

ตัวอย่างผลการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก

บทนี้นำเสนอ ตัวอย่างการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับวิธีบาวนด์ารีอีลีเมนต์ โดยใช้อีลีเมนต์สามเหลี่ยมกับอีลีเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้า วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์จะใช้หาผลเฉลยสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากรอบวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากด้วยอีลีเมนต์สามเหลี่ยม และเมื่อวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากจะหาผลเฉลยด้วยอีลีเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับวิธีบาวนด์ารีอีลีเมนต์จะใช้หาผลเฉลยบริเวณเงื่อนไขขอบเขตเปิดโล่ง การรวมวิธีไฟไนต์-อีลีเมนต์และวิธีบาวนด์ารีอีลีเมนต์เข้าด้วยกัน คือ บริเวณขอบเขตปัญหา ซึ่งก็คือบริเวณอวกาศว่างจากแนวคิดนี้ทำให้ทราบผลเฉลยสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่เกิดขึ้นตลอดโดเมนปัญหา และลดจำนวนอีลีเมนต์ที่ใช้หาผลเฉลยลงได้ ตัวอย่างผลการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ตัวอย่างผลการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากกรณีวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่มีรูปร่างต่างๆ
2. ค่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการชีลด์ อาทิเช่น ความซาบซึมได้ สภาพนำไฟฟ้า ความถี่ความหนา และระยะห่างของวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก

การนำเสนอผลการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากในวิทยานิพนธ์นี้ จะนำเสนอในรูปค่าประสิทธิภาพการชีลด์ (shielding effectiveness : SE) ซึ่งถูกกำหนดโดยอัตราส่วนการลดทอนของสนามแม่เหล็กขณะที่มีสนามแม่เหล็กแพร่ออกมาจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก โดยจะวัดความเข้มสนามแม่เหล็กที่จุดสังเกตจุดใดจุดหนึ่งก่อน โดยยังไม่มีให้นำวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กมาวางในบริเวณนั้น จากนั้นให้นำวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กมาวางกั้นระหว่างแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กกับจุดสังเกตและวัดความเข้มสนามแม่เหล็กที่จุดสังเกตจุดเดิมอีกครั้งหนึ่ง จากนั้นข้ามค้นเขียนในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$SE = \frac{\vec{H}_{unshield}}{\vec{H}_{shield}} \tag{5.1}$$

หรือ

$$SE (dB) = 20 \log \left[\frac{\bar{H}_{unshield}}{\bar{H}_{shield}} \right] \quad (5.2)$$

จากนิยามค่าประสิทธิภาพการชิลด์ กล่าวได้ว่า ถ้าค่าประสิทธิภาพการชิลด์ที่คำนวณได้มีค่าสูง หมายความว่า วัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กสามารถทำหน้าที่ลดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากได้ดี หรือ สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากแพร่ผ่านวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากไปได้น้อย ขณะเดียวกัน ถ้าค่าประสิทธิภาพการชิลด์ที่คำนวณได้มีค่าน้อยหมายความว่า วัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก สามารถทำหน้าที่ลดสนามแม่เหล็กได้ไม่ดี หรือสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากแพร่ผ่านวัตถุปิดกั้น สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากได้มาก

การแบ่งโดเมนที่ต่อเนื่องของปัญหาออกเป็นอีลีเมนต์เล็กๆในวิชานีพนธ์นี้ จะใช้โปรแกรม MSC/NASTRAN version 4.40 เป็นเครื่องมือช่วยในการแบ่งอีลีเมนต์

5.1 ตัวอย่างผลการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก

การนำเสนอตัวอย่างผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการชิลด์ที่เกิดจากวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากรูปร่างต่างๆในวิชานีพนธ์นี้ จะประกอบด้วย

1. แผ่นระนาบ (plane shield)
2. สี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านเปิดด้านหนึ่ง (three-sided shield)
3. สี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านเปิดด้านหนึ่ง 2 อันวางเหลื่อมกัน (two overlapping three-sided shields)
4. สี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular shield)
5. สี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีการเจาะตรงกลางด้านหนึ่งเป็นช่องเปิด

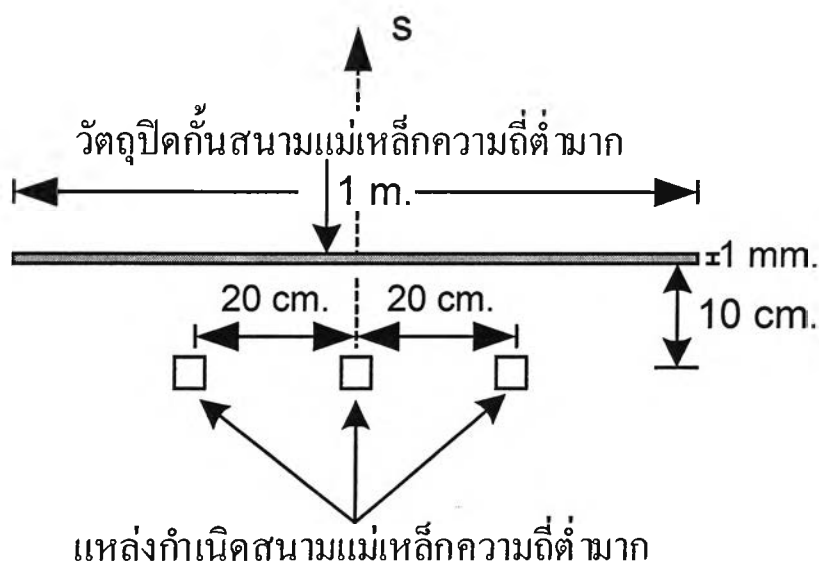
คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาคำนวณค่าประสิทธิภาพการชิลด์แสดงได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาคำนวณค่าประสิทธิภาพการชิลด์
อ้างอิงจาก Hasselgren and Luomi (1995)

