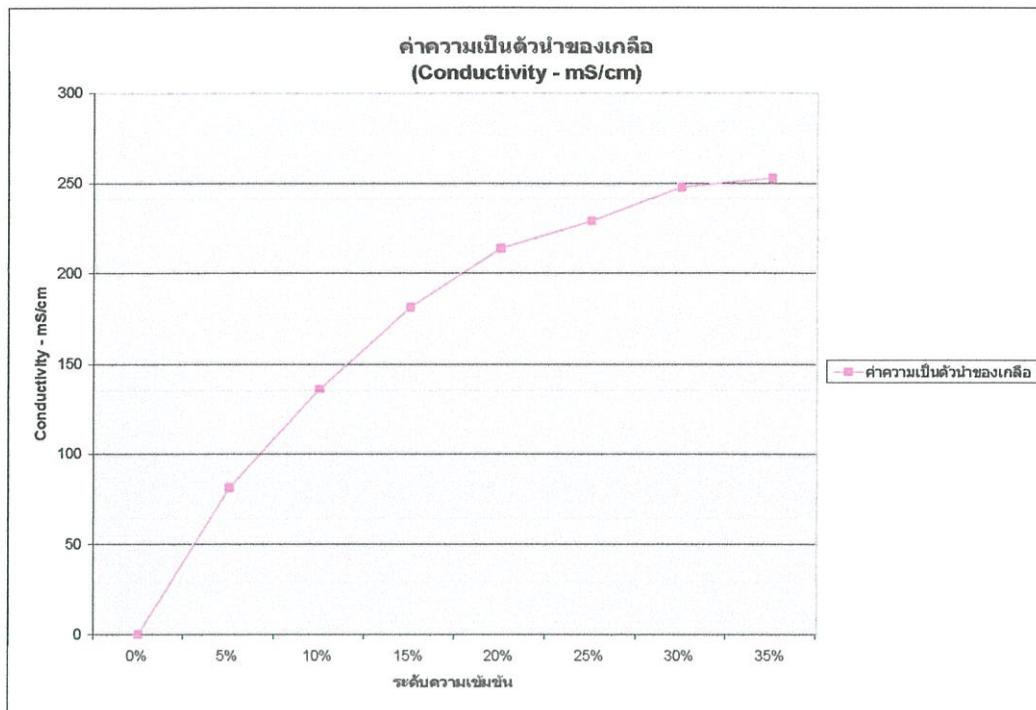
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการทดสอบการซึ่ดของสารละลายในภาชนะต่าง ๆ

ประเภทสาร	ภาชนะแบบปิด	ภาชนะเปิดหนา 2.5 ซม.	ภาชนะเปิดหนา 5 ซม.	ภาชนะเปิดหนา 7.5 ซม.
เกลือ	0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% และ 35%			
ค้างทับทิม	0%, 5%, 10%, 15% และ 20%			

โดยที่สารละลายแต่ละชนิดและแต่ละระดับความเข้มข้นจะมีค่าความเป็นตัวนำที่ต่างกัน โดยทำการวัดค่าความเป็นตัวนำที่ระดับความเข้มข้นด้วยเครื่องมือวัดค่าความเป็นตัวนำ ซึ่งได้แสดงค่าความเป็นตัวนำในตารางที่ 4.2 สำหรับเกลือ และตารางที่ 4.3 สำหรับค้างทับทิม

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความเป็นตัวนำของเกลือเมื่ออยู่ในรูปของสารละลาย

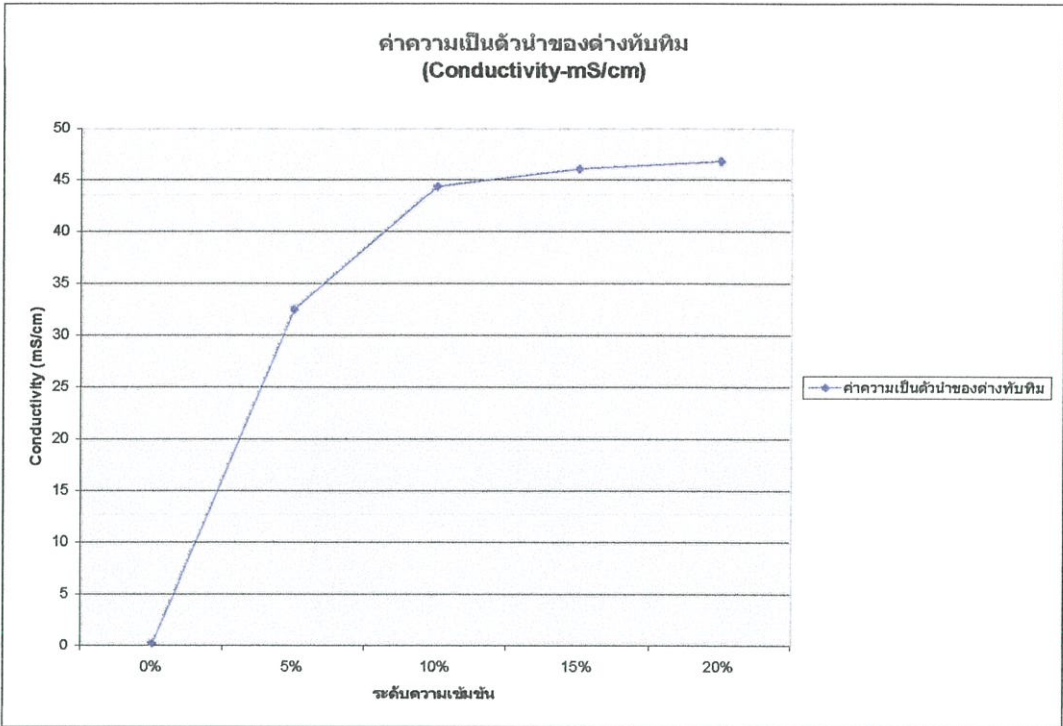
ระดับความเข้มข้น	ค่าความเป็นตัวนำของเกลือ (Conductivity - mS/cm)	หมายเหตุ
0%	0.247	-
5%	81.6	-
10%	136.3	-
15%	181.5	-
20%	214.0	-
25%	229.0	เกลือตกตะกอน ไม่สามารถละลายได้อีก
30%	248.0	เกลือตกตะกอน ไม่สามารถละลายได้อีก
35%	253.0	เกลือตกตะกอน ไม่สามารถละลายได้อีก



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มข้นและค่าความเป็นตัวนำของสารละลายเกลือ

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความเป็นตัวนำของค้างทับทิมเมื่ออยู่ในรูปของสารละลาย

ระดับความเข้มข้น	ค่าความเป็นตัวนำของค้าง-ทับทิม (Conductivity - mS/cm)	หมายเหตุ
0%	0.247	-
5%	32.5	-
10%	44.4	ค้างทับทิมตกตะกอน ไม่สามารถละลายได้อีก
15%	46.1	ค้างทับทิมตกตะกอน ไม่สามารถละลายได้อีก
20%	46.8	ค้างทับทิมตกตะกอน ไม่สามารถละลายได้อีก



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นและค่าความเป็นตัวนำของสารละลายต่างหับทิม

โดยค่าความเป็นตัวนำที่ได้จากการวัดนี้ จะนำไปใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม FLO/EMC เพื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติการกำบังของสารละลายที่เงื่อนไขต่าง ๆ กับการทดสอบจริงต่อไป อนึ่ง เนื่องจากติดขัดด้วยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าพารามิเตอร์ค่าความชื้นของสารดังกล่าว ดังนั้น การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการจำลองโดยอาศัยค่าความเป็นตัวนำของสารที่ได้จากการวัดมาทำการจำลองด้วยโปรแกรม FLO/EMC เพียงค่าเดียวเท่านั้น ส่วนค่าความชื้นของสารละลายที่ต้องใช้ในการป้อนค่าพารามิเตอร์ให้กับโปรแกรมกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าความชื้นของน้ำเท่านั้น

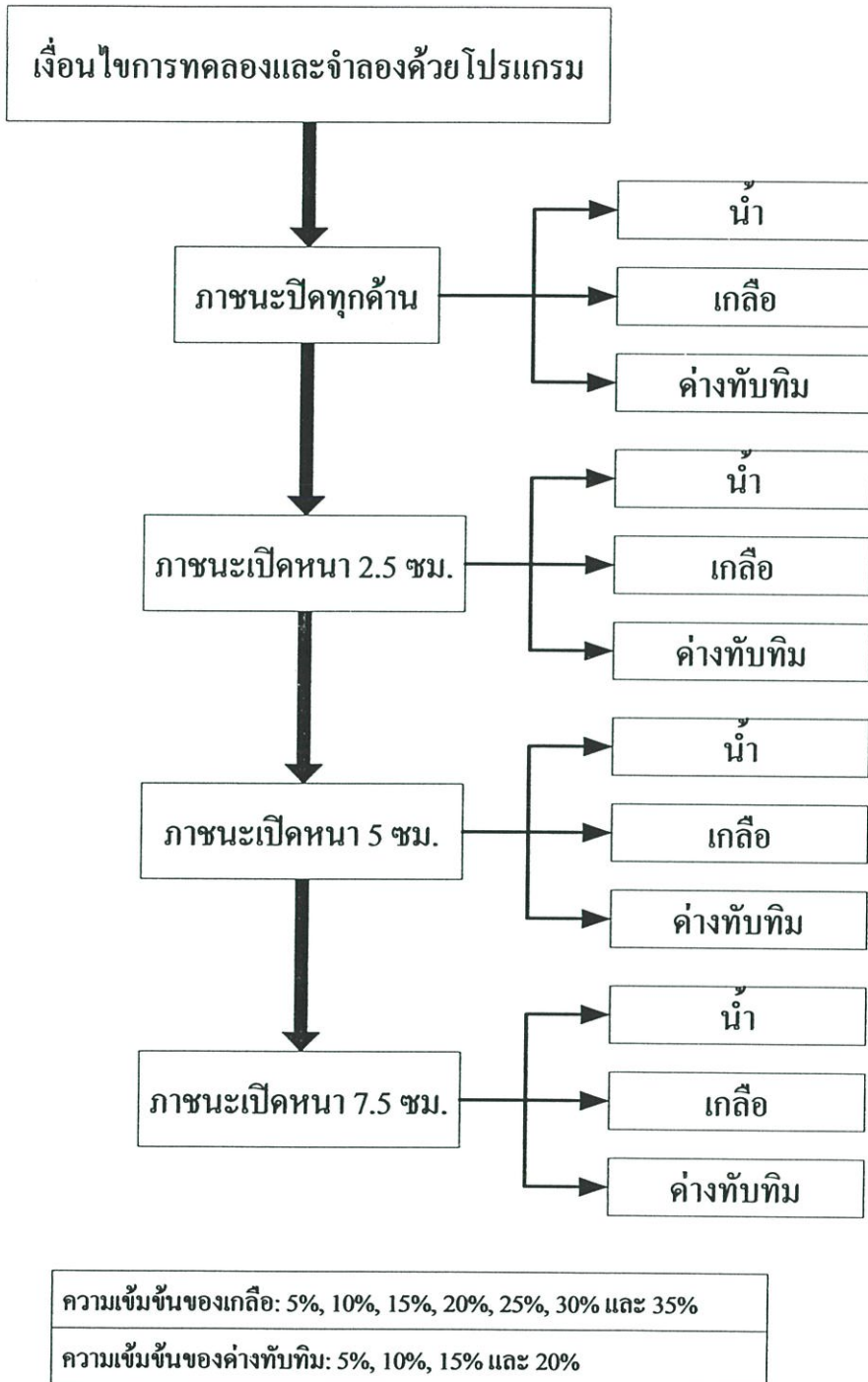
สำหรับการวัดนี้ได้อ้างอิงวิธีการจากมาตรฐาน CISPR 22 โดยกำหนดระยะวัดระหว่างสายอากาศและแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนที่ระยะ 3 เมตร ในห้องปิดกั้นกึ่งการสะท้อน (Semi anechoic chamber) มาตรฐาน และย่านความถี่ที่ใช้ในการวัดตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1,000 MHz

4.4 รูปแบบที่ทำการทดลอง และการจำลองด้วยโปรแกรม

รูปแบบในการทดลองในงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ รูปแบบการกำหนดเงื่อนไขการทดลอง และรูปแบบการทดสอบในการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยในหัวข้อที่ 4.4.1 เป็นกำหนดรูปแบบการกำหนดเงื่อนไขของระดับความชื้นของสารละลายและภาชนะที่ใช้บรรจุ 4.4.2 เป็นการกำหนดวิธีการทดสอบทางด้านสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

4.4.1 รูปแบบการกำหนดเงื่อนไขการทดลองและการจำลองในการวิจัย

ในการวิจัยนี้มีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการวัดการซึบดน้ำทั้งหมด 45 เงื่อนไข โดยสารที่ใช้ ได้แก่ เกลือที่มีความเข้มข้น 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% และ 35% และค่างทับทิมที่ระดับความเข้มข้น 0%, 5%, 10%, 15% และ 20% ส่วนภาชนะที่ใช้บรรจุมีทั้งหมด 3 แบบ โดยแสดงเป็นแผนภูมิต่างรูปที่ 4.5

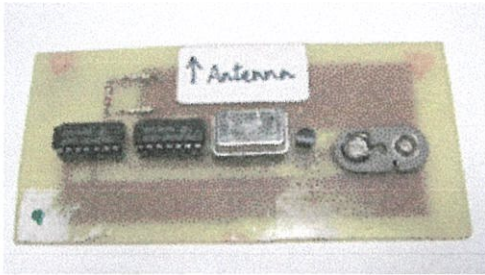


รูปที่ 4.5 เงื่อนไขการทดลองและการจำลองการซึบดน้ำด้วยสารละลายในรูปแบบต่าง ๆ

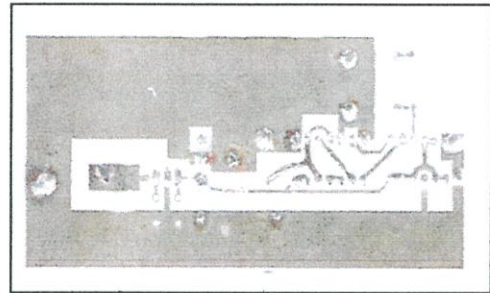
โดยในแต่ละเงื่อนไขจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลักได้แก่

ก) แหล่งกำเนิดสัญญาณ

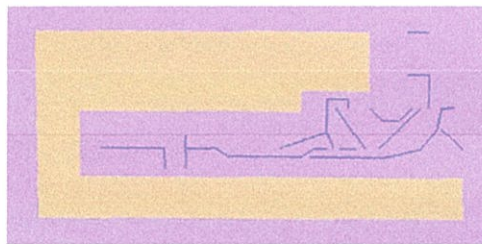
แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบเป็นวงจรง่าย ๆ ที่ใช้สัญญาณความถี่นาฬิกา (Clock frequency signal) 16 MHz เป็นตัวขับ ดังแสดงในรูป 4.6 (ก) และ 4.6 (ข) และเมื่อทำการจำลองในโปรแกรมจะได้ดังรูปที่ 4.6 (ค) และ 4.6 (ง) โดยแสดงอุปกรณ์และระดับแรงดันที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.7



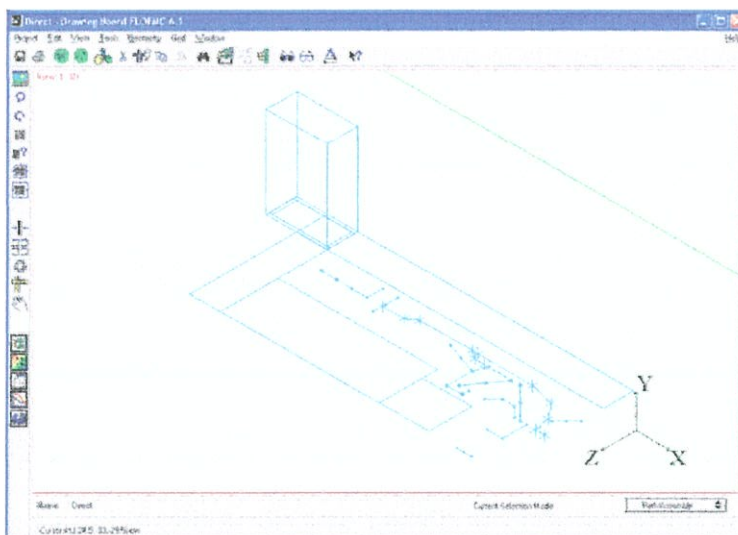
(ก)



(ข)

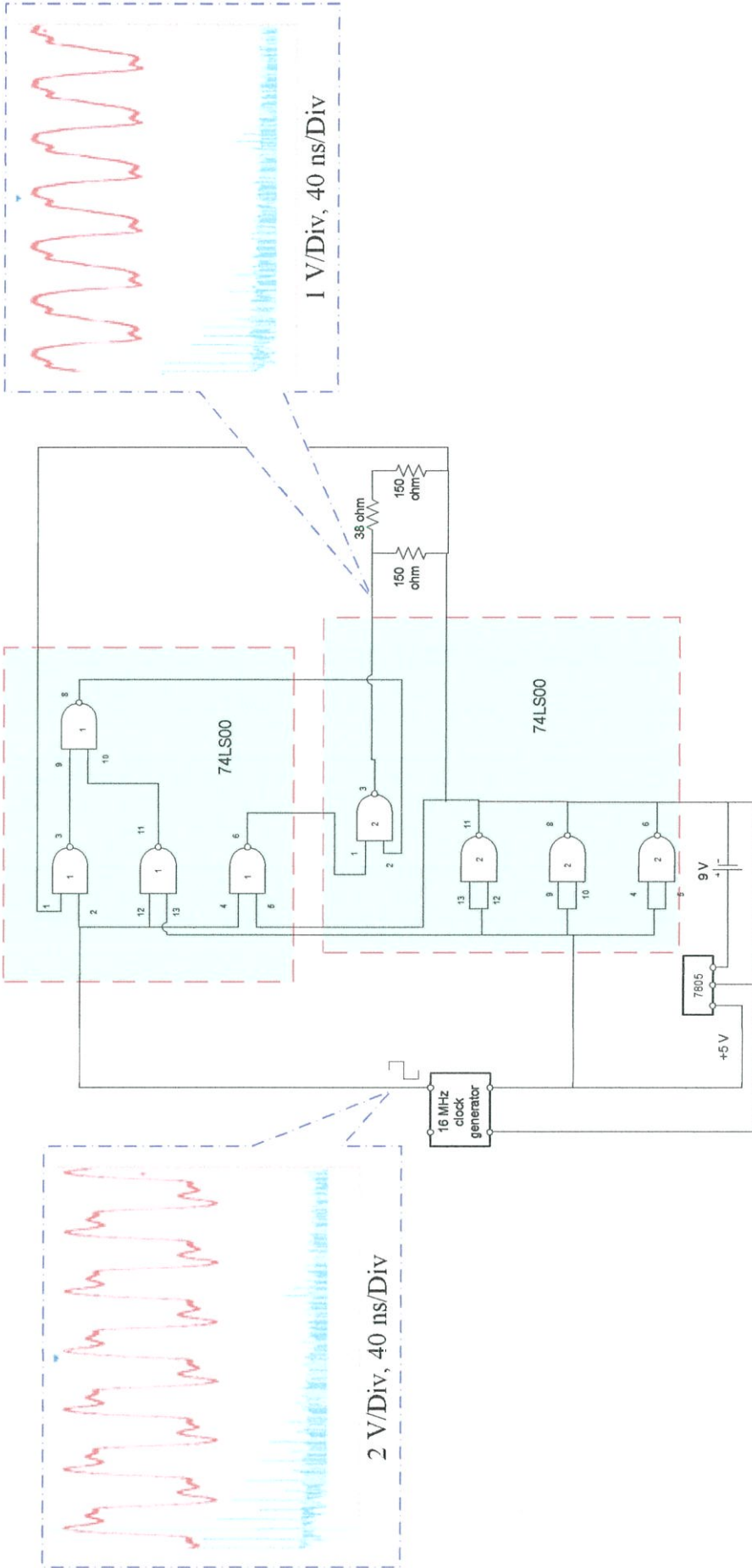


(ค)



(ง)

รูปที่ 4.6 รูปแหล่งกำเนิดสัญญาณ (ก) ลายวงจร (ข) และการจำลองด้วยโปรแกรม (ค) และ (ง)



รูปที่ 4.7 แสดงอุปกรณ์ของวงจรแหล่งกำเนิดสัญญาณ และระดับแรงดันในแต่ละตำแหน่ง

เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้การสร้าง Logic ในวงจรแหล่งกำเนิดสัญญาณคือ QUAD 2-INPUT NAND GATE รุ่น 74LS00 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่หาได้ง่าย โดยได้แสดงคุณสมบัติไว้ในภาคผนวก ก ซึ่งพบว่า สัญญาณ Logic ที่ออกจากอุปกรณ์ดังกล่าวมีระดับสัญญาณสูงสุด 3.5 โวลต์ (Output HIGH Voltage, V_{OH} ; 3.5 V typ) ซึ่งระดับแรงดันดังกล่าวเพียงพอในการสร้างสนามไฟฟ้าสำหรับการทำการทดสอบ หากทำการเปลี่ยนอุปกรณ์ในการสร้าง Logic นี้เป็นรุ่นที่ให้ระดับสัญญาณ Logic สูงขึ้น ก็จะได้สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ต่างออกไป

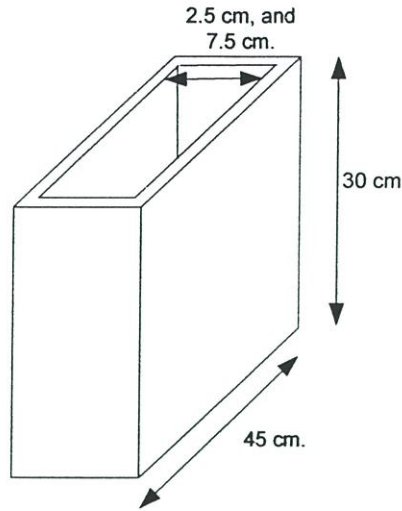
ข) กล่องพลาสติก

กล่องพลาสติกที่ใช้มี 2 แบบ แบบแรกเป็นกล่องพลาสติกปิดทุกด้านขนาดเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยขนาดกล่องภายในมีขนาด 20*20*20 ซม. และกล่องภายนอกมีขนาด 23*23*23 ซม. โดยพลาสติกที่นำมาจัดทำกล่องทั้งสองมีความหนา 0.5 ซม. เมื่อนำมาซ้อนกันจะเกิดช่องว่างระหว่างกล่องทั้งสอง ซึ่งช่องว่างนี้เองจะทำการบรรจุสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างกันและทำการทดลองรวมทั้งนำรูปแบบนี้ไปทำการจำลองในโปรแกรมด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.8 กล่องพลาสติกที่ใช้ในการทดสอบ

กล่องพลาสติกแบบที่สองทำจากพลาสติกหนา 0.5 ซม. เช่นเดียวกับแบบแรก แต่จะเปิดด้านบนเพื่อใช้สำหรับการบรรจุสารละลาย โดยมีขนาดความกว้าง 30 ซม. ความยาว 45 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 4.9



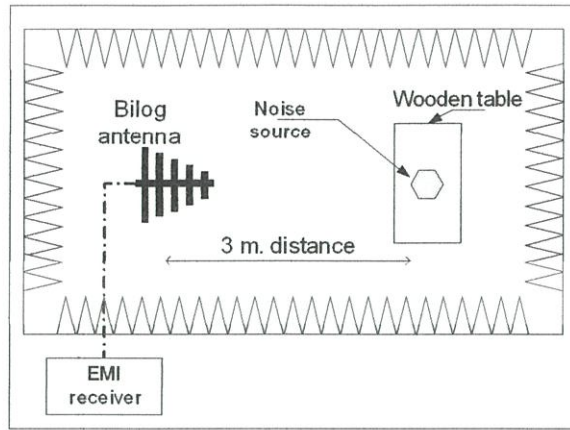
รูปที่ 4.9 กล่องพลาสติกชนิดขาว

4.4.2 รูปแบบการทดสอบ

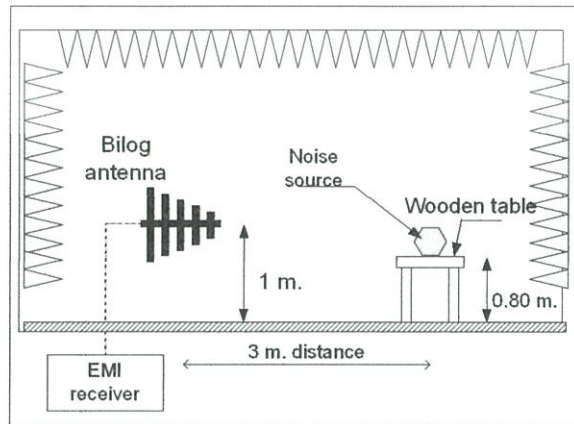
4.4.2.1 สำหรับการวัดแหล่งกำเนิดสัญญาณโดยตรง

ทำการวางแหล่งกำเนิดสัญญาณบนโต๊ะไม้ที่มีความสูง 80 เซนติเมตร และทำการทดลองภายในห้องปิดกั้นคลื่นกึ่งไร้การสะท้อน (Semi anechoic chamber) ที่ระยะห่างจากสายอากาศชนิด Bilog 3 เมตร โดยที่กำหนดความสูงของสายอากาศที่ 1 เมตร และทำการศึกษาสัญญาณที่สร้างจากแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ย่านความถี่ 30 เมกกะเฮิร์ตถึง 1,000 เมกกะเฮิร์ต

รูปแบบในการจำลองและทดสอบได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือดังรูปที่ 4.10 (ก) และ 4.10 (ข) รูปแสดงการทดสอบจริงตามรูปที่ 4.11 และแสดงรูปแบบกลไกของสัญญาณแบบ Time domain และ Frequency domain จากแหล่งกำเนิดสัญญาณภายหลังจากวัดด้วยสายอากาศ Bilog ตามรูปที่ 4.12

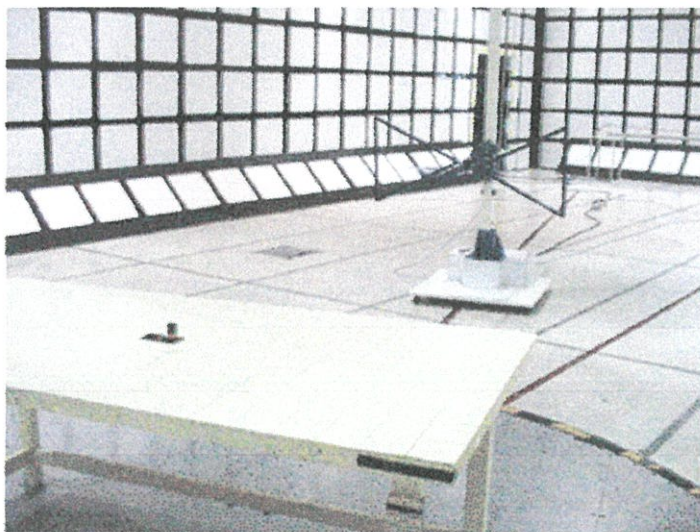


(ก)

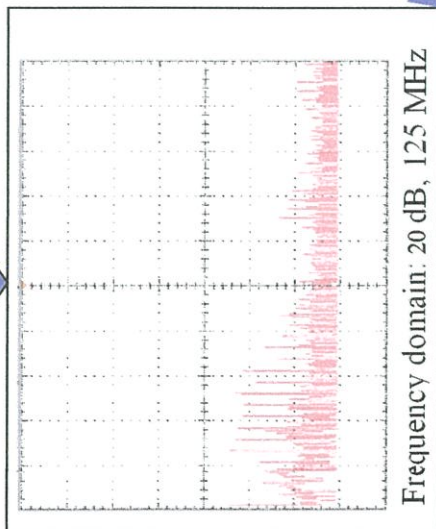
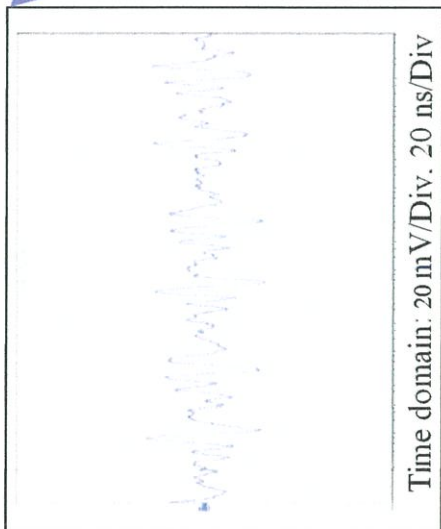
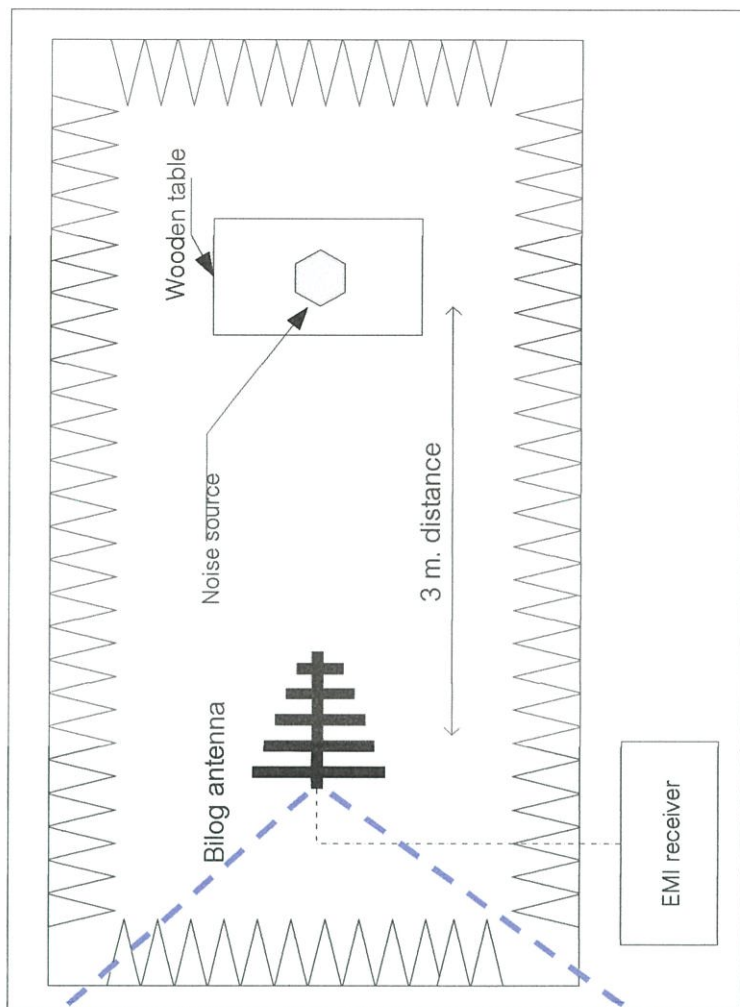


(ข)

รูปที่ 4.10 รูปแบบการติดตั้งการทดสอบโดยมองจากมุมบน (ก) และด้านข้าง (ข)



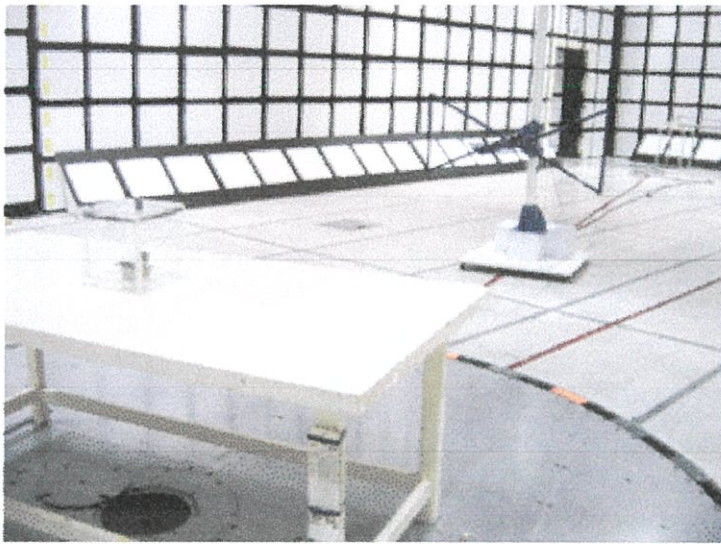
รูปที่ 4.11 รูปแบบการทดสอบจริง



รูปที่ 4.12 รูปแบบก่อกองสัญญาณแบบ Time domain และ Frequency domain จากแหล่งกำเนิดสัญญาณจากวัดด้วยสายอากาศ Bilog

4.4.2.2 สำหรับกล่องพลาสติกแบบปิด

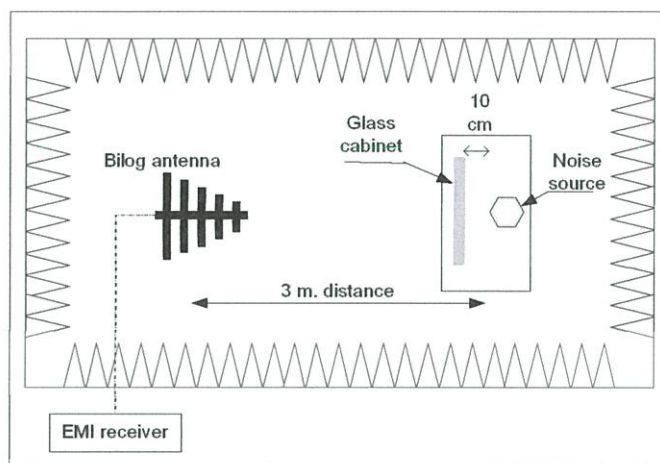
ทำการบรรจุสารละลายที่ช่องว่างของกล่องพลาสติกที่ทำการซ้อนดังแสดงดังรูปที่ 4.8 และทำการทดลองภายในห้องปิดกันคลื่นกึ่งไร้การสะท้อน (Semi anechoic chamber) ที่ระยะห่างจากสายอากาศชนิด Bilog 3 เมตร โดยที่กำหนดความสูงของสายอากาศที่ 1 เมตร ภายหลังจากการติดตั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณภายในกล่องพลาสติกแบบปิดเสร็จเรียบร้อยแล้วให้นำไปติดตั้งที่กลางโต๊ะไม้ที่มีความสูง 80 เซนติเมตร และทำการศึกษาสัญญาณที่สร้างจากแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ย่านความถี่ 30 เมกกะเฮิร์ตต์ถึง 1,000 เมกกะเฮิร์ตต์ โดยรูปแบบการทดลองตามรูปที่ 4.13 แสดงการจำลองตามรูปที่ 4.14 (ก) และ รูปที่ 4.14 (ข)



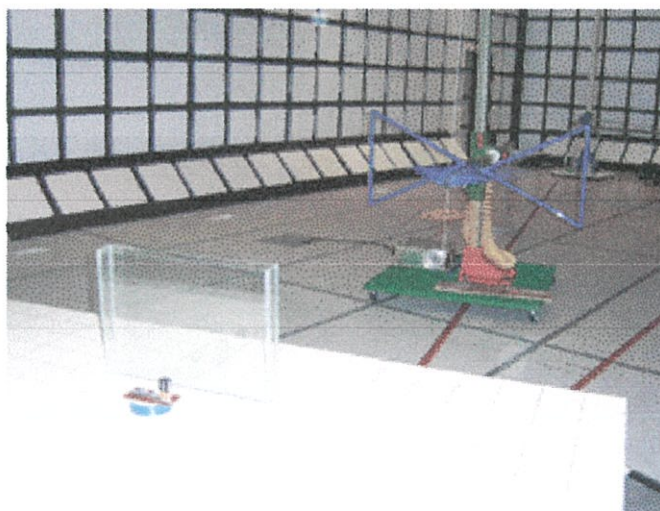
รูปที่ 4.13 การทดสอบสำหรับกล่องพลาสติกปิดทุกด้าน

ทำการบรรจุสารละลายที่ช่องว่างของกล่องพลาสติกดังแสดงดังรูปที่ 4.9 และนำไปวางขวางระหว่างสายอากาศและแหล่งกำเนิดสัญญาณภายในห้องปิดกั้นคลื่นกึ่งไร้การสะท้อน (Semi anechoic chamber) ที่ระยะห่าง 3 เมตร โดยที่กำหนดความสูงของสายอากาศที่ 1 เมตร ภายหลังจากการติดตั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณที่กึ่งกลางโต๊ะไม้ที่มีความสูง 80 เซนติเมตร และทำการศึกษาสัญญาณที่สร้างจากแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ย่านความถี่ 30 MHz ถึง 1,000 MHz

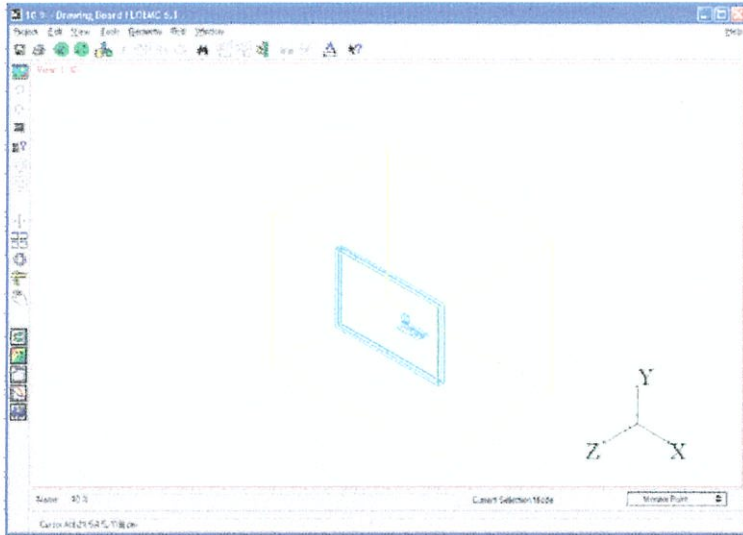
รูปแบบในการจำลองและทดสอบได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือดังรูปที่ 4.15 รูปที่ 4.16 แสดงการทดสอบจริง และรูปที่ 4.17 แสดงการจำลอง



รูปที่ 4.15 รูปแบบการติดตั้งการทดสอบ



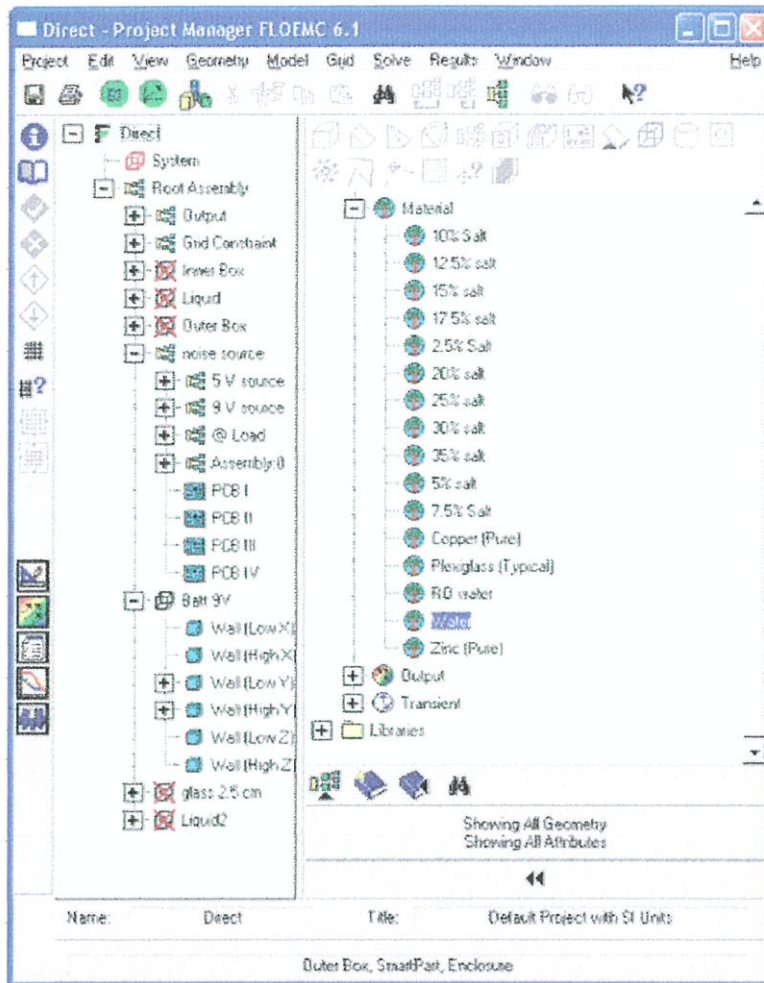
รูปที่ 4.16 การทดสอบสำหรับกล่องพลาสติกเปิด



รูปที่ 4.17 รูปแบบการจำลอง

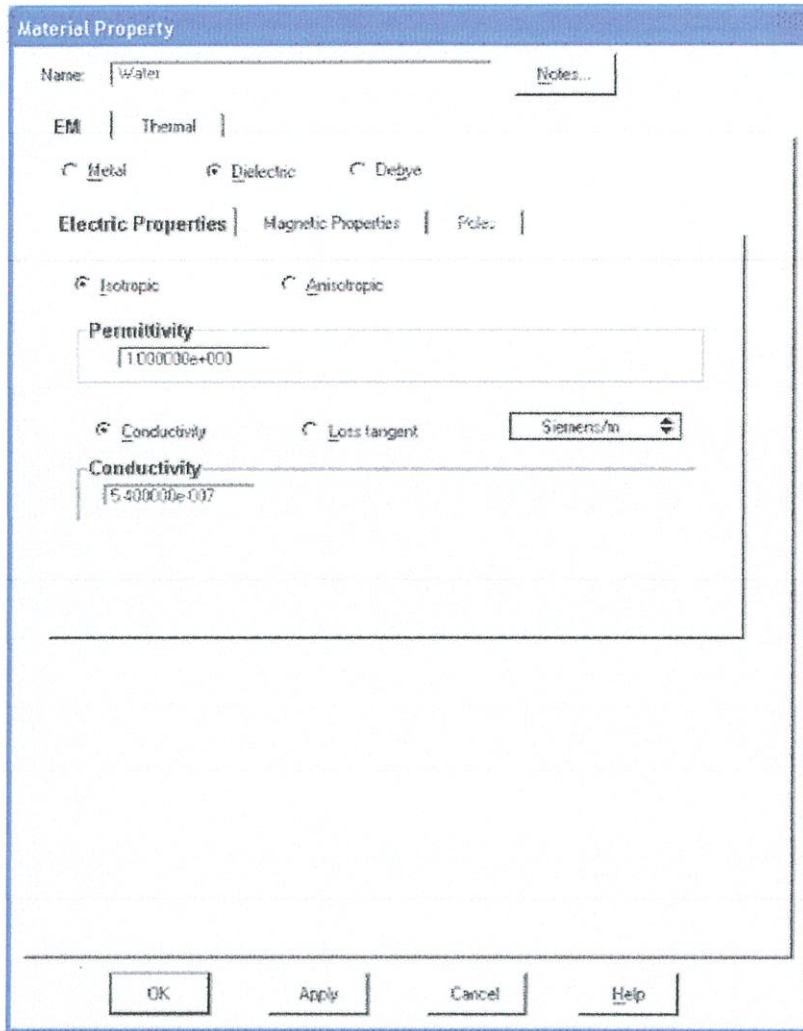
4.5 โปรแกรมสำหรับการจำลองความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (FLO/EMC)

โปรแกรมสำหรับการจำลองความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมที่มีชื่อว่า “FLO/EMC” เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการทดสอบอีเอ็มซีจริงภายในห้องทดสอบ โดยได้รับการคิดค้นและพัฒนาจากบริษัท FLOMERICS LTD. ประเทศอังกฤษ ซึ่งเวอร์ชันที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นเวอร์ชันที่ 6.1 เมื่อแรกเริ่มเข้าโปรแกรมจะปรากฏหน้าต่างดังนี้



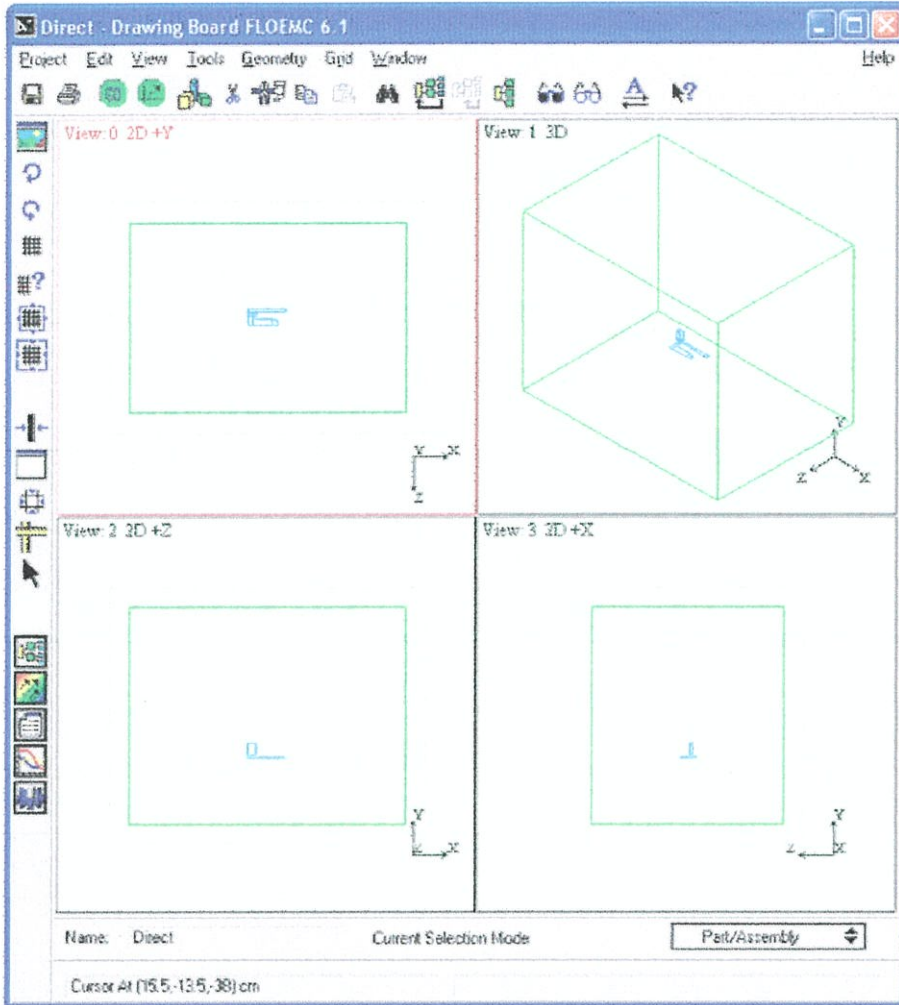
รูปที่ 4.18 หน้าต่างเมื่อเริ่มเปิดโปรแกรม FLO/EMC

จากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าในโปรแกรมดังกล่าวมีการอนุญาตให้กำหนดส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ภายใต้การทดสอบเป็นส่วน ๆ ในหน้าต่างซ้าย ส่วนหน้าต่างขวาเป็นการอนุญาตให้มีการกำหนดคุณสมบัติของสารต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ โดยในการวิจัยนี้จะนำค่าความเป็นตัวนำของสารละลายเกลือและค่าคงที่ที่มาจากตารางที่ 4.2 และ 4.3 มาป้อนค่าพารามิเตอร์ให้กับโปรแกรม ส่วนค่าความเข้มข้นจะใช้ค่าคงที่ของน้ำที่มีค่าเท่ากับ 1 ดังแสดงที่รูป 4.19



รูปที่ 4.19 หน้าต่างสำหรับป้อนค่าความเป็นตัวนำและค่าความซึมซาบให้กับโปรแกรม

ภายหลังจากกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับส่วนประกอบทั้งหมดในการจำลองแบบแล้ว โปรแกรมสามารถพล็อตรูปแบบการจำลองเป็นภาพ 3 มิติดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 หน้าต่างแสดงการจำลองภาพหลังจากการกำหนดรูปแบบให้กับโปรแกรม

โดยเมื่อทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวที่ใช้ในการจำลองแบบแล้ว โปรแกรมจะนำค่าดังกล่าวไปคำนวณตามทฤษฎีจากบทที่ 3 โดยสมการคุณสมบัติการซัดด์ทั้งหมดของวัสดุมีค่าเท่ากับผลรวมของค่าสูญเสียจากการดูดกลืน (A) กับค่าสูญเสียจากการสะท้อน (R) และค่าแก้ (B) ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$SE = A + R + B \quad \text{dB} \quad (4.1)$$

เมื่อ

- A = ค่าสูญเสียการดูดกลืนของวัสดุ (dB)
- R = ค่าสูญเสียการสะท้อนทั้งสองด้าน (dB)
- B = ค่าแก้ (Correction factor) ของการสะท้อนคลื่นของวัสดุ (dB)

ในการทำการทดลองภายในห้อง Semi-Anechoic chamber ได้ทำการทดลองที่ระยะห่าง 3 เมตร ซึ่งในการทดลองนั้นได้ทำการวัดที่ความถี่ 30 MHz ถึง 1,000 MHz ซึ่งเป็นสนามไกล (Far field, $r > \frac{\lambda}{2\pi}$) ซึ่งถือเป็นสนามระนาบ (Plane wave) ดังนั้น ค่าความสูญเสียการดูดกลืนของวัสดุ (A) ที่สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$A = 3.34t\sqrt{f\mu_r\sigma_r} \quad \text{dB} \quad (4.2)$$

เมื่อ

- t คือ ค่าความหนาของวัสดุที่ชิลด์ มีหน่วยเป็นนิ้ว
- f คือ ความถี่ (Hz)
- μ_r คือ ค่าความซึมซาบของวัสดุ (H/m)
- σ_r คือ ค่าความเป็นตัวนำของวัสดุ (mhos/m)

สำหรับค่าความสูญเสียการสะท้อนของวัสดุเมื่อแทนค่าความต้านทาน Z_1 ด้วยค่าความต้านทานของคลื่น Z_w และแทนค่าความสูญเสียการสะท้อน (Z_2) ด้วยค่าความต้านทานชิลด์ Z_s ทั้งค่า E และ H สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$R = 20 \log \frac{|Z_w|}{4|Z_s|} \quad \text{dB} \quad (4.3)$$

เมื่อ

- Z_w คือ ค่าความต้านทานของคลื่นก่อนกระทบเข้าสู่ตัวชิลด์
- Z_s คือ ค่าความต้านทานชิลด์

เนื่องจากค่าความสูญเสียการสะท้อนของวัสดุที่อยู่ในกรณีของคลื่นระนาบ (สนามไกล) ค่าความต้านทานคลื่น (Wave impedance - Z_w) มีค่าเท่ากับคุณสมบัติความต้านทานของพื้นที่ว่างอิสระ (Free space) หรือ Z_0 (ซึ่งมีค่าเท่ากับ 377 โอห์ม) ดังนั้นสมการที่ 4.3 จึงกลายเป็น

$$R = 20 \log \frac{94.25}{|Z_s|} \quad \text{dB} \quad (4.4)$$

ดังนั้น ค่าความต้านทานชิลด์มีค่าต่ำ ค่าความสูญเสียการสะท้อนก็จะมีค่ามาก เมื่อแทนค่าความต้านทานชิลด์ $|Z_s|$ สำหรับตัวนำใด ๆ ด้วยสมการต่อไปนี้

$$|Z_s| = 3.68 \times 10^{-7} \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r}} \sqrt{f} \quad (4.5)$$

และจัดสมการใหม่ได้เป็น

$$R = 168 + 10 \log(\sigma_r / \mu_r f) \text{ dB} \quad (4.6)$$

เมื่อ	μ_r	คือ ค่าซึมซาบของวัสดุ
	σ_r	คือ ค่าความเป็นตัวนำของวัสดุ
	f	คือ ความถี่

เนื่องจากค่าแก้ไข (Correction factor) ของการสะท้อนคลื่นของวัสดุ (B) มีค่าน้อยกว่าค่าสูญเสียการดูดกลืนของวัสดุ (A) มากกว่า 9 dB ดังนั้น ค่าดังกล่าวจึงยกเว้นไม่นำมาคำนวณ

โปรแกรม FLO/EMC จะนำข้อมูลที่ป้อนค่าให้ไปคำนวณด้วยความสัมพันธ์จากสมการดังกล่าวข้างต้นและแสดงผล โดยในงานวิจัยนี้จะทำการแสดงผลจากการจำลองในบทถัดไป

4.5 บทสรุป

ในบทนี้เป็นกรกล่าวถึง เงื่อนไข การติดตั้งและรูปแบบที่ใช้ทำการทดสอบและการจำลอง สำหรับการทดสอบทางด้านสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ เพื่อให้เห็นภาพรวมและรายละเอียดของการทดสอบกรณีต่างๆ สำหรับ ผลการทดสอบและการวิเคราะห์จะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

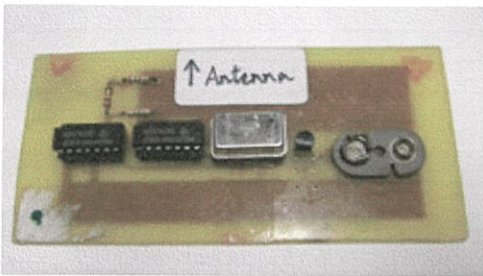
บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

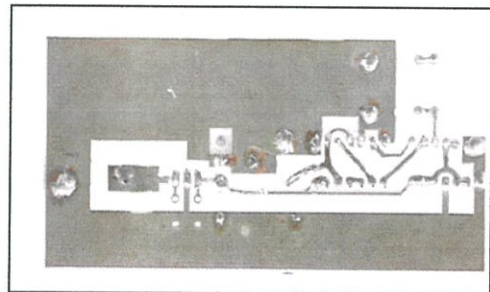
บทนี้กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ โดยผลการทดลองจะเป็นการทดสอบตามรูปแบบการทดลองในบทที่ 4 ในขณะที่การวิเคราะห์การก่้างหรือการชี้ลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศจะเป็นการวิเคราะห์ผลการทดลองและมีการเปรียบเทียบกับผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม FLO/EMC ระหว่างคุณสมบัติการชี้ลด์ของสารละลายที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ รวมทั้งภาระที่ใช้บรรจุในรูปแบบต่าง ๆ ที่นำเสนอ

5.1 แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการจำลองโดยใช้โปรแกรม FLO/EMC

ในการจำลองการทำงานของวงจรในการวิจัยนี้ จะใช้วงจรดังรูปที่ 5.1(ก) และ (ข) ในการจำลองการทำงานของวงจรเพื่อหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ โดยแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการทดลองนั้นจะถูกจำลองด้วยโปรแกรม FLO/EMC ดังรูปที่ 5.2 (ก) และ (ข) และการวัดหาผลการทดสอบด้วยวิธีในบทที่ 2 ก็จะถูกนำมาใช้ในการจำลองการทำงานเพื่อให้ผลการจำลองของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวนำเพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากการทดลองจริง

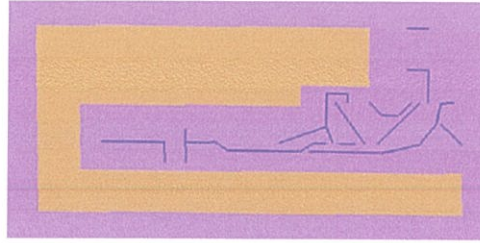


(ก)

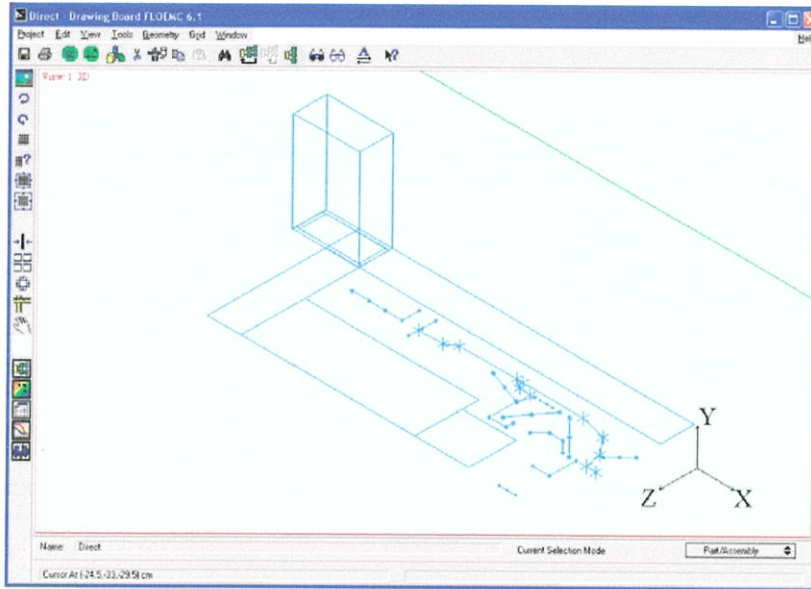


(ข)

รูปที่ 5.1 แสดงรูปแหล่งกำเนิดสัญญาณ (ก) และวงจร (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.2 แสดงรูปแหล่งกำเนิดสัญญาณจากการจำลองด้วยโปรแกรม FLO/EMC (ก) และ (ข)

โดยในการจำลองด้วยโปรแกรม FLO/EMC ต้องทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของสารละลายแต่ละชนิดและแต่ละระดับความเข้มข้นซึ่งจะมีค่าความเป็นตัวนำที่ต่างกัน โดยทำการวัดค่าความเป็นตัวนำที่ระดับความเข้มข้นด้วยเครื่องมือวัดค่าความเป็นตัวนำ ซึ่งได้สรุปค่าความเป็นตัวนำที่ใช้ในการจำลองในตารางที่ 5.1 สำหรับเกลือ และตารางที่ 5.2 สำหรับด่างทับทิม

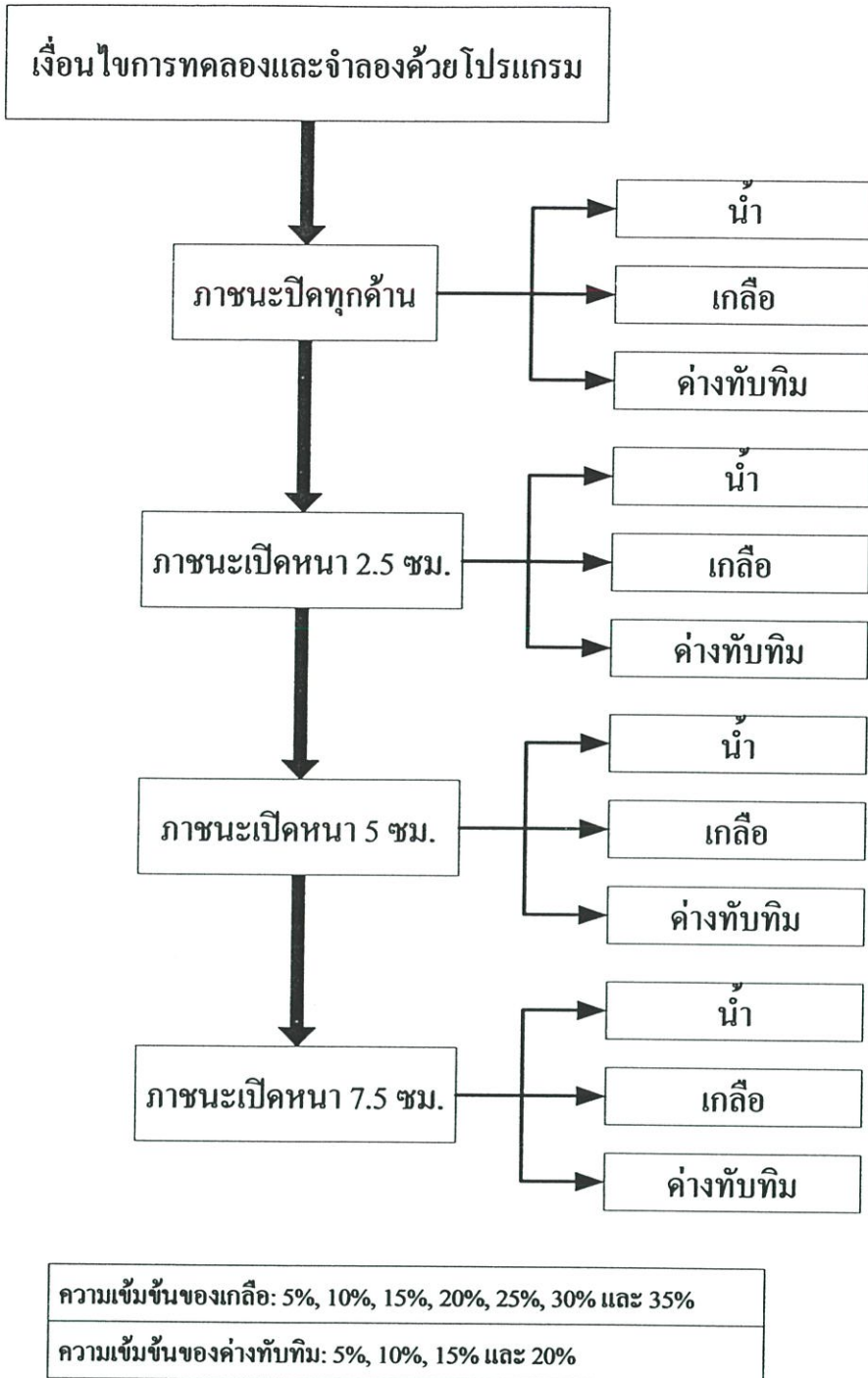
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าความเป็นตัวนำของเกลือเมื่ออยู่ในรูปของสารละลาย

ระดับความเข้มข้น	ค่าความเป็นตัวนำของเกลือ (Conductivity - mS/cm)	หมายเหตุ
0%	0.247	-
5%	81.6	-
10%	136.3	-
15%	181.5	-
20%	214.0	-
25%	229.0	เกลือตกตะกอน ไม่สามารถละลายได้อีก
30%	248.0	เกลือตกตะกอน ไม่สามารถละลายได้อีก
35%	253.0	เกลือตกตะกอน ไม่สามารถละลายได้อีก

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าความเป็นตัวนำของค่างทับทิมเมื่ออยู่ในรูปของสารละลาย

ระดับความเข้มข้น	ค่าความเป็นตัวนำของค่างทับทิม (Conductivity - mS/cm)	หมายเหตุ
0%	0.247	-
5%	32.5	-
10%	44.4	ค่างทับทิมตกตะกอน ไม่สามารถละลายได้อีก
15%	46.1	ค่างทับทิมตกตะกอน ไม่สามารถละลายได้อีก
20%	46.8	ค่างทับทิมตกตะกอน ไม่สามารถละลายได้อีก

