

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมารอบตัวนำบางโดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์
กับวิธีบาวน์คาร์อีลีเมนต์



นายชัยรัตน์ วิเชียรมงคลกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดำเนินการตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0414-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- 7 ก.ธ. 2548

I 20600471

ANALYSIS OF EXTREMELY LOW FREQUENCY MAGNETIC FIELDS
AROUND THIN CONDUCTIVE PLATES BY
HYBRID FINITE ELEMENT-BOUNDARY ELEMENT METHOD

Mr. Chairat Wichianmongkonkun

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0414-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากรอบตัวนำบางโดย
วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับวิธีบาวนด์รีอีลีเมนต์

โดย

นายชัยรัตน์ วิเชียรมงคลกุล

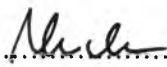
สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า


อาจารย์ที่ปรึกษา


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

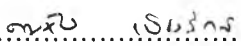
.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.ตำรวจ ตั้งษ์สะอาด)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรัชนี)

ชัยรัตน์ วิเชียรมงคลกุล : การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากรอบตัวนำบางโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับวิธีบาวนด์ารีอีลิเมนต์ (ANALYSIS OF EXTREMELY LOW FREQUENCY MAGNETIC FIELDS AROUND THIN CONDUCTIVE PLATES BY HYBRID FINITE ELEMENT-BOUNDARY ELEMENT METHOD) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ทับทิม อ่างแก้ว, 75 หน้า, ISBN 974-03-0414-1.

การลดผลของการรบกวนเนื่องจากสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากสามารถทำได้โดยอาศัยวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก โดยที่ค่าประสิทธิผลการชิลด์หาได้จากการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากก่อนและหลังการมีวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับวิธีบาวนด์ารีอีลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปัญหานี้ เนื่องจากจะทำให้ทราบผลเฉลยสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่เกิดขึ้นตลอดโดเมนปัญหา โดยผลเฉลยรอบวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากหาได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ขณะที่ผลเฉลยบริเวณเงื่อนไขขอบเขตเปิดโล่งหาได้จากวิธีบาวนด์ารีอีลิเมนต์ อย่างไรก็ตามกรณีที่วัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากมีลักษณะผิวบาง การแบ่งเนื้อวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากออกเป็นอีลิเมนต์สามเหลี่ยมจะประสบปัญหาจำนวนอีลิเมนต์ที่แบ่งจะมีจำนวนมาก วิทยานิพนธ์นี้จึงได้เสนออีลิเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าในเนื้อวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากเพื่อลดจำนวนการแบ่งอีลิเมนต์ลง ค่าประสิทธิผลการชิลด์ของวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากรูปร่างต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์โดยแนวคิดนี้ จะถูกเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากบทความที่นำเสนอมาก่อนหน้า นอกจากนี้ยังได้ศึกษาค่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าประสิทธิผลการชิลด์ อาทิเช่น ความซาบซึมได้ สภาพนำไฟฟ้า ความถี่ ความหนาและระยะห่างของวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก

ผลการศึกษาพบว่าวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับวิธีบาวนด์ารีอีลิเมนต์ โดยใช้อีลิเมนต์สามเหลี่ยมรอบวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากร่วมกับอีลิเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าภายในเนื้อวัตถุปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากจะให้ค่าประสิทธิผลการชิลด์ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์และผลการวัดที่ได้นำเสนอในบทความก่อนหน้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2544ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาพร้อม
.....

4070542421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORLD : MAGNETIC SHIELDING / HYBRID FINITE ELEMENT-BOUNDARY
ELEMENT METHODS/

CHAIRAT WICHIANMONGKONKUN : ANALYSIS OF EXTREMELY LOW
FREQUENCY MAGNETIC FIELDS AROUND THIN CONDUCTIVE PLATES BY
HYBRID FINITE ELEMENT-BOUNDARY ELEMENT METHOD. THESIS
ADVISOR : ASSIST. PROF. TUPTIM ANGKAEW. Ph.D. 75 PP. ISBN 974-03-0414-1.

