

ประสิทธิภาพของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ไอแกนโมด
ในท่อนำคลื่นแบบแอนไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย



นาย ชัยรัตน์ พินทอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

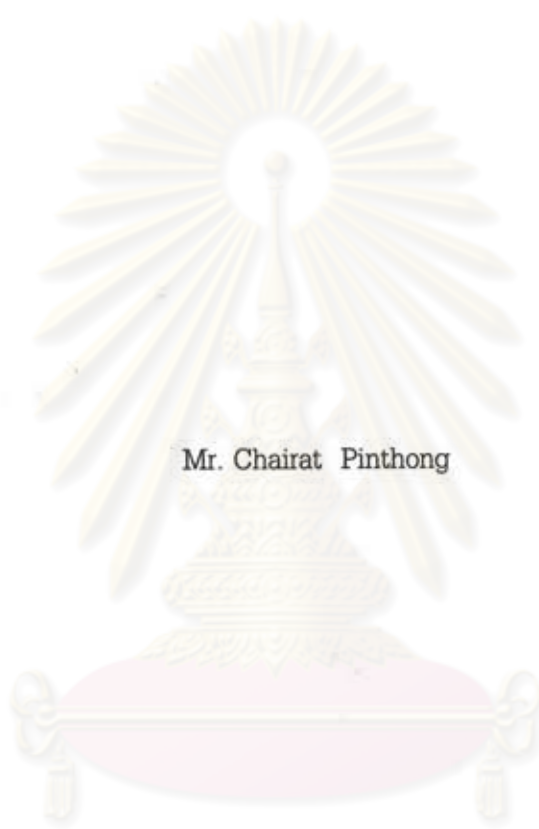
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-635-396-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFICIENCY OF FINITE ELEMENT ANALYSIS OF EIGENMODES
IN LOSSLESS ANISOTROPIC WAVEGUIDES



Mr. Chairat Pinthong

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1996

ISBN 974-635-396-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ประสิทธิภาพของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ไอแกนโมด
ในท่อนำคลื่นแบบแอนไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย

โดย

นายชัยรัตน์ พินทอง

ภาควิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุภวัฒน์ ชุตินวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยพัฒน์)



พิมพ์ต้นฉบับบทความวิจัยวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ชัยรัตน์ พินทอง : ประสิทธิภาพของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ไอเกนโหมดในท่อนำคลื่นแบบแอนไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย (EFFICIENCY OF FINITE ELEMENT ANALYSIS OF EIGENMODES IN LOSSLESS ANISOTROPIC WAVEGUIDES)
 อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว, 252 หน้า. ISBN 974-635-396-9

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์สำหรับวิเคราะห์ไอเกนโหมดในท่อนำคลื่นแบบแอนไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย ของวิธีที่ได้เสนอไว้ในช่วงระยะเวลาประมาณ 10 ปีที่ผ่านมา และมีการยอมรับอย่างกว้างขวางดังต่อไปนี้

1. วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ
2. วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ
3. วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ
4. วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าตามขวาง 2 องค์ประกอบ
5. วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน
6. วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง

ผลการวิจัยพบว่า จากการตรวจสอบในปัญหาท่อนำคลื่นแบบเดียวกัน วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน เมื่อได้รับการปรับปรุงจากผู้เสนอวิทยานิพนธ์ ให้ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบแอนไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสียสูงสุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
 ปีการศึกษา 2539

ลายมือชื่อนิสิต ชัยรัตน์ พินทอง
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา Tapd
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม Tapd

C615450 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: WAVEGUIDE / FINITE ELEMENT

CHAIRAT PINTHONG : EFFICIENCY OF FINITE ELEMENT ANALYSIS OF
EIGENMODES IN LOSSLESS ANISOTROPIC WAVEGUIDES.

THESIS ADVISOR : TUPTIM ANGKAEW, Dr.Eng.

252 pp. ISBN 974-635-396-9

This thesis has the objective on efficiency comparison of the finite element analysis of eigenmodes in lossless anisotropic waveguides, which are well known and widely accepted in the past decade. These proposed methods are

1. Finite Element Method (FEM) using three magnetic field components.
2. FEM using three electric field components.
3. FEM using transverse magnetic field components.
4. FEM using transverse electric field components.
5. FEM using tangential and axial electric field components.
6. FEM using transverse electric and magnetic field components.

In this thesis, all 6 methods mentioned above have been reviewed and tested by the same numerical examples. The result of comparison shows that the FEM using tangential and axial electric field components, with some modification by the author of this thesis, has the highest efficiency among other methods in analyzing lossless anisotropic waveguides.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา..... 2539

ลายมือชื่อนิสิต.....ไชรัตน์ ปิ่นทอง

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบหัวข้อวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เตชนครินทร์ รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ และอาจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยภาพนกร ที่ได้กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำต่างๆในการทำวิจัย