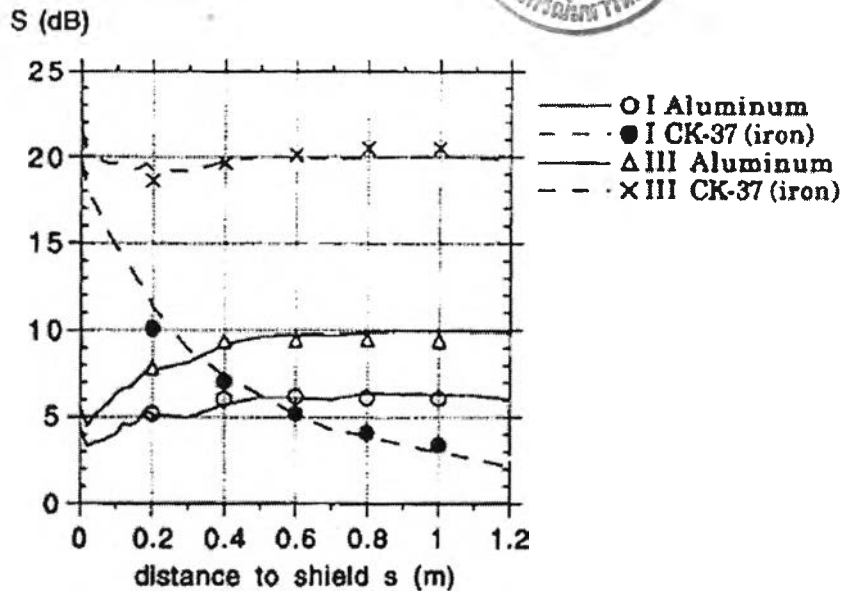
วัสดุ	สภาพต้านทาน ($\rho: \Omega m$)	ความขามซึมได้ (μ_r)
Aluminum (Al)	$2.8 \cdot 10^{-8}$	1
Construction grade iron (Fe)	$1.4 \cdot 10^{-7}$	700
Transformer grade iron (Ck-37)	$4.6 \cdot 10^{-7}$	4000
Copper (Cu)	$1.7 \cdot 10^{-8}$	1

5.1.1 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการชิลด์กรณีแผ่นระนาบ (plane shield)

กำหนดให้วัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากมีรูปร่างแผ่นระนาบ ความยาว 1 เมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร ห่างจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก 10 เซนติเมตร แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากมีลักษณะเป็นเส้นกระแสวนขนาด 3 เส้นวางเรียงกัน แต่ละเส้นกระแสมีขนาดเท่ากับ 1 A/m^2 วางห่างกันเป็นระยะ 20 เซนติเมตร โดยมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 20×20 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5.1 ขนาดขอบเขตภายนอก 20×20 เมตร จำนวนอีลีเมนต์ที่ใช้หาผลเฉลยเท่ากับ 1,548 อีลีเมนต์ จำนวนโนดเท่ากับ 3,206 โหนด ค่าประสิทธิภาพการชิลด์ที่ความถี่ 50 Hz ในทิศทาง S ทุกๆระยะ 20 เซนติเมตรจากวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก



รูปที่ 5.1 การปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากในกรณีแผ่นระนาบ

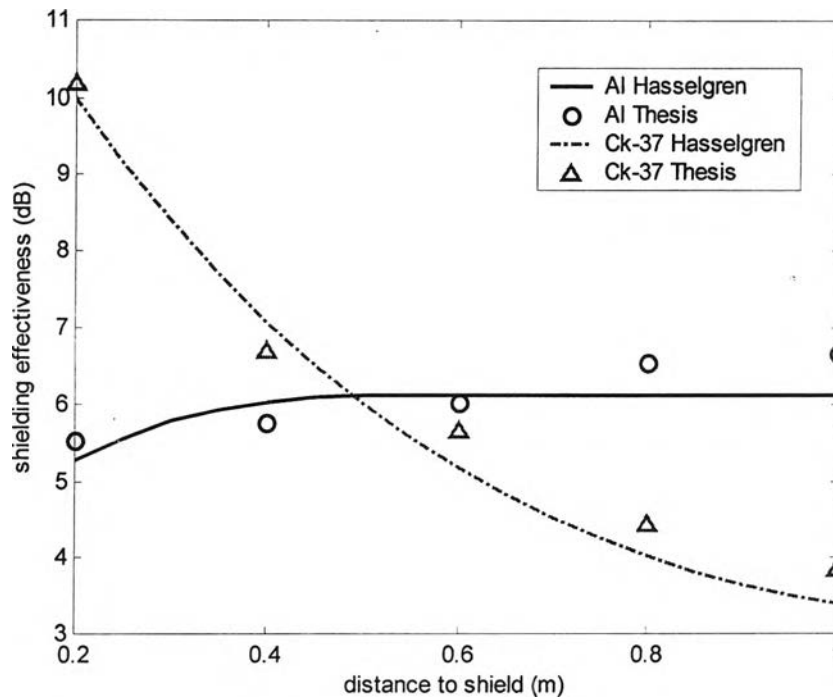


รูปที่ 5.2 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการชิลด์ของ Hasselgren and Luomi (1995)