อนึ่ง เนื่องจากติดขัดด้วยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าพารามิเตอร์ค่าความเข้มข้นของสารละลายดังกล่าว ดังนั้นการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการจำลองโดยอาศัยค่าความเป็นตัวนำของสารที่ได้จากการวัดมาทำการจำลองด้วยโปรแกรม FLO/EMC เพียงค่าเดียวเท่านั้น ส่วนค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ต้องใช้ในการป้อนค่าพารามิเตอร์ให้กับ โปรแกรมกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของน้ำ



รูปที่ 5.3 สรุปรูปแบบการทดสอบการซึ่ลค์ทั้งหมด

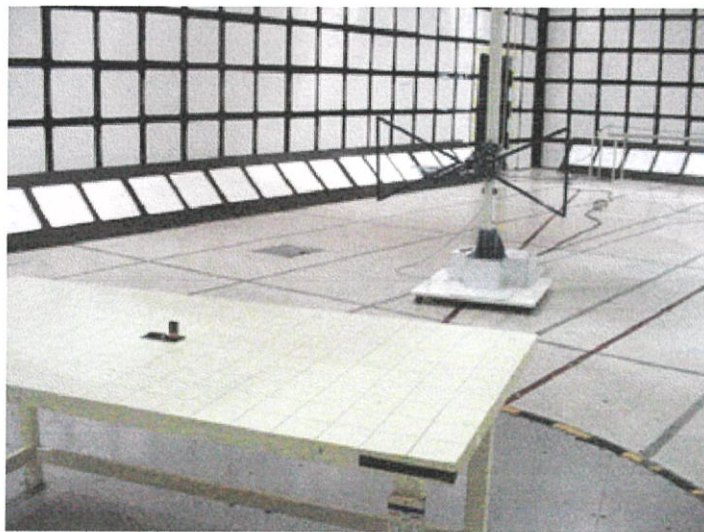
โดยวิธีการทดสอบของแต่ละรูปแบบนั้นได้แสดงไว้ในบทที่ 4 อย่างละเอียดแล้ว

5.2 ผลการทดลอง การจำลองและวิเคราะห์การก่อกำบังหรือการชีลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง การจำลองและการวิเคราะห์การชีลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ โดยสอดคล้องกับรูปแบบการทดลองซึ่งได้กล่าวไว้อย่างชัดเจนแล้วในหัวข้อที่ 4.4 ซึ่งเป็นการสรุปเงื่อนไขต่างๆ ในการทดสอบ การติดตั้งสำหรับวัดสัญญาณรบกวน และรวมถึงการจำลองด้วยโปรแกรม FLO/EMC

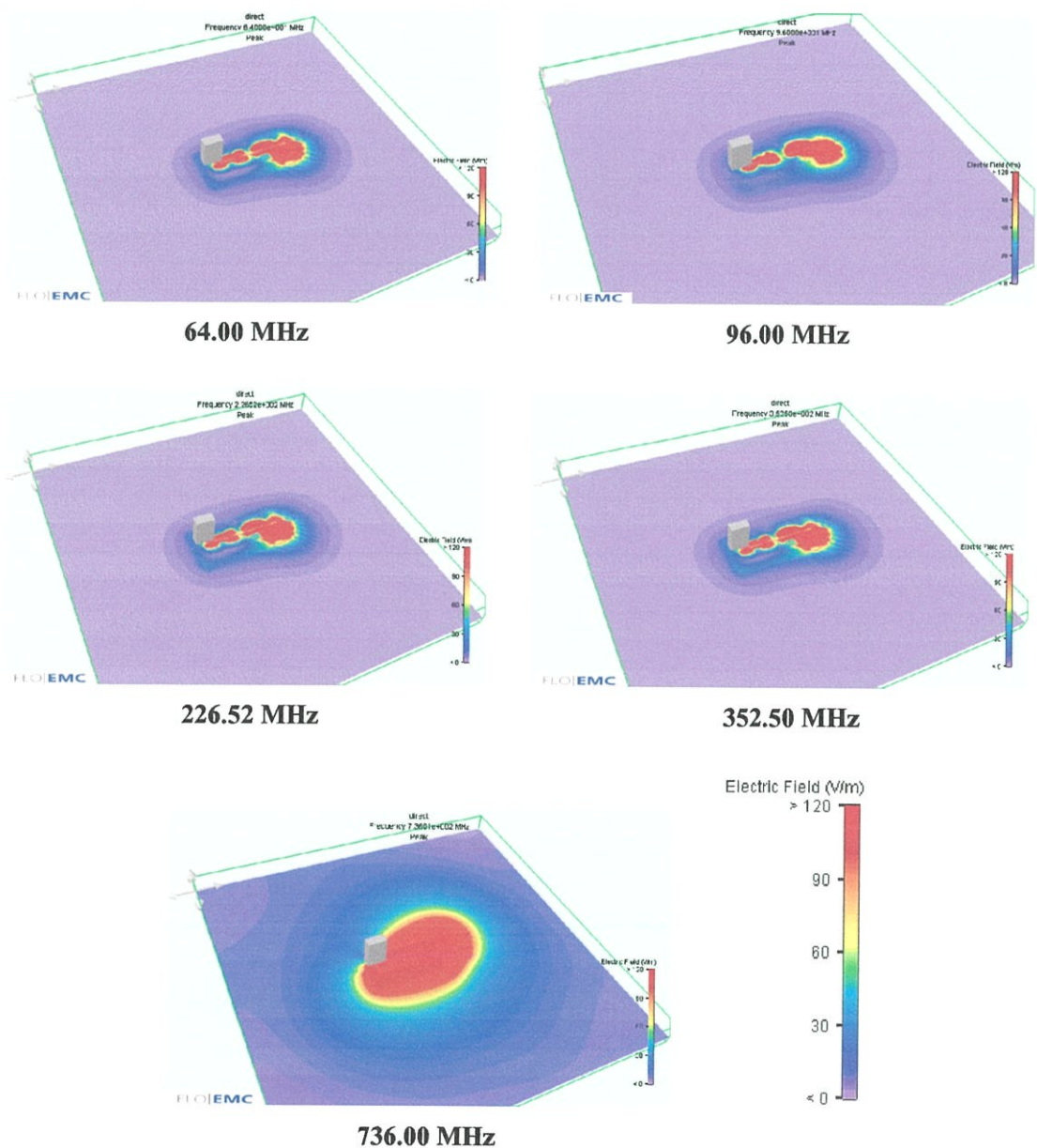
โดยในการทดสอบการชีลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศสำหรับการวิจัยนี้จะเป็นการทดสอบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศในโหมด Peak เท่านั้น และทั้งหมดเป็นการทดสอบที่มีการเปลี่ยนระดับความเข้มของสารละลายที่ระดับความเข้มต่าง ๆ รวมทั้งภาชนะที่ใช้ในการบรรจุ ซึ่งในแต่ละกรณีของรูปแบบการทดสอบนั้นล้วนมีผลต่อการชีลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศทั้งสิ้น

ในการวัดการชีลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศจะทำการวัดความถี่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1,000 MHz ด้วยเครื่องวัด EMC Analyzer ดังในรูปที่ 2.24 โดยในการทำการทดสอบจะทำการวัดแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยตรงขณะที่ไม่มีการชีลด์ด้วยวัสดุใด ๆ ขวางกัน ซึ่งจะนำค่าที่ได้ดังกล่าวมาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าชีลด์ในแต่ละรูปแบบการทดสอบต่อไป โดยแสดงรูปแบบการทดสอบดังรูปที่ 5.4 และแสดงการเดินทางของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้างดังรูปที่ 5.5



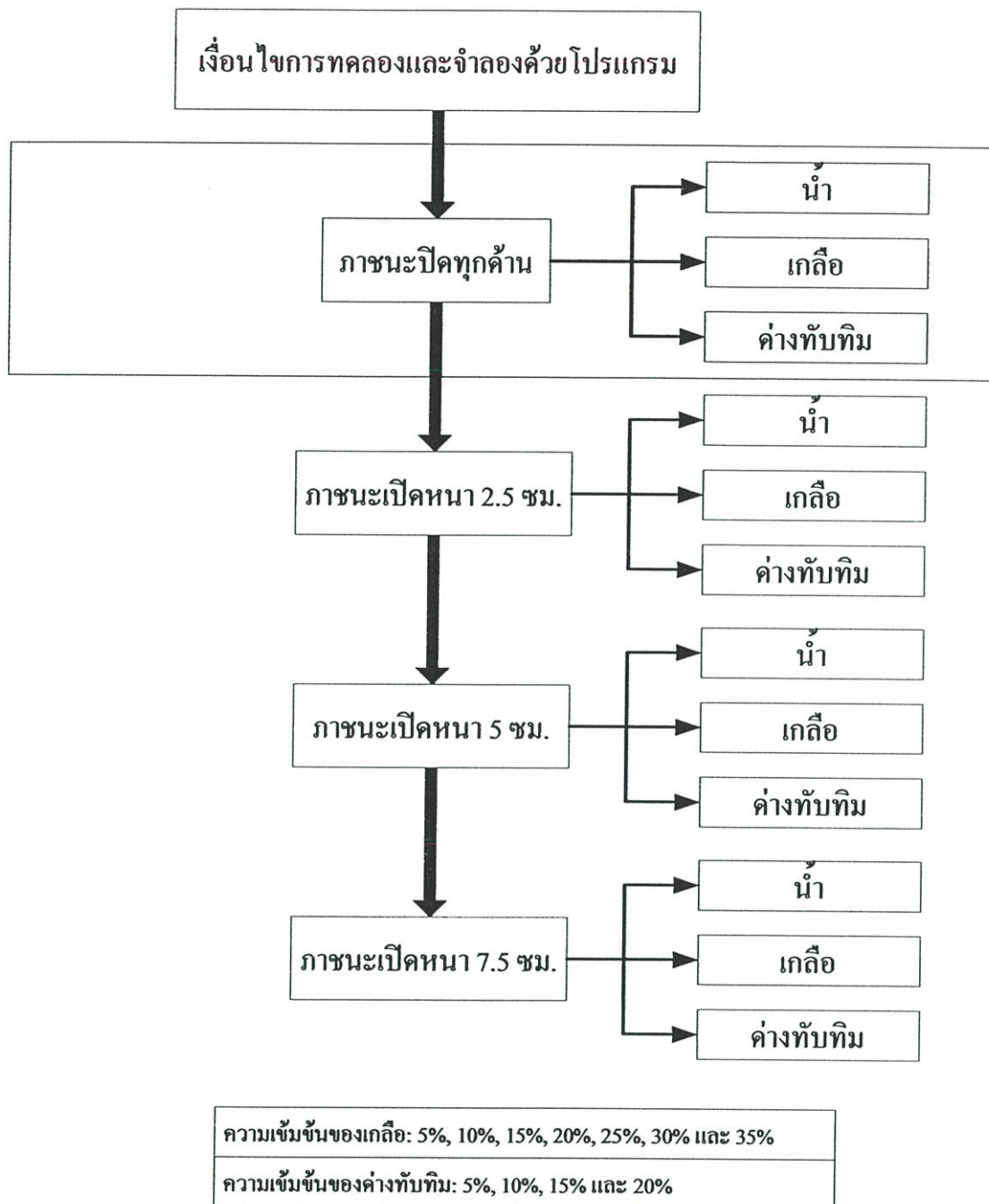
รูปที่ 5.4 รูปแบบการทดสอบจริงของแหล่งกำเนิดสัญญาณ

อนึ่ง เนื่องจากการจำลองด้วยโปรแกรม FLO/EMC ต้องมีการป้อนค่าพารามิเตอร์ค่าความซึมทราบ (Permeability- μ) และค่าความเป็นตัวนำ (Conductivity- σ) เพื่อใช้ในการคำนวณของโปรแกรมเอง แต่เนื่องจากติดขัดด้วยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความซึมทราบซึ่งไม่สามารถหาได้ในประเทศ ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงใช้ค่าความเป็นตัวนำเพียงค่าเดียวเท่านั้นในการจำลองด้วยโปรแกรม ส่วนค่าความซึมทราบของสารละลายที่ต้องใช้ในการป้อนค่าพารามิเตอร์ให้กับโปรแกรม กำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าความซึมทราบของน้ำ โดยจะนำผลดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์การชี้วัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศด้วยเงื่อนไขเดียวกัน เพื่อดูแนวโน้มของการชี้วัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศของสารละลายในแต่ละรูปแบบการทดสอบ



รูปที่ 5.5 รูปแบบการเดินทางของสนามไฟฟ้าที่จุดความถี่ต่าง ๆ ของแหล่งกำเนิดสัญญาณ

**ผลการทดสอบและการจำลองการฉีดด้วยสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
ผ่านอากาศด้วยกล่องพลาสติกปิดทุกด้าน**

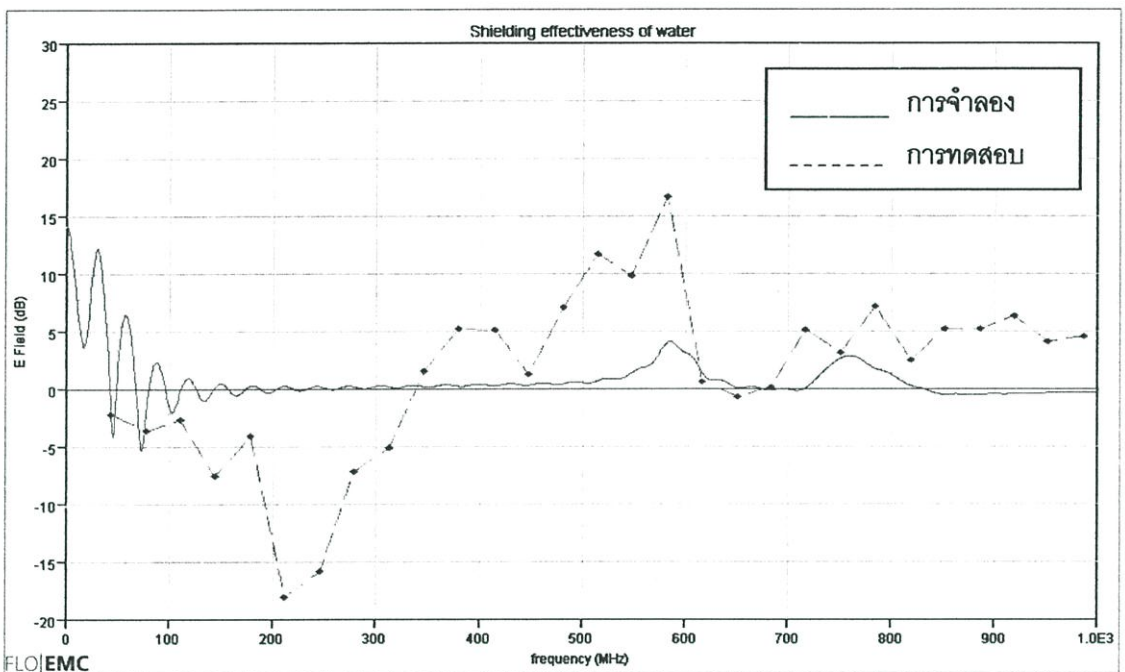


ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงผลการชี้วัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศของภาชนะปิดทุกด้านและกล่องพลาสติกแบบเปิด โดยผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองทุกรูปแบบการทดลองจะทำการแสดงเปรียบเทียบอยู่ในรูปเดียวกัน โดยแยกแต่ละเงื่อนไขดังแสดงในรูปที่ 5.3

5.2.1 การก่้างหรือการชี้วัดด้วยกล่องพลาสติกแบบปิด

โดยแบ่งสารที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ น้ำ เกลือและค้างทับทิม ซึ่งผลการทดสอบและการจำลองสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

5.2.1.1 ผลการทดสอบและจำลองการชี้วัดด้วยน้ำหรือที่สารละลาย 0%

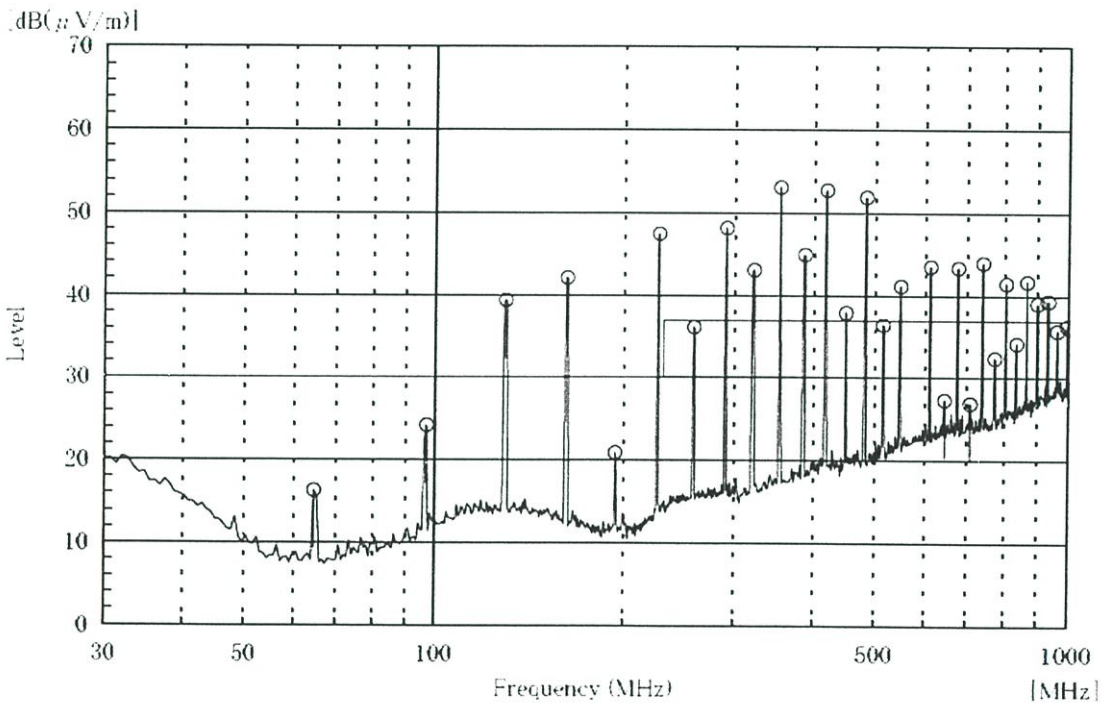


รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการชี้วัดของน้ำที่บรรจุภายในภาชนะปิด

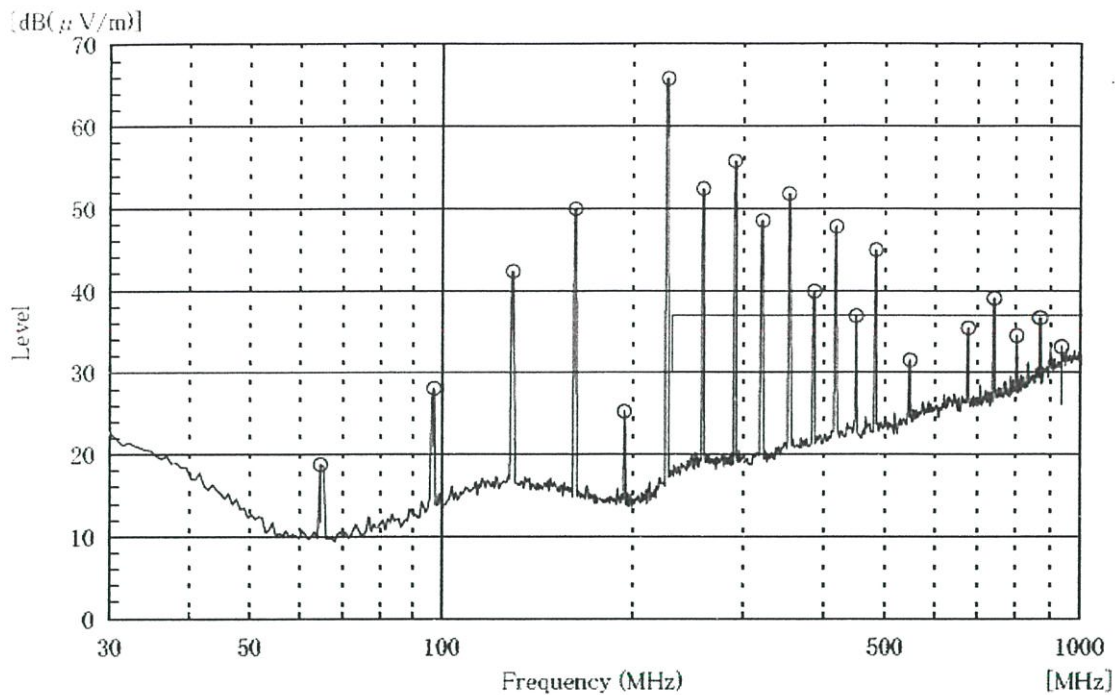
จากรูปที่ 5.6 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชี้วัดของน้ำหรือที่สารละลาย 0% ที่บรรจุภายในภาชนะปิดหรือกล่องพลาสติกแบบปิด ซึ่งจะพบว่าค่าที่ได้ภายหลังจากการใส่น้ำนั้นมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง โดยในช่วงความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 350 MHz จะพบว่าน้ำมีส่วนช่วยในการขยายสัญญาณ แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 350 MHz ถึง 1,000 MHz น้ำกลับมีส่วนในการชี้วัดสัญญาณ

ในการวิจัยนี้ รูปกราฟที่นำมาแสดงเป็นการแสดงประสิทธิภาพการชิลด์ที่ได้จากการทดลอง และการจำลอง ซึ่งการจำลองเป็นภาพที่ได้จากโปรแกรมโดยตรง ส่วนเส้นกราฟที่ได้จากการทดลองเป็นรูปกราฟที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าจากสองรูปภาพ (Envelop) โดยการใช้โปรแกรม Excel ในการวาดเส้นกราฟดังกล่าว

จากเส้นกราฟการทดสอบในรูปที่ 5.6 เป็นเส้นกราฟที่ได้มาจากการวัดสองครั้งคือ ค่าการวัดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยตรงดังรูปที่ 5.7 และค่าการวัดที่ได้จากการชิลด์ด้วยน้ำหรือที่สารละลาย 0% ดังรูปที่ 5.8 โดยนำค่าที่ได้จากทั้งสองรูปมาทำการเปรียบเทียบและนำไปใช้งานวิจัย ซึ่งจากหลักการนี้จะนำไปใช้ในการแสดงรูปภาพเพื่อเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการชิลด์ทุกกรณี



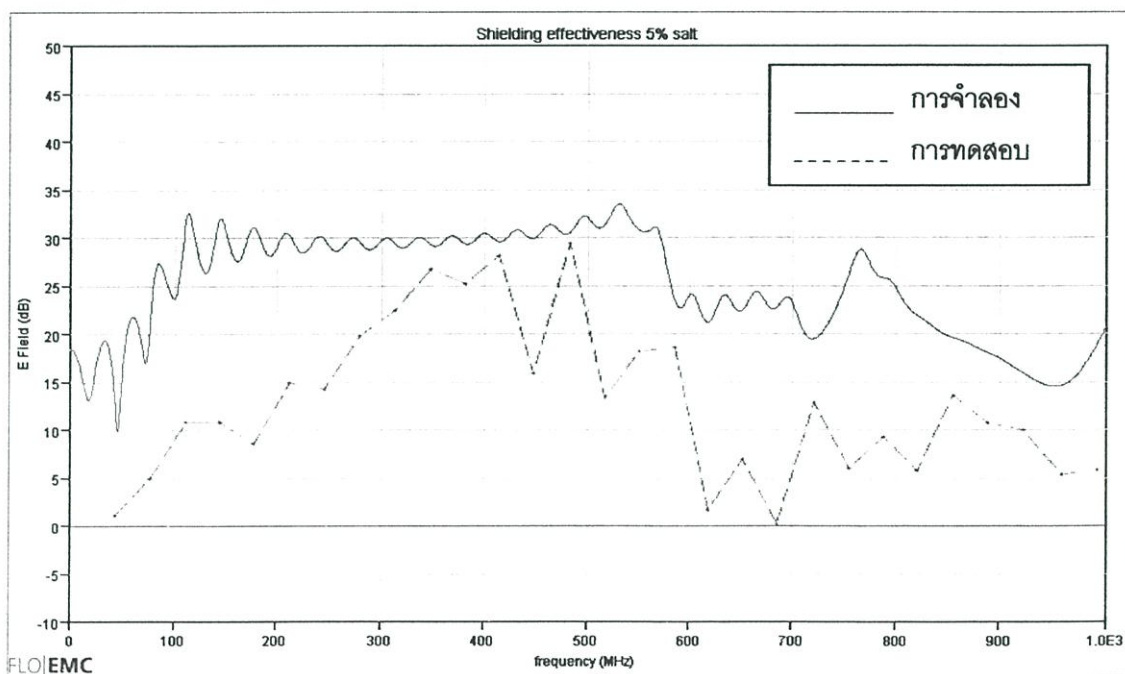
รูปที่ 5.7 ค่าการวัดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยตรง



รูปที่ 5.8 ค่าการวัดที่ได้จากการชิลด์ด้วยน้ำหรือที่สารละลาย 0%

5.2.1.2 ผลการทดสอบและการจำลองการชิลด์ด้วยสารละลายเกลือ

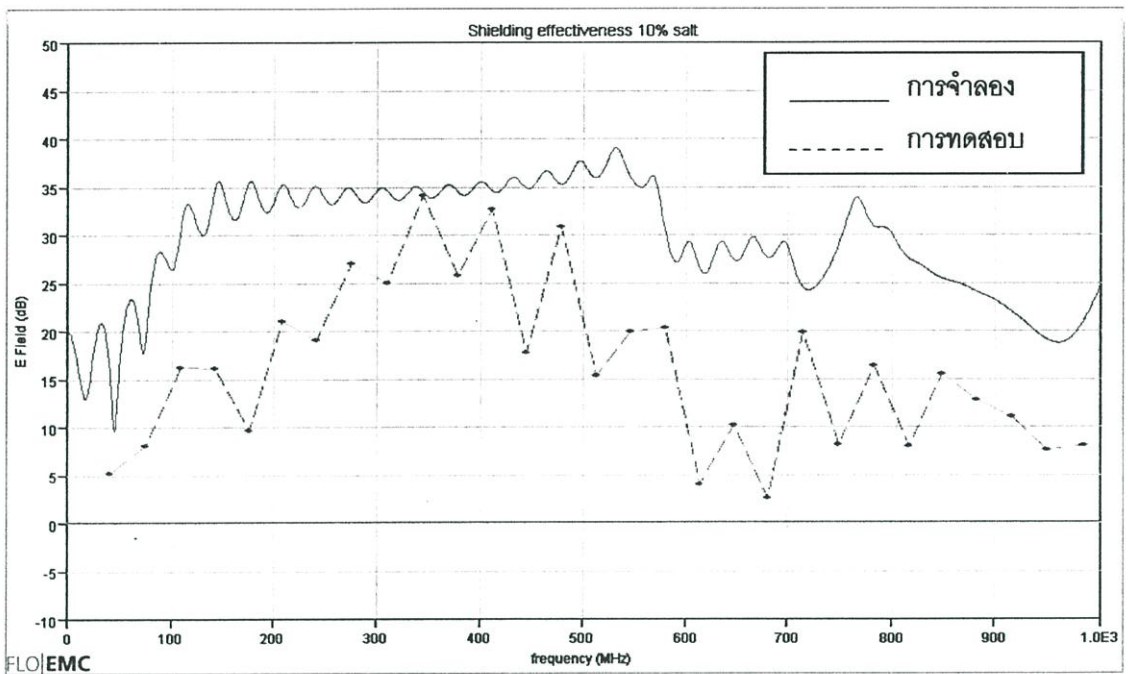
ก) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 5%



รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 5% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด

จากรูปที่ 5.9 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการลดทอนหรือการชิลด์ของสารละลายเกลือ 5% ที่บรรจุภายในภาชนะปิดหรือกล่องพลาสติกแบบปิด ซึ่งจะพบว่าค่าการลดทอนหรือการชิลด์จะมีค่าแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยเฉพาะที่ย่านความถี่ 300 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 600 เมกะเฮิรตซ์

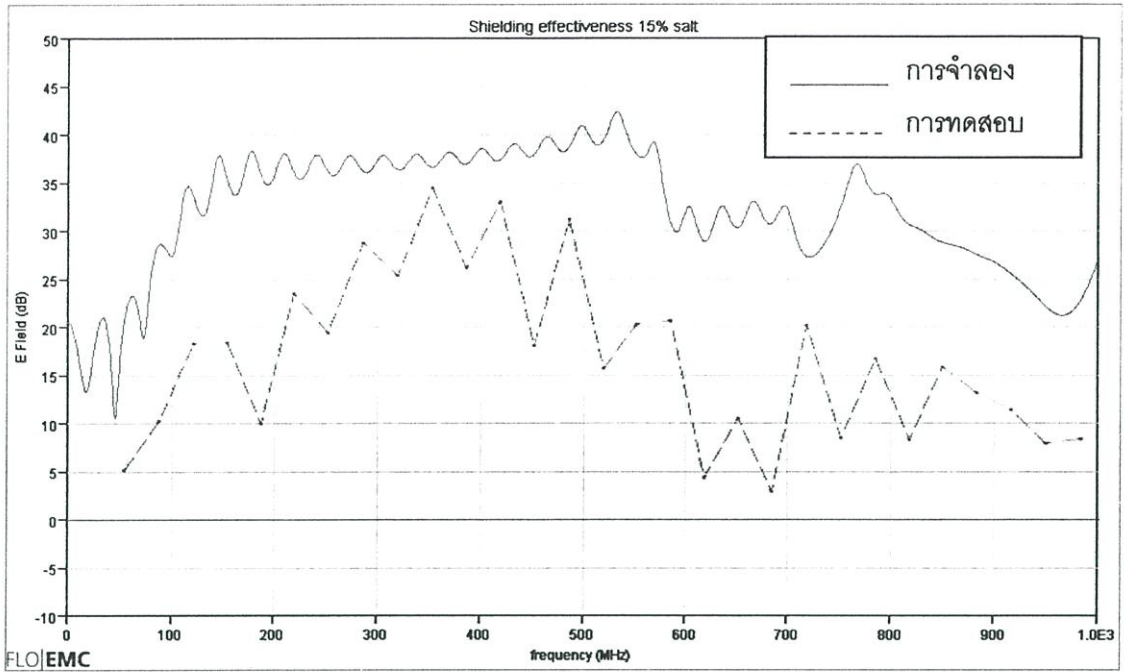
ข) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 10%



รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 10% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด

จากรูปที่ 5.10 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 10% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด ซึ่งจะพบว่าค่าคุณสมบัติการชิลด์จะมีค่าเท่ากับที่ความถี่ 352.5 เมกะเฮิรตซ์ ส่วนที่ย่านความถี่อื่น ๆ มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทั้งผลที่ได้จากการวัดและการจำลอง

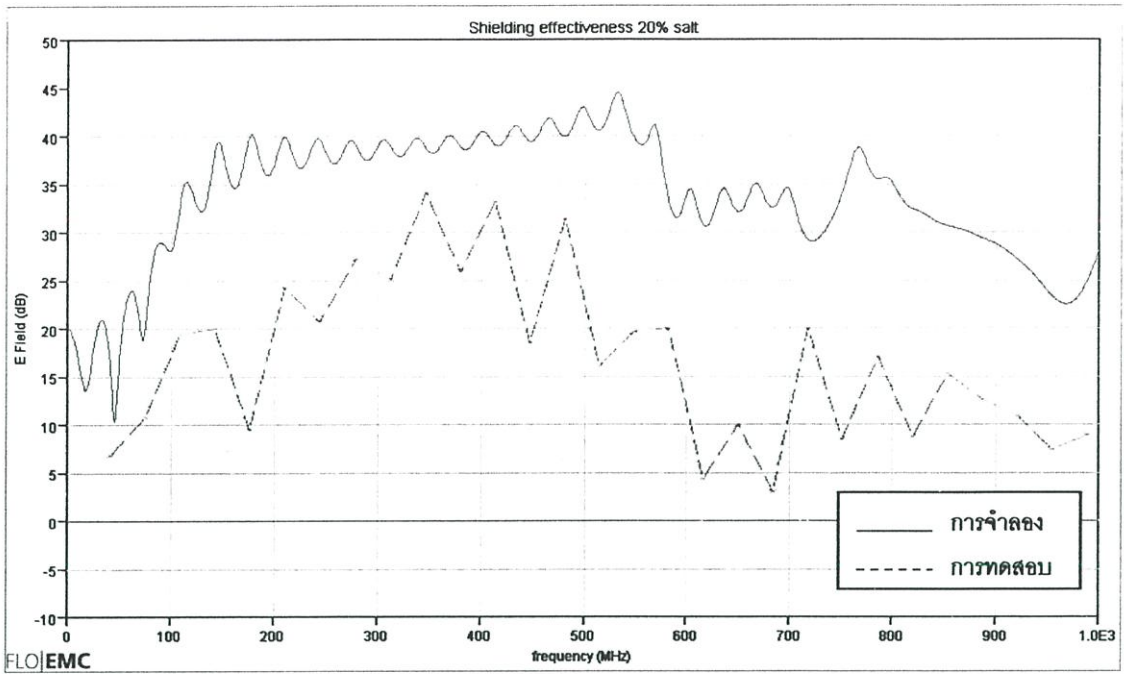
ค) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 15%



รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 15% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด

จากรูปที่ 5.11 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 15% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด ซึ่งจะพบว่าค่าคุณสมบัติการชิลด์ที่ได้ทั้งจากการวัดและการจำลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่จะพบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่าที่ได้จากการจำลองจะมีค่าห่างออกจากค่าจากการวัด เนื่องจากในการวัดจริงเมื่อถึงจุด ๆ หนึ่ง สารละลายเริ่มอิ่มตัวไม่สามารถทำละลายได้อีก จนทำให้สารนั้น ๆ ตกตะกอน จึงทำให้ค่าที่ได้จากการจำลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการวัดจริง

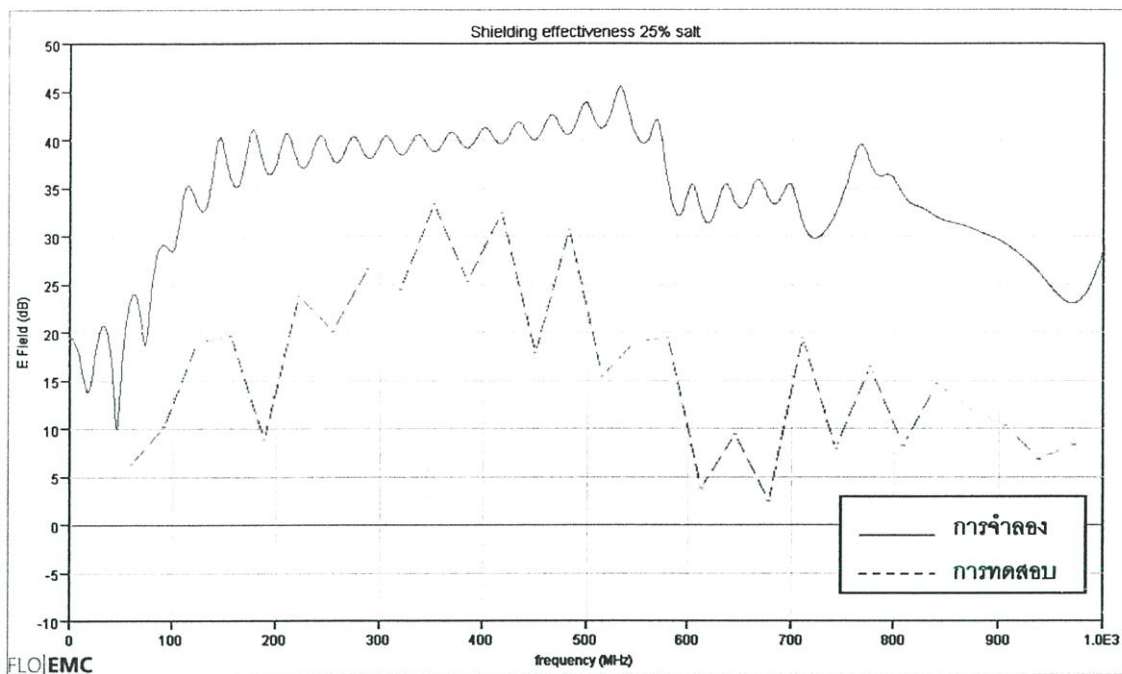
ง) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 20%



รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ 20% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด

จากรูปที่ 5.12 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ 20% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด ซึ่งจะพบว่าค่าคุณสมบัติการชีลด์ที่ได้จากการวัดและจำลองจะมีค่าที่ห่างคล้ายกับที่สารละลายเกลือ 15% สืบเนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณเกลือเข้าไปในสารละลาย น้ำไม่สามารถทำละลายต่อไปได้อีกทำให้ค่าที่ได้จากการวัดมีค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน

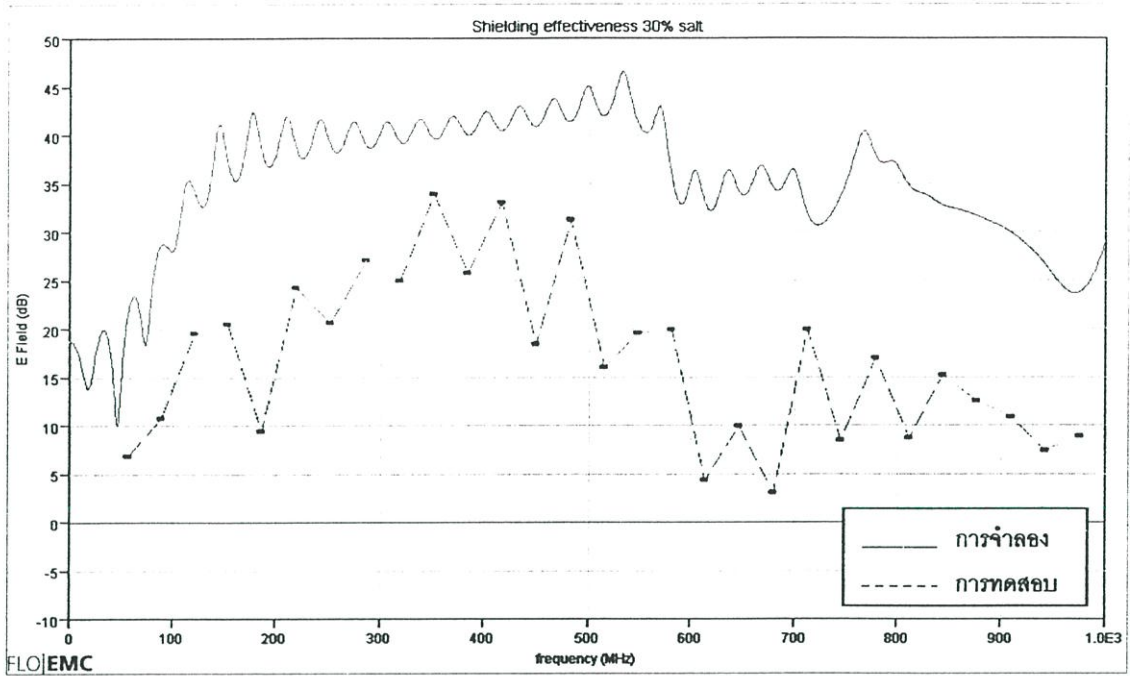
จ) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 25%



รูปที่ 5.13 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ 25% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด

จากรูปที่ 5.13 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ 25% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด ซึ่งจะพบว่าค่าคุณสมบัติการชีลด์ที่ได้จะคล้ายกับที่สารละลายเกลือ 15% และ 20 % สืบเนื่องมาจากในการทดสอบจริงเกลืออิมตัวไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวในสารละลายได้ และมีการตกตะกอนเป็นผลึกก้อนเกลือที่ก้นภาชนะ ทำให้ผลที่ได้จากการวัดเมื่อระดับสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นมีค่าคล้าย ๆ กัน

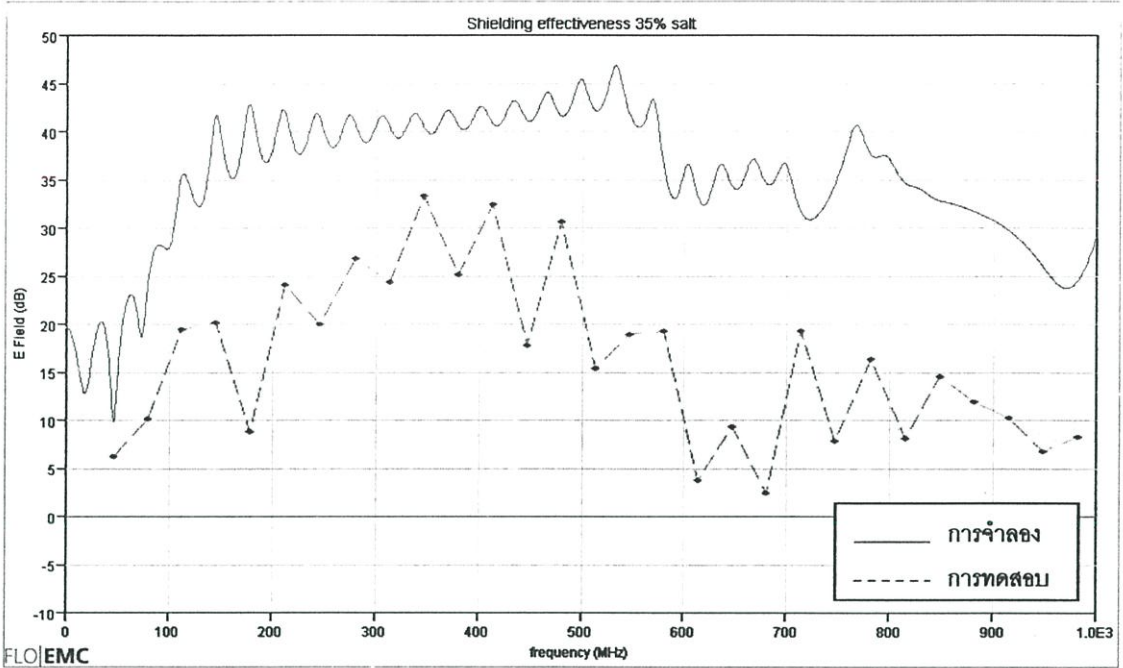
ก) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 30%



รูปที่ 5.14 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 30% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด

จากรูปที่ 5.14 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 30% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด ซึ่งจะพบว่าค่าคุณสมบัติการชิลด์ที่ได้จะคล้ายกับที่สารละลายเกลือ 15%, 20% และ 25% สืบเนื่องมาจากการทดสอบจริงเกลืออิมตัวไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวในสารละลายได้ และมีการตกตะกอนเป็นผลึกก้อนเกลือที่ก้นภาชนะ ทำให้ผลที่ได้จากการวัดเมื่อระดับสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นมีค่าคล้าย ๆ กัน

ข) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 35%



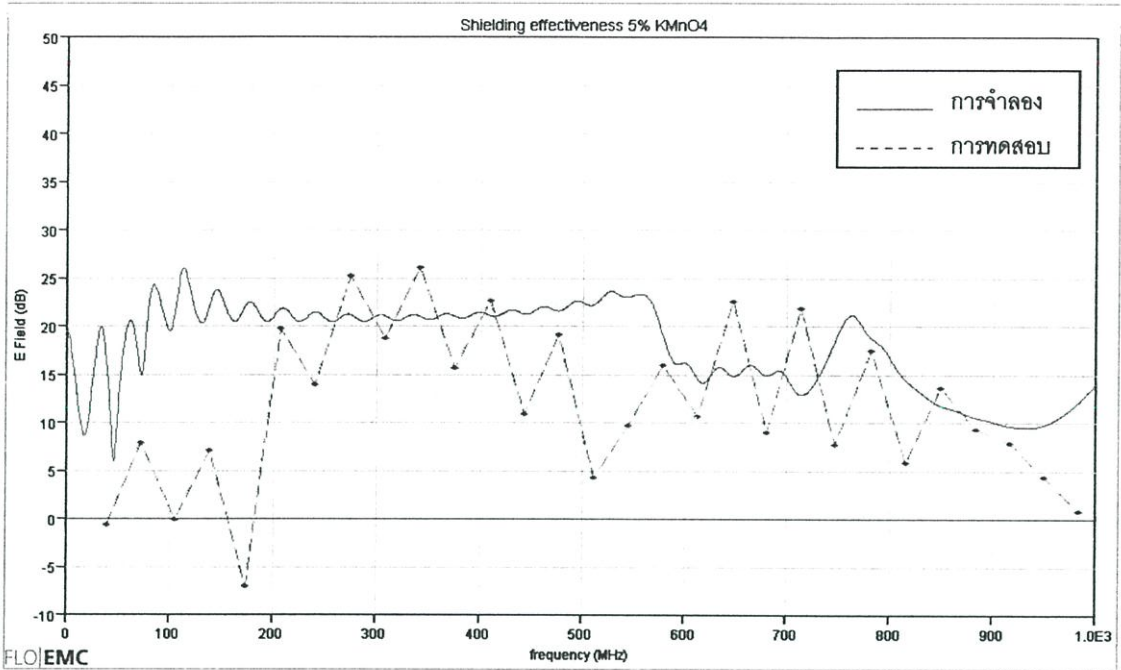
รูปที่ 5.15 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ 35% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด

จากรูปที่ 5.15 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ 35% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด ซึ่งจะพบว่าค่าคุณสมบัติการชีลด์ที่ได้จะคล้ายกับที่สารละลายเกลือ 15%, 20%, 25% และ 30 % สืบเนื่องมาจากในการทดสอบจริงเกลืออิมตัวไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวในสารละลายได้ และมีการตกตะกอนเป็นผลึกก้อนเกลือที่ก้นภาชนะ ทำให้ผลที่ได้จากการวัดเมื่อระดับสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นมีค่าคล้าย ๆ กัน

จากรูปการเปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่บรรจุภายในภาชนะปิด จะพบว่าเมื่อสารละลายมีระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่าคุณสมบัติการชีลด์ก็เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นด้วย จนกระทั่งถึงจุด ๆ หนึ่งที่สารละลายดังกล่าวไม่สามารถละลายได้หรือถึงจุดอิมตัวของสารละลาย ซึ่งจะสังเกตได้ง่าย ๆ จะพบว่าสารตกตะกอน ซึ่งหากมีการเพิ่มความเข้มข้นอีก ก็ไม่สามารถทำให้ค่าคุณสมบัติการชีลด์เพิ่มขึ้นได้อีก ซึ่งเป็นข้อจำกัดของสารที่นำมาทำเป็นตัวละลายหรือนำนั่นเอง

5.2.1.3 ผลการทดสอบและการจำลองการชีลด์ด้วยสารละลายต่างทับทิม

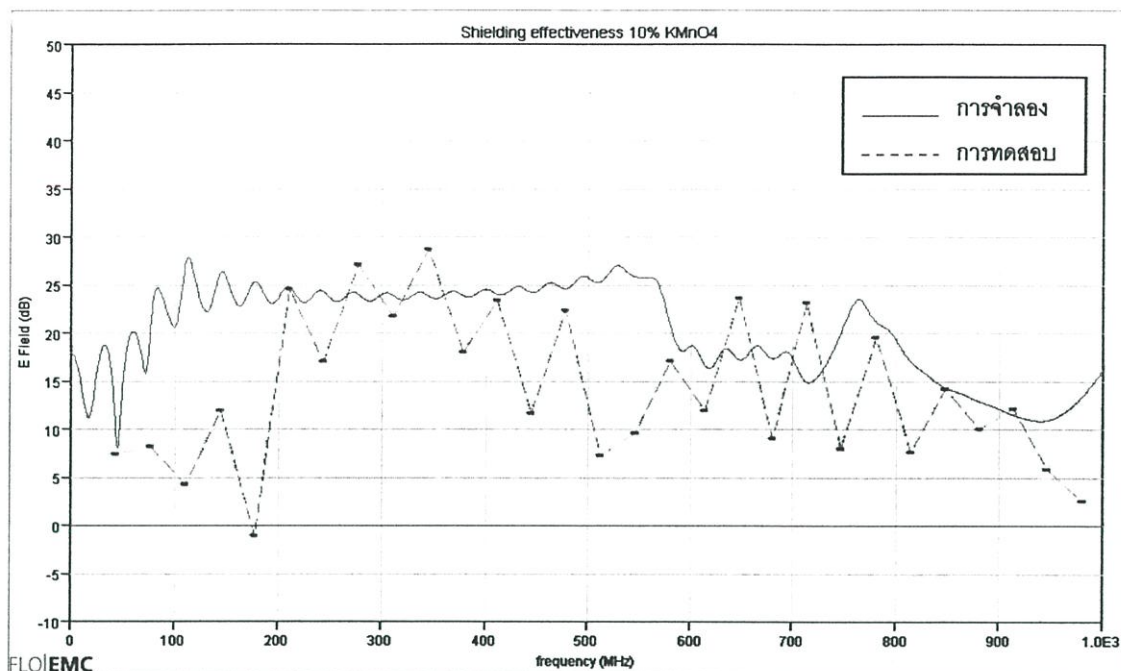
ก) สารละลายต่างทับทิมที่ระดับความเข้มข้น 5%



รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายต่างทับทิม 5% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด

จากรูปที่ 5.16 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายต่างทับทิม 5% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด ซึ่งจะพบว่าค่าคุณสมบัติการชีลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทั้งค่าที่ได้จากการวัดและการจำลอง แต่จะมีที่บางย่านความถี่ เช่น ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 200 MHz โดยประมาณ ค่าที่ได้จากการทดสอบกลับพบว่าสารละลายต่างทับทิมมีส่วนช่วยในการขยายสัญญาณ

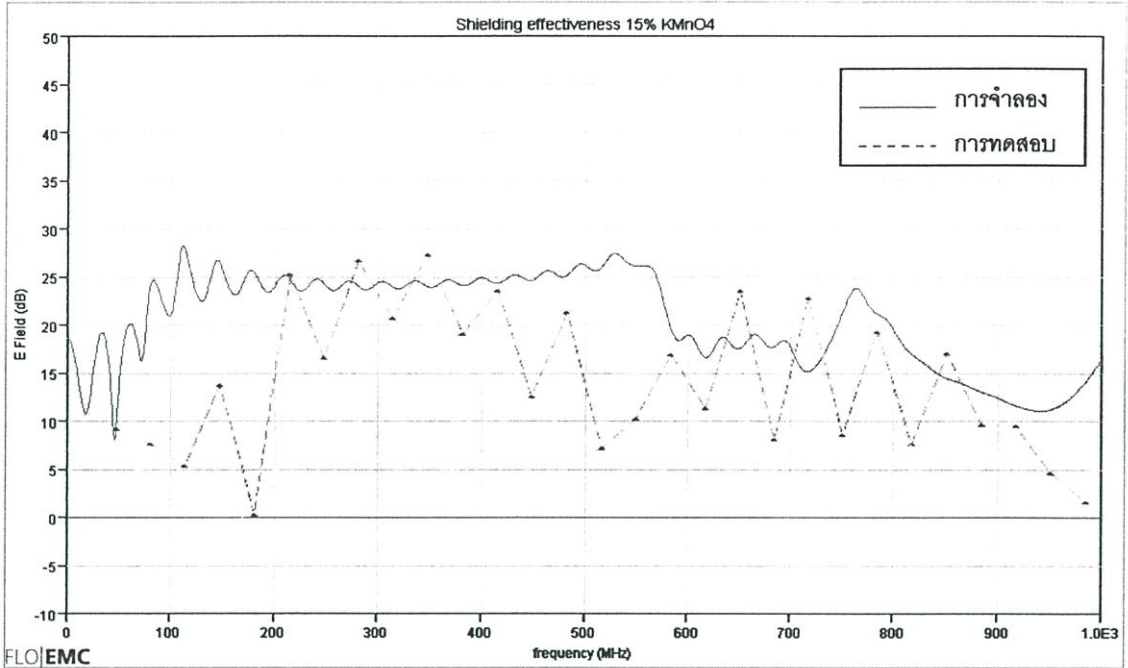
ข) สารละลายต่างทึบที่ระดับความเข้มข้น 10%



รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบ 10% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด

จากรูปที่ 5.17 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบ 10% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด ซึ่งจะพบว่าค่าการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทั้งค่าที่ได้จากการวัดและการจำลอง แต่จะมีที่บางย่านความถี่ เช่น ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 150 MHz ถึง 200 MHz โดยประมาณ ค่าที่ได้จากการทดสอบกลับพบว่า สารละลายต่างทึบมีส่วนช่วยในการขยายสัญญาณ ซึ่งค่าที่ได้มีค่าน้อยน้อยลงกว่าการทดสอบที่ระดับความเข้มข้นสารละลายต่างทึบ 5% อาจสืบเนื่องมาจากระดับความเข้มข้นของต่างทึบที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าคุณสมบัติการชิลด์ที่ได้เพิ่มขึ้นตามทำให้ไปหักล้างในส่วนที่ขยายแทน

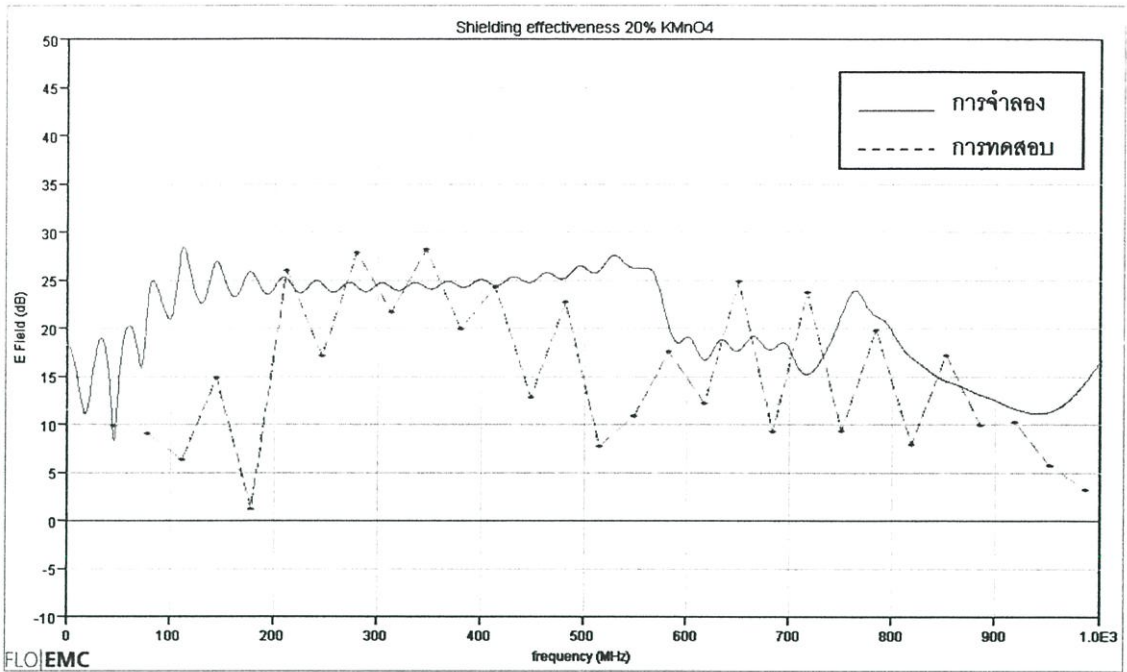
ก) สารละลายต่างทึบที่ระดับความเข้มข้น 15%



รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบ 15% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด

จากรูปที่ 5.18 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบ 15% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด ซึ่งจะพบว่าค่าการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่างๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทั้งค่าที่ได้จากการวัดและการจำลอง เนื่องด้วยระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นจึงไม่พบย่านความถี่ไหนที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ แต่ค่าที่ได้จากการทดสอบพบว่าแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากระดับความเข้มข้นก่อน ๆ เนื่องจากในขณะการทดสอบจริง สารละลายต่างทึบเริ่มอึดตัวไม่ละลายเป็นเนื้อเดียว และมีบางส่วนตกตะกอนเป็นผลึกต่างทึบที่ก้นภาชนะ ทำให้ไม่ค่าคุณสมบัติการชิลด์ไม่เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น

ง) สารละลายต่างทึบที่ระดับความเข้มข้น 20%

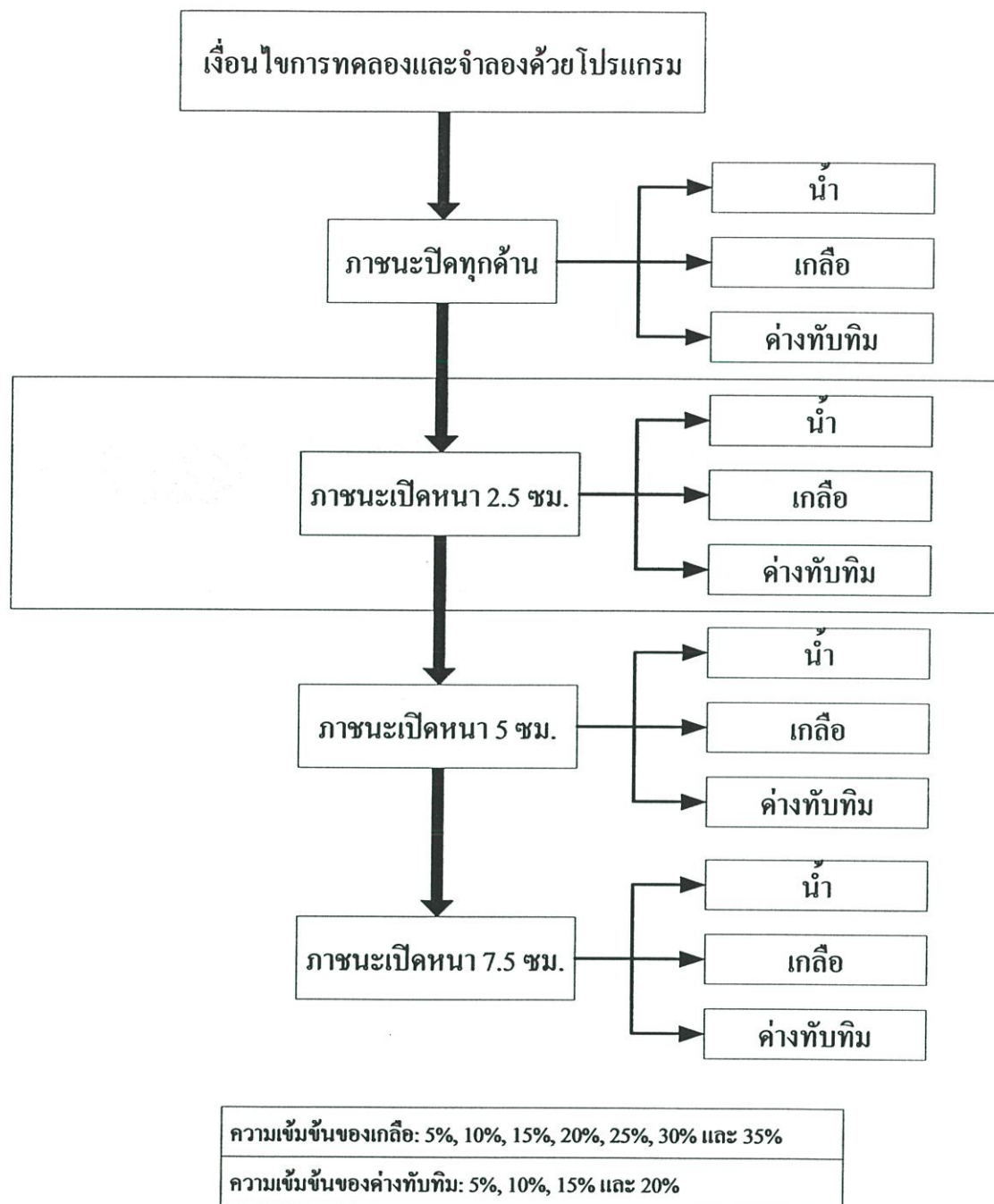


รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบ 20% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด

จากรูปที่ 5.19 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบ 20% ที่บรรจุภายในภาชนะปิด ซึ่งจะพบว่าค่าการลดทอนหรือการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทั้งค่าที่ได้จากการวัดและการจำลอง และค่าที่ได้จากการทดสอบพบว่าแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากระดับความเข้มข้นก่อน ๆ เนื่องจากการทดสอบจริงสารละลายต่างทึบเริ่มอึดตัวไม่ละลายเป็นเนื้อเดียว และมีบางส่วนตกตะกอนเป็นผลึกต่างทึบที่ก้นภาชนะ ทำให้ไม่ค่าคุณสมบัติการชิลด์ไม่เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น

จากรูปการเปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่บรรจุภายในภาชนะปิด จะพบว่าเมื่อสารละลายมีระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่าคุณสมบัติการชิลด์ก็เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นด้วย ถึงแม้ว่าที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ ที่บางความถี่ สารละลายต่างทึบจะมีส่วนช่วยในการขยายสัญญาณ แต่เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นขึ้น ค่าต่างทึบก็ทำหน้าที่ในการชิลด์สัญญาณ จนกระทั่งถึงจุด ๆ หนึ่งที่สารละลายดังกล่าวไม่สามารถละลายได้หรือถึงจุดอึดตัวของสารละลาย ซึ่งจะสังเกตได้ง่าย ๆ จะพบว่าสารตกตะกอน ซึ่งหากมีการเพิ่มความเข้มข้นอีก ก็ไม่สามารถทำให้ค่าคุณสมบัติการชิลด์เพิ่มขึ้นได้อีก ซึ่งเป็นข้อจำกัดของสารที่นำมาทำเป็นตัวละลายหรือน้ำนั่นเอง

**ผลการทดสอบและการจำลองการชีดต์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
ผ่านอากาศด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 2.5 เซนติเมตร**