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและอา ของผู้วิจัย ที่สนับสนุนในด้านการเรียนและให้กำลังใจ เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ฐ
สารบัญรูป	ท
คำอธิบายสัญลักษณ์	ย
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมา	1
วัตถุประสงค์	4
วิธีดำเนินการและขอบเขตของการวิจัย	4
ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย	5
บทที่ 2 วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ	6
ความนำ	6
นิพจน์แปรผัน	7
วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์	9
ตรวจสอบความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ	10
ท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก	11
ท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม	17
ท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์	20
ท่อนำแสงแบบฝังในฉาบสเตรท	21
สรุป	34
บทที่ 3 วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ	36
ความนำ	36
นิพจน์แปรผัน	37
วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ตรวจสอบความสามารถในการวิเคราะห์ที่หน้าคลื่นของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้	
สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ	40
หน้าคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก	40
หน้าคลื่นกลางที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม	44
หน้าคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์	47
หน้าแสงแบบฝังในชั้นสเตรท	51
สรุป	52
บทที่ 4 วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ	53
ความนำ	53
นิพจน์แปรผัน	54
วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์	55
การกำจัดผลเฉลยปลอมเทียม	56
ตรวจสอบความสามารถในการวิเคราะห์ที่หน้าคลื่นของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้	
สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ	58
หน้าคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก	58
หน้าคลื่นกลางที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม	61
หน้าคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์	63
หน้าแสงแบบฝังในชั้นสเตรท	64
สรุป	77
บทที่ 5 วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าตามขวาง 2 องค์ประกอบ	78
ความนำ	78
นิพจน์แปรผัน	79
วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์	80
การกำจัดผลเฉลยปลอมเทียม	81
ตรวจสอบความสามารถในการวิเคราะห์ที่หน้าคลื่นของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้	
สนามไฟฟ้าตามขวาง 2 องค์ประกอบ	83
หน้าคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก	83

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ท่อนำคลื่นกลางที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม	89
ท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์	91
ท่อนำแสงแบบฝังในฉาบสเตรท	96
สรุป	97
บทที่ 6 วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน	98
ความนำ	98
รูปของกาเลอกิน	99
วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์	101
ตรวจสอบความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน	102
ท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก	103
ท่อนำคลื่นกลางที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม	105
ท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์	107
ท่อนำแสงแบบฝังในฉาบสเตรท	117
สรุป	132
บทที่ 7 วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง	134
ความนำ	134
นิพจน์แปรผัน	136
วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์	137
ตรวจสอบความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง	138
ท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก	139
ท่อนำคลื่นกลางที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม	141
ท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์	143
ท่อนำแสงแบบฝังในฉาบสเตรท	146
สรุป	153
บทที่ 8 การศึกษาเปรียบเทียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ในปัญหาท่อนำคลื่น	155
ความนำ	155

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เปรียบเทียบความแม่นยำและการลู่เข้าผลเฉลยแม่นยำตรงของค่า β/k_0	156
เปรียบเทียบการใช้จำนวนตัวแปรไม่ทราบค่าในสมการเมตริกซ์ของปัญหา ค่าเจาะจงมาตรฐาน	173
เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดผลเฉลยปลอมเทียม	178
เปรียบเทียบความสปาร์สของเมตริกซ์ในสมการของปัญหาค่าเจาะจง	183
บทที่ 9 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	197
สรุปผลการวิจัย	197
ความสามารถในการวิเคราะห์ที่นำคลื่นแบบแอนไอโซทรอปิก	197
ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ	198
ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่นยำ	200
ประสิทธิภาพในกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ที่นำคลื่น ที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้ง	202
ประสิทธิภาพในกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ที่นำคลื่น แบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็ก	205
ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ของกลุ่มวิธีที่มี ความสามารถในการวิเคราะห์ที่นำแสงแบบแอนไอโซทรอปิกไฟฟ้า	207
ประสิทธิภาพโดยรวม	210
ข้อเสนอแนะ	213
รายการอ้างอิง	215
ภาคผนวก	219
ภาคผนวก ก นิพจน์แปรผันของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ	220
ภาคผนวก ข นิพจน์แปรผันของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ	224
ภาคผนวก ค รูปของสมการในวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ	231
ภาคผนวก ง รูปสมการในวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าตามขวาง 2 องค์ประกอบ	235
ภาคผนวก จ รูปของสมการในวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน	242
ภาคผนวก ฉ อินทิกรัลของฟังก์ชันรูปร่าง	249
ประวัติผู้เขียน	252