The interference due to the extremely low frequency magnetic fields can be reduced by using the magnetic shield materials. Shielding effectiveness can be found from the analysis of the extremely low frequency magnetic fields before and after using the magnetic shield materials. The hybrid finite element and boundary element method is a suitable numerical method in analysing this problem. Because the magnetic fields can be found through the entire domain. Where the solution around the magnetic shield is found from the finite element method while the solution at the open boundary is found from the boundary element method. In the case of the thin plate of magnetic shield, however, dividing the magnetic shield into the triangular elements results in the large number of elements. This thesis presents the rectangular element in the thin plate of magnetic shield to reduce the number of the elements. Shielding effectiveness of the various shape magnetic shields calculated from the analysis using this concept is compared to the results from the previous paper. Apart from the comparison, The effects on the shielding effectiveness due to various factors such as, the permeability, the conductivity, the frequency, the thickness and the distance of the magnetic shield from the magnetic field source are studied.

It is found that The hybrid finite element and boundary element method using the triangular elements around the magnetic shield and rectangular elements in the thin plate magnetic shield gives the results close to the numerical and measured results from the previous paper.

Department Electrical Engineering Student's Signature *Chairat Yi*
Field of study Electrical Engineering Advisor's Signature *Tuptim Angkawe*
Academic year 2001 Co advisor's Signature *S. Saphan*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำการวิจัย แนวทางการวิจัย ตลอดจนคำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆในการวิจัยเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด ผู้อำนวยการศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ตลอดจนอุปการณ์ดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ คุณศุภเชษฐ์ เพิ่มพูนวัฒนาสุข และคุณธีรศักดิ์ อนันตกุล นิสิตปริญญาเอก ห้องปฏิบัติการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้สละเวลาในการให้คำปรึกษา คำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆในการทำวิจัยเป็นอย่างดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ คุณปิยะบุตร พฤษานาบาล และเจ้าหน้าที่ศูนย์เชี่ยวชาญฯ สำหรับความช่วยเหลือในการจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ห้องปฏิบัติการคลื่นแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้ให้คำปรึกษาและกำลังใจในการทำวิจัย

สุดท้ายผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาข้าพเจ้าที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านทุนทรัพย์ และกำลังใจต่างๆเป็นอย่างดี ตลอดจนน้องๆทั้งหลายของข้าพเจ้า

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 กลไกการปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก.....	2
1.2 การศึกษางานวิจัยในอดีต.....	5
1.3 แนวทางและขอบเขตการวิจัย.....	7
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	10
2. วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับวิธีบาวน์คาร์อีลีเมนต์.....	11
2.1 สมการพื้นฐานการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก.....	11
2.2 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากกรณีปัญหา 2 มิติ.....	15
2.3 วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับวิธีบาวน์คาร์อีลีเมนต์.....	16
2.4 ตัวอย่างการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับวิธี บาวน์คาร์อีลีเมนต์.....	18
2.5 บทสรุป.....	22
3. วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์.....	23
3.1 การหาผลเฉลยสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์.....	24
3.2 อีลีเมนต์สามเหลี่ยม.....	27
3.3 ตัวอย่างผลการคำนวณสนามแม่เหล็กแม่เหล็กความถี่ต่ำมากด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์.....	29
3.4 อีลีเมนต์สี่เหลี่ยม.....	31
3.5 บทสรุป.....	34
4. วิธีบาวน์คาร์อีลีเมนต์.....	36
4.1 สมการบาวน์คาร์อินทิกรัล.....	36
4.2 การหาผลเฉลยสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากด้วยวิธีบาวน์คาร์อีลีเมนต์.....	40
4.3 บทสรุป.....	45