โดยเป็นการเทียบระหว่างผลการคำนวณ (—) กับผลการทดลอง (X, Δ, O, ●)

I คือ กรณีวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กมีรูปร่างแผ่นระนาบ

II คือ กรณีวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กมีรูปร่าง 3 ด้านวางเหลื่อมกัน

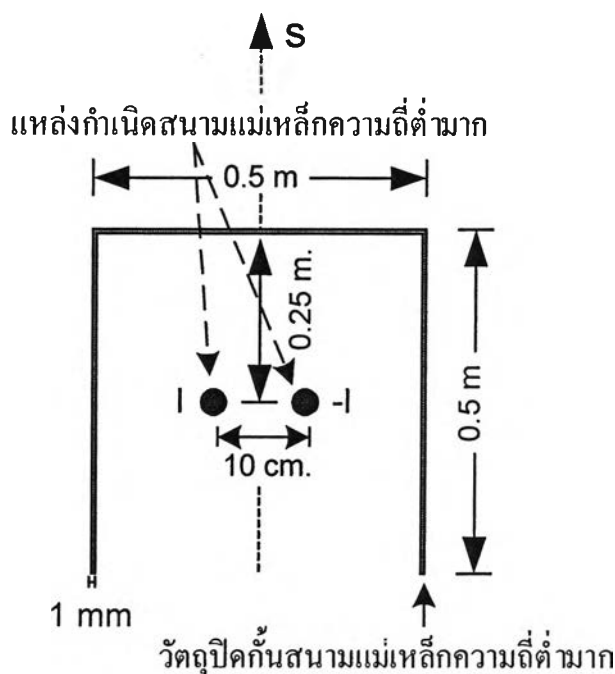


รูปที่ 5.3 ผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการชิลด์ในกรณีแผ่นระนาบโดยเทียบกับผลการทดลองของ Hasselgren and Luomi (1995)

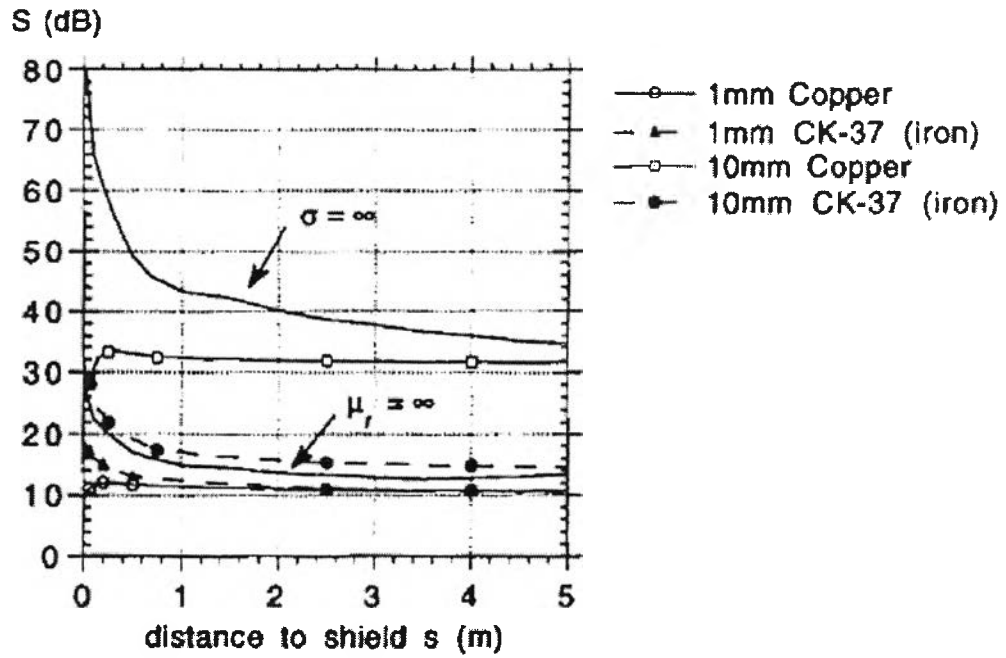
จากรูปที่ 5.3 แสดงผลการคำนวณค่าประสิทธิผลการชิลด์ในกรณีวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็ก ความถี่ต่ำมากมีรูปร่างแผ่นระนาบเทียบกับผลการทดลองของ Hasselgren and Luomi (1995) โดยค่าประสิทธิการชิลด์ที่คำนวณจะมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองของงานวิจัยที่นำเสนอ ความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณเกิดขึ้นจากขนาดของอีลีเมนต์ที่ใช้หาผลเฉลย โดยตำแหน่งที่เกิดความคลาดเคลื่อนมากที่สุด คือ ตำแหน่งที่ห่างจากวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก 1 เมตร

5.1.2 ตัวอย่างผลการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านเปิดด้านหนึ่ง (three-sided shields)