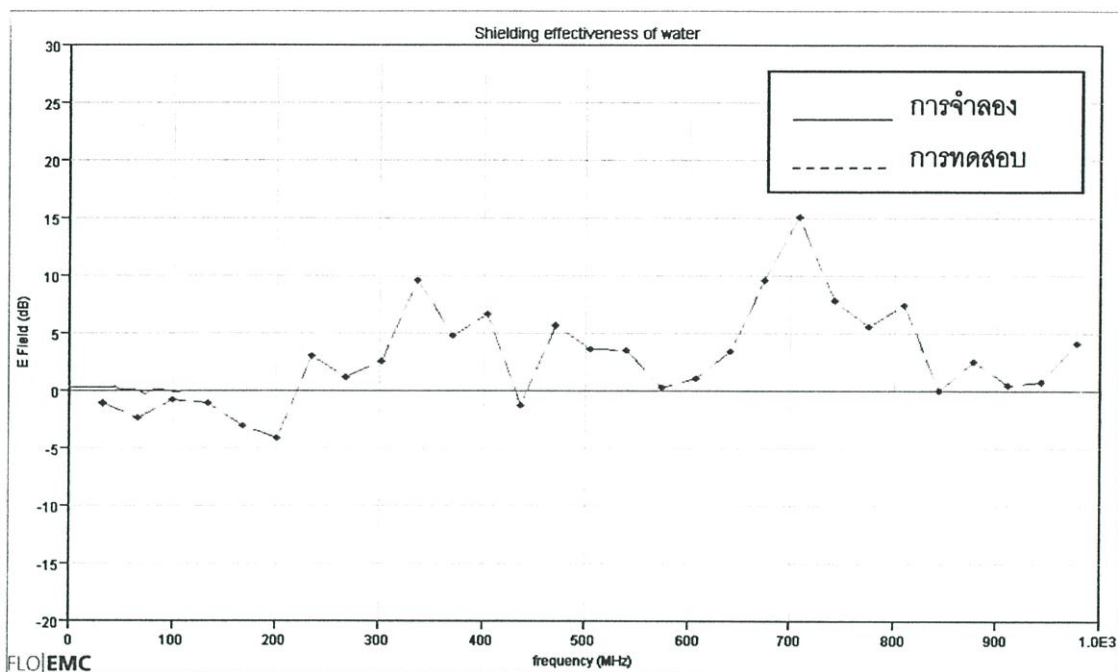


5.2.2 การก่้างหรือการช้ดด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง

หนา 2.5 เซนติเมตร

โดยแบ่งสารที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ น้ำ เกลือและด่างทับทิม ซึ่งผลการทดสอบและการจำลองสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

5.2.2.1 ผลการทดสอบและจำลองการช้ดด้วยน้ำหรือที่สารละลาย 0%

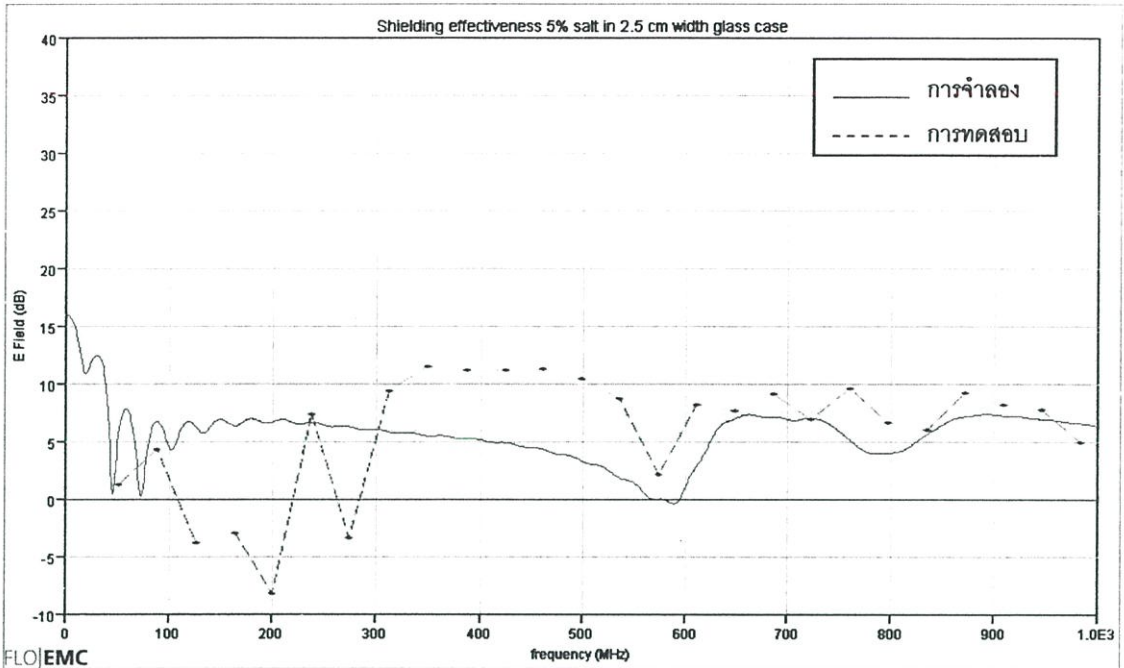


รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการช้ดของน้ำที่บรรจุภายในภาชนะที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.20 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการช้ดของน้ำหรือที่สารละลาย 0% ที่บรรจุภายในภาชนะกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 2.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าที่ได้ภายหลังจากการใส่น้ำนั้นมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง โดยในช่วงความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 300 MHz จะพบว่าน้ำมีส่วนช่วยในการขยายสัญญาณ แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 300 MHz ถึง 1,000 MHz น้ำกลับมีส่วนในการช้ดสัญญาณ

5.2.2.2 ผลการทดสอบและการจำลองการกำบังหรือการชีลด์ด้วยสารละลายเกลือ

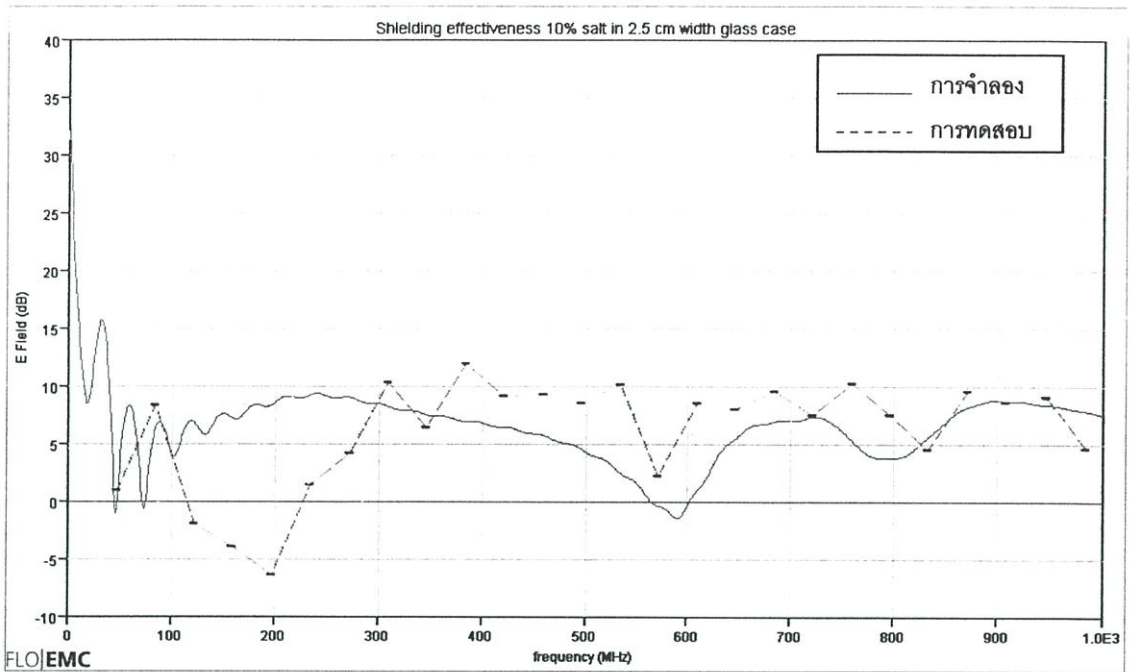
ก) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 5%



รูปที่ 5.21 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ 5% บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบน ที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.21 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ 5% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชีลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 100 MHz ถึง 300 MHz ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 5% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ

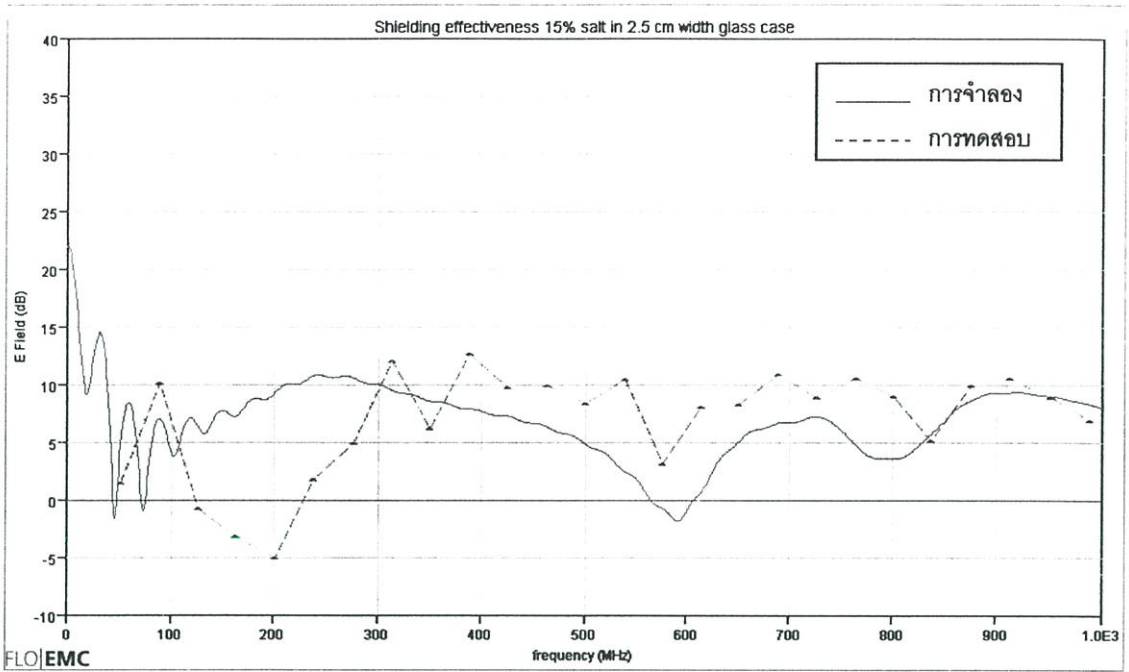
ข) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 10%



รูปที่ 5.22 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 10% บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบน ที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.22 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 10% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 100 MHz ถึง 230 MHz ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 10% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ เช่นเดียวกับผลการทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 5% แต่การขยายสัญญาณลดลงอันเนื่องมาจากระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น

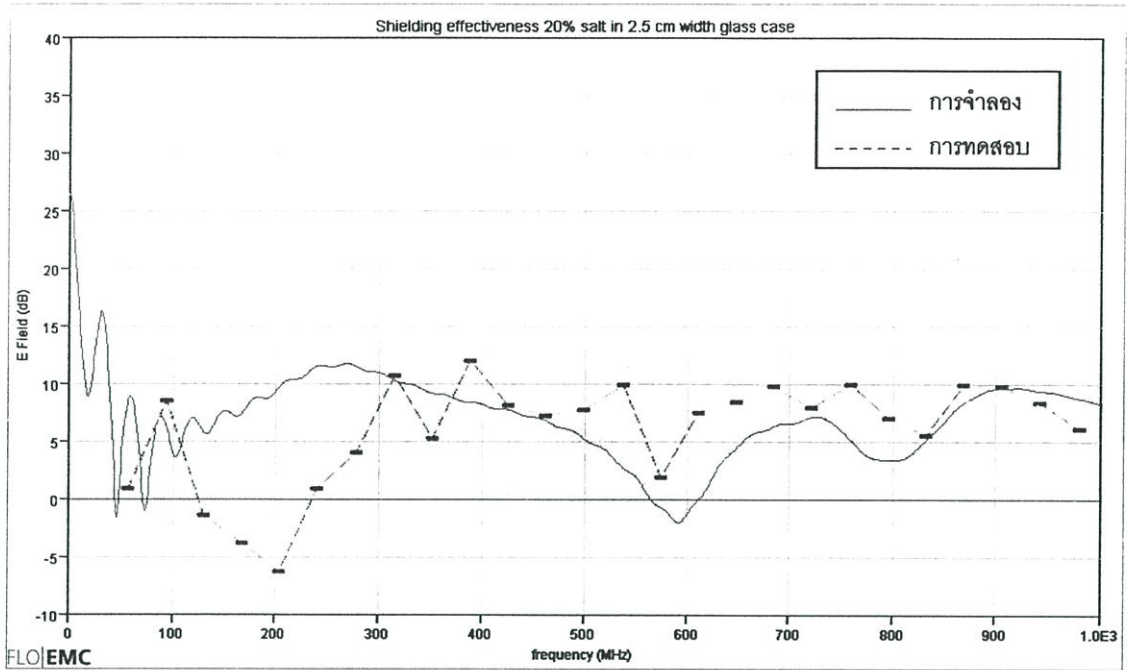
ค) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 15%



รูปที่ 5.23 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 15% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.23 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 15% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าจากการวัดที่ย่านความถี่ 100 MHz ถึง 230 MHz ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 15% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ ในขณะที่ผลที่ได้จากการจำลองมีการขยายสัญญาณในช่วงความถี่ 550 MHz ถึง 620 MHz แทน

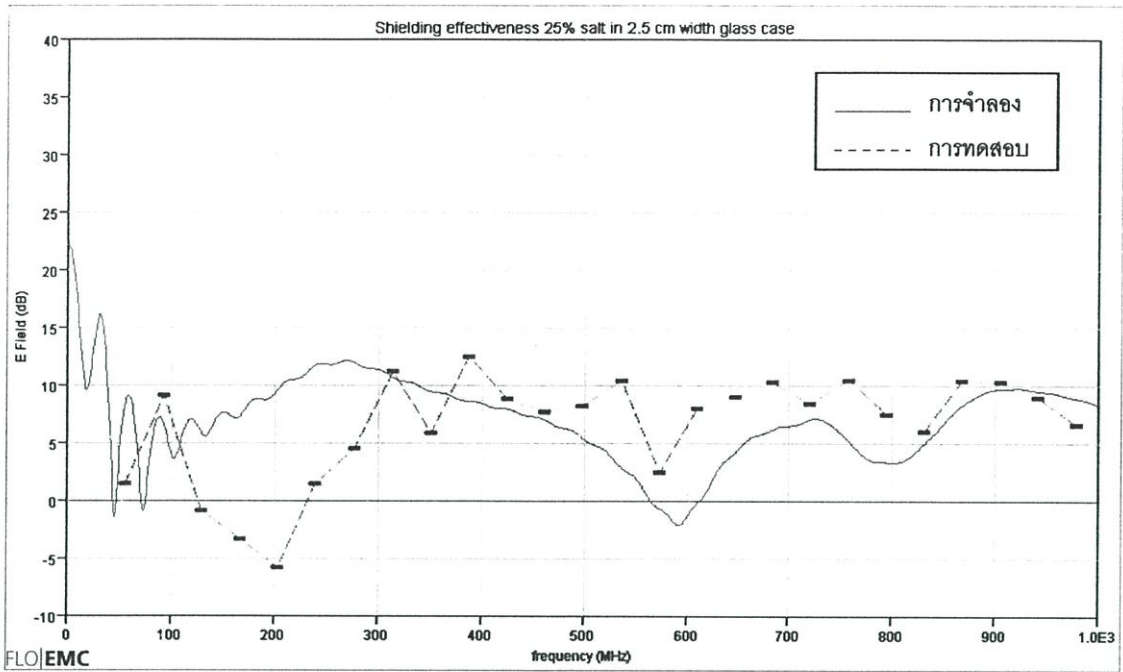
ง) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 20%



รูปที่ 5.24 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 20% บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบน ที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.24 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 20% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าผลจากการวัดที่ย่านความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 230 เมกะเฮิร์ตซ์ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 20% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ ในขณะที่ผลที่ได้จากการจำลองมีการขยายสัญญาณในช่วงความถี่ 550 MHz ถึง 620 MHz แทน

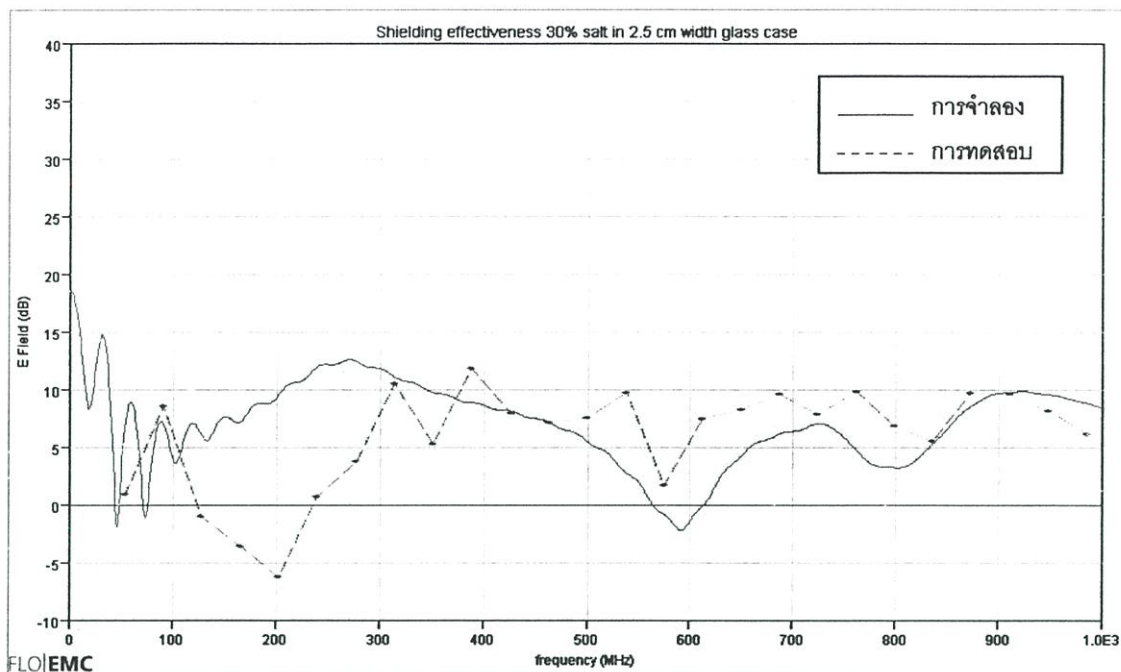
จ) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 25%



รูปที่ 5.25 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 25% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.25 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 25% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าคุณสมบัติการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 230 เมกะเฮิร์ตซ์ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 25% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ ในขณะที่ย่านความถี่อื่น ๆ คุณสมบัติการชิลด์เริ่มแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากในการทดสอบจริงเกลืออิมตัวไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวในสารละลายได้ และมีการตกตะกอนเป็นผลึกก้อนเกลือที่กั้นภาชนะ ทำให้ผลที่ได้จากการวัดเมื่อระดับสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นมีค่าคล้าย ๆ กัน

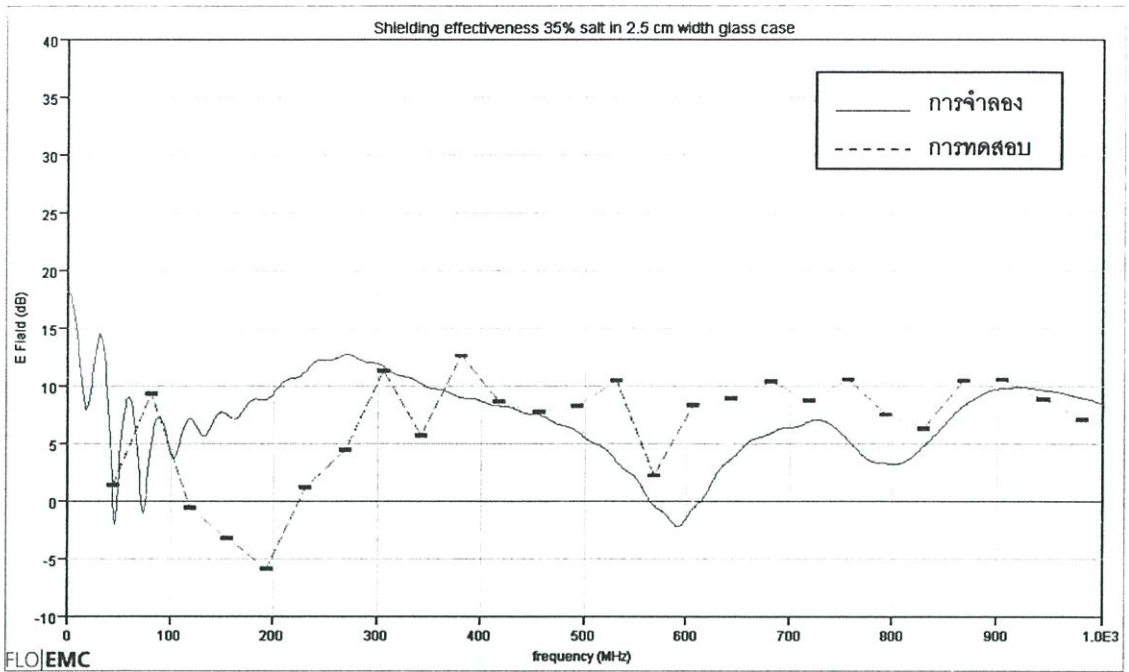
จ) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 30%



รูปที่ 5.26 เปรียบเทียบคุณสมบัติการซึบซึมของสารละลายเกลือ 30% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด
ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.26 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการซึบซึมของสารละลายเกลือ 30% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการซึบซึมที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าจากการวัดที่ย่านความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 230 เมกะเฮิร์ตซ์ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 30% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ ในขณะที่ย่านความถี่อื่น ๆ คุณสมบัติการซึบซึมเริ่มแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากในการทดสอบจริงเกลืออิมตัวไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวในสารละลายได้ และมีการตกตะกอนเป็นผลึกก้อนเกลือที่ก้นภาชนะ ทำให้ผลที่ได้จากการวัดเมื่อระดับสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นมีค่าคล้าย ๆ กันกับเช่นเดียวที่ระดับความเข้มข้นที่ 25%

จ) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 35%



รูปที่ 5.27 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ 35% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร

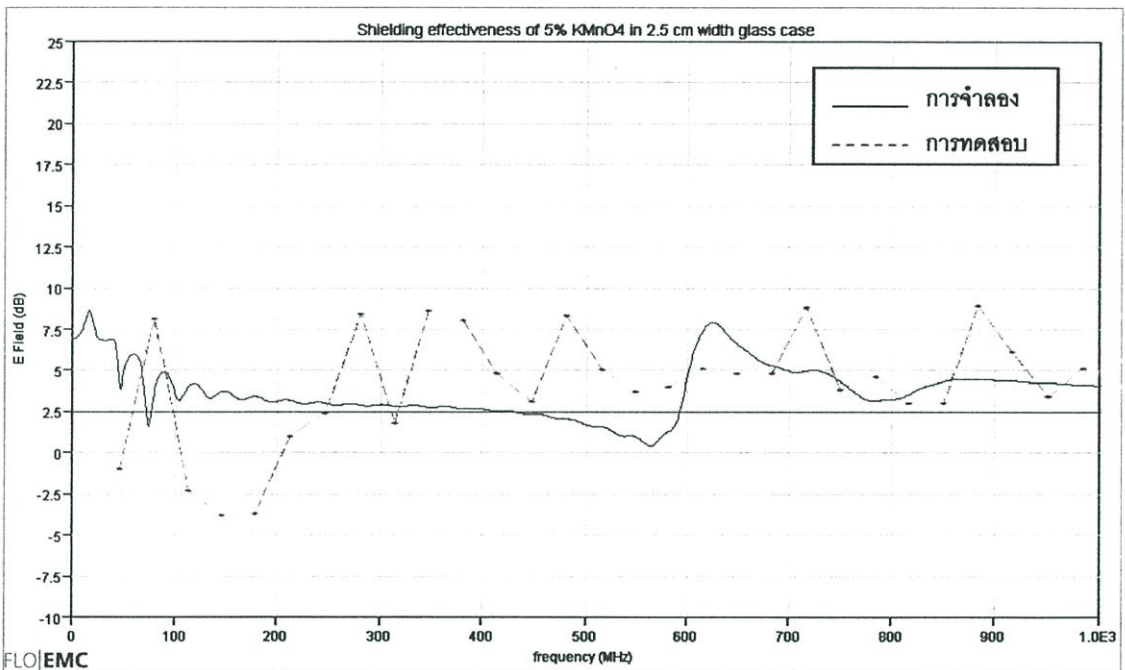
จากรูปที่ 5.27 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ 35% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชีลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าจากการวัดที่ย่านความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 230 เมกะเฮิร์ตซ์ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 35% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ ในขณะที่ย่านความถี่อื่น ๆ คุณสมบัติการชีลด์เริ่มแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากในการทดสอบจริงเกลืออิมตัวไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวในสารละลายได้ และมีการตกตะกอนเป็นผลึกก้อนเกลือที่ก้นภาชนะ ทำให้ผลที่ได้จากการวัดเมื่อระดับสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นมีค่าคล้าย ๆ กันกับเช่นเดียวที่ระดับความเข้มข้นที่ 25% และ 30%

จากรูปการเปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร จะพบว่าเมื่อสารละลายมีระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่าคุณสมบัติการชีลด์ก็เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นด้วย จนกระทั่งถึงจุด ๆ หนึ่งที่สารละลายดังกล่าวไม่สามารถละลายได้หรือถึงจุดอิมตัวของสารละลาย

ซึ่งจะสังเกตได้ง่าย ๆ จะพบว่าสสารตกตะกอน ซึ่งหากมีการเพิ่มความเข้มข้นอีก ก็ไม่สามารถทำให้ค่าคุณสมบัติการชีลด์เพิ่มขึ้นได้อีก ซึ่งเป็นข้อจำกัดของสารที่นำมาทำเป็นตัวละลายหรือน้ำนั่นเอง ซึ่งจากการทดลองด้วยภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตรนี้ พบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่าคุณสมบัติการชีลด์ก็เพิ่มขึ้นตามเช่นเดียวกับการชีลด์ด้วยภาชนะแบบปิด แต่ประสิทธิภาพการชีลด์ที่ได้จะมีค่าน้อยกว่า อันเนื่องมาจากการทดลองแบบนี้เป็นการวางขวาง ซึ่งทำให้มีการเดินทางของสัญญาณรอบข้าง ในขณะที่การชีลด์ทุกด้านจะปิดกั้นการเดินทางของสัญญาณทุกด้าน

5.2.2.3 ผลการทดสอบและการจำลองการชีลด์ด้วยสารละลายต่างทับทิม

ก) สารละลายต่างทับทิมที่ระดับความเข้มข้น 5%

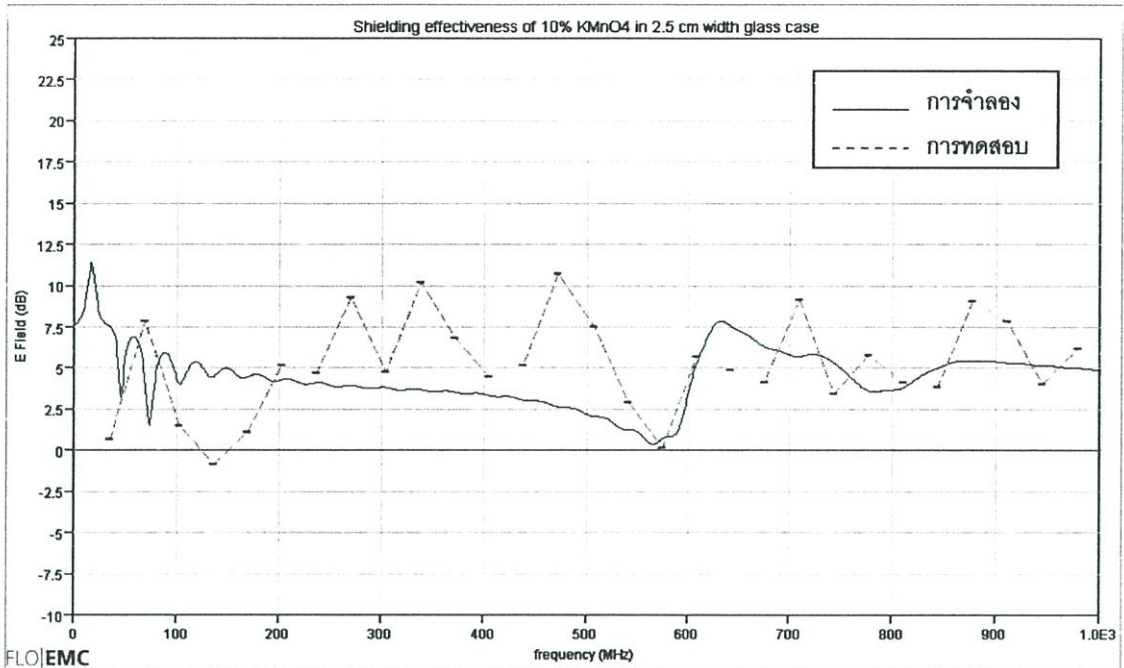


รูปที่ 5.28 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายต่างทับทิม 5% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.28 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายต่างทับทิม 5% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าคุณสมบัติชีลด์ที่ได้ทั้งจากการทดลองและจำลองมีแนวโน้มไปในทาง

เดียวกัน แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 30 MHz ถึง 220 MHz ผลจากการวัดพบว่าสารละลายมีคุณสมบัติขยายสัญญาณ

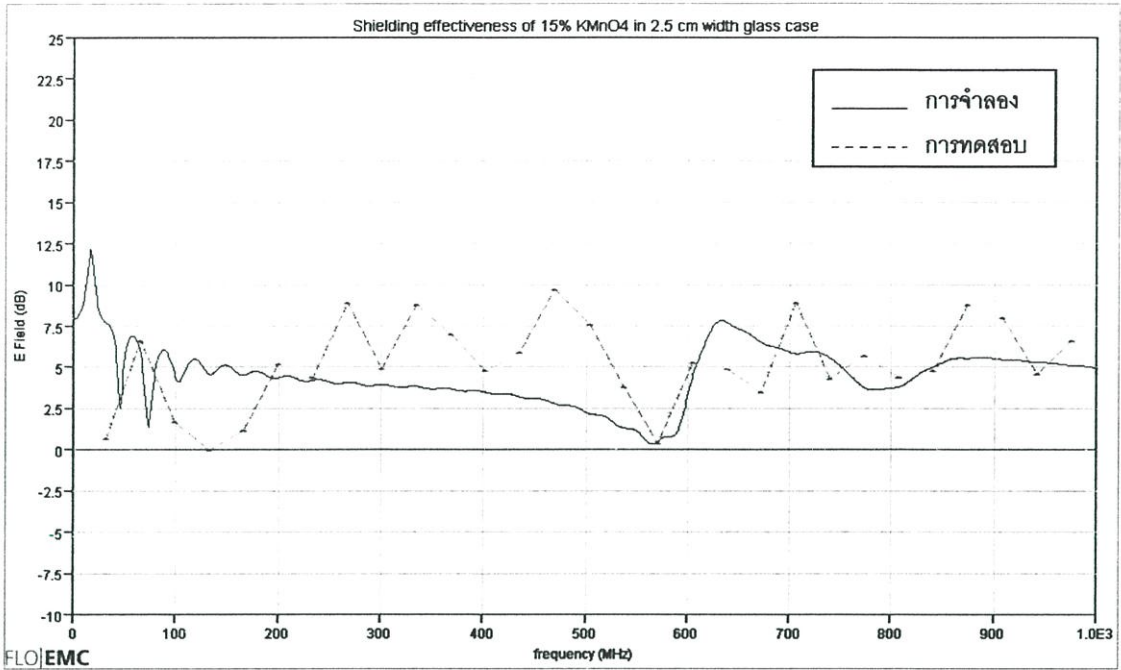
ข) สารละลายต่างทึบที่ระดับความเข้มข้น 10%



รูปที่ 5.29 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบ 10% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.29 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบ 10% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าคุณสมบัติการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 100 MHz ถึง 230 MHz ปรากฏว่าสารละลายต่างทึบ 10% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ เช่นเดียวกับผลการทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 5% แต่การขยายสัญญาณลดลงอันเนื่องมาจากระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น

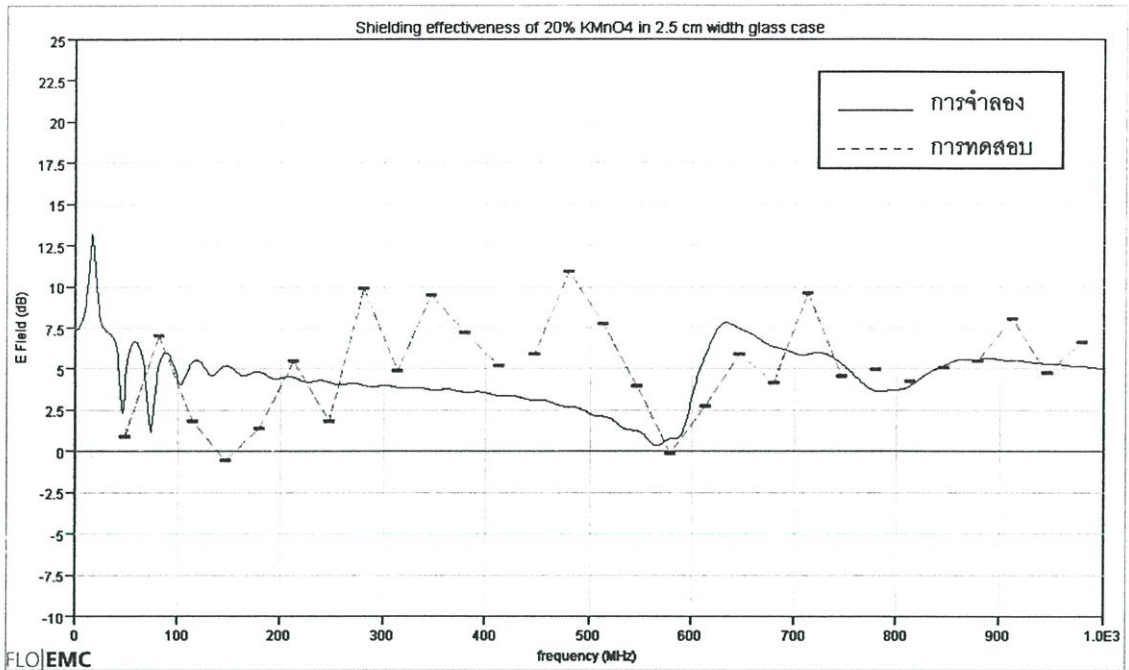
ค) สารละลายต่างทึบที่มีระดับความเข้มข้น 15%



รูปที่ 5.30 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบ 15% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.30 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบ 15% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทั้งค่าที่ได้จากการวัดและการจำลอง เนื่องด้วยระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นจึงไม่พบย่านความถี่ไหนที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ แต่ค่าที่ได้จากการทดสอบพบว่าแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากระดับความเข้มข้นก่อน ๆ เนื่องจากในขณะการทดสอบจริงสารละลายต่างทึบเริ่มอึดตัวไม่ละลายเป็นเนื้อเดียว และมีบางส่วนตกตะกอนเป็นผลึกต่างทึบที่ก้นภาชนะ ทำให้ค่าคุณสมบัติการชิลด์ไม่เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น

ง) สารละลายต่างทึบที่ระดับความเข้มข้น 20%



รูปที่ 5.31 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบ 20% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร

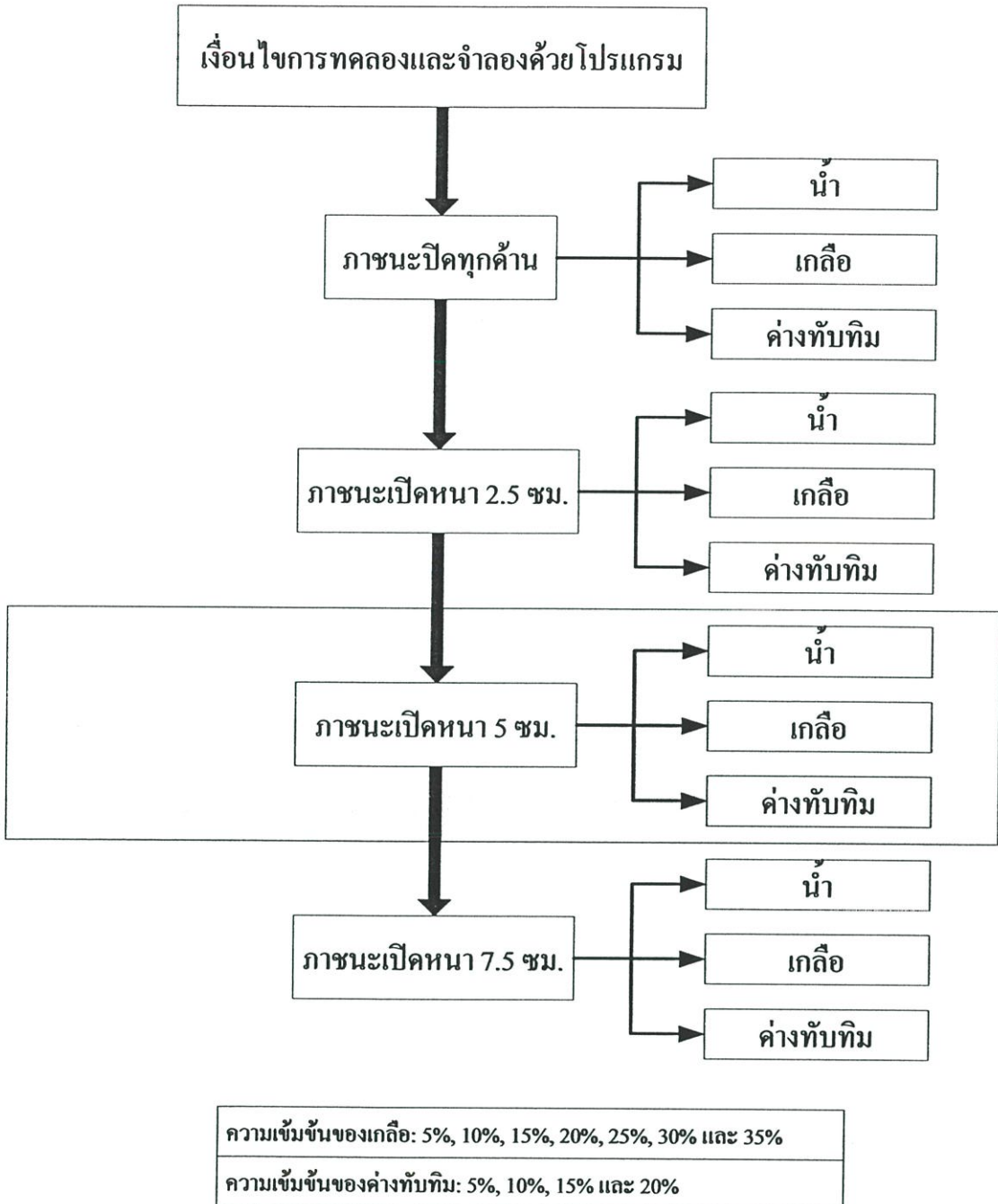
จากรูปที่ 5.31 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบ 20% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชิลด์ที่ยานความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทั้งค่าที่ได้จากการวัดและการจำลอง และค่าที่ได้จากการทดสอบพบว่าแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากระดับความเข้มข้นก่อน ๆ เนื่องจากในขณะการทดสอบจริงสารละลายต่างทึบเริ่มอิมตัวไม่ละลายเป็นเนื้อเดียว และมีบางส่วนตกตะกอนเป็นผลึกต่างทึบที่กั้นภาชนะ ทำให้ค่าคุณสมบัติการชิลด์ไม่เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น

จากรูปการเปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตร จะพบว่าเมื่อสารละลายมีระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่าคุณสมบัติการชิลด์ก็เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นด้วย ถึงแม้ว่าที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ ที่บางความถี่สารละลายต่างทึบจะมีส่วนช่วยในการขยายสัญญาณ แต่เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นขึ้น ต่างทึบก็ทำหน้าที่ในการชิลด์สัญญาณ จนกระทั่งถึงจุด ๆ หนึ่งที่สารละลายดังกล่าวไม่สามารถละลายได้หรือถึงจุดอิมตัวของสารละลาย ซึ่งจะสังเกตได้

ง่าย ๆ จะพบว่าสสารตกตะกอน ซึ่งหากมีการเพิ่มความเข้มข้นอีก ก็ไม่สามารถทำให้ค่าคุณสมบัติการซึบซึมเพิ่มขึ้นได้อีก ซึ่งเป็นข้อจำกัดของสารที่นำมาทำเป็นตัวละลายหรือน้ำนั่นเอง

ผลจากการทดลองและจำลองด้วยภาษาณะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 2.5 เซนติเมตรนี้ พบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่าคุณสมบัติการซึบซึมก็เพิ่มขึ้นตามเช่นเดียวกับการซึบซึมด้วยภาษาณะแบบปิด แต่ประสิทธิภาพการซึบซึมที่ได้จะมีค่าน้อยกว่า อันเนื่องมาจากการทดลองแบบนี้เป็นการวางขวาง ซึ่งทำให้มีการเดินทางของสัณฐานรอบข้าง ในขณะที่การซึบซึมทุกด้านจะปิดกั้นการเดินทางของสัณฐานทุกด้าน

**ผลการทดสอบและการจำลองการซึ่ดสัมฤทธิ์ของรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
ผ่านอากาศด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 5 เซนติเมตร**

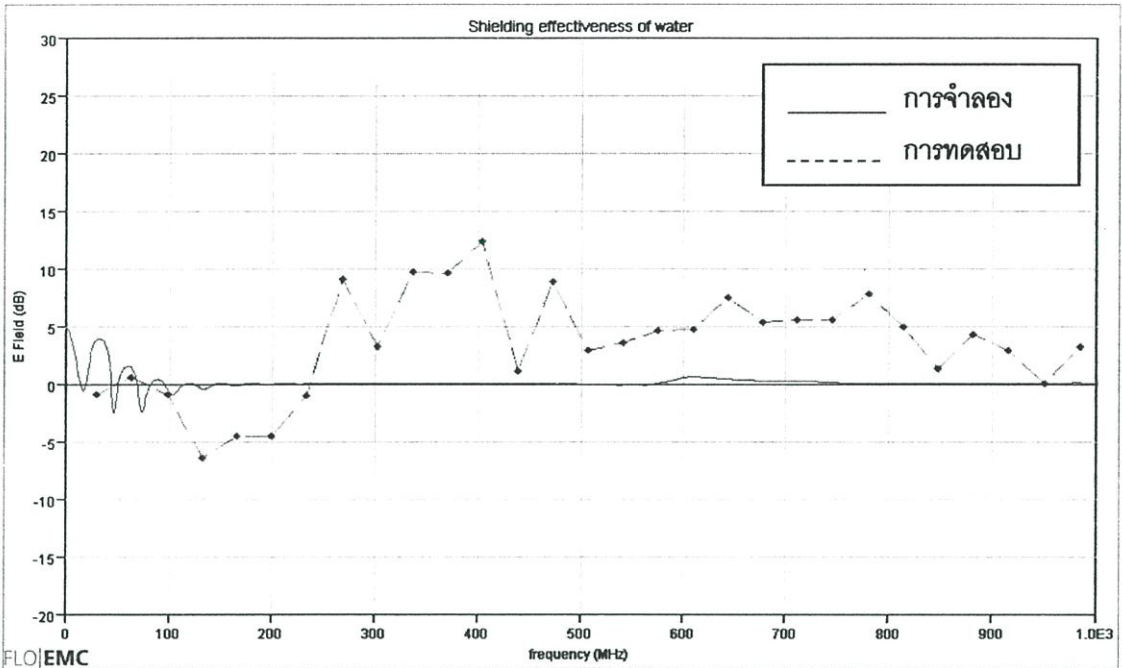


5.2.3 การก้ำบังหรือการชีลด์ด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง

หนา 5 เซนติเมตร

โดยแบ่งสารที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ น้ำ เกลือและค้างทับทิม ซึ่งผลการทดสอบและการจำลองสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

5.2.3.1 ผลการทดสอบและจำลองการชีลด์ด้วยน้ำหรือที่สารละลาย 0%

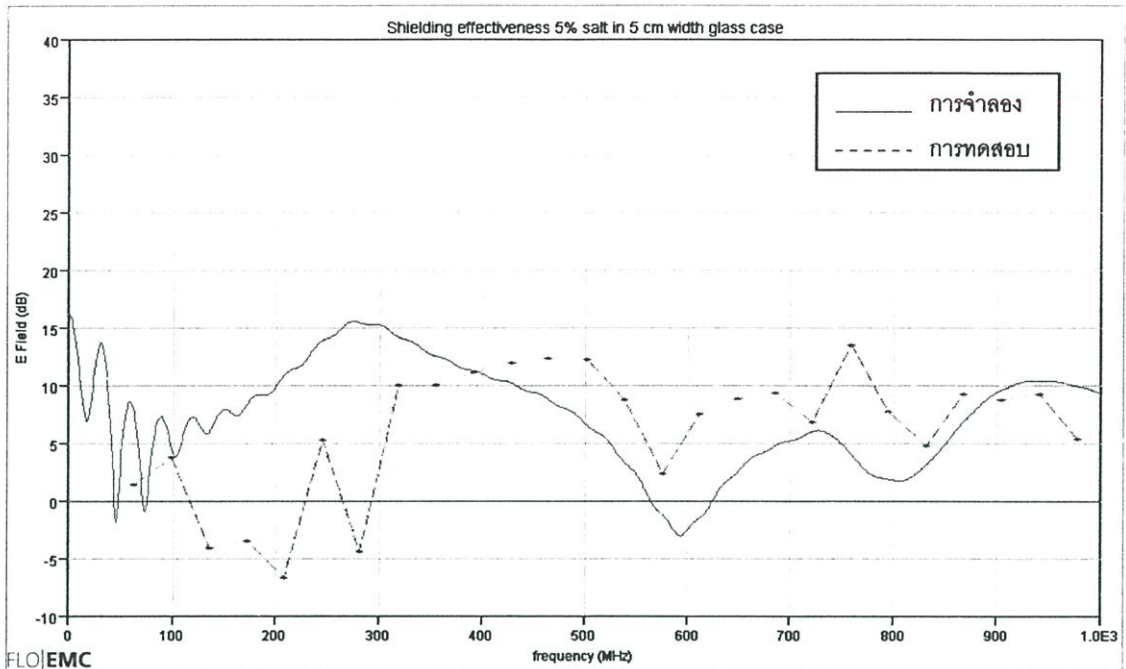


รูปที่ 5.32 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ของน้ำที่บรรจุภายในภาชนะที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.32 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชีลด์ของน้ำหรือที่สารละลาย 0% ที่บรรจุภายในภาชนะกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าที่ได้ภายหลังจากการใส่น้ำนั้นมันทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง โดยในช่วงความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 250 MHz จะพบว่าน้ำมีส่วนช่วยในการขยายสัญญาณ แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 250 MHz ถึง 1,000 MHz น้ำกลับมีส่วนในการชีลด์สัญญาณ

5.2.3.2 ผลการทดสอบและการจำลองการกำบังหรือการชีลด์ด้วยสารละลายเกลือ

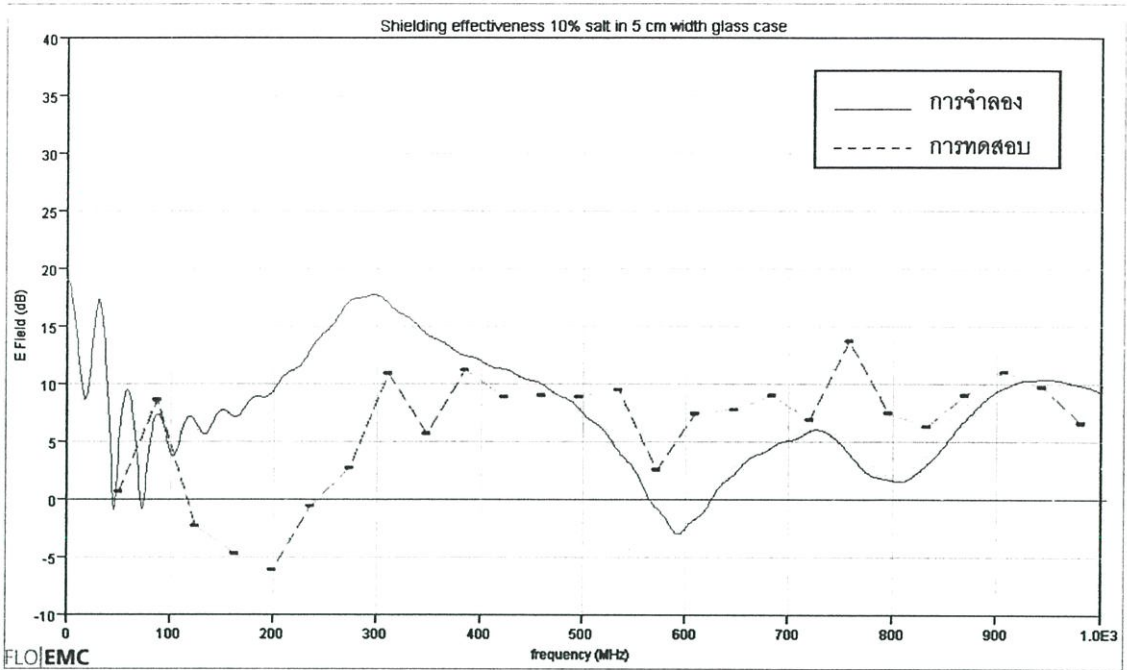
ก) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 5%



รูปที่ 5.33 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ 5% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.33 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ 5% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชีลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 100 MHz ถึง 300 MHz ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 5% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ

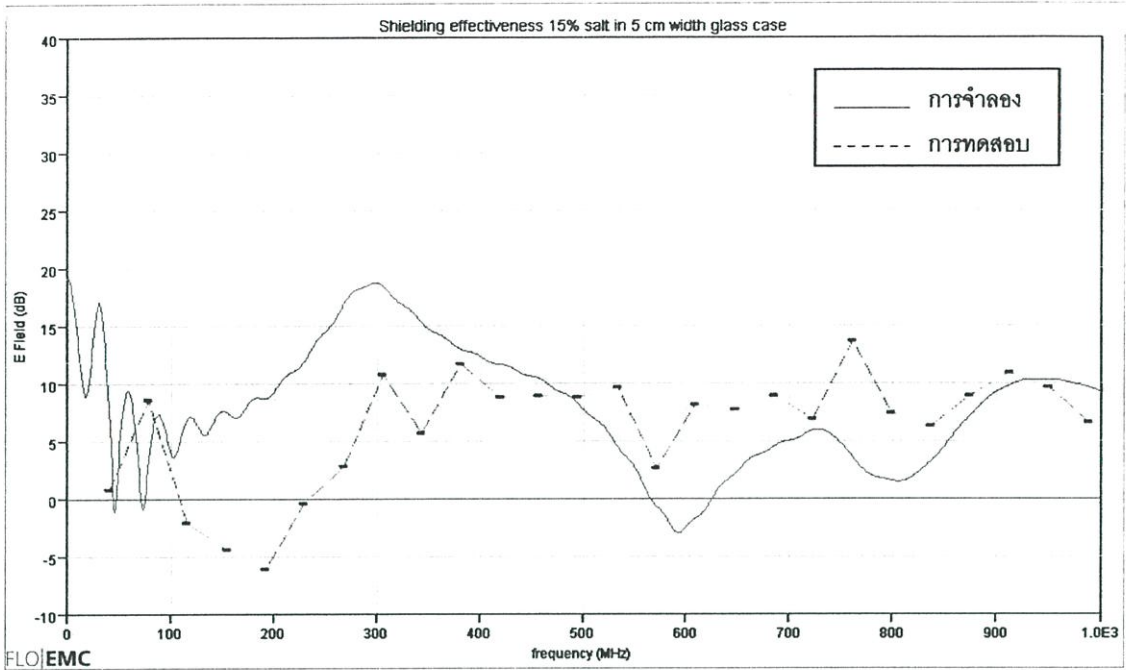
ข) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 10%



รูปที่ 5.34 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 10% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด
ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.34 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 10% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 100 MHz ถึง 250 MHz ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 10% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ เช่นเดียวกับผลการทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 5% แต่การขยายสัญญาณลดลงอันเนื่องมาจากระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น

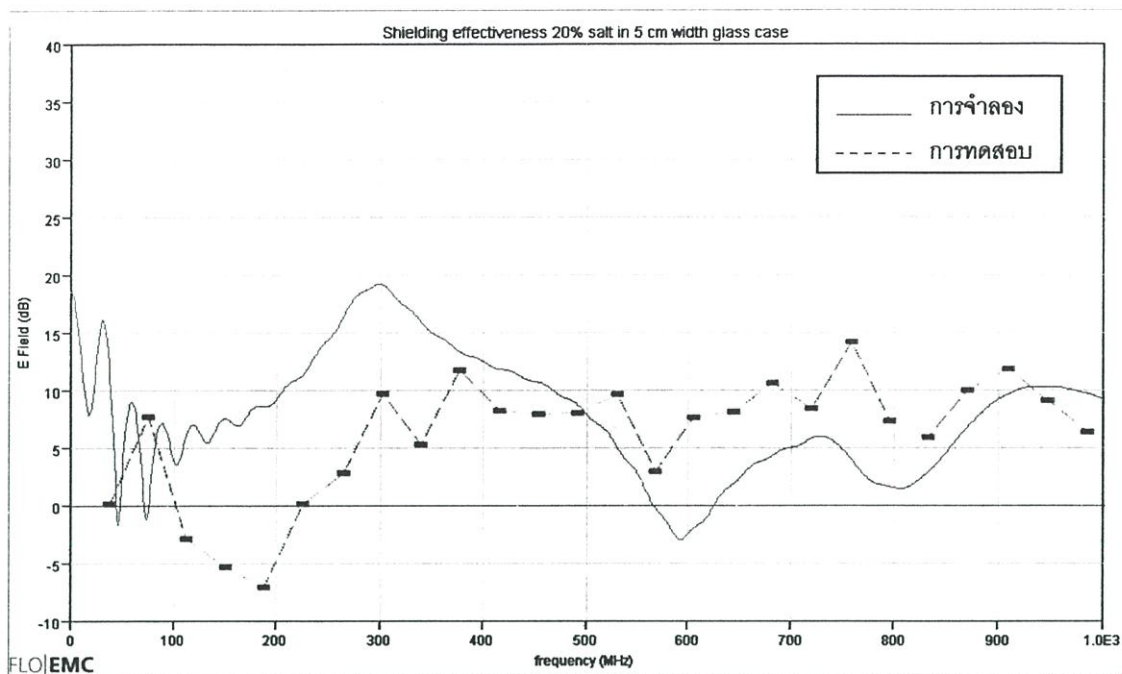
ค) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 15%



รูปที่ 5.35 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ 15% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด
ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.35 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ 15% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชีลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าจากการวัดที่ย่านความถี่ 100 MHz ถึง 230 MHz ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 15% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ ในขณะที่ผลที่ได้จากการจำลองมีการขยายสัญญาณในช่วงความถี่ 550 MHz ถึง 620 MHz แทน

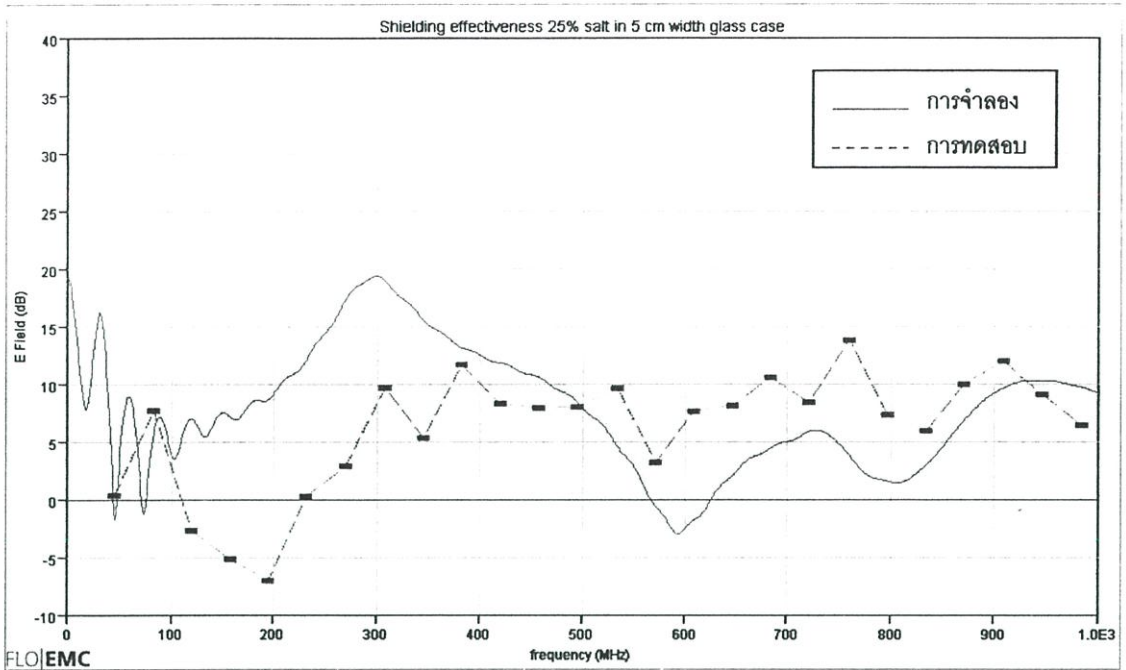
ง) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 20%



รูปที่ 5.36 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 20% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด
ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.36 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 20% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าผลจากการวัดที่ย่านความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 230 เมกะเฮิร์ตซ์ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 20% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ ในขณะที่ผลที่ได้จากการจำลองมีการขยายสัญญาณในช่วงความถี่ 550 MHz ถึง 620 MHz แทน

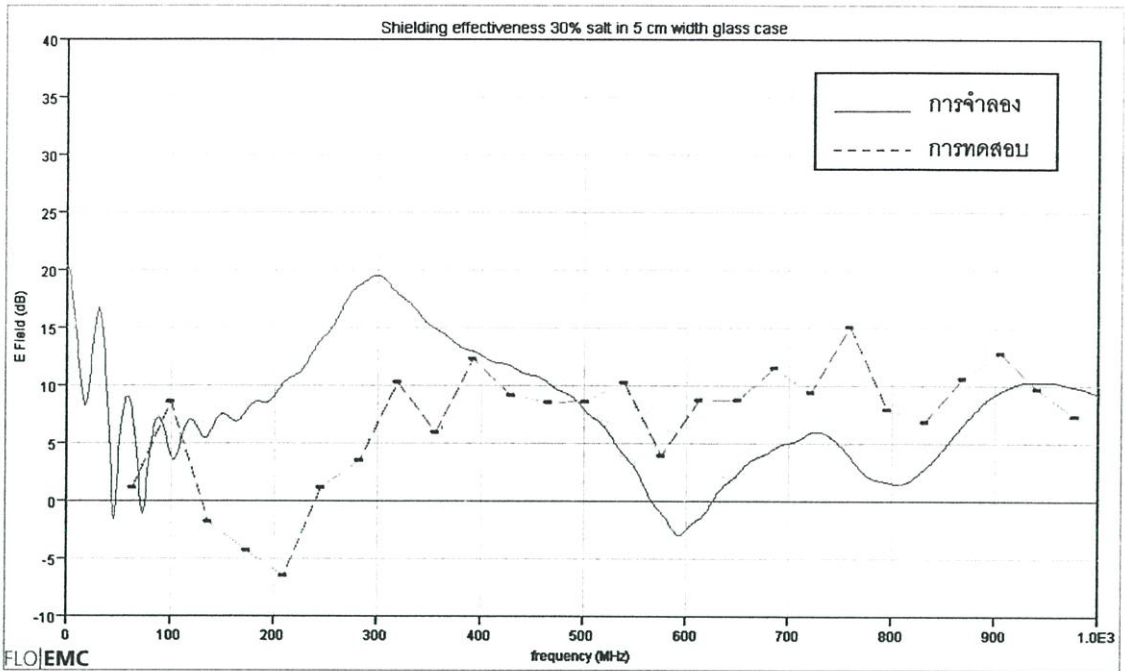
จ) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 25%



รูปที่ 5.37 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 25% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด
ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.37 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการการชิลด์ของสารละลายเกลือ 25% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าคุณสมบัติการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 230 เมกะเฮิร์ตซ์ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 25% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ ในขณะที่ย่านความถี่อื่น ๆ คุณสมบัติการชิลด์เริ่มแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากในการทดสอบจริงเกลืออิมิตัวไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวในสารละลายได้ และมีการตกตะกอนเป็นผลึกก้อนเกลือที่ก้นภาชนะ ทำให้ผลที่ได้จากการวัดเมื่อระดับสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นมีค่าคล้าย ๆ กัน

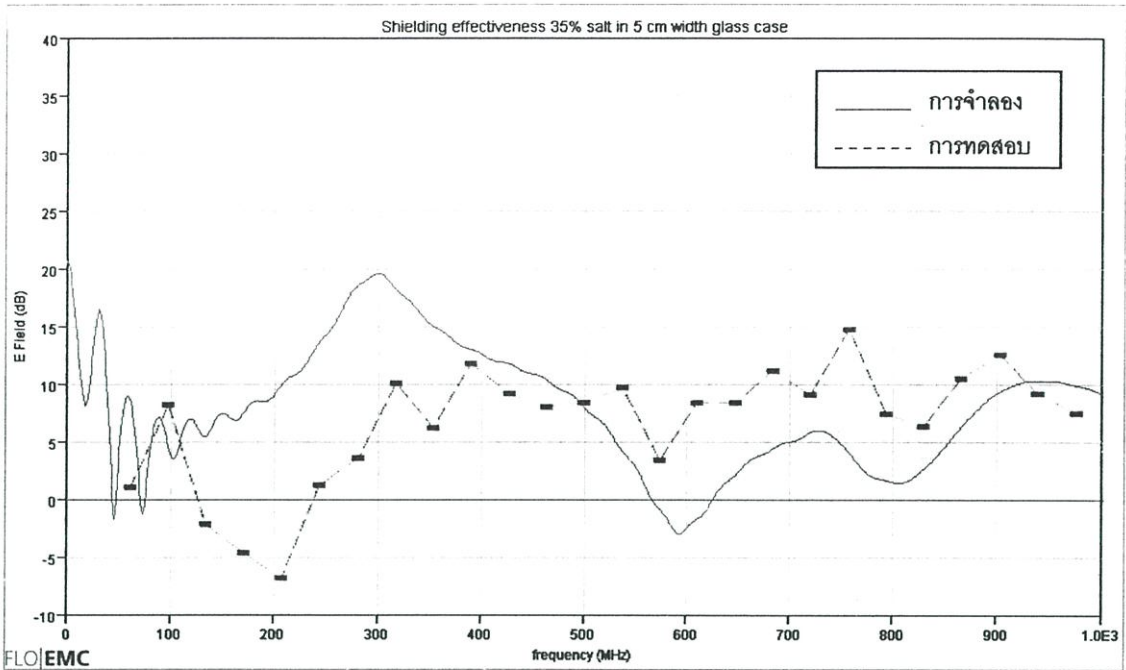
จ) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 30%