5. ตัวอย่างผลการคำนวณปัญหาสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก	46
5.1 ตัวอย่างผลการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก	47
5.1.1 ตัวอย่างผลการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากกรณีแผ่นระนาบ	48
5.1.2 ตัวอย่างผลการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มี ด้านเปิดด้านหนึ่ง	50
5.1.3 ตัวอย่างผลการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มี ด้านเปิดด้านหนึ่ง 2 อันวางเหลื่อมกัน	52
5.1.4 ตัวอย่างผลการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉาก	53
5.1.5 ตัวอย่างผลการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มี การเจาะตรงกลางด้านหนึ่งเป็นช่องเปิด	55
5.2 ผลการศึกษาค่าปัจจัยที่มีผลต่อการปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก	56
5.2.1 ความซาบซึมได้	57
5.2.2. สภาพนำไฟฟ้า	57
5.2.3. ความถี่	58
5.2.4. ความหนา	59
5.2.5. ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก	60
5.3 บทสรุป	61
6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	62
6.1 บทสรุป	62
6.2 ข้อเสนอแนะ	63
รายการอ้างอิง	64
ภาคผนวก	66
ภาคผนวก ก	67
ภาคผนวก ข	68
ภาคผนวก ค	71
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	75

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 5.1	
คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาเป็นตัวอย่างในการคำนวณ สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก.....	48
ตารางที่ 5.2	
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการชี้วัดกับความซาบซึมได้.....	57
ตารางที่ 5.3	
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการชี้วัดกับสภาพนำไฟฟ้า.....	58
ตารางที่ 5.4	
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการชี้วัดกับความถี่.....	59
ตารางที่ 5.5	
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการชี้วัดกับความหนา.....	59
ตารางที่ 5.6	
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการชี้วัดกับระยะห่างจาก แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก.....	60
ตารางที่ ข.1	
.....	69
ตารางที่ ข.2	
.....	70

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1.1	การนำวัสดุแม่เหล็กหรือวัสดุตัวนำมาปิดกั้นหรือลดสนามแม่เหล็ก ความถี่ต่ำมาก.....	2
รูปที่ 1.2	ลักษณะการลดลงของสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่เกิดขึ้นจากกลไก การปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก ก.The flux shunting shielding mechanism.....	4
	ข.The induce current shielding mechanism.....	4
รูปที่ 2.1	แบบจำลองคณิตศาสตร์การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก.....	12
รูปที่ 2.2	แบบจำลองคณิตศาสตร์การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก กรณีปัญหา 2 มิติ.....	15
รูปที่ 2.3	แนวคิดของวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับวิธีบาวน์คาร์อีลิเมนต์.....	16
รูปที่ 2.4	ตำแหน่งตัวแปรที่ไม่ทราบค่า.....	17
รูปที่ 2.5	แบบจำลองการคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่เกิดจากกระแสไหล เป็นเส้นตรงยาวอนันต์.....	19
รูปที่ 2.6	การแบ่งโดเมนที่ต่อเนื่องของปัญหาออกเป็นอีลิเมนต์สามเหลี่ยมกรณี สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่เกิดจากกระแสไหลเป็นเส้นตรงยาวอนันต์.....	20
รูปที่ 2.7	เปรียบเทียบระยะการแบ่งอีลิเมนต์ระหว่างวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และวิธี ไฟไนต์อีลิเมนต์กับบาวน์คาร์อีลิเมนต์ ก. ระยะการแบ่งอีลิเมนต์ของวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์.....	20
	ข. ระยะการแบ่งอีลิเมนต์ของวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับบาวน์คาร์อีลิเมนต์.....	20
รูปที่ 2.8	เปรียบเทียบผลการคำนวณความเข้มสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากระหว่าง วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับวิธีบาวน์คาร์อีลิเมนต์กับวิธีเชิงวิเคราะห์และ วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์.....	21
รูปที่ 3.1	ลักษณะการแบ่ง โดเมนที่ต่อเนื่องออกเป็นอีลิเมนต์เล็กๆ.....	24
รูปที่ 3.2	อีลิเมนต์สามเหลี่ยมและตัวแปรที่ไม่ทราบค่า.....	28
รูปที่ 3.3	การคำนวณสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่เกิดจากกระแสไหล เป็นเส้นตรงยาวอนันต์.....	30