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1	คุณลักษณะของผลเฉลยปลอมเทียม S_4 และโมดมูลฐาน (LSE_{10}) ที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ $\beta a = 1.0$ ตำแหน่ง $x = 1.125a$, $y = 0.375a$ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก เมื่อทำการแบ่งอีลิเมนต์ดังแสดงในรูป 2.3 โดยที่สัมประสิทธิ์พินอลดีเท่ากับ 1 (กำหนดให้ขนาดสูงสุดของสนามแม่เหล็กที่โนดบนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นมีค่าเท่ากับ 1) 14
2.2	ตัวอย่างของค่า β/k_0 ที่ $k_0 a = 3.0$ ที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และวิธีเชิงวิเคราะห์ รวมขนาดความผิดพลาด เมื่อทำการแบ่งอีลิเมนต์ดังแสดงในรูป 2.7 โดยที่สัมประสิทธิ์พินอลดีเท่ากับ 1 และ $1/0.75$ 16
2.3	ตัวอย่างของค่า β/k_0 ที่ $k_0 a = 4.0$ ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และวิธีเชิงวิเคราะห์ รวมขนาดความผิดพลาด เมื่อทำการแบ่งอีลิเมนต์ดังแสดงในรูป 2.7 โดยที่สัมประสิทธิ์พินอลดีเท่ากับ $1/0.70$ 18
2.4	คุณลักษณะของผลเฉลยปลอมเทียม S_4 และโมดมูลฐาน (TE_{11}) ที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ $\beta a = 1.05$ ตำแหน่ง $x = 0.3909a$, $y = 0.3117a$ ของท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม เมื่อทำการแบ่งอีลิเมนต์ดังแสดงในรูป 2.7 โดยที่สัมประสิทธิ์พินอลดีเท่ากับ $1/0.7$ (กำหนดให้ขนาดสูงสุดของสนามแม่เหล็กที่โนดบนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นมีค่าเท่ากับ 1) 20
3.1	ตัวอย่างของค่า β/k_0 ที่ $k_0 a = 3.0$ ที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และวิธีเชิงวิเคราะห์ รวมขนาดความผิดพลาด เมื่อทำการแบ่งอีลิเมนต์ดังแสดงในรูป 3.3 โดยที่สัมประสิทธิ์พินอลดีเท่ากับ 1 และ $1/0.75$ 44
3.2	ตัวอย่างของค่า β/k_0 ที่ $k_0 a = 4.0$ ที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และวิธีเชิงวิเคราะห์ รวมขนาดความผิดพลาด เมื่อทำการแบ่งอีลิเมนต์ดังแสดงในรูป 3.8 โดยที่สัมประสิทธิ์พินอลดีเท่ากับ $1/0.70$ 46
3.3	ตัวอย่างของค่า β/k_0 ที่ $k_0 a = 3.0$ จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และวิธีเชิงวิเคราะห์ รวมขนาดความผิดพลาด เมื่อทำการแบ่งอีลิเมนต์ดังแสดงในรูป 3.11 โดยที่สัมประสิทธิ์พินอลดีเท่ากับ $1/2$ 50
4.1	ตัวอย่างของค่า β/k_0 ที่ $k_0 a = 3.0$ ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และวิธีเชิงวิเคราะห์ รวมขนาดความผิดพลาด เมื่อทำการแบ่งอีลิเมนต์ดังแสดงในรูป 4.3 59

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.2 ตัวอย่างของค่า β/k_0 ที่ $k_0 a = 4.0$ ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์และวิธีเชิงวิเคราะห์ รวมขนาดความผิดพลาด เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 4.7	63
5.1 ตัวอย่างของค่า β/k_0 ที่ $k_0 a = 3.0$ ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์และวิธีเชิงวิเคราะห์ รวมขนาดความผิดพลาด เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 5.3	86
5.2 ค่าไดเวอร์เจนซ์ของสนามไฟฟ้า $\nabla \cdot \mathbf{E}$ ของผลเฉลยป्लอมเทียม S' ที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ $\beta a = 1.10$ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 5.3 (กำหนดให้ขนาดสูงสุดของสนามไฟฟ้าที่โนดบนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นมีค่าเท่ากับ 1)	87
5.3 ค่าไดเวอร์เจนซ์ของสนามไฟฟ้า $\nabla \cdot \mathbf{E}$ ของโหมด LSE_{10} ที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ $\beta a = 1.10$ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 5.3 (กำหนดให้ขนาดสูงสุดของสนามไฟฟ้าที่โนดบนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นมีค่าเท่ากับ 1)	87
5.4 ตัวอย่างของค่า β/k_0 ที่ $k_0 a = 4.0$ ที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์และวิธีเชิงวิเคราะห์ รวมขนาดความผิดพลาดเมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 5.7	90
5.5 ค่าไดเวอร์เจนซ์ของสนามไฟฟ้า $\nabla \cdot \mathbf{E}$ ของผลเฉลยป्लอมเทียม S' ที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ $\beta a = 2.239$ ของการแพร่กระจายในทิศ $+z$ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 5.10 (กำหนดให้ขนาดสูงสุดของสนามไฟฟ้าที่โนดบนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นมีค่าเท่ากับ 1)	95
5.6 ค่าไดเวอร์เจนซ์ของสนามไฟฟ้า $\nabla \cdot \mathbf{E}$ ของโหมดมูลฐาน (H_{10}) ที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ $\beta a = 2.239$ ของการแพร่กระจายในทิศ $+z$ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 5.10 (กำหนดให้ขนาดสูงสุดของสนามไฟฟ้าที่โนดบนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นมีค่าเท่ากับ 1)	95
6.1 ตัวอย่างของค่า β/k_0 ที่ $k_0 a = 3.0$ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริกที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน รวมขนาดความผิดพลาด เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงจากวิธีเชิงวิเคราะห์ เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 6.4	104

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
6.2 ตัวอย่างของค่า β/k_0 ที่ $k_0a=4.0$ ของท่อนำคลื่นกลางที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน รวมขนาดความผิดพลาด เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงจากวิธีเชิงวิเคราะห์ เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 6.7	107
6.3 ตัวอย่างค่า β/k_0 ที่ $k_0a=3.0$ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน รวมขนาดความผิดพลาด เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงจากวิธีเชิงวิเคราะห์ เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 6.10	116
7.1 ตัวอย่างของค่า β/k_0 ที่ $k_0a=3.0$ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง และขนาดความผิดพลาด เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงจากวิธีเชิงวิเคราะห์ เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 7.3	140
7.2 ตัวอย่างของค่า β/k_0 ที่ $k_0a=4.0$ ของท่อนำคลื่นกลางที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง และขนาดความผิดพลาด เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงจากวิธีเชิงวิเคราะห์ เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 7.6	142
7.3 ตัวอย่างค่า β/k_0 ที่ $k_0a=3.0$ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง และขนาดความผิดพลาด เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงจากวิธีเชิงวิเคราะห์ เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 7.9	145
8.1 ความสามารถในการวิเคราะห์ปัญหาท่อนำคลื่นของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์	155
8.2 ค่า β/k_0 ที่ $k_0a=3.0$ จากโมดมูลฐาน (LSE_{10}) ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ เปรอ์เซ็นต์ความผิดพลาดเทียบกับผลเฉลยแม่นยำที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์ และอันดับของความแม่นยำ เมื่อแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 8.2	159
8.3 เปรอ์เซ็นต์ความผิดพลาดของ β/k_0 ที่ $k_0a=3.0$ ในโมดมูลฐาน (LSE_{10}) ของท่อนำคลื่น บรรจุด้วยไดอิเล็กตริก จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ เมื่อใช้จำนวนอีลีเมนต์เท่ากับ 144 และ 256 และขนาดของอัตราการใช้ของค่า β/k_0 ที่ได้รับ	161