รูปที่ 5.38 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 30% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.38 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 30% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าจากการวัดที่ย่านความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 230 เมกะเฮิร์ตซ์ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 30% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ ในขณะที่ย่านความถี่อื่น ๆ คุณสมบัติการชิลด์เริ่มแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากการทดสอบจริงเกลืออิมตัวไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวในสารละลายได้ และมีการตกตะกอนเป็นผลึกก้อนเกลือที่ก้นภาชนะ ทำให้ผลที่ได้จากการวัดเมื่อระดับสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นมีค่าคล้าย ๆ กันกับเช่นเดียวที่ระดับความเข้มข้นที่ 25%

ข) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 35%



รูปที่ 5.39 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 35% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร

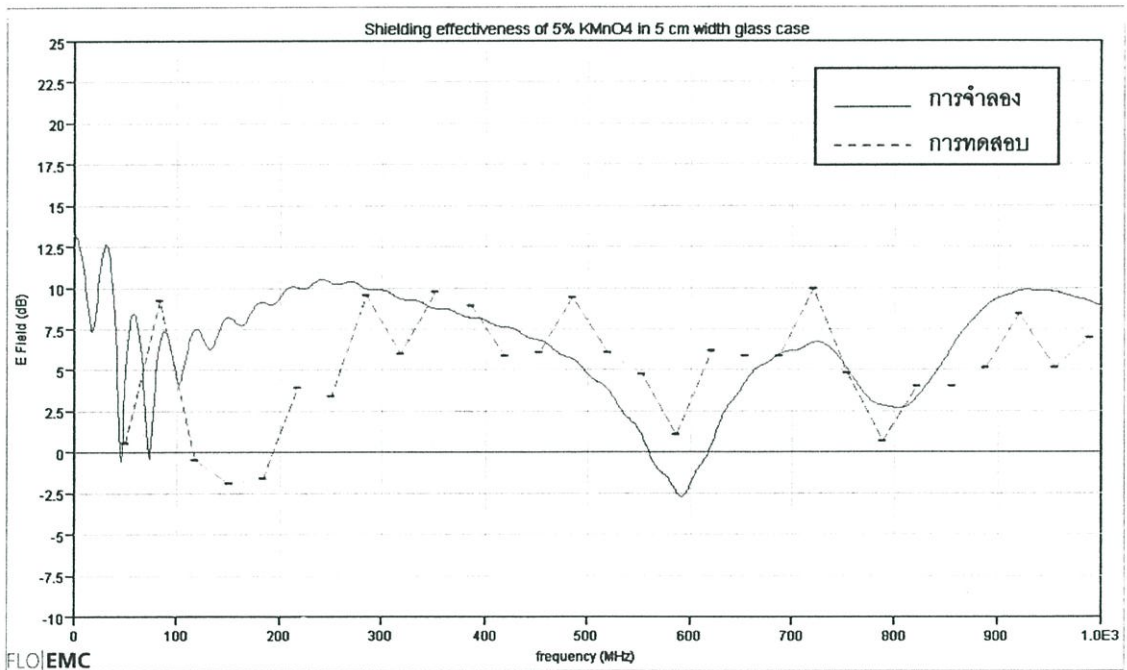
จากรูปที่ 5.39 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 35% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าจากการวัดที่ย่านความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 230 เมกะเฮิร์ตซ์ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 35% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ ในขณะที่ย่านความถี่อื่น ๆ คุณสมบัติการชิลด์เริ่มแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากในการทดสอบจริงเกลืออิมตัวไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวในสารละลายได้ และมีการตกตะกอนเป็นผลึกก้อนเกลือที่ก้นภาชนะ ทำให้ผลที่ได้จากการวัดเมื่อระดับสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นมีค่าคล้าย ๆ กันกับเช่นเดียวที่ระดับความเข้มข้นที่ 25% และ 30%

จากรูปการเปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร จะพบว่าเมื่อสารละลายมีระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่าคุณสมบัติการชิลด์ก็เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นด้วย จนกระทั่งถึง

จุด ๆ หนึ่งที่สารละลายดังกล่าวไม่สามารถละลายได้หรือถึงจุดอิ่มตัวของสารละลาย ซึ่งจะสังเกตได้ง่าย ๆ จะพบว่าสารตกตะกอน ซึ่งหากมีการเพิ่มความเข้มข้นอีก ก็ไม่สามารถทำให้ค่าคุณสมบัติการชี้วัดเพิ่มขึ้นได้อีก ซึ่งเป็นข้อจำกัดของสารที่นำมาทำเป็นตัวละลายหรือน้ำนั้นเอง ซึ่งจากการทดลองด้วยภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตรนี้ พบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่าคุณสมบัติการชี้วัดก็เพิ่มขึ้นตามเช่นเดียวกับการชี้วัดด้วยภาชนะแบบปิด แต่ประสิทธิภาพการชี้วัดที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าการชี้วัดด้วยภาชนะแบบปิด อันเนื่องมาจากการทดลองแบบนี้เป็นการวางขวาง ซึ่งทำให้มีการเดินทางของสัญญาณรอบข้าง ในขณะที่การชี้วัดทุกด้านจะปิดกั้นการเดินทางของสัญญาณทุกด้าน

5.2.3.3 ผลการทดสอบและการจำลองการกำบังหรือการชี้วัดด้วยสารละลายต่างทับทีม

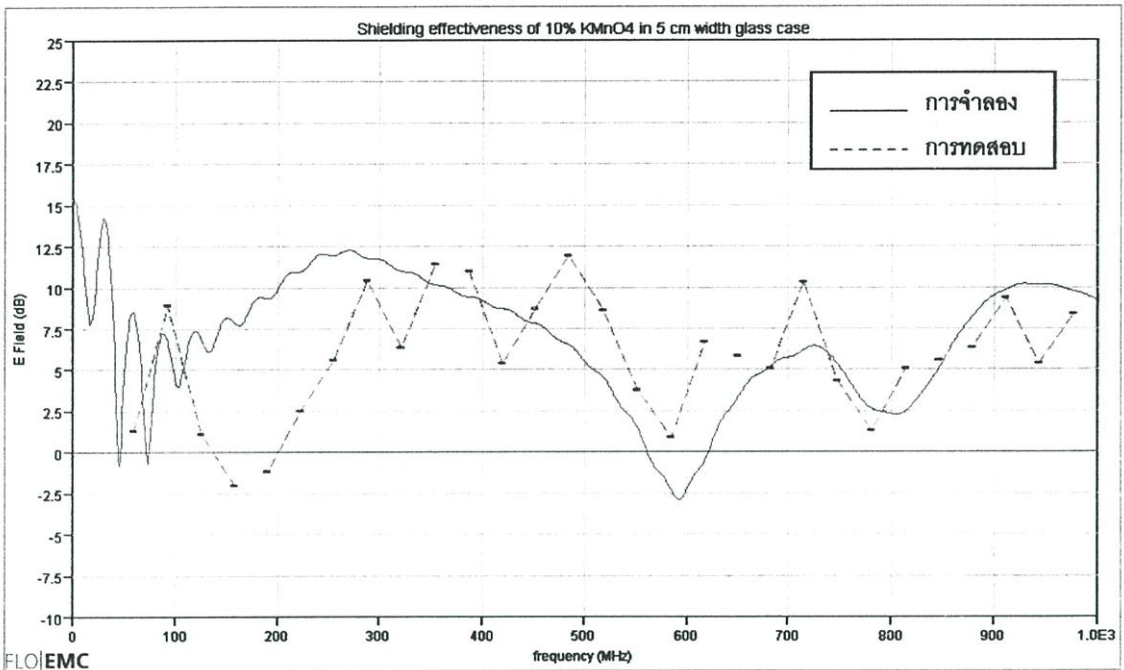
ก) สารละลายต่างทับทีมที่ระดับความเข้มข้น 5%



รูปที่ 5.40 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชี้วัดของสารละลายต่างทับทีม 5% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.40 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายต่างทึบทิม 5% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าคุณสมบัติชีลด์ที่ได้ทั้งจากการทดลองและจำลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 30 MHz ถึง 200 MHz ผลจากการวัดพบว่าสารละลายมีคุณสมบัติขยายสัญญาณ

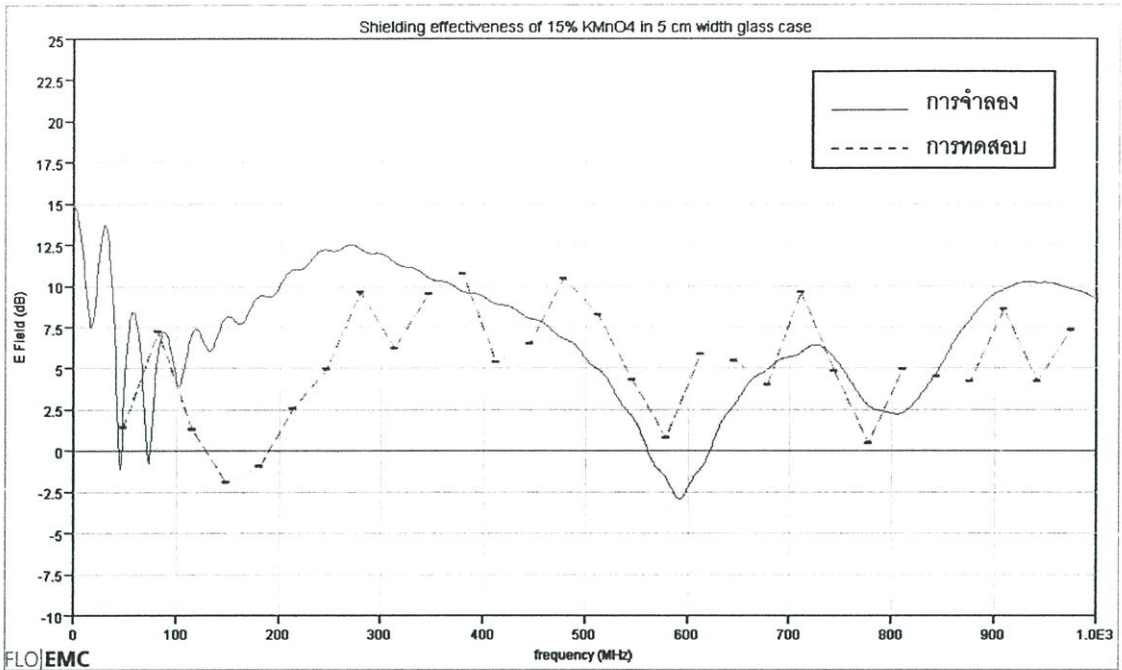
ข) สารละลายต่างทึบทิมที่ระดับความเข้มข้น 10%



รูปที่ 5.41 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายต่างทึบทิม 10% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.41 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายต่างทึบทิม 10% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าคุณสมบัติการชีลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 100 MHz ถึง 200 MHz ปรากฏว่าสารละลายต่างทึบทิม 10% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ เช่นเดียวกับผลการทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 5% แต่การขยายสัญญาณลดลงอันเนื่องมาจากระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น

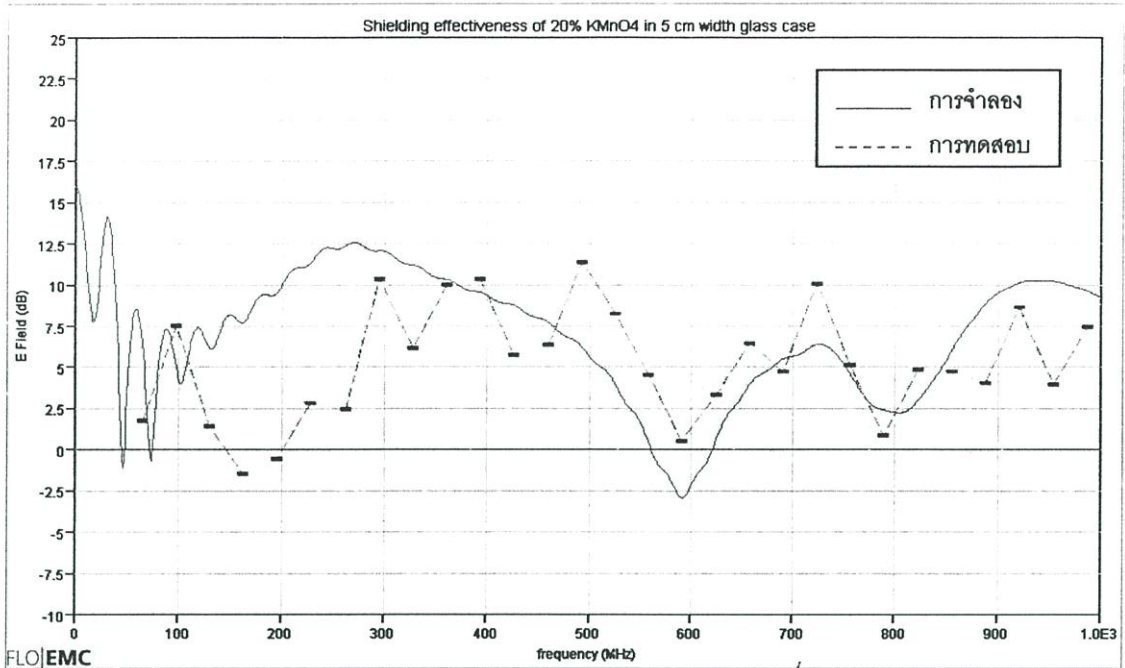
ค) สารละลายด่างทับทิมที่ระดับความเข้มข้น 15%



รูปที่ 5.42 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายด่างทับทิม 15% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.42 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายด่างทับทิม 15% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าคุณสมบัติการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทั้งค่าที่ได้จากการวัดและการจำลอง แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 100 MHz ถึง 200 MHz ปรากฏว่าสารละลายด่างทับทิม 10% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ จากระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าที่ได้จากการทดสอบพบว่าแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากระดับความเข้มข้นก่อน ๆ เนื่องจากในขณะการทดสอบจริงสารละลายด่างทับทิมเริ่มอึดตัวไม่ละลายเป็นเนื้อเดียว และมีบางส่วนตกตะกอนเป็นผลึกด่างทับทิมที่ก้นภาชนะ ทำให้ค่าคุณสมบัติการชิลด์ไม่เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น

ง) สารละลายค่างทับทิมที่ระดับความเข้มข้น 20%



รูปที่ 5.43 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายค่างทับทิม 20% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร

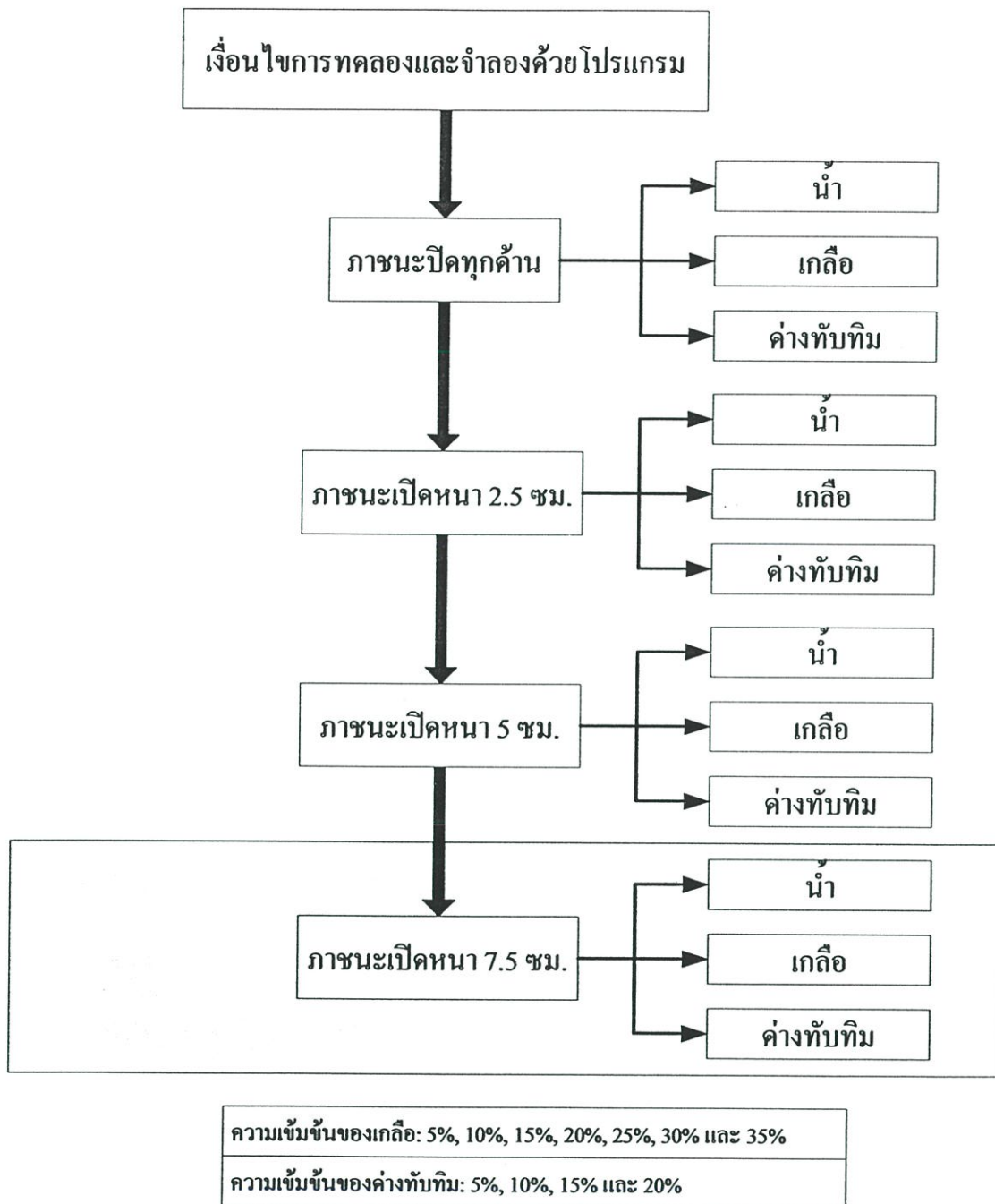
จากรูปที่ 5.43 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายค่างทับทิม 20% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทั้งค่าที่ได้จากการวัดและการจำลอง และค่าที่ได้จากการทดสอบพบว่าแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากระดับความเข้มข้นก่อน ๆ เนื่องจากในขณะการทดสอบจริงสารละลายค่างทับทิมเริ่มอิมตัวไม่ละลายเป็นเนื้อเดียว และมีบางส่วนตกตะกอนเป็นผลึกค่างทับทิมที่ก้นภาชนะ ทำให้ค่าคุณสมบัติการชิลด์ไม่เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น

จากรูปการเปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายค่างทับทิมที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตร จะพบว่าเมื่อสารละลายมีระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่าคุณสมบัติการชิลด์ก็เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นด้วย ถึงแม้ว่าที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ ที่บางความถี่สารละลายค่างทับทิมจะมีส่วนช่วยในการขยายสัญญาณ แต่เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นขึ้น ค่างทับทิมก็ทำหน้าที่ในการชิลด์สัญญาณ จนกระทั่งถึงจุด ๆ หนึ่งที่สารละลายดังกล่าวไม่สามารถละลายได้หรือถึงจุดอิ่มตัวของสารละลาย ซึ่งจะสังเกตได้

ง่าย ๆ จะพบว่าสสารตกตะกอน ซึ่งหากมีการเพิ่มความเข้มข้นอีก ก็ไม่สามารถทำให้ค่าคุณสมบัติการซีลด์เพิ่มขึ้นได้อีก ซึ่งเป็นข้อจำกัดของสารที่นำมาทำเป็นตัวละลายหรือน้ำนั่นเอง

ผลจากการทดลองและจำลองด้วยภาษาณะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 5 เซนติเมตรนี้ พบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่าคุณสมบัติการซีลด์ก็เพิ่มขึ้นตามเช่นเดียวกับการซีลด์ด้วยภาษาณะแบบปิด แต่ประสิทธิภาพการซีลด์ที่ได้จะมีค่าน้อยกว่า อันเนื่องมาจากการทดลองแบบนี้เป็นการวางขวาง ซึ่งทำให้มีการเดินทางของสัญญาณรอบข้าง ในขณะที่การซีลด์ทุกด้านจะปิดกั้นการเดินทางของสัญญาณทุกด้าน

**ผลการทดสอบและการจำลองการซึ่ดสัมฤทธิ์ของรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
ผ่านอากาศด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 7.5 เซนติเมตร**

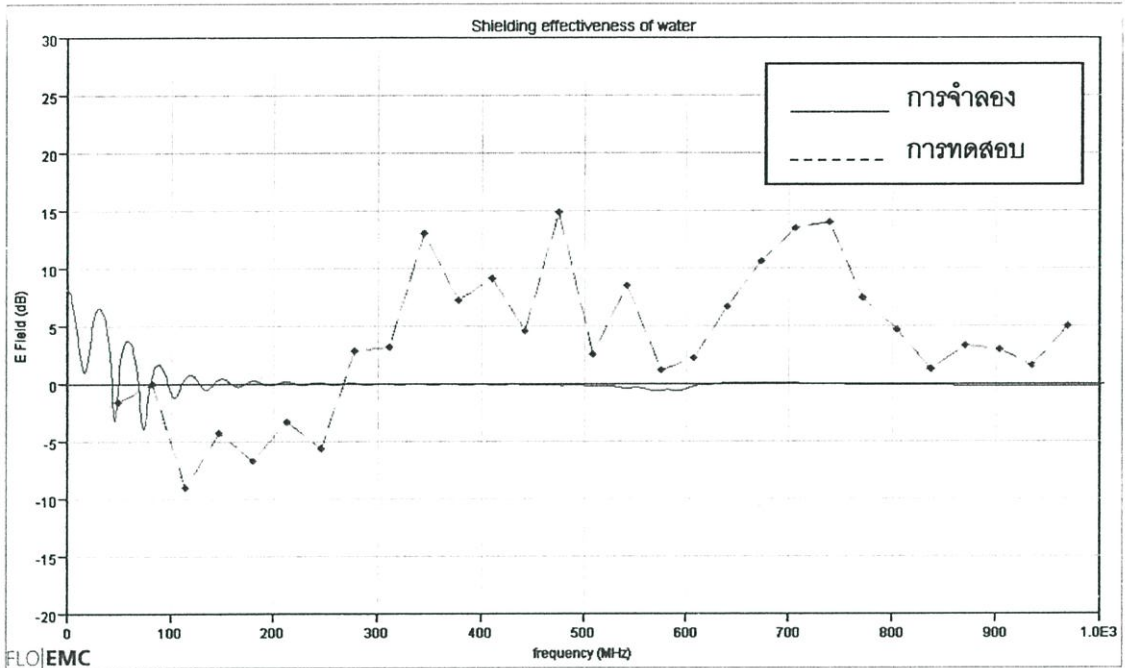


5.2.4 การก่้างหรือการซึ่ดด้ว้ก่องพลสติกเป็ดด้ำนบนท่มีพื้นที่บรจุสาร์ละลยกว้ง

หนน 7.5 เซนติเมตร

โดยแบ่งสาร์ท่ใช้ในการทคสอบได้แก่ น้ เกลือและด้งท้บทิม ซ่้งผลการทคสอบและการจ้าลองสอสามารถแสดงได้ค้งต้อไปน้

5.2.4.1 ผลการทคสอบและจ้าลองการซึ่ดด้ว้น้หรือท่สาร์ละลย 0%

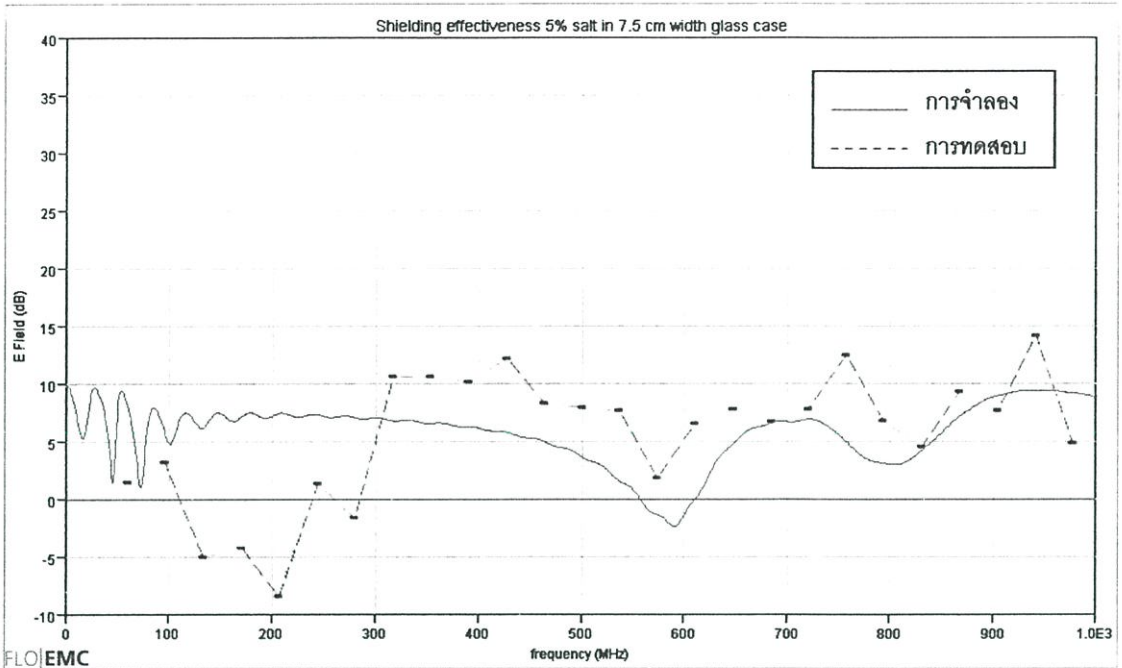


รูปท่ 5.44 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการซึ่ดด้ว้ของน้ที่บรจุภายในภษณะท่บรจุภายในภษณะเป็ดด้ำนบนท่มีพื้นที่บรจุสาร์ละลยกว้ง 7.5 เซนติเมตร

จากรูปท่ 5.44 เป็นการแสดงผลของการทคสอบจริงและการจ้าลองของคุณสมบัติการซึ่ดด้ว้ของน้หรือท่สาร์ละลย 0% ท่บรจุภายในภษณะก่องพลสติกเป็ดด้ำนบนท่มีพื้นที่บรจุสาร์ละลยกว้งหนน 7.5 เซนติเมตร ซ่้งจะพบว้ค่าท่ได้ภายหล้งจการใส่่น้มีท้งเพิ่มซ้้นและลดลง โดยในช้วงความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 270 MHz จะพบว้่น้มีส่วนช้วยในการชยยส้ญญาน แต่พบว้ท่ย่านความถี่ 270 MHz ถึง 1,000 MHz น้กลับมีส่วนในการซึ่ดด้ว้ส้ญญาน

5.2.4.2 ผลการทดสอบและการจำลองการชีลด์ด้วยสารละลายเกลือ

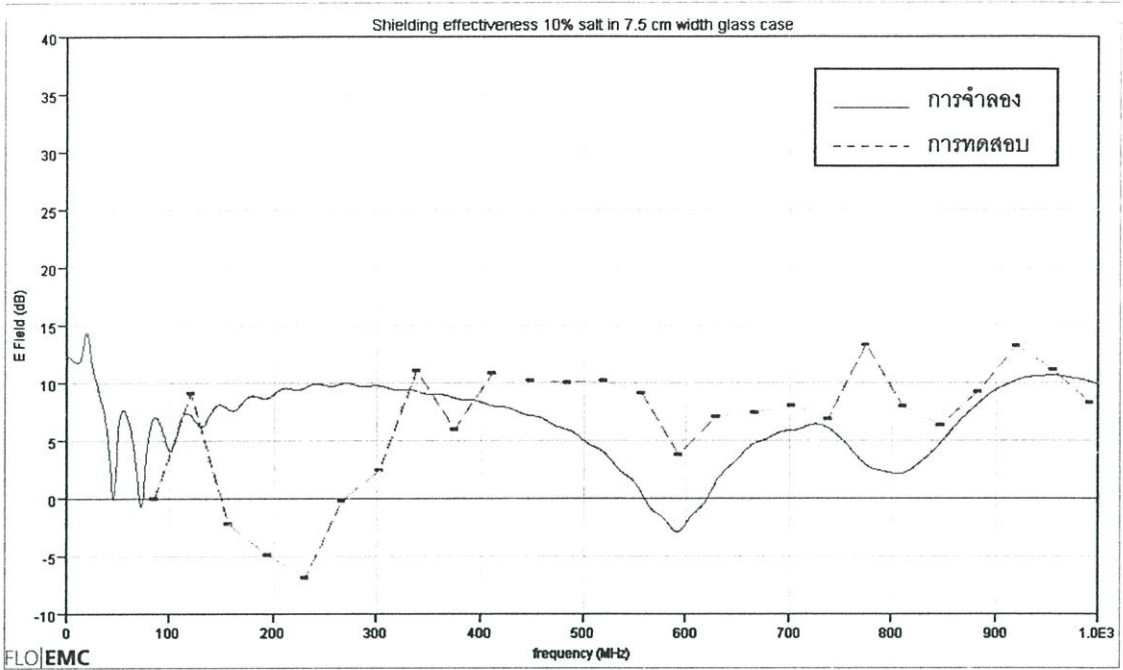
ก) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 5%



รูปที่ 5.45 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ 5% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด
ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.45 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ 5% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชีลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 100 MHz ถึง 300 MHz ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 5% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ

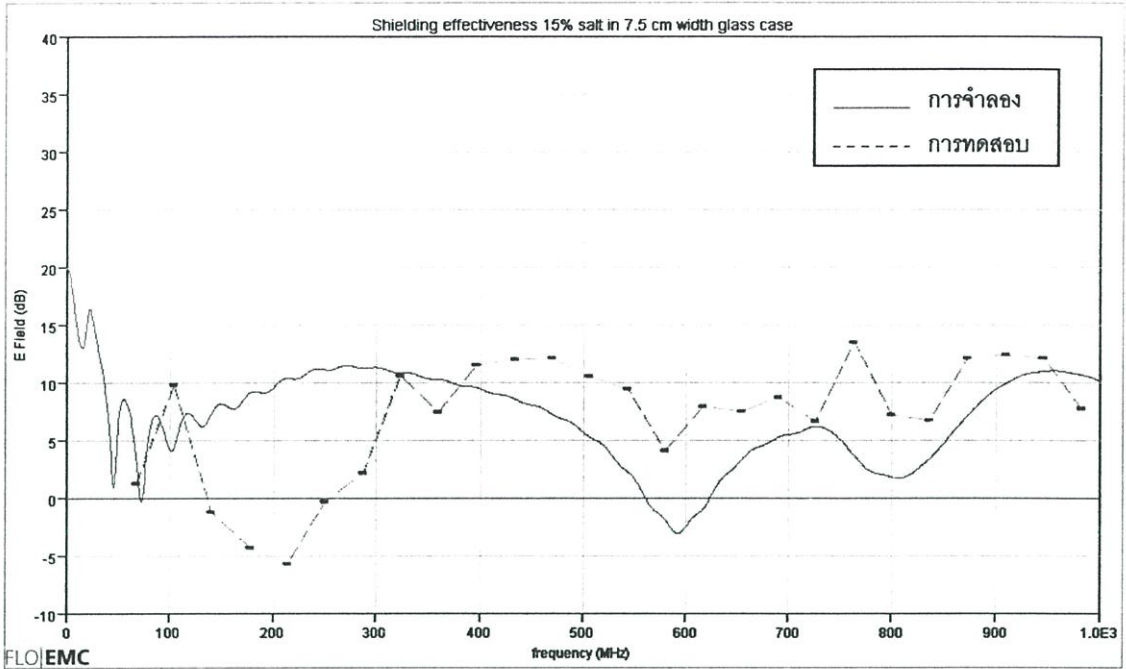
ข) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 10%



รูปที่ 5.46 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 10% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด
ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.46 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 10% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 100 MHz ถึง 300 MHz ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 10% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ เช่นเดียวกับผลการทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 5% แต่การขยายสัญญาณลดลงอันเนื่องมาจากระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น

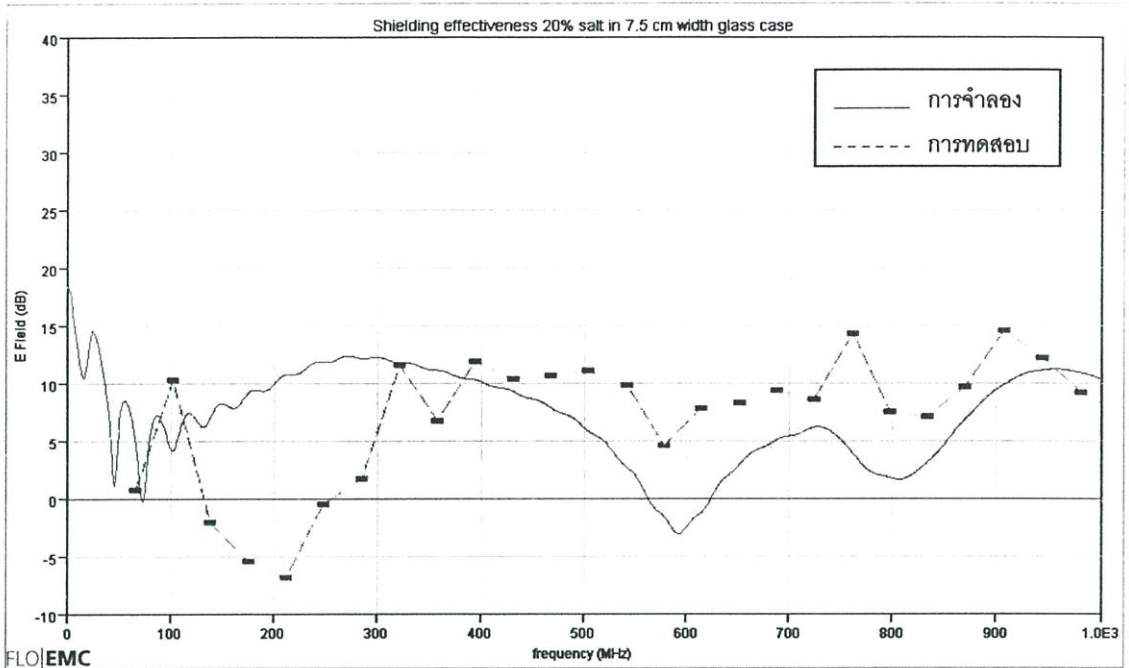
ค) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 15%



รูปที่ 5.47 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 15% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.47 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 15% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าจากการวัดที่ย่านความถี่ 100 MHz ถึง 250 MHz ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 15% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ ในขณะที่ผลที่ได้จากการจำลองมีการขยายสัญญาณในช่วงความถี่ 550 MHz ถึง 620 MHz แทน

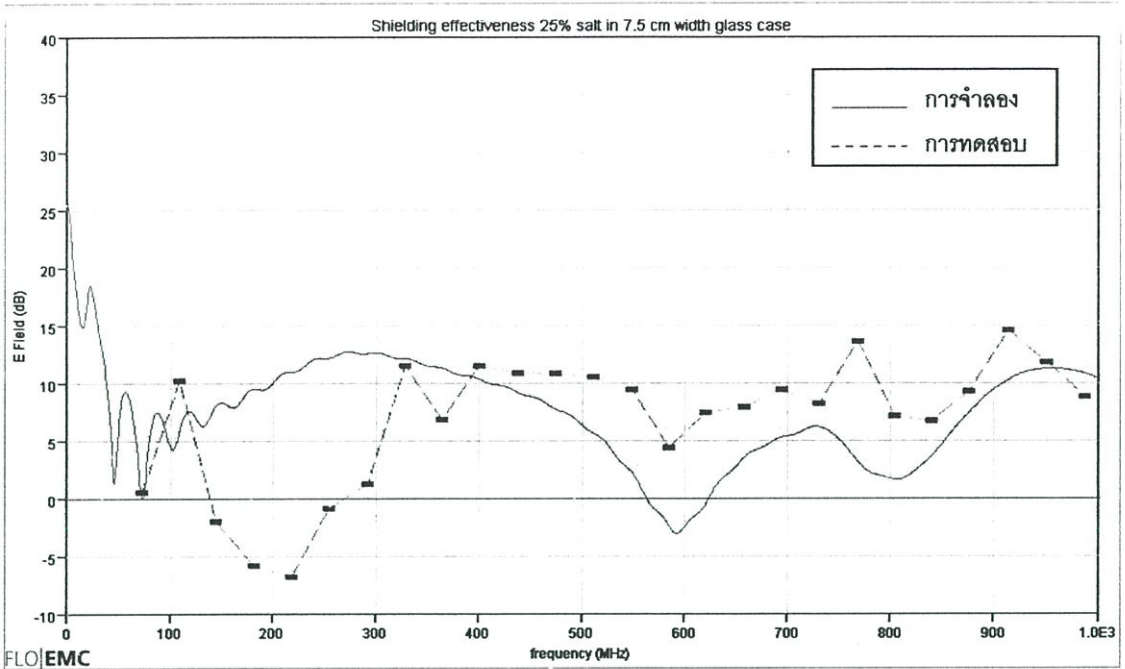
ง) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 20%



รูปที่ 5.48 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 20% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด
ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.48 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 20% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าผลจากการวัดที่ย่านความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 250 เมกะเฮิร์ตซ์ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 20% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ ในขณะที่ผลที่ได้จากการจำลองมีการขยายสัญญาณในช่วงความถี่ 550 MHz ถึง 620 MHz แทน

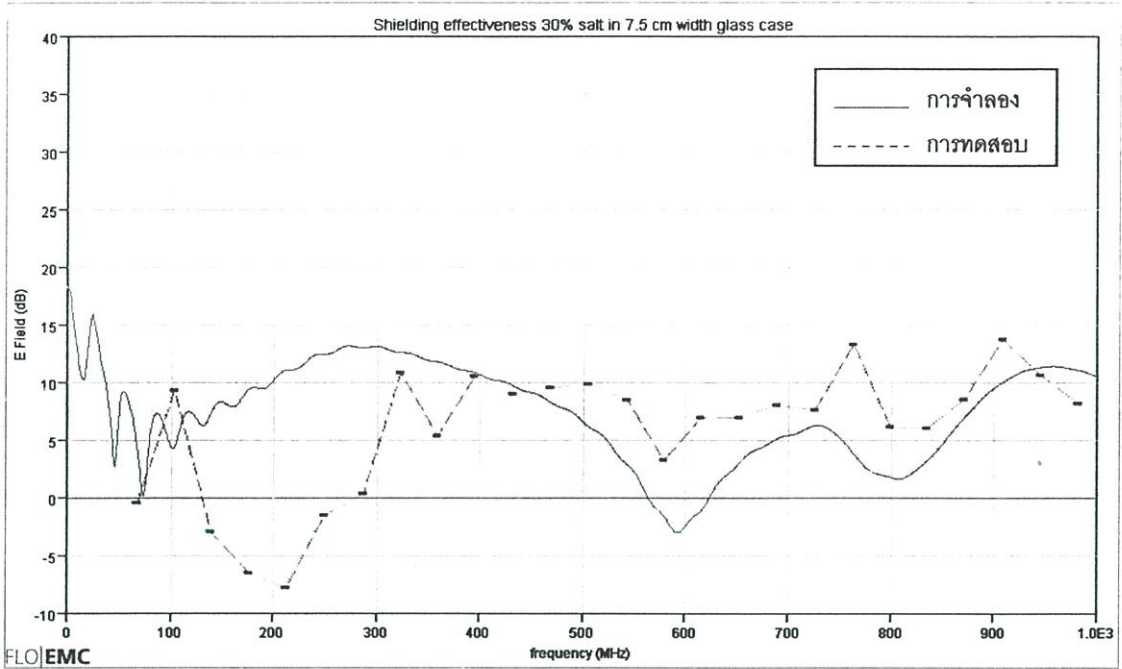
จ) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 25%



รูปที่ 5.49 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 25% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด
ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.49 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการการชิลด์ของสารละลายเกลือ 25% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าคุณสมบัติการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 230 เมกะเฮิร์ตซ์ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 25% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ ในขณะที่ย่านความถี่อื่น ๆ คุณสมบัติการชิลด์เริ่มแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากในการทดสอบจริงเกลืออึดตัวไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวในสารละลายได้ และมีการตกตะกอนเป็นผลึกก้อนเกลือที่ก้นภาชนะ ทำให้ผลที่ได้จากการวัดเมื่อระดับสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นมีค่าคล้าย ๆ กัน

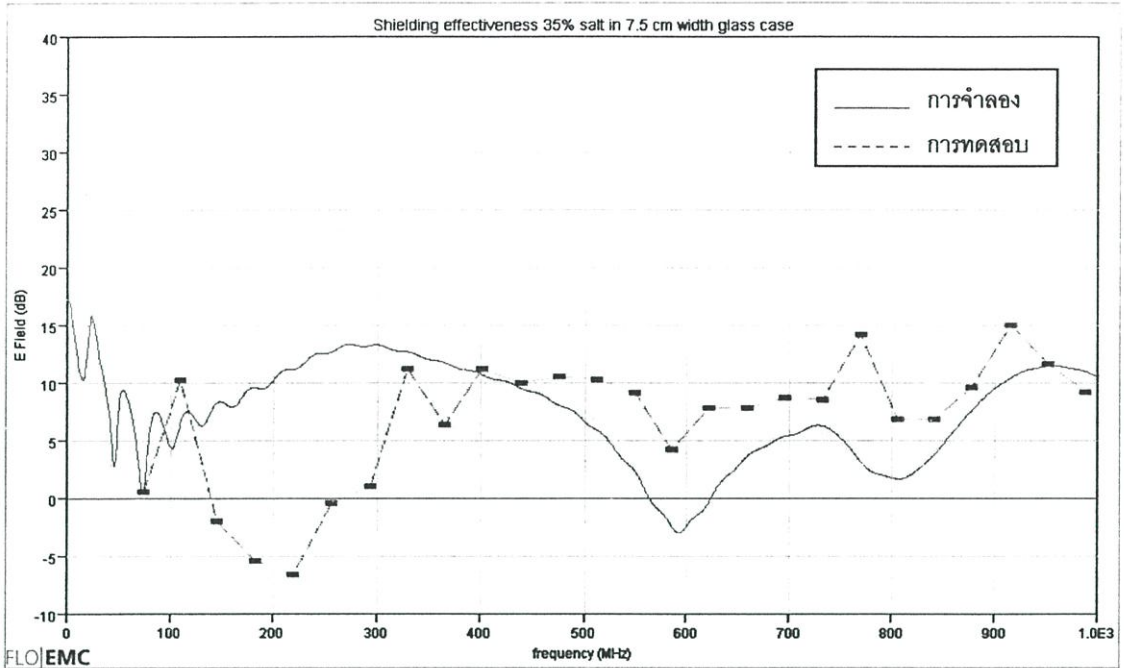
ด) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 30%



รูปที่ 5.50 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 30% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.50 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 30% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าจากการวัดที่ย่านความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 230 เมกะเฮิร์ตซ์ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 30% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ ในขณะที่ย่านความถี่อื่น ๆ คุณสมบัติการชิลด์เริ่มแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากการทดสอบจริงเกลืออิมตัวไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวในสารละลายได้ และมีการตกตะกอนเป็นผลึกก้อนเกลือที่ก้นภาชนะ ทำให้ผลที่ได้จากการวัดเมื่อระดับสารละลายเพิ่มขึ้นมีค่าคล้าย ๆ กันกับเช่นเดียวที่ระดับความเข้มข้นที่ 25%

ข) สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 35%



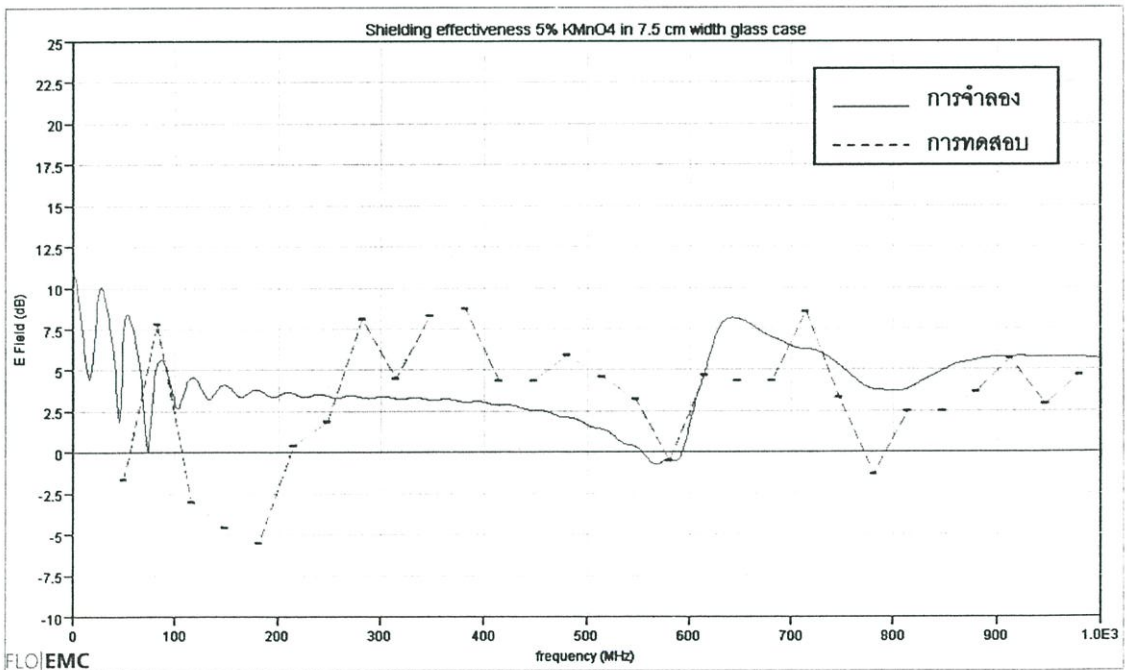
รูปที่ 5.51 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ 35% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.51 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายเกลือ 35% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชีลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าจากการวัดที่ย่านความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 230 เมกะเฮิร์ตซ์ปรากฏว่าสารละลายเกลือ 35% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ ในขณะที่ย่านความถี่อื่น ๆ คุณสมบัติการชีลด์เริ่มแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากในการทดสอบจริงเกลืออิมตัวไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวในสารละลายได้ และมีการตกตะกอนเป็นผลึกก้อนเกลือที่ก้นภาชนะ ทำให้ผลที่ได้จากการวัดเมื่อระดับสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นมีค่าคล้าย ๆ กันกับเช่นเดียวที่ระดับความเข้มข้นที่ 25% และ 30%

จากรูปการเปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร จะพบว่าเมื่อสารละลายมีระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่าคุณสมบัติการชิลด์ก็เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นด้วยจนกระทั่งถึงจุด ๆ หนึ่งที่สารละลายดังกล่าวไม่สามารถละลายได้หรือถึงจุดอิ่มตัวของสารละลาย ซึ่งจะสังเกตได้ง่าย ๆ จะพบว่าสารตกตะกอน ซึ่งหากมีการเพิ่มความเข้มข้นอีก ก็ไม่สามารถทำให้ค่าคุณสมบัติการชิลด์เพิ่มขึ้นได้อีก ซึ่งเป็นข้อจำกัดของสารที่นำมาทำเป็นตัวละลายหรือน้ำนั่นเอง ซึ่งจากการทดลองด้วยภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตรนี้ พบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่าคุณสมบัติการชิลด์ก็เพิ่มขึ้นตามเช่นเดียวกับการชิลด์ด้วยภาชนะแบบปิด แต่ประสิทธิภาพการชิลด์ที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าการชิลด์ด้วยภาชนะแบบปิด อันเนื่องมาจากการทดลองแบบนี้เป็นการวางขวาง ซึ่งทำให้มีการเดินทางของสัญญาณรอบข้าง ในขณะที่การชิลด์ทุกด้านจะปิดกั้นการเดินทางของสัญญาณทุกด้าน

5.2.4.3 ผลการทดสอบและการจำลองการชิลด์ด้วยสารละลายต่างทับทิม

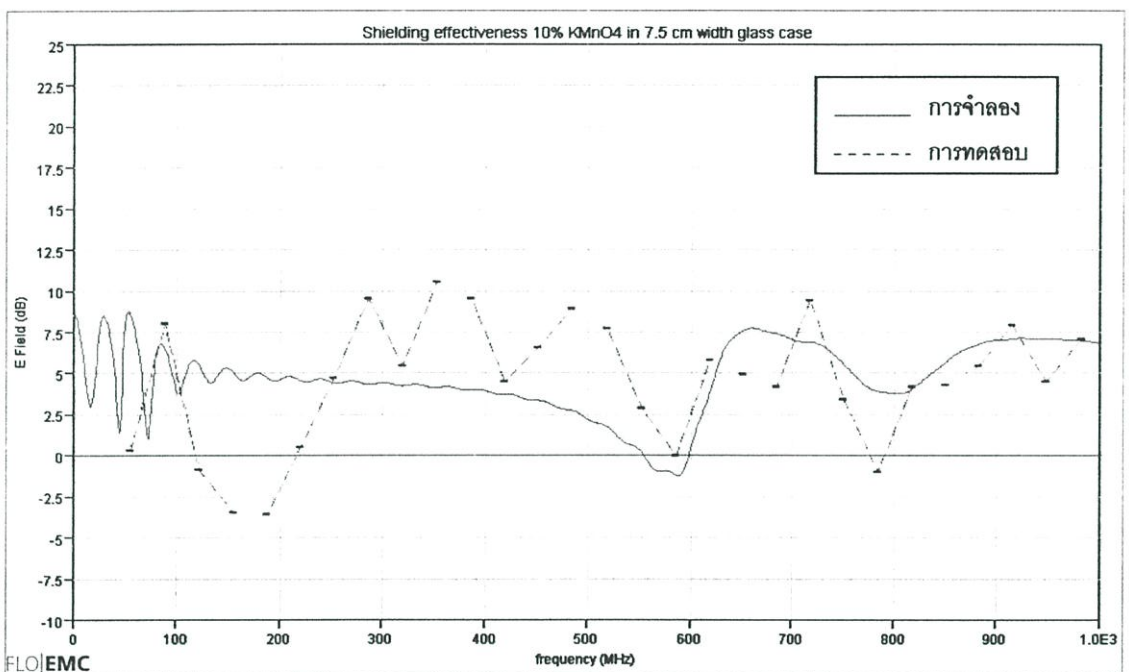
ก) สารละลายต่างทับทิมที่ระดับความเข้มข้น 5%



รูปที่ 5.52 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทับทิม 5% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.52 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายต่างทึบทิม 5% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าคุณสมบัติชีลด์ที่ได้ทั้งจากการทดลองและจำลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 30 MHz ถึง 220 MHz ผลจากการวัดพบว่าสารละลายมีคุณสมบัติขยายสัญญาณ

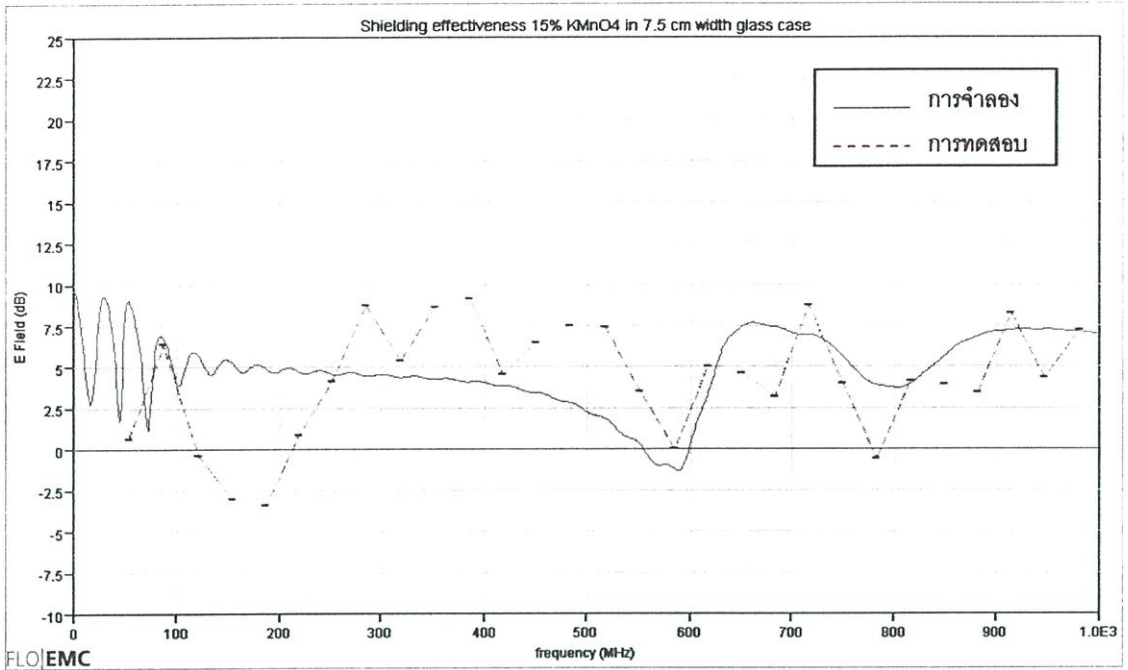
ข) สารละลายต่างทึบทิมที่ระดับความเข้มข้น 10%



รูปที่ 5.53 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายต่างทึบทิม 10% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.53 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชีลด์ของสารละลายต่างทึบทิม 10% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าคุณสมบัติการชีลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 100 MHz ถึง 220 MHz ปรากฏว่าสารละลายต่างทึบทิม 10% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ เช่นเดียวกับผลการทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 5% แต่การขยายสัญญาณลดลงอันเนื่องมาจากระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น

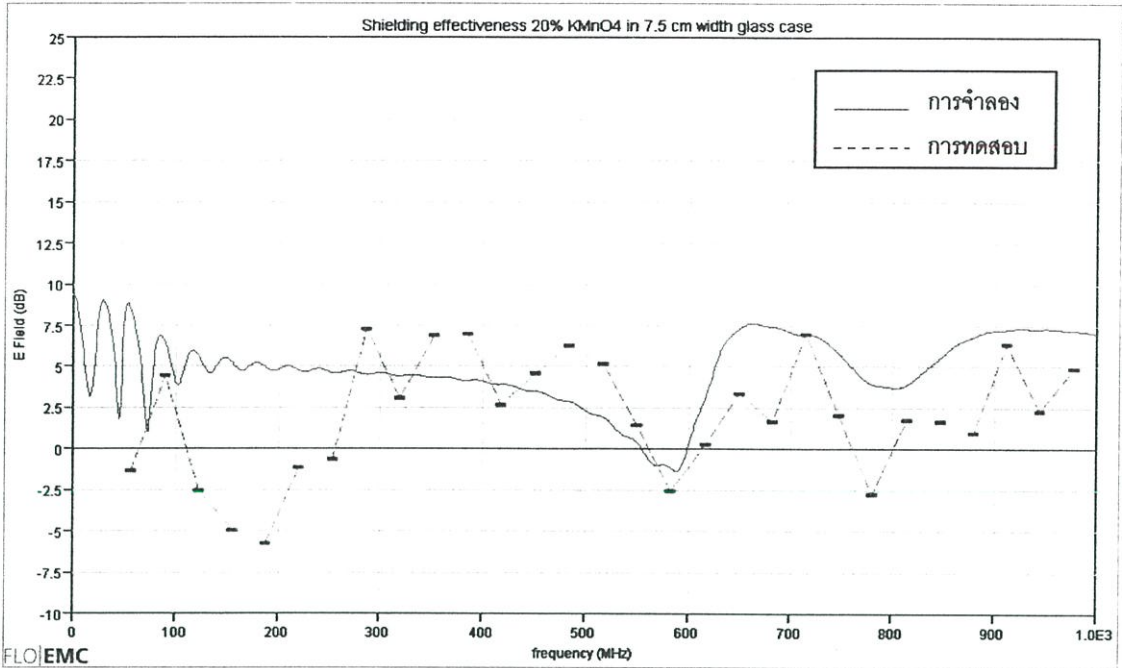
ค) สารละลายค่างทับทิมที่ระดับความเข้มข้น 15%



รูปที่ 5.54 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายค่างทับทิม 15% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด ด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.54 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายค่างทับทิม 15% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าคุณสมบัติการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทั้งค่าที่ได้จากการวัดและการจำลอง แต่พบว่าที่ย่านความถี่ 100 MHz ถึง 220 MHz ปรากฏว่าสารละลายค่างทับทิม 10% ที่บรรจุในภาชนะดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยขยายสัญญาณ จากระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าที่ได้จากการทดสอบพบว่าแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากระดับความเข้มข้นก่อน ๆ เนื่องจากในขณะการทดสอบจริงสารละลายค่างทับทิมเริ่มอึดตัวไม่ละลายเป็นเนื้อเดียว และมีบางส่วนตกตะกอนเป็นผลึกค่างทับทิมที่ก้นภาชนะ ทำให้ไม่ค่าคุณสมบัติการชิลด์ไม่เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น

ง) สารละลายต่างทึบที่มีระดับความเข้มข้น 20%



รูปที่ 5.55 เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบ 20% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิด ค้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.55 เป็นการแสดงผลของการทดสอบจริงและการจำลองของคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบ 20% ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดค้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร ซึ่งจะพบว่าค่าการชิลด์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทั้งค่าที่ได้จากการวัดและการจำลอง และค่าที่ได้จากการทดสอบพบว่าแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากระดับความเข้มข้นก่อน ๆ เนื่องจากในขณะการทดสอบจริงสารละลายต่างทึบเริ่มอิมตัวไม่ละลายเป็นเนื้อเดียว และมีบางส่วนตกตะกอนเป็นผลึกต่างทึบที่กั้นภาชนะ ทำให้ค่าคุณสมบัติการชิลด์ไม่เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น

จากรูปการเปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่บรรจุภายในภาชนะเปิดค้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตร จะพบว่าเมื่อสารละลายมีระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่าคุณสมบัติการชิลด์ก็เพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นด้วย ถึงแม้ว่าที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ ที่บางความถี่สารละลายต่างทึบจะมีส่วนช่วยในการขยายสัญญาณ แต่เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นขึ้น ต่างทึบก็ทำหน้าที่ในการชิลด์สัญญาณ จนกระทั่งถึงจุด ๆ หนึ่งที่สารละลายดังกล่าวไม่สามารถละลายได้หรือถึงจุดอิมตัวของสารละลาย ซึ่งจะสังเกตได้

ง่าย ๆ จะพบว่าสารตกตะกอน ซึ่งหากมีการเพิ่มความเข้มข้นอีก ก็ไม่สามารถทำให้ค่าคุณสมบัติการชิลด์เพิ่มขึ้นได้อีก ซึ่งเป็นข้อจำกัดของสารที่นำมาทำเป็นตัวละลายหรือนำมันเอง

ผลจากการทดลองและจำลองด้วยภาษาอะปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้าง 7.5 เซนติเมตรนี้ พบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่าคุณสมบัติการชิลด์ก็เพิ่มขึ้นตามเช่นเดียวกับการชิลด์ด้วยภาษาอะปิด แต่ประสิทธิภาพการชิลด์ที่ได้จะมีค่าน้อยกว่า อันเนื่องมาจากการทดลองแบบนี้เป็นการวางขวาง ซึ่งทำให้มีการเดินทางของสัญญาณรอบข้าง ในขณะที่การชิลด์ทุกด้านจะปิดกั้นการเดินทางของสัญญาณทุกด้าน

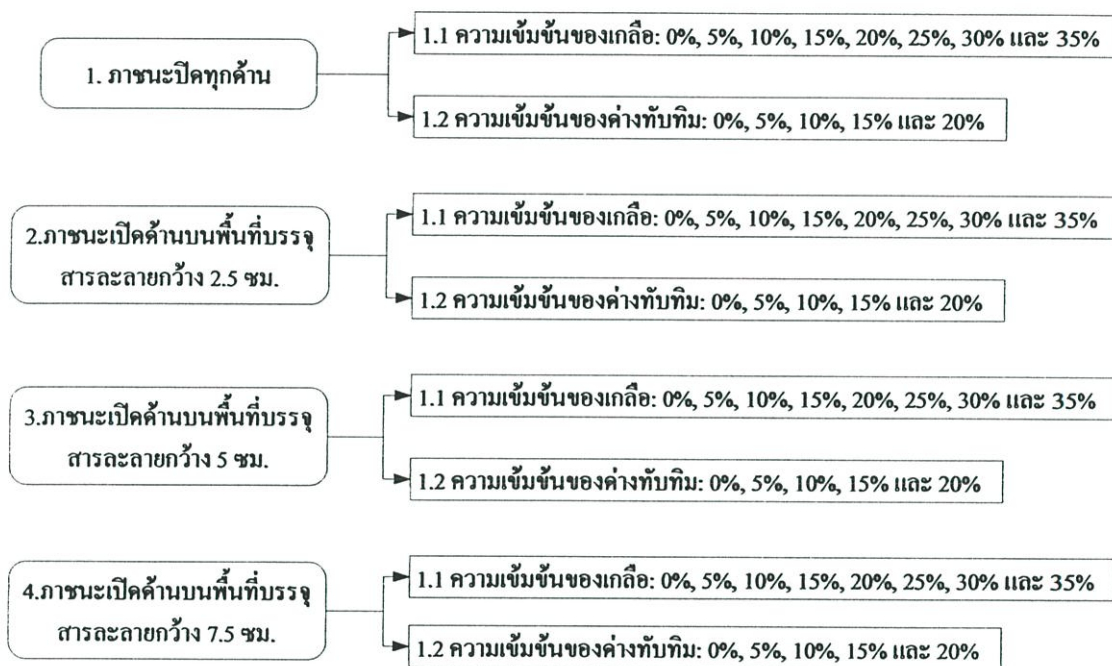
ผลสรุปจากรูปที่ 5.6 ถึงรูปที่ 5.55 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติการลดทอนหรือการชิลด์ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศจากผลการทดสอบจริงกับผลจากการจำลองของวงจรโดยใช้โปรแกรม FLO/EMC ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองนั้นจะสามารถทำนายช่วงความถี่ในการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ใกล้เคียงในภาพรวมของทุกกรณี

5.3 การเปรียบเทียบผลของการฉีดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ

5.3.1 เปรียบเทียบตามภาชนะที่บรรจุ

ในส่วนนี้เป็นการนำผลการทดสอบที่วัดได้มาทำการเปรียบเทียบตามภาชนะที่บรรจุเพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างที่เกิดขึ้น โดยประเด็นที่มีการเปรียบเทียบนั้นสามารถสรุปได้ 4 ประเด็น ดังรูปที่ 5.56 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้ในแต่ละหัวข้อดังรูปที่ 5.56 แล้วก็จะมีการสรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบนั้นเป็นกรณีไป

