

การปรับปรุงการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์สำหรับไอแกนโหมดของ
ท่อนำคลื่นใจโรแมกเนติกแบบไม่เจาะจง



นายปราโมทย์ จางอิสระกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-639-735-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**IMPROVEMENT OF FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR EIGENMODES IN
AN ARBITRARY GYROMAGNETIC WAVEGUIDE**

Mr. Pramote Jangisarakul

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

Department of Electrical Engineering

Graduate School

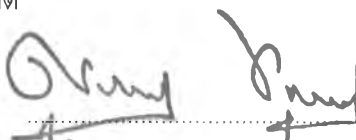
Chulalongkorn University

Academic year 1998

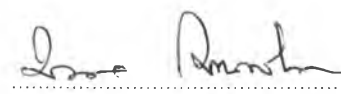
ISBN 974-639-735-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์สำหรับไอแกนโมดของ
ท่อนำคลื่นใจโรแมกเนติกแบบไม่เจาะจง
โดย นายปราโมทย์ งามอิสระกุล
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว

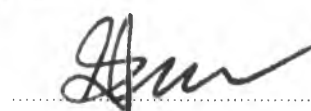
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ
ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุตินวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์)


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


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.โมนัย ไกรฤกษ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัตถชัย ไวยาพัฒน์กร)

ปราโมทย์ จางอิสระกุล : การปรับปรุงการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์สำหรับไอแกนโหมด
ของท่อนำคลื่นโรแมกเนติกแบบไม่เจาะจง (IMPROVEMENT OF FINITE ELEMENT
ANALYSIS FOR EIGENMODES IN AN ARBITRARY GYROMAGNETIC WAVEGUIDE)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ทับทิม อ่างแก้ว, 73 หน้า
ISBN 974-639-735-4.

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการปรับปรุงวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ในการวิเคราะห์โหมดเจาะจงและการ
หมุนพาราเดย์ของท่อนำคลื่นโรแมกเนติกมีรูปร่างแบบไม่เจาะจง วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่นำเสนอมีนิพจน์แปรผันใน
พจน์ของความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง ซึ่งนิพจน์แปรผันนี้มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ปัญหาท่อนำ
คลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟที่มีตัวกลางเปลี่ยนแปลงตามความถี่ เช่น เฟอร์ไรต์ และปรับปรุงฟังก์ชันรูปร่างโดยใช้ฟังก์ชัน
รูปร่างอีลีเมนต์ขอบแบบอันดับสูงมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่ากำหนดที่ขอบของอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยม ทำให้เกิดมีความต่อ
เนื่องของสนามแวนซ์มัส นอกจากนี้ยังสามารถลดจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่ามีผลให้เมทริกซ์เจาะจงมีขนาดเล็กลง
และใช้เวลาในการคำนวณเร็วขึ้น โดยได้นำเสนอผลการเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างอีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่าง
แบบเวกเตอร์และอีลีเมนต์ขอบในกรณีตัวอย่างของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก ผลการเปรียบเทียบพบ
ว่าวิธีที่ใช้อีลีเมนต์ขอบให้ผลที่แม่นยำและทดสอบความถูกต้องของวิธีที่นำเสนอจึงได้เสนอผลการวิเคราะห์กราฟดิส
เพอร์ชันและการหมุนพาราเดย์ของโหมดพื้นฐาน ในตัวอย่างของท่อนำคลื่นหน้าตัดขวางรูปวงกลมที่บรรจุด้วย
เฟอร์ไรต์และไบแอสสนามแม่เหล็กสถิตในแนวแกน ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงมุมการหมุนของสนามที่แปรตาม
ตำแหน่งบนแกนของท่อนำคลื่น ที่แปรตามความถี่และที่แปรตามค่าอำนาจแม่เหล็กอิ่มตัวของเฟอร์ไรต์

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2541

ลายมือชื่อนิสิต ปราโมทย์ จางอิสระกุล
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ทับทิม
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C815594 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD:

FINITE ELEMENT METHOD / FEM / GYROMAGNETIC WAVEGUIDE
/ EDGE ELEMENT / FARADAY ROTATION /

PRAMOTE JANGISARAKUL : IMPROVEMENT OF FINITE ELEMENT ANALYSIS
FOR EIGENMODES IN AN ARBITRARY GYROMAGNETIC WAVEGUIDE.

THESIS ADVISOR : TUPTIM ANGKAEW, D.Eng.

73 pp. ISBN 974-639-735-4.