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า	
8.4	ค่า β/k_0 ที่ $k_0a=4.0$ จากโหมดมูลฐาน (TE_{11}) ของท่อนำคลื่นกลางที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาดความผิดพลาดเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงจากวิธีเชิงวิเคราะห์ และอันดับของความแม่นยำเมื่อแบ่งอีลีเมนต์ ดังแสดงในรูป 8.5	163
8.5	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ β/k_0 ที่ $k_0a=4.0$ ในโหมดมูลฐาน (TE_{11}) ของท่อนำคลื่นกลางที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ เมื่อจำนวนอีลีเมนต์เท่ากับ 140 และ 308 และขนาดของอัตราการลู่เข้าของค่า β/k_0 ที่ได้รับ	165
8.6	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ β/k_0 ที่ $k_0a=4.0$ ในโหมดมูลฐาน (TE_{11}) ของท่อนำคลื่นกลางที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ เมื่อจำนวนอีลีเมนต์เท่ากับ 308 และ 680 และขนาดของอัตราการลู่เข้าของค่า β/k_0 ที่ได้รับ	166
8.7	ค่า β/k_0 ที่ $k_0a=3.0$ จากโหมดมูลฐาน (H_{10}) ของการแพร่กระจายในทิศ +z ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงจากวิธีเชิงวิเคราะห์ และอันดับของความแม่นยำเมื่อแบ่งอีลีเมนต์ ดังแสดงในรูป 8.8	169
8.8	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ β/k_0 ที่ $k_0a=3.0$ ในโหมดมูลฐาน (H_{10}) ของการแพร่กระจายในทิศ +z ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ เมื่อใช้จำนวนอีลีเมนต์เท่ากับ 100 และ 144 และขนาดของอัตราการลู่เข้าผลเฉลยแม่นยำตรงของ β/k_0 ที่ได้รับ	171
8.9	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ β/k_0 ที่ $k_0a=3.0$ ในโหมดมูลฐาน (H_{10}) ของการแพร่กระจายในทิศ +z ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ เมื่อใช้จำนวนอีลีเมนต์เท่ากับ 144 และ 256 และขนาดของอัตราการลู่เข้าผลเฉลยแม่นยำตรงของ β/k_0 ที่ได้รับ	172
8.10	จำนวนตัวแปรไม่ทราบค่าที่ใช้ในสมการเมตริกซ์ของปัญหาค่าเจาะจงมาตรฐานที่ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ β/k_0 เท่ากับ 0.20% ที่ $k_0a=3.0$ ในโหมดมูลฐาน (LSE_{10}) ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก	174

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
8.11 จำนวนตัวแปรไม่ทราบค่าในสมการเมตริกซ์เจาะจงมาตรฐาน ที่เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ β/k_0 เท่ากับ 0.20% ที่ $k_0a = 4.0$ ในโมดมูลฐาน (TE_{11}) ของท่อนำคลื่นกลางที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม	176
8.12 จำนวนตัวแปรไม่ทราบค่าที่ใช้ในสมการเมตริกซ์ของปัญหาค่าเจาะจงมาตรฐาน ที่ขนาดความผิดพลาดของ β/k_0 เท่ากับ 0.5% ของการแพร่กระจายในทิศ +z ที่ $k_0a = 3.0$ ในโมดมูลฐานของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์	178
8.13 ความสามารถในการกำจัดผลเฉลยปลอมเทียมของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์	180
8.14 อันดับของความสามารถในการกำจัดผลเฉลยปลอมเทียมของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์	182
8.15 ความสปาร์ส และอันดับของความสปาร์สของเมตริกซ์ในสมการของปัญหาค่าเจาะจงของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก เมื่อแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 8.2	184
8.16 ความสปาร์ส และอันดับของความสปาร์สของเมตริกซ์ในสมการของปัญหาค่าเจาะจงของท่อนำคลื่นกลางที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม เมื่อทำแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 8.5	186
8.17 ความสปาร์ส และอันดับของความสปาร์สของเมตริกซ์ในสมการของปัญหาค่าเจาะจงของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ เมื่อทำแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 8.8	189
8.18 ความสปาร์ส และอันดับของความสปาร์สของเมตริกซ์ในสมการของปัญหาค่าเจาะจงของท่อนำแสงแบบฝังในชั้นสเตรทที่มีแกนและชั้นสเตรทเป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียล เมื่อแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 8.17	192
8.19 ความสปาร์ส และอันดับของความสปาร์สของเมตริกซ์ในสมการของปัญหาค่าเจาะจงของท่อนำคลื่นแสงแบบฝังในชั้นสเตรทที่มีแกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง และชั้นสเตรทเป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียล เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 8.17	195
9.1 ความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบแอนไอโซทรอปิก	198
9.2 ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ในท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก	199
9.3 ประสิทธิภาพในเชิงความแม่นยำของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ในท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก	201
9.4 ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ของกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้ง	202