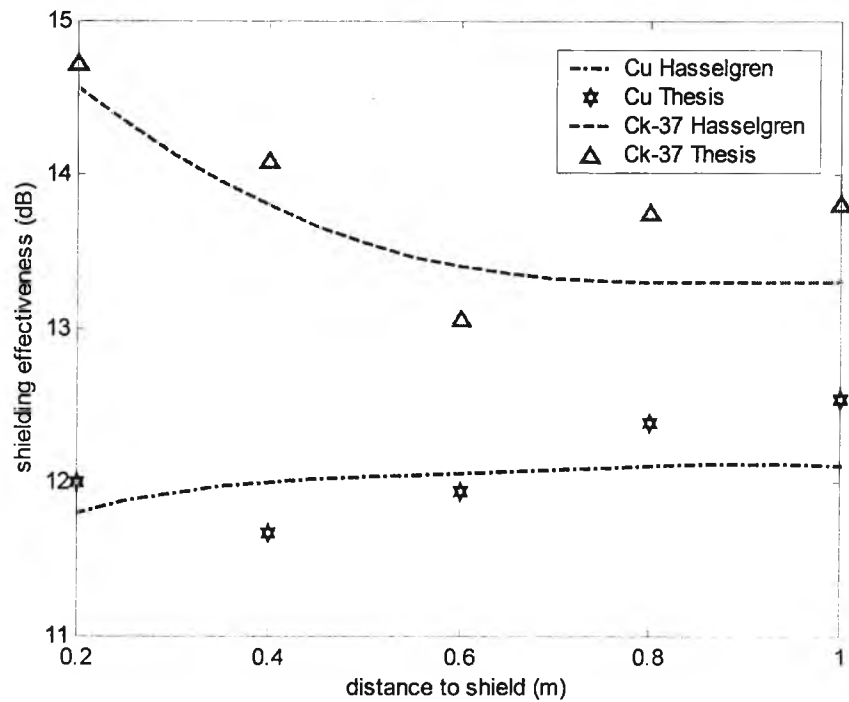
กำหนดให้วัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากมีความยาวแต่ละด้าน 50 เซนติเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากมีลักษณะเป็นเส้นกระแสยาวอนันต์ 2 เส้น (infinitely long double-conductor source) ขนาด 1 A/m^2 วางห่างกัน 10 เซนติเมตร ตรงกลางวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก ดังรูปที่ 5.4 ขอบเขตภายนอกมีขนาด 20×20 เมตร จำนวนอีลีเมนต์ที่ใช้หาผลเฉลยเท่ากับ 1,464 อีลีเมนต์ จำนวนโนดเท่ากับ 3,105 โหนด ค่าประสิทธิผลการชิลด์ที่ความถี่ 50 Hz ในทิศทาง S ทุกๆ ระยะ 20 เซนติเมตรจากวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก



รูปที่ 5.4 การปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากในกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านเปิดด้านหนึ่ง



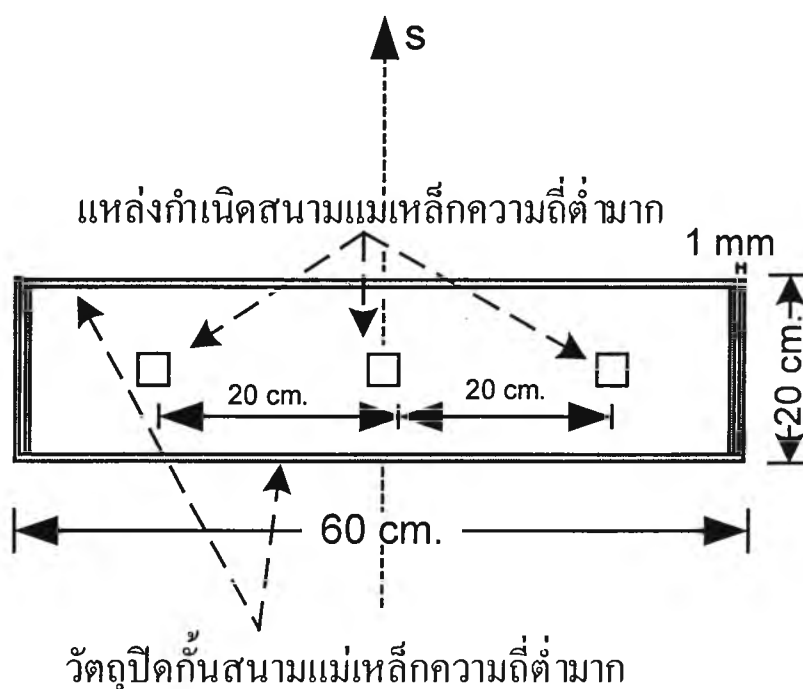
รูปที่ 5.5 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการชดเชยของ Hasselgren and Luomi (1995)
กรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านเปิดด้านหนึ่ง



