

การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นรูปร่างใดๆด้วยวิธีไรเมช

นายพนัส สิ้นสุนทรพงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF ARBITRARY WAVEGUIDES USING MESHLESS METHOD

Mr. Panus Sinsoontornpong

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

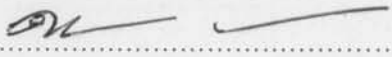
Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

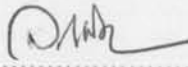
490643

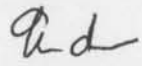
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ที่นำคลื่นรูปร่างใดๆด้วยวิธีไร่เมซ
โดย นายพนัส ลินสุนทรพงศ์
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว

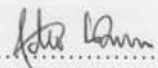
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แนบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เบญจพลกุล)


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


..... กรรมการ
(อาจารย์ สุวิทย์ นาคพิระยุทธ)

4670394421: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: MESHLESS METHODS / MOVING LEAST SQUARE / RADIAL POINT INTERPOLATION / PENALTY METHODS / WAVEGUIDE

PANUS SINSOONTORN PONG : ANALYSIS OF ARBITRARY WAVEGUIDES USING MESHLESS METHOD. THESIS ASVISOR :ASST.PROF.TUBTIM ANGKAEW,Ph.D., 85 pp.

This research aims to develop meshless methods to investigate the shape function of waveguides in 2 dimensional and evaluate the cutoff wavenumber in TE and TM mode by using two methods .The first method is the use of moving least square approximation . The second one is the use of radial point interpolation. The essential boundary condition for TM mode for moving least square approximation use penalty methods, the shape function prepared from meshless method did not use mesh to estimate the relation between nodes.

Computational results of the presented method have been compared with results from previously published data .The simulation results in this are inclined to the reference paper.

Department Electrical Engineering Student's signature *mit*
Field of study..... Electrical Engineering Advisor's signature *td*
Academic year..... 2006.....

พนัส สิ้นสุนทรพงศ์ : การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นรูปร่างใดๆด้วยระเบียบวิธีไร้เมช
 (ANALYSIS OF ARBITRARY WAVEGUIDES USING MESHLESS METHOD) อ. ที่
 ปริญญา : ผศ. ดร.ทับทิม อ่างแก้ว, 85 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการเริ่มต้นศึกษาระเบียบวิธีไร้เมชเพื่อวิเคราะห์ท่อนำคลื่นใน 2 มิติโดย
 คำนวณหาค่าเลขคลื่นตัดทั้ง TE และ TM โมด โดยใช้ฟังก์ชันรูปร่างสองแบบคือ เรเดียลพ้อยอิน
 เทอโพลีชัน และ เคลื่อนที่กำลังสองน้อยที่สุด โดยใช้ระเบียบวิธี ฟินอลดี เพื่อกำหนดเงื่อนไข
 ขอบเขตสำหรับฟังก์ชันรูปร่างที่เป็น แบบเคลื่อนที่กำลังสองน้อยที่สุดซึ่งระเบียบวิธีไร้เมชมีข้อดีคือ
 ในการสร้างฟังก์ชันรูปร่างจะใช้เฉพาะโนดที่อยู่รอบๆเท่านั้นซึ่งทำให้ไม่ต้องมีการใช้เมชเพื่อกำหนด
 ความสัมพันธ์ระหว่างโนด

ผลการคำนวณตามวิธีที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธี
 บทความอ้างอิง พบว่าผลการคำนวณที่ได้สอดคล้องกัน

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....*พนัส*
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์.....*ท.อ.*
 ปีการศึกษา.....2549.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำในการวิจัย แนวทางการวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษา ข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัย และจัดหาอุปกรณ์การดำเนินการวิจัยให้แก่ผู้วิจัยอย่างครบถ้วน ทำให้งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

นอกจากนั้นขอขอบคุณสมาชิกในห้องปฏิบัติการวิจัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ทั้งที่จบไปแล้วและที่ยังศึกษาอยู่ทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ของผู้วิจัยที่ได้สนับสนุนด้านการเรียน และเป็นกำลังใจตลอดเวลาที่ได้ศึกษาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	7
2.1 ความนำ.....	7
2.2 ท่อนำคลื่น.....	7
2.3 ระเบียบวิธีไร้มesh.....	9
2.3.1 ระเบียบวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกร้าง.....	9
2.4 ซัพพอร์ตโดเมน(support domain).....	12
2.5 ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก.....	13
2.6 ฟังก์ชันรูปร่าง(Shape Function).....	17
2.6.1 ฟังก์ชันรูปร่างแบบเคลื่อนที่กำลังสองน้อยที่สุด.....	17
2.6.2 เรเดียลพ้อยอินเทอโพลชัน(Radial point interpolation).....	22
2.7 เงื่อนไขขอบเขต.....	28
2.7.1 กำหนดโดยตรง.....	28
2.7.2 ระเบียบวิธีพินอลตี้ (Penalty methods).....	29
2.8 ระเบียบวิธีอีลีเมนต์ฟรีกาลेरคิน(element free galerkin methods).....	30