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
9.5	ประสิทธิภาพในเชิงความแม่นยำของกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ ตัวอย่างที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้ง 204
9.6	ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ในกลุ่มวิธีที่มีความสามารถ ในการวิเคราะห์ตัวอย่างแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็ก 205
9.7	ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่นยำ ของกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ ตัวอย่างแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็ก 206
9.8	ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ในกลุ่มวิธีที่มีความสามารถ ในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นแอนไอโซทรอปิกแนวทแยง 208
9.9	ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ในกลุ่มวิธีที่มีความสามารถ ในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง 209



คุรุวิทยทรรศน์พยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1	ท่อนำคลื่นที่มีภาคตัดขวางรูปทรงใดๆ และมีความสม่ำเสมอในแนวแกน z 7
2.2	ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก 11
2.3	การแบ่งอิลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริกออกเป็น 256 อิลีเมนต์ 153 โนด 12
2.4	กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก เมื่อปราศจากพจน์พินอลดี ($p=0$) 12
2.5	กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริกเมื่อ $p=1$ เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จาก วิธีเชิงวิเคราะห์ 13
2.6	ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่น 17
2.7	การแบ่งอิลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นออกเป็น 308 อิลีเมนต์ 169 โนด 17
2.8	กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ ของท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางรูปทรงกลมเมื่อ $p=1/0.7$ เทียบกับผลเฉลย แม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์ 18
2.9	ภาคตัดขวางของท่อนำแสงแบบฝังในฉาบสเตรท 21
2.10	การแบ่งอิลีเมนต์บนภาคตัดขวางท่อนำคลื่นแบบที่ 1 ออกเป็น 624 อิลีเมนต์ 351 โนด 21
2.11	การแบ่งอิลีเมนต์บนภาคตัดขวางท่อนำคลื่นแบบที่ 2 ออกเป็น 624 อิลีเมนต์ 351 โนด 22
2.12	กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p=1/2.289$ และที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ ของท่อนำแสงแบบฝังในฉาบสเตรทที่มีแกนและฉาบสเตรทเป็นเนกาทีฟ ยูนิแอกเซียล เมื่อใช้ (ก) การแบ่งอิลีเมนต์แบบที่ 1 (ข) การแบ่งอิลีเมนต์แบบที่ 2 24
2.13	แบบรูปของสนามแม่เหล็กที่ $k_0 r = 16.0$ ใน (ก) โหมด E_{11}' (ข) โหมด E_{21}' (ค) โหมด E_{31}' ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p=1/2.289$ ของท่อนำแสงแบบฝังในฉาบสเตรทที่มีแกนและฉาบสเตรทเป็นเนกาทีฟ ยูนิแอกเซียล โดยใช้การแบ่งอิลีเมนต์แบบที่ 1 25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
2.14 การกระจายในลักษณะ 3 มิติของ H_x ที่ $k_0 t = 16.0$ ใน (ก) โมด E_{11}' (ข) โมด E_{21}' (ค) โมด E_{31}' ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p = 1/2.289$ ของท่อนำแสงแบบฝังในฉนวนที่แกนและฉนวนเป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียล โดยการใช้การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1	27
2.15 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p = 1/2.289$ และที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ ของท่อนำแสงแบบฝังในฉนวนที่มีแกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวางเมื่อใช้ (ก) การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1 (ข) การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 2	30
2.16 แบบรูปของสนามแม่เหล็กที่ $k_0 t = 16.0$ ใน (ก) โมด E_{11}' (ข) โมด E_{21}' (ค) โมด E_{31}' ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p = 1/2.289$ ของท่อนำแสงแบบฝังในฉนวนที่เป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง และฉนวนเป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียล โดยการใช้การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1	31
2.17 การกระจายในลักษณะ 3 มิติของ H_x ที่ $k_0 t = 16.0$ ใน (ก) โมด E_{11}' (ข) โมด E_{21}' (ค) โมด E_{31}' ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p = 1/2.289$ ของท่อนำแสงแบบฝังในฉนวนที่แกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง และฉนวนเป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียล โดยการใช้การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1	33
3.1 ท่อนำคลื่นที่มีภาคตัดขวางรูปทรงใดๆ และมีความสม่ำเสมอในแนวแกน z	37
3.2 ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยไดอิเล็กตริก	53
3.3 การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก ออกเป็น 256 อีลีเมนต์ 153 โหนด	40
3.4 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยไดอิเล็กตริก เมื่อปราศจากพจน์ทีนอลดี ($p = 0$)	41
3.5 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยไดอิเล็กตริกเมื่อ $p = 1/1.25$ เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
3.6 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ ของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยไดอิเล็กตริกเมื่อ $p=1$ เทียบกับผลเฉลยแม่นยำ ที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์	42
3.7 ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่น	44
3.8 การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นออกเป็น 308 อีลีเมนต์ 169 โหนด	45
3.9 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ ของท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลมเมื่อ $p=1/0.70$ เทียบกับผลเฉลย แม่นยำที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์	46
3.10 ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์	49
3.11 การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ออกเป็น 144 อีลีเมนต์ 91 โหนด	69
3.12 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ เมื่อ $p=1/2$ เทียบกับผลเฉลยแม่นยำ ที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์	50
4.1 ท่อนำคลื่นที่มีภาคตัดขวางรูปทรงใดๆ และมีความสม่ำเสมอในแนวแกน z	54
4.2 ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก	59
4.3 การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริกออกเป็น 256 อีลีเมนต์ 153 โหนด	59
4.4 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก ของท่อนำคลื่น บรรจุด้วยไดอิเล็กตริก เมื่อปราศจากการบังคับเงื่อนไขไดเวอร์เจนซ์ต้องเท่ากับศูนย์	60
4.5 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก เทียบกับผลเฉลยแม่นยำที่ได้จากวิธี เชิงวิเคราะห์	60
4.6 ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่น	61
4.7 การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นออกเป็น 308 อีลีเมนต์ 169 โหนด	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.8 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ ของท่อนำคลื่นกลางที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธี เชิงวิเคราะห์	62
4.9 ภาคตัดขวางของท่อนำแสงแบบฝังในฉนวน	64
4.10 การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบที่ 1 ออกเป็น 624 อีลีเมนต์ 351 โหนด	64
4.11 การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบที่ 2 ออกเป็น 624 อีลีเมนต์ 351 โหนด	65
4.12 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ และที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อ $p = 1/2.289$ ของท่อนำแสงแบบฝังในฉนวนที่มีแกนและฉนวนเป็นเนกาทีฟ ยูนิแอกเซียล เมื่อใช้ (ก) การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1 (ข) การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 2	67
4.13 แบบรูปของสนามแม่เหล็กที่ $k_0t = 16.0$ ใน (ก) โหมด E_{11}' (ข) โหมด E_{21}' (ค) โหมด E_{31}' ที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ ของท่อนำแสงแบบฝังในฉนวนที่มีแกนและฉนวนเป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียล โดยใช้การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1	68
4.14 การกระจายในลักษณะ 3 มิติของ H_z ที่ $k_0t = 16.0$ ใน (ก) โหมด E_{11}' (ข) โหมด E_{21}' (ค) โหมด E_{31}' ที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ ของท่อนำแสงแบบฝังในฉนวนที่มีแกนและฉนวนเป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียล โดยใช้การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1	70
4.15 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ และที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อสัมพันธ์ พินอลดีเท่ากับ $1/2.289$ ($p = 1/2.289$) ของท่อนำแสงแบบฝังในฉนวน ที่มีแกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง และฉนวนเป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียล เมื่อใช้ (ก) การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1 (ข) การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 2	73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.16	แบบรูปสนามแม่เหล็กที่ $k_0 t = 16.0$ ใน (ก) โมด E'_{11} (ข) โมด E'_{21} (ค) โมด E'_{31} ที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ ของท่อนำแสงแบบฝังในชั้นสเตรทที่แกนเป็นไอโซทรอปิกตามขวาง และชั้นสเตรทเป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียลโดยใช้การแบ่งอีลิเมนต์แบบที่ 1 74
4.17	การกระจายในลักษณะ 3 มิติของ H_x ที่ $k_0 t = 16.0$ ในโมด (ก) โมด E'_{11} (ข) โมด E'_{21} (ค) โมด E'_{31} ที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ ของท่อนำแสงแบบฝังในชั้นสเตรทที่แกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง และชั้นสเตรทเป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียล โดยใช้การแบ่งอีลิเมนต์แบบที่ 1 75
5.1	ท่อนำคลื่นที่มีภาคตัดขวางรูปทรงใดๆ และมีความสม่ำเสมอในแนวแกน z 79
5.2	ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก 83
5.3	การแบ่งอีลิเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริกออกเป็น 256 อีลิเมนต์ 153 โหนด 84
5.4	กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก เมื่อปราศจากการบังคับเงื่อนไขไดเวอร์เจนซ์ต้องเป็นศูนย์ 85
5.5	กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าตามขวาง 2 องค์ประกอบ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์
5.6	ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่น 86
5.7	การแบ่งอีลิเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นออกเป็น 308 อีลิเมนต์ 169 โหนด 89
5.8	กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าตามขวาง 2 องค์ประกอบ ของท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์ 89
5.9	ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ 93
5.10	การแบ่งอีลิเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ออกเป็น 144 อีลิเมนต์ 91 โหนด 94
5.11	กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าตามขวาง 2 องค์ประกอบ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์ 94
5.12	ภาคตัดขวางของท่อส่งแบบฝังในชั้นสเตรท 97