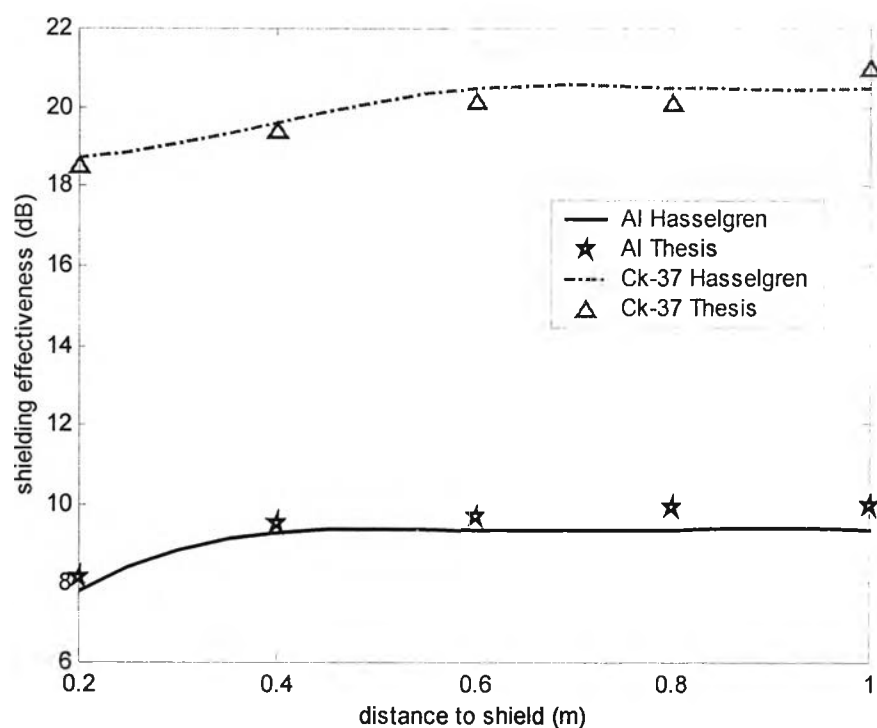
รูปที่ 5.6 ผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการชดเชยในกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านเปิดด้านหนึ่ง
โดยเทียบกับผลการคำนวณของ Hasselgren and Luomi (1995)

5.1.3 ตัวอย่างผลการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านเปิดด้านหนึ่ง 2 อันวางเหลื่อมกัน (two overlapping three-sided shields)

กำหนดให้วัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากมีขนาด 20X60 เซนติเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร วัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กทั้งสองวางเหลื่อมกันเล็กน้อย แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากจะมีลักษณะเป็นเส้นกระแสยาวอนันต์ 3 เส้นวางเรียงกัน แต่ละเส้นกระแสมีขนาดเท่ากับ 1 A/m^2 แต่ละเส้นห่างกัน 20 เซนติเมตร มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 20X20 มิลลิเมตร และวางห่างจากวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก 10 เซนติเมตร ดังรูป 5.7 ขอบเขตภายนอกมีขนาด 20X20 เมตร จำนวนอิลีเมนต์ที่ใช้หาผลเฉลยเท่ากับ 1,600 อิลีเมนต์ จำนวน โหนด 3,273 โหนดและคำนวณค่าประสิทธิภาพการชีลด์ที่ความถี่ 50 Hz ในทิศทาง S ทุกๆ ระยะ 20 เซนติเมตรจากวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก



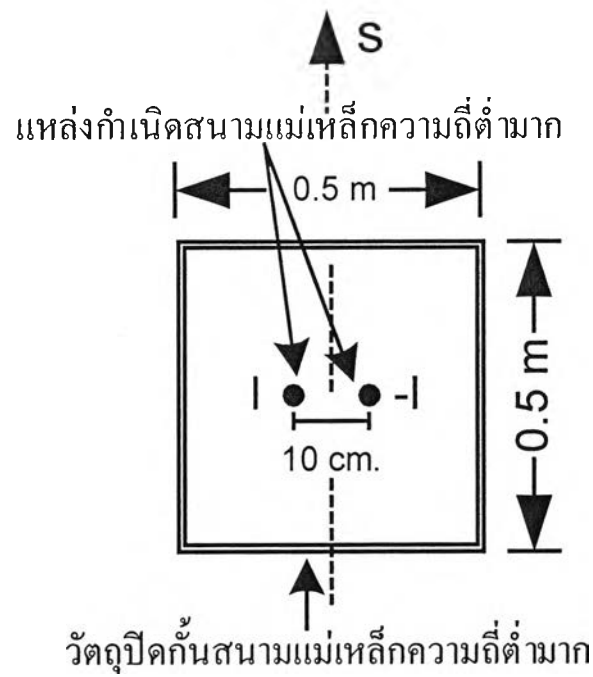
รูปที่ 5.7 การปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากในกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีลักษณะ
ด้านเปิดด้านหนึ่ง 2 อันวางเหลื่อมกัน



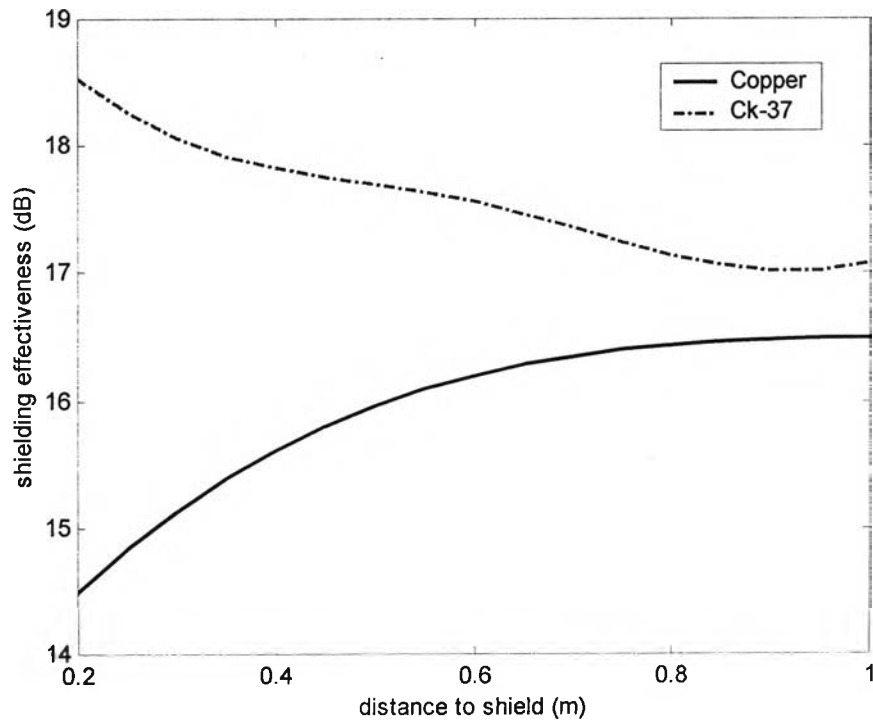
รูปที่ 5.8 ผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการชิลด์ในกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านเปิดด้านหนึ่ง 2 อันวางเหลื่อมกัน โดยเทียบกับผลการทดลองของ Hasselgren and Luomi (1995) (รูปที่ 5.2)