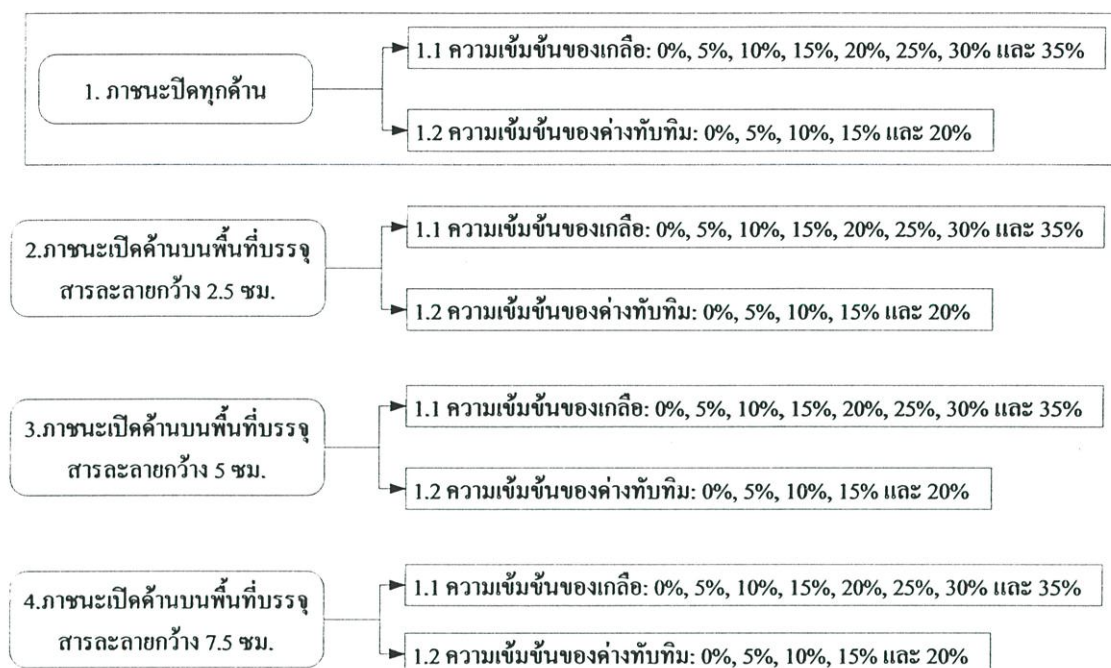
ประเด็นการเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองในด้านสัญญาณรบกวน



รูปที่ 5.56 ประเด็นในการเปรียบเทียบการทดสอบวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวนำ

โดยในแต่ละประเด็นสามารถสรุปผลการเปรียบเทียบและการวิเคราะห์ทั้งหมดได้ดังต่อไปนี้

**ประเด็นการเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการ
จำลองในด้านสัญญาณรบกวน**

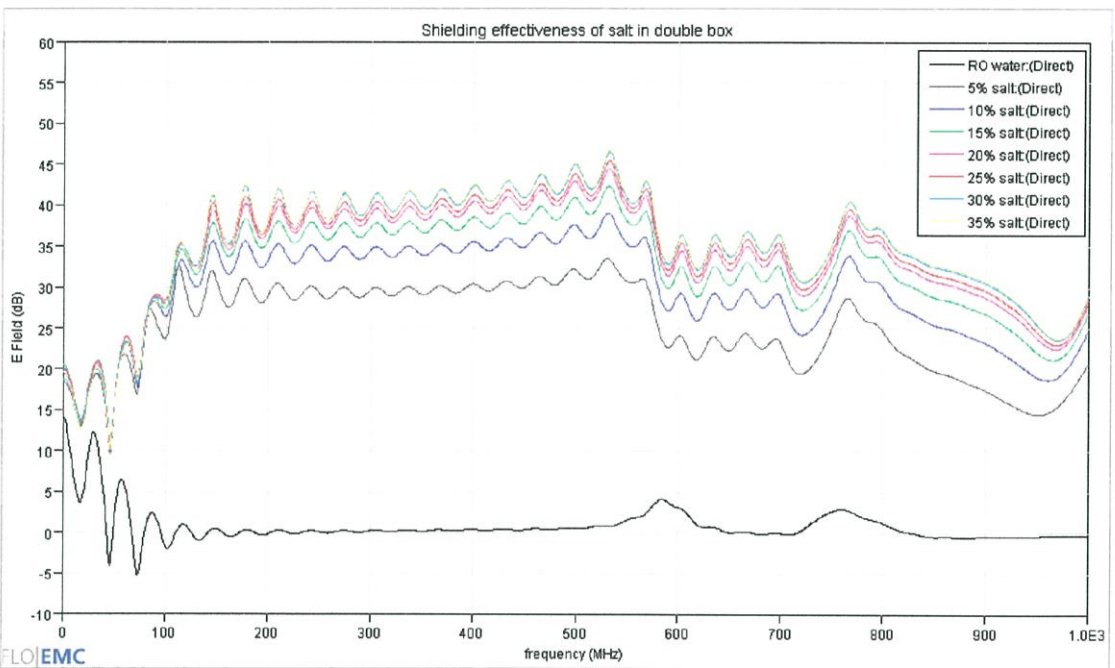


5.3.1.1 การชี้วัดด้วยกล่องพลาสติกแบบปิด

การเปรียบเทียบคุณสมบัติการชี้วัดในประเด็นที่ 1 นั้น จะเป็นการเปรียบเทียบเมื่อบรรจุอยู่ในภาชนะแบบปิดทุกด้าน โดยเอกสารที่ใช้ในการทำวิจัยดังนี้

- เกลือ

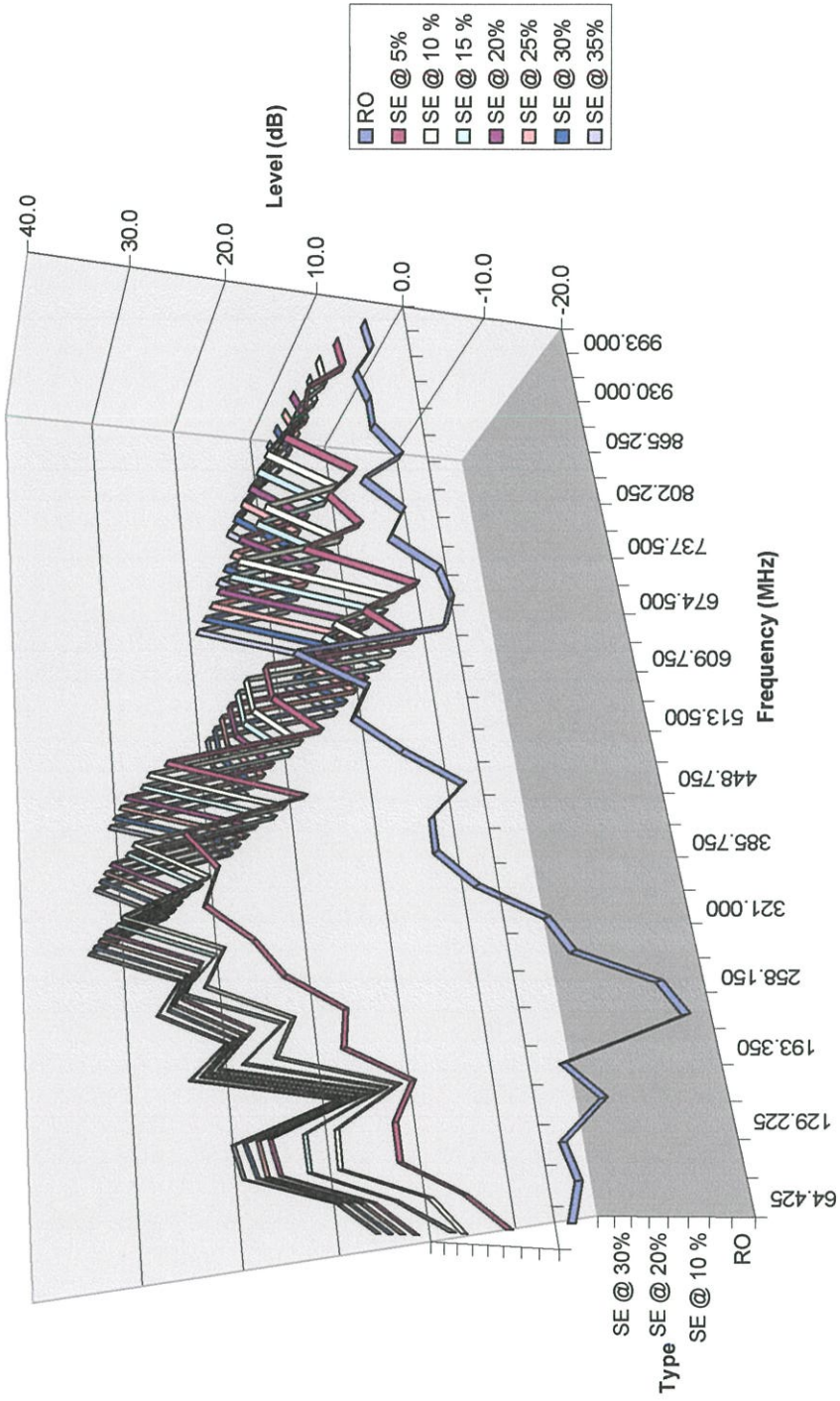
ผลการจำลองค่าคุณสมบัติการชี้วัดที่ได้จากโปรแกรม FLO/EMC สามารถนำมาทำภาพกราฟเปรียบเทียบผลการจำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือได้ดังรูปที่ 5.57



รูปที่ 5.57 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการชี้วัดจากการจำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ

และผลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำค่าที่ได้มาทำภาพเปรียบเทียบคุณสมบัติการชี้วัดในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือในรูปที่ 5.58

กราฟเปรียบเทียบการชดเชยการขยายตัวของสารละลายเกลือในภาชนะปิด



รูปที่ 5.58 การเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการชดเชยการหดงอในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ

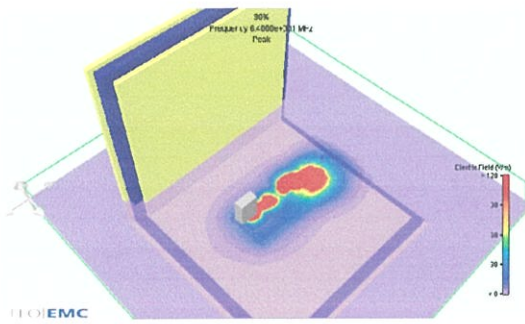
สรุปและวิเคราะห์การเปรียบเทียบในประเด็นที่ 1 สำหรับสารละลายเกลือ

- ❖ คุณสมบัติการซีลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีระดับความเข้มข้นของสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นทั้งจากผลการทดลองและจากการจำลอง โดยรวมผลจากทั้งการทดลองและการจำลองมีรูปแบบไปในทางเดียวกัน
- ❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 100 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการซีลด์สูงสุด 10.2 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการซีลด์ในย่านนี้สูงสุดถึง 27 dB
- ❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ถึง 500 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการซีลด์สูงสุด 33.6 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการซีลด์ในย่านนี้สูงสุดถึง 47 dB
- ❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 500 MHz ถึง 1,000 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการซีลด์สูงสุด 19.5 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการซีลด์ในย่านนี้สูงสุดถึง 40 dB
- ❖ สามารถสรุปค่าคุณสมบัติการซีลด์สูงสุดและต่ำสุดจากการทดลองและการจำลองดังต่อไปนี้

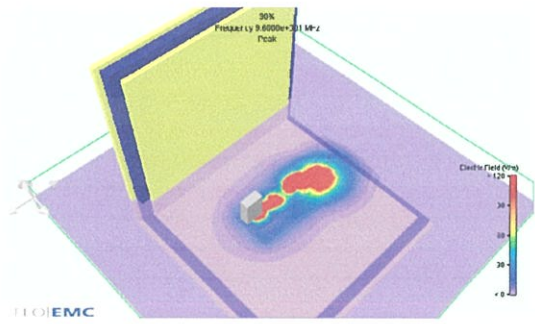
ตารางที่ 5.3 สรุปประสิทธิภาพการซีลด์ของเกลือในประเด็นที่ 1

ประสิทธิภาพการซีลด์	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
การทดลอง	33.6	0.9
การจำลอง	47.3	9.8

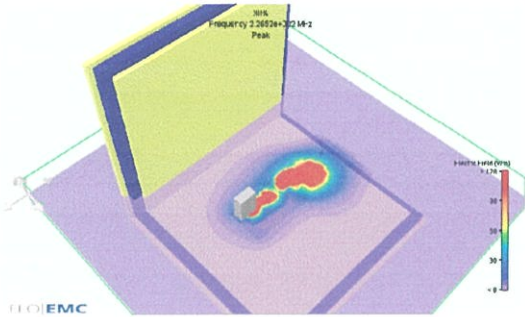
- ❖ จากผลของการจำลอง สามารถจำลองการรูปแบบการเดินทางของสนามแม่เหล็กที่ทำการซีลด์ด้วยพลาสติกแบบปิด โดยภายในบรรจุสารละลายเกลือที่จุดความถี่ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.59



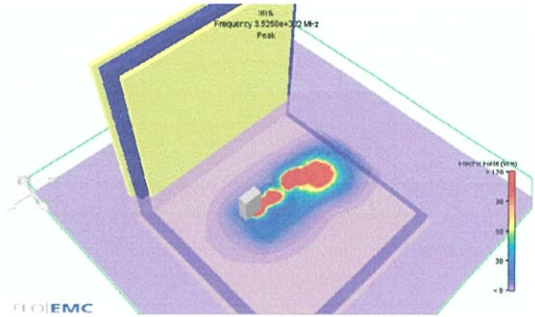
64.00 MHz



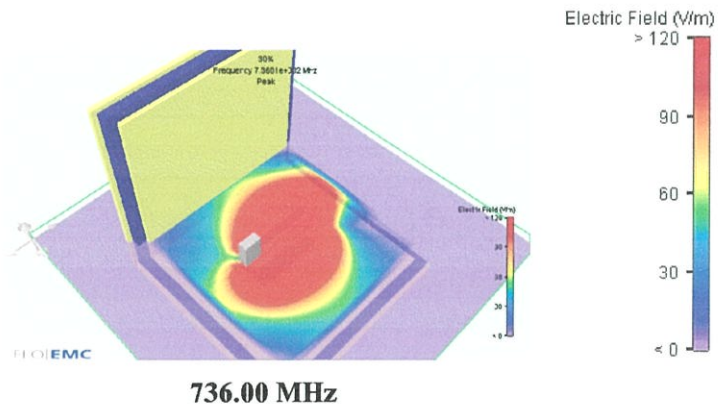
96.00 MHz



226.52 MHz



352.50 MHz

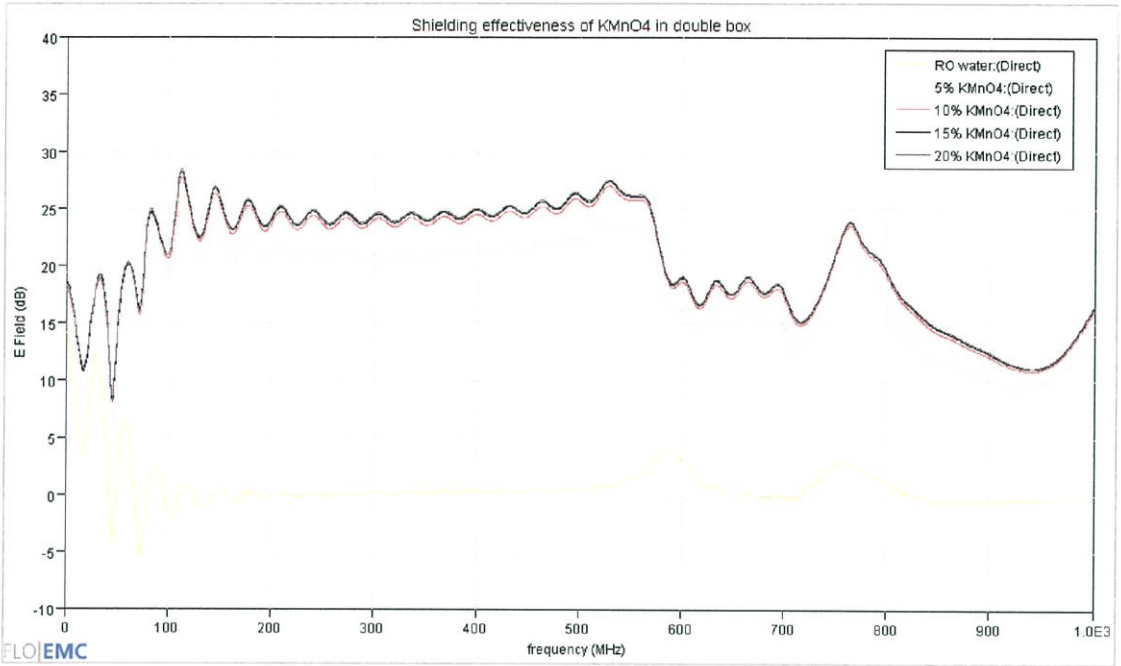


736.00 MHz

รูปที่ 5.59 รูปแบบการเดินทางของสนามไฟฟ้าที่ถูกชีลด์ด้วยพลาสติกแบบปิดโดยภายในบรรจุสารละลายเกลือ

- ค้างทับทิม

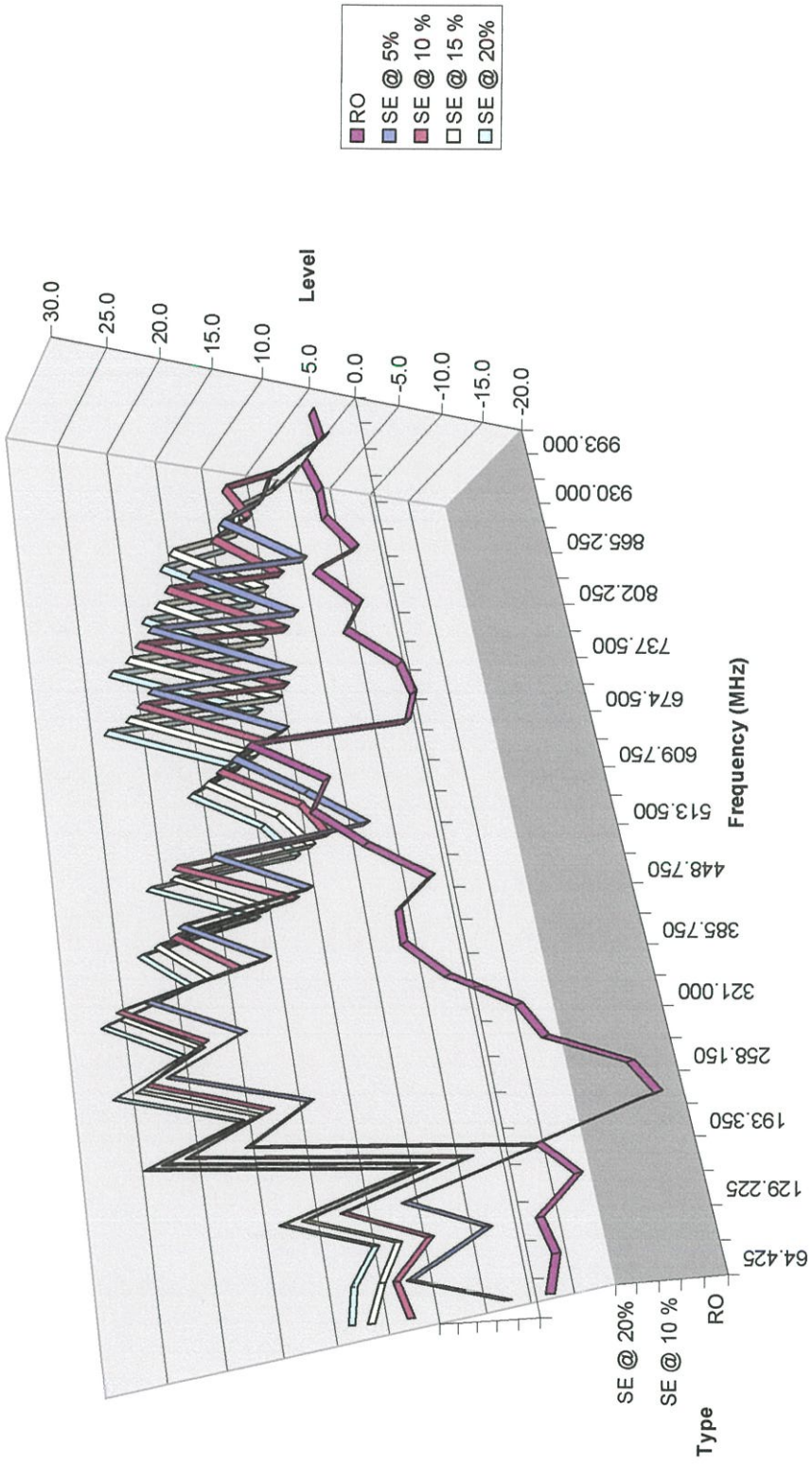
ผลที่ได้จากการจำลองค่าคุณสมบัติการชีลด์ที่ได้จากโปรแกรม FLO/EMC สามารถนำมาทำภาพกราฟเปรียบเทียบผลการจำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของค้างทับทิมได้ดังรูปที่ 5.60



รูปที่ 5.60 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการชีลด์จากการจำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของค้างทับทิม

ผลจากการทดสอบที่ได้สามารถนำค่าที่ได้มาทำภาพเปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ในแต่ละระดับความเข้มข้นของค้างทับทิมในรูปที่ 5.61

การเปรียบเทียบการรบกวนของสารละลายต่าง ๆ ในภาชนะปิด



รูปที่ 5.61 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการรบกวนของสารละลายต่าง ๆ ในภาชนะปิด

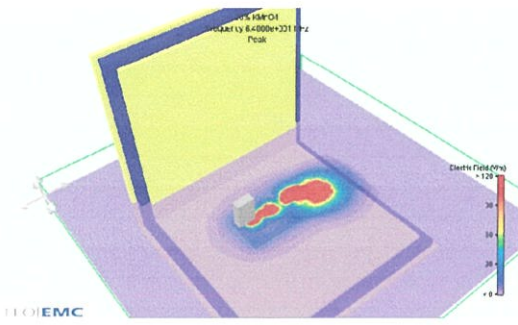
สรุปและวิเคราะห์การเปรียบเทียบในประเด็นที่ 1 สำหรับสารละลายต่างทับทิม

- ❖ คุณสมบัติการซึบซึมของวัสดุบรรจุภัณฑ์แม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีระดับความเข้มข้นของสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นทั้งจากผลการทดลองและจากการจำลอง โดยรวมผลจากทั้งการทดลองและการจำลองมีรูปแบบไปในทางเดียวกัน แต่พบว่ามีการทดลองที่บางความถี่ช่วยในการขยายสัญญาณ โดยสาเหตุหนึ่งสืบเนื่องมาจากการเรโซแนนซ์ของสารละลายและภาชนะที่บรรจุ
- ❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 100 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการซึบซึมสูงสุด 9.2 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการซึบซึมในย่านนี้สูงสุดถึง 25 dB
- ❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ถึง 500 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการซึบซึมสูงสุด 28.1 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการซึบซึมในย่านนี้สูงสุดถึง 29 dB
- ❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 500 MHz ถึง 1,000 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการซึบซึมสูงสุด 24.1 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการซึบซึมในย่านนี้สูงสุดถึง 27.5 dB
- ❖ สามารถสรุปค่าคุณสมบัติการซึบซึมสูงสุดและต่ำสุดจากการทดลองและการจำลองดังต่อไปนี้

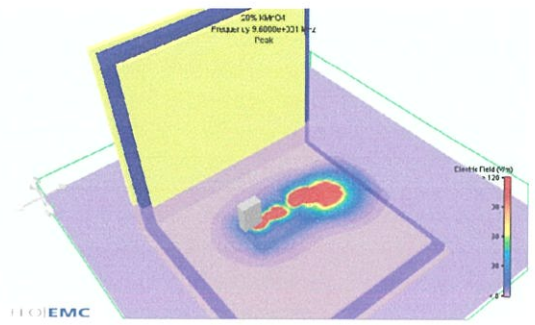
ตารางที่ 5.4 สรุปประสิทธิภาพการซึบซึมของต่างทับทิมในประเด็นที่ 1

คุณสมบัติการซึบซึม	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
การทดลอง	28.1	-6.9
การจำลอง	29	5.5

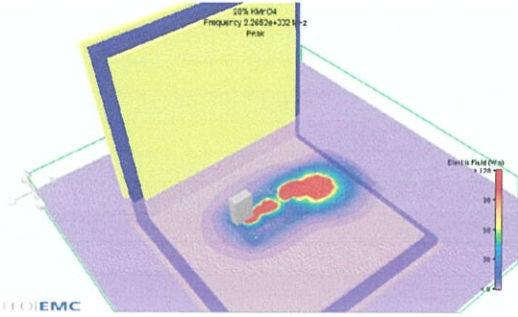
- ❖ จากผลของการจำลอง สามารถจำลองการรูปแบบการเดินทางของสนามแม่เหล็กที่ทำการซึบซึมด้วยพลาสติกแบบปิด โดยภายในบรรจุสารละลายต่างทับทิมที่จุดความถี่ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.62



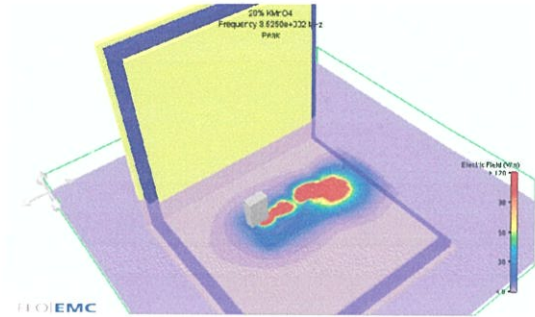
64.00 MHz



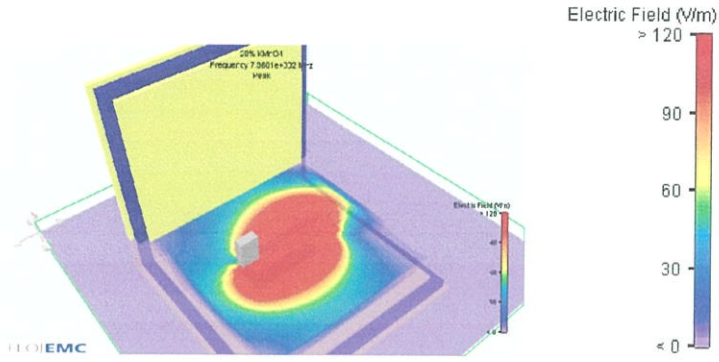
96.00 MHz



226.52 MHz



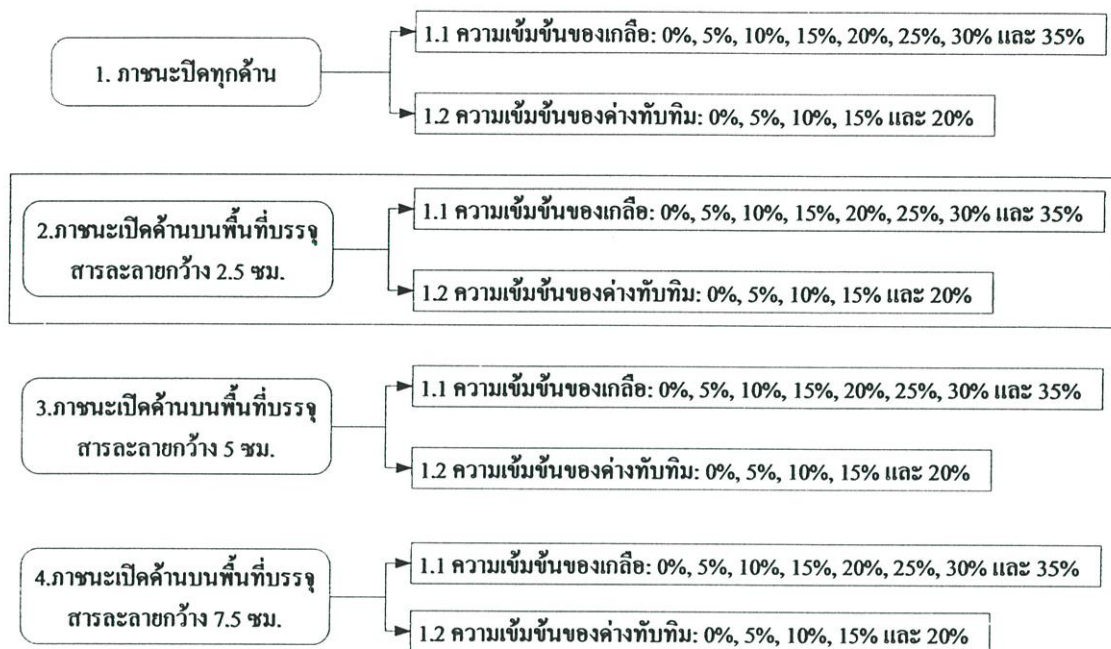
352.50 MHz



736.00 MHz

รูปที่ 5.62 รูปแบบการเดินทางของสนามไฟฟ้าที่ถูกซัดด้วยพลาสติกแบบปิดโดยภายในบรรจุสารละลายต่างทับทม

ประเด็นการเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการ
จำลองในด้านสัญญาณรบกวน

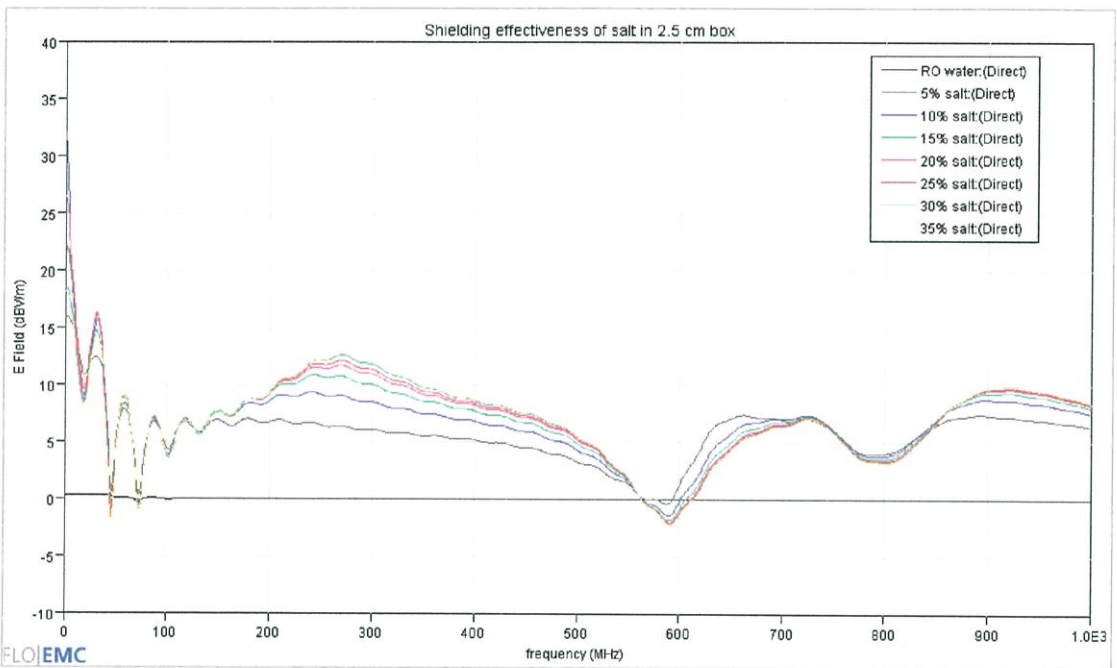


5.3.1.2 การชิลด์ด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 2.5 เซนติเมตร

การเปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ในประเด็นที่ 2 นั้น จะเป็นการเปรียบเทียบเมื่อบรรจุอยู่ในกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 2.5 เซนติเมตร โดยแยกสสารที่ใช้ในการทำวิจัยดังนี้

- เกลือ

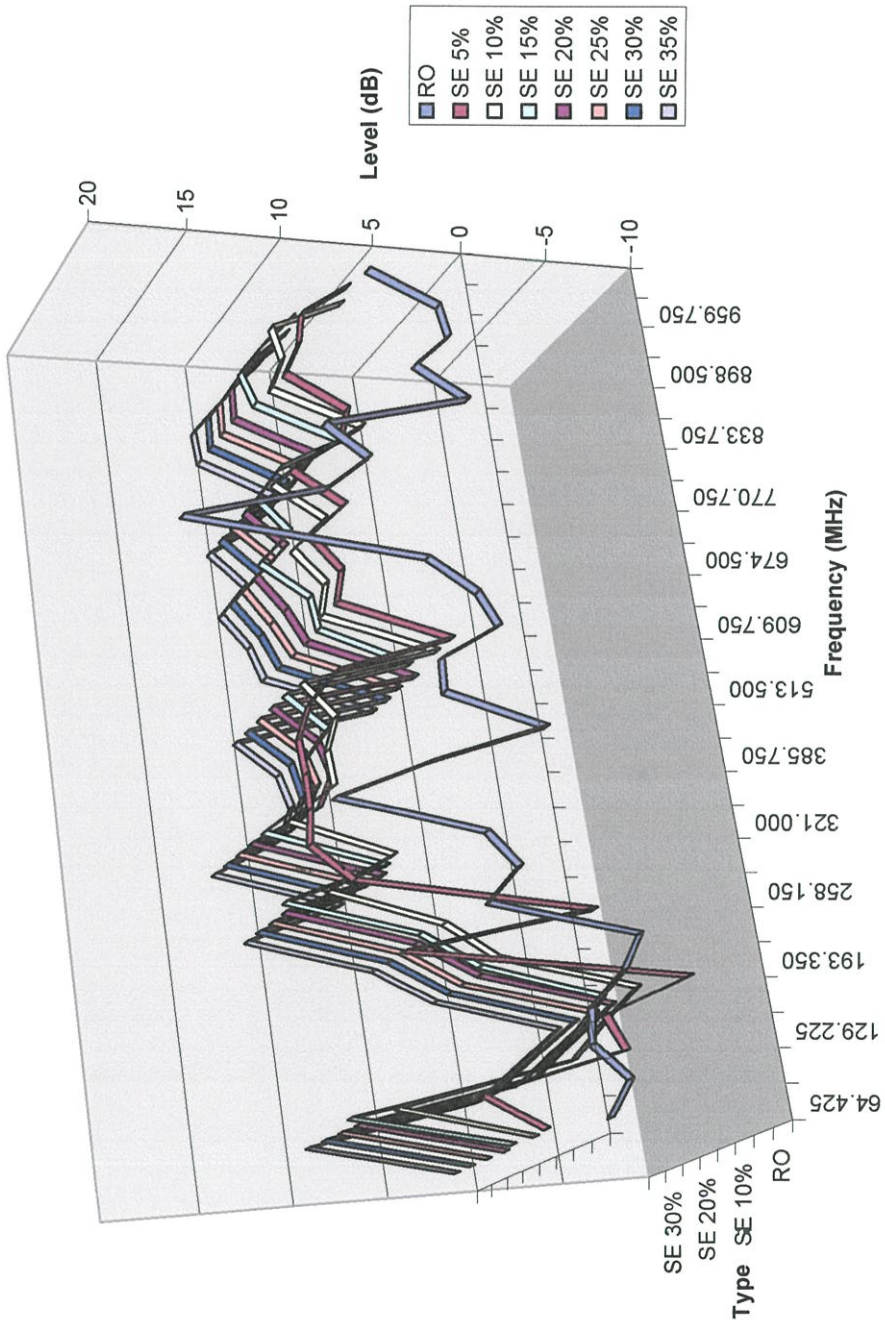
ผลที่ได้จากการจำลองค่าคุณสมบัติการชิลด์ที่ได้จาก โปรแกรม FLO/EMC สามารถนำมาทำภาพกราฟเปรียบเทียบผลการจำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ ได้ดังรูปที่ 5.63



รูปที่ 5.63 แสดงเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการชิลด์จากการจำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ

ส่วนผลจากการทดสอบ สามารถนำค่าที่ได้มาทำภาพเปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ที่แต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือในรูปที่ 5.64

เปรียบเทียบการรบกวนของสารละลายเกลือในสถานะเปิดหน้า 2.5 ซม.



รูปที่ 5.64 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการรบกวนการทดลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ

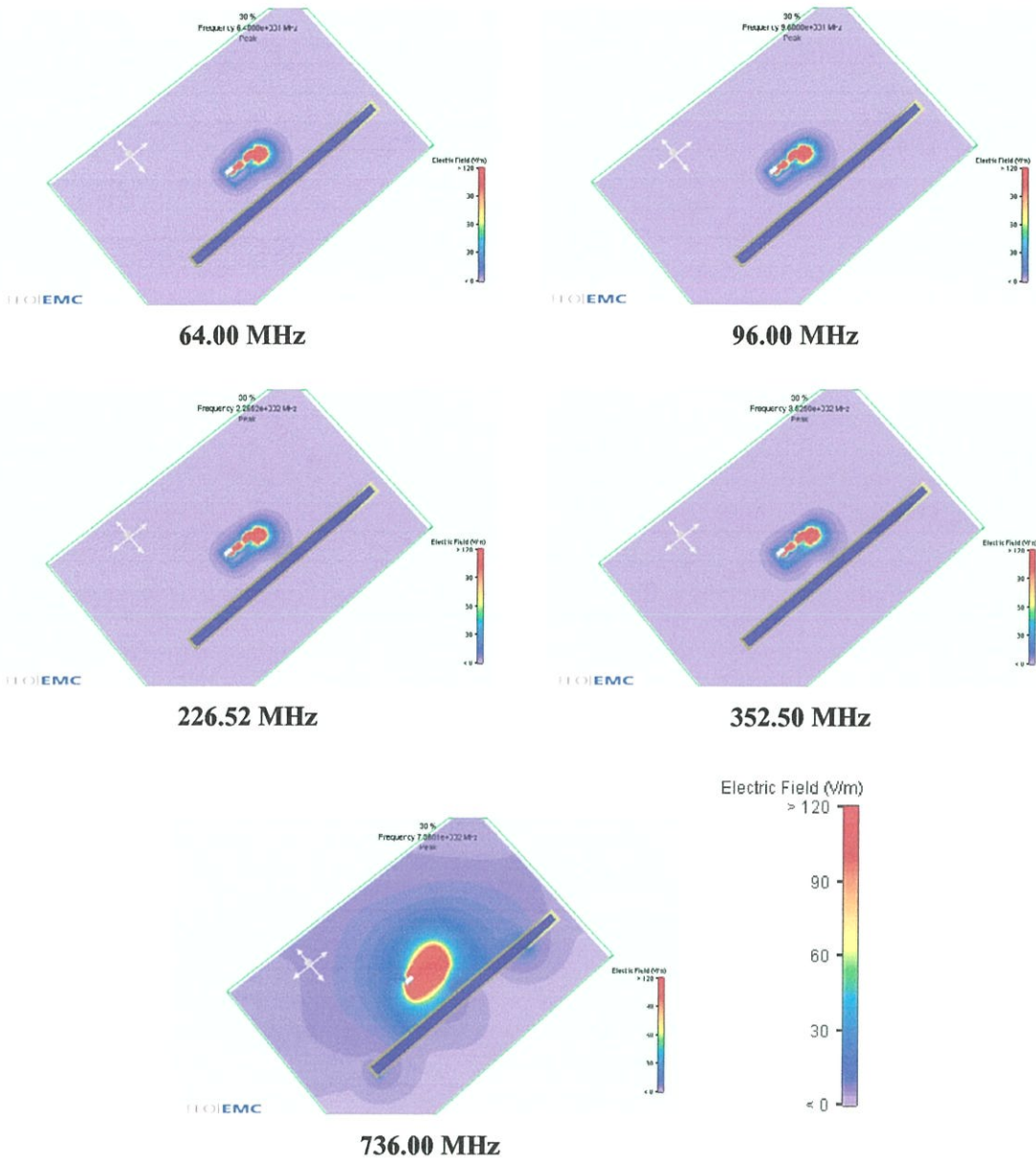
สรุปและวิเคราะห์การเปรียบเทียบในประเด็นที่ 2 สำหรับสารละลายเกลือ

- ❖ คุณสมบัติการชิลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีระดับความเข้มข้นของสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นทั้งจากผลการทดลองและจากการจำลอง โดยรวมผลจากทั้งการทดลองและการจำลองมีรูปแบบไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าผลการทดลองที่บางความถี่ช่วยในการขยายสัญญาณ โดยสาเหตุหนึ่งสืบเนื่องมาจากการเรโซแนนซ์ของสารละลายและภาชนะที่บรรจุ
- ❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 100 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการชิลด์สูงสุด 10 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการชิลด์ในย่านนี้สูงสุดถึง 12 dB
- ❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ถึง 500 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการชิลด์สูงสุด 12.4 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการชิลด์ในย่านนี้สูงสุดถึง 13 dB
- ❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 500 MHz ถึง 1,000 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการชิลด์สูงสุด 10.7 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการชิลด์ในย่านนี้สูงสุดถึง 10 dB
- ❖ สามารถสรุปค่าคุณสมบัติการชิลด์สูงสุดและต่ำสุดจากการทดลองและการจำลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.5 สรุปประสิทธิภาพการชิลด์ของเกลือในประเด็นที่ 2

ประสิทธิภาพการชิลด์	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
การทดลอง	12.4	-7.5
การจำลอง	13	-2

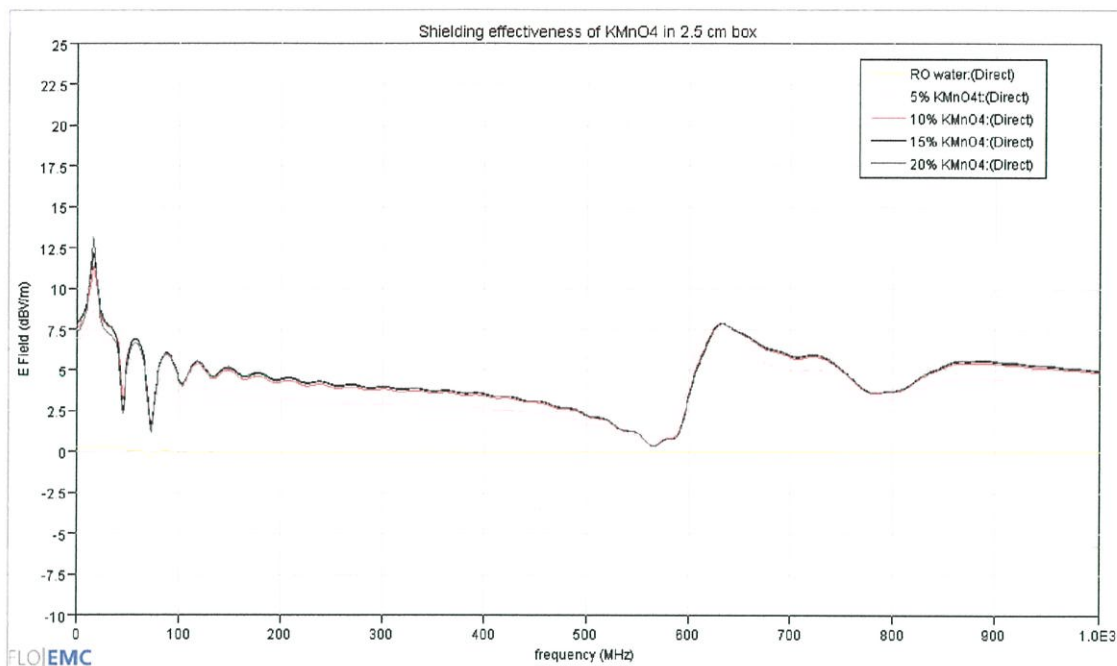
- ❖ จากผลของการจำลอง สามารถจำลองการรูปแบบการเดินทางของสนามแม่เหล็กที่ทำการชิลด์ด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 2.5 เซนติเมตร โดยภายในบรรจุสารละลายเกลือที่จุดความถี่ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.65



รูปที่ 5.65 รูปแบบการเดินทางของสนามไฟฟ้าที่ถูกซัดด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุน้ำละลายกว้างหนา 2.5 เซนติเมตร โดยภายในบรรจุน้ำละลายเกลือ

- ค้างทับทิม

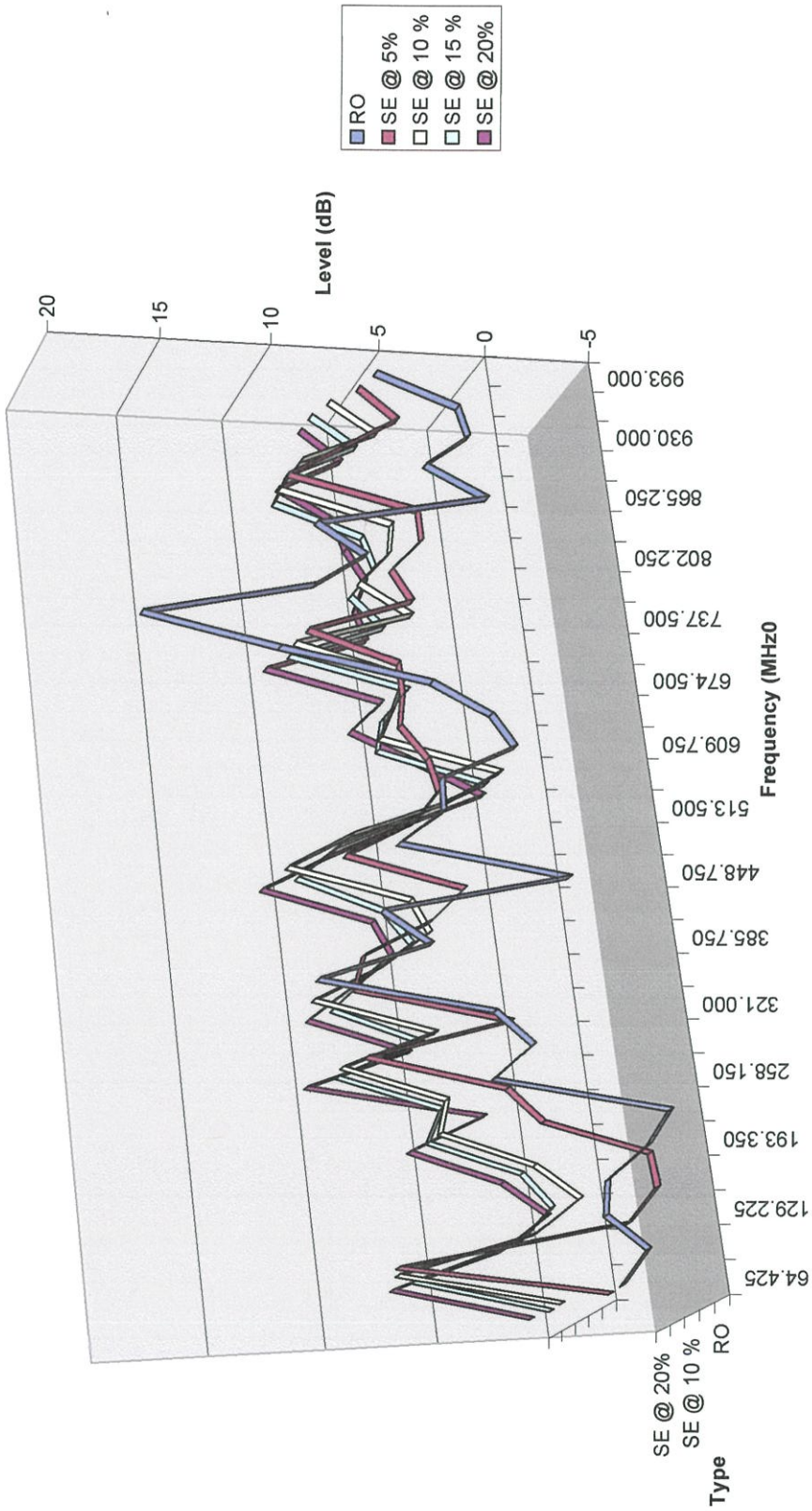
ผลที่ได้จากการจำลองค่าคุณสมบัติการชีลด์ที่ได้จากโปรแกรม FLO/EMC สามารถนำมาทำภาพกราฟเปรียบเทียบผลการจำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของค้างทับทิมได้ดังรูปที่ 5.66



รูปที่ 5.66 แสดงเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการชีลด์จากการจำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของ ค้างทับทิม

ผลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำค่าที่ได้มาทำภาพเปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ที่แต่ละระดับความเข้มข้นของค้างทับทิมในรูปที่ 5.67

เปรียบเทียบการชดเชยของสสารละลายต่างที่พบในภาชนะเปิด 2.5 ซม.



รูปที่ 5.67 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการชดเชยการทดลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของต่างที่พบ

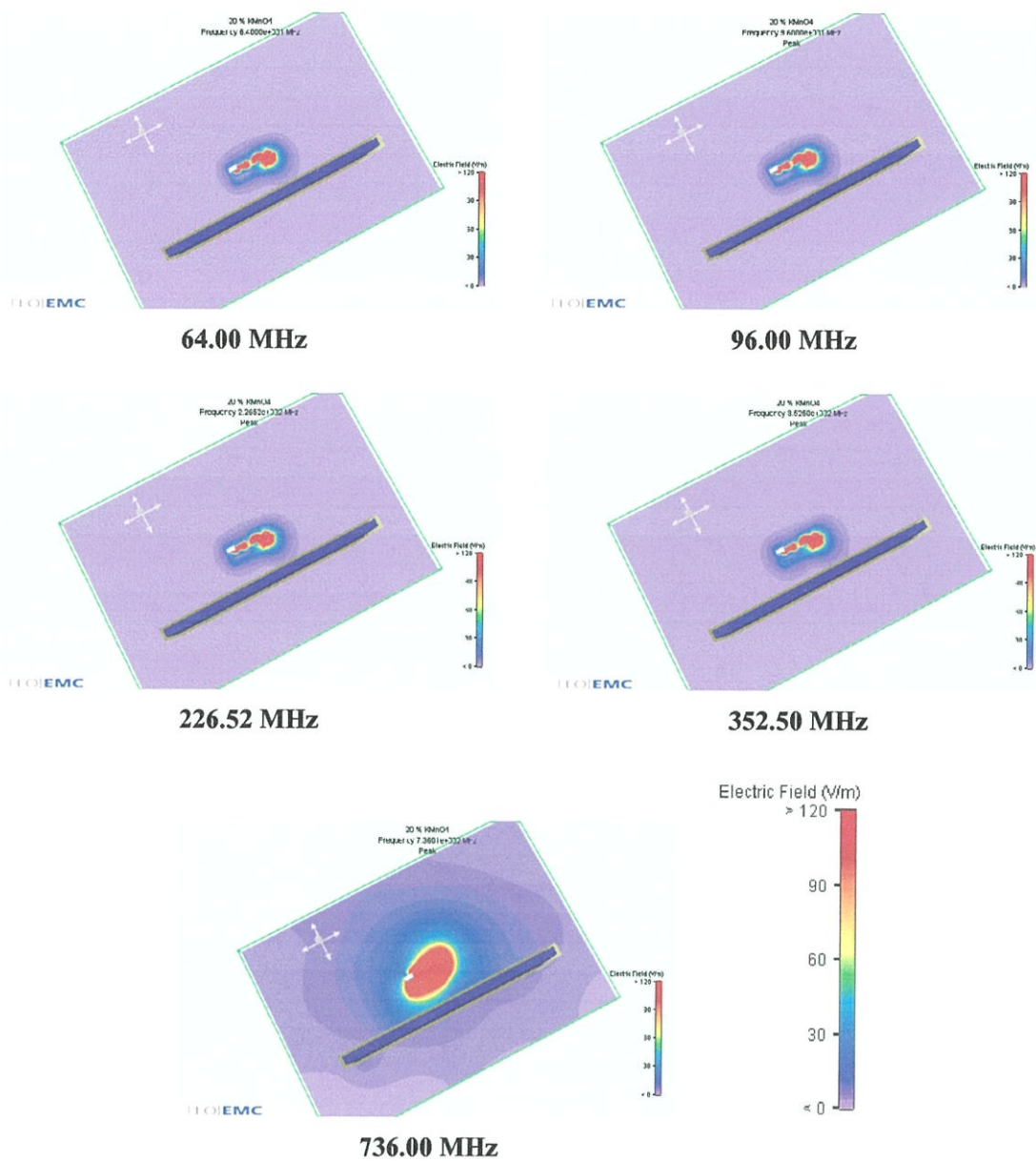
สรุปและวิเคราะห์การเปรียบเทียบในประเด็นที่ 2 สำหรับสารละลายต่างทับทิม

- ❖ คุณสมบัติการซึบซับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีระดับความเข้มข้นของสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นทั้งจากผลการทดลองและจากการจำลอง โดยรวมผลจากทั้งการทดลองและการจำลองมีรูปแบบไปในทางเดียวกัน แต่พบว่ามีการทดลองที่บางความถี่ช่วยในการขยายสัญญาณ โดยสาเหตุหนึ่งสืบเนื่องมาจากการเรโซแนนซ์ของสารละลายและภาชนะที่บรรจุ
- ❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 100 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการซึบซับสูงสุด 8.3 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการซึบซับในย่านนี้สูงสุดถึง 7.5 dB
- ❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ถึง 500 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการซึบซับสูงสุด 10.8 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการซึบซับในย่านนี้สูงสุดถึง 6.5 dB
- ❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 500 MHz ถึง 1,000 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการซึบซับสูงสุด 9.5 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการซึบซับในย่านนี้สูงสุดถึง 8.5 dB
- ❖ สามารถสรุปค่าคุณสมบัติการซึบซับสูงสุดและต่ำสุดจากการทดลองและการจำลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.6 สรุปประสิทธิภาพการซึบซับของต่างทับทิมในประเด็นที่ 2

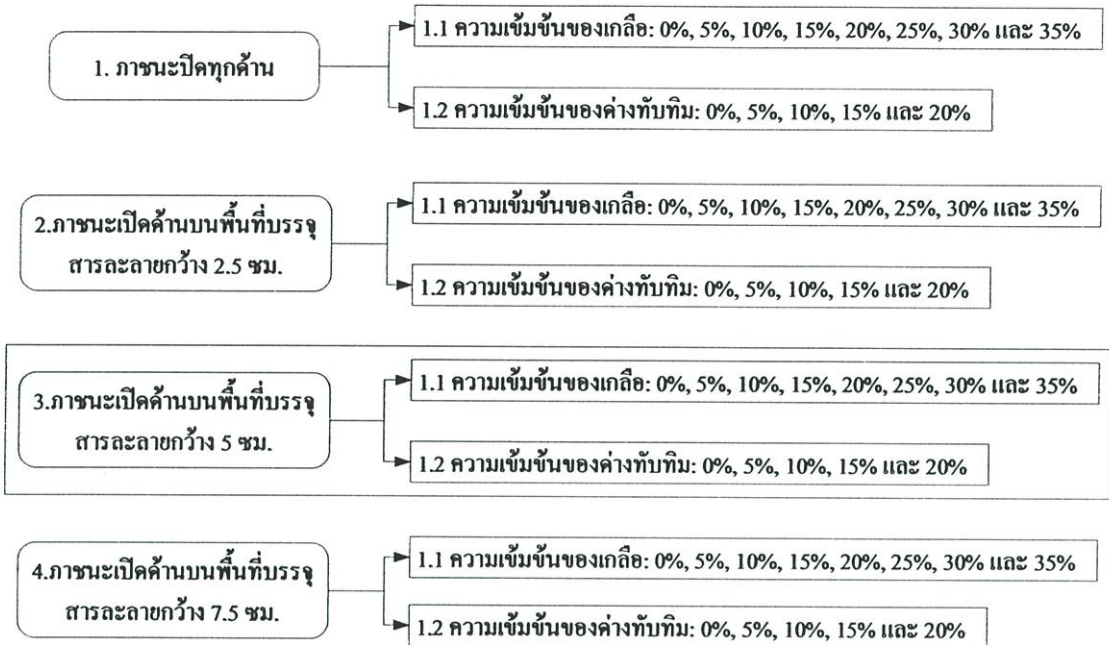
ประสิทธิภาพการซึบซับ	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
การทดลอง	10.8	-3.6
การจำลอง	8.5	0

- ❖ จากผลของการจำลอง สามารถจำลองการรูปแบบการเดินทางของสนามแม่เหล็กที่ทำการซึบซับด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 2.5 เซนติเมตร โดยภายในบรรจุสารละลายต่างทับทิมที่จุดความถี่ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.68



รูปที่ 5.68 รูปแบบการเดินทางของสนามไฟฟ้าที่ถูกชีลด์ด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 2.5 เซนติเมตร โดยภายในบรรจุสารละลายต่างทับทม

ประเด็นการเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการ
จำลองในด้านสัญญาณรบกวน

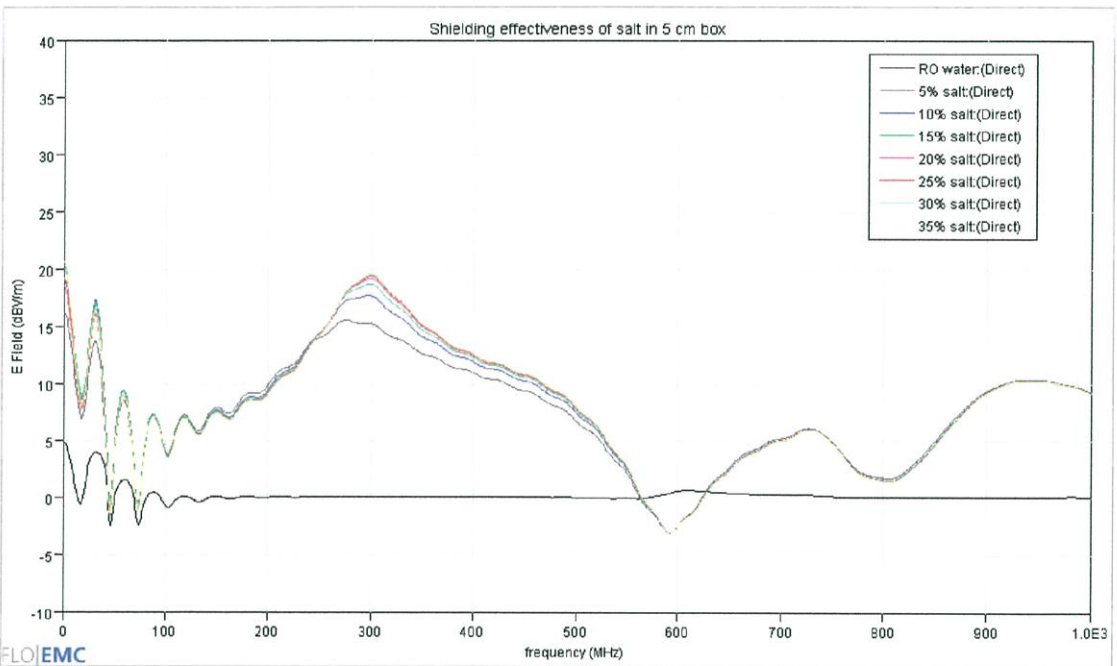


5.3.1.3 การชี้วัดด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 5 เซนติเมตร

การเปรียบเทียบคุณสมบัติการชี้วัดในประเด็นที่ 3 นั้น จะเป็นการเปรียบเทียบเมื่อบรรจุอยู่ในกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 5 เซนติเมตร โดยแยกสารที่ใช้ในการทำวิจัยดังนี้

- เกลือ

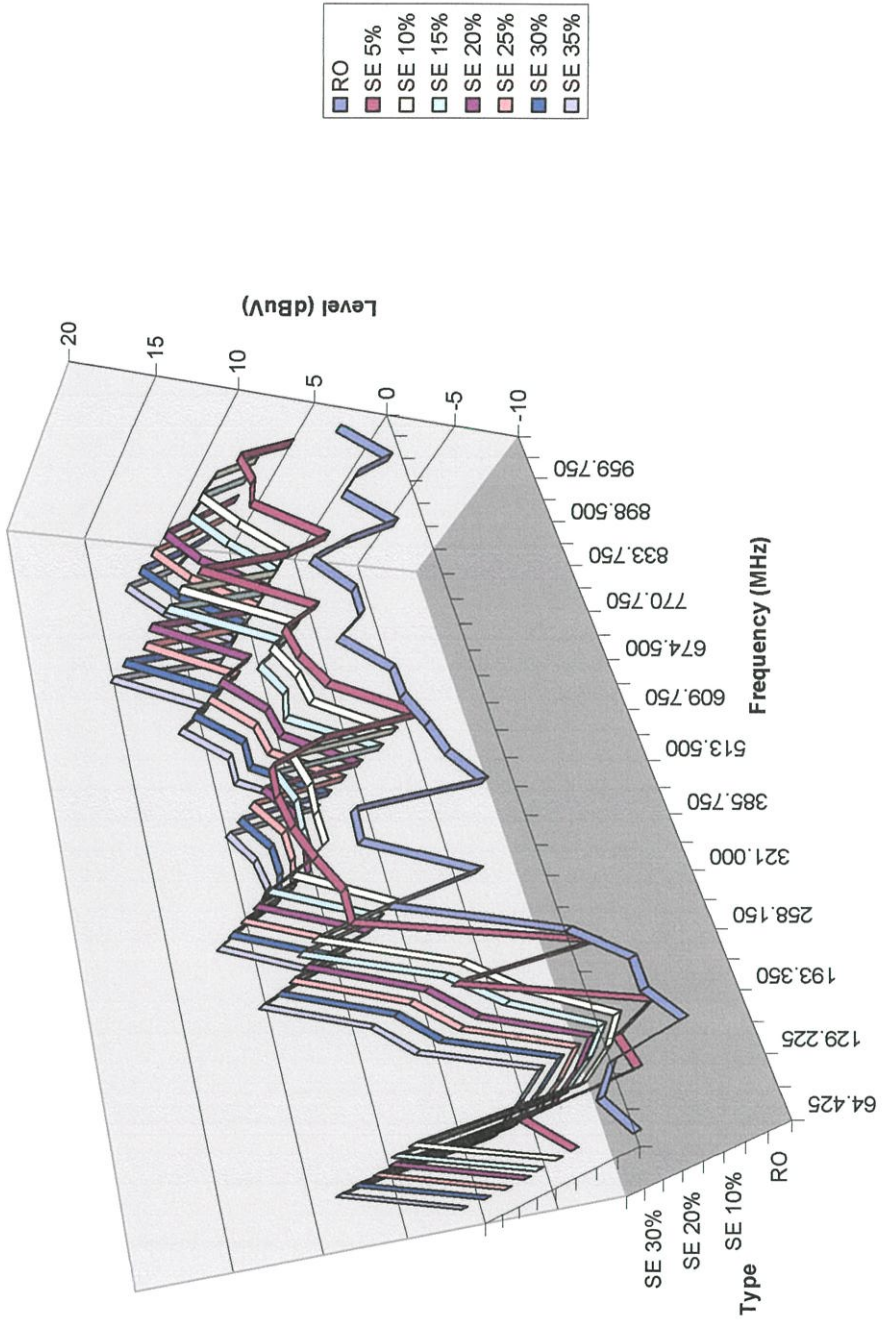
ผลที่ได้จากการจำลองค่าคุณสมบัติการชี้วัดที่ได้จากโปรแกรม FLO/EMC สามารถนำมาทำภาพกราฟเปรียบเทียบผลการจำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ ได้ดังรูปที่ 5.69



รูปที่ 5.69 แสดงเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการชี้วัดจากการจำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ

ผลที่ได้จากการทดสอบดังสามารถนำค่าที่ได้มาทำภาพเปรียบเทียบคุณสมบัติการชี้วัดที่แต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือในรูปที่ 5.70

เปรียบเทียบการขจัดทุกสภาวะของสารละลายเกลือในภาชนะเปิด 5 ชม.