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
6.1	ท่อนำคลื่นที่มีภาคตัดขวางรูปทรงใดๆ และมีความสม่ำเสมอในแนวแกน z 100
6.2	อีลีเมนต์สามเหลี่ยม และสนามไฟฟ้าตามขวางที่แต่ละด้านของอีลีเมนต์ 101
6.3	ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก 103
6.4	การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริกออกเป็น 256 อีลีเมนต์ 153 โหนด 103
6.5	กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธี เชิงวิเคราะห์ 104
6.6	ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่น 105
6.7	การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นออกเป็น 308 อีลีเมนต์ 169 โหนด 105
6.8	กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัส และในแนวแกนของท่อนำคลื่นกลางที่มีภาคตัดขวางรูวงกลม เทียบกับ ผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์ 106
6.9	ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ 114
6.10	การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ ออกเป็น 144 อีลีเมนต์ 91 โหนด 115
6.11	กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน ของท่อนำคลื่นเฟอร์ไรต์ เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์ 116
6.12	ภาคตัดขวางของท่อนำแสงแบบฝังในชั้นสเตรท 119
6.13	การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบที่ 1 ออกเป็น 624 อีลีเมนต์ 351 โหนด 120
6.14	การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบที่ 2 ออกเป็น 624 อีลีเมนต์ 351 โหนด 120
6.15	กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัส และในแนวแกน และที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ ของท่อนำแสงแบบฝังในชั้นสเตรทที่มีแกนและชั้นสเตรทเป็นเนกาทีฟ ยูนิแอกเซียล เมื่อใช้ (ก) การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1 (ข) การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 2 122