This thesis has an objective to present the finite-element analysis of eigenmodes and Faraday rotation in arbitrarily shaped gyromagnetic waveguides by using high-order edge elements. The method uses the variational expression of propagation constant, which is expressed in terms of the transverse components. This variational expression is suited for analyzing dispersive waveguides, in which the medium varies with frequency such as ferrite. To improve the shape function uses edge element which has the field component along the edge as unknown parameters and satisfy the tangential continuity condition of the fields across material interfaces. In addition, the use of edge element can reduce the number of unknown parameters and the time of computational. Hence, the method can yield the good accuracy comparing with the method that uses vector shape function.

The result of comparison is shown in the example of dielectric-loaded waveguide. To verify the usefulness of the present method, the example of circular waveguide partially loaded with ferrite where the applied a static magnetic field in the longitudinal direction of propagation is demonstrated. The computational results show the dispersion curves and the variation of rotation degree of fundamental mode along the propagation axis with the frequency and saturation magnetization.

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
ปีการศึกษา.....2541.....

ลายมือชื่อนิสิต.....ปราโมทย์ จางิสระกุล.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....Tuptim.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำการวิจัย แนวทางการวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษา ข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยและจัดหาอุปกรณ์การดำเนินการวิจัยอย่างครบถ้วน

ขอขอบคุณ คุณชัยรัตน์ พินทอง ที่ได้กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำและคำปรึกษาต่อการวิจัยในครั้งนี้
สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดาและพี่ชายของผู้วิจัย ที่ได้สนับสนุนด้านการเรียนและเป็นกำลังใจเสมอมาตลอดเวลาที่ได้ศึกษาและดำเนินการวิจัยจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ณ
บทที่ 1	
บทนำ.....	1
ความเป็นมา.....	1
วัตถุประสงค์.....	3
เป้าหมายและขอบเขตของงานวิจัย.....	4
ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	4
ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย.....	5
บทที่ 2	
การปรับปรุงวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง.....	6
ความนำ.....	6
สมการพื้นฐานของการวิเคราะห์ท่อนำคลื่น.....	6
นิพจน์แปรผันในพจน์ของความเข้มสนามไฟฟ้าตามขวางและความเข้มสนามแม่เหล็กตามขวาง.....	9
ฟังก์ชันรูปร่างเวกเตอร์เชิงเส้น.....	12
ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบคองที่.....	14
ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบเชิงเส้น.....	17
ตัวอย่างผลการทดสอบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์.....	20
ท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม.....	20
ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก.....	26
บทที่ 3	
วิเคราะห์โหมดเจาะจงและการหมุนพาราเคย์ของ	
ท่อนำคลื่นโจโรแมกเนติกด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์.....	33
เทนเซอร์ความซาบซึ่มได้.....	33
วิเคราะห์โหมดเจาะจงของท่อนำคลื่นโจโรแมกเนติก.....	37

	ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีโพรพิลีนมีภาคตัดขวางรูปวงกลม.....	37
	ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีโพรพิลีนมีภาคตัดขวางรูปวงรี.....	42
	ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีโพรพิลีนมีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์.....	47
	ผลการคำนวณการหมุนโพลาไรซ์ของท่อนำคลื่นโพลีโพรพิลีน.....	49
บทที่ 4	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	58
	สรุปผลการวิจัย.....	58
	ข้อเสนอแนะ.....	59
	รายการอ้างอิง.....	60
	ภาคผนวก ก.....	64
	ภาคผนวก ข.....	71
	ประวัติผู้เขียน.....	73

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	การเปรียบเทียบค่า β/k_0 ที่ $k_0 a = 4.0$ ใน 3 โมดแรกของท่อนำคลื่นกลวงมีภาคตัดขวางรูปวงกลมด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่มีฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบคงที่กับผลเฉลยแม่นยำตรง.....	23
ตารางที่ 2.2	การเปรียบเทียบค่า β/k_0 ที่ $k_0 a = 4.0$ ใน 3 โมดแรกของท่อนำคลื่นกลวงมีภาคตัดขวางรูปวงกลมด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่มีฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบเชิงเส้นกับผลเฉลยแม่นยำตรง.....	23
ตารางที่ 2.3	การเปรียบเทียบค่า β/k_0 ที่ $k_0 a = 4.0$ ใน 4 โมดแรกของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไดอิเล็กทริกด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่มีฟังก์ชันรูปร่างแตกต่างกันกับผลเฉลยแม่นยำตรง.....	27
ตารางที่ 2.4	การเปรียบเทียบค่า β/k_0 ที่ $k_0 a = 3.0$ ใน 4 โมดแรกของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไดอิเล็กทริกด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่มีฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบคงที่กับผลเฉลยแม่นยำตรง.....	28
ตารางที่ 2.5	การเปรียบเทียบค่า β/k_0 ที่ $k_0 a = 3.0$ ใน 4 โมดแรกของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไดอิเล็กทริกด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่มีฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบเชิงเส้นกับผลเฉลยแม่นยำตรง.....	29
ตารางที่ ก.1	พิกัด ณ จุดกึ่งกลางอีลีเมนต์ของท่อนำคลื่นมีภาคตัดขวางรูปวงกลม.....	66