รูปที่ 5.70 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการขจัดค่าการทดลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ

สรุปและวิเคราะห์การเปรียบเทียบในประเด็นที่ 3 สำหรับสารละลายเกลือ

❖ คุณสมบัติการซึบซับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีระดับความเข้มข้นของสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นทั้งจากการทดลองและจากการจำลอง โดยรวมผลจากทั้งการทดลองและการจำลองมีรูปแบบไปในทางเดียวกัน แต่พบว่ามีการทดลองรวมทั้งจากการจำลองที่บางความถี่ช่วยในการขยายสัญญาณ โดยสาเหตุหนึ่งสืบเนื่องมาจากการเรโซแนนซ์ของสารละลายและภาวะที่บรรจ

❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 100 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการซึบซับสูงสุด 9.2 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการซึบซับในย่านนี้สูงสุดถึง 10 dB

❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ถึง 500 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการซึบซับสูงสุด 12.6 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการซึบซับในย่านนี้สูงสุดถึง 18 dB

❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 500 MHz ถึง 1,000 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการซึบซับสูงสุด 15.4 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการซึบซับในย่านนี้สูงสุดถึง 12 dB

❖ สามารถสรุปค่าคุณสมบัติการซึบซับสูงสุดและต่ำสุดจากการทดลองและการจำลองดังต่อไปนี้

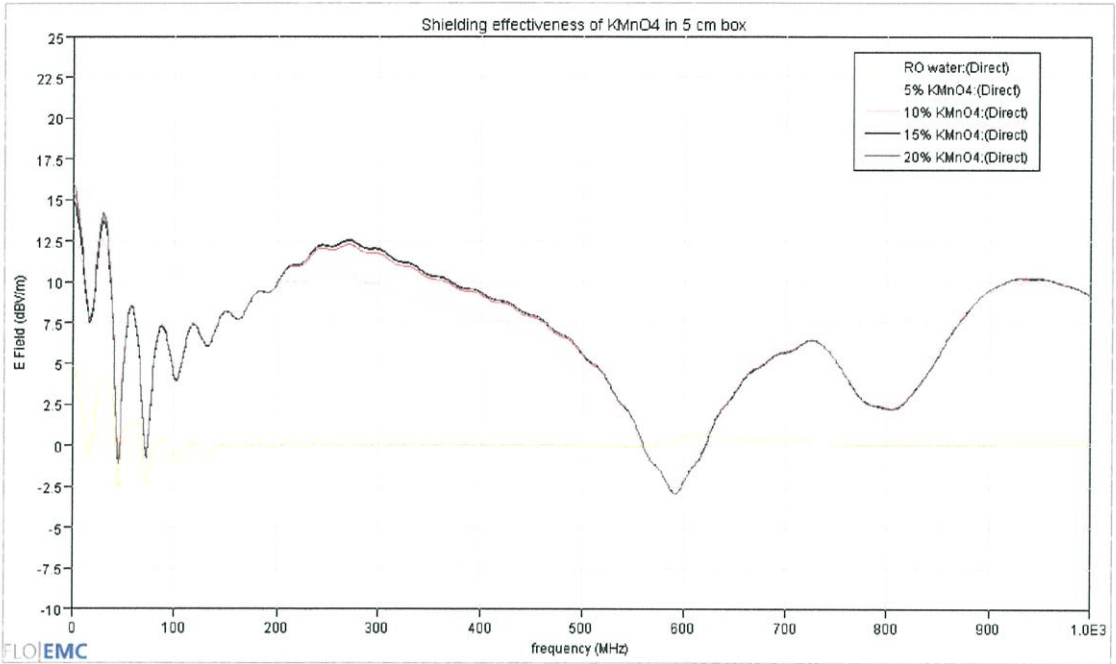
ตารางที่ 5.7 สรุปประสิทธิภาพการซึบซับของเกลือในประเด็นที่ 3

ประสิทธิภาพการซึบซับ	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
การทดลอง	15.4	-6.5
การจำลอง	18	-3

❖ จากผลของการจำลอง สามารถจำลองการรูปแบบการเดินทางของสนามแม่เหล็กที่ทำการซึบซับด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 5 เซนติเมตร โดยภายในบรรจุสารละลายเกลือที่จุดความถี่ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.71

- ค้างทับทิม

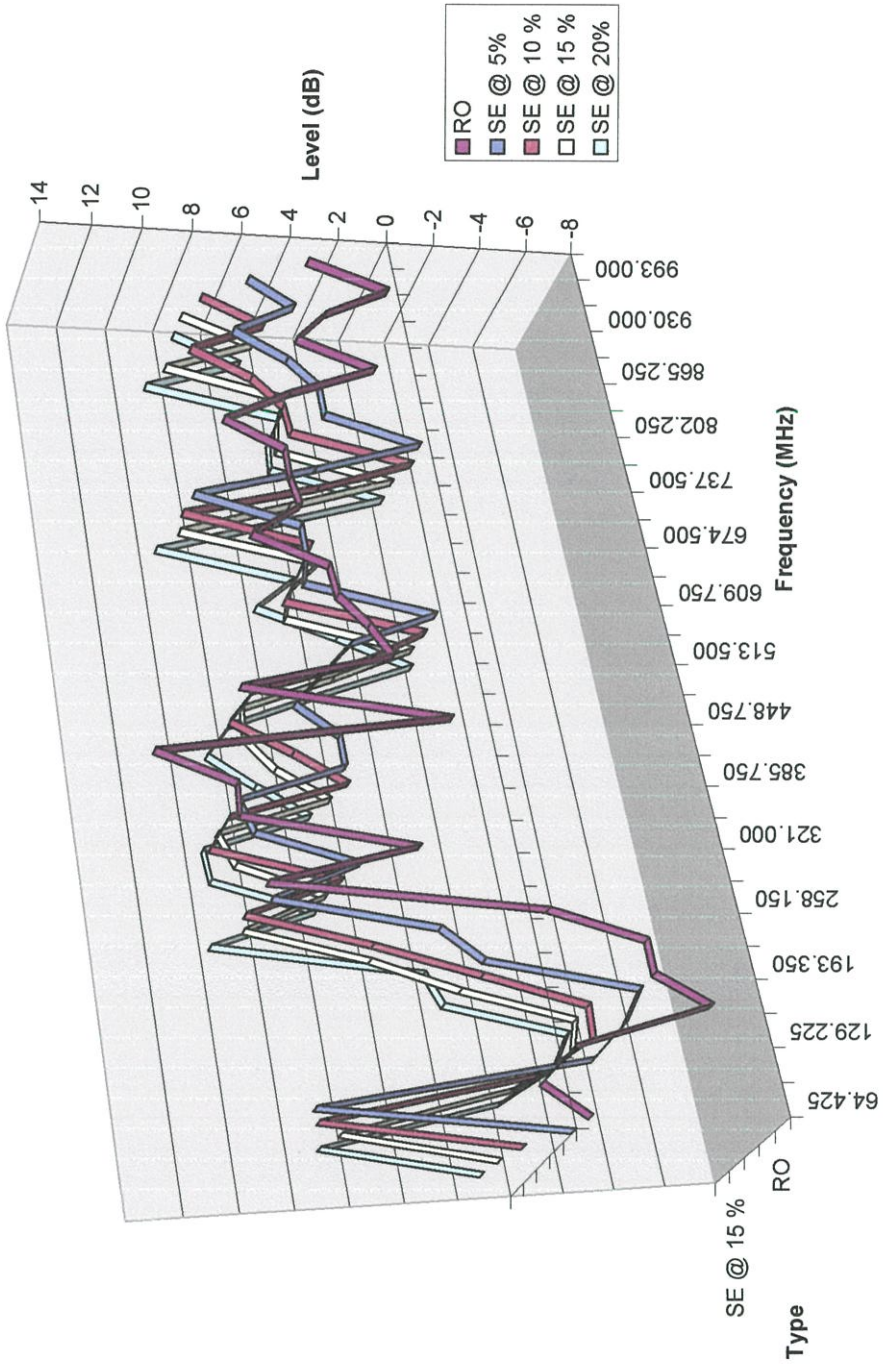
ผลจากการจำลองค่าคุณสมบัติการชีดด์ที่ได้จากโปรแกรม FLO/EMC สามารถนำมาทำภาพกราฟเปรียบเทียบผลการจำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของค้างทับทิมได้ดังรูปที่ 5.72



รูปที่ 5.72 แสดงเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการชีดด์จำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของค้างทับทิม

ผลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำค่าที่ได้มาทำภาพเปรียบเทียบคุณสมบัติการชีดด์ในแต่ละระดับความเข้มข้นของค้างทับทิมในรูปที่ 5.73

เปรียบเทียบการรบกวนที่ปกสภาวะของสารละลายต่างที่พบในภาชนะแบบเปิด 5 ขม.



รูปที่ 5.73 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการรบกวนที่ปกสภาวะของสารละลายต่างที่พบในภาชนะแบบเปิด 5 ขม

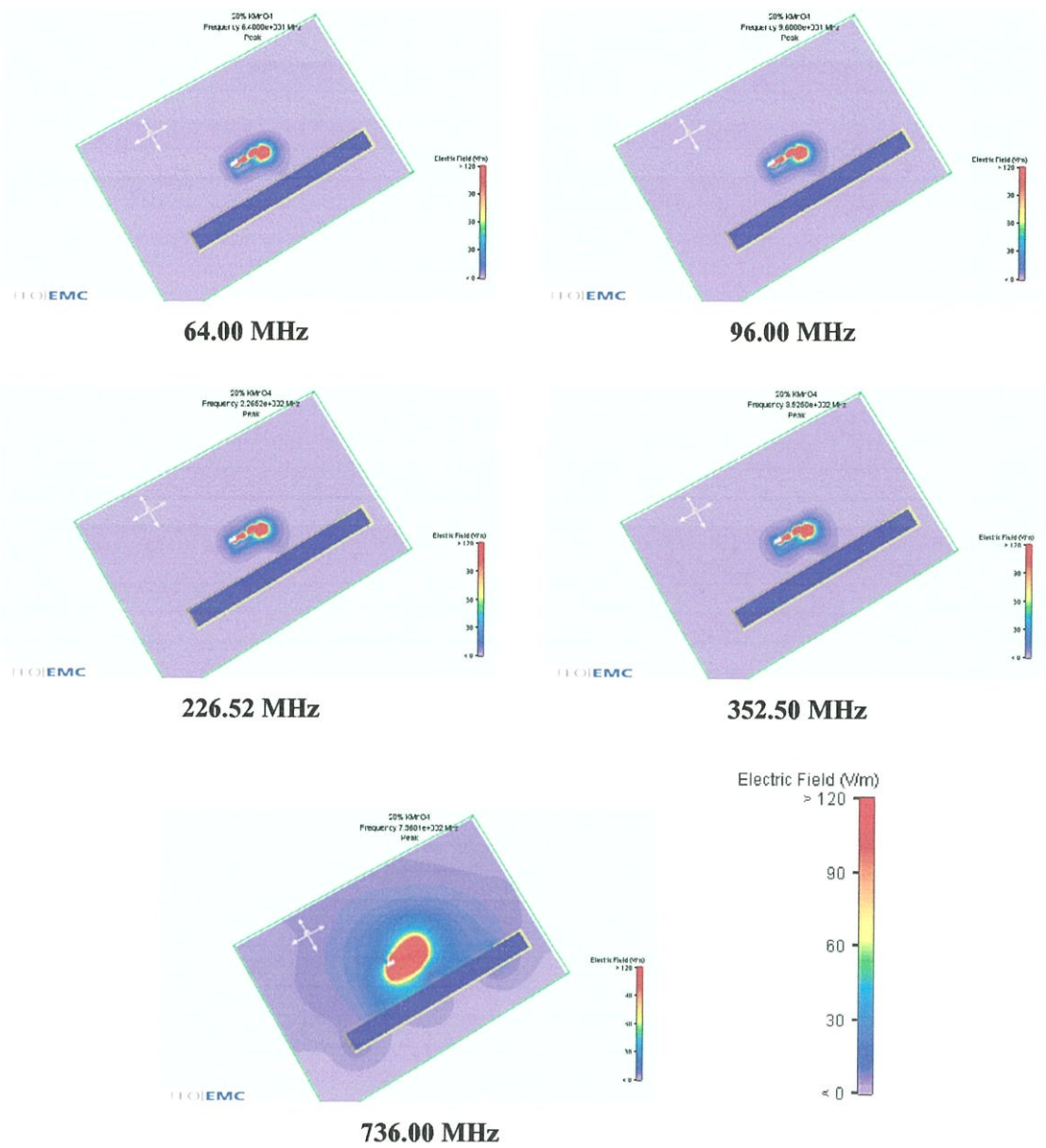
สรุปและวิเคราะห์การเปรียบเทียบในประเด็นที่ 3 สำหรับสารละลายต่างทับทิม

- ❖ คุณสมบัติการลดทอนหรือการชิลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีระดับความเข้มข้นของสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นทั้งจากผลการทดลองและจากการจำลอง โดยรวมผลจากทั้งการทดลองและการจำลองมีรูปแบบไปในทางเดียวกัน แต่พบว่าผลการทดลองรวมทั้งจากการจำลองที่บางความถี่ช่วยในการขยายสัญญาณ โดยสาเหตุหนึ่งสืบเนื่องมาจากการเรโซแนนท์ของสารละลายและภาชนะที่บรรจุ
- ❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 100 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการชิลด์สูงสุด 8.4 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการชิลด์ในย่านนี้สูงสุดถึง 10 dB
- ❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ถึง 500 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการชิลด์สูงสุด 11 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการชิลด์ในย่านนี้สูงสุดถึง 12.5 dB
- ❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 500 MHz ถึง 1,000 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการชิลด์สูงสุด 9.7 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการชิลด์ในย่านนี้สูงสุดถึง 10.2 dB
- ❖ สามารถสรุปค่าคุณสมบัติการชิลด์สูงสุดและต่ำสุดจากการทดลองและการจำลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.8 สรุปประสิทธิภาพการชิลด์ของต่างทับทิมในประเด็นที่ 3

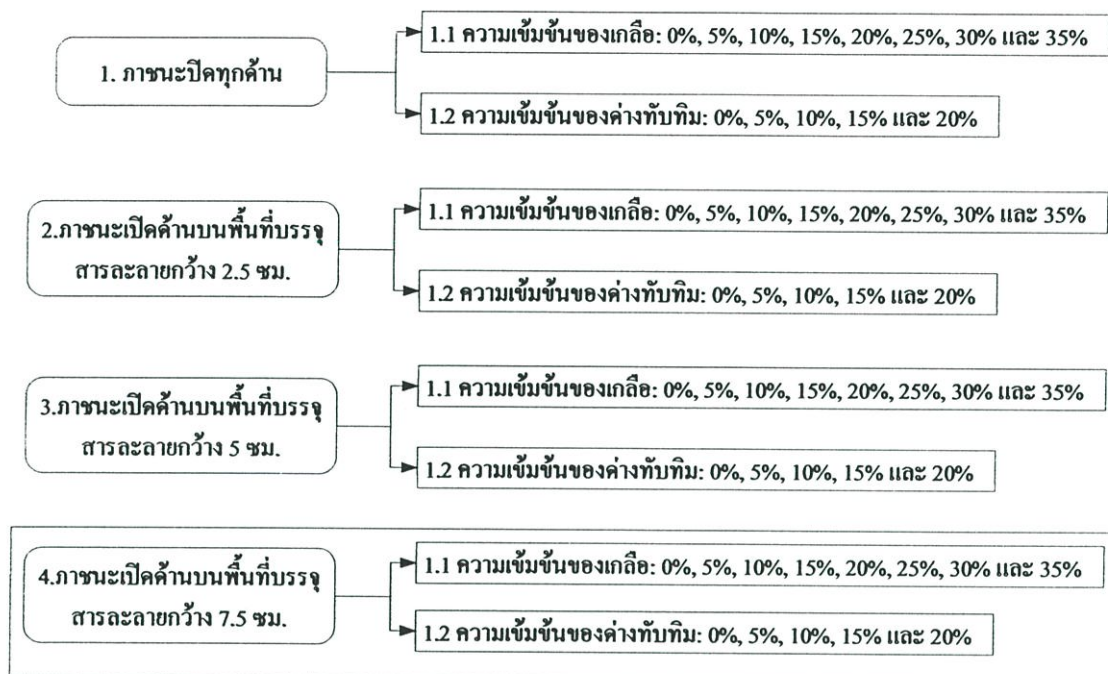
ประสิทธิภาพการชิลด์	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
การทดลอง	11	-2.6
การจำลอง	12.5	-2.7

- ❖ จากผลของการจำลอง สามารถจำลองการรูปแบบการเดินทางของสนามแม่เหล็กที่ทำการชิลด์ด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 5 เซนติเมตร โดยภายในบรรจุสารละลายต่างทับทิมที่จุดความถี่ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.74



รูปที่ 5.74 แสดงรูปแบบการเดินทางของสนามไฟฟ้าที่ถูกชีดด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 5 เซนติเมตร โดยภายในบรรจุสารละลายต่างทับทม

ประเด็นการเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการ
จำลองในด้านสัญญาณรบกวน

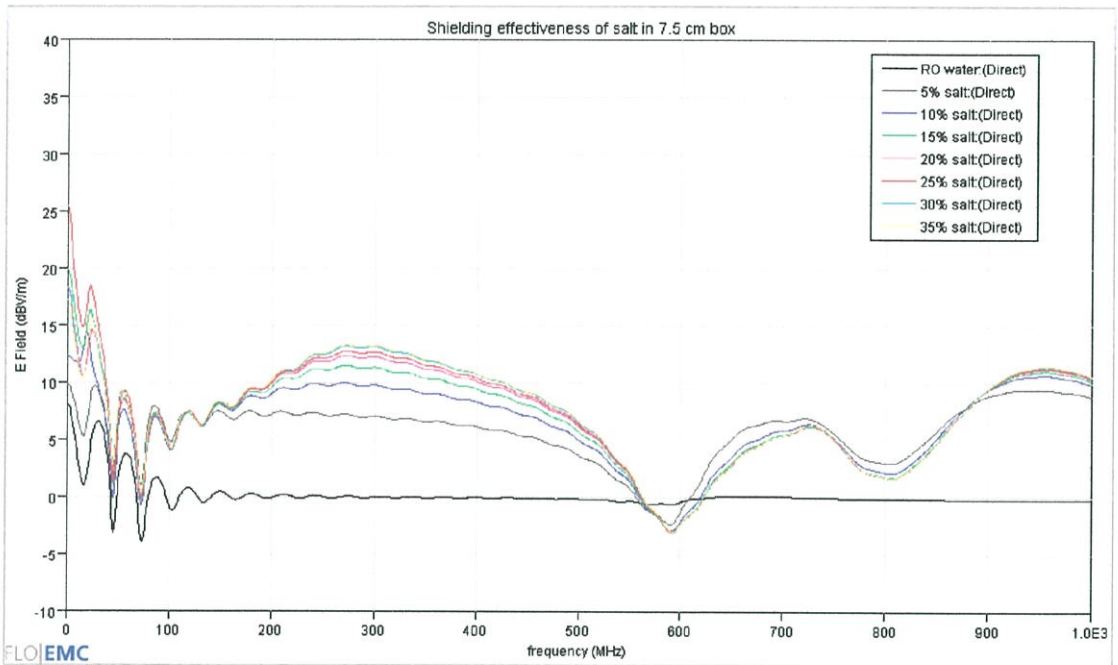


5.3.1.4 การชิลด์ด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 7.5 เซนติเมตร

การเปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ในประเด็นที่ 4 นั้น จะเป็นการเปรียบเทียบเมื่อบรรจุอยู่ในกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 7.5 เซนติเมตร โดยแยกสารที่ใช้ในการทำวิจัยดังนี้

- เกลือ

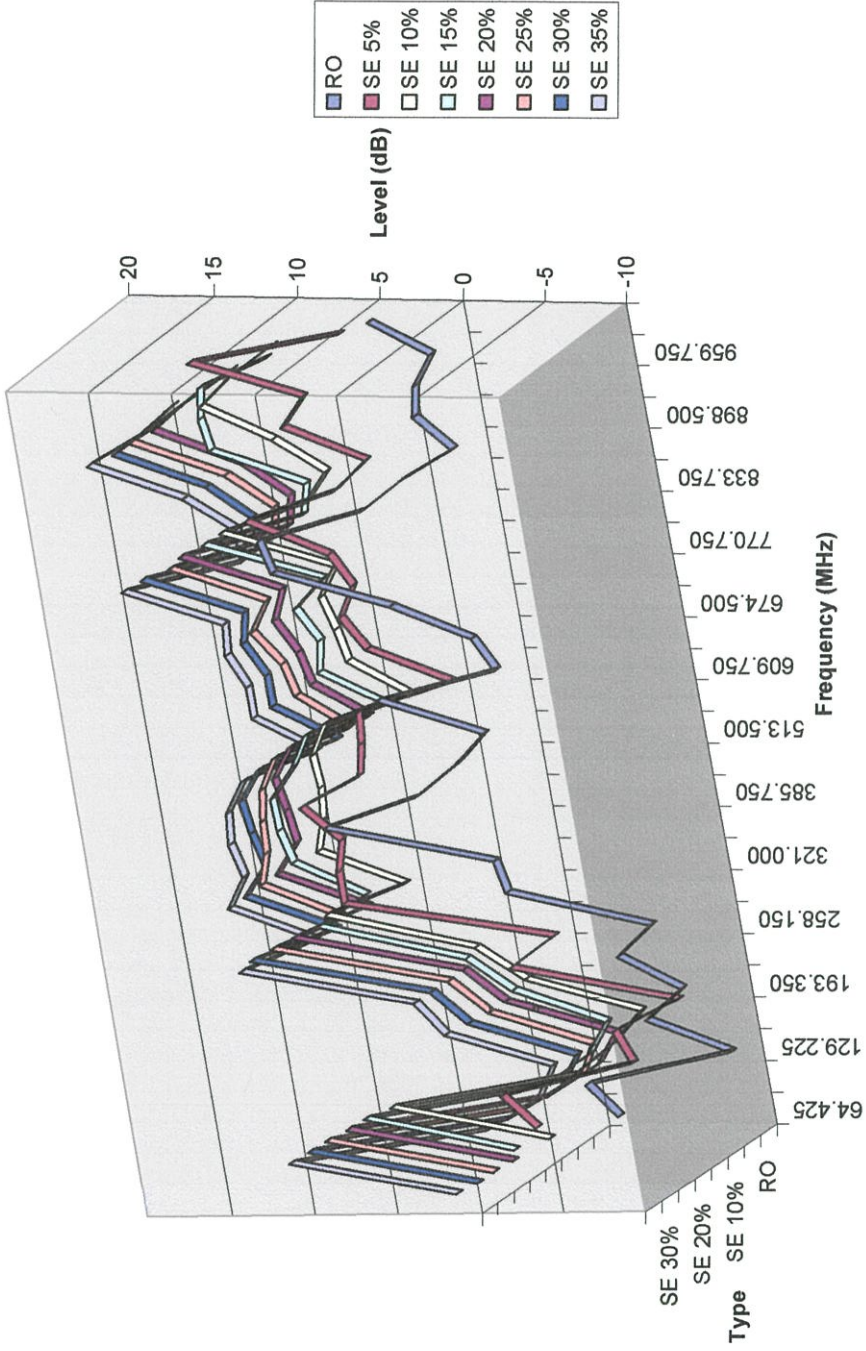
ผลที่ได้จากการจำลองค่าคุณสมบัติการชิลด์ที่ได้จาก โปรแกรม FLO/EMC สามารถทำภาพกราฟเปรียบเทียบผลการจำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือได้ดังรูปที่ 5.75



รูปที่ 5.75 แสดงเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการชิลด์จากการจำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ

ผลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำค่าที่ได้มาทำภาพเปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์ในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือในรูปที่ 5.76

เปรียบเทียบการรบกวนที่ลดลงของสารละลายภายในภาชนะแบบเปิด 7.5 ซม.



รูปที่ 5.76 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการรบกวนที่ลดลงในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ

สรุปและวิเคราะห์การเปรียบเทียบในประเด็นที่ 4 สำหรับสารละลายเกลือ

❖ คุณสมบัติการซึบซับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีระดับความเข้มข้นของสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นทั้งจากผลการทดลองและจากการจำลอง โดยรวมผลจากทั้งการทดลองและการจำลองมีรูปแบบไปในทางเดียวกัน แต่พบว่ามีการทดลองรวมทั้งจากการจำลองที่บางความถี่ช่วยในการขยายสัญญาณ โดยสาเหตุหนึ่งสืบเนื่องมาจากการเรโซแนนซ์ของสารละลายและภาชนะที่บรรจุ

❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 100 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการซึบซับสูงสุด 11.4 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการซึบซับในย่านนี้สูงสุดถึง 15 dB

❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ถึง 500 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการซึบซับสูงสุด 13.5 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการซึบซับในย่านนี้สูงสุดถึง 14 dB

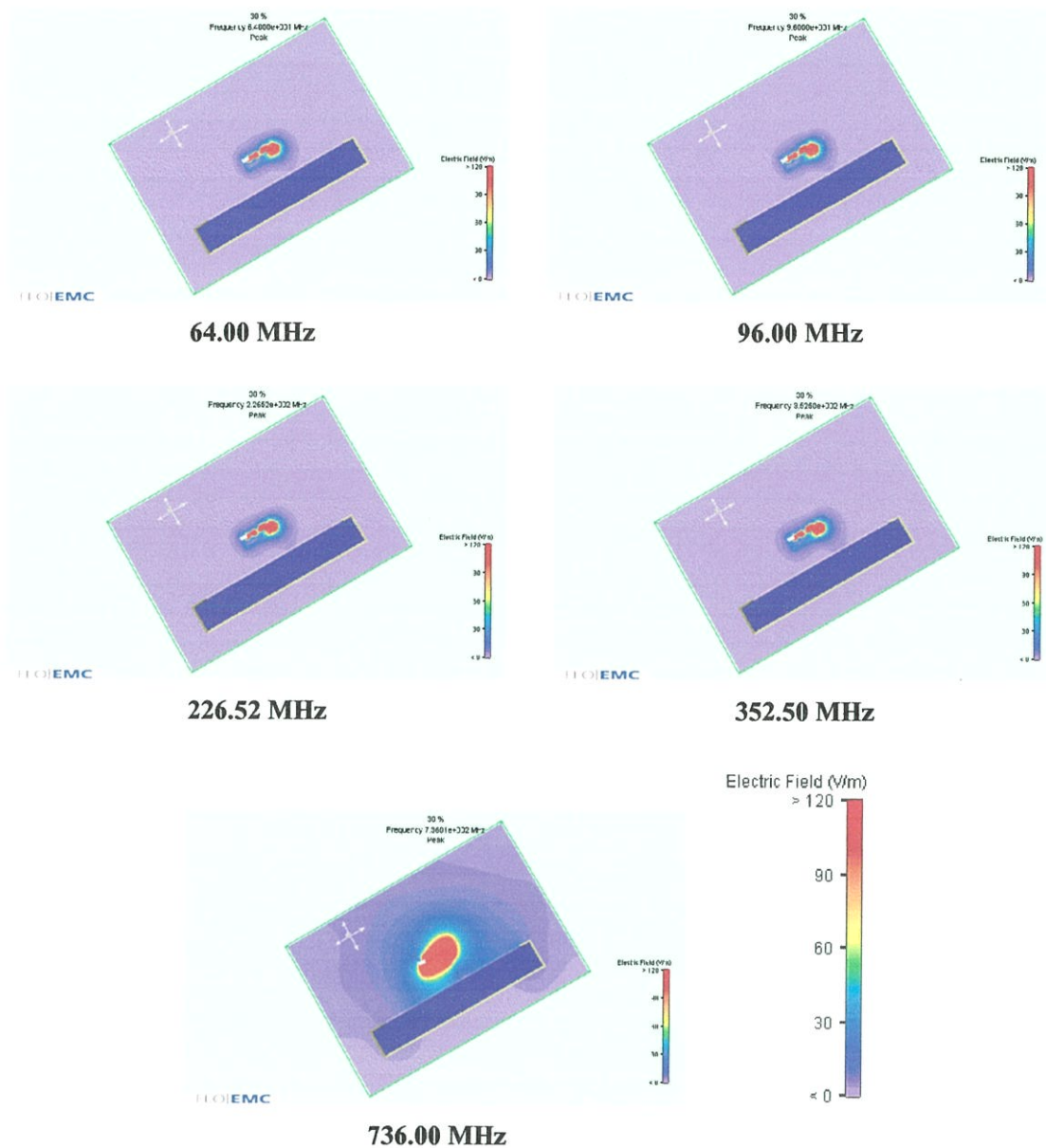
❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 500 MHz ถึง 1,000 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการซึบซับสูงสุด 16.2 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการซึบซับในย่านนี้สูงสุดถึง 12 dB

❖ สามารถสรุปค่าคุณสมบัติการซึบซับสูงสุดและต่ำสุดจากการทดลองและการจำลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.9 สรุปประสิทธิภาพการซึบซับของเกลือในประเด็นที่ 4

ประสิทธิภาพการซึบซับ	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
การทดลอง	16.2	-7.2
การจำลอง	15	-3

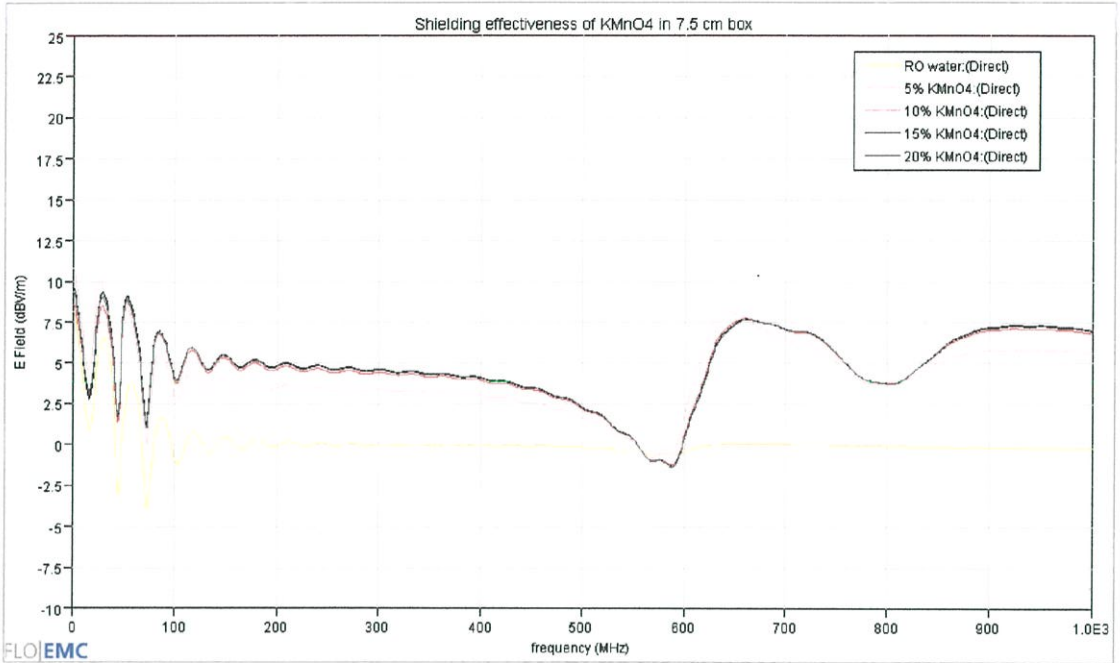
❖ จากผลของการจำลอง สามารถจำลองการรูปแบบการเดินทางของสนามแม่เหล็กที่ทำการซึบซับด้วยหลอดพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 7.5 เซนติเมตร โดยภายในบรรจุสารละลายเกลือที่จุดความถี่ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.77



รูปที่ 5.77 แสดงรูปแบบการเดินทางของสนามไฟฟ้าที่ถูกชีดด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 7.5 เซนติเมตร โดยภายในบรรจุสารละลายเกลือ

- ค้างทับทิม

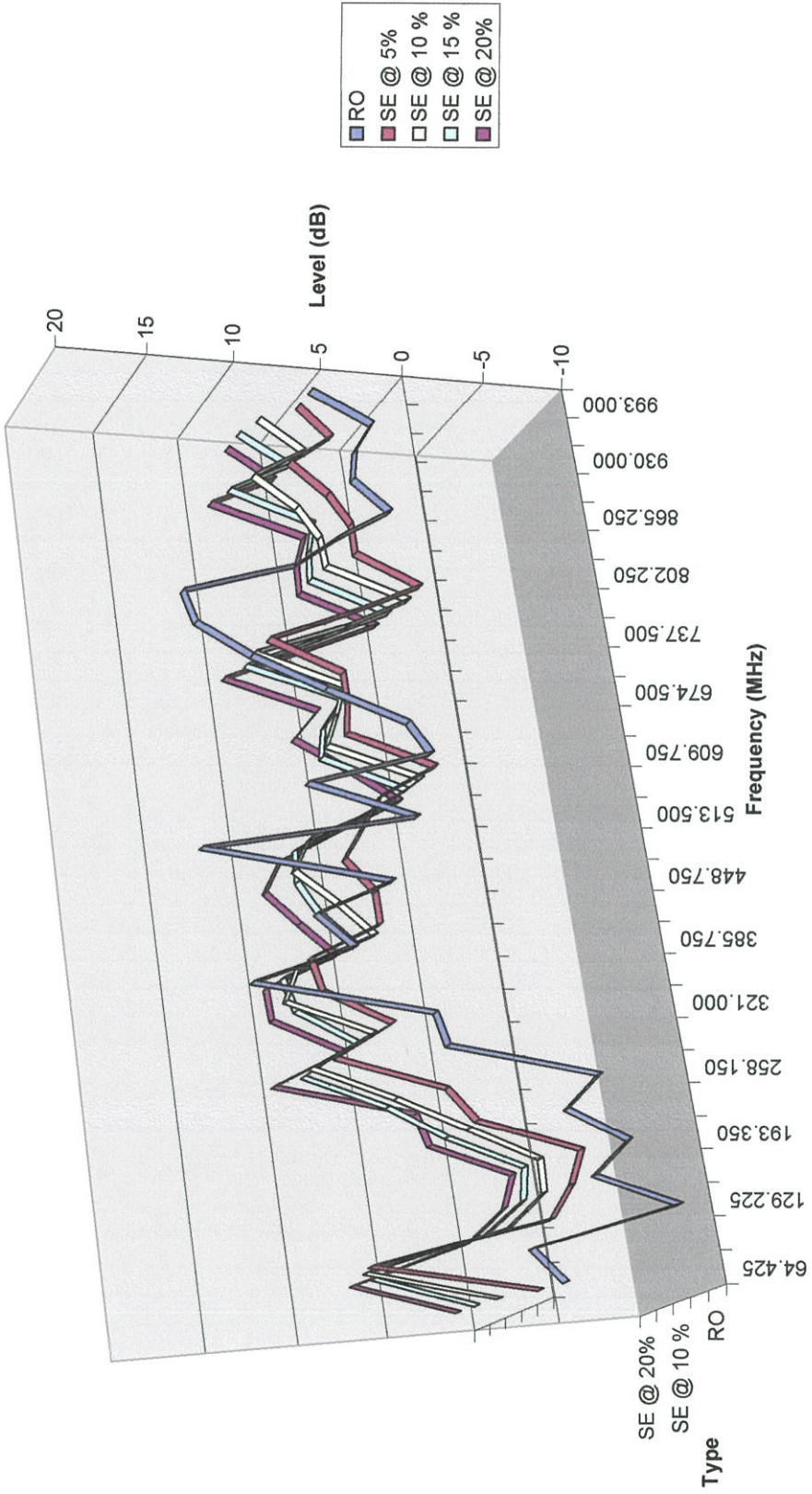
ผลที่ได้จากการจำลองค่าคุณสมบัติการชีลด์ที่ได้จาก โปรแกรม FLO/EMC สามารถนำมาทำภาพกราฟเปรียบเทียบผลการจำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของค้างทับทิม ได้ดังรูปที่ 5.78



รูปที่ 5.78 แสดงเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการชีลด์จำลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของค้างทับทิม

ผลจากการทดสอบสามารถนำค่าที่ได้มาทำภาพเปรียบเทียบคุณสมบัติการชีลด์ในแต่ละระดับความเข้มข้นของค้างทับทิมในรูปที่ 5.79

เปรียบเทียบการชดเชยทุกสภาวะของสารละลายต่างที่บวมในภาชนะแบบเปิด 7.5 ซม.



รูปที่ 5.79 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติการชดเชยการทดลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของต่างที่บวม

สรุปและวิเคราะห์การเปรียบเทียบในประเด็นที่ 4 สำหรับสารละลายค่างทับทิม

❖ คุณสมบัติการซึบซึมของสารละลายแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีระดับความเข้มข้นของสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นทั้งจากผลการทดลองและจากการจำลอง โดยรวมผลจากทั้งการทดลองและการจำลองมีรูปแบบไปในทางเดียวกัน แต่พบว่ามีผลการทดลองรวมทั้งจากการจำลองที่บางความถี่ช่วยในการขยายสัญญาณ โดยสาเหตุหนึ่งสืบเนื่องมาจากการเรโซแนนซ์ของสารละลายและสถานะที่บรรจ

❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 100 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการซึบซึมสูงสุด 8.3 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการซึบซึมในย่านนี้สูงสุดถึง 10 dB

❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ถึง 500 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการซึบซึมสูงสุด 10.1 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการซึบซึมในย่านนี้สูงสุดถึง 7 dB

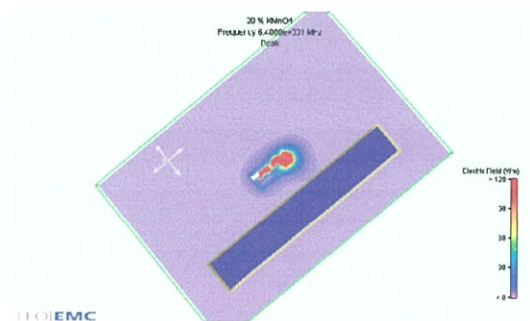
❖ ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 500 MHz ถึง 1,000 MHz จะพบว่าผลจากการทดลองมีคุณสมบัติการซึบซึมสูงสุด 9.5 dB ในขณะที่ผลจากการจำลองมีค่าคุณสมบัติการซึบซึมในย่านนี้สูงสุดถึง 8 dB

❖ สามารถสรุปค่าคุณสมบัติการซึบซึมสูงสุดและต่ำสุดจากการทดลองและการจำลองดังต่อไปนี้

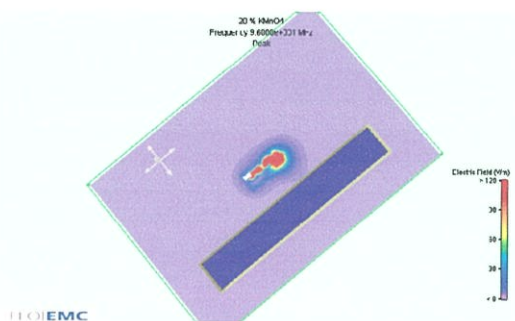
ตารางที่ 5.10 สรุปประสิทธิภาพการซึบซึมของค่างทับทิมในประเด็นที่ 4

ประสิทธิภาพการซึบซึม	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
การทดลอง	10.1	-4.5
การจำลอง	10.0	-2.0

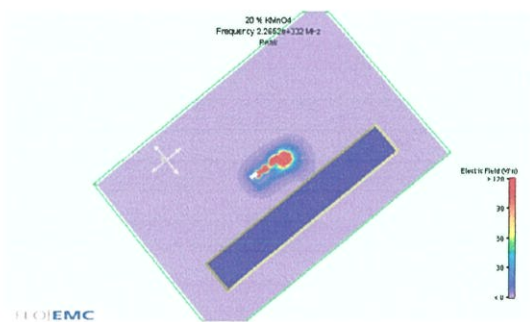
❖ จากผลของการจำลอง สามารถจำลองการรูปแบบการเดินทางของสนามแม่เหล็กที่ทำการซึบซึมด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 7.5 เซนติเมตร โดยภายในบรรจุสารละลายค่างทับทิมที่จุดความถี่ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.80



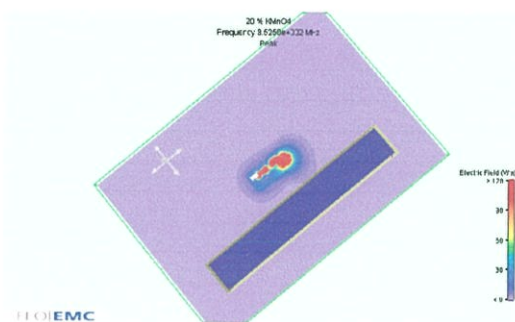
64.00 MHz



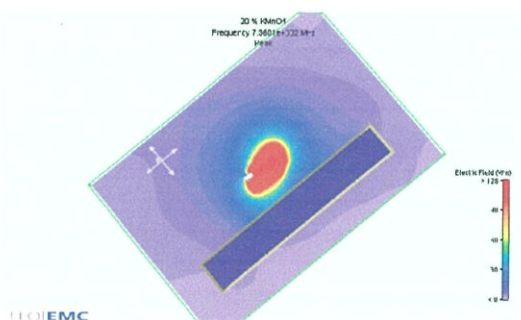
96.00 MHz



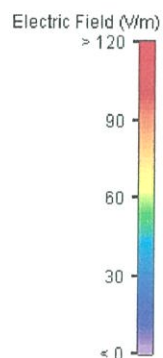
226.52 MHz



352.50 MHz



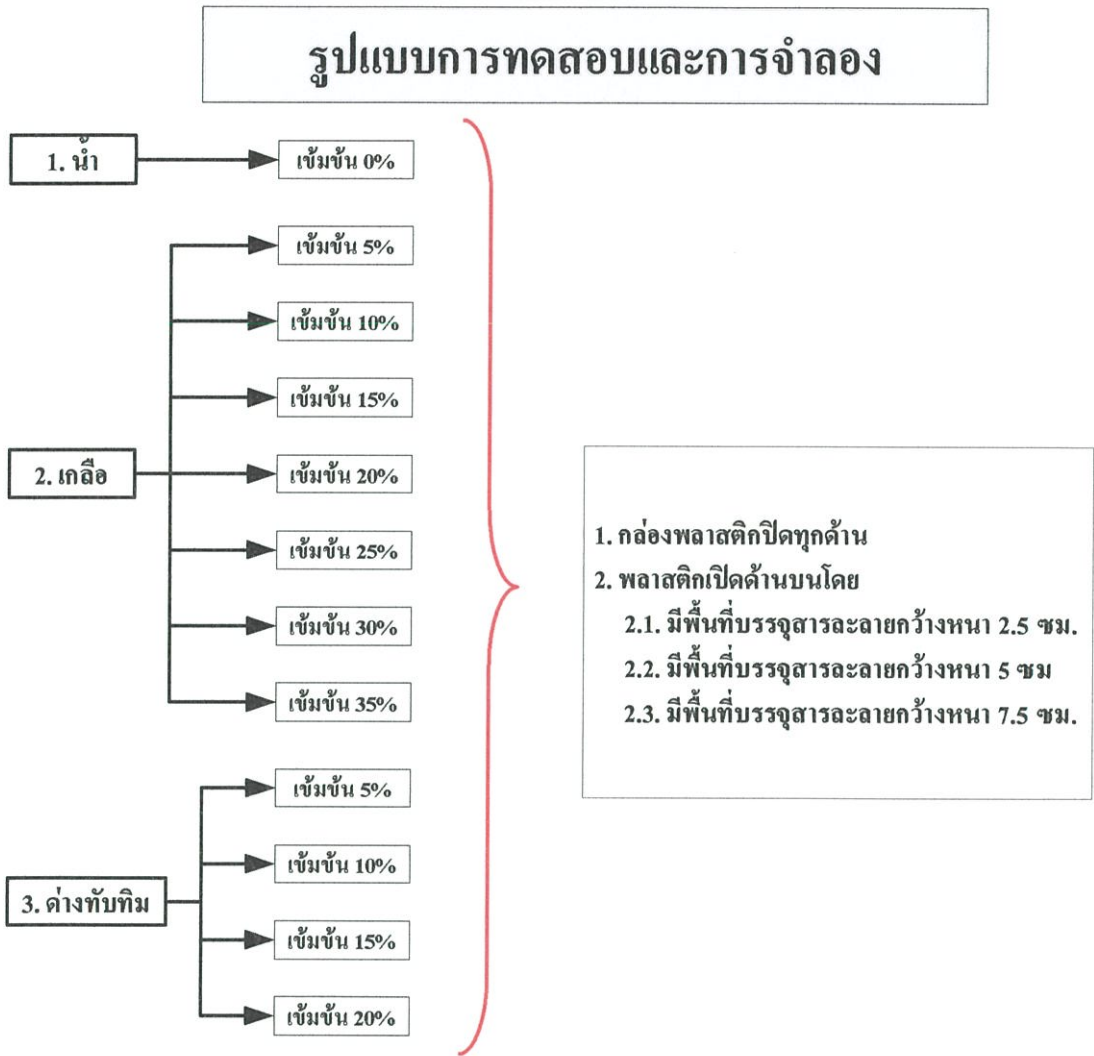
736.00 MHz



รูปที่ 5.80 แสดงรูปแบบการเดินทางของสนามไฟฟ้าที่ถูกชีดด้วยกล่องพลาสติกเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 7.5 เซนติเมตร โดยภายในบรรจุสารละลายต่างทับทม

5.3.2 เปรียบเทียบตามชนิดของสารละลาย

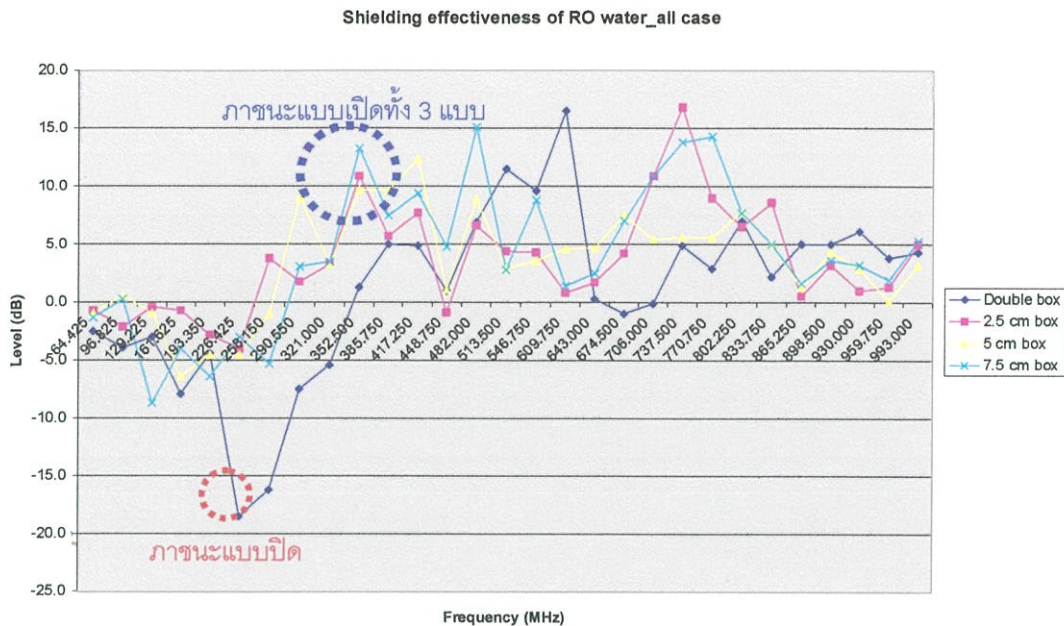
ในหัวข้อนี้จะแบ่งทำการสรุปตามสาร โดยทำการเปรียบเทียบตามระดับความเข้มข้นของสารละลายเกลือ และค่ากัมมันต์ที่นำมาใช้ในการทำวิจัยตามแผนภูมิรูปที่ 5.81



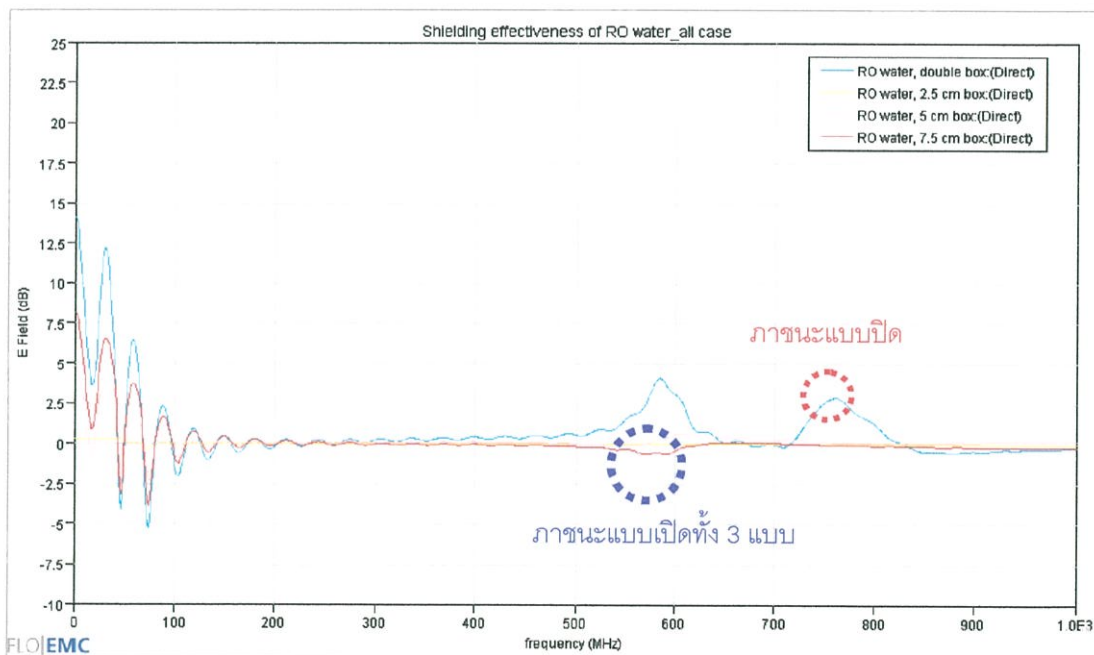
รูปที่ 5.81 สรุปรูปแบบการทดสอบและจำลอง

5.3.2.1 น้ำ

จากผลของการทดลองและการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.82 และ รูปที่ 5.83



รูปที่ 5.82 คุณสมบัติการชิลด์ของน้ำในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 5.83 คุณสมบัติการชิลด์ของน้ำในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลอง

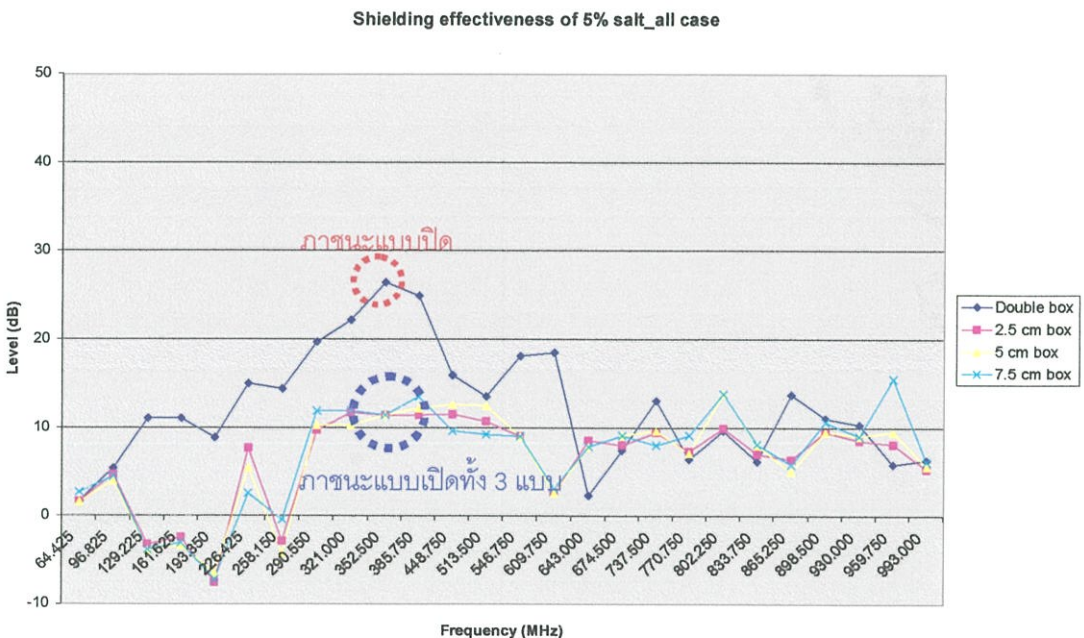
จากรูปทั้งสองพบว่าภาชนะที่ใช้บรรจุน้ำนั้น มีผลต่อการชิลด์ของสัญญาณ โดยจะพบว่าภาชนะทุกประเภทในการทดลองจะมีส่วนช่วยในการขยายสัญญาณในย่านความถี่ต่ำ ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 400 MHz โดยเฉพาะที่ภาชนะแบบปิดจะมีส่วนช่วยในการขยายมากที่สุด ในขณะที่ย่านความถี่สูง ตั้งแต่ 400 MHz ถึง 1,000 MHz น้ำกลับมีคุณสมบัติการชิลด์สัญญาณ จากค่าที่ได้จากการทดลอง ภาชนะที่ใช้ในการบรรจุจะมีประสิทธิผลการชิลด์ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า น้ำมีส่วนช่วยในการขยายที่ความถี่ต่ำ ที่ความถี่สูงน้ำกลับทำหน้าที่ในการชิลด์ และภาชนะที่ใช้ในการบรรจุน้ำนั้น ไม่มีผลแตกต่างกันมากนักเมื่อดูในภาพรวม

5.3.2.2 สารละลายเกลือ

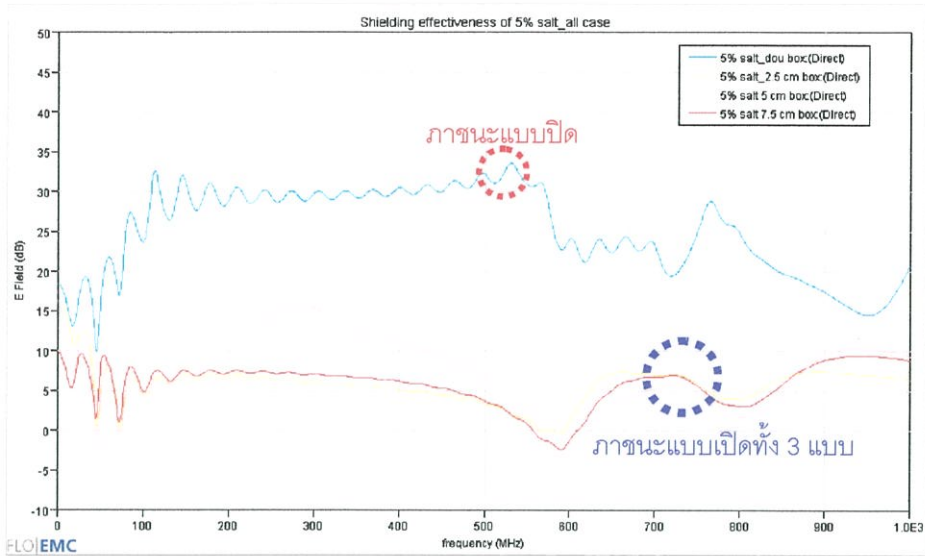
โดยในการสรุปผลการวิจัยนี้จะทำการสรุปแยกด้วยระดับความเข้มข้นที่บรรจุในภาชนะแตกต่างกัน ดังนี้

- สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 5%

จากผลของการทดลองและการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.84 และ รูปที่ 5.85 จากรูปทั้งสองสรุปได้ว่า ภาชนะที่ใช้บรรจุมีผลต่อการชิลด์ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะพบว่าภาชนะปิดทุกด้านจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการชิลด์สัญญาณ ส่วนภาชนะเปิดด้านบนทั้งสามแบบพบว่าไม่มีประสิทธิผลการชิลด์ใกล้เคียงกัน



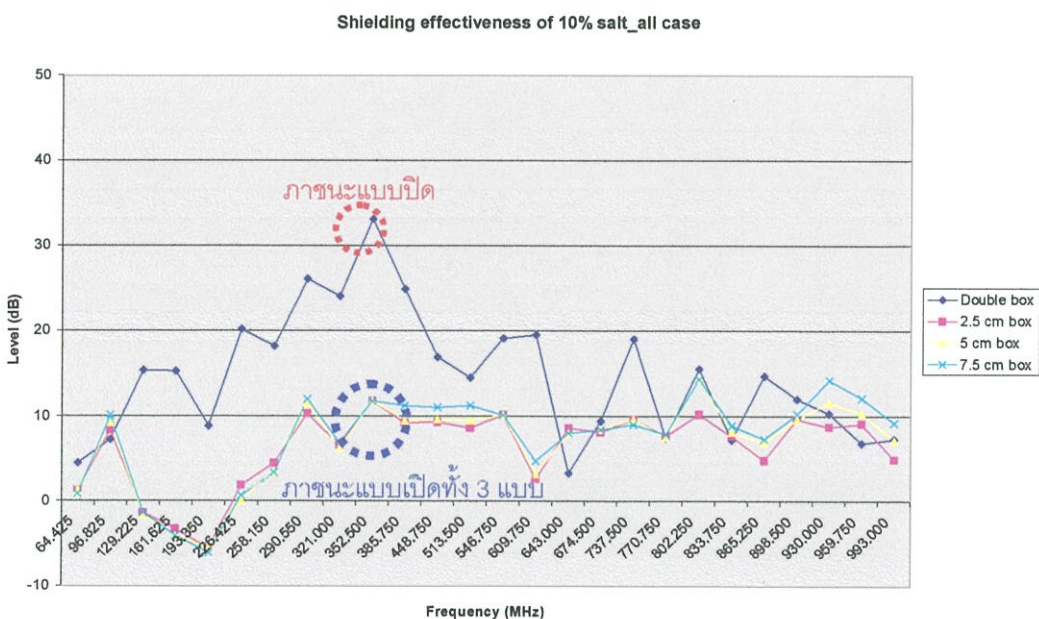
รูปที่ 5.84 คุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 5% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ



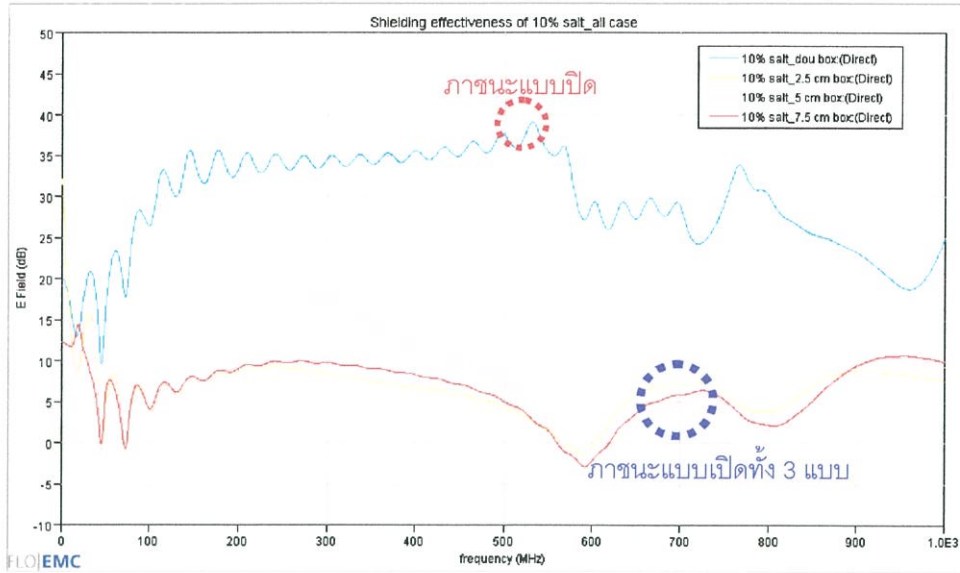
รูปที่ 5.85 คุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 5% ในภาษาณะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลอง

- สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 10%

จากผลของการทดลองและการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.86 และ รูปที่ 5.87 จากรูปทั้งสองสรุปได้ว่า ภาษาณะที่ใช้บรรจุจะมีผลต่อการชิลด์ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะพบว่าภาษาณะปิดทุกด้านจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการชิลด์สัญญาณ ส่วนภาษาณะเปิดด้านบนทั้งสามแบบที่ความหนาต่าง ๆ กันจะมีประสิทธิภาพการชิลด์ใกล้เคียงกัน



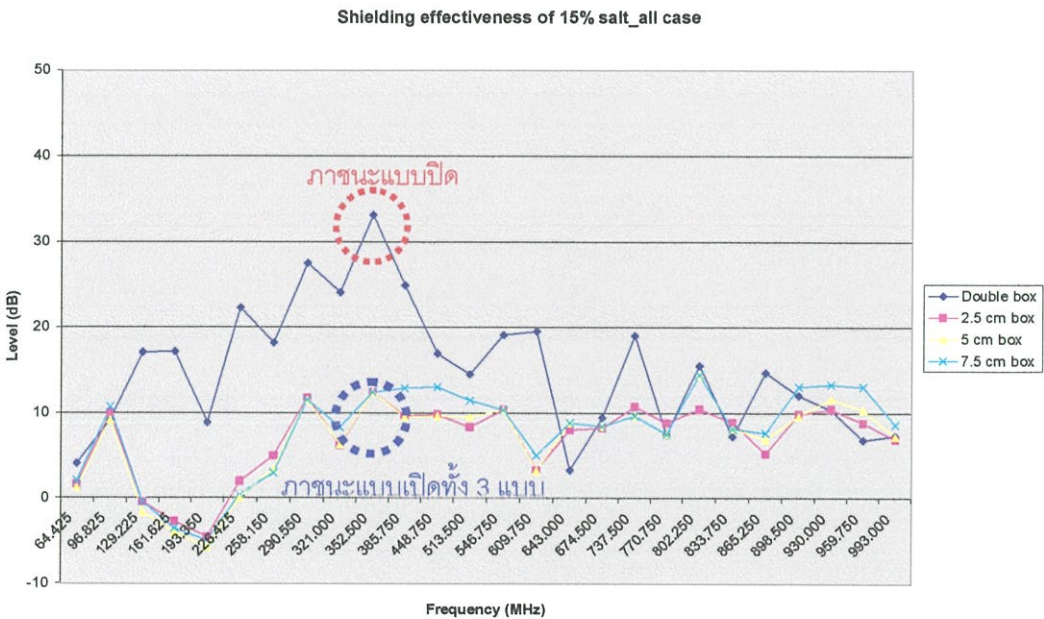
รูปที่ 5.86 คุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 10% ในภาษาณะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ



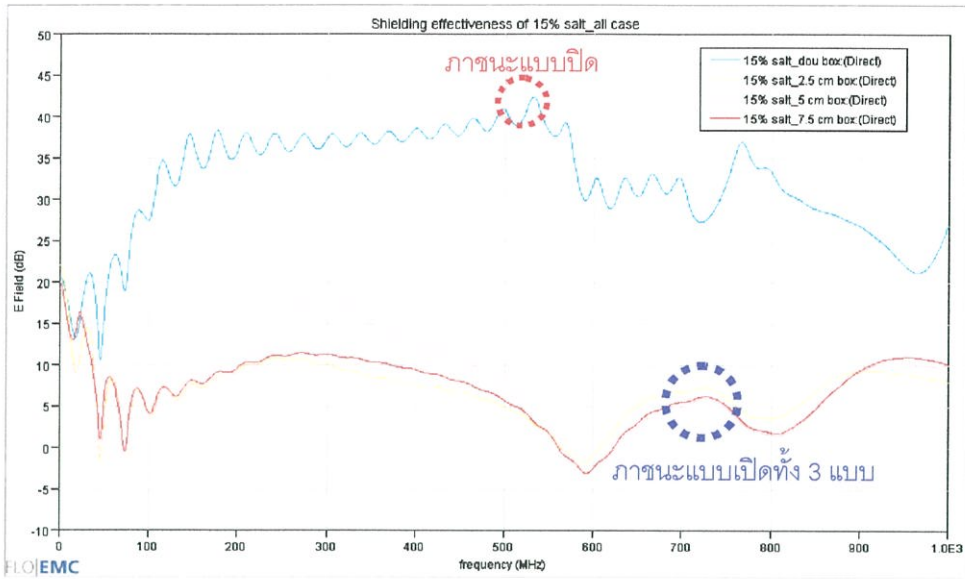
รูปที่ 5.87 คุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 10% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลอง

- สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 15%

จากผลของการทดลองและการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.88 และ รูปที่ 5.89 จากรูปทั้งสองสรุปได้ว่า ภาชนะที่ใช้บรรจุมีผลต่อการชิลด์ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะพบว่าภาชนะปิดทุกด้านจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการชิลด์สัญญาณ ส่วนภาชนะเปิดด้านบนทั้งสามแบบมีประสิทธิผลการชิลด์ใกล้เคียงกัน



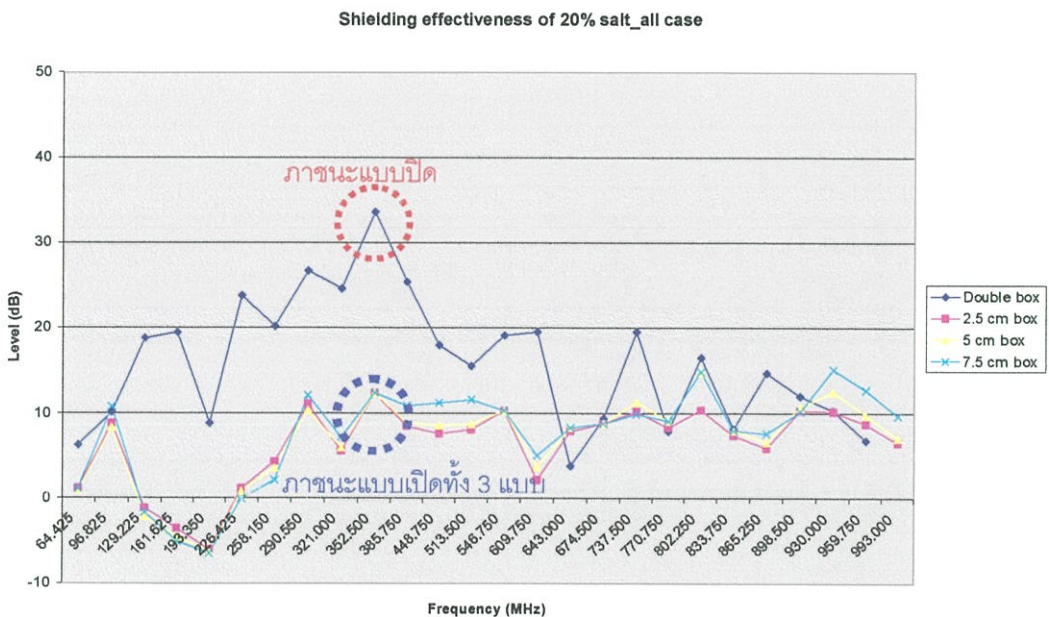
รูปที่ 5.88 คุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 15% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ



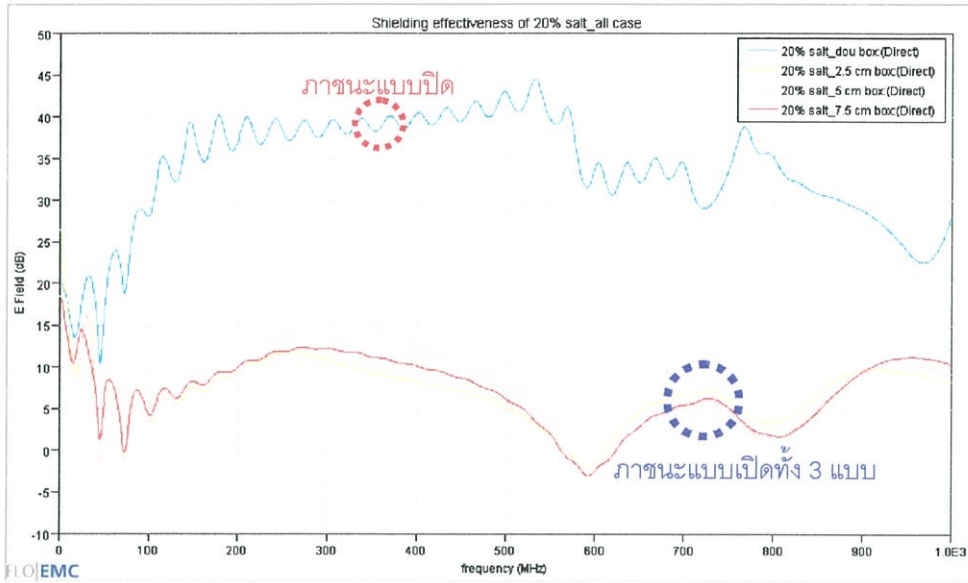
รูปที่ 5.89 คุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 15% ในภาชนะแบบต่างๆ ที่ได้จากการจำลอง

- สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 20%

จากผลของการทดลองและการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.90 และ รูปที่ 5.91 จากรูปทั้งสองสรุปได้ว่า ภาชนะที่ใช้บรรจุมีผลต่อการชิลด์ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะพบว่าภาชนะปิดทุกด้านจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการชิลด์สัญญาณ ส่วนภาชนะเปิดด้านบนทั้งสามแบบจะมีประสิทธิผลการชิลด์ที่ใกล้เคียงกัน



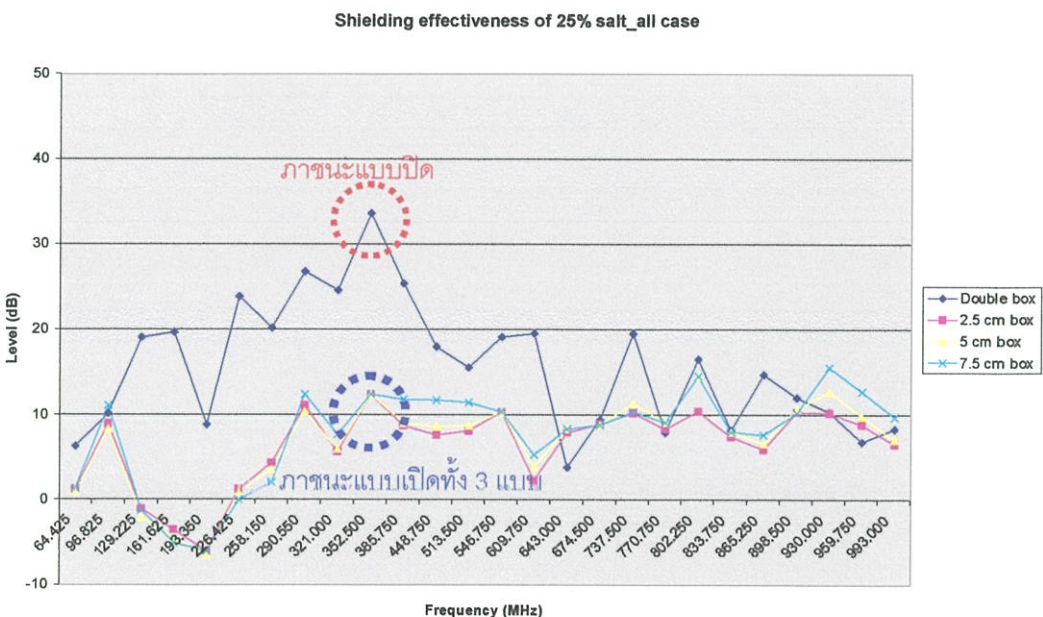
รูปที่ 5.90 คุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 20% ในภาชนะแบบต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง



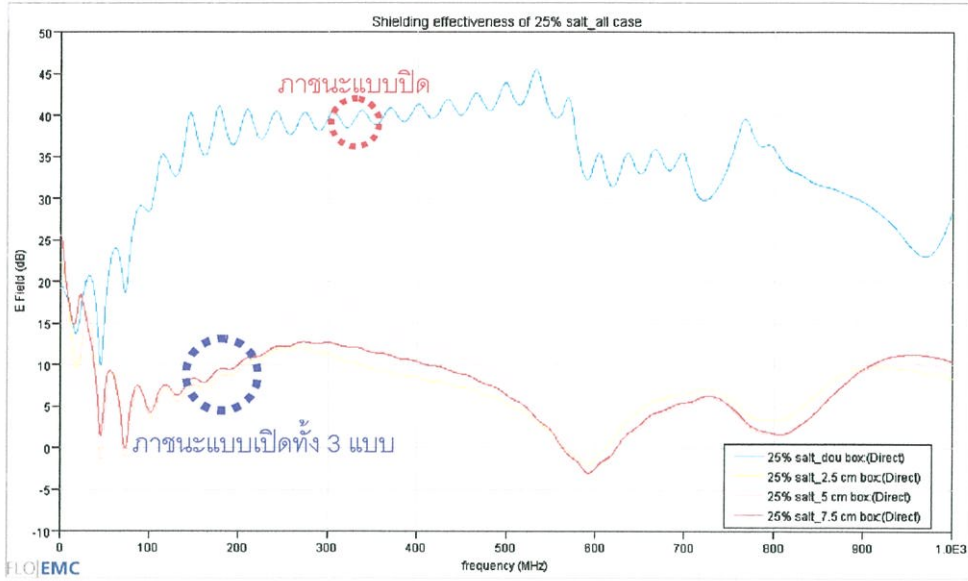
รูปที่ 5.91 คุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 20% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลอง

- สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 25%

จากผลของการทดลองและการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.92 และ รูปที่ 5.93 จากรูปทั้งสองสรุปได้ว่า ภาชนะที่ใช้บรรจุมีผลต่อการชิลด์ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะพบว่า ภาชนะปิดทุกด้านจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการชิลด์สัญญาณ ส่วนภาชนะเปิดด้านบนทั้งสามแบบมีประสิทธิภาพในการชิลด์ใกล้เคียงกัน



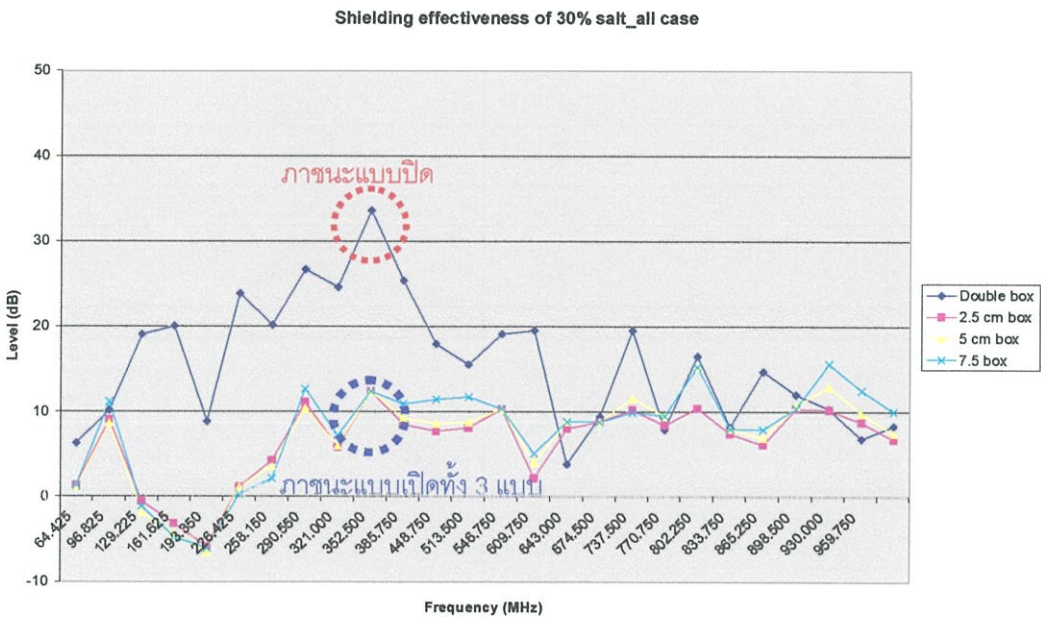
รูปที่ 5.92 คุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 25% ในภาชนะแบบต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบ



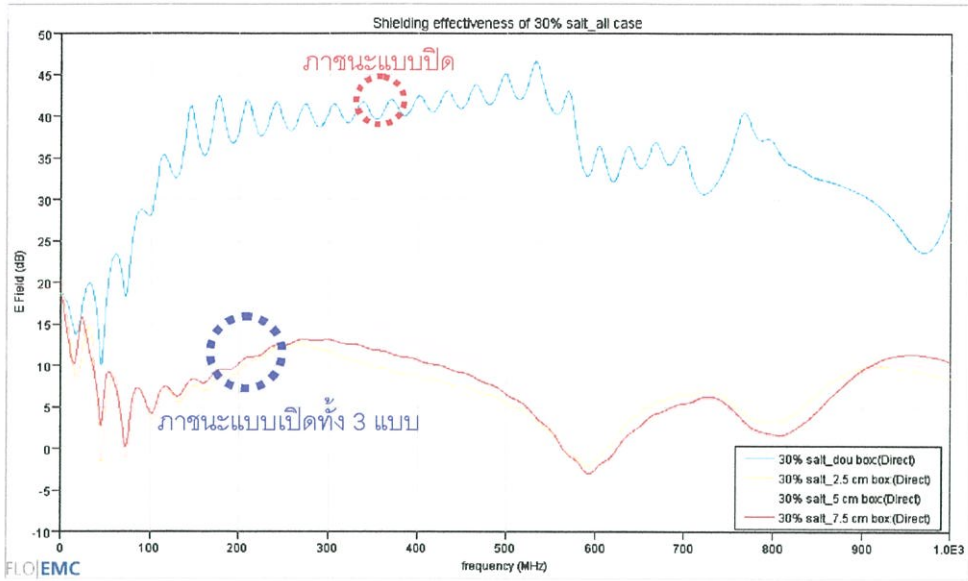
รูปที่ 5.93 คุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 25% ในภาชนะแบบต่างๆ ที่ได้จากการจำลอง

- สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 30%

จากผลของการทดลองและการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.94 และ รูปที่ 5.95 จากรูปทั้งสองสรุปได้ว่า ภาชนะที่ใช้บรรจุมีผลต่อการชิลด์ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะพบว่าภาชนะปิดทุกด้านจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการชิลด์สัญญาณ ส่วนภาชนะเปิดด้านบนทั้งสามแบบมีประสิทธิภาพการชิลด์ใกล้เคียงกัน



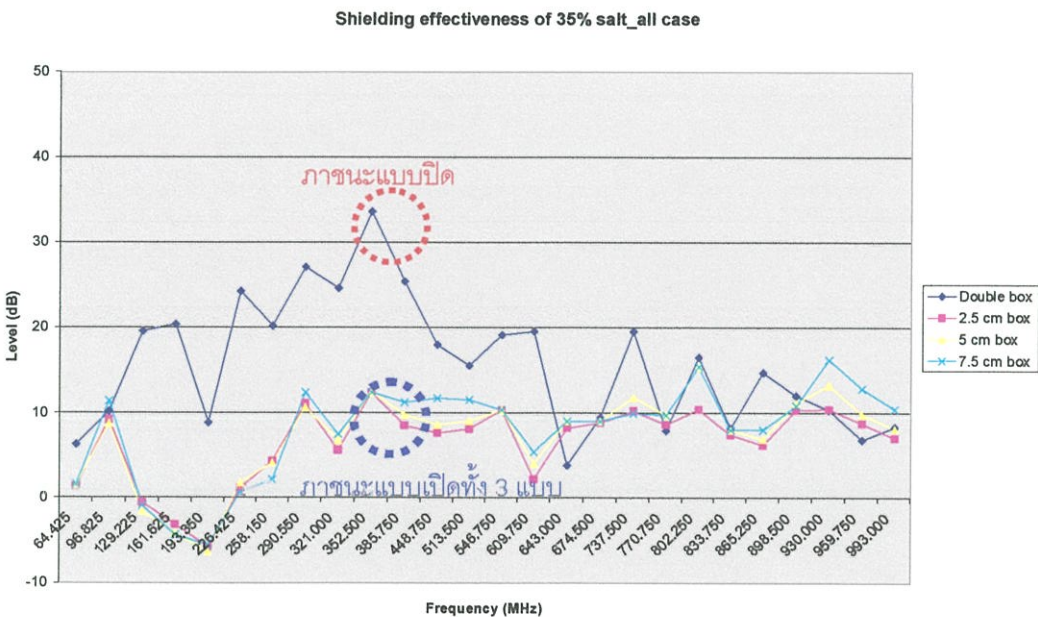
รูปที่ 5.94 คุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 30% ในภาชนะแบบต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบ



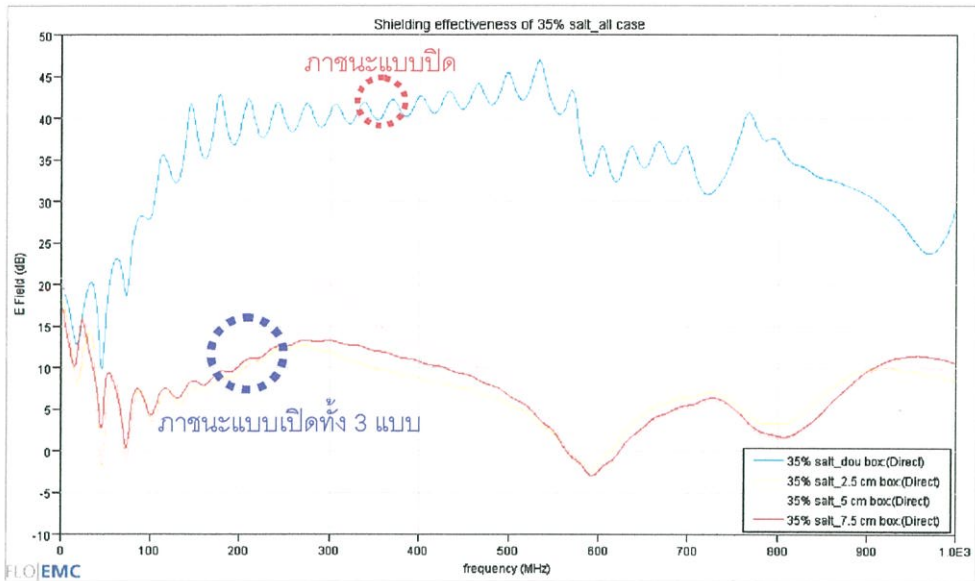
รูปที่ 5.95 คุณสมบัติการชดเชยของสารละลายเกลือ 30% ในภาชนะแบบต่างๆ ที่ได้จากการจำลอง

- สารละลายเกลือที่ระดับความเข้มข้น 35%

จากผลของการทดลองและการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.96 และ รูปที่ 5.97 จากรูปทั้งสองสรุปได้ว่า ภาชนะที่ใช้บรรจุจะมีผลต่อการชดเชยของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะพบว่าภาชนะปิดทุกด้านจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการชดเชยสัญญาณ ส่วนภาชนะเปิดด้านบนทั้งสามแบบมีประสิทธิผลในการชดเชยใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5.96 คุณสมบัติการชดเชยของสารละลายเกลือ 35% ในภาชนะแบบต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบ



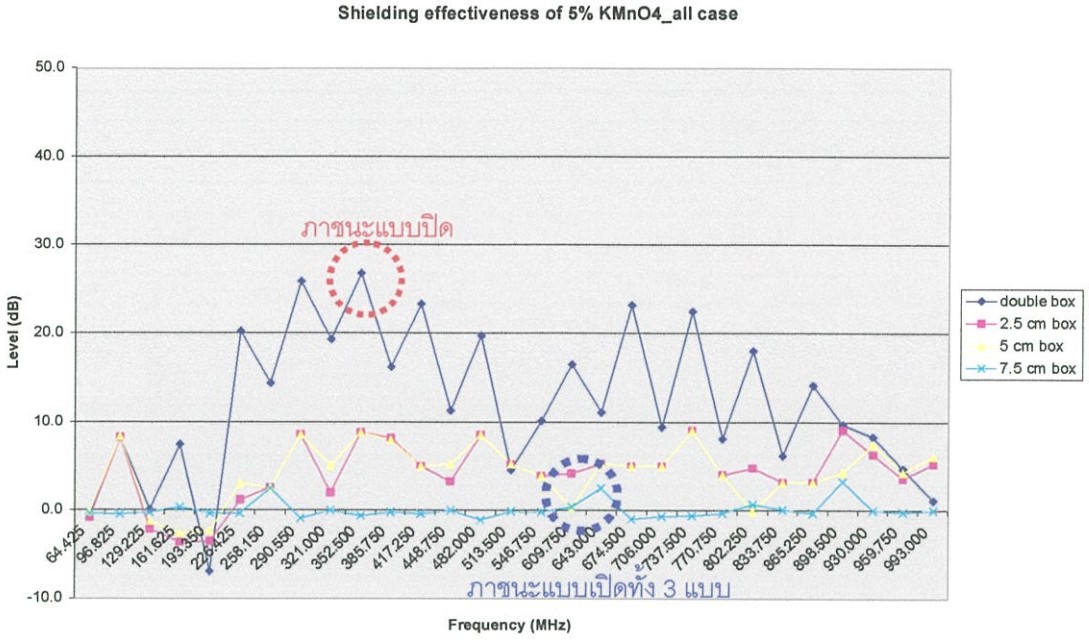
รูปที่ 5.97 คุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายเกลือ 35% ในภาชนะแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลอง

5.3.2.3 สารละลายต่างทึบทึม

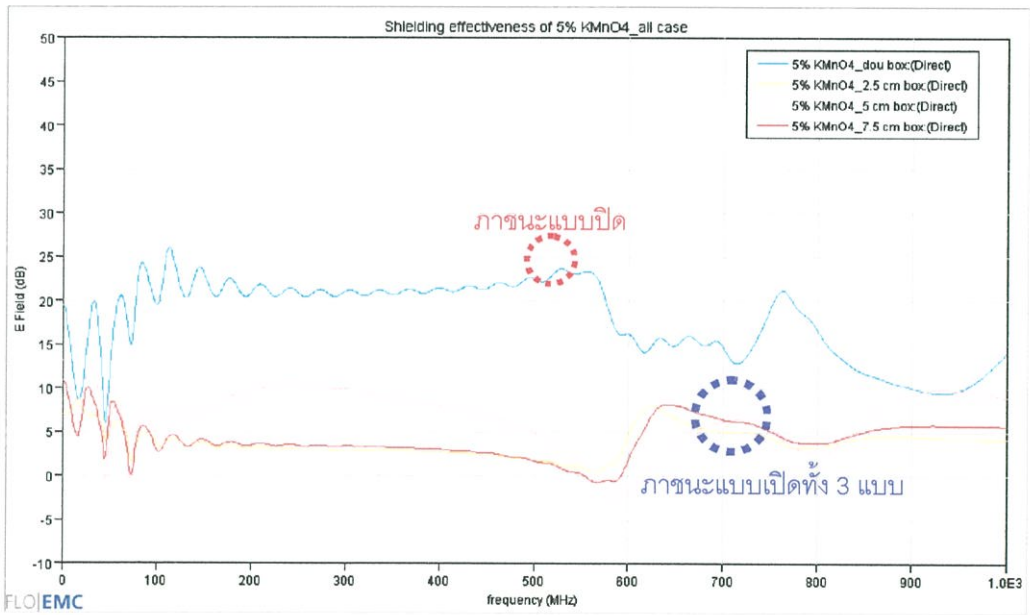
โดยในการสรุปผลการวิจัยนี้จะทำการสรุปแยกด้วยระดับความเข้มข้นที่บรรจุในภาชนะแตกต่างกัน ดังนี้

- สารละลายต่างทึบทึมที่ระดับความเข้มข้น 5%

จากผลของการทดลองและการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.98 และ รูปที่ 5.99 จากรูปทั้งสองสรุปได้ว่า ภาชนะที่ใช้บรรจุมีผลต่อการชิลด์ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะพบว่าภาชนะปิดทุกด้านจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการชิลด์สัญญาณ ในขณะที่ภาชนะแบบเปิดหนา 2.5 ซม. และ 5 ซม. จะมีประสิทธิภาพการชิลด์ใกล้เคียงกัน ส่วนภาชนะแบบเปิดหนา 7.5 ซม. จะมีประสิทธิภาพการชิลด์ต่ำสุด



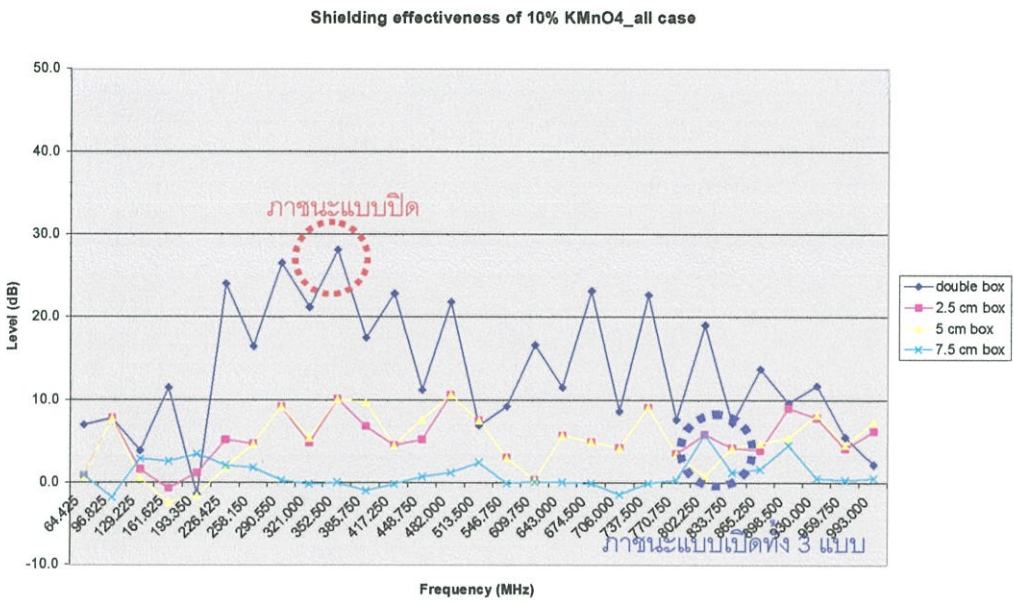
รูปที่ 5.98 คุณสมบัติการชดเชยของสารละลายต่างที่ 5% ในภาวะแบบต่าง ๆ จากการทดสอบ



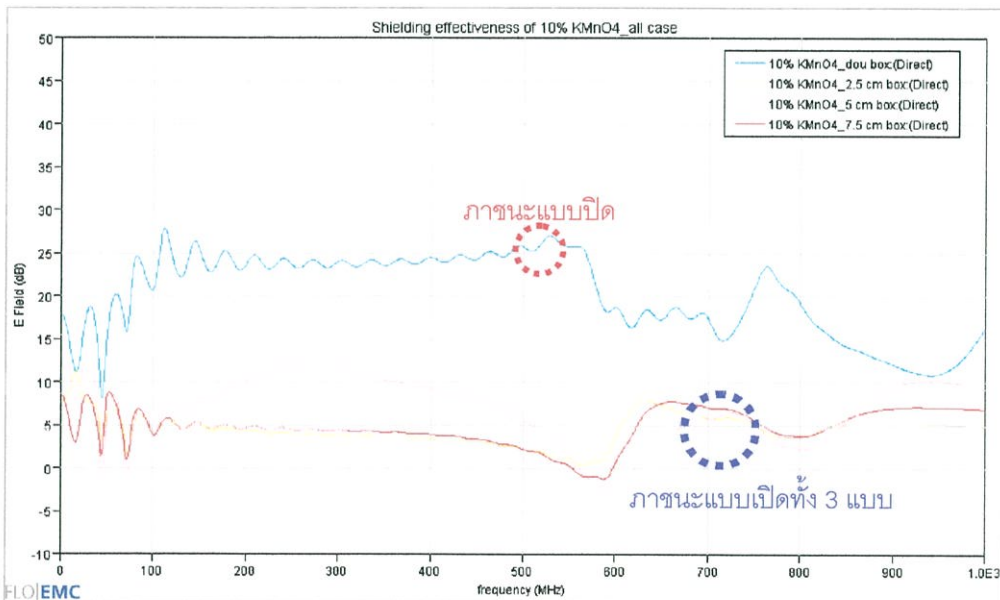
รูปที่ 5.99 คุณสมบัติการชดเชยของสารละลายต่างที่ 5% ในภาวะแบบต่าง ๆ จากการจำลอง

- สารละลายต่างทึบที่ระดับความเข้มข้น 10%

จากผลของการทดลองและการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.100 และ รูปที่ 5.101 จากรูปทั้งสองสรุปได้ว่า ภาชนะที่ใช้บรรจุมีผลต่อการชิลด์ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะพบว่าภาชนะปิดทุกด้านจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการชิลด์สัญญาณ ในขณะที่ภาชนะแบบเปิดหนา 2.5 ซม. และ 5 ซม. จะมีประสิทธิผลการชิลด์ใกล้เคียงกัน ส่วนภาชนะแบบเปิดหนา 7.5 ซม. จะมีประสิทธิผลการชิลด์ต่ำสุด



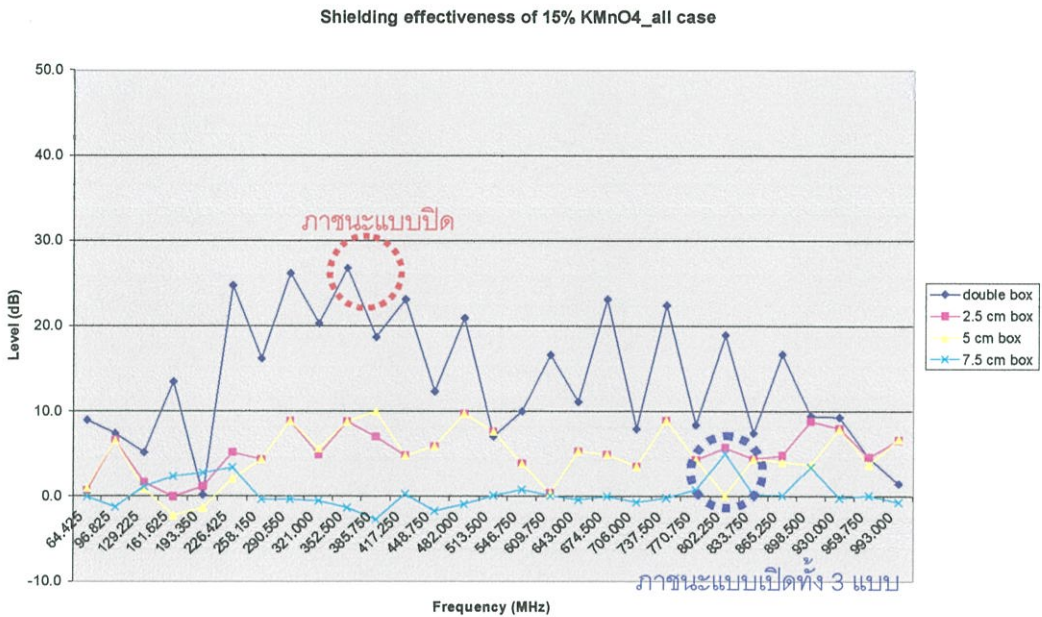
รูปที่ 5.100 คุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบ 10% ในภาชนะต่างๆ จากการทดสอบ



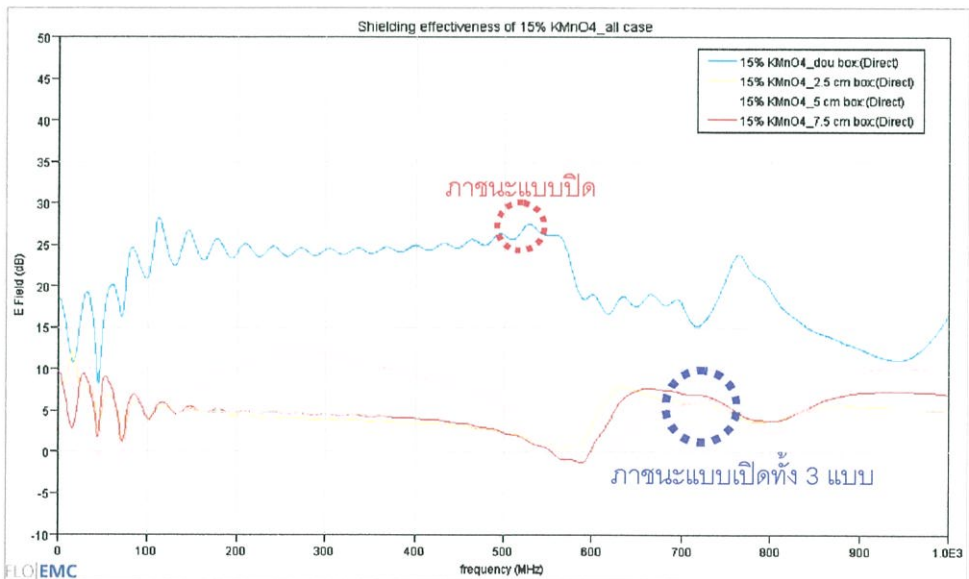
รูปที่ 5.101 คุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบ 10% ในภาชนะแบบต่าง ๆ จากการจำลอง

- สารละลายต่างทับทิมที่ระดับความเข้มข้น 15%

จากผลของการทดลองและการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.102 และ รูปที่ 5.103 จากรูปทั้งสองสรุปได้ว่า ภาชนะที่ใช้บรรจุจะมีผลต่อการชิลด์ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะพบว่าภาชนะปิดทุกด้านจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการชิลด์สัญญาณ ในขณะที่ภาชนะแบบเปิดหนา 2.5 ซม. และ 5 ซม. จะมีประสิทธิผลการชิลด์ใกล้เคียงกัน ส่วนภาชนะแบบเปิดหนา 7.5 ซม. จะมีประสิทธิผลการชิลด์ต่ำสุด



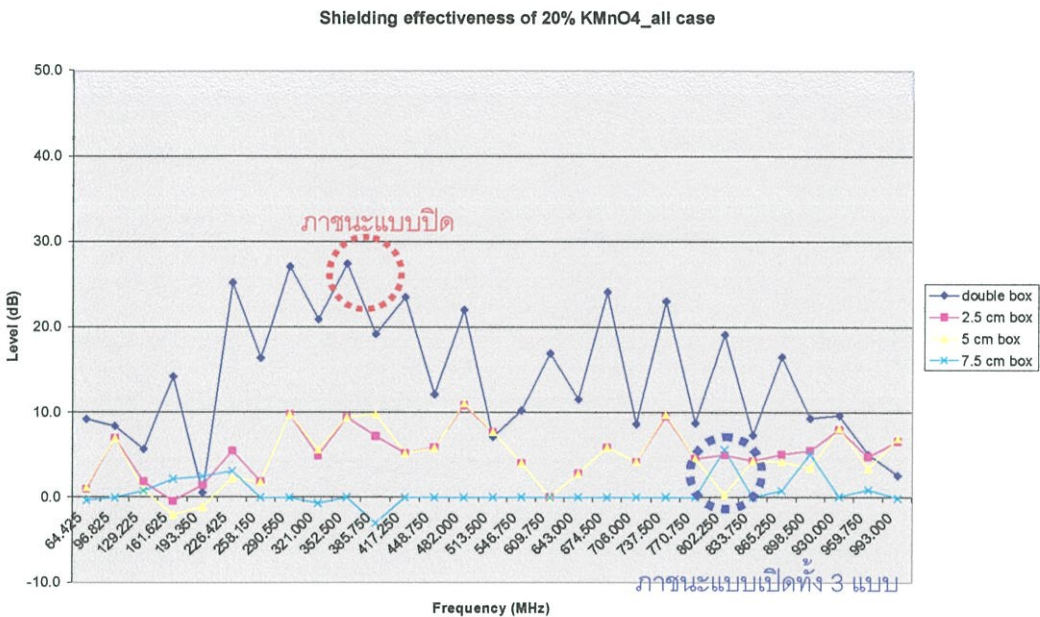
รูปที่ 5.102 คุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทับทิม 15% ในภาชนะต่าง ๆ จากการทดสอบ



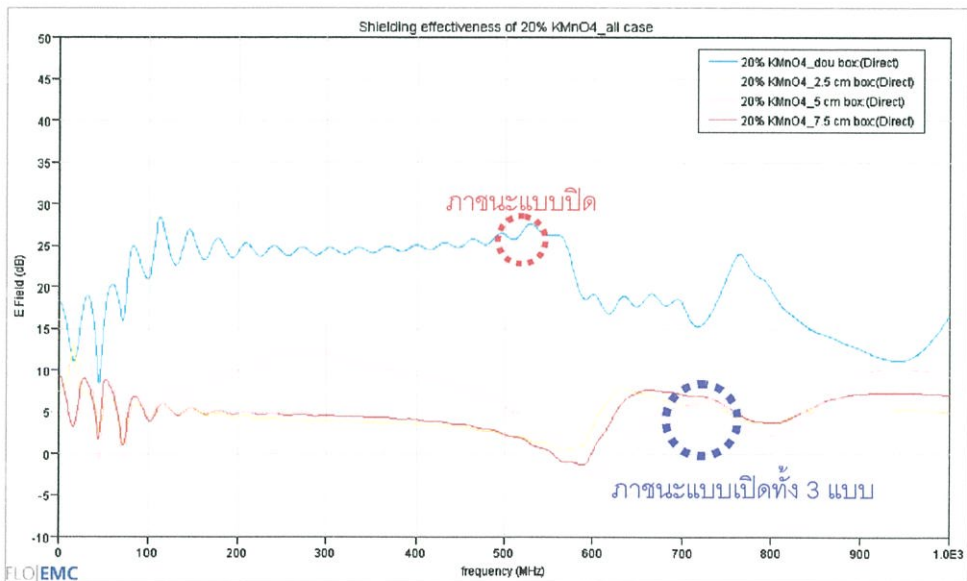
รูปที่ 5.103 คุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทับทิม 15% ในภาชนะแบบต่าง ๆ จากการจำลอง

- สารละลายต่างทึบที่ระดับความเข้มข้น 20%

จากผลของการทดลองและการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.104 และ รูปที่ 5.105 จากรูปทั้งสองสรุปได้ว่า ภาชนะที่ใช้บรรจุมีผลต่อการชิลด์ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะพบว่าภาชนะปิดทุกด้านจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการชิลด์สัญญาณ ในขณะที่ภาชนะแบบเปิดหนา 2.5 ซม. และ 5 ซม. จะมีประสิทธิผลการชิลด์ใกล้เคียงกัน ส่วนภาชนะแบบเปิดหนา 7.5 ซม. จะมีประสิทธิผลการชิลด์ต่ำสุด



รูปที่ 5.104 คุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบ 20% ในภาชนะต่าง ๆ จากการทดสอบ



รูปที่ 5.105 คุณสมบัติการชิลด์ของสารละลายต่างทึบ 20% ในภาชนะแบบต่าง ๆ จากการจำลอง

ซึ่งจากผลของการเปรียบเทียบในหัวข้อนี้ จะพบว่าภาชนะทั้ง 4 แบบมีประสิทธิภาพการซีลด์ เรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้.

1. กล่องพลาสติกแบบปิด
2. กล่องพลาสติกแบบเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 5 เซนติเมตร
3. กล่องพลาสติกแบบเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 7.5 เซนติเมตร
4. กล่องพลาสติกแบบเปิดด้านบนที่มีพื้นที่บรรจุสารละลายกว้างหนา 2.5 เซนติเมตร

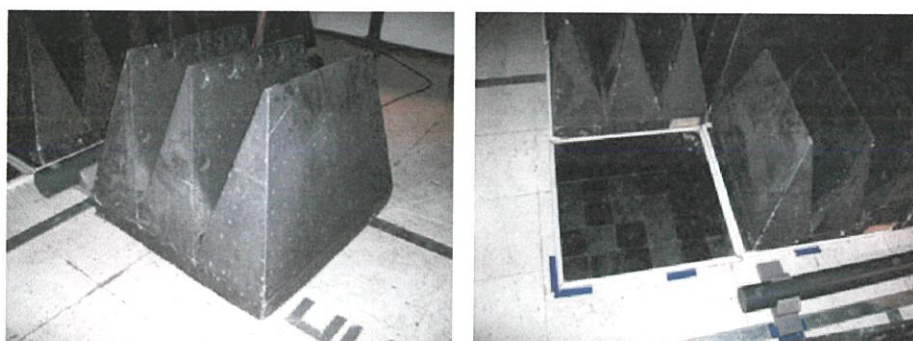
ซึ่งจะพบว่าในภาชนะแบบเปิดเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ปรากฏว่าเมื่อเพิ่มถึงจุดหนึ่ง การซีลด์ จะไม่เพิ่มตามความหนาที่เพิ่มขึ้น สาเหตุหนึ่งมาจากการเกิดเรโซแนนซ์ของสารละลายและภาชนะ ที่บรรจุ ซึ่งหากนำการใช้งานดังกล่าวไปใช้งานควรคำนึงถึงคุณสมบัติของสารละลายในการเกิดเรโซแนนซ์ และย่านความถี่ที่ใช้งานที่เหมาะสมด้วย

5.3.3 ความแตกต่างระหว่างผลการทดลองและการจำลองแบบ

ความแตกต่างระหว่างผลการทดลองและการจำลองแบบในวิจัยฉบับนี้ มีสาเหตุ ดังต่อไปนี้

ก) สถานที่ในการทดลอง

ในการทดลองจริงได้ทำการทดลองภายในห้อง Semi-anechoic chamber โดยในห้อง ดังกล่าวจะมีการติดตั้งวัสดุดูดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 5 ด้าน ยกเว้นพื้น ซึ่งวัสดุ ดูดคลื่นดังกล่าวทำหน้าที่ในการดูดซับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบ ซึ่งในความเป็นจริงวัสดุดังกล่าวยังมีบางส่วนที่มีการสะท้อนออกมา ในขณะที่ในการจำลองแบบจะไม่มี การจำลองรูปแบบการสะท้อนจากวัสดุดูดคลื่นนี้



รูปที่ 5.106 วัสดุดูดคลื่นที่ใช้ภายในห้อง Semi-anechoic chamber

ข) การป้อนค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองแบบ

ในการจำลองแบบด้วยโปรแกรม FLO/EMC ของงานวิจัยฉบับนี้ ต้องทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ให้กับโปรแกรม ซึ่งค่าพารามิเตอร์นี้ได้แก่ ค่าความเป็นตัวนำ (Conductivity) และค่าความซึมซาบ (Permeability) โดยโปรแกรมจะนำค่าดังกล่าวไปทำการคำนวณเพื่อแสดงผลออกมา แต่เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าพารามิเตอร์ค่าความซึมซาบของสารละลายที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่สามารถหาได้ในประเทศ ดังนั้นการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการจำลองโดยอาศัยค่าความเป็นตัวนำของสารที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือ PH/Conductivity measurement และนำมาทำการจำลองด้วยโปรแกรม FLO/EMC เพียงค่าเดียวเท่านั้น ส่วนค่าความซึมซาบของสารละลายที่ต้องใช้ในการป้อนค่าพารามิเตอร์ให้กับโปรแกรมกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าความซึมซาบของน้ำ จึงทำให้ผลการทดลองและผลของการจำลองที่ออกมามีค่าแตกต่างกัน

ค) ค่าความไม่แน่นอนในการวัด (Uncertainty of measurement)

ในการทดลองภายในห้อง Semi-anechoic chamber มีหลายองค์ประกอบซึ่งเกี่ยวข้องกับ การทดสอบได้แก่

- อุณหภูมิ
- ความชื้น
- ค่าความผิดพลาดในการอ่านของเครื่องมือ
- Mismatch ของสัญญาณระหว่างข้อต่อของสายสัญญาณ
- โต๊ะไม้ เนื่องจากไม้เป็นวัสดุ Organic ซึ่งทำให้มีผลกระทบในการวัดสัญญาณ

โดยค่าดังกล่าวมีผลกระทบในการวัดสัญญาณ ในขณะที่ผลจากการจำลองจะไม่นำค่าดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณ

5.4 บทสรุป

บทนี้เป็นการนำเสนอคุณสมบัติการชิลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากการการทดสอบจริง และจากการจำลองด้วยโปรแกรม FLO/EMC โดยได้มีการสรุปไว้แล้วในแต่ละหัวข้อ และสุดท้ายเป็นสรุปและการวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติการชิลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละประเด็นทั้ง 4 กรณีดังรูปที่ 5.56 ซึ่งพบว่าเมื่อระดับความเข้มข้นของทั้งเกลือ

และค่าสัมประสิทธิ์เพิ่มขึ้น คุณสมบัติในการชี้วัดก็มีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับของความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีการสรุปไว้ในแต่ละกรณีแล้วเช่นกัน โดยจากผลการทดสอบที่ได้จะนำมาซึ่งแนวทางในการเลือกระดับของความเข้มข้นของสารที่ใช้ในการทำวิจัยให้เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอถึงคุณสมบัติการซึ่ดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของสารละลายเกลือและค่าสัมประสิทธิ์ที่ระดับต่าง ๆ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากภาชนะที่บรรจุต่าง ๆ กัน ซึ่งมีทั้งการทดสอบและการจำลองด้วยโปรแกรม FLO/EMC ทุกกรณีศึกษา ซึ่งได้แสดงผลการวิจัยทั้งหมดในบทที่ 5 แล้ว

อนึ่ง ในการจำลองค่าคุณสมบัติการซึ่ดด้วยโปรแกรมนั้นจะแตกต่างจากผลการทดลองจริงเนื่องจากข้อจำกัดในการป้อนค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณให้กับโปรแกรม โดยโปรแกรมต้องมีการป้อนค่าพารามิเตอร์ค่าความซึมทราน (Permeability- μ) และค่าความเป็นตัวนำ (Conductivity- σ) เพื่อใช้ในการคำนวณของโปรแกรมเอง แต่เนื่องจากติดขัดด้วยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความซึมทรานซึ่งไม่สามารถหาได้ในประเทศ ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงใช้ค่าความเป็นตัวนำเพียงค่าเดียวเท่านั้น ส่วนค่าความซึมซาบของสารละลายที่ต้องใช้ในการป้อนค่าพารามิเตอร์ให้กับโปรแกรมกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าความซึมซาบของน้ำ อีกทั้งในการทดลองจริงจะมีผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม อาทิ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการละลายของสาร การติดตั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณบนโต๊ะไม้ ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการดูดซับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า อีกทั้งค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด จึงทำให้ผลการทดลองที่ได้มีค่าต่างจากค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมระดับหนึ่ง แต่โดยในภาพรวมแล้วค่าประสิทธิภาพการซึ่ดทั้งสองค่าที่ได้จากการทดสอบและการจำลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยในบทนี้จะกล่าวถึงสรุปผลการวิจัยในหัวข้อที่ 6.1 และข้อเสนอแนะในหัวข้อที่ 6.2 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

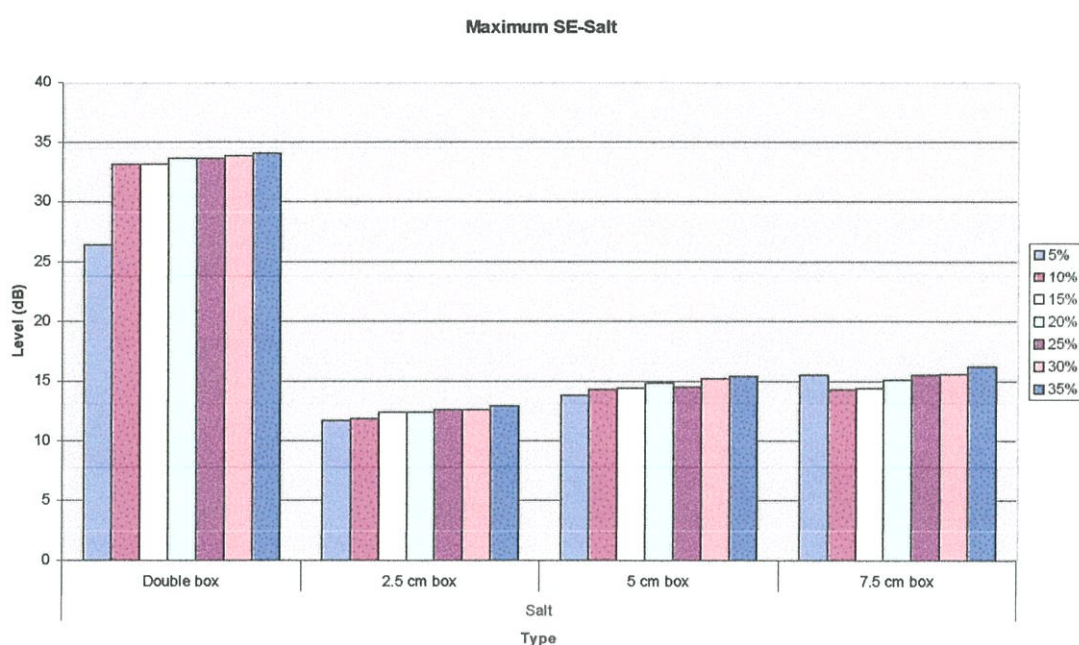
6.1 สรุปผลการวิจัย

ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการซึ่ดในงานวิจัยนี้ สืบเนื่องจากวงจรแหล่งกำเนิดสัญญาณทำงานด้วยสัญญาณนาฬิกา (Clock) ที่ความถี่ 16 MHz ดังนั้นจะทำการศึกษาสัญญาณที่ได้จากความถี่พื้นฐานจากวงจรคือ 16 MHz และจุดความถี่ที่เป็นฮาร์โมนิกจากความถี่พื้นฐานเพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบ

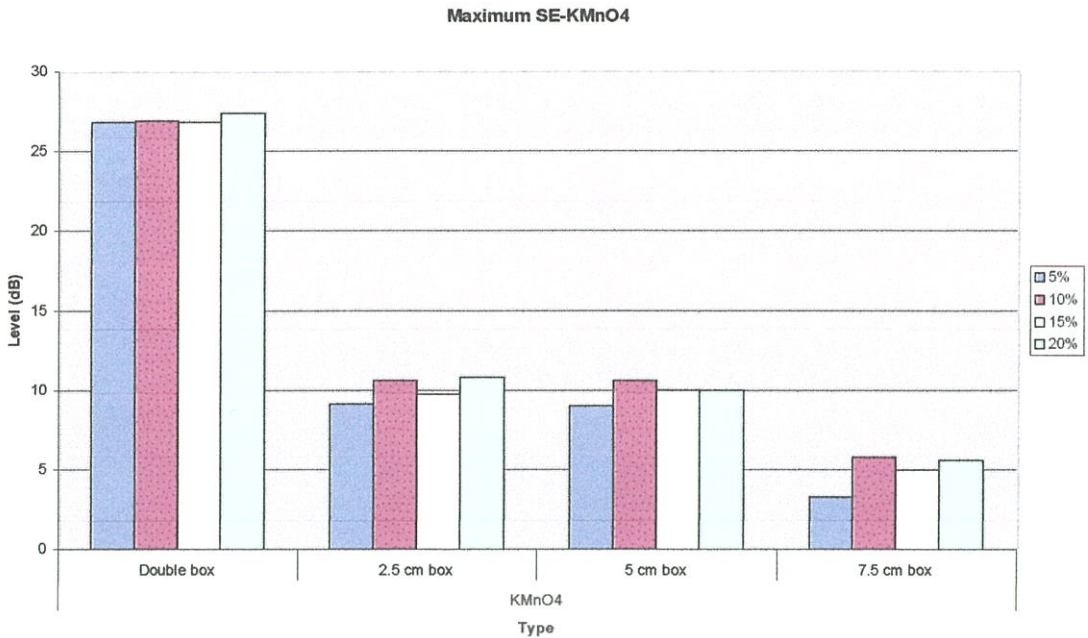
ผลจากการทดลองที่ได้มาทั้งหมดสามารถนำมาเปรียบเทียบสสารทั้งสองชนิดที่บรรจุในภาชนะต่าง ๆ กัน สามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังนี้

6.1.1 ประสิทธิภาพการซึบซับตามระดับความเข้มข้น

จากผลที่ได้จากการวัดพบว่าที่ความถี่ 352 MHz ซึ่งเป็นฮาร์โมนิกของความถี่พื้นฐาน สารละลายมีประสิทธิภาพการซึบซับสูงสุดในทุก ๆ ประเภทของสารละลาย ดังนั้นจึงนำค่าดังกล่าว มาทำการเปรียบเทียบเพื่อดูประสิทธิภาพของแต่ละระดับความเข้มข้นของสารละลายโดยแยกตาม ประเภทของภาชนะที่บรรจุ ซึ่งสามารถสรุปแยกประเภทของสสารได้ดังรูปที่ 6.1 สำหรับ สารละลายเกลือ และรูปที่ 6.2 สำหรับสารละลายต่างทึบทิมดังนี้



รูปที่ 6.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการซึบซับของเกลือที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน

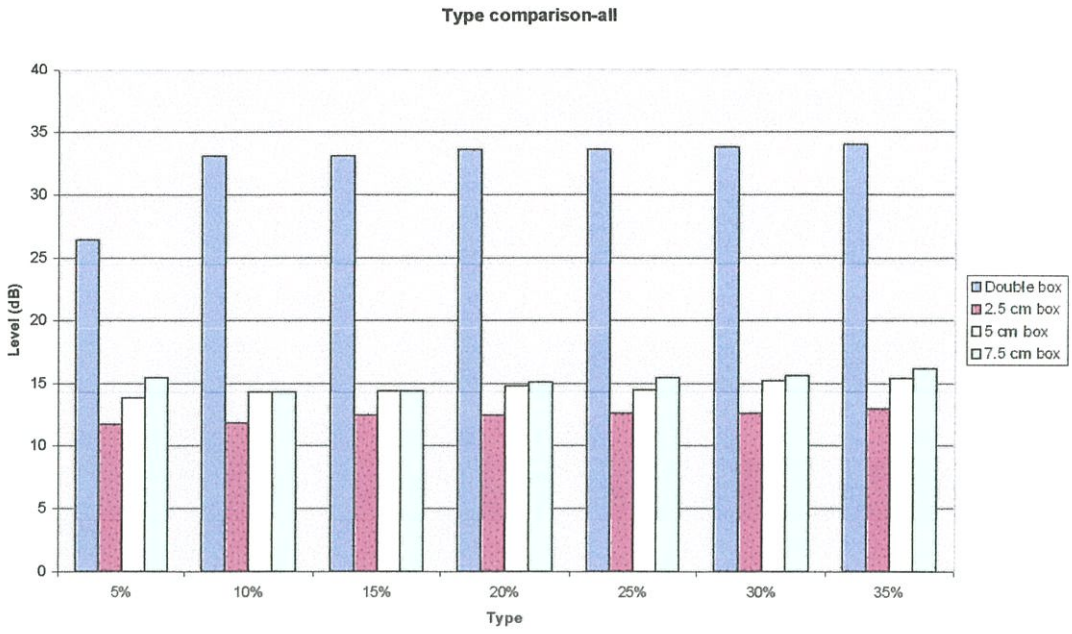


รูปที่ 6.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการซึบดักของต่างทับทิมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน

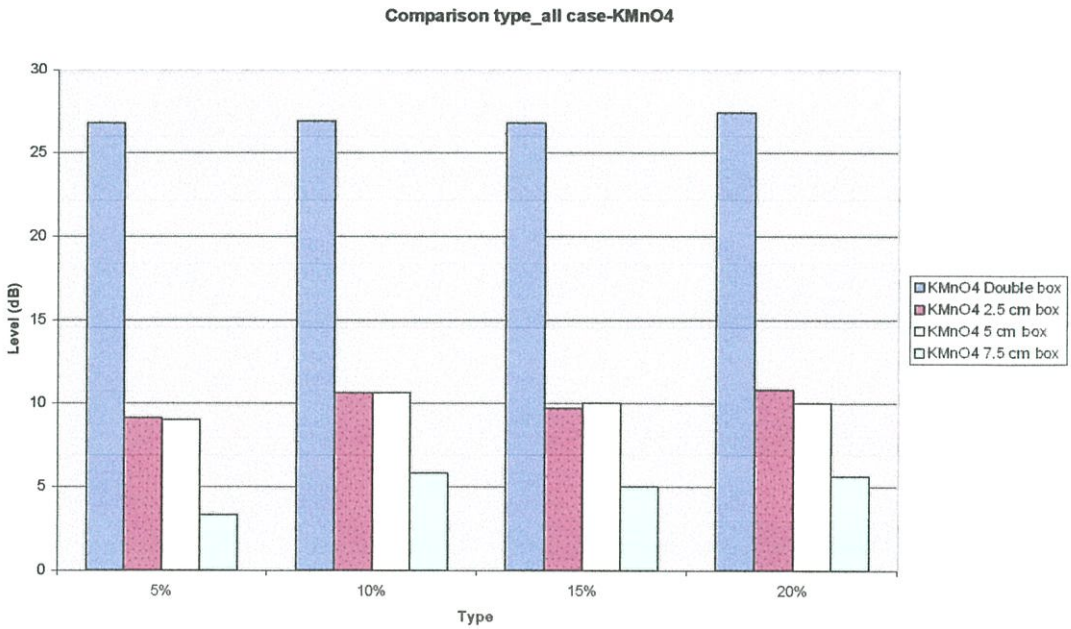
จากผลการเปรียบเทียบทั้งหมด พบว่าทั้งเกลือและต่างทับทิมเมื่ออยู่ในรูปของสารละลาย เมื่อมีระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น คุณสมบัติการซึบดักก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ไม่ว่าจะบรรจุอยู่ในภาชนะรูปแบบใด ๆ แต่ทั้งนี้ควรพิจารณาระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมในการใช้งานจริงและอุณหภูมิ เนื่องจากสารเมื่อนำมาละลายในน้ำ เมื่อผสมไปจนถึงระดับหนึ่ง สารละลายดังกล่าวจะมีการอึดตัวทำให้ไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้และตกตะกอนในที่สุด ซึ่งหากผสมเพิ่มเข้าไปนอกจากประสิทธิภาพการซึบดักจะไม่เพิ่มขึ้นแล้ว ยังสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสำหรับสารนั้น ๆ อีก จากผลการวิจัยที่ได้ทั้งหมดระดับความเข้มข้นของสารละลายเกลือที่เหมาะสมคือที่ระดับ 20%-25% และสำหรับสารละลายต่างทับทิมที่ระดับ 10%-15%

6.1.2 ประสิทธิภาพการซึบดักตามลักษณะภาชนะที่บรรจุ

เมื่อนำผลจากการทดลองที่ได้ที่ความถี่ 352 MHz ซึ่งเป็นฮาร์โมนิคของความถี่พื้นฐานมาทำการเปรียบเทียบด้วยกราฟแท่งในแต่ละระดับความเข้มข้นที่บรรจุในภาชนะต่าง ๆ กันสามารถเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 6.3 สำหรับสารละลายเกลือและ รูปที่ 6.4 สำหรับสารละลายต่างทับทิม



รูปที่ 6.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติการซึ่ดของเกลือในภาชนะต่าง ๆ



รูปที่ 6.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติการซึ่ดของด่างทับทิมในภาชนะต่าง ๆ

จากรูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.4 พบว่าภาษาณะแบบปิดมีคุณสมบัติการซึดค้ดีที่สุดเนื่องจากภาษาณะดังกล่าวปิดกั้นสัญญาณทุกด้านที่ออกจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ ในขณะที่ภาษาณะแบบเปิดทั้งสามแบบปิดกั้นเฉพาะด้านหน้าของแหล่งกำเนิดสัญญาณ จึงทำให้สัญญาณแพร่กระจายออกทางด้านข้างได้ จากภาษาณะแบบเปิดดังกล่าวทั้งหมดสามารถสรุปประสิทธิผลการซึดค้เฉพาะภาษาณะแบบเปิดได้ดังนี้

❖ เกลือ

- เมื่อความหนาของภาษาณะเพิ่มขึ้น ประสิทธิผลการซึดค้ของสารละลายเกลือที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีค่าใกล้เคียงกัน จะมีค่าที่ต่างกันบ้างเพียงเล็กน้อยที่ย่านความถี่สูง ๆ แต่ไม่มากนัก ดังผลการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.78, 5.80, 5.82, 5.84, 5.86, 5.88 และ 5.90 ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าความหนาของภาษาณะที่ใช้ในการบรรจุสารละลายที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่อประสิทธิผลการซึดค้
- เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเกลือเพิ่มขึ้น ประสิทธิผลการซึดค้ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งกล่าวได้ว่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากเช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนภาษาณะให้มีความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้จากรูปที่ 5.78, 5.80, 5.82, 5.84, 5.86, 5.88 และ 5.90

ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าในการวัดประสิทธิผลการซึดค้ภาษาณะแบบเปิดทั้งสามแบบด้วยสารละลายเกลือ ความหนาของภาษาณะ และความเข้มข้นของสารละลายที่เพิ่มขึ้นไม่สามารถทำให้ประสิทธิผลการซึดค้เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น จึงสามารถใช้ภาษาณะแบบเปิดหนา 2.5 เซนติเมตร และที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายเกลือ 5 % ซึ่งจะทำให้ได้ประสิทธิผลการซึดค้ที่เหมาะสมและประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุด

❖ ค่างทับทิม

- เมื่อความหนาของภาษาณะเพิ่มขึ้น ประสิทธิผลการซึดค้ของสารละลายค่างทับทิมจะเพิ่มขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้นตาม แต่เมื่อเพิ่มความหนาถึงจุดหนึ่งประสิทธิผลการซึดค้จะไม่เพิ่มตาม ดังผลการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.92, 5.94, 5.96 และ 5.98 ซึ่งจะพบว่าที่ภาษาณะหนา 5 ซม. ค่าประสิทธิผลการซึดค้จะเพิ่มขึ้นมากกว่าที่ภาษาณะหนา 2.5 ซม. แต่เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นเป็น 7.5 ซม. ประสิทธิผลการซึดค้จะไม่เพิ่มตาม จะมีค่าใกล้เคียงเมื่อทำการซึดค้ด้วยภาษาณะหนา 5 ซม.