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
6.16	<p>แบบรูปของสนามไฟฟ้าที่ $k_0 t = 16.0$ ใน (ก) โมด E'_{11} (ข) โมด E'_{21} (ค) โมด E'_{31} ที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกนของท่อนำแสงแบบฝังในฉนวนที่แกนและฉนวนเป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียล โดยใช้การแบ่งอีลิเมนต์แบบที่ 2 123</p>
6.17	<p>การกระจายในลักษณะ 3 มิติของ E_y ที่ $k_0 t = 16.0$ ใน (ก) โมด E'_{11} (ข) โมด E'_{21} (ค) โมด E'_{31} ที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกนของท่อนำแสงแบบฝังในฉนวนที่แกนและฉนวนเป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียล โดยใช้การแบ่งอีลิเมนต์แบบที่ 2 125</p>
6.18	<p>กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน และได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อสัมพันธ์ที่พินอลดีเท่ากับ $1/2.289$ ($p = 1/2.289$) ของท่อนำแสงแบบฝังในฉนวนที่มีแกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง และฉนวนเป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียล เมื่อใช้ (ก) การแบ่งอีลิเมนต์แบบที่ 1 (ข) การแบ่งอีลิเมนต์แบบที่ 2 128</p>
6.19	<p>แบบรูปของสนามไฟฟ้าที่ $k_0 t = 16.0$ ใน (ก) โมด E'_{11} (ข) โมด E'_{21} (ค) โมด E'_{31} ที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกนของท่อนำแสงแบบฝังในฉนวนที่มีแกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง และฉนวนเป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียล โดยใช้การแบ่งอีลิเมนต์แบบที่ 2 129</p>
6.20	<p>การกระจายในลักษณะ 3 มิติของ E_y ที่ $k_0 t = 16.0$ ในโมด (ก) โมด E'_{11} (ข) โมด E'_{21} (ค) โมด E'_{31} ที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกนของท่อนำแสงแบบฝังในฉนวนที่มีแกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง และฉนวนเป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียล โดยใช้การแบ่งอีลิเมนต์แบบที่ 2 131</p>
7.1	<p>ท่อนำคลื่นที่มีภาคตัดขวางรูปทรงใดๆ และมีความสม่ำเสมอในแนวแกน z 135</p>
7.2	<p>ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กทริก 139</p>
7.3	<p>การแบ่งอีลิเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กทริกออกเป็น 256 อีลิเมนต์ 153 โหนด 139</p>

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
7.4 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์	140
7.5 ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่น	141
7.6 การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นออกเป็น 308 อีลีเมนต์ 169 โหนด	141
7.7 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง ของท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์	142
7.8 ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์	144
7.9 การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ออกเป็น 144 อีลีเมนต์ 91 โหนด	144
7.10 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางของท่อนำคลื่นเฟอร์ไรต์ เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์	145
7.11 ภาคตัดขวางของท่อนำแสงแบบฝังในฉนวน	146
7.12 การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบที่ 1 ออกเป็น 224 อีลีเมนต์ 135 โหนด	147
7.13 การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบที่ 2 ออกเป็น 224 อีลีเมนต์ 135 โหนด	147
7.14 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางและที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อสัมประสิทธิ์พินอลดีเท่ากับ $1/2.289$ ของท่อนำแสงแบบฝังในฉนวนที่มีแกนและฉนวนเป็นเนกาทีฟยูนิเอกเซียล เมื่อใช้ (ก) การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1 (ข) การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 2	149

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
7.15	กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง และที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อสัมพันธ์พื้นที่อลดีเท่ากับ $1/2.289$ ของท่อนำแสงแบบฝังในฉนวนที่มีแกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง และฉนวนเป็นเนกาทีฟยูนิเอกเซียลเมื่อใช้ (ก) การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1 (ข) การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 2 152
8.1	ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก 157
8.2	การแบ่งภาคตัดขวางบนท่อนำคลื่นออกเป็น 256 อีลีเมนต์ 153 โนด 158
8.3	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ β/k_0 ที่ $k_0a=3.0$ จากโมดมูลฐาน (LSE_{10}) จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก และจำนวนอีลีเมนต์ 160
8.4	ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่น 162
8.5	การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นออกเป็น 308 อีลีเมนต์ 169 โนด 162
8.6	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ β/k_0 ที่ $k_0a=4.0$ จากโมดมูลฐาน (TE_{11}) จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ของท่อนำคลื่นกลางที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม และจำนวนอีลีเมนต์ 164
8.7	ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ 168
8.8	การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ออกเป็น 144 อีลีเมนต์ 91 โนด 168
8.9	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ β/k_0 ที่ $k_0a=3.0$ จากโมดมูลฐาน (H_{10}) ของการแพร่กระจายในทิศ $+z$ จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ และจำนวนอีลีเมนต์ 170
8.10	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ β/k_0 ที่ $k_0a=3.0$ จากโมดมูลฐาน (LSE_{10}) ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ และจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่าในสมการเมตริกซ์ของปัญหาค่าเจาะจงมาตรฐาน 173

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
8.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ β/k_0 ที่ $k_0a = 4.0$ จากโหมดมูลฐาน (TE_{11}) ของท่อนำคลื่นทรงกลมที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ และจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่า ในสมการเมตริกซ์ของปัญหาค่าเจาะจงมาตรฐาน	175
8.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ β/k_0 ที่ $k_0a = 3.0$ จากโหมดมูลฐาน (H_{10}) การแพร่กระจายในทิศ +z ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ และจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่าในสมการเมตริกซ์ของปัญหาค่าเจาะจงมาตรฐาน	177
8.13 ตำแหน่งขององค์ประกอบที่ไม่เท่ากับศูนย์ในเมตริกซ์ในสมการของปัญหาค่าเจาะจงของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก (ก) วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ (ข) วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ (ค) วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน	185
8.14 ตำแหน่งขององค์ประกอบที่ไม่เท่ากับศูนย์ในเมตริกซ์ในสมการของปัญหาค่าเจาะจงของท่อนำคลื่นทรงกลมที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม (ก) วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ (ข) วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ (ค) วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน	188
8.15 ตำแหน่งขององค์ประกอบที่ไม่เท่ากับศูนย์ในเมตริกซ์ในสมการของปัญหาค่าเจาะจงของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ (ก) วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ (ข) วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน (ค) วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง	190
8.16 ภาคตัดขวางของท่อนำแสงแบบฝังในฉาบสเตรท	191
8.17 การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นออกเป็น 224 อีลีเมนต์ 135 โหนด	191
8.18 ตำแหน่งขององค์ประกอบที่ไม่เท่ากับศูนย์ในเมตริกซ์ในสมการของปัญหาค่าเจาะจงของท่อนำแสงแบบฝังในฉาบสเตรทที่มีแกนและฉาบสเตรทเป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียล (ก) วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ (ข) วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน	193

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
8.19	ตำแหน่งขององค์ประกอบที่ไม่เท่ากับศูนย์ในเมตริกซ์ในสมการของปัญหาค่าเจาะจง ของท่อนำแสงแบบฝังในชั้นสเตรทที่มีแกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวางและชั้นสเตรท เป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียล (ก) วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ (ข) วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน 196
9.1	กราฟประสิทธิภาพสัมพัทธ์เชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ในท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก 200
9.2	กราฟประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่นยำ ของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ในท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก 201
9.3	กราฟประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ของกลุ่มวิธีที่มี ความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้ง 203
9.4	กราฟประสิทธิภาพในเชิงความแม่นยำ ของกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ ท่อนำคลื่นที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้ง 204
9.5	กราฟประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ของกลุ่มวิธีที่มี ความสามารถในการวิเคราะห์ ท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็ก 206
9.6	กราฟประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่นยำ ของกลุ่มวิธีที่มีความสามารถใน การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็ก 207
9.7	กราฟประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ในกลุ่มวิธีที่มี ความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำแสงที่เป็นแอนไอโซทรอปิกแนวทแยง 208
9.8	กราฟประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ของกลุ่มวิธีที่มี ความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำแสงที่เป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง 210
9.9	กราฟประสิทธิภาพโดยรวมของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก 211
9.10	กราฟประสิทธิภาพโดยรวมของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ 212
9.11	กราฟประสิทธิภาพโดยรวมของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ของท่อนำคลื่นที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้ง 213
จ.1	อีลีเมนต์สามเหลี่ยม พิกัดโนด และสนามไฟฟ้าตามขวางที่แต่ละด้านของอีลีเมนต์ 243
ฉ.1	อีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยม และพิกัดโนด 250

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
E	ความเข้มสนามไฟฟ้า
H	ความเข้มสนามแม่เหล็ก
ϵ	สภาพยอมของตัวกลาง
μ	ความซึมได้ของตัวกลาง
ϵ_0	สภาพยอมของอวกาศว่าง
μ_0	ความซึมได้ของอวกาศว่าง
ϵ_r	สภาพยอมสัมพัทธ์ของตัวกลาง
μ_r	ความซึมได้สัมพัทธ์ของตัวกลาง
$[\epsilon]$	เทนเซอร์สภาพยอมของตัวกลาง
$[\mu]$	เทนเซอร์ความซึมได้ของตัวกลาง
$[\epsilon_r]$	เทนเซอร์สภาพยอมสัมพัทธ์ของตัวกลาง
$[\mu_r]$	เทนเซอร์ความซึมได้สัมพัทธ์ของตัวกลาง
γ	ค่าคงตัวการแพร่กระจาย
α	ค่าคงตัวลดทอน
β	เวฟนิ่งเบอร์ในทิศ z
k_0	เวฟนิ่งเบอร์ในอวกาศว่าง
σ	สภาพนำ
ω	ความถี่เชิงมุม
Ω	ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่น
Γ	ผนังท่อนำคลื่น
Γ_1	ตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์แบบ
Γ_2	ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์แบบ
n	ดัชนีหักเห
p	สัมประสิทธิ์พินอลดี
\mathbf{n}	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศตั้งฉากกับผนังท่อนำคลื่น