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นรูปร่างไม่เจาะจงและมีความเป็นเอกกรุป (uniform) ตลอดแนวแกน z	6
รูปที่ 2.2	เงื่อนไขขอบเขต.....	8
รูปที่ 2.3	อีลีเมนต์สามเหลี่ยมและพิกัดโนด.....	12
รูปที่ 2.4	อีลีเมนต์สามเหลี่ยมมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของสนามบนตำแหน่งขอบทั้ง 3 ด้าน.....	14
รูปที่ 2.5	ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบคงที่ในแนวสัมผัสบนแต่ละด้านของอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยม.....	16
รูปที่ 2.6	เงื่อนไขขอบเขตระหว่างอีลีเมนต์.....	17
รูปที่ 2.7	อีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าที่ตำแหน่งขอบ 6 ตัวแปร และมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในแนวตั้งฉากกับด้านของอีลีเมนต์ 2 ตัวแปร.....	18
รูปที่ 2.8	ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบเชิงเส้นในแนวสัมผัสและแนวตั้งฉากบนอีลีเมนต์สามเหลี่ยม.....	19
รูปที่ 2.9	ท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม.....	20
รูปที่ 2.10	การแบ่งอีลีเมนต์ของท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม.....	20
รูปที่ 2.11	กราฟดิสเปอร์ชันของท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม.....	21
รูปที่ 2.12	แบบรูปความเข้มสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามแม่เหล็กที่ $k_0 a = 4.0$ ของท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม.....	22
รูปที่ 2.13	เปรียบเทียบเวลาในการคำนวณที่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบคงที่และอีลีเมนต์ขอบเชิงเส้น.....	24
รูปที่ 2.14	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่า.....	25
รูปที่ 2.15	ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก.....	26
รูปที่ 2.16	การแบ่งอีลีเมนต์ของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก.....	26
รูปที่ 2.17	การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่าที่ $k_0 a = 3.0$ ของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก.....	31
รูปที่ 3.1	โมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุสารแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามการไปอัล H_0	34
รูปที่ 3.2	ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม.....	37
รูปที่ 3.3	การแบ่งอีลีเมนต์ของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม.....	37
รูปที่ 3.4	กราฟดิสเปอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม	

	ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์.....	38
รูปที่ 3.5	กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์.....	39
รูปที่ 3.6	กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ กำหนด $k_0 a = 0.75$	40
รูปที่ 3.7	กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ กำหนด $k_0 a = 0.75$	40
รูปที่ 3.8	กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ $\kappa = 0.750$, $\mu = 1.0$, $\epsilon_r = 13.0$	41
รูปที่ 3.9	กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ $a = 11.944 \text{ mm}$, $M_s = 2300 \text{ G}$, $H_0 = 384 \text{ Oe}$ และ $\epsilon_r = 13.6$	42
รูปที่ 3.10	ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงรี.....	42
รูปที่ 3.11	การแบ่งอีลีเมนต์ของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงรี.....	43
รูปที่ 3.12	กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงรี ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์.....	44
รูปที่ 3.13	กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงรี ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์.....	44
รูปที่ 3.14	กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงรี มีค่าความเยื้องศูนย์กลางต่างกัน.....	46
รูปที่ 3.15	ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์.....	47
รูปที่ 3.16	การแบ่งอีลีเมนต์ของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมี ภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์.....	47
รูปที่ 3.17	กราฟดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติกมี ภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์.....	48
รูปที่ 3.18	การหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติก มีภาคตัดขวางรูปวงกลมมีความถี่ 3.5 GHz	50
รูปที่ 3.19	การหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติก มีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์ มีความถี่ 8.6 GHz	51
รูปที่ 3.20	การหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไอโรแมกเนติก มีภาคตัดขวางรูปวงกลม ที่ความถี่ 2.5 GHz , 3.0 GHz , 3.5 GHz และ 4.0 GHz	52

รูปที่ 3.21	การหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเอทิลีน มีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์ ที่ความถี่ 7.5 GHz , 8.0 GHz , 8.5 GHz และ 9.0 GHz	53
รูปที่ 3.22	การหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเอทิลีน มีภาคตัดขวางรูปวงกลม ที่อำนาจแม่เหล็กอิมิตัว 2300 G , 2700 G และ 3100 G	54
รูปที่ 3.23	การหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเอทิลีนมี ภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์ มีค่า $\epsilon_1 = 1.0$ ที่อำนาจแม่เหล็กอิมิตัว 2300 G , 2700 G และ 3100 G	54
รูปที่ 3.24	การหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเอทิลีนมี ภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์ มีค่า $\epsilon_1 = 2.56$ ที่อำนาจแม่เหล็กอิมิตัว 2300 G , 2700 G และ 3100 G	55
รูปที่ 3.25	การหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเอทิลีนมี ภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธ์ มีค่า $\epsilon_1 = 3.5$ ที่อำนาจแม่เหล็กอิมิตัว 2300 G , 2700 G และ 3100 G	55
รูปที่ 3.26	ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเอทิลีนไม่เอกพันธ์แบบที่สอง.....	56
รูปที่ 3.27	การหมุนของความเข้มสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเอทิลีน ไม่เอกพันธ์แบบที่สองมีค่าอำนาจแม่เหล็กอิมิตัว 2300 G , 2700 G และ 3100 G	56
รูปที่ ก.1	การโพลาริเซชันแบบวงรี.....	65
รูปที่ ก.2	แบบรูปความเข้มสนามไฟฟ้าในโหมดพื้นฐานที่มีการโพลาริเซชันแบบวงรีหมุนขวา ของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเอทิลีนมีภาคตัดขวางรูปวงกลม.....	67
รูปที่ ก.3	แบบรูปความเข้มสนามไฟฟ้าในโหมดพื้นฐานที่มีการโพลาริเซชันแบบวงรีหมุนซ้าย ของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเอทิลีนมีภาคตัดขวางรูปวงกลม.....	68
รูปที่ ก.4	การโพลาริเซชันแบบวงรีหมุนขวาในโหมดพื้นฐาน ของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเอทิลีนมีภาคตัดขวางรูปวงกลม.....	69
รูปที่ ก.5	การโพลาริเซชันแบบวงรีหมุนซ้ายในโหมดพื้นฐาน ของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโพลีเอทิลีนมีภาคตัดขวางรูปวงกลม.....	70
รูปที่ ข.1	การรวมของความเข้มสนามไฟฟ้าตามขวางที่มีการโพลาริเซชันแบบหมุนขวาและหมุนซ้าย.....	72

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
a, b	รัศมีที่นำคลื่น
a, b	ความยาวแกนรองและแกนหลักของวงรี
a_x, a_y, a_z	เวกเตอร์หน่วยในทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ
A_e	พื้นที่สามเหลี่ยมของแต่ละอีลีเมนต์
$[A]_e$	เมทริกซ์จตุรัสของแต่ละอีลีเมนต์
$[B]_e$	เมทริกซ์จตุรัสของแต่ละอีลีเมนต์
E	ความเข้มสนามไฟฟ้า
E_t	ความเข้มสนามไฟฟ้าตามขวาง
E_z	ความเข้มสนามไฟฟ้าในแนวแกน
E_{x0}, E_{y0}	ขนาดความเข้มสนามไฟฟ้าแนวแกน x และ y
g_1, g_2	ฟังก์ชันรูปร่างของสนามแนวตั้งฉาก
H	ความเข้มสนามแม่เหล็ก
H_t	ความเข้มสนามแม่เหล็กตามขวาง
H_z	ความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน
H_0	สนามแม่เหล็กสถิต
j	สัญลักษณ์ของจำนวนจินตภาพ ($=\sqrt{-1}$)
k_0	เวฟนัมเบอร์ของอวกาศว่าง
M_s	อำนาจแม่เหล็กอิ่มตัว
n	เวกเตอร์หน่วยตั้งฉากกับสี่เหลี่ยมขอบเขต
$N_m(x,y)$	ฟังก์ชันรูปร่าง
tt, tz, zt, zz	ดรรชนีล่าง : ขนาดเมทริกซ์ย่อย
μ_0	ความซาบซึมได้ของอวกาศว่าง
μ_r	ความซาบซึมได้สัมพัทธ์ของตัวกลาง
$[\mu]$	เทนเซอร์ความซาบซึมได้ในรูปของเฮอรัมิเซียน
ϵ_0	สภาพยอมของอวกาศว่าง
ϵ_r	สภาพยอมสัมพัทธ์ของตัวกลาง

$[\mathcal{E}]$	เทนเซอร์สภาพยอมในรูปของเฮร์มิเชียน
β	ค่าคงตัวเฟส
ω	ความถี่เชิงมุม
ϕ_m	ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของสนามไฟฟ้าตามขวางบนอิลีเมนต์
ψ_m	ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของสนามแม่เหล็กตามขวางบนอิลีเมนต์
η	อัตราส่วนไจโรแมกเนติก
ω_0	ความถี่เชิงมุมเรโซแนนซ์
φ_x, φ_y	เฟสของความเข้มสนามไฟฟ้าแนวแกน x และ y
∇	ตัวดำเนินการเดล