5.1.4 ตัวอย่างผลการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular shield)

กำหนดให้วัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากมีความยาวแต่ละด้าน 50 เซนติเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากมีลักษณะเป็นเส้นกระแสยาวอนันต์ 2 เส้น (infinitely long double-conductor source) ขนาด 1 A/m^2 วางห่างกัน 10 เซนติเมตร ตรงกลางวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากดังรูปที่ 5.9 ขอบเขตภายนอกมีขนาด 20×20 เมตร จำนวนอีลีเมนต์ที่ใช้หาผลเฉลยเท่ากับ 1,444 อีลีเมนต์ จำนวนโนดเท่ากับ 3,105 โหนด และคำนวณค่าประสิทธิภาพชิลด์ที่ความถี่ 50 Hz ในทิศทาง S ทุกๆระยะ 20 เซนติเมตรจากวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก



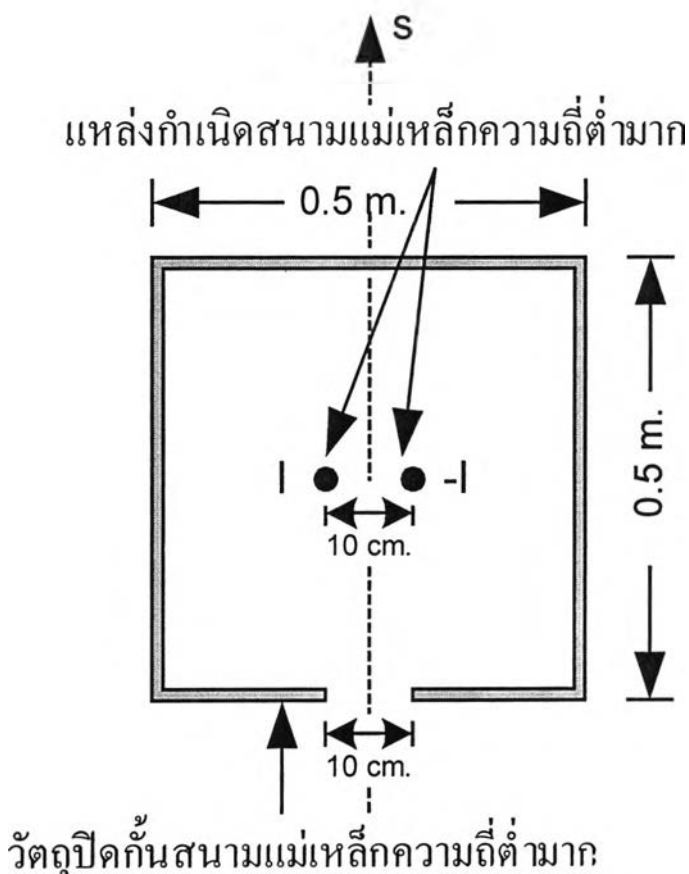
รูปที่ 5.9 การปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากในกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉาก



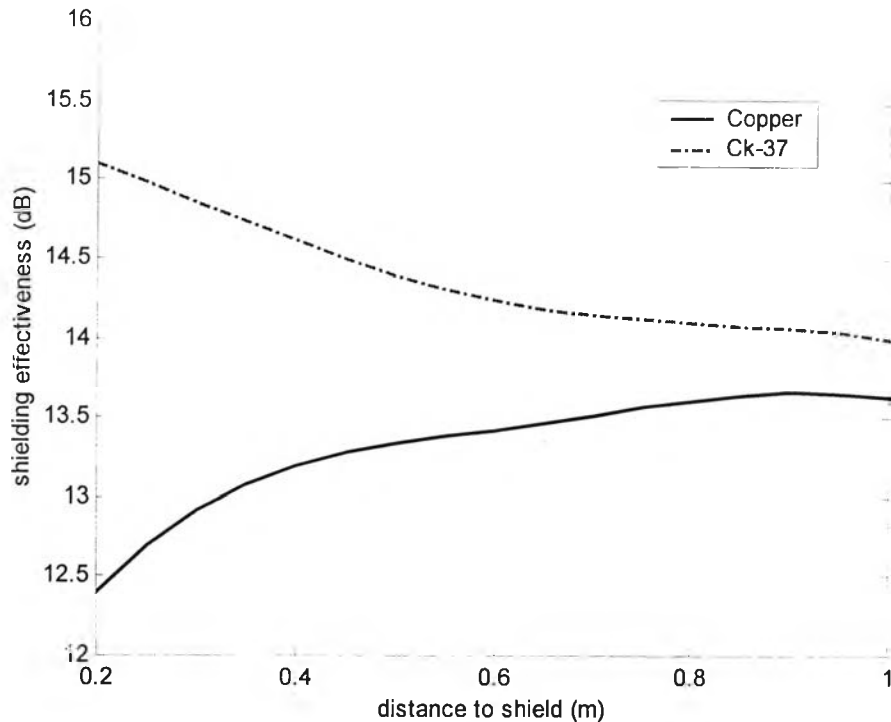
รูปที่ 5.10 ผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการชิลด์ในกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉาก

5.1.5 ตัวอย่างผลการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มี
การเจาะตรงกลางด้านหนึ่งเป็นช่องเปิด

กำหนดให้วัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากมีความยาวแต่ละด้าน 50 เซนติเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร และตรงกลางด้านหนึ่งของสี่เหลี่ยมมุมฉากมีการเจาะเป็นช่องเล็กๆ ขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากมีลักษณะเป็นเส้นกระแสนอนันต์ 2 เส้น (infinitely long double-conductor source) ขนาด 1 A/m^2 วางห่างกัน 10 เซนติเมตร ตรงกลางวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากดังรูปที่ 5.11 ขอบเขตภายนอกมีขนาด 20x20 เมตร จำนวนอิลีเมนต์ที่ใช้หาผลเฉลยเท่ากับ 1,448 อิลีเมนต์ จำนวนโนดเท่ากับ 3,105 โหนด และคำนวณค่าประสิทธิภาพการชีลด์ที่ความถี่ 50 Hz ในทิศทาง S ทุกๆ ระยะ 20 เซนติเมตรจากวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก



รูปที่ 5.11 การปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากในกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มี
การเจาะตรงกลางด้านหนึ่งเป็นช่องเปิด



รูปที่ 5.12 ผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการชิลด์ในกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มี
การเจาะตรงกลางด้านหนึ่งเป็นช่องเปิด

5.2 ผลการศึกษาค่าปัจจัยที่มีผลต่อการปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก

การศึกษาค่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการชิลด์ ได้แก่

1. ความซาบซึมได้ (permeability : μ_r)
2. สภาพนำไฟฟ้า (conductivity : σ)
3. ความถี่ (frequency : f)
4. ความหนา (thickness : d)

5. ระยะห่างของวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก-
ความถี่ต่ำมาก

รูปร่างของวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่นำมาทดสอบ คือ แผ่นระนาบ ซึ่งจะมีการกำหนดลักษณะต่างๆเช่นเดียวกับการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากกรณีแผ่นระนาบ ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งจะคำนวณค่าประสิทธิภาพการชิลด์ที่ความถี่ 50 Hz ในแนวทิศทาง S ที่ระยะห่างจากวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก 50 เซนติเมตร

5.2.1 ความซาบซึมได้ (permittivity : μ_r)

จุดประสงค์ของหัวข้อนี้เป็นการศึกษาว่า ความซาบซึมได้มีผลต่อค่าประสิทธิผลการชีลด์หรือไม่ โดยวัสดุที่จะนำมาใช้ทดสอบ คือ วัสดุแม่เหล็ก ซึ่งคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็ก คือ มีความซาบซึมได้สูง (high permeability) ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลการชีลด์กับความซาบซึมได้แสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลการชีลด์กับความซาบซึมได้

วัสดุ	ความซาบซึมได้ (μ_r)	ค่าประสิทธิผลการชีลด์ (dB)
Cobalt	250	2.13
Nickel	600	2.96
Mild steel	2,000	5.96
Iron	5,000	10.53
Silicon iron	7,000	12.24
Alloy	10,000	13.01

หมายเหตุ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุชนิดต่างๆอ้างอิงจาก (Balanis, 1989)

จากตารางที่ 5.2 จะเห็นว่า วัสดุแม่เหล็กที่มีค่าซาบซึมได้สูง ค่าประสิทธิผลการชีลด์ที่คำนวณได้จะมีค่าสูงกว่าวัสดุแม่เหล็กที่มีค่าซาบซึมได้ต่ำ ซึ่งแสดงว่าวัสดุที่มีความซาบซึมได้สูงสามารถที่จะปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากได้ดี ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ค่าประสิทธิผลการชีลด์จะขึ้นอยู่กับค่าซาบซึมได้ของวัสดุที่นำมาทำหน้าที่ปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากด้วย

5.2.2. สภาพนำไฟฟ้า (conductivity : σ)

จุดประสงค์ของหัวข้อนี้เป็นการศึกษาว่า สภาพนำไฟฟ้ามีผลต่อค่าประสิทธิผลการชีลด์หรือไม่ วัสดุที่จะนำมาใช้ทดสอบ คือ วัสดุตัวนำ ซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า คือ สภาพนำไฟฟ้าสูง (high conductivity) ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลการชีลด์กับสภาพนำไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลการชีลด์กับสภาพนำไฟฟ้า

วัสดุ	สภาพนำไฟฟ้า : σ (S/m)	ค่าประสิทธิผลการชีลด์ (dB)
Zinc	$1.7 \cdot 10^7$	2.21
Brass	$2.56 \cdot 10^7$	2.84
Aluminium	$3.96 \cdot 10^7$	5.85
Gold	$4.1 \cdot 10^7$	6.18
Copper	$5.76 \cdot 10^7$	11.02
Silver	$6.1 \cdot 10^7$	11.32