	หน้า
2.8.1 บริเวณสำหรับอินทิเกรต(background integration).....	30
บทที่ 3 การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นโดยระเบียบวิธีอีลีเมนต์พรีกาเลอริคิน.....	32
3.1 ความนำ.....	32
3.2 ผลการตรวจสอบโดยการคำนวณ.....	32
3.2.1 ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม.....	32
3.2.2 ท่อนำคลื่นแบบวงกลม.....	37
3.2.3 ท่อนำคลื่นรูปร่างแบบ L.....	41
3.2.4 ท่อนำคลื่นแบบสันเดี่ยว.....	45
3.2.5 ท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียลสี่เหลี่ยม.....	49
3.2.6 ท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียล.....	53
3.2.7 ท่อนำคลื่นแบบสันคู่.....	57
3.3 สรุปผลการคำนวณ.....	61
บทที่ 4 ฟังก์ชันรูปร่างแบบเรเดียลพ้อยอินเทอโพล์ชัน.....	62
4.1 ความนำ.....	62
4.2 ผลการตรวจสอบโดยการคำนวณ.....	62
4.2.1 ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม.....	62
4.2.2 ท่อนำคลื่นแบบวงกลม.....	63
4.2.3 ท่อนำคลื่นรูปร่างแบบ L.....	64
4.2.4 ท่อนำคลื่นแบบสันเดี่ยว.....	65
4.2.5 ท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียลสี่เหลี่ยม.....	66
4.2.6 ท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียล.....	67
4.2.7 ท่อนำคลื่นแบบสันคู่.....	68
4.3 สรุปผลการคำนวณ.....	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	70
รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	74

ภาคผนวก ก การแปลงพิกัดเรขาคณิต.....	75
ภาคผนวก ข การอินทิเกรตเชิงเส้น.....	78
ภาคผนวก ค ท่อนำคลื่น.....	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	85

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 3.10	เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่างแบบ โคแอกเซียลสี่เหลี่ยมที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี <i>TM mode</i> เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ MLS.....	53
ตารางที่ 3.11	เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียลที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี <i>TE mode</i> เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ MLS.....	56
ตารางที่ 3.12	เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นแบบ โคแอกเซียลที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี <i>TM mode</i> เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ MLS.....	57
ตารางที่ 3.13	เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นแบบ coaxial ที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี <i>TE mode</i> เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ MLS.....	60
ตารางที่ 4.1	เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่างแบบสี่เหลี่ยมที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี <i>TE mode</i> เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ RPIM.....	62
ตารางที่ 4.2	เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่างแบบสี่เหลี่ยม ที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี <i>TM mode</i> เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ RPIM.....	63
ตารางที่ 4.3	เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่างแบบวงกลม ที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี <i>TE mode</i> เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ RPIM.....	63
ตารางที่ 4.4	เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่างแบบวงกลมที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณีกรณี <i>TM mode</i> เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ RPIM.....	64
ตารางที่ 4.5	เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่าง L ที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี <i>TE mode</i> เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ RPIM.....	64