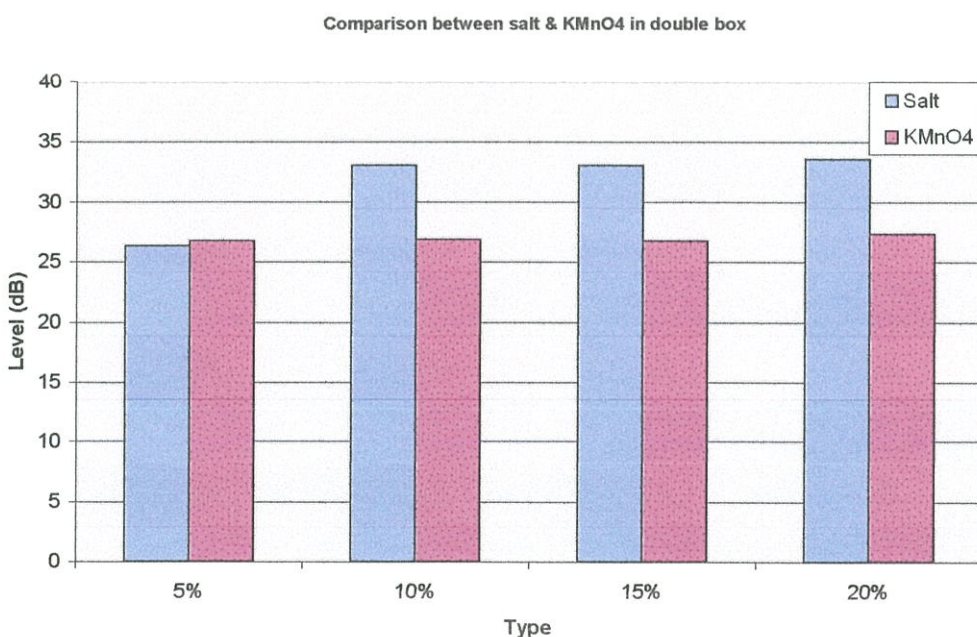
- เมื่อความเข้มข้นของสารละลายต่างทับทิมเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการซึดที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยรวมมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งกล่าวได้ว่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากเช่นเดียวกันกับการวัดการซึดด้วยสารละลายเกลือ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้จากรูปที่ 5.92, 5.94, 5.96 และ 5.98

ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าในการวัดประสิทธิภาพการซึดภาชนะแบบเปิดทั้งสามแบบด้วยสารละลายต่างทับทิม ความหนาที่เพิ่มขึ้นมีส่วนในการทำให้ประสิทธิภาพการซึดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่งประสิทธิภาพจะคงที่ไม่มีการเพิ่มตามความหนาที่เพิ่มขึ้นอีก ส่วนระดับความเข้มข้นของสารละลายที่เพิ่มขึ้นไม่สามารถทำให้ประสิทธิภาพการซึดเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นเดียวกับการวัดด้วยสารละลายเกลือ ดังนั้น จากผลการทดลองดังกล่าว จึงพบว่าภาชนะแบบเปิดหนา 2.5 เซนติเมตร และที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายต่างทับทิม 5 % จะมีประสิทธิภาพการซึดที่เหมาะสมและประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุด

6.1.3 ประสิทธิภาพการซึดตามประเภทของสาร

จากผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาแยกพิจารณาประสิทธิภาพการซึดตามประเภทของสารตามภาชนะที่บรรจุได้ดังนี้

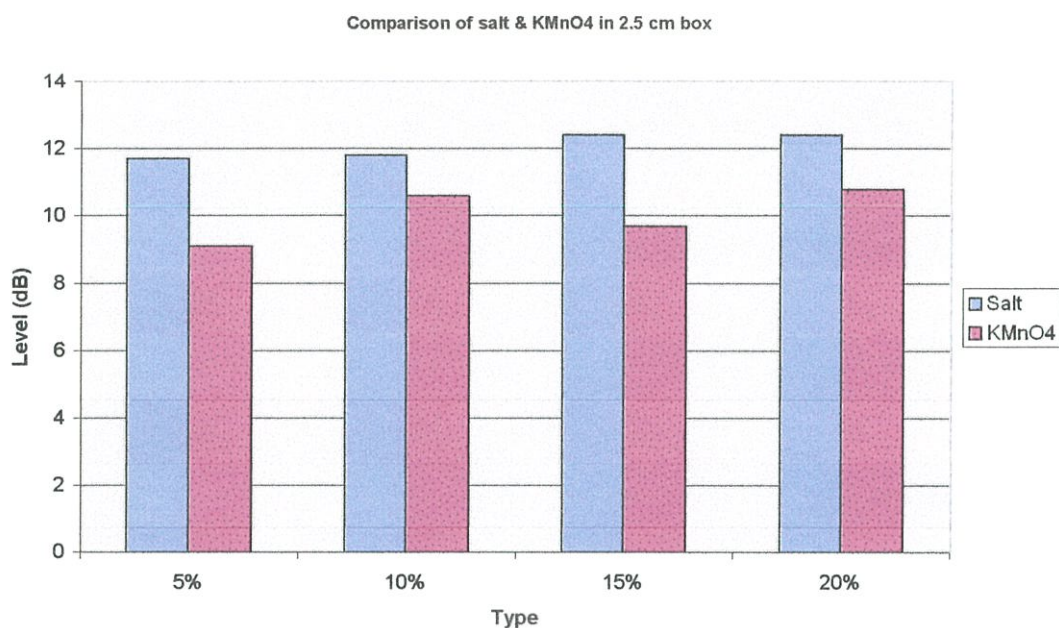
- ภาชนะปิดทุกด้าน



รูปที่ 6.5 ประสิทธิภาพการซึดระหว่างเกลือและต่างทับทิมในภาชนะปิด

จากผลที่ได้จากการทดลองที่บรรจุสารละลายในภาชนะปิดทุกด้าน เมื่อนำมาเปรียบเทียบในรูปที่ 6.5 พบว่าที่ระดับความเข้มข้น 5 % ของสารทั้งสองชนิดประสิทธิภาพการซึดค์จะมีค่าสูงสุดเท่ากัน แต่เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นเข้าไป ประสิทธิภาพการซึดค์ที่ได้จะมีค่าต่างกัน 10 เดซิเบล โดยประมาณ ซึ่งสามารถคำนวณได้ว่าเกลือมีคุณสมบัติดีกว่าค่าซึดค์ถึง 10 เท่า โดยประมาณ

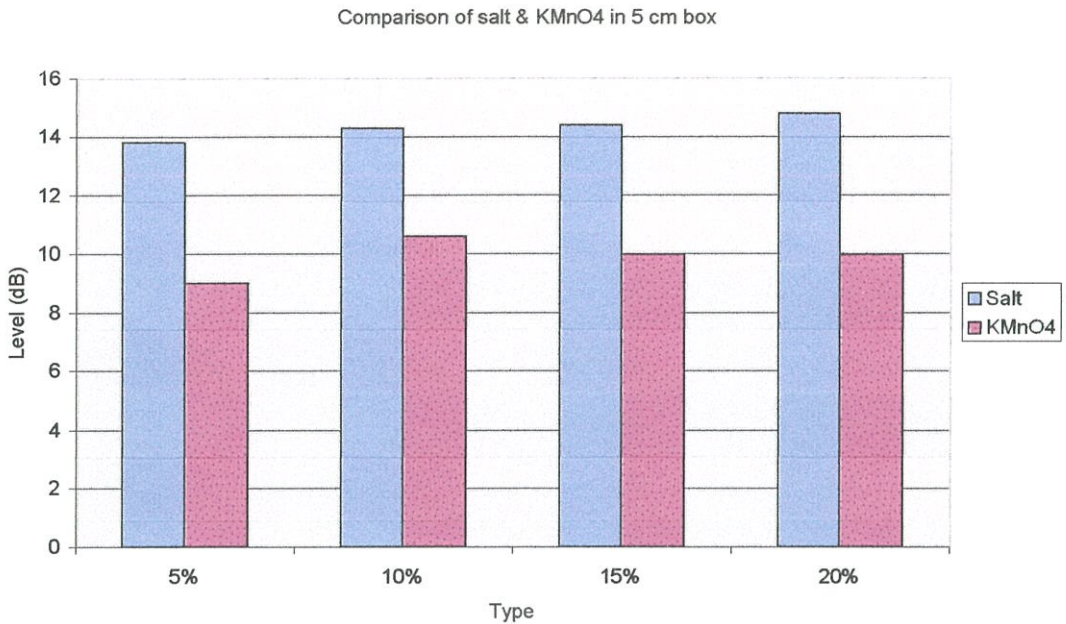
- ภาชนะเปิดด้านบนหนา 2.5 เซนติเมตร



รูปที่ 6.6 ประสิทธิภาพการซึดค์ระหว่างเกลือและค่าซึดค์ในภาชนะเปิดด้านบนหนา 2.5 ซม.

จากผลที่ได้จากการทดลองที่บรรจุสารละลายในภาชนะเปิดด้านบนหนา 2.5 ซม. เมื่อนำมาเปรียบเทียบในรูปที่ 6.6 พบว่าที่ทุกระดับความเข้มข้นของสารทั้งสองชนิดประสิทธิภาพการซึดค์จะมีต่างกัน 1-4 เดซิเบล ซึ่งสามารถคำนวณได้ว่าเกลือมีคุณสมบัติดีกว่าค่าซึดค์ 0.5-2 เท่า โดยประมาณ

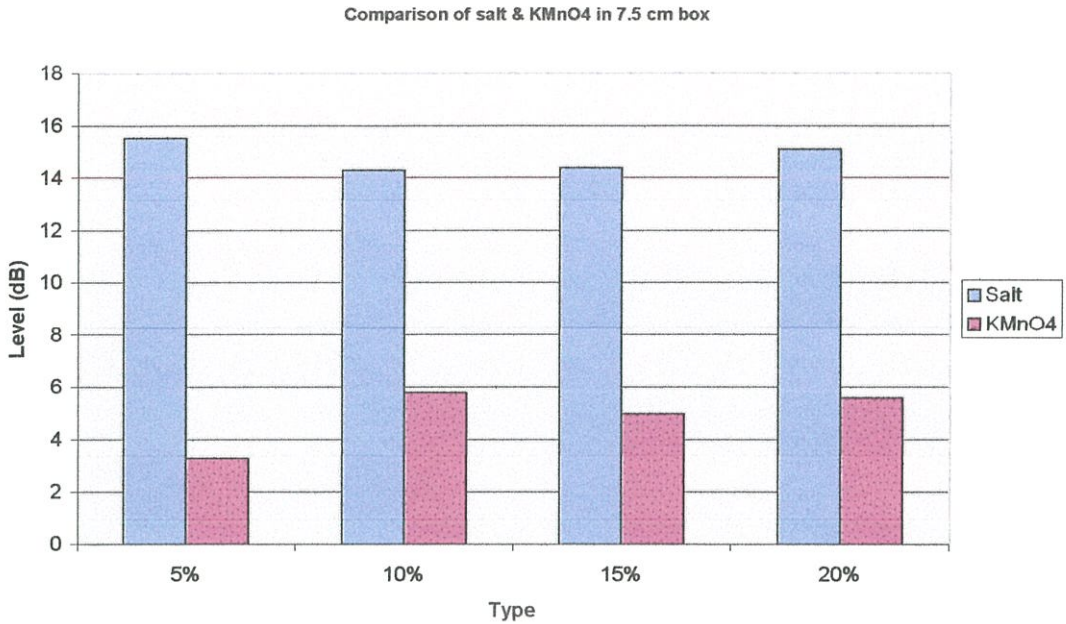
- ภาพขณะเปิดด้านบนหนา 5 เซนติเมตร



รูปที่ 6.7 ประสิทธิภาพการซึบซึมระหว่างเกลือและค่างทับทิมในภาชนะเปิดด้านบนหนา 5 ซม.

จากผลที่ได้จากการทดลองที่บรรจุสารละลายในภาชนะเปิดด้านบนหนา 5 ซม. เมื่อนำมาเปรียบเทียบในรูปที่ 6.7 พบว่าที่ทุกระดับความเข้มข้นของสารทั้งสองชนิดประสิทธิภาพการซึบซึมจะมีต่างกัน 4-6 เดซิเบล ซึ่งสามารถคำนวณได้ว่าเกลือมีคุณสมบัติดีกว่าค่างทับทิม 2-4 เท่าโดยประมาณ

- ภาพขณะเปิดด้านบนหนา 7.5 เซนติเมตร



รูปที่ 6.8 ประสิทธิภาพการซึบซึมระหว่างเกลือและค้างทับทิมในภาชนะเปิดด้านบนหนา 7.5 ซม.

จากผลที่ได้จากการทดลองที่บรรจุสารละลายในภาชนะเปิดด้านบนหนา 7.5 ซม. เมื่อนำมาเปรียบเทียบในรูปที่ 6.8 พบว่าที่ทุกระดับความเข้มข้นของสารทั้งสองชนิดประสิทธิภาพการซึบซึมจะมีต่างกัน 8-12 เดซิเบล ซึ่งสามารถคำนวณได้ว่าเกลือมีคุณสมบัติดีกว่าค้างทับทิม 6-15 เท่าโดยประมาณ

6.2 ข้อเสนอแนะ

ประเด็นต่างๆ ที่จะเป็นแนวทางในการวิจัยและข้อเสนอแนะต่างๆ มีดังต่อไปนี้

6.2.1 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

- เนื่องจากการซึบซึมส่วนใหญ่เป็นโลหะ เช่น ทองแดง ซึ่งมีราคาแพง หากในการใช้งานที่ก้างไม่มากนัก สามารถใช้สารที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นสารในการซึบซึมได้ เนื่องจากสามารถหาได้ง่าย ราคาไม่แพงนัก

- การซึบซึมด้วยวัสดุปัจจุบันยังมีความสามารถในการระบายความร้อนไม่มากนัก หากนำงานวิจัยนี้ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายไปช่วยในการระบายอากาศจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานดีขึ้น เช่น การซึบซึมมอเตอร์ไฟฟ้า สามารถช่วยในการซึบซึมและระบายความร้อนไปในตัว แต่ควรระวังเรื่องการเกิดสนิม หากภาชนะในการบรรจุสารละลายไม่แข็งแรงพอ

- เนื่องด้วยห้องซีลด์สัญญาณในปัจจุบันทำจากวัสดุที่เป็นโลหะ เช่น ห้องควบคุม คอมพิวเตอร์ ศูนย์พยากรณ์อากาศ เป็นต้น ห้องเหล่านี้จะมีลักษณะทึบ เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการ สร้างนั่นเอง หากทำการพัฒนาห้องให้ทำการซีลด์ด้วยสารละลาย จะทำให้ห้องดังกล่าวมีความรู้สึกล่อง โปร่ง และสามารถมองเห็นสภาพภายนอกผ่านจากภายในห้องได้โดยไม่ต้องออก ข้างนอก
- เนื่องจากสารละลายเป็นสารที่สามารถเปลี่ยนรูปได้ตามภาชนะที่บรรจุ จึงทำให้สะดวก ในการออกแบบชิ้นส่วนที่จะนำไปใช้ในงานซีลด์สัญญาณ

6.2.2 แนวทางการวิจัยต่อไป

- เปลี่ยนสสารที่ใช้ในการทำสารละลายเป็นชนิดอื่น อาทิเช่น น้ำตาล เพื่อวิจัยคุณสมบัติ การซีลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าของสสารอื่น
- เปลี่ยนภาชนะที่ใช้ในการบรรจุสำหรับทำการวิจัยคุณสมบัติการซีลด์สัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อหารูปแบบภาชนะต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ออกไป
- ศึกษารูปแบบการใช้งานด้านการลดความร้อนที่ได้จากการซีลด์ด้วยสารละลาย
- ศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลของโปรแกรม FLO/EMC ซึ่งจะทำให้ผล การจำลองที่ได้ใกล้เคียงและสามารถทำนายผลได้แม่นยำขึ้น

6.2.3 ข้อเสนอแนะอื่นๆ

- เมื่อต้องเลือกรูปแบบการซีลด์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยสารละลาย ควร พิจารณาย่านความถี่ที่ใช้งาน ระดับความเข้มข้นของสสารที่มีผลต่ออุณหภูมิ (ความสามารถใน การละลายของสสาร) เพื่อประโยชน์และประสิทธิภาพสูงสุดที่เหมาะสมในแต่ละลักษณะการใ้ งาน
- ในการนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรมนั้น ต้องมีการศึกษาตัวแปรในด้านอื่นๆ อาทิเช่น ภาชนะที่ใช้บรรจุที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน การระบายความร้อน รวมทั้งระยะเวลาในการ เปลี่ยนถ่ายสารละลาย ซึ่งทั้งหมดนี้จำเป็นต้องได้รับการศึกษาต่อไปเพื่อพัฒนาให้ได้ประโยชน์ สูงสุดต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] INTERNATIONAL SPECIAL COMMITTEE ON RADIO INTERFERENCE, “CISPR 22: Information technology equipment - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement”, INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION-IEC, Fifth edition, 2005-04
- [2] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION-IEC, “IEC62209-1: Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices - Human models, instrumentation, and procedures - Part 1: Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for hand-held devices used in close proximity to the ear (frequency range of 300 MHz to 3 GHz”, First edition, 2005-02
- [3] NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, “A Guide to power flux density and field strength measurement”, First edition, 2004
- [4] V. Prasad Kodali, “Engineering Electromagnetic Compatibility-Principles, Measurements and Technologies”, IEEE PRESS, 1996
- [5] Henry W. Ott, “NOISE REDUCTION TECHNIQUES IN ELECTRONIX SYSTEMS”, JOHN WILEY & SONS, Second edition, 1988
- [6] Tim Williams, “EMC for Product Designers”, NEWNES, Second edition, 1996
- [7] John Scott & Clinton Van Zyl, “Introduction to EMC”, NEWNES, First edition, 1997
- [8] <http://en.wikipedia.org/wiki/Water>
- [9] <http://en.wikipedia.org/wiki/Salt>
- [10] <http://en.wikipedia.org/wiki/KMnO4>
- [11] พงษ์ทิพย์ โกเมศโตภา และ ธนาธิธ เสือวรรณศรี, เคมีอินทรีย์พื้นฐาน, พิมพ์ครั้งที่ 1. กทม., สำนักพิมพ์ยูไนเต็ทบุ๊คส์, 2534
- [12] Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH, Germany, inoLab pH/Cond 720 operating manual, 03/2004
- [13] บริษัท กรีน บรรณณ จำกัด, เครื่องมือวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง และวัดค่าความนำไฟฟ้า Model: inoLab pH/Cond 720, 2548
- [14] Paul Duxbury, “FLO/EMC training Course”, FLOMERICS, Version 6.1, 2004
- [15] วีระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 1. กทม., โรงพิมพ์ ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ.พรินติ้ง, 2547

- [16] http://www.teseq.com/com/en/news_events/specials/1_RF_emission_testing.pdf
- [17] Voluntary Control Council for Interference by Information Technology Equipment (VCCI), “VCCI Textbook of Study Course for EMI Measurement Engineers”, VCCI Education Subcommittee, 2003
- [18] INTERNATIONAL SPECIAL COMMITTEE ON RADIO INTERFERENCE, “CISPR 16-1-4: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Ancillary equipment - Radiated disturbances”, INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION-IEC, Fifth edition, 2005-04
- [19] NEC TOKIN Corporation, ANECHOIC CHAMBER NO.1, 2002
- [20] Voluntary Control Council for Interference by Information Technology Equipment (VCCI), “VCCI Textbook of Basic Course for EMI Measurement Engineers”, VCCI Education Subcommittee, 2003
- [21] NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, “A NATIONAL MEASUREMENT FOOD PRACTICE GUIDE No.73: Calibration and use of antennas, focusing on EMC applications”, First edition, 2004
- [22] INTERNATIONAL SPECIAL COMMITTEE ON RADIO INTERFERENCE, “CISPR 16-1-1: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Measuring apparatus”, INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION-IEC, Second edition, 2006-03
- [23] Schaffner, “RF Emission Testing – a handy guide”, 2004
- [24] Schaffner, “RF Immunity Testing – a handy guide”, 2004

ภาคผนวก ก

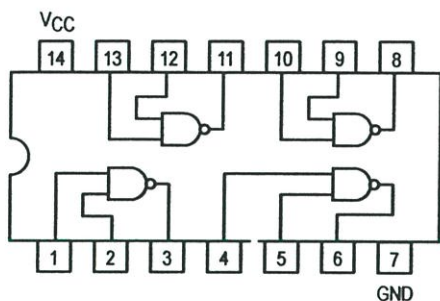
ข้อมูลอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวิจัย

(มีเฉพาะรายละเอียดหน้าแรกของอุปกรณ์เท่านั้น ส่วนรายละเอียดของข้อมูลทั้งหมด
สามารถสืบค้นได้ที่ www.alldatasheet.com)



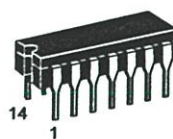
QUAD 2-INPUT NAND GATE

- ESD > 3500 Volts

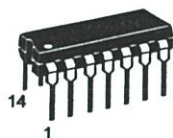


SN54/74LS00

QUAD 2-INPUT NAND GATE
LOW POWER SCHOTTKY



J SUFFIX
CERAMIC
CASE 632-08



N SUFFIX
PLASTIC
CASE 646-06



D SUFFIX
SOIC
CASE 751A-02

ORDERING INFORMATION

SN54LSXXJ	Ceramic
SN74LSXXN	Plastic
SN74LSXXD	SOIC

GUARANTEED OPERATING RANGES

Symbol	Parameter		Min	Typ	Max	Unit
V _{CC}	Supply Voltage	54	4.5	5.0	5.5	V
		74	4.75	5.0	5.25	
T _A	Operating Ambient Temperature Range	54	-55	25	125	°C
		74	0	25	70	
I _{OH}	Output Current — High	54, 74			-0.4	mA
I _{OL}	Output Current — Low	54			4.0	mA
		74			8.0	

SN54/74LS00

DC CHARACTERISTICS OVER OPERATING TEMPERATURE RANGE (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter		Limits			Unit	Test Conditions	
			Min	Typ	Max			
V _{IH}	Input HIGH Voltage		2.0			V	Guaranteed Input HIGH Voltage for All Inputs	
V _{IL}	Input LOW Voltage	54			0.7	V	Guaranteed Input LOW Voltage for All Inputs	
		74			0.8			
V _{IK}	Input Clamp Diode Voltage			-0.65	-1.5	V	V _{CC} = MIN, I _{IN} = -18 mA	
V _{OH}	Output HIGH Voltage	54	2.5	3.5		V	V _{CC} = MIN, I _{OH} = MAX, V _{IN} = V _{IH} or V _{IL} per Truth Table	
		74	2.7	3.5		V		
V _{OL}	Output LOW Voltage	54, 74		0.25	0.4	V	I _{OL} = 4.0 mA	V _{CC} = V _{CC} MIN, V _{IN} = V _{IL} or V _{IH} per Truth Table
		74		0.35	0.5	V	I _{OL} = 8.0 mA	
I _{IH}	Input HIGH Current				20	μA	V _{CC} = MAX, V _{IN} = 2.7 V	
					0.1	mA	V _{CC} = MAX, V _{IN} = 7.0 V	
I _{IL}	Input LOW Current				-0.4	mA	V _{CC} = MAX, V _{IN} = 0.4 V	
I _{OS}	Short Circuit Current (Note 1)		-20		-100	mA	V _{CC} = MAX	
I _{CC}	Power Supply Current Total, Output HIGH				1.6	mA	V _{CC} = MAX	
	Total, Output LOW				4.4			

Note 1: Not more than one output should be shorted at a time, nor for more than 1 second.

AC CHARACTERISTICS (T_A = 25°C)

Symbol	Parameter		Limits			Unit	Test Conditions	
			Min	Typ	Max			
t _{PLH}	Turn-Off Delay, Input to Output			9.0	15	ns	V _{CC} = 5.0 V C _L = 15 pF	
t _{PHL}	Turn-On Delay, Input to Output			10	15	ns		

ภาคผนวก ข
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Thossaphorn Udomsinsirikul and Weerachet Khan-ngern, “**Comparison of EMI shielding with transparency liquid**” 2005 International Conference on Electromagnetic Compatibility, Phuket, Thailand, 2005
2. ทศพร อุดมสินศิริกุล และวีระเชษฐ์ ชันเงิน “**การเปรียบเทียบคุณสมบัติการลดทอนของ วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศด้วยสารละลายน้ำเกลือ**” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON 28), ภูเก็ต, 2548



EMC
ReCCIT KMITL

KMITL

2005

International
Conference on
Electromagnetic
Compatibility
Phuket, Thailand



Proceeding



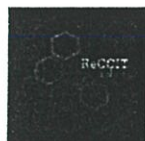
July 27-29, 2005
Kata Beach Resort,
Phuket, Thailand



IEEE CAS Society



IEEE THAILAND CHAPTER



Comparison of EMI shielding with transparency liquid

Thossaphorn Udomsinsirikul* and Weerachet Khan-ngern*

*Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering,
And EMC Laboratory, Research Center for Communication and Information Technology
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand,
Phone/Fax: +66 2737 3000 Ext. 3322

E-mail: u_thossaphorn@yahoo.co.uk, kkveerac@kmitl.ac.th Website: www.kmitl.ac.th/emc

Abstract

This paper is presented the properties of electromagnetic interference (EMI) shielding with transparency liquid in many cases of quantity of salt from 0% to 20% concentrate solution. The comparison is done under semi-anechoic chamber at 3 meter distance with Bilog antenna from 30 MHz to 1,000 MHz frequency range. It is found that in higher salt concentrate solution had high EMI shielding property.

1. Introduction

Nowadays, the mobile telephone had been use widespread in many country. In each time of mobile telephone usage, there are transmitting and receiving signal for communication. The mobile telephone will generate signal and effect directly to user.

From the above hypothesis, there is an examination of plastic model of human's skull by placing solution liquid into the model. The solution liquid that placed inside is representative for human's tissue. The examination is introduced into SAR (Specific Absorption Rate) [1].

From the principal of solution represent human's tissue inside human's skull that apply into EMI shielding property study. The examination study EMI shielding properties in differences concentration by salt combination.

2. Theory

Shielding effectiveness (S) [2] can be determined by analyzing the problem in either of two ways. One method is to use circuit theory, and the second is to use field theory. In the circuit theory approach the noise fields induce currents in the shields, and these currents in turn generate additional fields that tend to cancel the original fields in certain regions. An example of this is shown in Fig.1.

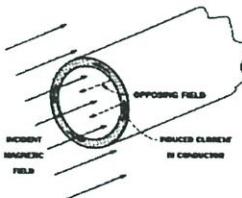


Fig 1: Conducting material can provide magnetic shielding.

Shielding can be specified in terms of the reduction in magnetic and/or electric field strength caused by the

shield. It is convenient to express this shielding effectiveness in units of decibels(dB). Use of dB then permits the shielding produced by various effect to be added to obtain the total shielding. Shielding effectiveness (S) is defined for electric fields as

$$S = 20 \log \frac{E_0}{E_1} \quad \dots(1)$$

and for magnetic fields as

$$S = 20 \log \frac{H_0}{H_1} \quad \dots(2)$$

In the preceding equation, $E_0(H_0)$ is the incident field strength, and $E_1(H_1)$ is the field strength of the transmitted wave as it emerges from the shield.

Two types of loss are encountered by an electromagnetic wave striking a metallic surface. The wave is partially reflected from the surface, and the transmitted (nonreflected) portion is attenuated as it passes through the medium. This latter effect, called absorption or penetration loss, is the same in either the near or the far field and for electric and magnetic fields. Reflection loss, however, is dependent on the type of field, and the wave impedance.

The total shielding effectiveness (S) of a material is equal to the sum of the absorption loss (A) plus the reflection loss (R) plus a correction factor (B) to account for multiple reflection in thin shields. Total shielding effectiveness therefore can be written as

$$S = A + R + B \quad \text{dB} \quad \dots(3)$$

All the term in Eq. (3) must be expressed in dB. The multiple reflection factor B can be neglected if the absorption loss A is greater than 9 dB. From a practical point of view, B can also be neglected for electric fields and plan waves.

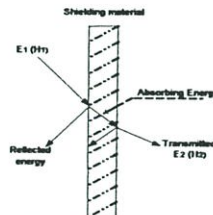


Fig 2: Partial reflection and transmission occur at both faces of shield.

3. Test configuration.

3.1. Equipment

- EMI noise source: a digital frequency oscillator at 16 MHz
- Plastic case 20*20*20 centimeters size and 23*23*23 centimeters size
- Bilog antenna
- EMI receiver
- Semi-anechoic chamber

3.2. Test setup

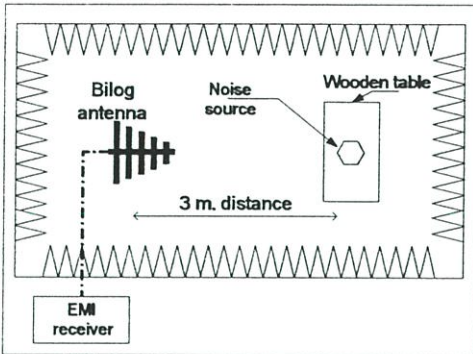


Fig 3 : Measurement setup diagram

EMI shielding property test of differences concentration of salt solution were tested in semi-anechoic chamber by using 1 meter high Bilog antenna and captured signal from the distance of 80 centimeters height wooden table and 3 meter length from signal create source. The measurement setup diagram is shown in Fig 3. The test was recorded from 30 MHz to 1,000 MHz frequency range under following conditions:

Case A Captured signal directly from the source by setting the source on the middle of wooden table. The measurement setup is shown in Fig 4.

Case B Put the source into 20*20*20 centimeters plastic case which was 0.5 centimeter thick and capture signal.

Case C Put the source into 20*20*20 centimeters plastic case which was 0.5 centimeter thick [3]. Then put the case into 23*23*23 centimeters plastic case which left 1 centimeter space between the first and second case. Finally captured signal and recorded. The measurement setup is shown in Fig 5.

Case D Filled Reverse Osmosis water which was 0.054 $\mu\text{S}/\text{cm}$. [4] conductive into the space between the first and second case. Then captured signal and recorded.

Case E Combined Reverse Osmosis with salt by stability the concentration at 2.5 %

Case F Combined Reverse Osmosis with salt by stability the concentration at 5 %

Case G Combined Reverse Osmosis with salt by stability the concentration at 10 %

Case H Combined Reverse Osmosis with salt by stability the concentration at 15 %

Case I Combined Reverse Osmosis with salt by stability the concentration at 20 %

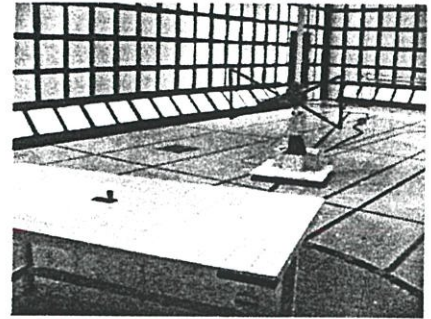


Fig 4: Measurement setup of case A, directly measurement from noise source.

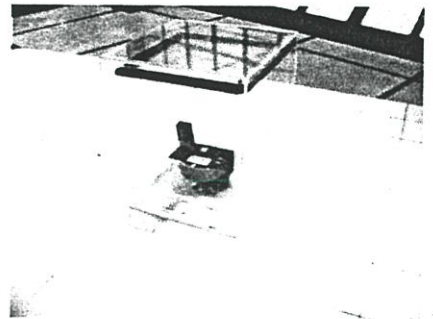


Fig 5: Measurement setup when put the noise source in double plastic boxes.

4. Results and discussion

To study the effect of salt combination in Reverse Osmosis water. The test result was shown under following figure.

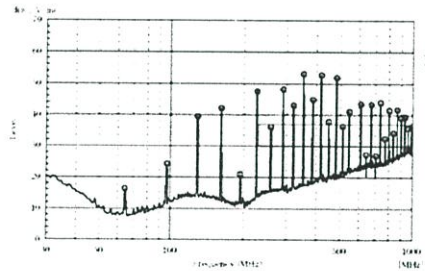


Fig 6: Test result of case A, directly measurement from noise source.

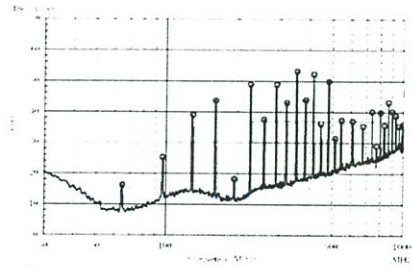


Fig 7: Test result of case B, noise source in plastic box.

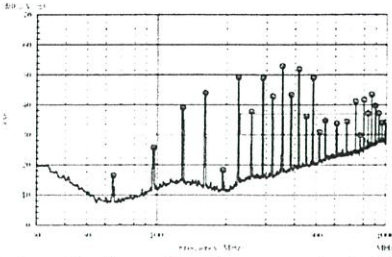


Fig 8: Test result of case C, noise source in double plastic box.

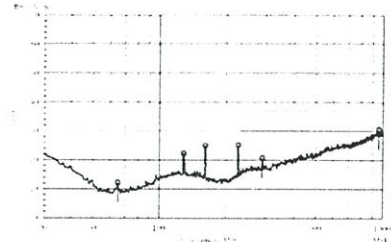


Fig 13: Test result of case H, noise source in double plastic box with 15 % salt concentrate Reverse Osmosis water.

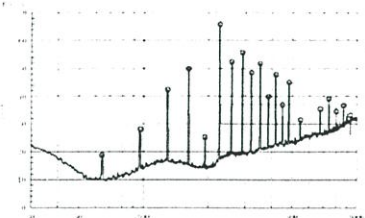


Fig 9: Test result of case D, noise source in double plastic box with Reverse Osmosis water.

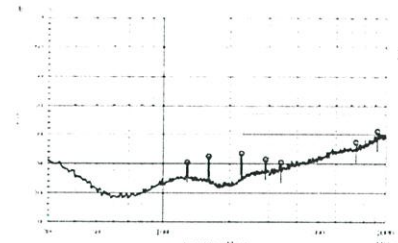


Fig 14: Test result of case I, noise source in double plastic box with 20 % salt concentrate Reverse Osmosis water.

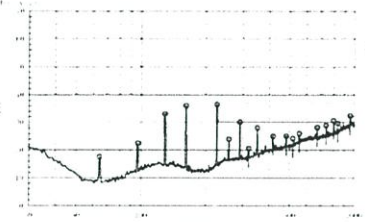


Fig 10: Test result of case E, noise source in double plastic box with 2.5 % salt concentrate Reverse Osmosis water.

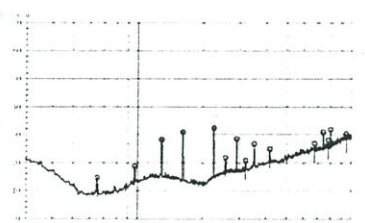


Fig 11: Test result of case F, noise source in double plastic box with 5 % salt concentrate Reverse Osmosis water.

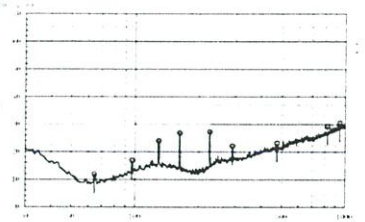


Fig 12: Test result of case G, noise source in double plastic box with 10 % salt concentrate Reverse Osmosis water.

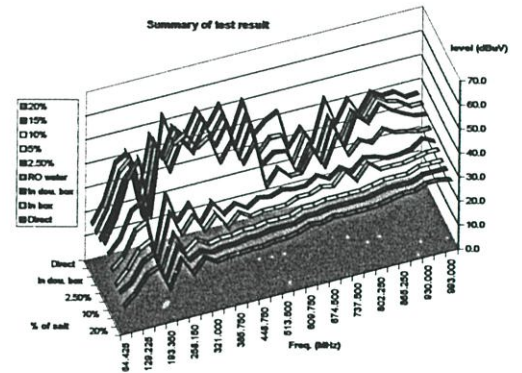


Fig 15: Summary of test result of each cases.

5. Conclusions

The result from the measurement, we can split to 3 groups for consideration.

- Group i; frequency range between 30 to 100 MHz,
- Group ii; frequency range between 100 to 500 MHz, and
- Group iii: frequency range between 500 to 1,000 MHz.

Group i.

In this group, we fix frequency range from 30 to 100 MHz. We found that the field strength of case A, B and C are the same. But it will increase a little bit from reflection effect of reverse osmosis (RO) water in case D. After add salt in RO water, the signal result would decrease in consequence of salt concentration.

- Frequency point at 96.825 MHz

Case no.	Result (dBuV)	*S (dB)
A	24.2	-
B	25.2	-1
C	25.9	-1.7
D	28.1	-3.9
E	22.5	1.5
F	18.8	5.4
G	16.9	6.4
H	0	-
I	0	-

*Compare shielding effectiveness with result of case A.

Group ii.

In second group, we assume frequency range between 100 to 500 MHz. The measurement result was same as group i, but we found that the reflection effect from reverse osmosis (RO) was strong in this group. Especially, at 225.425 MHz frequency point. After add salt in RO water, the signal result would decrease in consequence of salt concentration same as group i.

- Frequency point at 225.425 MHz

Case no.	Result (dBuV)	*S (dB)
A	47.4	-
B	48.9	-1.5
C	49.3	-1.9
D	65.9	-18.5
E	36.5	10.9
F	32.4	15.0
G	27.2	20.2
H	25.1	22.3
I	23.6	23.8

*Compare shielding effectiveness with result of case A.

Group iii.

In the last group, we assume frequency range between 500 to 1,000 MHz. The measurement result was same as group i and group ii, but we found that the reflection effect from reverse osmosis (RO) was not affect the signal in each frequency in this group. After add salt in RO water, the signal result would decrease in consequence of salt concentration same as group i and group ii.

- Frequency point at 737.500 MHz

Case no.	Result (dBuV)	*S (dB)
A	44.0	-
B	40.1	3.9
C	41.3	2.7
D	39.1	4.9
E	29.0	15.0
F	31.0	13.0
G	-	-
H	-	-
I	-	-

*Compare shielding effectiveness with result of case A.

From the measurement result, we found that the field strength from noise source will increase when we fill Reverse Osmosis (RO) water (in case D). Because of effect from reflection of RO water. But no affect in high frequency, especially group iii.

After salted combination, the captured signal result would decrease in consequence of salt concentration. As see from the comparison with the result on picture. As more salt concentrated as much the signal rate would be determined on the difference pitch of frequencies.

As the result, as more salt concentrated as much, the captured signal result would decrease. Thus, the salt concentrate solution has property of shielding effectiveness in EMI.

6. References

- [1] Telecom & IT Test centre, PSB Singapore, "Specific Absorption Rate (SAR) measurement", 2002.
- [2] Henry W. Ott, "Noise Reduction techniques in electronic systems" John Wiley & Sons, Inc., 1988, pp.159-201.
- [3] Daniele Florean, "Computer aided prediction and experimental validation of radiated emission from a shielding box with different size apertures" IEEE 2000, pp. 195-198.
- [4] Soo-hyung Kim, Seung-bac Lee, Kyung-il Ouh and Cha-bog Rim, "Reduction of Radiated Emissions from Semiconductor by Using Absorbent Materials" IEEE 2000, pp.153-156.

Authors



Mr. Thossaphorn Udomsinsirikul, He received the degree of B.Eng. from KASETSART University in 1999. He is working forward to M.Eng. at KMITL. His research interest is EMI shielding.



Assoc. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern, He received the degree of B.Eng. and M.Eng. from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) in 1982 and 1988, respectively. He received his Ph.D. and DIC

from Imperial Collage of Science Technology and Medicine, the University of London in 1997 in the area of power electronics. He is also a technical committee no. 890: in EMC for the Ministry of Industry. Dr. Khan-ngern continues his research in the area of EMI & EMC and Power Electronic System.



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28

28th Electrical Engineering Conference (EECON 28)



ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สาส์นจากอธิการบดี/คณบดี/ประธาน

กรมการการประชุม

บทความดีเด่น

ดัชนีผู้เขียนบทความ

Author Index

สารบัญบทความ

- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

...



Western
Digital

ABB



IT.DABOS Co., Ltd.

การเปรียบเทียบคุณสมบัติการลดทอนของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศด้วยสารละลายน้ำเกลือ

Comparison of Radiated Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness with Salt Concentrate in Transparency Liquid

ทศพร อุดมอินทวิกุล และ วีระพงษ์ ชันเงิน

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2 หมู่ 3 อ.ฉลองกรุง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร. 02-7373000 ต่อ 3322 E-mail: u_thossaphorn@yahoo.co.uk, kkveerac@kmitl.ac.th Website: www.kmitl.ac.th/emc

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นนํานำเสนอ การเปรียบเทียบคุณสมบัติการลดทอนของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศด้วยสารละลายน้ำเกลือ (NaCl) เพื่อศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของสารละลายที่ระดับ 5%, 10 %, 15% และ 20% ว่ามีผลต่อการลดทอนสัญญาณรบกวนอย่างไร โดยบรรจุสารละลายดังกล่าวในตู้กระจกที่มีความหนา 2.5 เซนติเมตร 5 เซนติเมตร และ 7.5 เซนติเมตรตามลำดับ การทดลองได้ทดสอบคุณสมบัติของสารละลายภายในห้องปิดกั้นคลื่นกึ่งไร้การสะท้อน (Semi anechoic chamber) ที่ระยะ 3 เมตร ด้วยสายอากาศชนิด Bilog โดยทำการศึกษาที่ย่านความถี่ 30 MHz ถึง 500 MHz ผลจากการทดลองพบว่าสารละลายน้ำเกลือมีคุณสมบัติในการลดทอนของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่เพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นและความหนาของขนาดภาชนะบรรจุมากขึ้น

คำสำคัญ: สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ, คุณสมบัติการลดทอน

Abstract

This paper presents the comparison of the radiated electromagnetic interference (EMI) shielding with salt concentrate in transparency liquid. The study focused on the shielding effectiveness of the salt transparency based on the variation of soluted concentration at 5%, 10%, 15% and 20% where three thickness of the shielded material of glass cabinet at 2.5 cm., 5 cm. and 7.5 cm. are studied. The comparison is done under semi-anechoic chamber at 3 meter distance with Bilog antenna from 30 MHz to 500 MHz frequency range. It is found that in higher salt concentrate solution and higher thickness of salt solution result a better high frequency EMI shielding.

Keywords: Radiated EMI, Shielding effectiveness.

1. บทนำ

การรบกวน คือการนำวัสดุที่เป็นโลหะวางระหว่างสองพื้นผิว โดยวัสดุดังกล่าวทำการควบคุมการแพร่กระจายทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากบริเวณพื้นผิวหนึ่งไปยังอีกพื้นผิวหนึ่ง โดยทั่วไปในการพิจารณาการรบกวนจะพิจารณาจากวัสดุของแข็ง โดยเฉพาะสารที่นำไฟฟ้า

ในปัจจุบันได้มีการนำสารละลายที่มีความเข้มข้นเทียบเท่ากับเนื้อเยื่อภายในกะโหลกของมนุษย์บรรจุภายในรูปหัวกะโหลกจำลอง และทำการวัดสัญญาณที่แพร่ออกมาจากแหล่งกำเนิด เพื่อศึกษาถึงการดูดซับสัญญาณ หรือการลดทอนสัญญาณที่ผ่านสารละลายดังกล่าว ซึ่งการจำลองรูปแบบการทดลองดังกล่าวเรียกว่า อัตราการดูดกลืนจำเพาะ (Specific Absorption Rate-SAR) [3]

จากหลักการข้างต้นที่มีการใช้สารละลายเป็นตัวแทนของเนื้อเยื่อของมนุษย์ภายในกะโหลกมนุษย์ จึงนำมาศึกษาถึงคุณสมบัติการลดทอนของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศด้วยสารละลายน้ำเกลือ ซึ่งคุณสมบัติของสารละลายสามารถมองเห็นได้ชัดเจนโดยการผสมสีลงในสารละลายดังกล่าว และประโยชน์ในรูปของของเหลวที่สามารถเปลี่ยนรูปแบบได้ตามภาชนะที่บรรจุ ซึ่งสะดวกต่อการเปลี่ยนรูปแบบการทดสอบต่างๆ โดยในการทดลองได้ศึกษาถึงคุณสมบัติการลดทอนของสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้นต่างๆ กัน และขนาดภาชนะที่บรรจุต่างกัน

นอกจากนี้หากมีการประยุกต์ใช้น้ำเกลือใส่แทนการรบกวนด้วยแผ่นโลหะที่บ่งจะช่วยให้ความรู้สึกที่คิดว่า เพราะจะมองทะลุภายใน และภายนอกได้ ทำให้ช่วยให้บุคคลที่ทำงานในห้องรบกวนเหมือนทำงานภายในห้องกระจกปกติ

2. ทฤษฎี

คุณสมบัติการลดทอน (Shielding Effectiveness-SE) หมายถึง ระดับสัญญาณที่ลดทอนลงจากแหล่งกำเนิดขณะผ่านวัสดุ โดยสามารถระบุในเทอมของการลดลงของความเข้มสนามแม่เหล็ก

และ/หรือสนามไฟฟ้าที่ผ่านสิ่งกีดขวาง ซึ่งมีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB) โดยสามารถนิยามด้วยสมการ [1] ดังนี้

$$SE = 20 \log \left[\frac{E_0(H_0)}{E_1(H_1)} \right] \quad \dots(1)$$

หรือ

$$SE = A + R + K \quad \dots(2)$$

เมื่อ A = ค่าสูญเสียจากการดูดกลืนของวัสดุ (dB)

R = ค่าสูญเสียจากการสะท้อนทั้งสองด้าน (dB)

K = ค่าแก้ (correction factor) ของการสะท้อนคลื่นของวัสดุ (dB)

$E_0(H_0)$ = ความเข้มสนามไฟฟ้าหรือแม่เหล็กจากแหล่งกำเนิด

$E_1(H_1)$ = ความเข้มสนามไฟฟ้าหรือแม่เหล็กของสัญญาณหลังจากถูกขัด

$P_1(P_2)$ = Plane wave

โดยที่

$$A = 3.34t \sqrt{f \mu_r \sigma_r} \quad \dots(3)$$

และ

$$R = C + 10 \log \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r} \right) \left(\frac{1}{f^n r^m} \right) \quad \dots(4)$$

เมื่อ μ_r = ค่าความซึมซับของวัสดุ

σ_r = ค่าความไฟฟ้าของวัสดุ

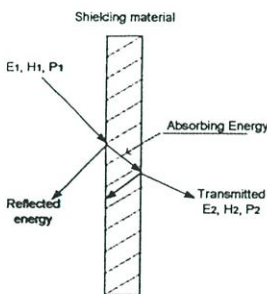
t = ความหนาของวัสดุที่ทำการขัดที่มีหน่วยเป็นนิ้ว (inch)

f = ความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

r = ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดถึงวัสดุขัดที่มีหน่วยเป็นเมตร (m)

c, n และ m = ค่าคงที่โดยมีค่าในแคละกรณีดังต่อไปนี้

ชนิดของสนาม	C	n	m
สนามไฟฟ้า	322	3	2
สนามแนวราบ	168	1	0
สนามแม่เหล็ก	14.6	-1	-2



รูปที่ 1 คุณสมบัติการผ่านของสัญญาณที่วัสดุ

จะเห็นว่าการลดทอนของสัญญาณรบกวนมีอยู่สองส่วน

หลัก คือ การสะท้อนสัญญาณและการดูดกลืนของสัญญาณ และในบางเงื่อนไข เช่น หากเป็นผลกรวดที่ไร้สายอากาศ จะต้องพิจารณาค่าแก้ (K) ด้วย

3. ขั้นตอนการทดสอบ

3.1. อุปกรณ์และเครื่องมือ

- แหล่งกำเนิดสัญญาณ เป็นวงจรสร้างความถี่แบบดิจิทัลที่มีความถี่ 16 MHz

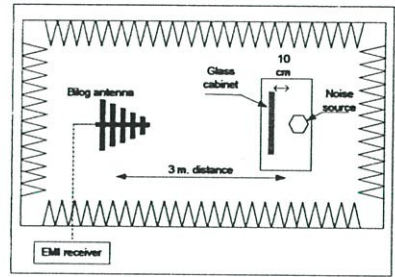
- ตู้กระจก

- สายอากาศชนิด Bilog

- เครื่องวัดสัญญาณ EMI

- ห้องปิดกั้นคลื่นกึ่งไร้การสะท้อน (Semi anechoic chamber)

3.2. การจัดตำแหน่งการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 รูปแบบการทดสอบ

การทดสอบคุณสมบัติการลดทอนของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศด้วยสารละลายน้ำเกลือทดลองภายในห้องปิดกั้นคลื่นกึ่งไร้การสะท้อน (Semi anechoic chamber) ที่ระยะ 3 เมตร ด้วยสายอากาศชนิด Bilog ที่ความสูงของสายอากาศที่ 1 เมตร และทำการติดตั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณกลางโต๊ะไม้ที่มีความสูง 80 เซนติเมตร โดยทำการศึกษาสัญญาณที่สร้างจากแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ย่านความถี่ 30 MHz ถึง 500 MHz ภายใต้สภาวะดังต่อไปนี้

สภาวะ ก. ทำการวัดสัญญาณโดยตรงจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยวางแหล่งกำเนิดสัญญาณที่บริเวณกึ่งกลางโต๊ะ

สภาวะ ข. นำตู้กระจกที่มีความหนาของเนื้อกระจก 0.5 เซนติเมตร ขนาดความกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 45 เซนติเมตร และมีความหนาสำหรับบรรจุของเหลว 2.5 เซนติเมตร [2] ดังรูปที่ 3 วางระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณและสายอากาศ โดยห่างจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ 10 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4

สภาวะ ค. นำน้ำ Reverse Osmosis ที่มีค่า Conductivity เท่ากับ 0.054 $\mu\text{s}/\text{cm}$. ลงในตู้กระจก และทำการวัดสัญญาณที่ได้

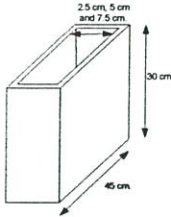
สภาวะ ง. เติมเกลือลงในน้ำ Reverse Osmosis ในตู้กระจก ดังกล่าว โดยให้มีความเข้มข้นของเกลือที่ระดับ 5%

สภาวะ จ. เติมเกลือลงในน้ำ Reverse Osmosis ในตู้กระจก ดังกล่าว โดยให้มีความเข้มข้นของเกลือที่ระดับ 10%

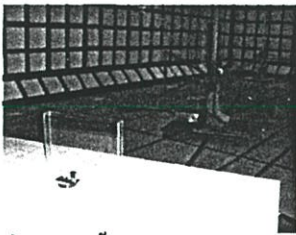
สภาวะ ฉ. เติมเกลือลงในน้ำ Reverse Osmosis ในตู้กระจก ดังกล่าว โดยให้มีความเข้มข้นของเกลือที่ระดับ 15%

สภาวะ ช. เติมเกลือลงในน้ำ Reverse Osmosis ในตู้กระจก ดังกล่าว โดยให้มีความเข้มข้นของเกลือที่ระดับ 20%

โดยหลังจากทำการวัดสัญญาณที่ได้จากทุกสภาวะแล้ว ได้ทำการเปลี่ยนตู้กระจกเป็นขนาดความหนา (x) สำหรับบรรจุของเหลว เป็น 5 เซนติเมตร และ 7.5 เซนติเมตร และทำการวัดสัญญาณจากสภาวะ ข. ถึง สภาวะ ช. เพื่อทำการศึกษาผลกระทบจากคุณสมบัติการลดทอนที่ขนาดความหนาต่าง ๆ



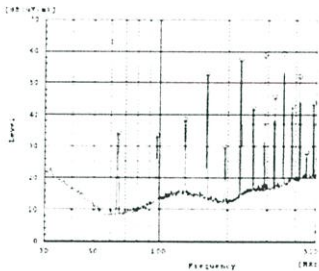
รูปที่ 3 ขนาดของภาชนะที่บรรจุ



รูปที่ 4 การติดตั้งการทดสอบความสภาวะ ข

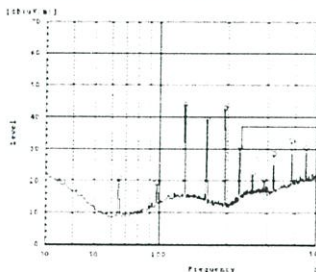
4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์

ผลการทดลองจากการวัดแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยตรงตามข้อกำหนดในสภาวะ ก. ดังแสดงในรูปที่ 5 และผลการทดลองจากการวัดแหล่งกำเนิดสัญญาณที่มีการฉีดคัสต์สารละลายน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 20% ตามข้อกำหนดในสภาวะ ข. แสดงรูปที่ 6 และเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดทั้งสองรูปที่รูปที่ 7

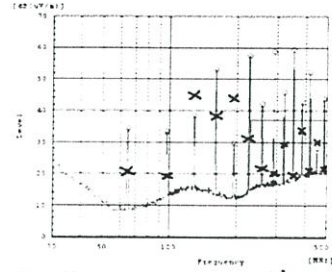


รูปที่ 5 ผลการทดลอง โดยวัดสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ

โดยตรงตามข้อกำหนดสภาวะ ก.



รูปที่ 6 ผลการทดลอง โดยการวัดแหล่งกำเนิดสัญญาณที่มีการฉีดคัสต์สารละลายน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 20% ตามข้อกำหนดสภาวะ ข.



รูปที่ 7 เปรียบเทียบผลการทดลองจากรูปที่ 5 และรูปที่ 6

จากการทดลองสภาวะ ก. เมื่อทำการทดลองจากสภาวะ ข. ถึง สภาวะ ช. จึงเลือกนำค่าที่วัดได้มาวิเคราะห์เฉพาะแต่ละตัวแทนความถี่ดังต่อไปนี้

- ย่านความถี่ 30 MHz ถึง 300 MHz โดยเลือกความถี่ที่ 161.625MHz เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์

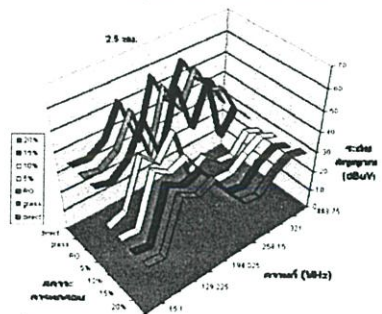
สภาวะที่	ผลการทดลอง (dBuV)	*คุณสมบัติการลดทอน (dB)
ก.	53.3	-
ข.	53.1	0.2
ค.	53.8	-0.5
ง.	39.4	13.9
จ.	38.8	14.5
ฉ.	38.7	14.6
ช.	38.5	14.8

*เปรียบเทียบคุณสมบัติการลดทอนของสภาวะต่าง ๆ กับสภาวะ ก.

ตารางที่ 1

จากผลการทดลองในสภาวะ ข. ในตารางที่ 1 พบว่า คู่กระจกมีคุณสมบัติในการสะท้อน จึงทำให้สัญญาณที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น และเมื่อทำการเติมน้ำ Reverse Osmosis ลงในกระจกหรือการทดลองในสภาวะ ค. ก็ทำให้สัญญาณที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่หลังจากเมื่อเค็มเกลือออกไป ค่าสัญญาณที่วัดได้มีค่าลดลงตามลำดับ เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

จากการทดลองภาชนะทั้งสามขนาดที่สภาวะต่างๆ สามารถนำมาแสดงเป็นแผนภูมิสามมิติได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 8 แสดงระดับสัญญาณทุกสภาวะการทดลองที่ตู้กระจกหนา 2.5 ซม.

ในขณะที่เดียวกันเมื่อทำการเติมน้ำ Reverse Osmosis ที่ยัง

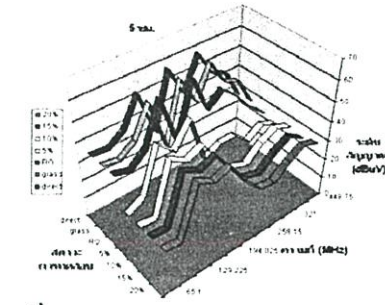
ไม่มีการผสมเกลือลงในตู้กระจกดังกล่าว ซึ่งเป็นการทดลองในสภาวะ ก. จะพบว่าค่าสัญญาณที่ทำการวัด ได้มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการวัด หลังกักเน็คสัญญาณ โดยตรงหรือการทดลองในสภาวะ ก. นั้นแสดง ให้เห็นว่าน้ำ Reverse Osmosis มีคุณสมบัติของการสะท้อนของ สัญญาณภายในตัวมันเอง ซึ่งทำให้ค่าสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้น

ภายหลังจากเติมเกลือลงไปในตู้กระจกที่บรรจุน้ำ Reverse Osmosis ดังกล่าว พบว่าระดับของสัญญาณที่ทำการวัดได้นั้น มีค่า ลดลง ซึ่งมีการผสมเกลือเข้มข้นมาก ก็ทำให้ค่าสัญญาณที่วัด ได้ลด น้อยลง จึงแสดงให้เห็นว่าเกลือ (NaCl) เมื่อมีการผสมเป็นของเหลวจะ มีคุณสมบัติช่วยในการลดทอนระดับของสัญญาณลง

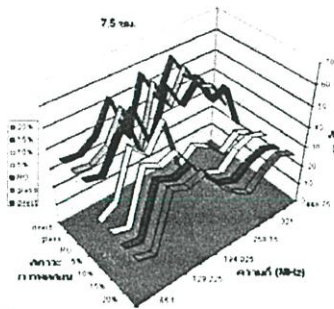
เมื่อมีการเปลี่ยนภาชนะที่บรรจุสารละลายให้มีขนาดใหญ่ ขึ้นและทำการทดลอง พบว่าค่าสัญญาณที่วัด ได้ก็จะมีค่าที่ลดลงตาม ขนาดที่บรรจุด้วยเช่นกัน ซึ่งมีความหนาของภาชนะที่บรรจุมากขึ้น คุณสมบัติในการลดทอนของสัญญาณก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยจากผล ของการทดลองทั้งหมดพบว่าสารละลายน้ำเกลือสามารถลดทอน สัญญาณได้ถึง 39.1 dB เมื่อระดับสภาวะความเข้มข้นของน้ำเกลือที่ 20% และตู้กระจกหนา 7.5 ซม.

เอกสารอ้างอิง

- [1] Henry W. Ott, "Noise Reduction techniques in electronic systems" John Wiley & Sons, Inc., 1988, pp.159-201.
- [2] N.Sudarshan, S.K.Chatterji, K.Suryanarayana, G.V.Rao, "EM shielding effectiveness of metal sandwiched composites" Proceeding of INCEMIC 2001-2002, pp.99-103.
- [3] Telecom & IT Test centre, PSB Singapore, "Specific Absorption Rate (SAR) measurement", 2002



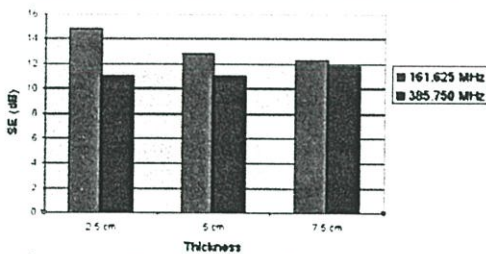
รูปที่ 9 แสดงระดับสัญญาณทุกสภาวะการทดลอง ที่ตู้กระจกหนา 5 ซม.



รูปที่ 10 แสดงระดับสัญญาณทุกสภาวะการทดลอง ที่ตู้กระจกหนา 7.5 ซม.

โดยเลือกค่าความถี่ที่ 161.625 MHz และ 385.75 MHz เป็นตัวแทนของของความถี่ทั้งหมดในการทดลอง พบว่าที่ความถี่สูงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดภาชนะบรรจุ ค่าลดทอนของสัญญาณจะเพิ่มขึ้นตาม ในขณะที่เดียวกัน ที่ความถี่ต่ำค่าลดทอนของสัญญาณจะลดลงเมื่อขนาดของภาชนะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 11

Comparison of SE in each glass cabinet at 161.625 MHz and 385.750 MHz



รูปที่ 11 เปรียบเทียบค่าการลดทอนที่ขนาดภาชนะบรรจุต่าง ๆ

สรุป

ผลการทดลองในตารางและแผนภูมิที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าที่สภาวะการทดสอบ ข. เป็นการนำตู้กระจกมาวาง ระหว่างหลังกักเน็คสัญญาณกับสายอากาศนั้น สัญญาณที่ทำการวัดได้นั้น มีค่าลดลงเล็กน้อยนั้น แสดงให้เห็นว่าตู้กระจกมีคุณสมบัติในการลดทอนเช่นเดียวกัน แต่มีค่าไม่มากเมื่อมีการเปรียบเทียบเมื่อมีการเติมสารละลายเกลือลงไป



ทศพร ชุมสินศิริกุล ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจคือ EMI shielding



วีระเชษฐ ชันเงิน จบการศึกษา วศ.บ.(ไฟฟ้า), วศ.ม.(ไฟฟ้า) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, Ph.D. (Electrical Engineering) จาก Imperial Collage, University of London, UK. ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจคือ Power Electronics system, EMI & EMC

ประวัติผู้เขียน

นายทศพร อุดมสินศิริกุล เกิดเมื่อวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2520 ณ จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จ การศึกษามัธยมศึกษาและมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสารสิทธิ์พิทยาลัย จากนั้นเข้าศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2538 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปีการศึกษา 2546 และทำงานในห้องปฏิบัติการความเข้ากันได้ ทางแม่เหล็กไฟฟ้า สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542 จนถึงปัจจุบัน