หมายเหตุ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุชนิดต่างๆอ้างอิงจาก (Balanis, 1989)

จากตารางที่ 5.3 จะเห็นว่า วัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงๆค่าประสิทธิผลการชีลด์ที่คำนวณได้จะมีค่าสูงกว่าวัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำ ซึ่งแสดงว่า สามารถที่จะปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากได้ดีกว่าวัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ค่าประสิทธิผลการชีลด์จะขึ้นอยู่กับสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาทำหน้าที่ปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก

5.2.3. ความถี่ (frequency : f)

จุดประสงค์ของหัวข้อนี้เป็นการศึกษาว่า ความถี่มีผลต่อค่าประสิทธิผลการชีลด์หรือไม่ โดยใช้วัสดุอลูมิเนียม ($\sigma = 3.96 \cdot 10^7$ S/m) มาเป็นวัสดุทดสอบและวัดค่าประสิทธิผลการชีลด์ห่างจากวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก 50 เซนติเมตรเช่นเดียวกับกรณีของความขบขิมได้และสภาพนำไฟฟ้า ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลการชีลด์กับความถี่แสดงได้ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการซึบกับความถี่

ความถี่ (Hz)	ค่าประสิทธิภาพการซึบ (dB)
50	5.85
60	6.70
100	9.36
200	10.11
300	10.33
1,000	10.72

จากตารางที่ 5.4 จะเห็นว่า ถ้าเพิ่มความถี่ในการทดสอบค่าประสิทธิภาพการซึบให้มีค่ามากขึ้น ค่าประสิทธิภาพการซึบที่คำนวณได้จะมีค่ามากขึ้นด้วย ซึ่งหมายความว่า สามารถที่จะปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากได้ดีขึ้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ความถี่จะมีผลต่อค่าประสิทธิภาพการซึบในการปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก

5.2.4. ความหนา (thickness : d)

จุดประสงค์ของหัวข้อนี้เป็นการศึกษาว่า ความหนามีผลต่อค่าประสิทธิภาพการซึบหรือไม่ โดยใช้วัสดุอลูมิเนียม ($\sigma=3.96 \times 10^7 \text{ S/m}$) มาเป็นวัสดุทดสอบ กำหนดค่าประสิทธิภาพการซึบห่างจากวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก 50 เซนติเมตร ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการซึบกับความหนาแสดงได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการซึบกับความหนา

ความหนา (mm)	ค่าประสิทธิภาพการซึบ (dB)
1	5.85
2	7.43
3	9.97
4	10.12
5	10.58
6	11.07

จากตารางที่ 5.5 จะเห็นว่า ถ้าวัสดุที่นำมาทำหน้าที่ปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากมีความหนาเพิ่มขึ้น ค่าประสิทธิภาพการชิลด์ที่คำนวณได้จะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่า สามารถที่จะปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากได้ดีขึ้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ความหนาของวัสดุที่นำมาทำหน้าที่ปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากจะมีผลต่อค่าประสิทธิภาพการชิลด์

5.2.5. ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก

จุดประสงค์ของหัวข้อนี้เป็นการศึกษาว่า ระยะห่างของวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากมีผลต่อค่าประสิทธิภาพการชิลด์หรือไม่ โดยใช้วัสดุอลูมิเนียม ($\sigma=3.96 \times 10^7 \text{ S/m}$) มาเป็นวัสดุทดสอบ กำหนดค่าประสิทธิภาพการชิลด์ห่างจากวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก 50 เซนติเมตร ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการชิลด์กับระยะห่างของวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก แสดงได้ดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกับค่าประสิทธิภาพการชิลด์กับระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก

ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก- ความถี่ต่ำมาก (cm)	ค่าประสิทธิภาพการชิลด์ (dB)
10	5.85
20	6.72
30	7.02
40	7.42
50	7.83

จากตารางที่ 5.6 จะเห็นว่า เมื่อเปลี่ยนระยะการวางวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากให้ห่างมากขึ้น ค่าประสิทธิภาพการชิลด์ที่คำนวณได้จะมีค่ามากขึ้นด้วย แต่ไม่ได้หมายความว่า จะสามารถปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากได้ดี เนื่องจากตำแหน่งที่ห่างจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากมาก การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่เกิดขึ้นจะน้อย และตำแหน่งที่ห่างจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำ-

มากเป็นระยะไกลในวิทยานิพนธ์นี้อีลีเมนต์ที่แบ่งจะมีขนาดใหญ่ จึงทำให้ประสิทธิภาพการซีลด์ที่คำนวณได้จึงมีค่ามาก

5.3 บทสรุป

จากแนวคิดที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์สามารถที่จะนำมาวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากได้ โดยเห็นได้จากค่าประสิทธิภาพการซีลด์ที่คำนวณได้เทียบกับผลการคำนวณและผลการทดลองของงานวิจัยในอดีตจะมีค่าใกล้เคียงกัน แม้ว่าจะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอยู่บ้างก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของอีลีเมนต์ที่ใช้หาผลเฉลยมีขนาดค่อนข้างใหญ่จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพการซีลด์ที่คำนวณได้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น นอกจากนี้จะพบว่าค่าประสิทธิภาพการซีลด์จะมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางไฟฟ้า ความถี่ ความหนา และระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากของวัสดุที่นำมาทำหน้าที่เป็นวัสดุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากด้วย