ตาราง		
ตารางที่ 4.6	เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่าง L ที่ได้ จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี <i>TM mode</i> เมื่อใช้ ฟังก์ชันรูปร่างแบบ RPIM.....	65
ตารางที่ 4.7	เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่าง แบบสัน เดียวที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี <i>TE mode</i> เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ RPIM.....	65
ตารางที่ 4.8	เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่าง แบบสัน เดียวที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี <i>TM mode</i> เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ RPIM.....	66
ตารางที่ 4.9	เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่างแบบ โค แอกเซียลสี่เหลี่ยม ที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี <i>TE mode</i> เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ RPIM.....	66
ตารางที่ 4.10	เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นรูปร่างแบบ โค แอกเซียลสี่เหลี่ยมที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิง กรณี <i>TM mode</i> เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ RPIM.....	67
ตารางที่ 4.11	เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียล ที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี <i>TE mode</i> เมื่อ ใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ RPIM.....	67
ตารางที่ 4.12	เปรียบเทียบผลการคำนวณเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นแบบ โคแอกเซียล ที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลในบทความอ้างอิงกรณี <i>TM mode</i> เมื่อ ใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ RPIM.....	68
ตารางที่ 4.13	เปรียบเทียบท่อนำคลื่นแบบสันคู่ที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้กับผลใน บทความอ้างอิง กรณี <i>TE mode</i> เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ RPIM <i>TM mode</i> เมื่อใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบ RPIM.....	68

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1	โครงสร้างภาคตัดขวางของท่อนำคลื่น..... 2
รูปที่ 1.2	ขอบเขตที่พิจารณาในระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์..... 3
รูปที่ 1.3	ขอบเขตที่พิจารณาในระเบียบวิธีไร้เมช..... 3
รูปที่ 1.4	อัลกอริทึมของระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์และระเบียบวิธีไร้เมช..... 4
รูปที่ 2.1	ภาคตัดขวางท่อนำคลื่นรูป..... 9
รูปที่ 2.2	จุดศูนย์กลางของ ซัพพอร์ตโดเมนหรือจุดที่ใช้ในการหาค่าอินทิเกรท..... 12
รูปที่ 2.3	เปรียบเทียบรูปร่างของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักใน 1 มิติ..... 14
รูปที่ 2.4	เปรียบเทียบรูปร่างของอนุพันธ์ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักใน 1 มิติ..... 15
รูปที่ 2.5	ฟังก์ชันรูปร่างของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก cubic spline ที่โนด (0,0) โดยใช้ 25 โหนดในระนาบ 2 มิติ และ คอนทัวร์พล็อต(countour plot)..... 15
รูปที่ 2.6	ฟังก์ชันรูปร่างของอนุพันธ์ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักcubic spline เทียบกับ x ที่โนด (0,0) โดยใช้ 25 โหนดในระนาบ 2 มิติและ คอนทัวร์พล็อต..... 16
รูปที่ 2.7	ฟังก์ชันรูปร่างของอนุพันธ์ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักcubic spline เทียบกับ y ที่โนด (0,0) โดย ใช้ 25 โหนดในระนาบ 2 มิติและคอนทัวร์พล็อต..... 16
รูปที่ 2.8	ค่าประมาณของ $u''(x)$ ในการประมาณค่าแบบเคลื่อนที่กำลังสองน้อยที่สุด..... 19
รูปที่ 2.9	ฟังก์ชันรูปร่างแบบเคลื่อนที่กำลังสองน้อยที่สุดที่โนด (0,0) โดยใช้ 25 โหนด และ คอนทัวร์พล็อต..... 20
รูปที่ 2.10	อนุพันธ์ของฟังก์ชันรูปร่างแบบเคลื่อนที่กำลังสองน้อยที่สุดที่โนด(0,0)โดย ใช้ 25 โหนด เทียบกับ x และ คอนทัวร์พล็อต..... 20
รูปที่ 2.11	อนุพันธ์ของฟังก์ชันรูปร่างแบบเคลื่อนที่กำลังสองน้อยที่สุดที่โนด(0,0)โดย ใช้ 25 โหนด เทียบกับ y และ คอนทัวร์พล็อต..... 21
รูปที่ 2.12	ฟังก์ชันรูปร่างแบบเคลื่อนที่กำลังสองน้อยที่สุดที่โนด (1,1) โดยใช้ 25 โหนด และ คอนทัวร์พล็อต..... 21
รูปที่ 2.13	ฟังก์ชันรูปร่างแบบเคลื่อนที่กำลังสองน้อยที่สุดที่โนด (0,1) โดยใช้ 25 โหนด และคอนทัวร์พล็อต..... 22