รูปที่ 3.4	ตัวอย่างการแบ่งโดเมนการคำนวณความเข้มข้นแม่เหล็กความถี่ต่ำมาก ที่เกิดจากกระแสไหลเป็นเส้นตรงยาวอนันต์ออกเป็นอีลีเมนต์สามเหลี่ยม.....	30
รูปที่ 3.5	เปรียบเทียบผลเฉลยความเข้มข้นแม่เหล็กความถี่ต่ำมากที่เกิดจาก กระแสไหลเป็นเส้นตรงยาวอนันต์ระหว่างวิธีเชิงวิเคราะห์และ วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์.....	31
รูปที่ 3.6	อีลีเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าและตัวแปรที่ไม่ทราบ.....	32
รูปที่ 3.7	อีลีเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าในพิกัด (ξ, η)	33
รูปที่ 3.8	ลักษณะของการใช้อีลีเมนต์สี่เหลี่ยมร่วมกับอีลีเมนต์สามเหลี่ยม.....	34
รูปที่ 4.1	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบน Γ และการพิจารณาโดเมนปัญหา 2 มิติ.....	38
รูปที่ 4.2	ลักษณะการแบ่งขอบเขตออกเป็นขอบเขตย่อยๆ.....	40
รูปที่ 4.3	ลักษณะฟังก์ชันรูปร่างอันดับสอง.....	41
รูปที่ 5.1	การปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากในกรณีแผ่นระนาบ.....	48
รูปที่ 5.2	ตัวอย่างผลการคำนวณค่าประสิทธิผลการชีลด์ของ Hasselgren and Luomi (1995) โดยเป็นการเทียบระหว่างผลการคำนวณ (—) กับผลการทดลอง (X, Δ , O, \bullet).....	49
รูปที่ 5.3	ผลการคำนวณค่าประสิทธิผลการชีลด์ในกรณีแผ่นระนาบ โดยเทียบกับ ผลการทดลองของ Hasselgren and Luomi (1995).....	49
รูปที่ 5.4	การปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากในกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้าน เปิดด้านหนึ่ง.....	50
รูปที่ 5.5	ตัวอย่างผลการคำนวณค่าประสิทธิผลการชีลด์ของ Hasselgren and Luomi (1995) กรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านเปิดด้านหนึ่ง.....	51
รูปที่ 5.6	ผลการคำนวณค่าประสิทธิผลการชีลด์ในกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้าน เปิดด้านหนึ่ง โดยเทียบกับผลการคำนวณของ Hasselgren and Luomi (1995).....	51
รูปที่ 5.7	การปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากในกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้าน เปิดด้านหนึ่ง 2 อันวางเหลื่อมกัน.....	52
รูปที่ 5.8	ผลการคำนวณค่าประสิทธิผลการชีลด์ในกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านเปิด ด้านหนึ่ง 2 อันวางเหลื่อมกัน โดยเทียบกับผลการทดลองของ Hasselgren and Luomi(1995).....	53
รูปที่ 5.9	การปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากในกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉาก.....	54
รูปที่ 5.10	ผลการคำนวณค่าประสิทธิผลการชีลด์ในกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉาก.....	54

รูปที่ 5.11	การปิดกั้นสนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากในกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มี การเจาะตรงกลางด้านหนึ่งเป็นช่องเปิด.....	55
รูปที่ 5.12	ผลการคำนวณค่าประสิทธิผลการชี้ลัดในกรณีสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มี การเจาะตรงกลางด้านหนึ่งเป็นช่องเปิด.....	56
รูปที่ ค.1	ลักษณะปัญหาการนำความร้อนบนแผ่นโลหะสี่เหลี่ยม.....	71
รูปที่ ค.2	เปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิระหว่างวิธีเชิงวิเคราะห์กับวิธี บาวนด์คาร์อิติเมนต์.....	72
รูปที่ ค.3	ลักษณะปัญหาการไหลของความร้อนบนแผ่นโลหะสี่เหลี่ยม.....	73
รูปที่ ค.4	เปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิระหว่างการประมาณค่าตอบด้วย ฟังก์ชันเชิงเส้นกับอิติเมนต์ชนิดฟังก์ชันรูปร่างอันดับสอง.....	73