		๗
ภาพประกอบ		หน้า
รูปที่ 2.14	ฟังก์ชันรูปร่างแบบ $RPIM - MQ$	24
รูปที่ 2.15	ฟังก์ชันรูปร่างแบบ $RPIM - EXP$	25
รูปที่ 2.16	ฟังก์ชันรูปร่างแบบ $RPIM - TPS$	25
รูปที่ 2.17	ฟังก์ชันรูปร่างแบบ $RPIM - MQ$ ที่โนด (0,0) โดยใช้ 25 โหนดและ คอน ทัวร์พล็อต.....	26
รูปที่ 2.18	อนุพันธ์ฟังก์ชันรูปร่างแบบ $RPIM - MQ$ เทียบกับ x ที่โนด (0,0) โดยใช้ 25 โหนด และ คอนทัวร์พล็อต.....	26
รูปที่ 2.19	อนุพันธ์ฟังก์ชันรูปร่างแบบ $RPIM - MQ$ เทียบกับ y ที่โนด (0,0) โดย ใช้ 25 โหนด และคอนทัวร์พล็อต.....	27
รูปที่ 2.20	ชันรูปร่างแบบ $RPIM - MQ$ เทียบกับ y ที่โนด (0,1) โดยใช้ 25 โหนด และ คอนทัวร์พล็อต.....	27
รูปที่ 2.21	ฟังก์ชันรูปร่างแบบ $RPIM - MQ$ เทียบกับ y ที่โนด (1,1) โดยใช้ 25 โนดและ คอนทัวร์พล็อต.....	28
รูปที่ 2.22	แบบจำลองเซลล์ที่ใช้ในระบบอีลีเมนต์ฟรีกาเลอร์ดินสำหรับการ อินทิเกรท.....	30
รูปที่ 2.23	อัลกอริทึมของระเบียบวิธีอีลีเมนต์ฟรีกาเลอร์ดิน	31
รูปที่ 3.1	โครงสร้างภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม.....	32
รูปที่ 3.2	แบบรูปสนามแม่เหล็กของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมกรณี TE โมด.....	34
รูปที่ 3.3	แบบรูปสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมกรณี TM โมด.....	35
รูปที่ 3.4	โครงสร้างภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบวงกลม.....	37
รูปที่ 3.5	แบบรูปสนามแม่เหล็กของท่อนำคลื่นแบบวงกลมกรณี TE โมด.....	38
รูปที่ 3.6	แบบรูปสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นแบบวงกลมกรณี TM โมด.....	40
รูปที่ 3.7	โครงสร้างภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบรูปร่าง L.....	41
รูปที่ 3.8	แบบรูปสนามแม่เหล็กของท่อนำคลื่นรูปร่างแบบ L กรณี TE โมด.....	42
รูปที่ 3.9	แบบรูปสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นรูปร่างแบบ L กรณี TM โมด.....	44
รูปที่ 3.10	โครงสร้างภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นมีสันแบบเดี่ยว.....	45
รูปที่ 3.11	แบบรูปสนามแม่เหล็กของท่อนำคลื่นมีสันแบบเดี่ยวกรณี TE โมด.....	47
รูปที่ 3.12	แบบรูปสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นมีสันแบบเดี่ยวกรณี TM โมด.....	48
รูปที่ 3.13	โครงสร้างภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบโคแอกเชียลสี่เหลี่ยม.....	50

	ผ
ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.14	แบบรูปสนามแม่เหล็กของท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียลส์เหลี่ยมกรณี TE โหมด..... 51
รูปที่ 3.15	แบบรูปสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียลส์เหลี่ยมกรณี TM โหมด 52
รูปที่ 3.16	โครงสร้างภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียล..... 53
รูปที่ 3.17	แบบรูปสนามแม่เหล็กของท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียลกรณี TE โหมด..... 55
รูปที่ 3.18	แบบรูปสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นแบบโคแอกเซียลกรณี TM โหมด..... 56
รูปที่ 3.19	โครงสร้างภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบ สันคู่..... 57
รูปที่ 3.20	แบบรูปสนามแม่เหล็กของท่อนำคลื่นมีสันแบบคู่กรณี TE โหมด..... 59
รูปที่ 3.21	แบบรูปสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นมีสันแบบคู่กรณี TM โหมด..... 60
รูปที่ ก.1	การแปลงพิกัดเรขาคณิต..... 75
รูปที่ ข.1	อีลีเมนต์เชิงเส้นที่อยู่ในปริภูมิ 2 มิติ..... 78
รูปที่ ค.1	ภาคตัดขวางท่อนำคลื่น..... 81

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
\hat{n}	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับผิวสัมผัส
α_s	สัมประสิทธิ์ของซัพพอร์ทโดเมน
d_c	ระยะห่างระหว่างโนด
d_s	รัศมีของซัพพอร์ทโดเมน
r_w	รัศมีของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก