

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์โหมดค่าเจาะจงของเรโซเนเตอร์
ที่บรรจุด้วยอภิวัดรูปประเภทไบแอนไอโซทรอปิก

นายยุรพันธ์ ลิ้มปันทวี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF EIGENMODES IN A RESONATOR LOADED WITH
BIANISOTROPIC METAMATERIALS

Mr. Yuranan Limpananvadee

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์โหมดค่า
เจาะจงของเรโซเนเตอร์ที่บรรจุด้วยอภิวัดสุประเภท
ไบแอนไอโซทรอปิก

โดย

นายยุทธนันท์ ลิ้มปนนท์ทวี

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤดี วรรณสิทธิ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกมาลิน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.दनัย ต.รุ่งเรือง)

ยุรนันท์ ลิมนันทน์ทวี : ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์โหมดค่า
เจาะจงของเรโซเนเตอร์ที่บรรจุด้วยอภิวัดสุประเภทไบแอนไอโซทรอปิก. (FINITE
ELEMENT ANALYSIS OF EIGENMODES IN A RESONATOR LOADED WITH
BIANISOTROPIC METAMATERIALS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.ทับทิม
อ่างแก้ว, 92 หน้า.

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์โหมดค่าเจาะจงของเรโซเนเตอร์ที่บรรจุด้วย
อภิวัดสุประเภทไบแอนไอโซทรอปิกได้ถูกเสนอในงานวิทยานิพนธ์นี้ สมการของระเบียบวิธี
ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นำเสนอได้ทำการตรวจสอบในตัวอย่างเชิงเลขของเรโซเนเตอร์ทรงกลมซึ่ง
ถูกเติมด้วยวัสดุไครัลซึ่งจัดอยู่ในวัสดุประเภทไบแอนไอโซทรอปิก ผลของความถี่เรโซแนนซ์ที่
ได้มีความสอดคล้องกับผลเฉลยแม่นยำตรง นอกจากนี้พลังงานสะสมตามทฤษฎีพอยน์ติงได้ถูก
ทำการตรวจสอบในตัวอย่างเชิงเลขของเรโซเนเตอร์ผิวปิดที่บรรจุด้วยวัสดุไครัล
ผลของค่าตัวประกอบคุณภาพของเรโซเนเตอร์ผิวปิดโดยใช้ความสัมพันธ์ของพลังงานสะสมมี
ความสอดคล้องกับผลของค่าตัวประกอบคุณภาพที่ได้จากความถี่เรโซแนนซ์ พลังงานสะสม
ในสนามไฟฟ้าเฉลี่ยและพลังงานสะสมในสนามแม่เหล็กเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามค่าของพารามิเตอร์
ไครัลลิตี ดังนั้นค่าตัวประกอบคุณภาพของเรโซเนเตอร์ที่บรรจุด้วยวัสดุไครัลสามารถเพิ่มขึ้นได้

สมการระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างสามมิติของท่อนำคลื่นที่ไม่ต่อเนื่อง
แบบหลายพอร์ตที่บรรจุด้วยวัสดุไบแอนไอโซทรอปิกได้ถูกนำเสนอเพิ่มเติมในงานวิทยานิพนธ์
นี้เพื่อวิเคราะห์เรโซเนเตอร์ในทางปฏิบัติและท่อนำคลื่นที่ไม่ต่อเนื่อง

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2554.....

5370476221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : Finite-element method (FEM) / Bianisotropic media / Chiral media

YURANAN LIMPANANVADEE: FINITE ELEMENT ANALYSIS OF EIGENMODES IN A RESONATOR LOADED WITH BIANISOTROPIC METAMATERIALS. ADVISOR: ASST.PROF. TUPTIM ANGKAEW, Ph.D., 92 pp.

The finite element formulation for analyzing modes of resonator loaded with bianisotropic materials has been proposed in this thesis. The proposed finite element formulation has been verified in a numerical example of spherical resonator loaded with chiral material which is a subclass of bianisotropic material. The computed results of resonant frequencies agree well with the result of analytical method. In addition, the energy relation according to the Poynting's theorem has been investigated in a numerical example of closed resonator loaded with chiral material. The computed quality factor of the closed resonator by using energy relations agrees well with the quality factor computed by using complex resonant frequency. The time-average stored electric energy and stored magnetic energy increase in accordance with chirality parameter. Thus, quality factor of resonator loaded with chiral material can be enhanced.

The finite element formulation of 3D structure of multiport waveguide discontinuities loaded with bi-anisotropic has been additionally proposed in this thesis to analysis practical resonators and waveguide discontinuities.

Department :Electrical Engineering..... Student's Signature

Field of Study :Electrical Engineering..... Advisor's Signature

Academic Year :2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ เนื่องด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ทับทิม อ่างแก้ว ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้พื้นฐานซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำงานวิจัยทั้งทางตรงและทางอ้อม นอกจากนี้ยังคอยให้คำปรึกษา คำแนะนำรวมไปถึงแนวคิดในการทำงานวิจัยซึ่งเปรียบเสมือนแรงผลักดันสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผลงานวิจัยทั้งหมดสำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ และซอฟต์แวร์ CST (Computer simulation technology) และสถานที่ที่ใช้ในการทำงานวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณโครงการทุน NTC (National Telecommunications Commission) ที่ให้เงินทุนสนับสนุนในการทำงานวิจัยตลอดระยะเวลา 2 ปี

กำลังใจและบรรยากาศที่ดีจากเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จ และท้ายที่สุดขอขอบคุณคุณพ่อและคุณแม่ที่ให้การสนับสนุนทั้งร่างกายและแรงใจตลอดมาอย่างหาที่สุดมิได้ ดังนั้นจึงมีคำกล่าวใดๆ ที่สามารถทดแทนสิ่งดีๆ เหล่านี้ได้ จึงคงไว้ซึ่งความรู้สึกซาบซึ้งและขอบคุณตลอดไป

ขอขอบคุณพี่ ปิยณัฐ ลิมปิยะรยวงศ์ที่ได้สอนการใช้โปรแกรมแมทแลปแก่ข้าพเจ้าและอีกหลายๆอย่าง

ขอขอบคุณเพื่อน ชัชวาลส์ วุฒิศิริศาสตร์ ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจข้าพเจ้ามาตลอด

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์ | 3 |
| 1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์..... | 4 |
| 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน | 4 |
| 1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์..... | 4 |
| 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 5 |
| บทที่ 2 ตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิก..... | 6 |
| 2.1 ความสัมพันธ์ปรุงแต่ง..... | 7 |
| 2.1.1 ตัวกลางไอโซทรอปิก | 8 |
| 2.1.2 ตัวกลางแอนไอโซทรอปิก | 8 |
| 2.1.3 ตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิก | 9 |
| 2.2 เงื่อนไขที่สำคัญของตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิก | 11 |
| 2.2.1 ตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกแบบไร้การสูญเสีย..... | 11 |
| 2.2.2 ตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกแบบภาวะย้อนกลับได้ | 12 |
| 2.3 ความสัมพันธ์ปรุงแต่งของตัวกลางไครัล | 15 |

| | |
|--|----|
| บทที่ 3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..... | 18 |
| 3.1 การหาสูตรสำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวัสดุไบแอนไอโซทรอปิกเพื่อ คำนวณความถี่เรโซแนนซ์และค่าตัวประกอบคุณภาพของอุปกรณ์เรโซเนเตอร์..... | 18 |
| 3.1.1 การหาสมการคลื่นสำหรับวัสดุไบแอนไอโซทรอปิก..... | 18 |
| 3.1.2 กระบวนการแบ่งโพรงออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยเพื่อทำการวิเคราะห์โดยวิธี Edge element | 21 |
| 3.1.3 สมการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวัสดุไบแอนไอโซทรอปิกเพื่อ คำนวณความถี่เรโซแนนซ์ | 24 |
| 3.1.4 อุปกรณ์เรโซเนเตอร์..... | 26 |
| 3.1.5 สรุปขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเพื่อคำนวณความถี่เรโซแนนซ์และตัว ประกอบคุณภาพของอุปกรณ์เรโซเนเตอร์ | 27 |
| 3.1.6 การนิยามพารามิเตอร์การกระเจิง..... | 29 |
| 3.1.7 การหาสูตรสำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวัสดุไบแอนไอโซทรอปิก เพื่อคำนวณพารามิเตอร์การกระเจิงของอุปกรณ์เรโซเนเตอร์..... | 30 |
| 3.1.8 สรุปขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเพื่อคำนวณพารามิเตอร์การกระเจิงของ อุปกรณ์เรโซเนเตอร์ | 35 |
| บทที่ 4 ผลการจำลองในการคำนวณหาความถี่เรโซแนนซ์ ตัวประกอบคุณภาพและพารามิเตอร์ การกระเจิง | 37 |
| 4.1 ผลการจำลองของความถี่เรโซแนนซ์ในตัวกลางไดอิเล็กตริก | 37 |
| 4.2 ผลการจำลองของความถี่เรโซแนนซ์และตัวประกอบคุณภาพสำหรับตัวกลางไครัล | 43 |
| 4.2.1 ผลการจำลองของความถี่เรโซแนนซ์สำหรับตัวกลางไครัลในกรณีเรโซเนเตอร์ แบบทรงกลมถูกเติมด้วยวัสดุไครัลทั้งหมด | 44 |
| 4.2.2 ผลการจำลองของความถี่เรโซแนนซ์สำหรับตัวกลางไครัลในกรณีเรโซเนเตอร์ แบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกเติมด้วยวัสดุไครัลเพียงครึ่งเดียว | 46 |
| 4.2.3 ผลการจำลองของพลังงานสะสมเฉลี่ยในสนามไฟฟ้าและพลังงานสะสมเฉลี่ยใน สนามแม่เหล็กสำหรับตัวกลางไครัลในอุปกรณ์เรโซเนเตอร์..... | 47 |

| | |
|---|----|
| 4.2.4 ผลการจำลองของค่าตัวประกอบคุณภาพสำหรับตัวกลางไดอิเล็กตริกใน อุปกรณ์เรโซเนเตอร์..... | 49 |
| 4.2.5 ผลการจำลองของค่าตัวประกอบคุณภาพสำหรับตัวกลางไครัลในอุปกรณ์ เรโซเนเตอร์..... | 51 |
| 4.2.6 การเปรียบเทียบผลการจำลองของค่าตัวประกอบคุณภาพสำหรับตัวกลางไครัล ในอุปกรณ์เรโซเนเตอร์..... | 67 |
| 4.2.7 การหาค่าความเหนี่ยวนำรวมและค่าความจุรวมของเรโซเนเตอร์ที่ถูกเติมด้วย วัสดุไครัล..... | 68 |
| 4.2.8 การเปรียบเทียบผลการจำลองของจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองระหว่าง วัสดุไดอิเล็กตริกและวัสดุไครัลในอุปกรณ์เรโซเนเตอร์..... | 74 |
| 4.3 ผลการจำลองของพารามิเตอร์การกระเจิงในตัวกลางไดอิเล็กตริก..... | 79 |
| 4.4 ผลการจำลองของพารามิเตอร์การกระเจิงในตัวกลางไครัล..... | 83 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 86 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย..... | 86 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต..... | 88 |
| รายการอ้างอิง..... | 89 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 92 |

สารบัญตาราง

| | หน้า | |
|---------------|---|----|
| ตารางที่ 2.1 | คุณสมบัติการมีภาวะการทำงานย้อนกลับและไร้ภาวะการทำงานย้อนกลับ | 10 |
| ตารางที่ 3.1 | การสร้างด้านของทรงสี่หน้าอันดับหนึ่ง..... | 22 |
| ตารางที่ 4.1 | เลขคลื่นที่ได้จากการคำนวณค่าเจาะจงในกรณีโพรงแบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกเติมด้วยอากาศ..... | 38 |
| ตารางที่ 4.2 | เลขคลื่นที่ได้จากการคำนวณค่าเจาะจงในกรณีโพรงแบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกเติมด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก..... | 39 |
| ตารางที่ 4.3 | เลขคลื่นที่ได้จากการคำนวณค่าเจาะจงในกรณีโพรงแบบทรงกระบอกถูกเติมด้วยอากาศ..... | 40 |
| ตารางที่ 4.4 | เลขคลื่นที่ได้จากการคำนวณค่าเจาะจงในกรณีโพรงแบบทรงกลมถูกเติมด้วยอากาศ..... | 41 |
| ตารางที่ 4.5 | เลขคลื่นที่ได้จากการคำนวณค่าเจาะจงในกรณีโพรงแบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งถูกตัดไปบางส่วนและถูกเติมด้วยอากาศ..... | 42 |
| ตารางที่ 4.6 | เลขคลื่นที่ได้จากการคำนวณค่าเจาะจงในกรณีโพรงแบบทรงกลมถูกเติมด้วยอากาศโดยทำการเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์..... | 43 |
| ตารางที่ 4.7 | เปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้กับโปรแกรมจำลองสามมิติ CST โดยแสดงความถี่เรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11..... | 50 |
| ตารางที่ 4.8 | เปรียบเทียบผลของตัวประกอบคุณภาพที่มาจากการสูญเสียของวัสดุไดอิเล็กตริกจากสมการที่ (3.37) และโปรแกรมจำลองสามมิติ CST ของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11..... | 50 |
| ตารางที่ 4.9 | เปรียบเทียบผลของตัวประกอบคุณภาพที่มาจากการสูญเสียของวัสดุไดอิเล็กตริกจากสมการที่ (3.36) และ (3.37) ของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.38..... | 68 |
| ตารางที่ 4.10 | ความถี่เรโซแนนซ์ ณ ค่าพารามิเตอร์ไคร์ลิตีที่เป็น 0 ของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.40..... | 71 |

| | | |
|----------------------|---|-----------|
| <p>ตารางที่ 4.11</p> | <p>การเปรียบเทียบผลของตัวประกอบคุณภาพที่มาจากการสูญเสียของวัสดุไดอิเล็กตริกจากสมการที่ (3.36) ตัวประกอบคุณภาพจากสนามที่กระจายตัวและสมการที่ (3.37) ตัวประกอบคุณภาพจากความถี่เรโซแนนซ์จากเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.40.....</p> | <p>72</p> |
| <p>ตารางที่ 4.12</p> | <p>แสดงค่าความเหนี่ยวนำรวม และค่าความจุรวมของโมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.40 โดยเปลี่ยนค่าตาม chirality parameter ดังตาราง โดยได้ค่ามาจากภาพที่ 4.42 และภาพที่ 4.43.....</p> | <p>74</p> |
| <p>ตารางที่ 4.13</p> | <p>แสดงเวลาที่ใช้ในการจำลองเรโซเนเตอร์สำหรับวัสดุไดอิเล็กตริกและวัสดุไครัลสำหรับเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.44.....</p> | <p>75</p> |
| <p>ตารางที่ 4.14</p> | <p>ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการจำลองในกรณีตัวกลางไครัล</p> | <p>83</p> |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 2.1 | โครงสร้างของไคร์ลบนพีซีบอร์ด..... | 17 |
| 3.1 | ทรงสี่หน้าอันดับหนึ่ง..... | 22 |
| 3.2 | ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์และ ตัวประกอบคุณภาพ..... | 28 |
| 3.3 | โครงข่ายทางไมโครเวฟจำนวน N พอร์ต..... | 30 |
| 3.4 | ท่อนำคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยมสองพอร์ตที่มีโหลดบรรจุอยู่ภายใน..... | 32 |
| 3.5 | ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในการคำนวณเมตริกซ์พารามิเตอร์ การกระเจิง..... | 36 |
| 4.1 | โพรงแบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกเติมด้วยอากาศซึ่งมีขนาดกว้าง 1 ซม. ยาว 0.5 ซม. และสูง 0.75 ซม..... | 38 |
| 4.2 | โพรงแบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกเติมด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกที่ความสูงตั้งแต่ 0.5 ซม.จนถึง 1 ซม.และโพรงมีขนาดกว้าง 1 ซม. ยาว 0.5 ซม. และสูง 0.75 ซม..... | 39 |
| 4.3 | โพรงแบบทรงกระบอกถูกเติมด้วยอากาศซึ่งมีรัศมี 0.5 ซม และสูง 0.5 ซม..... | 40 |
| 4.4 | โพรงแบบทรงกลมถูกเติมด้วยอากาศซึ่งมีรัศมี 1 ซม..... | 41 |
| 4.5 | โพรงแบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งถูกตัดไปบางส่วนและถูกเติมด้วยอากาศ..... | 42 |
| 4.6 | เรโซเนเตอร์แบบทรงกลมถูกเติมด้วยวัสดุไคร์ลทั้งหมด..... | 45 |
| 4.7 | ความถี่เรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์แบบทรงกลมถูกเติมด้วยวัสดุไคร์ลทั้งหมด..... | 45 |
| 4.8 | เรโซเนเตอร์แบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกเติมด้วยวัสดุไคร์ลเพียงครั้งเดียว..... | 46 |
| 4.9 | ความถี่เรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์แบบทรงสี่เหลี่ยมถูกเติมด้วยวัสดุไคร์ลเพียง ครั้งเดียว..... | 47 |
| 4.10 | พลังงานสะสมเฉลี่ยของเรโซเนเตอร์แบบทรงสี่เหลี่ยมถูกเติมด้วยวัสดุไคร์ล เพียงครั้งเดียว ดังแสดงในภาพที่ 4.8..... | 49 |
| 4.11 | เรโซเนเตอร์แบบทรงสี่เหลี่ยมถูกเติมด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก..... | 50 |

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.12 ความถี่เรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์แบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากในภาพที่ 4.11 โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์ไครัลิตีตั้งแต่ค่า 0 ถึง 2..... | 52 |
| 4.13 ตัวประกอบคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียของวัสดุไดอิเล็กตริกของเรโซเนเตอร์แบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากในภาพที่ 4.11 โดยทำการปรับค่าไครัลิตีตั้งแต่ค่า 0 ถึง 2 โดยได้มาจากสมการที่ (3.37)..... | 52 |
| 4.14 สนามไฟฟ้าโหมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11 เมื่อ chirality parameter=0 บนระนาบ z=0..... | 53 |
| 4.15 สนามไฟฟ้าโหมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11 เมื่อ chirality parameter=0 บนระนาบ y=0..... | 53 |
| 4.16 สนามไฟฟ้าโหมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11 เมื่อ chirality parameter=0.5 บนระนาบ z=0..... | 54 |
| 4.17 สนามไฟฟ้าโหมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11 เมื่อ chirality parameter=0.5 บนระนาบ y=0..... | 54 |
| 4.18 สนามไฟฟ้าโหมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11 เมื่อ chirality parameter=1 บนระนาบ z=0..... | 55 |
| 4.19 สนามไฟฟ้าโหมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11 เมื่อ chirality parameter=1 บนระนาบ y=0..... | 55 |
| 4.20 สนามไฟฟ้าโหมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11 เมื่อ chirality parameter=1.5 บนระนาบ z=0..... | 56 |
| 4.21 สนามไฟฟ้าโหมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11 เมื่อ chirality parameter=1.5 บนระนาบ y=0..... | 56 |
| 4.22 สนามไฟฟ้าโหมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11 เมื่อ chirality parameter=2 บนระนาบ z=0..... | 57 |
| 4.23 สนามไฟฟ้าโหมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11 เมื่อ chirality parameter=2 บนระนาบ y=0..... | 57 |
| 4.24 สนามแม่เหล็กโหมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11 เมื่อ chirality parameter=0 บนระนาบ z=0..... | 58 |

| ภาพที่ | หน้า |
|--------|------|
| 4.25 | 58 |
| 4.26 | 59 |
| 4.27 | 59 |
| 4.28 | 60 |
| 4.29 | 60 |
| 4.30 | 61 |
| 4.31 | 61 |
| 4.32 | 62 |
| 4.33 | 62 |
| 4.34 | 63 |
| 4.35 | 64 |
| 4.36 | 65 |

| ภาพที่ | หน้า |
|--------|------|
| 4.37 | 66 |
| 4.38 | 68 |
| 4.39 | 69 |
| 4.40 | 70 |
| 4.41 | 71 |
| 4.42 | 73 |
| 4.43 | 73 |
| 4.44 | 74 |
| 4.45 | 76 |
| 4.46 | 76 |
| 4.47 | 77 |
| 4.48 | 77 |
| 4.49 | 78 |
| 4.50 | 78 |
| 4.51 | 80 |
| 4.52 | 80 |

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.53 | ผลของพารามิเตอร์การกระเจิงสำหรับสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเทียบกับ ความถี่ที่ 20-40 GHz สำหรับเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.51..... | 81 |
| 4.54 | ผลของพารามิเตอร์การกระเจิงสำหรับสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอิมพีแดนซ์ เทียบกับความถี่ที่ 15-30 GHz สำหรับเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.51..... | 82 |
| 4.55 | ผลของพารามิเตอร์การกระเจิงสำหรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน เทียบกับความถี่ที่ 8-13 GHz กรณี $W=10.16$ mm..... | 84 |
| 4.56 | ผลของพารามิเตอร์การกระเจิงสำหรับสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน เทียบกับความถี่ที่ 8-13 GHz กรณี $W=10.16$ mm..... | 84 |

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันนี้การสื่อสารในย่านความถี่ไมโครเวฟได้เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมาก และในการสื่อสารนั้นสิ่งที่จำเป็นอย่างขาดเสียไม่ได้คือ อุปกรณ์สื่อสารทางไมโครเวฟความถี่ระดับ 1-40 GHz การพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะช่วยให้การสื่อสารนั้นมีความคล่องตัว และถูกต้องมากยิ่งขึ้น เเรโซเนเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ใช้ในทางการสื่อสาร มีหน้าที่หลายอย่างด้วยกัน [1] เช่น สามารถวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุได้ และยังใช้ในวงจรฟิลเตอร์, ออสซิลเลเตอร์ และตัวขยายสัญญาณปรับค่าได้ สิ่งที่น่าสนใจคือ เเรโซเนเตอร์จะมีค่าตัวประกอบคุณภาพ (quality factor) ที่สูงมาก ระดับ 5,000-10,000 นอกจากนี้ยังสามารถสร้างขึ้นได้ง่ายอีกด้วย ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพของเรโซเนเตอร์โดยการเพิ่มค่าตัวประกอบคุณภาพจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจในงานวิทยานิพนธ์นี้ โดยเนื้อหาในบทนี้ได้เสนอแนวทางของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้น อุปกรณ์เรโซเนเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในวงจรทางไมโครเวฟ เเรโซเนเตอร์ส่วนใหญ่ได้ถูกสร้างจากวัสดุไดอิเล็กตริก ทำให้มีข้อจำกัดในการออกแบบ เพราะค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าจำกัดอยู่ในช่วง 10-100 [1] ด้วยเหตุนี้ในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงสนใจที่จะนำวัสดุอื่นมาใช้แทนวัสดุไดอิเล็กตริก เช่น วัสดุไครัล (chiral media) ซึ่งจัดเป็นวัสดุในประเภทวัสดุไบแอนไอโซทรอปิก (bianisotropic media) สาเหตุที่ผู้วิจัยสนใจวัสดุไครัลและวัสดุไบแอนไอโซทรอปิกนั้น เนื่องจากวัสดุได้ถูกนำไปใช้ทำอุปกรณ์หลายอย่าง [2]-[3] เช่น ท่อนำคลื่นเรโซเนเตอร์ สายอากาศ เป็นต้น นอกจากนี้วัสดุเหล่านี้ยังมีคุณสมบัติพิเศษโดยจะมีการคัปปลิงระหว่างสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น ทำให้มีพารามิเตอร์การคัปปลิงเพิ่มขึ้น จึงทำให้การออกแบบนั้นมีความยืดหยุ่นมากขึ้น และในปัจจุบันนี้สามารถสร้าง และสังเคราะห์วัสดุเหล่านี้ขึ้นมาได้จริง [4]

จากงานวิจัย [5]-[6] ได้ทำการคำนวณค่าความถี่เรโซแนนซ์และค่าตัวประกอบคุณภาพของเรโซเนเตอร์ที่บรรจุด้วยวัสดุไครัล โดยมีข้อสังเกตที่น่าสนใจในงานวิจัยเหล่านี้คือ เมื่อทำการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตี (chirality parameter) จะทำให้ค่าตัวประกอบคุณภาพจะมีค่าสูงขึ้น

นอกจากนี้เมื่อทำการเพิ่มขึ้นของค่าพารามิเตอร์ไคร์ลิตีจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์มีค่าลดลง จึงเห็นได้ว่าการใส่วัสดุไคร์ลิตีลงในเรโซเนเตอร์จะช่วยปรับปรุงเพิ่มค่าตัวประกอบคุณภาพได้ และเนื่องจากงานวิจัย [5]-[6] ได้ทำการคำนวณด้วยวิธีแมนตรงสำหรับเรโซเนเตอร์ที่เป็นแบบรูปทรงกลมเท่านั้น นอกจากนี้เรโซเนเตอร์ยังถูกเติมด้วยวัสดุไคร์ลิตีทั้งหมดซึ่งเป็นตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียว ทำให้มีข้อด้อยในการคำนวณกับรูปทรงอื่นๆ และการคำนวณกับวัสดุที่มีความไม่เป็นเนื้อเดียว ดังนั้นปัญหาในการคำนวณกับเรโซเนเตอร์รูปทรงสามมิติ และตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกที่ไม่เป็นเนื้อเดียวจึงเป็นที่มาของปัญหาในงานวิทยานิพนธ์นี้

จากงานวิจัย [7] งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการคำนวณแบบ (finite difference time domain: FDTD) โดยทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การกระเจิงสำหรับท่อนำคลื่นที่ถูกบรรจุด้วยวัสดุไคร์ลิตี แต่ยังไม่ได้ขยายไปยังวัสดุไบแอนไอโซทรอปิก การคำนวณแบบ FDTD นั้นไม่เหมาะกับการคำนวณในโดเมนความถี่เพื่อคำนวณหาโหมดที่เกิดขึ้นที่ท่อนำคลื่น และไม่เหมาะกับการคำนวณค่าตัวประกอบคุณภาพเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีงานวิจัย [8] ได้ใช้วิธีการคำนวณแบบ (coupled mode method) ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณแบบกึ่งแมนตรงร่วมกับวิธีโหมดแมตชิ่ง (mode matching method) ทำให้สามารถคำนวณพารามิเตอร์การกระเจิงของท่อนำคลื่นที่มีโหลดเป็นวัสดุไคร์ลิตีได้ แต่ยังไม่มีการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์และค่าตัวประกอบคุณภาพ อีกทั้งรูปร่างของท่อนำคลื่นต้องเป็นแบบท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

จากเหตุผลที่ได้กล่าวมาข้างต้นในงานวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยจึงนำเสนอวิธีการคำนวณเชิงเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) [9] มาใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้เองด้วยเป็นวิธีการคำนวณแบบเชิงเลขโดยสามารถคำนวณรูปทรงสามมิติใดๆ ได้อีกทั้งยังเหมาะกับการคำนวณหาโหมดที่เกิดขึ้นในโดเมนความถี่ ได้มีงานวิจัย [10] ได้เสนอระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโดเมนความถี่เพื่อวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบไม่ต่อเนื่องในสามมิติซึ่งถูกเติมด้วยวัสดุไคร์ลิตี แต่ในงานนี้ผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่มีค่าความถี่เรโซแนนซ์และตัวประกอบคุณภาพ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการทำงานวิจัยเพื่ออุทิศให้การวิเคราะห์เรโซเนเตอร์มีโหลดเป็นวัสดุไบแอนไอโซทรอปิก และสำหรับพารามิเตอร์การกระเจิงนั้น งานวิจัย [11] ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับวิธีโหมดแมตชิ่ง แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์สำหรับตัวกลางแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) ซึ่งทำให้งานนี้ยังไม่สามารถวิเคราะห์ตัวกลางไคร์ลิตีและตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกได้ ในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ขยายงานจากงานวิจัย [11] โดยขยายไปยังตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิก

1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์อุปกรณ์เรโซเนเตอร์ เพราะเป็นอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนน้อย สร้างได้ง่ายจึงทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ง่าย นอกจากนี้เมื่อสามารถวิเคราะห์อุปกรณ์เรโซเนเตอร์ได้แล้วก็สามารถนำความรู้นี้ไปวิเคราะห์อุปกรณ์อื่นได้ เช่น ท่อนำคลื่น เป็นต้น เครื่องมือที่จะนำมาใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้คือระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ ในช่วงแรกจะเป็นการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์และค่าตัวประกอบคุณภาพโดยทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับโปรแกรมจำลองสามมิติ CST ในกรณีตัวกลางไดอิเล็กตริก สำหรับตัวกลางโคร์ลันได้ทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัย [12] ในกรณีการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์ สำหรับการคำนวณค่าตัวประกอบคุณภาพนั้น งานวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอวิธีการตรวจสอบโดยใช้วิธีการคำนวณสองวิธีเพื่อเปรียบเทียบ โดยวิธีแรกนั้นเป็นการคำนวณจากความถี่เรโซแนนซ์โดยตรง ส่วนวิธีที่สองนั้นเป็นการคำนวณจากทฤษฎีพอยน์ติง [1] จากนั้นจึงนำผลที่ได้จากทั้งสองวิธีนี้มาเปรียบเทียบกันเพื่อเป็นการยืนยันผลของการคำนวณ ในช่วงที่สองจะเป็นการคำนวณพารามิเตอร์การกระเจิงโดยทำการเปรียบเทียบกับโปรแกรมจำลองสามมิติ CST ในกรณีตัวกลางไดอิเล็กตริกสำหรับท่อนำคลื่นสองพอร์ต หลังจากนั้นจึงลดจำนวนพอร์ตลงเพื่อวิเคราะห์เรโซเนเตอร์ จากนั้นจึงทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์การกระเจิงโดยเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้กับความถี่เรโซแนนซ์ เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าพารามิเตอร์การกระเจิงและความถี่เรโซแนนซ์ที่คำนวณได้นั้นถูกต้องอีกทางหนึ่ง สำหรับตัวกลางโคร์ลันได้เปรียบเทียบกับงานวิจัย [7] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุโคร์ล จากนั้นจึงทำการพล็อตค่าพารามิเตอร์การกระเจิงเพื่อดูแนวโน้มผลของพารามิเตอร์โคร์ลิตีที่มีต่อทั้งสัมประสิทธิ์การสะท้อน และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของท่อนำคลื่น

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของตัวกลางไคร้ล เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบอุปกรณ์เรโซเนเตอร์ที่บรรจุด้วยวัสดุไคร้ล
2. สร้างเครื่องมือเพื่อใช้วิเคราะห์และออกแบบอุปกรณ์สื่อสารทางไมโครเวฟที่ประกอบด้วยอภิวัดรูปประเภทไบแบนไอโซทรอปิกโดยการเขียนโปรแกรมวิธีเชิงเลข Finite Element method (FEM) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เรโซเนเตอร์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาความรู้พื้นฐานของวัสดุไบแบนไอโซทรอปิกและวัสดุไคร้ลรวมถึงคุณสมบัติที่สำคัญเพื่อนำมาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์อุปกรณ์เรโซเนเตอร์
2. ศึกษาความรู้พื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโดเมนความถี่ โดยศึกษาทฤษฎีและวิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะ (eigenmode)
3. เขียนโปรแกรมวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโดเมนความถี่
4. ทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของโปรแกรมที่เขียนขึ้นกับระเบียบวิธีวิเคราะห์
5. คำนวณความถี่เรโซแนนซ์และตัวประกอบคุณภาพจากคุณลักษณะเฉพาะ
6. เขียนโปรแกรมวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาพารามิเตอร์การกระเจิงโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโดเมนความถี่
7. ทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของโปรแกรมโดยเปรียบเทียบกับวิธีเชิงเลข
8. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
9. เขียนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิเคราะห์และเขียนโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์โหมดสำหรับเรโซเนเตอร์ที่มีวัสดุเป็นไบแบนไอโซทรอปิกเป็นส่วนประกอบโดยใช้หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโดเมนความถี่และคำนวณหาความถี่เรโซแนนซ์และค่าตัวประกอบคุณภาพของเรโซเนเตอร์ รวมทั้งพารามิเตอร์การกระเจิง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้และความเข้าใจในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโดเมนความถี่และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับผู้วิจัย
2. ความรู้และความเข้าใจในการวิเคราะห์และออกแบบเรโซเนเตอร์ที่ประกอบด้วยวัสดุไครัล (chiral) หรือวัสดุไบแอนไอโซทรอปิก (bianisotropic) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโดเมนความถี่

บทที่ 2

ตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิก

ปัจจุบันในงานวิจัยทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีการประยุกต์นำวัสดุตัวกลางที่มีความซับซ้อนมาใช้กับอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ท่อนำคลื่น, สายอากาศ, เรโซเนเตอร์ เป็นต้น เนื่องด้วยเหตุผลที่ว่าลักษณะของตัวกลางแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่โดดเด่นแตกต่างกัน ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวกลางชนิดนี้

ตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกเป็นตัวกลางที่ได้รับความสนใจอันเนื่องจากคุณสมบัติพิเศษของตัวกลางชนิดนี้ที่มีผลต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ปรากฏการณ์ของผลกระทบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อวัสดุตัวกลางจะแสดงอยู่ในความสัมพันธ์ซึ่งเรียกว่าความสัมพันธ์ปรุ่่งแต่ง (constitutive relation) [13] ความสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งนี้จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กกับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก โดยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของวัสดุตัวกลางคือ พารามิเตอร์สภาพยอม (permittivity parameter) และพารามิเตอร์ความซาบซึ่มได้ (permeability parameter) ในกรณีของตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกจะมีความแตกต่างจากวัสดุไดอิเล็กตริกทั่วไป กล่าวคือความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กนอกจากพารามิเตอร์สภาพยอมและพารามิเตอร์ความซาบซึ่มได้แล้วยังขึ้นอยู่กับอีก 2 พารามิเตอร์ที่แสดงถึงการคัปปลิงระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก พารามิเตอร์ความสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งจะอยู่ในรูปของเทนเซอร์ซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบในแนวแกน x , y และ z รวมทั้งแนวแกนร่วมของแกนทั้งสามทำให้องค์ประกอบทั้งหมดกลายเป็น 9 องค์ประกอบซึ่งจะมากกว่าในกรณีที่เป็นตัวกลางไอโซทรอปิก (isotropic medium) ซึ่งมีเพียงแค่สามองค์ประกอบเท่านั้นคือ ในแนวแกน x , y และ z

ดังนั้นด้วยความสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งของวัสดุตัวกลางต่างๆสามารถจำแนกตัวกลางตามคุณสมบัติคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [13] ดังเช่น ตัวกลางที่มีคุณสมบัติเชิงเส้น, ตัวกลางที่ไม่มีคุณสมบัติเชิงเส้น, ตัวกลางเอกพันธ์, ตัวกลางที่ไม่เอกพันธ์, ตัวกลางดิสเพอซิฟ (dispersive medium) และตัวกลางนอนดิสเพอซิฟ (nondispersive medium) ตัวกลางไอโซทรอปิก และตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิก (biisotropic medium) หรือตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิก โดยที่ตัวกลางที่มีความเป็นเชิงเส้นจะไม่ใช่ฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ถ้าหากตัวกลางนั้นเป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตัวกลางนั้นจะจัดอยู่ในกลุ่มตัวกลางที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น และถ้าหากตัวกลางนั้นไม่เป็นฟังก์ชันของฟิวด์ของตัวกลาง ตัวกลางนั้นจะจัดอยู่ในกลุ่มตัวกลาง

เอกพันธ์ ในทางกลับกันตัวกลางนั้นจะจัดอยู่ในกลุ่มตัวกลางไม่เอกพันธ์ ส่วนตัวกลางไอโซทรอปิก นั้นความสัมพันธ์ปรุงแต่งจะไม่เป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า แต่ถ้าหากว่า ตัวกลางนั้นเป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ตัวกลางนั้นจัดอยู่ในกลุ่มของตัวกลาง แอนไอโซทรอปิกหรือตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิก และถ้าหากว่าความสัมพันธ์ปรุงแต่งของ ตัวกลางนั้นเป็นฟังก์ชันของความถี่แล้วตัวกลางนั้นอยู่ในกลุ่มนั้นในกลุ่มดิสเพอซีฟ และในทำนอง กลับกัน ตัวกลางนั้นจะจัดอยู่ในกลุ่มที่ไม่เป็นฟังก์ชันของความถี่

การในอดีตนั้นการออกแบบวงจรทางไมโครเวฟถูกจำกัดด้วยคุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็ก-ตริก ทำให้ไม่มีความยืดหยุ่นในการออกแบบ ถ้าหากมีพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้การออกนั้นมี ความยืดหยุ่นมากขึ้น ดังนั้นจึงมีการสังเคราะห์วัสดุไบแอนไอโซทรอปิก เนื่องจากมีการการคับปลิง ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นในตัวกลางนี้ ทำให้สามารถออกแบบวงจรได้อย่าง หลากหลายมากขึ้นโดยการปรับค่าคับปลิงระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนี้ ตัวกลาง ไบแอนไอโซทรอปิกมีคุณสมบัติที่แตกต่างกับตัวกลางไอโซทรอปิกทั่วไปในหลายด้าน ตัวอย่าง หนึ่งคือคุณสมบัติปฏิกิริยาทางแสง (optical activity) คุณสมบัตินี้จะแสดงพฤติกรรมการโพลาไรซ์ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางเข้าไปในตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกซึ่งคุณสมบัตินี้ทำให้เกิดการ หมุนของระนาบโพลาไรซ์เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายผ่านตัวกลาง และอีกคุณสมบัติหนึ่ง คือปฏิกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (magnetolectric activity) ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการคับปลิง (coupling) ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยปรากฏการณ์นี้มีประโยชน์ในการออกแบบ อุปกรณ์สื่อสารไมโครเวฟที่มีหน้าที่กำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น เช่น ท่อนำคลื่น, เส้นใย แก้วนำแสง, สายอากาศไมโครสตริบ (microstrip antenna), ราโดม (radome) เป็นต้น ตัวอย่าง ของตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกเช่น ไครัล ,ไครัลเฟอร์ไรต์ (chiral-ferrite) และไดอิเล็กตริกไครัล (dielectric chiral) โดยตัวกลางไครัลจัดเป็นตัวกลางกรณีพิเศษของตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกที่ 4 องค์ประกอบเทนเซอร์ของความสัมพันธ์ปรุงแต่งเป็นปริมาณเสกัลาร์ซึ่งโดยทั่วไปเรียกตัวกลางนี้ ว่า ตัวกลางไบไอโซทรอปิก (biisotropic medium)

2.1 ความสัมพันธ์ปรุงแต่ง

ความสัมพันธ์ปรุงแต่งจะบ่งบอกถึงลักษณะและคุณสมบัติของแต่ละชนิด โดยแบ่งออกได้ เป็นสามแบบดังนี้ [13] 1. ตัวกลางไอโซทรอปิก (isotropic medium) 2. ตัวกลางแอนไอโซทรอปิก (anisotropic medium) 3. ตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิก

2.1.1 ตัวกลางไอโซทรอปิก

ความสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งจะมีสมการเป็น

$$\begin{aligned}\mathbf{D} &= \varepsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H}\end{aligned}\tag{2.1}$$

หรือในอีกรูปแบบหนึ่ง

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} &= \varepsilon_0 \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} &= \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{2.2}$$

โดยที่ ε คือพารามิเตอร์สภาพยอม และ μ คือพารามิเตอร์ความซาบซึมได้

จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งแบบตัวกลางไอโซทรอปิกมีความหมายว่า ทิศทางของความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าจะมีทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า ในทำนองเดียวกันทิศทางของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กจะมีทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็ก

2.1.2 ตัวกลางแอนไอโซทรอปิก

ความสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งจะมีสมการเป็น

$$\begin{aligned}\mathbf{D} &= \overline{\varepsilon} \mathbf{E} \\ \mathbf{B} &= \overline{\mu} \mathbf{H}\end{aligned}\tag{2.3}$$

หรือในอีกรูปแบบหนึ่ง

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix}\tag{2.4}$$

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & \mu_{xz} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & \mu_{yz} \\ \mu_{zx} & \mu_{zy} & \mu_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix}$$

โดยที่ $\underline{\underline{\epsilon}}$ คือ เทนเซอร์สภาพยอม และ $\underline{\underline{\mu}}$ คือ เทนเซอร์ความซาบซึมได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งจะแตกต่างกับกรณีของตัวกลางไอโซทรอปิก กล่าวคือ ทิศทางของความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าจะไม่มีทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าอีกต่อไป เช่นเดียวกับทิศทางของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กจะไม่มีทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็ก

2.1.3 ตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิก

ความสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งสำหรับตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกเมื่อสนามเปลี่ยนแปลงตามเวลา ($e^{j\omega t}$) ความสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งจะมีสมการเป็น

$$\underline{\underline{D}} = \underline{\underline{\epsilon}} \cdot \underline{\underline{E}} + \underline{\underline{\xi}} \cdot \underline{\underline{H}} \quad (2.5)$$

$$\underline{\underline{B}} = \underline{\underline{\zeta}} \cdot \underline{\underline{E}} + \underline{\underline{\mu}} \cdot \underline{\underline{H}}$$

ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.5) จะอยู่ในรูปแบบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (**EH** representation) สมการที่ (2.5) ยังสามารถเขียนได้ในอีกรูปแบบหนึ่งดังนี้

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{xx} & \xi_{xy} & \xi_{xz} \\ \xi_{yx} & \xi_{yy} & \xi_{yz} \\ \xi_{zx} & \xi_{zy} & \xi_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_{xx} & \zeta_{xy} & \zeta_{xz} \\ \zeta_{yx} & \zeta_{yy} & \zeta_{yz} \\ \zeta_{zx} & \zeta_{zy} & \zeta_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} + \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & \mu_{xz} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & \mu_{yz} \\ \mu_{zx} & \mu_{zy} & \mu_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix}$$

โดยที่ $\underline{\underline{\xi}}$ และ $\underline{\underline{\zeta}}$ คือ เทนเซอร์ (Tensor) ที่แสดงถึงการคัปปลิง (coupling) ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก และพารามิเตอร์ทั้งสองตัวนี้สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบ

$$\begin{aligned} \underline{\underline{\xi}} &= (\chi + j\kappa) \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \\ \underline{\underline{\zeta}} &= (\chi - j\kappa) \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \end{aligned} \quad (2.7)$$

โดยที่ χ คือ เทนเซอร์เทลริเจน (Tellegen tensors) และ κ คือ เทนเซอร์ไครัลลิตี (Chirality tensors) พารามิเตอร์เทลริเจนจะใช้วัดคุณสมบัติของตัวกลางที่มีคุณสมบัติไร้ภาวะการทำงาน

ย้อนกลับ (nonreciprocal) ถ้าหากพารามิเตอร์เทลริเจนมีค่าเป็นศูนย์แล้วตัวกลางจะมีภาวะการทำงานย้อนกลับได้ (reciprocal) ส่วนพารามิเตอร์ไครัลลิตีจะแสดงถึงการคัปปลิงระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ถ้าพารามิเตอร์ไครัลลิตีมีค่ามากแสดงว่าการคัปปลิงระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีค่ามากตามไปด้วย โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติการมีภาวะการทำงานย้อนกลับและไร้ภาวะการทำงานย้อนกลับ

| | Nonchiral ($\kappa = 0$) | Chiral ($\kappa \neq 0$) |
|--|----------------------------|----------------------------|
| คุณสมบัติมีภาวะการทำงานย้อนกลับ ($\chi = 0$) | ตัวกลางไอโซทรอปิก | ตัวกลางพาสเตอร์ |
| คุณสมบัติไร้ภาวะการทำงานย้อนกลับ ($\chi \neq 0$) | ตัวกลางเทลริเจน | ตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิก |

นอกจากสมการที่ (2.5) แล้วความสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งของตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกยังเมื่อสนามเปลี่ยนแปลงตามเวลา ($e^{j\omega t}$) สามารถเขียนได้ดังนี้คือ [14]

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \underline{\underline{\epsilon}} \cdot \mathbf{E} - j\underline{\underline{\xi}} \cdot \mathbf{B} \\ \mathbf{H} &= \underline{\underline{\mu}}^{-1} \cdot \mathbf{B} - j\underline{\underline{\eta}} \cdot \mathbf{E} \end{aligned} \quad (2.8)$$

โดยที่สมการที่ (2.8) จะอยู่ในรูปแบบของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (\mathbf{EB} representation) และจะนำมาใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้เพราะสามารถใช้ในการเปรียบเทียบผลกับงานวิจัย [12] ได้ง่าย โดยที่ $\underline{\underline{\xi}}$ และ $\underline{\underline{\eta}}$ คือเทนเซอร์ที่แสดงถึงการคัปปลิงระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก และพารามิเตอร์ทั้งสองตัวนี้สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบ

$$\begin{aligned} \underline{\underline{\xi}} &= \underline{\underline{\xi}}_c - j\underline{\underline{\chi}} \\ \underline{\underline{\eta}} &= \underline{\underline{\xi}}_c + j\underline{\underline{\chi}} \end{aligned} \quad (2.9)$$

โดยที่ $\underline{\underline{\xi}}_c$ คือเทนเซอร์ไครัลลิตีแอดมิตแตนซ์ (chirality admittance tensor)

2.2 คุณสมบัติที่สำคัญของตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิก

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติที่สำคัญของตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิก [13] นั่นคือ คุณสมบัติไร้การสูญเสียในหัวข้อ 2.2.1 และคุณสมบัติภาวะย้อนกลับได้ในหัวข้อ 2.2.2 โดยจะอธิบายถึงเงื่อนไขของเทนเซอร์สภาพยอม, เทนเซอร์ความขบขี้มได้ และ เทนเซอร์คัปปลิงของคุณสมบัติไร้การสูญเสีย และคุณสมบัติภาวะย้อนกลับได้

2.2.1 ตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกแบบไร้การสูญเสีย

สมการ Maxwell สำหรับสนามที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ($e^{j\omega t}$) และไม่มีแหล่งจ่ายใดๆ

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B} \quad (2.10)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega \mathbf{D} \quad (2.11)$$

หาผลคูณเชิงสเกลาร์ระหว่างสมการที่ (2.10) และ \mathbf{H}^* และสังยุคผลคูณเชิงสเกลาร์ระหว่างสมการที่ (2.11) และ \mathbf{E} จากนั้นจึงนำสมการทั้งสองมาลบกันจะได้ว่า

$$\mathbf{H}^* \cdot \nabla \times \mathbf{E} - \mathbf{E} \cdot \nabla \times \mathbf{H}^* = -j\omega(\mathbf{H}^* \cdot \mathbf{B} - \mathbf{E} \cdot \mathbf{D}^*) \quad (2.12)$$

โดยเอกลักษณ์ $\nabla \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{V}) = \mathbf{V} \cdot (\nabla \times \mathbf{U}) - \mathbf{U} \cdot (\nabla \times \mathbf{V})$ (2.13)

ดังนั้นจากสมการที่ (2.12) และ (2.13) จึงได้ว่า

$$\nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) = -j\omega(\mathbf{H}^* \cdot \mathbf{B} - \mathbf{E} \cdot \mathbf{D}^*) \quad (2.14)$$

สำหรับ Complex Poynting vector จะถูกกำหนดโดยสมการ

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \quad (2.15)$$

จากสมการที่ (2.14) และ (2.15) จะได้ว่าค่าเฉลี่ยตามเวลาของไดเวอร์เจนซ์ของ Complex Poynting vector คือ

$$\langle \nabla \cdot \mathbf{S} \rangle = \frac{1}{2} \text{Re} \{ -j\omega(\mathbf{H}^* \cdot \mathbf{B} - \mathbf{E} \cdot \mathbf{D}^*) \} \quad (2.16)$$

โดยความสัมพันธ์ $\text{Re}\{C\} = (C + C^*)/2$ เมื่อ C เป็นจำนวนเชิงซ้อนและจากสมการที่ (2.5) และ (2.16) จะได้ว่า

$$\langle \nabla \cdot \mathbf{S} \rangle = \frac{-j\omega}{4} \left\{ \mathbf{H}^* \cdot (\overline{\overline{\mu}} \cdot \mathbf{H} + \overline{\overline{\zeta}} \cdot \mathbf{E}) - \mathbf{E} \cdot (\overline{\overline{\varepsilon}} \cdot \mathbf{E}^* + \overline{\overline{\xi}} \cdot \mathbf{H}^*) - \mathbf{H} \cdot (\overline{\overline{\mu}} \cdot \mathbf{H}^* + \overline{\overline{\zeta}} \cdot \mathbf{E}^*) + \mathbf{E}^* \cdot (\overline{\overline{\varepsilon}} \cdot \mathbf{E} + \overline{\overline{\xi}} \cdot \mathbf{H}) \right\} \quad (2.17)$$

พิจารณาพจน์ $\mathbf{H} \cdot \overline{\overline{\mu}} \cdot \mathbf{H}^*$ สามารถใช้ความสัมพันธ์ $\mathbf{H} \cdot \overline{\overline{\mu}} \cdot \mathbf{H}^* = \mathbf{H}^* \cdot \overline{\overline{\mu}}^+ \cdot \mathbf{H}$ โดยที่ดรรชนีบน + หมายถึง การเปลี่ยนตำแหน่ง (transpose) และสัญลักษณ์ของเมตริกซ์ ดังนั้นสมการที่ (2.17) สามารถเขียนได้เป็น

$$\langle \nabla \cdot \mathbf{S} \rangle = \frac{-j\omega}{4} \left\{ \mathbf{E}^* \cdot (\overline{\overline{\varepsilon}} - \overline{\overline{\varepsilon}}^+) \cdot \mathbf{E} + \mathbf{H}^* \cdot (\overline{\overline{\mu}} - \overline{\overline{\mu}}^+) \cdot \mathbf{H} + \mathbf{E}^* \cdot (\overline{\overline{\xi}} - \overline{\overline{\xi}}^+) \cdot \mathbf{H} + \mathbf{H}^* \cdot (\overline{\overline{\zeta}} - \overline{\overline{\zeta}}^+) \cdot \mathbf{E} \right\} \quad (2.18)$$

ในกรณีที่ $\langle \nabla \cdot \mathbf{S} \rangle > 0$ จะถือว่าตัวกลางเป็นแบบไวงาน (active media) สำหรับกรณี $\langle \nabla \cdot \mathbf{S} \rangle < 0$ จะถือว่าตัวกลางเป็นแบบเฉื่อยงาน (passive media) และเมื่อ $\langle \nabla \cdot \mathbf{S} \rangle = 0$ จะถือว่าเป็นตัวกลางที่ไร้การสูญเสีย (lossless media) ดังนั้นสำหรับตัวกลางที่ไร้การสูญเสียจะต้องได้ว่า สมการที่ (2.18) จะต้องเป็นศูนย์ ดังนั้นเงื่อนไขสำหรับตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกที่ไร้การสูญเสียคือ

$$\overline{\overline{\varepsilon}} = \overline{\overline{\varepsilon}}^+ \quad (2.19)$$

$$\overline{\overline{\mu}} = \overline{\overline{\mu}}^+ \quad (2.20)$$

$$\overline{\overline{\xi}} = \overline{\overline{\xi}}^+ \quad (2.21)$$

2.2.2 ตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกแบบภาวะย้อนกลับได้

ให้ $\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1$ เป็นสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ถูกแผ่ออกมาโดย กระแส \mathbf{J}_1 เกิดขึ้นในปริมาตรจำกัด V_1 และให้ $\mathbf{E}_2, \mathbf{H}_2$ เป็นสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ถูกแผ่ออกมาโดย กระแส \mathbf{J}_2 เกิดขึ้นในปริมาตรจำกัด V_2 แหล่งกำเนิดกระแสสองแหล่งมีการสั่นอย่างคงที่ ที่ความถี่

เดียวกัน และตัวกลางภายนอกปริมาตร V_1 และ V_2 เป็นไดรัล และอาจเป็นตัวกลางที่ไม่เป็นเอกพันธ์ จึงเห็นได้ว่า $\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1$ สัมพันธ์กับ \mathbf{J}_1 และ $\mathbf{E}_2, \mathbf{H}_2$ สัมพันธ์กับ \mathbf{J}_2 โดยสมการ

$$\nabla \times \mathbf{H}_1 = \mathbf{J}_1 + j\omega \mathbf{D}_1 \quad (2.22)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}_2 = \mathbf{J}_2 + j\omega \mathbf{D}_2 \quad (2.23)$$

โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งจากสมการที่ (2.5)

$$\mathbf{D}_1 = \overline{\overline{\boldsymbol{\varepsilon}}} \cdot \mathbf{E}_1 + \overline{\overline{\boldsymbol{\zeta}}} \cdot \mathbf{H}_1 \quad (2.24)$$

$$\mathbf{D}_2 = \overline{\overline{\boldsymbol{\varepsilon}}} \cdot \mathbf{E}_2 + \overline{\overline{\boldsymbol{\zeta}}} \cdot \mathbf{H}_2 \quad (2.25)$$

หาผลคูณเชิงสเกลาร์ระหว่างสมการที่ (2.22) และ \mathbf{E}_2 และนำมาลบกับผลคูณเชิงสเกลาร์ระหว่างสมการที่ (2.23) และ \mathbf{E}_1 จะได้ว่า

$$\mathbf{E}_2 \cdot \nabla \times \mathbf{H}_1 - \mathbf{E}_1 \cdot \nabla \times \mathbf{H}_2 = \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_1 - \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2 - j\omega(\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{D}_2 - \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{D}_1) \quad (2.26)$$

นำสมการ $\nabla \times \mathbf{E}_1 = -j\omega \mathbf{B}_1$ และ $\nabla \times \mathbf{E}_2 = -j\omega \mathbf{B}_2$ คูณด้วย \mathbf{H}_2 และ \mathbf{H}_1 ตามลำดับแล้วจึงนำมาลบกันจะได้ว่า

$$\mathbf{H}_2 \cdot \nabla \times \mathbf{E}_1 - \mathbf{H}_1 \cdot \nabla \times \mathbf{E}_2 = -j\omega(\mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{H}_2 - \mathbf{B}_2 \cdot \mathbf{H}_1) \quad (2.27)$$

จากสมการที่ (2.13), (2.26), (2.27) และจาก $\nabla \cdot (\mathbf{A} - \mathbf{B}) = \nabla \cdot \mathbf{A} - \nabla \cdot \mathbf{B}$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) &= \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_1 - \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2 \\ &+ j\omega(\mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{D}_1 - \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{D}_2 + \mathbf{B}_2 \cdot \mathbf{H}_1 - \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{H}_2) \end{aligned} \quad (2.28)$$

และจากความสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งจากสมการที่ (2.5)

$$\mathbf{B}_1 = \overline{\overline{\boldsymbol{\mu}}} \cdot \mathbf{H}_1 + \overline{\overline{\boldsymbol{\varsigma}}} \cdot \mathbf{E}_1 \quad (2.29)$$

$$\mathbf{B}_2 = \overline{\overline{\boldsymbol{\mu}}} \cdot \mathbf{H}_2 + \overline{\overline{\boldsymbol{\varsigma}}} \cdot \mathbf{E}_2 \quad (2.30)$$

จากสมการที่ (2.24), (2.25), (2.29) และ (2.30) แทนลงในสมการที่ (2.28) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) = & \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_1 - \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2 + j\omega \left\{ \mathbf{E}_2 \cdot (\bar{\bar{\epsilon}} - \bar{\bar{\epsilon}}') \cdot \mathbf{E}_1 \right. \\ & + \mathbf{H}_1 \cdot (\bar{\bar{\mu}} - \bar{\bar{\mu}}') \cdot \mathbf{H}_2 + \mathbf{E}_2 \cdot (\bar{\bar{\zeta}} + \bar{\bar{\zeta}}') \cdot \mathbf{H}_1 \\ & \left. + \mathbf{H}_1 \cdot (\bar{\bar{\zeta}} + \bar{\bar{\zeta}}') \cdot \mathbf{E}_2 \right\} \end{aligned} \quad (2.31)$$

หาปริพันธ์ด้านซ้ายมือของสมการที่ (2.31) ทั้งทั้งปริภูมิ และจากทฤษฎี Divergence โดยที่ \mathbf{n}_0 คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่มีทิศทางชี้ออกและตั้งฉากกับพื้นผิวโพรง และจะได้ว่า

$$\int_V \nabla \cdot (\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) dV = \int_S (\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) \cdot \mathbf{n}_0 dS \quad (2.32)$$

จากสมการที่ (2.32) จะได้ว่าสมการที่ (2.31) สามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} \int_S (\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 - \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) \cdot \mathbf{n}_0 dS = & \int_{V_1} \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_1 dV_1 - \int_{V_2} \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2 dV_2 \\ & + j\omega \int_V \left\{ \mathbf{E}_2 \cdot (\bar{\bar{\epsilon}} - \bar{\bar{\epsilon}}') \cdot \mathbf{E}_1 + \mathbf{H}_1 \cdot (\bar{\bar{\mu}} - \bar{\bar{\mu}}') \cdot \mathbf{H}_2 \right. \\ & \left. + \mathbf{E}_2 \cdot (\bar{\bar{\zeta}} + \bar{\bar{\zeta}}') \cdot \mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_1 \cdot (\bar{\bar{\zeta}} + \bar{\bar{\zeta}}') \cdot \mathbf{E}_2 \right\} dV \end{aligned} \quad (2.33)$$

โดยที่ ทรานซ์โพส t หมายถึง การเปลี่ยนตำแหน่ง (transpose)

เมื่อทางฝั่งขวาของสมการที่ (2.33) เป็นศูนย์จะได้ว่าตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกจะเป็นแบบภาวะย้อนกลับได้ และจากทฤษฎี reciprocity [13] ดังสมการที่ (2.34)

$$\int_{V_1} \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_1 dV_1 = \int_{V_2} \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2 dV_2 \quad (2.34)$$

ดังนั้นเงื่อนไขที่ทำให้ตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกเป็นแบบภาวะย้อนกลับได้คือ

$$\bar{\bar{\epsilon}} = \bar{\bar{\epsilon}}' \quad (2.35)$$

$$\bar{\bar{\mu}} = \bar{\bar{\mu}}' \quad (2.36)$$

$$\bar{\bar{\zeta}} = -\bar{\bar{\zeta}}' \quad (2.37)$$

จากเงื่อนไขจากสมการที่ (2.35), (2.36) และ (2.37) จะเห็นได้ว่าตัวกลางไอโซทรอปิกจะมีคุณสมบัติเป็นแบบภาวะย้อนกลับได้ สำหรับตัวกลางแอนไอโซทรอปิกด้วยเงื่อนไขเทนเซอร์ความซบซึ่มได้และเทนเซอร์สภาพยอมมีความสมมาตรจะสามารถเป็นแบบภาวะย้อนกลับได้ สำหรับตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิกซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขจากสมการที่ (2.35), (2.36) และเงื่อนไขความสมมาตร $\overset{=}{\zeta} = \overset{=+}{\zeta}$ จะเป็นแบบภาวะย้อนกลับได้ ถ้า $\overset{=}{\zeta}$ และ $\overset{=}{\zeta}$ เป็นเมตริกซ์ของจำนวนจินตภาพแท้ (purely imaginary matrices)

2.3 ความสัมพันธ์ปรุ่่งแต่งของตัวกลางไครัล

ตัวกลางนี้เป็นกรณีหนึ่งของตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิก โดยพารามิเตอร์ทั้งหมดของตัวกลางนี้จะเป็นค่าสเกลาร์

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} - j \zeta \mathbf{B} \quad (2.38)$$

$$\mathbf{H} = -j \eta \mathbf{E} + \mu^{-1} \mathbf{B} \quad (2.39)$$

โดยที่ $\zeta = \eta = \frac{\kappa}{\eta_0 \mu_r}$ เมื่อ κ คือพารามิเตอร์ไครัลลิตี (chirality parameter)

ตัวกลางไครัลเป็นโครงสร้างที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาและมีความต่อเนื่องกันของตัวกลาง ตัวกลางไครัลประกอบไปด้วยวัตถุไครัลซึ่งมีการเรียงตัวอย่างมีทิศทาง วัตถุไครัลเป็นวัตถุที่ขาดความสมมาตร เพราะไม่สามารถมีรูปร่างแบบเดิมได้โดยการสะท้อนกระจกหรือหมุน แต่จะมีลักษณะเป็น left-handed หรือ right-handed อย่างใดอย่างหนึ่ง วัตถุที่ไม่ใช่ไครัลจะเรียกว่าอไครัล ตัวอย่างของวัตถุไครัล เช่น ขดลวด, แถบโมบิลิส และทรงสี่หน้าปกติ [15]

เมื่อคลื่นที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นตกลงอย่างตั้งฉากบนตัวกลางไครัลที่เป็นแผ่นบาง จะเกิดคลื่นสองลักษณะขึ้นในตัวกลางคือ หนึ่งคือ คลื่นที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมทางซ้าย แบบที่สองคือคลื่นที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมทางขวา คลื่นทั้งสองแบบนี้จะมีความเร็วเฟสที่แตกต่างกัน หลังจากทีคลื่นเดินทางผ่านชั้นตัวกลางไครัล คลื่นทั้งสองแบบจะรวมตัวกันเป็นคลื่นที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นซึ่งระนาบของการโพลาไรซ์ถูกหมุนไปตามระนาบของโพลาไรซ์ของคลื่นที่ตกกระทบ ปริมาณการหมุนขึ้นอยู่กักระยะทางที่วิ่งอยู่ในตัวกลาง เรียกการหมุนระนาบของแสงโพลาไรซ์นี้ว่า optical activity โดยปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นตลอดทั้งตัวกลาง ปรากฏการณ์ optical activity ถูกค้นพบโดย D.F.Arago [16] เป็นคนแรกใน ค.ศ.1811 เขาพบว่าผลึกของ

ควอดทซ์จะหมุนระนาบของแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นซึ่งถูกส่งในทิศทางเดียวกับแกนที่ส่งแสง ต่อมา การทดลองของ J.B. Biot บนแผ่นควอดทซ์ได้แสดงให้เห็นว่า 1. Optical activity จะขึ้นกับความหนาของแผ่นควอดทซ์ 2. การหมุนของระนาบของแสงโพลาไรซ์จะไม่เท่ากันที่ความยาวคลื่นต่างกัน 3. การหายไปของ optical activity เมื่อสองแผ่นควอดทซ์ที่มีความหนาเหมือนกันแต่มีทิศทางต่างกันถูกใช้ ใน ค.ศ. 1815 Biot ค้นพบว่า optical activity ไม่ได้ถูกจำกัดอยู่ในผลึกของแข็ง แต่จะปรากฏในตัวกลางอื่นด้วย เช่น น้ำมันสน, พืชชนิด laurel และสารละลายกรดปุน A.Fresnel ใน ค.ศ. 1822 ได้แสดงว่า รังสีของแสงเมื่อเดินทางผ่านแกนของผลึกควอดทซ์จะถูกแยกเป็นแสงโพลาไรซ์แบบวงกลมซึ่งมีสองทิศทาง คือตามทิศมือขวาและตามทิศมือซ้าย และจะเดินทางด้วยความเร็วเฟสที่ต่างกัน เขาได้ให้เหตุผลว่า ความแตกต่างของคลื่นที่มีความเร็วเฟสแตกต่างกันเป็นสาเหตุของ optical activity C.H. Papas, D.L. Jaggard และ A.R. Mickelson ในงานวิจัยนี้ได้แสดงว่าปฏิกิริยาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับกลุ่มของขดลวดเหล็กที่มีทิศทางอย่างไม่แน่นอน และทำการศึกษาโดยใช้สมการของแมกซ์เวล (Maxwell) ซึ่งนำไปสู่ความสัมพันธ์ปรุ่งแต่ง (Constitutive Relation) สำหรับตัวกลางไครัลซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการใช้สมการนี้เพื่อวิเคราะห์และออกแบบตัวกลางไครัล

ใน ค.ศ. 2008 A. Gomez et al. [17] ได้ทำการศึกษาและทดลองวัสดุไครัลที่เป็น isotropic ในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม โดยสร้างวัสดุไครัลจากขดลวดเล็ก และวางลงอย่างไร้ทิศทางในตัวกลางเรซินสังเคราะห์ โดยทำการทดลองในย่านความถี่ x band โดยทำการตัดวัสดุไครัลออกมาเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมแล้วจึงนำไปวางไว้ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมเพื่อวิเคราะห์วัดหาค่าอิมพีแดนซ์ และค่า S parameter ในงานนี้ได้มีทำการทดลองหลายแบบโดยมีความหนาแน่นของจำนวนขดลวดที่แตกต่างกันแล้วทำการเปรียบเทียบผลที่วัดได้กับทฤษฎี ผลที่ได้ขนาดของค่า S parameter มีความไม่ถูกต้องมากกว่าเฟส เพราะความไม่แม่นยำในการวัดในส่วนของจำนวนจินตภาพมากกว่าส่วนจริง และในปี ค.ศ. 2009 I. Barba, A. Cristina, L. Cabeceira, A. Gomez and J. Represa [18] ได้ออกแบบลายทองแดงเป็นรูปตัว crank ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นไครัล โดยนำเทคโนโลยีพีซีบอร์ดมาใช้ ทำให้สามารถออกแบบวัสดุไครัลได้ง่ายขึ้น และราคาถูก นอกจากนี้ยังได้สร้างโมเดลเพื่อศึกษาคุณสมบัติของไครัล เช่น reciprocity



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของไครัลบนพีซีบอร์ด

การนำวัสดุไครัลไปใช้งานนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายอย่าง [19] - [25] เช่น เรโซเนเตอร์, ท่อนำคลื่น, หม้อแปลงโพลาไรซ์ (polarization transformers), ไฟเบอร์, สายอากาศ และฝาครอบสายอากาศ (antenna radomes) เป็นต้น โดยที่ข้อจำกัดของค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตี้นั้น ช่วงของค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตี้นั้นจะอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 [5] แต่ในงานวิจัย [26] ได้ทำการสร้างและสังเคราะห์ตัวกลางไครัลโดยใช้เทคโนโลยีพีซีบอร์ด ในงานวิจัยนี้ได้ทำทั้งการจำลองและการวัดซึ่งผลที่ได้นั้นมีความสอดคล้องกัน งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าช่วงของค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตี้นั้นขยายไปยังช่วง -5 ถึง 5 ได้ แต่จะมีเฉพาะบางความถี่เท่านั้น ที่ค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตี้นั้นจะมีค่ามาก ดังนั้นในการนำวัสดุไครัลไปใช้งานจึงต้องมีการเลือกใช้งานความถี่ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตี้นั้นตามที่ต้องการ

บทที่ 3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในบทนี้จะกล่าวถึงระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์เชิงเลข เพื่อนำวิธีนี้มาใช้ในการคำนวณหาความถี่เรโซแนนซ์ (resonant frequency), ตัวประกอบคุณภาพ และพารามิเตอร์การกระเจิง (scattering parameter) ของอุปกรณ์เรโซเนเตอร์

3.1 การหาสูตรสำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวัสดุไบแอนไอโซทรอปิกเพื่อคำนวณความถี่เรโซแนนซ์และค่าตัวประกอบคุณภาพของอุปกรณ์เรโซเนเตอร์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างสมการเพื่อคำนวณความถี่เรโซแนนซ์และค่าตัวประกอบคุณภาพของอุปกรณ์เรโซเนเตอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยแบ่งหัวข้อย่อยออกเป็น 3.1.1 การหาสมการคลื่นสำหรับวัสดุไบแอนไอโซทรอปิก 3.1.2 กระบวนการแบ่งโพรงออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยเพื่อทำการวิเคราะห์โดยวิธี Edge element 3.1.3 สมการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวัสดุไบแอนไอโซทรอปิกเพื่อคำนวณความถี่เรโซแนนซ์ 3.1.4 อุปกรณ์เรโซเนเตอร์ 3.1.5 สรุปขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเพื่อคำนวณความถี่เรโซแนนซ์และค่าตัวประกอบคุณภาพของอุปกรณ์เรโซเนเตอร์ 3.1.6 การนิยามพารามิเตอร์การกระเจิง 3.1.7 การหาสูตรสำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวัสดุไบแอนไอโซทรอปิกเพื่อคำนวณพารามิเตอร์การกระเจิงของอุปกรณ์เรโซเนเตอร์ และ 3.1.8 สรุปขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเพื่อคำนวณพารามิเตอร์การกระเจิงของอุปกรณ์เรโซเนเตอร์

3.1.1 การหาสมการคลื่นสำหรับวัสดุไบแอนไอโซทรอปิก

สามารถทำได้โดยนำสมการที่ (2.8) มาใช้ในการสร้างสมการสำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในสามมิติสำหรับวัสดุประเภทไบแอนไอโซทรอปิก และจากหัวข้อที่ 3.1 ได้กล่าวถึงระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ และได้เลือกสมการคลื่นในรูปแบบของสนามไฟฟ้าเพื่อความสะดวกในการใส่เงื่อนไขขอบเขตแบบผนังตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (Perfect electric conductor: PEC wall)

เริ่มจากสมการของ Maxwell สำหรับแหล่งจ่ายอิสระภายใต้สนามที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ($e^{j\omega t}$) นั่นคือ

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B} \quad (3.6)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega \mathbf{D} \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (2.8) และ (3.6) จะได้ว่า

$$\nabla \times (\bar{\mu}^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{E}) = -j\omega \nabla \times \mathbf{H} + \omega \nabla \times (\bar{\eta} \cdot \mathbf{E}) \quad (3.8)$$

ขั้นต่อไปพิจารณาสมการ

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega \bar{\varepsilon} \cdot \mathbf{E} + j\bar{\xi} \cdot \nabla \times \mathbf{E} \quad (3.9)$$

นำสมการที่ (3.9) แทนลงในสมการที่ (3.8) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} & \nabla \times (\bar{\mu}_r^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{E}) \\ & = k_0^2 \bar{\varepsilon}_r \cdot \mathbf{E} + k_0 \cdot (120\pi) \cdot (\bar{\xi} \cdot \nabla \times \mathbf{E} + \nabla \times (\bar{\eta} \cdot \mathbf{E})) \end{aligned} \quad (3.10)$$

โดยที่ $\mathbf{E} = E_x \mathbf{a}_x + E_y \mathbf{a}_y + E_z \mathbf{a}_z$, $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_0 \bar{\varepsilon}_r$, $\bar{\mu} = \mu_0 \bar{\mu}_r$ และ $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$

สมการที่ (3.10) เรียกว่าสมการคลื่นสำหรับตัวกลางไบแอนไอโซทรอปิก สมการนี้ยังสามารถเขียนโดยใช้สนามแม่เหล็ก \mathbf{H} แทนด้วยสนามไฟฟ้า \mathbf{E} ได้ เพื่อความสะดวกในที่นี้จะแสดงเฉพาะกรณีสนาม \mathbf{E} ต่อไปสร้างฟังก์ชันทดสอบ (testing function) $\mathbf{T} = T_x \mathbf{a}_x + T_y \mathbf{a}_y + T_z \mathbf{a}_z$ เพื่อนำมาใช้กับวิธีของ Galerkin [9] หาผลคูณเชิงสเกลาร์ระหว่างฟังก์ชันทดสอบกับสมการที่ (3.10) จากนั้นจึงทำการหาปริพันธ์ทั่วทั้งปริมาตร V จะได้ว่า

$$\begin{aligned} & \iiint_V \mathbf{T} \cdot \nabla \times (\bar{\mu}_r^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{E}) dV - k_0^2 \iiint_V \mathbf{T} \cdot \bar{\varepsilon}_r \cdot \mathbf{E} dV \\ & - k_0 \cdot (120\pi) \cdot \iiint_V \left(\mathbf{T} \cdot \bar{\xi} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) + \mathbf{T} \cdot \nabla \times (\bar{\eta} \cdot \mathbf{E}) \right) dV = 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

พิจารณาเทอมแรกในสมการที่ (3.11) ด้วยเอกลักษณ์ของเวกเตอร์

$$\mathbf{A} \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) = (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot \mathbf{B} - \nabla \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) \quad \text{จะได้ว่า}$$

$$\begin{aligned} \iiint_V \mathbf{T} \cdot (\nabla \times (\overline{\overline{\mu_r}}^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{E})) dV &= \iiint_V (\nabla \times \mathbf{T}) \cdot (\overline{\overline{\mu_r}}^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{E}) dV \\ &- \iiint_V \nabla \cdot (\mathbf{T} \times (\overline{\overline{\mu_r}}^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{E})) dV \end{aligned} \quad (3.12)$$

โดยทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์ $\iiint_V \nabla \cdot \mathbf{A} dV = \iint_S \mathbf{A} \cdot \mathbf{n}_0 dS$ และเอกลักษณ์ของเวกเตอร์ $(\mathbf{A} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{n}_0 = -\mathbf{A} \cdot (\mathbf{n}_0 \times \mathbf{B})$ ซึ่ง V ปังถึงปริพันธ์ทั่วทั้งปริมาตรโพรง S ปังถึงปริพันธ์ทั่วทั้งพื้นผิวภายนอกโพรง และ \mathbf{n}_0 คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่มีทิศทางชี้ออกและตั้งฉากกับพื้นผิวโพรง และจากสมการที่ (3.12) พิจารณาเทอมที่สองทางฝั่งขวามือจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \iiint_V \nabla \cdot (\mathbf{T} \times (\overline{\overline{\mu_r}}^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{E})) dV &= \iint_S (\mathbf{T} \times (\overline{\overline{\mu_r}}^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{E})) \cdot \mathbf{n}_0 dS \\ &= \iint_S (\overline{\overline{\mu_r}}^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{E}) \cdot (\mathbf{n}_0 \times \mathbf{T}) dS \end{aligned} \quad (3.13)$$

เนื่องจากโพรงมีขอบเขตเป็นตัวนำทางไฟฟ้า สนามไฟฟ้าทั้งในทิศแนวสัมผัสกับจะต้องเป็นศูนย์บนพื้นที่ผิวภายนอก ดังนั้นจึงต้องกำหนดให้เงื่อนไขขอบเขตโดยให้ $\mathbf{n}_0 \times \mathbf{T} = \mathbf{0}$ บนผนังตัวนำ สมบูรณ์จะได้ว่าสมการที่ (3.13) จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสมการที่ (3.12) จึงสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\iiint_V \mathbf{T} \cdot (\nabla \times (\overline{\overline{\mu_r}}^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{E})) dV = \iiint_V (\nabla \times \mathbf{T}) \cdot (\overline{\overline{\mu_r}}^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{E}) dV \quad (3.14)$$

พิจารณาพจน์ที่สองในสมการที่ (3.11) ด้วยเอกลักษณ์ $\mathbf{A} \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) = (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot \mathbf{B} - \nabla \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B})$ จะได้ว่า

$$\iiint_V \mathbf{T} \cdot \nabla \times (\overline{\overline{\eta}} \cdot \mathbf{E}) dV = \iiint_V (\nabla \times \mathbf{T}) \cdot (\overline{\overline{\eta}} \cdot \mathbf{E}) dV - \iiint_V \nabla \cdot (\mathbf{T} \times \overline{\overline{\eta}} \cdot \mathbf{E}) dV \quad (3.15)$$

จากสมการที่ (3.15) พิจารณาพจน์ที่สองทางฝั่งขวามือสามารถกำหนดให้เงื่อนไขขอบเขตโดยให้ $\mathbf{n}_0 \times \mathbf{T} = \mathbf{0}$ บนผนังตัวนำสมบูรณ์จะได้ว่า

$$\iiint_V \nabla \cdot (\mathbf{T} \times \overline{\overline{\eta}} \cdot \mathbf{E}) dV = \iint_S (\mathbf{T} \times \overline{\overline{\eta}} \cdot \mathbf{E}) \cdot \mathbf{n}_0 dS = \iint_S \overline{\overline{\eta}} \cdot \mathbf{E} \cdot (\mathbf{n}_0 \times \mathbf{T}) dS = 0 \quad (3.16)$$

ดังนั้นสมการที่ (3.15) จึงสามารถเขียนได้ว่า

$$\iiint_v \mathbf{T} \cdot (\nabla \times \bar{\bar{\eta}} \cdot \mathbf{E}) dV = \iiint_v (\nabla \times \mathbf{T}) \cdot \bar{\bar{\eta}} \cdot \mathbf{E} dV \quad (3.17)$$

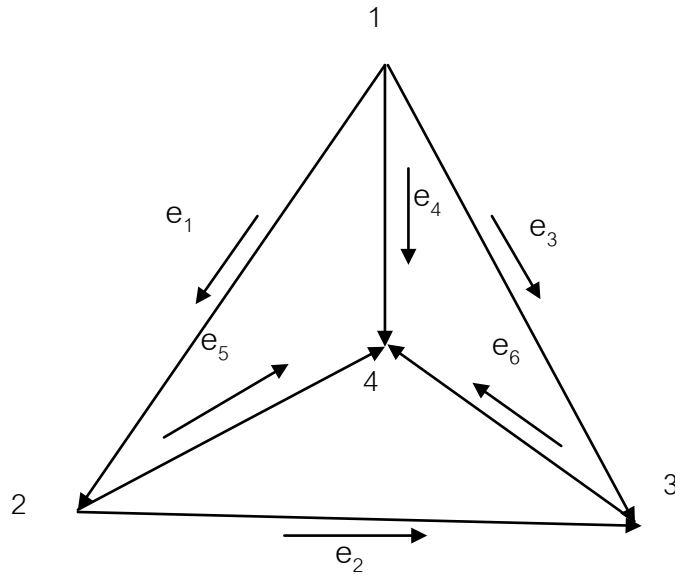
ในที่สุดสมการที่ (3.11) สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$\begin{aligned} \iiint_v (\nabla \times \mathbf{T}) \cdot (\bar{\mu}_r^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{E}) dV - k_0^2 \iiint_v \mathbf{T} \cdot \bar{\bar{\epsilon}}_r \cdot \mathbf{E} dV \\ - k_0 \cdot (120\pi) \cdot \iiint_v \left(\mathbf{T} \cdot \bar{\bar{\xi}} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) + \nabla \times \mathbf{T} \cdot \bar{\bar{\eta}} \cdot \mathbf{E} \right) dV = 0 \end{aligned} \quad (3.18)$$

3.1.2 กระบวนการแบ่งโพรงออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยเพื่อทำการวิเคราะห์โดยวิธี Edge element

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วิธี edge element แทน nodal-based element ซึ่งไม่เหมาะสมในการแสดงเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าแม่เหล็ก ตามที่เงื่อนไขขอบเขตมักจะอยู่ในรูปแบบที่เฉพาะเจาะจงเพียงสนามเวกเตอร์ในแนวสัมผัสกับขอบเขต และยังสามารถเกิดคำตอบซึ่งเป็นผลเฉลยปลอมเทียมได้ วิธี edge element สามารถกำจัดผลเฉลยปลอมเทียมได้ และกำหนดความต่อเนื่องของสนามเพียงในแนวสัมผัสทั้งสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้อบังคับของสนามเหล่านี้ได้ง่าย อีกทั้งยังง่ายต่อการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบนผนังตัวนำ สำหรับสนามไฟฟ้าจะเป็นผนังตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (PEC: perfect electric conductor wall) และสำหรับสนามแม่เหล็กจะเป็นผนังตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ (PMC: perfect magnetic conductor wall)

ปริมาตรของโพรงถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์โดยใช้ทรงสี่หน้าอันดับหนึ่งดังภาพที่ 3.1 รูปทรงสี่หน้าประกอบไปด้วยจุดยอดสี่จุดและด้านหกด้าน ด้านทั้งหกด้านนั้นถูกสร้างขึ้นตาม [9] แสดงดังตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ทรงสี่หน้าอันดับหนึ่ง

สนามไฟฟ้าในเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าเดียวสามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$\mathbf{E} = \sum_{m=1}^6 e_m \mathbf{W}_m \quad (3.19)$$

โดยตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของด้านทั้งหกคือ e_1, e_2, \dots, e_6 ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวมสามารถหาได้จากสมการที่ (3.19) เวกเตอร์สัมผัสด้าน (vector tangential edge elements) ถูกเขียนโดย

$$\mathbf{W}_m = L_m (\alpha_{ij} \nabla \alpha_{ij} - \alpha_{ji} \nabla \alpha_{ji}) \quad (3.20)$$

สำหรับสมการที่ (3.20) ดรรชนีล่าง m แสดงถึงลำดับของด้าน i และ j แทนจุดยอดซึ่งเชื่อมต่อกันระหว่างด้าน L_m คือความยาวของด้านที่ m α_{ii} และ α_{ij} เป็น simplex coordinates ซึ่งเกี่ยวข้องกับ i และ j สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\alpha_{i1} = \frac{V_1}{V} \quad (3.21)$$

$$\alpha_{i2} = \frac{V_2}{V} \quad (3.22)$$

$$\alpha_{t3} = \frac{V_3}{V} \quad (3.23)$$

$$\alpha_{t4} = \frac{V_4}{V} \quad (3.24)$$

$$\text{โดยที่ } V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}, \quad V_1 = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x & y & z \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}, \quad V_2 = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x & y & z \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix},$$

$$V_3 = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x & y & z \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \text{และ} \quad V_4 = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x & y & z \end{vmatrix}$$

โดยที่ $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3)$ และ (x_4, y_4, z_4) คือจุดยอดของทรงสี่หน้า สำหรับจุดยอดใดๆ α_{ii} , ($i = 1, 2, 3, 4$) ถูกเขียนได้โดย

$$\alpha_{ii} = \frac{a_{ii} + b_{ii}x + c_{ii}y + d_{ii}z}{6V} \quad (3.25)$$

โดยที่ a_{ii}, b_{ii}, c_{ii} และ d_{ii} คือโคแฟกเตอร์ที่เหมาะสมจากดีเทอร์มิแนนต์ใน V_1, V_2, V_3 และ V_4

ตารางที่ 3.1 การสร้างด้านของทรงสี่หน้าอันดับหนึ่ง

| ด้านที่ | โนดที่ | |
|---------|--------|---|
| | i | j |
| 1 | 1 | 2 |
| 2 | 2 | 3 |
| 3 | 1 | 3 |
| 4 | 1 | 4 |
| 5 | 2 | 4 |
| 6 | 3 | 4 |

นำสมการที่ (3.25) แทนลงในสมการที่ (3.20) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_m = \frac{L_m}{36V^2} & \left[(A_{xm} + B_{xm}y + C_{xm}z)\mathbf{a}_x + (A_{ym} + B_{ym}x + C_{ym}z)\mathbf{a}_y \right. \\ & \left. + (A_{zm} + B_{zm}x + C_{zm}y)\mathbf{a}_z \right] \end{aligned} \quad (3.26)$$

โดย $A_{xm} = a_{ii}b_{ij} - a_{ij}b_{ii}$, $B_{xm} = c_{ii}b_{ij} - c_{ij}b_{ii}$, $C_{xm} = d_{ii}b_{ij} - d_{ij}b_{ii}$,

$$A_{ym} = a_{ii}c_{ij} - a_{ij}c_{ii}, B_{ym} = b_{ii}c_{ij} - b_{ij}c_{ii} = -B_{xm}, C_{ym} = d_{ii}c_{ij} - d_{ij}c_{ii},$$

$$A_{zm} = a_{ii}d_{ij} - a_{ij}d_{ii}, B_{zm} = b_{ii}d_{ij} - b_{ij}d_{ii} = -C_{xm} \text{ และ } C_{zm} = c_{ii}d_{ij} - c_{ij}d_{ii} = -C_{ym}$$

\mathbf{W}_m สามารถแสดงได้ว่าสอดคล้องกับเงื่อนไข

$$\mathbf{t}_m \cdot \mathbf{W}_m = \begin{cases} 1 & \text{ค่า 1 สำหรับด้านที่ } m \text{ ค่า 0 สำหรับด้านอื่นๆ} \\ 0 \end{cases}$$

โดยที่ \mathbf{t}_m คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยมีทิศทางไปตามด้านของทรงสี่หน้า

3.1.3 สมการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวัสดุ ไบแอนไอโซทรอปิกเพื่อคำนวณความถี่เรโซแนนซ์

นำสมการที่ (3.19) แทนลงในที่ (3.18), ทำการหาปริพันธ์ทั่วทั้งปริมาตรของทรงสี่หน้า และทำการหาผลบวกของแต่ละเอลิเมนต์จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^6 \iiint_{\Delta} (\nabla \times \mathbf{W}_m) \cdot (\overline{\mu}_r^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{W}_n) e_m dV & = k_0^2 \sum_{m=1}^6 \iiint_{\Delta} (\mathbf{W}_m \cdot \overline{\varepsilon}_r \cdot \mathbf{W}_n) e_m dV \\ & + k_0 \cdot (120\pi) \cdot \sum_{m=1}^6 \iiint_{\Delta} \left(\mathbf{W}_n \cdot \overline{\xi} \cdot (\nabla \times \mathbf{W}_m) + \nabla \times \mathbf{W}_n \cdot \overline{\eta} \cdot \mathbf{W}_m \right) e_m dV \end{aligned} \quad (3.27)$$

($n = 1, 2, \dots, 6$)

โดย Δ แสดงถึงปริพันธ์ทั่วทั้งปริมาตรของทรงสี่หน้า สมการที่ (3.27) สามารถเขียนให้อยู่ใน
รูปแบบเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$[S_{el}]\{e\} = k_0^2 [T_{el}]\{e\} + k_0 [C_{el}]\{e\} \quad (3.28)$$

โดย
$$[S_{el}] = \iiint_{\Delta} (\nabla \times \mathbf{W}_m) \cdot (\overline{\overline{\mu_r}}^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{W}_n) dV \quad (3.29)$$

$$[T_{el}] = \iiint_{\Delta} (\mathbf{W}_m \cdot \overline{\overline{\varepsilon_r}} \cdot \mathbf{W}_n) dV \quad (3.30)$$

$$[C_{el}] = (120\pi) \cdot \iiint_{\Delta} \left(\mathbf{W}_n \cdot \overline{\overline{\xi}} \cdot (\nabla \times \mathbf{W}_m) + \nabla \times \mathbf{W}_n \cdot \overline{\overline{\eta}} \cdot \mathbf{W}_m \right) dV \quad (3.31)$$

เมตริกซ์เหล่านี้สามารถถูกประกอบกันทั่วทั้งหมดเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าในโพรง เพื่อได้มาเป็นสมการเมตริกซ์เจะจรวม

$$[S]\{e\} = k_0^2 [T]\{e\} + k_0 [C]\{e\} \quad (3.32)$$

โดยที่
$$S_{mn} = \sum_{e=1}^{all\ elements} \int_{V^e} (\nabla \times \mathbf{W}_m) \cdot (\overline{\overline{\mu_r}}^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{W}_n) dV$$

$$T_{mn} = \sum_{e=1}^{all\ elements} \int_{V^e} (\mathbf{W}_m \cdot \overline{\overline{\varepsilon_r}} \cdot \mathbf{W}_n) dV$$

$$C_{mn} = 120\pi \cdot \sum_{e=1}^{all\ elements} \int_{V^e} \left(\mathbf{W}_n \cdot \overline{\overline{\xi}} \cdot (\nabla \times \mathbf{W}_m) + \nabla \times \mathbf{W}_n \cdot \overline{\overline{\eta}} \cdot \mathbf{W}_m \right) dV$$

จากสมการที่ (3.32) สัญลักษณ์ $[.]$ จะบ่งถึงเมตริกซ์ที่ทราบค่า ส่วนสัญลักษณ์ $\{.\}$ จะบ่งถึงเมตริกซ์ที่ต้องการทราบค่า สมการที่ (3.32) สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ง่ายต่อการหาคำตอบได้ดังนี้

$$([K] - k_0 [M])\{q\} = [0] \quad (3.33)$$

โดย $[K] = \begin{bmatrix} [S] & [0] \\ [0] & [T] \end{bmatrix}, [M] = \begin{bmatrix} [C] & [T] \\ [T] & [0] \end{bmatrix}$ และ $\{q\} = \begin{Bmatrix} [E] \\ k_0 [E] \end{Bmatrix}$

เพื่อให้แน่ใจว่าสนามมีความต่อเนื่องทุกเอลิเมนต์ จึงต้องมีการกำหนดทิศทางของด้าน โดยจะชี้จากหมายเลขของโนดที่มีค่าน้อยกว่าไปยังหมายเลขโนดที่มีค่ามากกว่า ดังนั้นสมการที่ (3.19) จะต้องคูณด้วยลบหนึ่งถ้า local edge vector มีทิศทางไม่เหมือนกับ global edge vector และสนามไฟฟ้าจะมีค่าเป็นศูนย์บนขอบตัวนำในทิศสัมผัสกับขอบตัวนำ โดยกำหนดให้สัมประสิทธิ์ของสมการที่ (3.19) เป็นศูนย์ และในการคำนวณหาค่าเจะจจากสมการที่ (3.33)

นั้น ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมแมทแลป (MATLAB) เวอร์ชัน 7.8.0 (2009a) ในการคำนวณ โดยใช้คำสั่ง eig ในการคำนวณหาค่าเจาะจง หลังจากคำนวณค่าเลขคลื่น (wave number) ได้จากสมการที่ (3.33) จึงสามารถคำนวณความถี่เรโซแนนซ์ของอุปกรณ์เรโซเนเตอร์ได้จาก

$$f = \frac{k_0 c_0}{2\pi} \quad (3.34)$$

3.1.4 อุปกรณ์เรโซเนเตอร์

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้คำนวณค่าเจาะจงของเรโซเนเตอร์แบบต่างๆ เช่น โพรงแบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกเติมด้วยอากาศ, โพรงแบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกเติมด้วยไดอิเล็กตริก, โพรงแบบทรงกระบอกถูกเติมด้วยอากาศ, โพรงแบบทรงกลมถูกเติมด้วยอากาศ และโพรงแบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งถูกตัดไปบางส่วนและถูกเติมด้วยอากาศ โดยที่โพรงเหล่านี้ถูกปกคลุมด้วยผนังตัวนำทางไฟฟ้าสมบูรณ์ซึ่งผนังตัวนำนี้สามารถกักสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไว้ภายในได้ ทำให้ไม่เกิดการรบกวนอุปกรณ์อื่นๆ เรโซเนเตอร์จึงนิยมใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น วงจรกรอง, ออสซิลเลเตอร์, เครื่องวัดความถี่ และวงจรขยายปรับค่าได้ ผู้วิจัยสนใจพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ความถี่เรโซแนนซ์ และตัวประกอบคุณภาพ โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์จะขึ้นกับชนิดของวัสดุที่นำมาใช้เติมลงในเรโซเนเตอร์ และรูปทรงของเรโซเนเตอร์ เช่น ความถี่เรโซแนนซ์ของทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากสามารถหาได้จากสมการ [1]

$$f_{mnp} = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2} \quad (3.35)$$

โดยที่ m, n และ p คือจำนวนของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของคลื่นหนึ่งในทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ ถ้าเป็นรูปทรงอื่นจะมีสมการของความถี่เรโซแนนซ์ที่แตกต่างกันออกไป สำหรับตัวประกอบคุณภาพนั้นสามารถนิยามโดย [1]

$$Q = \omega_0 \times (\text{พลังงานสะสมเฉลี่ย}) / (\text{พลังงานสูญเสียต่อหนึ่งวินาที}) \quad (3.36)$$

โดยที่ ω_0 คือความถี่เรโซแนนซ์ พลังงานสะสมจะมีทั้งพลังงานสะสมทั้งที่เกิดจากสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ส่วนพลังงานสูญเสียจะมาจากการสูญเสียที่มาจาก การนำไฟฟ้าที่ผนังของเรโซเนเตอร์ และการสูญเสียที่เกิดจากตัวกลางไดอิเล็กตริก โดยทั่วไปแล้วการสูญเสียที่เกิดจากตัวกลางวัสดุไดอิเล็กตริกจะส่งต่อตัวประกอบคุณภาพเป็นหลัก เราสามารถหาตัวประกอบ

คุณภาพได้อีกวิธีหนึ่งคือ หาจากความถี่เรโซแนนซ์ในกรณีที่มีตัวกลางที่มีการสูญเสียจากไดอิเล็กทริก ทำให้ได้ว่าความถี่เรโซแนนซ์จะเป็นจำนวนเชิงซ้อน และสามารถหาตัวประกอบคุณภาพที่มาจาก การสูญเสียจากวัสดุไดอิเล็กทริกได้จากสมการ [1]

$$Q = \frac{\omega_r}{2\omega_i} \quad (3.37)$$

โดยที่ ω_r และ ω_i คือส่วนจริงและส่วนจินตภาพของความถี่เชิงมุมเรโซแนนซ์ตามลำดับ

ทั้งสมการที่ (3.36) และสมการ (3.37) สามารถคำนวณค่าตัวประกอบคุณภาพที่มาจากตัวกลางมีความสูญเสียจากวัสดุไดอิเล็กทริก และวัสดุแม่เหล็ก เพราะสมการที่ (3.36) เป็นสมการที่เป็นจริงเสมอเพราะสอดคล้องกับทฤษฎีพอยน์ติง สำหรับสมการที่ (3.37) เป็นการนิยามจากวงจรรอนุกรมหรือวงจรรขนานของตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ เมื่อความต้านทานขาเข้ามีค่าลดลงเป็น $\frac{1}{\sqrt{2}}$ เท่า สามารถนิยาม แบนด์วิดท์ (BW)

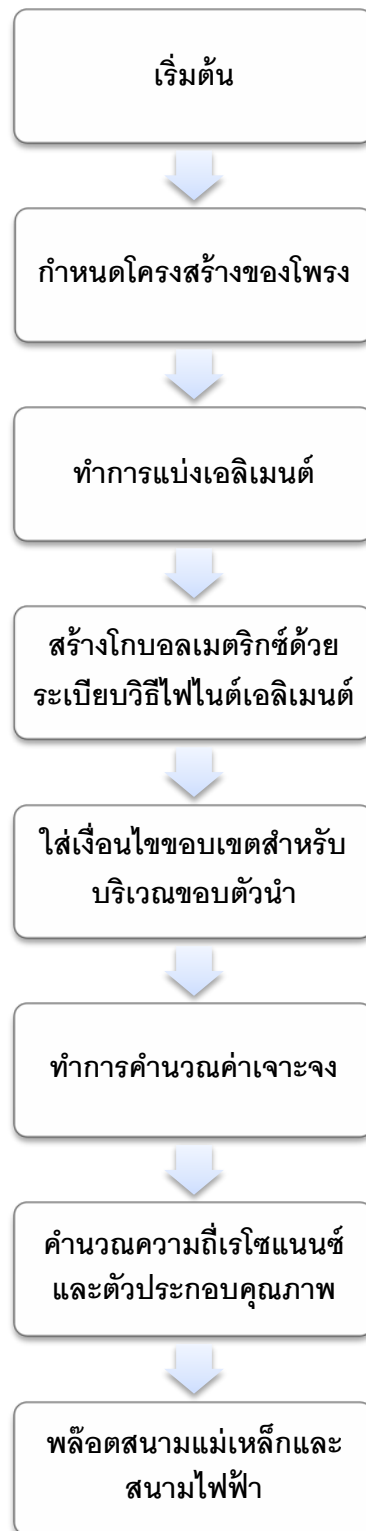
$$BW = \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{Q} \quad (3.38)$$

โดยที่ $\omega_0 = \omega_r$ และ $\Delta\omega = \omega_i$

จากงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มียานวิจัยที่บ่งชี้ว่าสมการที่ 3.37 สามารถคำนวณค่าตัวประกอบคุณภาพของวัสดุไครัลได้จริง ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องทำการเปรียบเทียบผลของค่าตัวประกอบคุณภาพจากทั้งสมการที่ (3.36) และสมการ (3.37) และถ้าการคำนวณค่าตัวประกอบคุณภาพจากสมการที่ (3.36) แล้วได้ผลลัพธ์เท่ากับที่ได้จากสมการที่ (3.37) แสดงว่าเรโซเนเตอร์ที่ใช้วัสดุไครัลเป็นส่วนประกอบสามารถเปลี่ยนเป็นวงจรมุมูลของ ตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำได้

3.1.5 สรุปขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเพื่อคำนวณความถี่เรโซแนนซ์และตัวประกอบคุณภาพของอุปกรณ์เรโซเนเตอร์

จากหัวข้อที่ได้กล่าวมาตั้งแต่หัวข้อ 3.1.1 ถึง 3.1.4 สามารถสรุปเป็นแผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในวิทยานิพนธ์นี้ได้ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์และตัวประกอบคุณภาพ

3.1.6 การนิยามพารามิเตอร์การกระเจิง

พิจารณาโครงข่ายจำนวน N พอร์ตในภาพที่ 3.3 โดยที่ V_n^+ คือแรงดันคลื่นที่ตกกระทบบนพอร์ต n และ V_n^- คือแรงดันคลื่นที่สะท้อนออกจากพอร์ต n พารามิเตอร์การกระเจิงสามารถเขียนในรูปแบบเมตริกซ์โดยมีความสัมพันธ์กับแรงดันคลื่นที่ตกกระทบและแรงดันคลื่นที่สะท้อนได้ดังนี้ [1]

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & S_{N2} & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

สำหรับสมาชิกในเมตริกซ์พารามิเตอร์การกระเจิงสามารถนิยามได้โดย

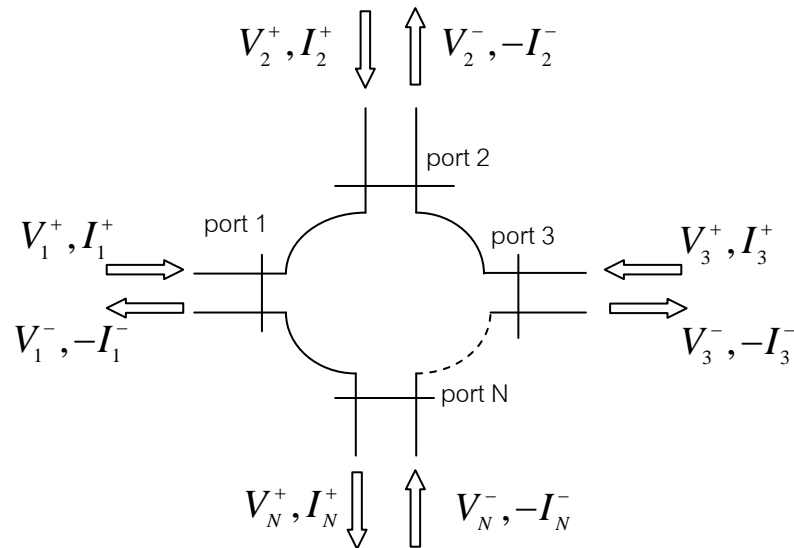
$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0 \text{ for } k \neq j} \quad (3.40)$$

สมการที่ (3.40) แสดงว่า S_{ij} สามารถหาได้โดยขับพอร์ตที่ j ด้วยคลื่นตกกระทบของแรงดัน V_j^+ และวัดขนาดของคลื่นสะท้อน V_i^- ซึ่งออกมาจากพอร์ตที่ i คลื่นตกกระทบทุกพอร์ทยกเว้นพอร์ตที่ j ถูกทำให้เป็นศูนย์ ซึ่งหมายความว่าพอร์ตทั้งหมดควรจะทำกรแมตซ์โหลดเพื่อหลีกเลี่ยงการสะท้อน ดังนั้น S_{ii} คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนโดยมองเข้าไปในพอร์ตที่ i เมื่อพอร์ตอื่นทำการแมตซ์โหลด ส่วน S_{ij} คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากพอร์ต j ไปยังพอร์ต i เมื่อพอร์ตอื่นทำการแมตซ์โหลด

เราสามารถคำนวณหาเมตริกซ์พารามิเตอร์การกระเจิงจากเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ ($[Z]$: impedance matrix) หรือ เมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ ($[Y]$: admittance matrix) หรือในทางกลับกันโดยเริ่มจาก สมมติให้อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance), Z_{0n} ของพอร์ตทั้งหมดมีค่าเท่าหมด เพื่อความง่ายเราสามารถกำหนดให้ $Z_{0n} = 1$ ต่อไปพิจารณาแรงดันรวมและกระแสรวมที่พอร์ตที่ n จะได้ว่า

$$V_n = V_n^+ + V_n^- \quad (3.41)$$

$$I_n = I_n^+ - I_n^- = V_n^+ - V_n^- \quad (3.42)$$



ภาพที่ 3.3 โครงข่ายทางไม่โคจรเวฟจำนวน N พอร์ต

จากสมการ $\{V\} = [Z]\{I\}$, สมการที่ (3.41) และ (3.42) จะได้ว่า

$$[Z]\{I\} = [Z]\{V^+\} - [Z]\{V^-\} = \{V\} = \{V^+\} + \{V^-\} \quad (3.43)$$

จะได้ว่า
$$([Z] + [U])\{V^-\} = ([Z] - [U])\{V^+\} \quad (3.44)$$

โดยที่ $[U]$ คือเมตริกซ์เอกลักษณ์

ดังนั้นจากสมการที่ (3.39) และ (3.44) จะได้ว่า

$$[S] = ([Z] + [U])^{-1} ([Z] - [U]) \quad (3.45)$$

สมการที่ (3.45) จะสามารถหาพารามิเตอร์การกระเจิงได้จากเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนจากเมตริกซ์อิมพีแดนซ์เป็นเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์โดยความสัมพันธ์

$$[Y] = [Z]^{-1} \quad (3.46)$$

3.1.7 การหาสูตรสำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวัสดุไบแอนไอโซทรอปิกเพื่อคำนวณพารามิเตอร์การกระเจิงของอุปกรณ์เรโซเนเตอร์

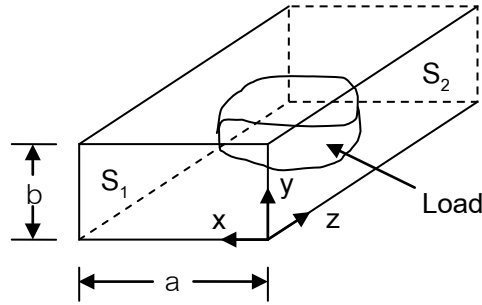
ในหัวข้อนี้มีจุดประสงค์เพื่อแสดงการคำนวณค่าพารามิเตอร์การกระเจิง พารามิเตอร์การกระเจิงมีความสำคัญในการออกแบบทั้งเรโซเนเตอร์ และทำอนาคลีน ทำให้ผู้ใช้งานสามารถรู้

ถึงช่วงความถี่ที่ควรใช้งานของเรโซเนเตอร์ และทำนายคลื่นได้ ในงานวิจัย [11] ได้ทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การกระเจิงของวงจรทางไมโครเวฟ (microwave circuits) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีโหมดแมตชิ่ง (mode matching method) โดยสามารถวิเคราะห์รูปทรงทั้งสองมิติและสามมิติได้ และสามารถวิเคราะห์วัสดุประเภทแอนไอโซทรอปิก (anisotropic media) ได้ ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ขยายไปยังวัสดุประเภทไบแอนไอโซทรอปิก (bianisotropic media)

ความแตกต่างระหว่างการคำนวณเพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ และตัวประกอบคุณภาพกับการคำนวณเพื่อหาพารามิเตอร์การกระเจิง คือการใส่เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) โดยในกรณีการคำนวณหาความถี่เรโซแนนซ์ และตัวประกอบคุณภาพ จะใส่เงื่อนไขขอบเขตผนังตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์แบบปิดล้อมรอบทั้งหมด ซึ่งจะแตกต่างกับการคำนวณหาพารามิเตอร์การกระเจิง จะมีการยกเว้นโดยใส่เงื่อนไขขอบเขตผนังตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ที่บริเวณพอร์ตทั้งหมด และจะมีการใส่คลื่น TE โหมดและคลื่น TM โหมดเข้าไปแทนเพื่อคำนวณหาพารามิเตอร์การกระเจิงออกมา ดังนั้นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการหาพารามิเตอร์การกระเจิงสามารถเริ่มได้จากสมการที่ (3.13) และทำการปรับสมการจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \iiint_V \nabla \cdot (\mathbf{T} \times (\overline{\mu}_r^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{E})) dV &= \iint_S (\mathbf{T} \times (\overline{\mu}_r^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{E})) \cdot \mathbf{n}_0 dS \\ &= -\iint_S \mathbf{T} \cdot \left(\mathbf{n}_0 \times \left(\overline{\mu}_r^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{E} \right) \right) dS \end{aligned} \quad (3.47)$$

จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการป้อนคลื่น TE โหมดหรือคลื่น TM โหมดเข้าไปยังพอร์ตที่พิจารณาจะทำให้ทางฝั่งขวามือของสมการที่ (3.47) มีค่าไม่เป็นศูนย์ซึ่งจะแตกต่างกับในกรณีที่คำนวณหาความถี่เรโซแนนซ์ และตัวประกอบคุณภาพซึ่งจะมีค่าเป็นศูนย์ ทำนายคลื่นสองพอร์ตหน้าตัดสี่เหลี่ยมแสดงได้ดังภาพที่ 3.4 โดยผลเฉลยของคลื่น TE โหมด และคลื่น TM โหมดในทำนายคลื่นนี้คือ



ภาพที่ 3.4 ท่อนำคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยมสองพอร์ตที่มีโหลดบรรจุอยู่ภายใน

ผลเฉลยสำหรับ TE โมด

$$\mathbf{e}_{mn}^{TE}(x, y) = N_{mn} \left(\frac{n}{b} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \mathbf{a}_x - \frac{m}{a} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \mathbf{a}_y \right) \quad (3.48)$$

ผลเฉลยสำหรับ TM โมด

$$\mathbf{e}_{mn}^{TM}(x, y) = N_{mn} \left(\frac{M}{a} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \mathbf{a}_x + \frac{n}{b} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \mathbf{a}_y \right) \quad (3.49)$$

$$\mathbf{e}_{zmn}^{TM}(x, y) = \frac{N_{mn}}{\pi\gamma_{mn}} \left(\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 \right) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (3.50)$$

$$\text{โดยที่ } N_{mn} = \sqrt{v_m v_n} / \sqrt{n^2 \frac{a}{b} + m^2 \frac{b}{a}}$$

$$\gamma_{mn} = \begin{cases} j\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} & \rightarrow \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \leq k_0^2 \\ \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - k_0^2} & \rightarrow \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 > k_0^2 \end{cases}$$

$$v_m = \begin{cases} 1 & m = 0 \\ 2 & m \neq 0 \end{cases}$$

นอกจากนี้ผลเฉลยทั้ง TE โมดและ TM โมดจะมีคุณสมบัติตั้งฉากกันคือ

$$\int_0^b \int_0^a e_{mn}^{TE} e_{m'n'}^{TE} dx dy = \delta_{mm'} \delta_{nn'} \quad (3.51)$$

$$\int_0^b \int_0^a e_{mn}^{TM} e_{m'n'}^{TM} dx dy = \delta_{mm'} \delta_{nn'} \quad (3.52)$$

$$\int_0^b \int_0^a e_{mn}^{TE} e_{m'n'}^{TM} dx dy = 0 \quad (3.53)$$

$$\text{โดยที่ } \delta_{mm'} = \begin{cases} 0 & m \neq m' \\ 1 & m = m' \end{cases}$$

จากสมการที่ (3.11) และ (3.47) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} & \iiint_v (\nabla \times \mathbf{T}) \cdot (\overline{\mu_r}^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{E}) dV - k_0 \cdot (120\pi) \cdot \iiint_v (\mathbf{T} \cdot \overline{\xi} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) + \nabla \times \mathbf{T} \cdot \overline{\eta} \cdot \mathbf{E}) dV \\ & - k_0^2 \iiint_v \mathbf{T} \cdot \overline{\varepsilon_r} \cdot \mathbf{E} dV = - \sum_{i=1}^P \iint_{S_i} \mathbf{T} \cdot (\mathbf{a}_z \times (\overline{\mu_r}^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{E}_i^i)) dS_i \end{aligned} \quad (3.54)$$

โดยที่ $\mathbf{E}_t^i = \sum_{k=1}^{mi} V_k^i(\mathbf{a}_z) \mathbf{e}_{tk}^i(\mathbf{a}_x, \mathbf{a}_y)$ และ $\mathbf{H}_t^i = \sum_{k=1}^{mi} I_k^i(\mathbf{a}_z) \mathbf{h}_{tk}^i(\mathbf{a}_x, \mathbf{a}_y)$ เมื่อ mi เป็นจำนวนโมดที่

ทำให้คำตอบลู่อู่เข้า

ดังนั้นสมการที่ (3.54) สามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$[G]\{E_c\} = [B]\{I\} \quad (3.55)$$

โดยที่ $[G] = [S] - k_0[C] - k_0^2[T]$ เมื่อ $[S], [C]$ และ $[T]$ คือเมตริกซ์จากสมการที่ (3.32)

$$[B] = \left[\{b_1^1\} \quad \cdots \quad \{b_{m1}^1\} \quad \cdots \quad \{b_k^i\} \quad \cdots \quad \{b_1^P\} \quad \cdots \quad \{b_{mP}^P\} \right]$$

$$\text{โดย } \{b_k^i\} = \left\{ \begin{array}{c} \int_{S_i} \mathbf{W}_{1m} \cdot (\mathbf{a}_z \times \mathbf{h}_{tk}^i) dS_i \\ \cdots \\ \int_{S_i} \mathbf{W}_{jm} \cdot (\mathbf{a}_z \times \mathbf{h}_{tk}^i) dS_i \\ \cdots \\ \int_{S_i} \mathbf{W}_{Nm} \cdot (\mathbf{a}_z \times \mathbf{h}_{tk}^i) dS_i \end{array} \right\}$$

ดังนั้นจะได้ว่า $\{b_k^i\}$ ของ $[B]$ คือ

$$\{b_k^i\} = \left\{ \begin{array}{l} j \cdot 120\pi \cdot k_0 \cdot \int_{S_i} \mathbf{W}_{1m} \cdot (\mathbf{a}_z \times \mathbf{h}_{tk}^i) dS_i \\ \dots \\ j \cdot 120\pi \cdot k_0 \cdot \int_{S_i} \mathbf{W}_{jm} \cdot (\mathbf{a}_z \times \mathbf{h}_{tk}^i) dS_i \\ \dots \\ j \cdot 120\pi \cdot k_0 \cdot \int_{S_i} \mathbf{W}_{Nm} \cdot (\mathbf{a}_z \times \mathbf{h}_{tk}^i) dS_i \end{array} \right\}$$

นอกจากนี้ในการคำนวณ $[B]$ ต้องใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

สำหรับ TE โมด

$$\mathbf{E} = -Z_{TE} (\mathbf{a}_z \times \mathbf{H}) \quad (3.56)$$

โดยที่ $Z_{TE} = \frac{j\omega\mu}{\gamma_{mn}}$

สำหรับ TM โมด

$$\mathbf{H} = \frac{1}{Z_{TM}} (\mathbf{a}_z \times \mathbf{E}) \quad (3.57)$$

โดยที่ $Z_{TM} = \frac{\gamma_{mn}}{j\omega\epsilon}$

ต่อไปพิจารณา

$$\int_{S_i} \mathbf{E} \cdot (\mathbf{a}_z \times \mathbf{h}_{ik}^i) dS_i = V_{ik}^i(\mathbf{a}_z) \int_{S_i} \mathbf{e}_{ik}^i \cdot (\mathbf{a}_z \times \mathbf{h}_{ik}^i) dS_i \quad (3.58)$$

สมการที่ 3.58 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้คือ

$$[B_1]^t \{E_c\} = [\Delta] \{V\} \quad (3.59)$$

จากสมการที่ (3.55) และ (3.59) จะได้ว่า เมตริกซ์อิมพีแดนซ์สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

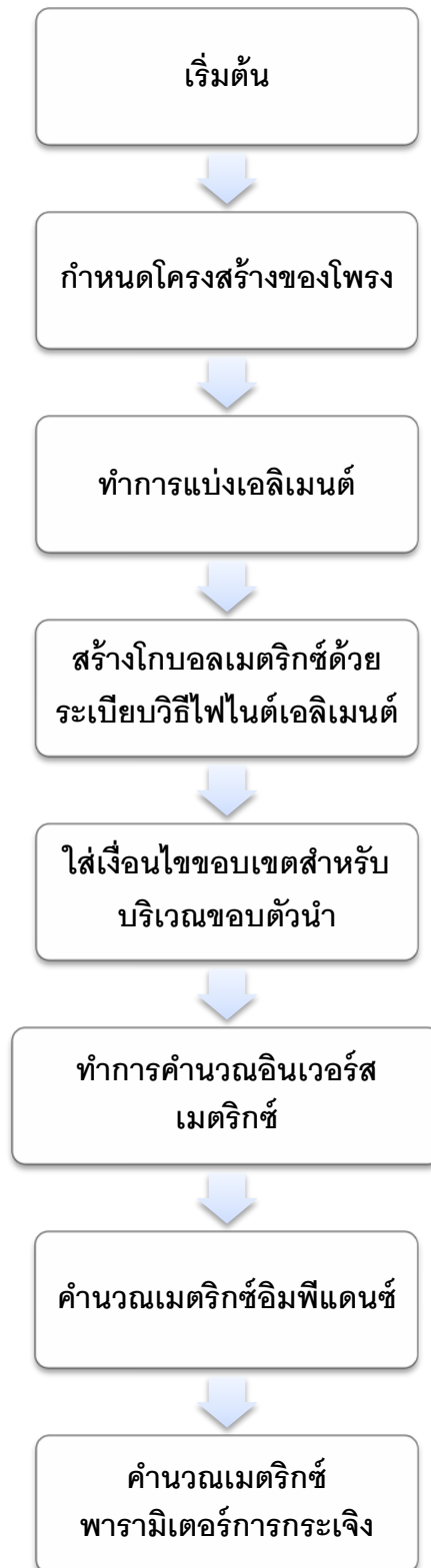
$$[Z] = [B_N]^t [G]^{-1} [B_N] \quad (3.61)$$

เมื่อ $[B_N] = [B][\Delta]^{-1/2}$ โดยที่ $\Delta = \int_{S_i} \mathbf{e}_{ik}^i \cdot (\mathbf{a}_z \times \mathbf{h}_{ik}^i) dS_i$

จะเห็นได้ว่าเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ในสมการที่ (3.61) จะขึ้นอยู่กับความถี่หรือค่า k_0 ดังนั้นเราจะสามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ที่เราสนใจได้ เมื่อคำนวณเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ได้แล้วจึงอาศัยสมการที่ (3.45) เพื่อคำนวณหาเมตริกซ์พารามิเตอร์การกระเจิง

3.1.8 สรุปขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเพื่อคำนวณพารามิเตอร์การกระเจิงของอุปกรณ์เรโซเนเตอร์

จากหัวข้อที่ได้กล่าวมาตั้งแต่หัวข้อ 3.1.6 ถึง 3.1.7 สามารถสรุปเป็นแผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในวิทยานิพนธ์นี้ได้ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในการคำนวณเมตริกซ์พารามิเตอร์การกระเจิง

บทที่ 4

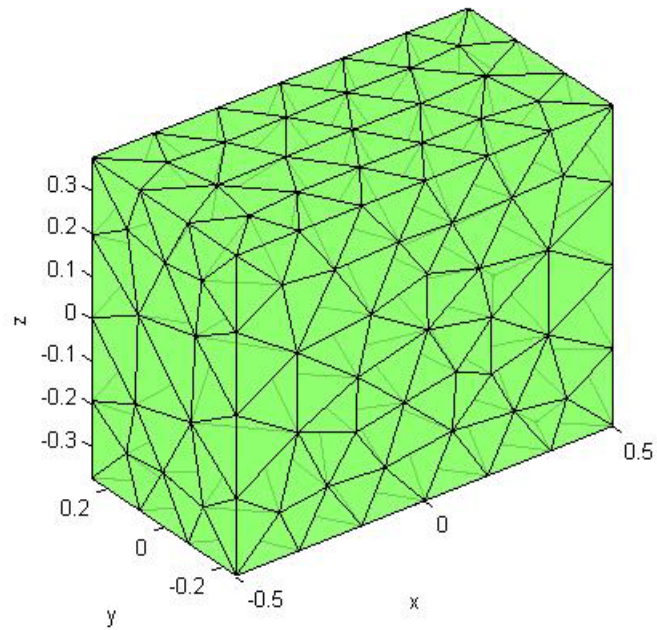
ผลการจำลองในการคำนวณหาความถี่เรโซแนนซ์ ตัวประกอบคุณภาพ และ พารามิเตอร์การกระเจิง

ในบทนี้ได้มีการจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ทั้งในกรณีตัวกลางไดอิเล็กตริก และ ตัวกลางโครัล ในการจำลองนี้ได้แบ่งออกเป็น 4.1 ผลการจำลองของความถี่เรโซแนนซ์ในตัวกลาง ไดอิเล็กตริก 4.2 ผลการจำลองของความถี่เรโซแนนซ์และตัวประกอบคุณภาพสำหรับตัวกลาง โครัล 4.3 ผลการจำลองของพารามิเตอร์การกระเจิงในตัวกลางไดอิเล็กตริก และ 4.4 ผลการ จำลองของพารามิเตอร์การกระเจิงในตัวกลางโครัล

4.1 ผลการจำลองของความถี่เรโซแนนซ์ในตัวกลางไดอิเล็กตริก

ในหัวข้อนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้กับงานวิจัย [9] ในกรณีที่ตัวกลางเป็นวัสดุ ไดอิเล็กตริก โดยรูปร่างของเรโซเนเตอร์ที่ได้ทำการเปรียบเทียบผลนั้นมีด้วยกันหลายรูปแบบ เช่น แบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก แบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ถูกเติมด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกบางส่วน แบบ ทรงกระบอก แบบทรงกลม และแบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ถูกตัดออกไปบางส่วน โดยในงาน วิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรมขึ้นโดยใช้ภาษาแมทแล็บ (MATLAB) 7.8.0 (R2009a) และ ประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ใช้หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) Intel® core™2 Quad Q8300 @2.50 GHz 2.50 GHz หน่วยความจำ 2.00 GB บนระบบปฏิบัติการ 64-bit

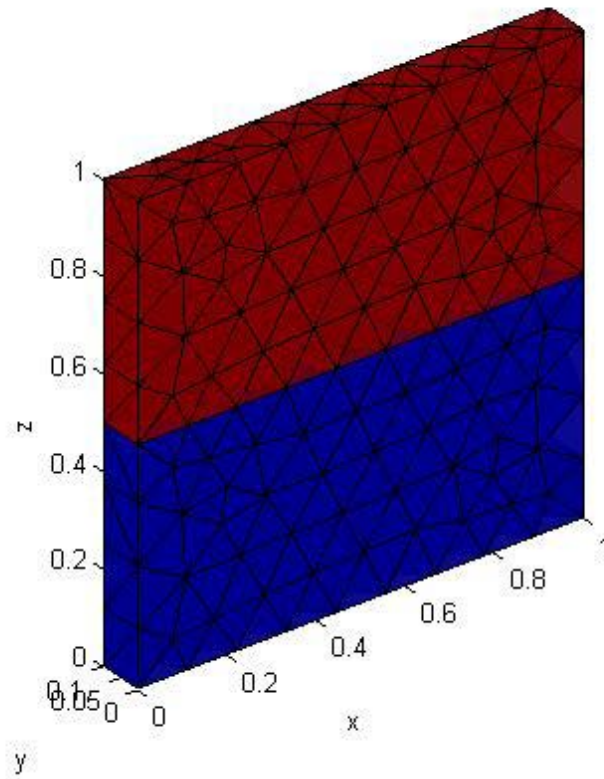
โดยที่จำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในแต่ละการจำลองมีดังนี้ สำหรับเรโซเนเตอร์แบบทรงสี่เหลี่ยม มุมฉากได้ทำการแบ่งเอลิเมนต์ออกเป็น 922 เอลิเมนต์, เรโซเนเตอร์แบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ถูก เติมด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกบางส่วนได้ทำการแบ่งเอลิเมนต์ออกเป็น 751 เอลิเมนต์, เรโซเนเตอร์แบบ ทรงกระบอกได้ทำการแบ่งเอลิเมนต์ออกเป็น 788 เอลิเมนต์, เรโซเนเตอร์แบบทรงกลมได้ทำการ แบ่งเอลิเมนต์ออกเป็น 514 เอลิเมนต์ และเรโซเนเตอร์แบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ถูกตัดออกไป บางส่วนได้ทำการแบ่งเอลิเมนต์ออกเป็น 406 เอลิเมนต์ ผู้วิจัยได้ทำการเลือกจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ ในการจำลองนี้โดยเลือกให้ใกล้เคียงกับงานวิจัย [9] หนึ่งเราสามารถเพิ่มความแม่นยำของผลการ จำลองที่ได้โดยเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ให้มากขึ้น



ภาพที่ 4.1 โพรงแบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกเติมด้วยอากาศซึ่งมีขนาดกว้าง 1 ซม. ยาว 0.5 ซม. และสูง 0.75 ซม.

ตารางที่ 4.1 เลขคลื่นที่ได้จากการคำนวณค่าเจาะจงในกรณีโพรงแบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกเติมด้วยอากาศ

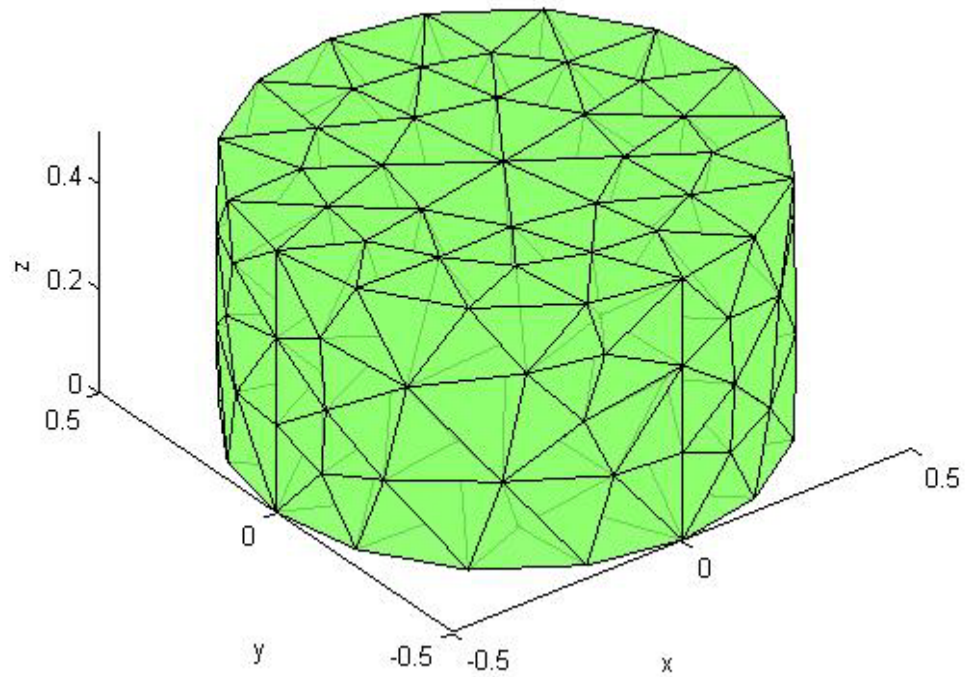
| Mode | k_0, cm^{-1} | | | Error |
|-------------------|-----------------|---------------|-----------|--------|
| | Analytical [27] | Reference [9] | This work | |
| TE ₁₀₁ | 5.236 | 5.242 | 5.215 | 0.401% |
| TM ₁₁₀ | 7.025 | 6.942 | 6.992 | 0.470% |
| TE ₀₁₁ | 7.531 | 7.372 | 7.495 | 0.478% |
| TE ₂₀₁ | 7.531 | 7.560 | 7.529 | 0.027% |
| TE ₁₁₁ | 8.179 | 8.064 | 8.116 | 0.770% |
| TM ₁₁₁ | 8.179 | 8.164 | 8.120 | 0.721% |
| TM ₂₁₀ | 8.886 | 8.725 | 8.826 | 0.675% |
| TE ₁₀₂ | 8.947 | 8.871 | 8.877 | 0.782% |



ภาพที่ 4.2 โพรงแบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกเติมด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีความสูงตั้งแต่ 0.5 ซม. จนถึง 1 ซม. และโพรงมีขนาดกว้าง 1 ซม. ยาว 0.5 ซม. และสูง 0.75 ซม

ตารางที่ 4.2 เลขคลื่นที่ได้จากการคำนวณค่าเจาะจงในกรณีโพรงแบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกเติมด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก

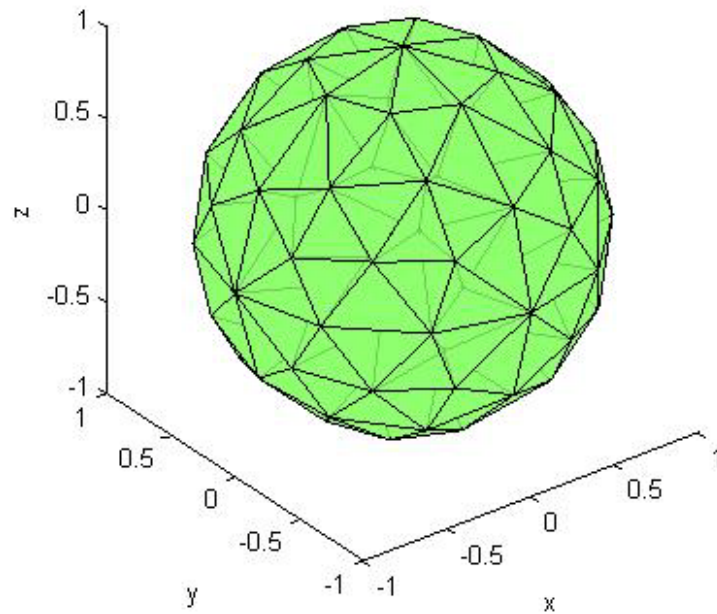
| Mode | k_0, cm^{-1} | | | Error |
|--------------------|-----------------|---------------|-----------|--------|
| | Analytical [27] | Reference [9] | This work | |
| TEz ₁₀₁ | 3.538 | 3.524 | 3.529 | 0.254% |
| TMz ₂₀₁ | 5.445 | 5.401 | 5.410 | 0.643% |
| TEz ₁₀₂ | 5.935 | 5.931 | 5.923 | 0.202% |
| TEz ₃₀₁ | 7.503 | 7.382 | 7.383 | 1.560% |
| TEz ₂₀₂ | 7.633 | 7.562 | 7.536 | 1.271% |
| TMz ₁₀₃ | 8.096 | 8.003 | 7.952 | 1.779% |



ภาพที่ 4.3 โพรงแบบทรงกระบอกถูกเติมด้วยอากาศซึ่งมีรัศมี 0.5 ซม. และสูง 0.5 ซม.

ตารางที่ 4.3 เลขคลื่นที่ได้จากการคำนวณค่าเจาะจงในกรณีโพรงแบบทรงกระบอกถูกเติมด้วยอากาศ

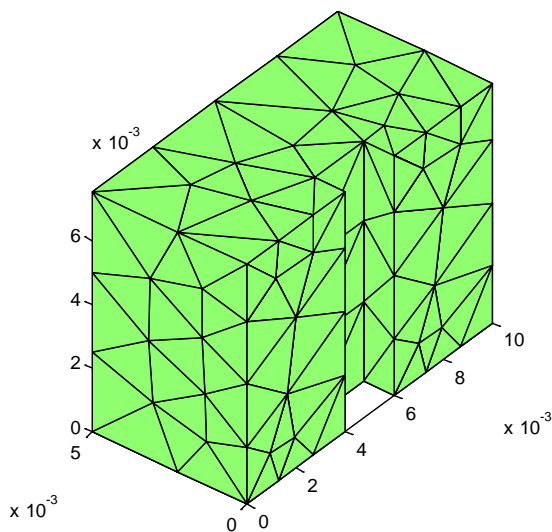
| Mode | k_0, cm^{-1} | | | Error |
|-------------------|-----------------|---------------|-----------|--------|
| | Analytical [27] | Reference [9] | This work | |
| TM ₀₁₀ | 4.810 | 4.782 | 4.806 | 0.083% |
| TE ₁₁₁ | 7.283 | 7.210 | 7.275 | 0.110% |
| TE ₁₁₁ | 7.283 | 7.290 | 7.287 | 0.055% |
| TM ₁₁₀ | 7.650 | 7.575 | 7.604 | 0.601% |
| TM ₁₁₀ | 7.650 | 7.620 | 7.629 | 0.275% |
| TM ₀₁₁ | 7.840 | 7.901 | 7.952 | 1.429% |
| TE ₂₁₁ | 8.658 | 8.676 | 8.742 | 0.970% |
| TE ₂₁₁ | 8.658 | | 8.844 | 2.148% |



ภาพที่ 4.4 โพรงแบบทรงกลมถูกเติมด้วยอากาศซึ่งมีรัศมี 1 ซม.

ตารางที่ 4.4 เลขคลื่นที่ได้จากการคำนวณค่าเจาะจงในกรณีโพรงแบบทรงกลม
ถูกเติมด้วยอากาศ

| Mode | k_0, cm^{-1} | | | Error |
|------------------------|-----------------|---------------|-----------|--------|
| | Analytical [27] | Reference [9] | This work | |
| TM ₀₁₀ | 2.744 | 2.799 | 2.801 | 2.077% |
| TM ₀₁₀ | 2.744 | 2.802 | 2.804 | 2.187% |
| TM ₀₁₀ | 2.744 | 2.807 | 2.805 | 2.223% |
| TM ₀₂₁ | 3.870 | 3.961 | 3.985 | 2.972% |
| TM _{121,even} | 3.870 | 3.976 | 3.996 | 3.256% |
| TM _{121,odd} | 3.870 | 3.986 | 4.000 | 3.359% |
| TM _{221,even} | 3.870 | 3.994 | 4.006 | 3.514% |
| TM _{221,odd} | 3.870 | 3.998 | 4.015 | 3.747% |
| TE ₀₁₁ | 4.493 | 4.421 | 4.439 | 1.202% |
| TE _{111,even} | 4.493 | 4.478 | 4.456 | 0.824% |
| TE _{111,odd} | 4.493 | 4.501 | 4.507 | 0.312% |



ภาพที่ 4.5 โพรงแบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งถูกตัดไปบางส่วนและถูกเติมด้วยอากาศ

ตารางที่ 4.5 เลขคลื่นที่ได้จากการคำนวณค่าเจาะจงในกรณีโพรงแบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งถูกตัดไปบางส่วนและถูกเติมด้วยอากาศ

| Mode | k_0, cm^{-1} | | | |
|------|----------------|--------------|------------------------|------------|
| | Reference [27] | 671 unknowns | This work 644 unknowns | Difference |
| 1 | 4.999 | | 4.976 | 0.460% |
| 2 | 7.354 | | 7.263 | 1.237% |
| 3 | 7.832 | | 7.749 | 1.060% |
| 4 | 7.942 | | 7.828 | 1.435% |
| 5 | 7.959 | | 7.914 | 0.565% |
| 6 | 8.650 | | 8.500 | 1.734% |
| 7 | 8.916 | | 8.852 | 0.718% |
| 8 | 9.103 | | 9.101 | 0.022% |
| 9 | 9.757 | | 9.638 | 1.220% |
| 10 | 9.927 | | 9.770 | 1.582% |

จากตารางที่ 4.1 ถึง 4.5 จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมในงานวิทยานิพนธ์นี้มีความผิดพลาดอย่างมากไม่เกิน 4% ในแต่ละกรณี และความผิดพลาดจะมากที่สุดในการโพรงแบบทรงกลม เพราะในการโพรงกลมการแบ่งเอลิเมนต์จะมีความผิดพลาดมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ เราไม่สามารถทำให้พื้นผิวของทรงสี่หน้าโค้งเหมือนกับทรงกลมได้ แต่เราสามารถลดความผิดพลาดนี้ได้โดยเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ให้มากขึ้นได้ดังตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนเอลิเมนต์มากขึ้น ความผิดพลาดสำหรับโหมดแรกจะมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.6 เลขคลื่นที่ได้จากการคำนวณค่าเจาะจงในกรณีโพรงแบบทรงกลมถูกเติมด้วยอากาศโดย
ทำการเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์

| จำนวนเอลิ- เมนต์ | จำนวนตัว แปร | โมด TM ₀₁₀ | โมด TM ₀₁₀ | โมด TM ₀₁₀ | เวลาที่ใช้ (วินาที) | ความผิดพลาด สำหรับโมดแรก |
|---|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 514 | 723 | 2.801 | 2.804 | 2.805 | 3.820 | 2.077% |
| 803 | 1117 | 2.787 | 2.789 | 2.790 | 15.752 | 1.567% |
| 1142 | 1526 | 2.782 | 2.784 | 2.784 | 50.115 | 1.385% |
| 1991 | 2597 | 2.771 | 2.771 | 2.772 | 288.165 | 0.984% |
| ผลเฉลยแม่นยำตรง (หน่วยที่ใช้คือ 1/ซม.) | | 2.744 | 2.744 | 2.744 | | |

4.2 ผลการจำลองของความถี่เรโซแนนซ์และตัวประกอบคุณภาพสำหรับ ตัวกลางไดรัล

ในหัวข้อนี้มีจุดประสงค์คือการเปรียบเทียบผลที่ได้กับงานวิจัยอื่นเพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยแบ่งหัวข้อออกเป็น 4.2.1 ผลการจำลองของความถี่เรโซแนนซ์สำหรับตัวกลางไดรัลในกรณีเรโซเนเตอร์แบบทรงกลมถูกเติมด้วยวัสดุไดรัลทั้งหมด, 4.2.2 ผลการจำลองของความถี่เรโซแนนซ์สำหรับตัวกลางไดรัลในกรณีเรโซเนเตอร์แบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกเติมด้วยวัสดุไดรัลเพียงครึ่งเดียว, 4.2.3 ผลการจำลองของพลังงานสะสมเฉลี่ยในสนามไฟฟ้า และพลังงานสะสมเฉลี่ยในสนามแม่เหล็กสำหรับตัวกลางไดรัลในอุปกรณ์เรโซเนเตอร์, 4.2.4 ผลการจำลองของค่าตัวประกอบคุณภาพสำหรับตัวกลางไดอิเล็กทริกในอุปกรณ์เรโซเนเตอร์, 4.2.5 ผลการจำลองของค่าตัวประกอบคุณภาพสำหรับตัวกลางไดรัลในอุปกรณ์เรโซเนเตอร์, 4.2.6 การเปรียบเทียบผลการจำลองของค่าตัวประกอบคุณภาพสำหรับตัวกลางไดรัลในอุปกรณ์เรโซเนเตอร์, 4.2.7 การหาค่าความเหนี่ยวนำรวม และค่าความจุรวมของเรโซเนเตอร์ที่ถูกเติมด้วยวัสดุไดรัล และ 4.2.8 การเปรียบเทียบผลการจำลองของจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองระหว่างวัสดุไดอิเล็กทริก และวัสดุไดรัลในอุปกรณ์เรโซเนเตอร์

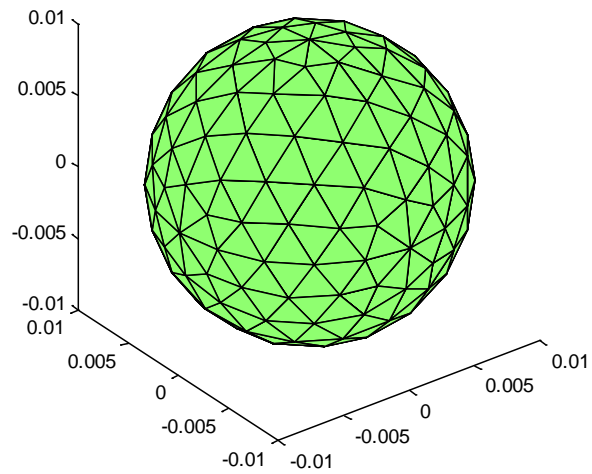
4.2.1 ผลการจำลองของความถี่เรโซแนนซ์สำหรับตัวกลางไครัลในกรณี เรโซเนเตอร์แบบทรงกลมถูกเติมด้วยวัสดุไครัลทั้งหมด

ในหัวข้อนี้เป็นผลการจำลองในกรณีตัวกลางเป็นไครัล ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้เปรียบเทียบกับงานวิจัย [12] และพบว่ามีความสอดคล้องกัน โดยตัวอย่างนี้เป็นเรโซเนเตอร์แบบทรงกลมถูกเติมด้วยวัสดุไครัลทั้งหมด ดังภาพที่ 4.6

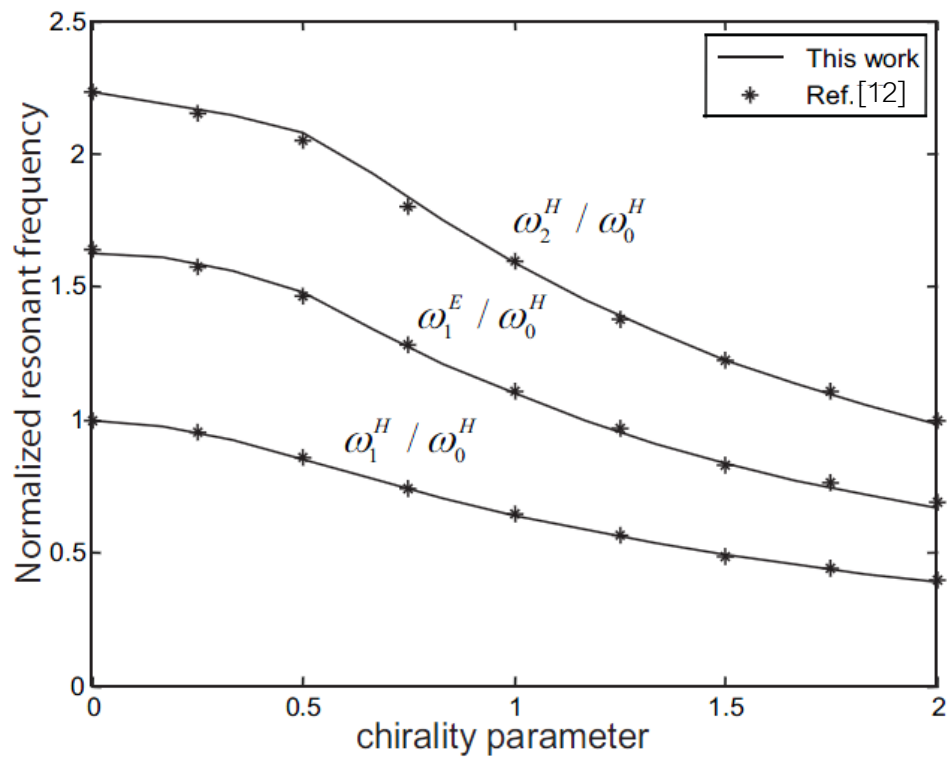
ในการจำลองนี้ได้อาศัยสมการที่ (2.8) ในการคำนวณโดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ไครัลลิตี และไครัลลิตีแอมิตแดนซ์ คือ

$$\xi_c = \frac{\kappa}{\eta_0 \mu_r} \quad (4.1)$$

เรโซเนเตอร์ถูกปิดด้วยผนังตัวนำสมบูรณ์ รัศมีของทรงกลมคือ 1 เซนติเมตร ภายในทรงกลมถูกเติมด้วยวัสดุไครัลทั้งหมด ดังภาพที่ 4.6 โดยที่สภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 1 และความขานซึมได้สัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 1 โดยทำการเพิ่มค่า chirality parameter จาก 0 จนถึง 2 ในกรณี chirality parameter = 0 จะได้ว่าวัสดุเป็นอากาศว่าง โดเมนของทรงกลมถูกแบ่งเป็นจำนวน 1991 เอลิเมนต์ หลังจากแก้ระบบสมการของค่าเจาะจง ความถี่เรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์แบบทรงกลมได้ถูกเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากวิธีวิเคราะห์ถูกแสดงดังภาพที่ 4.7 โดยความถี่เรโซแนนซ์ของทุกโหมดถูกหารด้วยความถี่เรโซแนนซ์ที่ต่ำที่สุดเมื่อ chirality parameter=0 นั่นคือ $\omega_0^H = 13.229$ GHz ในภาพที่ 4.7 เส้นทึบคือผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิทยานิพนธ์นี้สำหรับสามโหมดแรก ขณะที่ผลลัพธ์จากวิธีวิเคราะห์ [12] ถูกแสดงโดย “ * ” จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากงานวิทยานิพนธ์นี้สอดคล้องกับวิธีวิเคราะห์ [12] ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้สามารถตรวจสอบได้ว่าโปรแกรมมีความถูกต้อง สามารถสังเกตได้ว่าความถี่เรโซแนนซ์ของแต่ละโหมดมีค่าลดลง เมื่อ chirality parameter ถูกเพิ่มขึ้น นี่คือคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุไครัลที่ผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์ อนึ่งเนื่องจากผู้วิจัยไม่สามารถทำตามวิธีวิเคราะห์ [12] เพื่อให้ได้ข้อมูลโดยตรง ทำให้ข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองอาจมีความไม่แม่นยำเกิดขึ้นได้



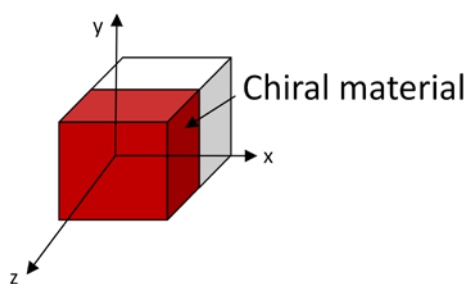
ภาพที่ 4.6 เรโซเนเตอร์แบบทรงกลมถูกเติมด้วยวัสดุไครล์ทั้งหมด



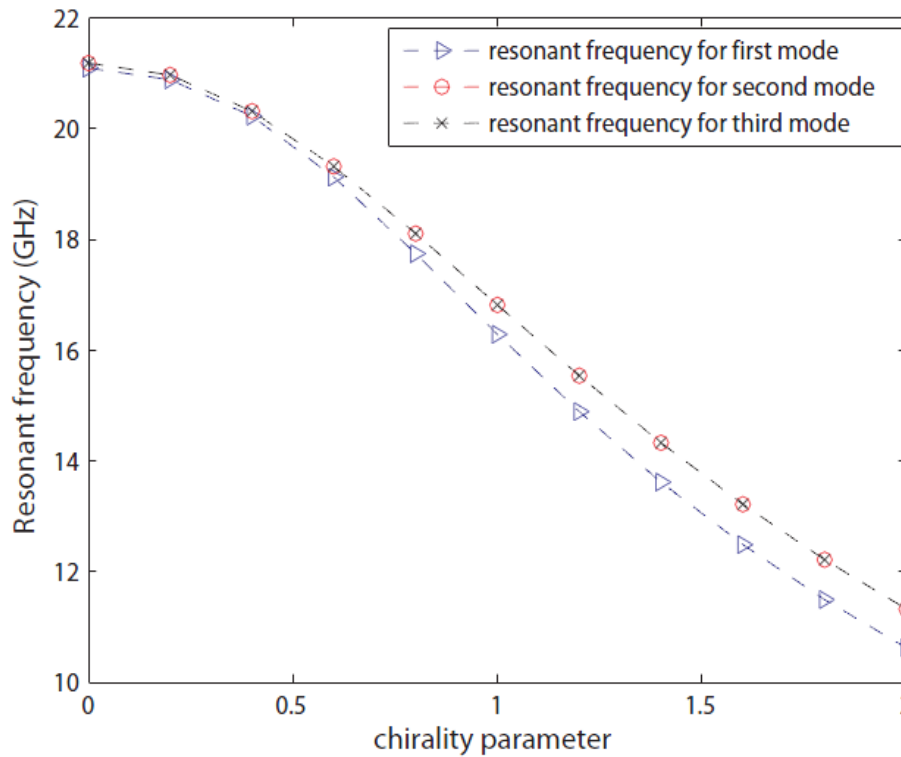
ภาพที่ 4.7 ความถี่เรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์แบบทรงกลมถูกเติมด้วยวัสดุไครล์ทั้งหมด

4.2.2 ผลการจำลองของความถี่เรโซแนนซ์สำหรับตัวกลางไครัลในกรณีเรโซเนเตอร์แบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ถูกเติมด้วยวัสดุไครัลเพียงครั้งเดียว

เพื่อแสดงความเป็นประโยชน์ของวิธีในงานวิทยานิพนธ์นี้ ตัวอย่างจำลองของเรโซเนเตอร์ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งมีโหนดเป็นวัสดุไครัลเพียงบางส่วนได้ถูกแสดงดังภาพที่ 4.8 เรโซเนเตอร์ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากได้ถูกวาง ณ ตำแหน่ง $0 < x < 1$ เซนติเมตร, $0 < y < 1$ เซนติเมตร และ $0 < z < 1$ เซนติเมตร โดยที่ สภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 1 และความซาบซึมได้สัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 1 โดยทำการเพิ่มค่า chirality parameter จาก 0 จนถึง 2 สำหรับทรงสี่เหลี่ยมเพียงครั้งเดียว โดยที่โดเมนของทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกแบ่งเป็นจำนวน 1521 เอลิเมนต์ หลังจากแก้ระบบสมการของค่าเจาะจง ความถี่เรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์ทรงสี่เหลี่ยมสำหรับสามโหมดแรกถูกแสดงดังภาพที่ 4.9 โดยความถี่เรโซแนนซ์ที่ต่ำที่สุดในกรณี chirality parameter=0 คือ 21.090 GHz สังเกตได้ว่าความถี่เรโซแนนซ์ทั้งสามโหมดแรกนั้นมีค่าลดลงสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่า chirality parameter และเป็นที่น่าสังเกตว่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่เรโซแนนซ์กับ chirality parameter เหมือนกับในกรณีของเรโซเนเตอร์ทรงกลมซึ่งถูกเติมด้วยวัสดุไครัลทั้งหมด เนื่องจากโหมดสองและโหมดสามเป็นโหมด degenerated ดังนั้นกราฟของความถี่เรโซแนนซ์ของทั้งสองโหมดนี้จึงมีค่าเท่ากันดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.8 เรโซเนเตอร์แบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ถูกเติมด้วยวัสดุไครัลเพียงครั้งเดียว



ภาพที่ 4.9 ความถี่เรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์แบบทรงสี่เหลี่ยมถูกเติมด้วยวัสดุไครัลเพียงครั้งเดียว

4.2.3 ผลการจำลองของพลังงานสะสมเฉลี่ยในสนามไฟฟ้าและพลังงานสะสมเฉลี่ยในสนามแม่เหล็กสำหรับตัวกลางไครัลในอุปกรณ์เรโซเนเตอร์

พลังงานสะสมเฉลี่ยในสนามไฟฟ้า และพลังงานสะสมเฉลี่ยในสนามแม่เหล็กสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีพอยนติง [1] สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.2)

$$\begin{aligned}
 -\oint_S \left(\frac{\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*}{2} \right) \cdot \mathbf{n}_0 dS &= j2\omega \int_V \left(\frac{\mathbf{H}^* \cdot \mathbf{B}}{4} - \frac{\mathbf{D}^* \cdot \mathbf{E}}{4} \right) dV \\
 &+ \sigma \int_V \frac{\mathbf{E}^* \cdot \mathbf{E}}{2} dV + \int_V \frac{\mathbf{J}^* \cdot \mathbf{E}}{2} dV
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

โดยที่ $-\int_V \frac{\mathbf{J}^* \cdot \mathbf{E}}{2} dV$ คือกำลังงานที่มาจากแหล่งกำเนิด (P)

$\oint_S \left(\frac{\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*}{2} \right) \cdot \mathbf{n}_0 dS$ คือกำลังงานที่ส่งผ่านไปยังพื้นผิวของเรโซเนเตอร์ (P_0)

$$\int_V \text{Im} \left(\frac{\mathbf{H}^* \cdot \mathbf{B}}{4} - \frac{\mathbf{D}^* \cdot \mathbf{E}}{4} \right) dV + \sigma \int \frac{\mathbf{E}^* \cdot \mathbf{E}}{2} dV$$

คือกำลังงานสูญเสียที่มาจากตัวกลางแม่เหล็ก, ตัวกลางไดอิเล็กตริกและตัวนำ ตามลำดับ

$$\int_V \text{Re} \left(\frac{\mathbf{H}^* \cdot \mathbf{B}}{4} - \frac{\mathbf{D}^* \cdot \mathbf{E}}{4} \right) dV$$

คือพลังงานสะสมในสนามแม่เหล็กเฉลี่ยตามเวลา และพลังงานสะสมในสนามไฟฟ้าเฉลี่ยตามเวลา ตามลำดับ

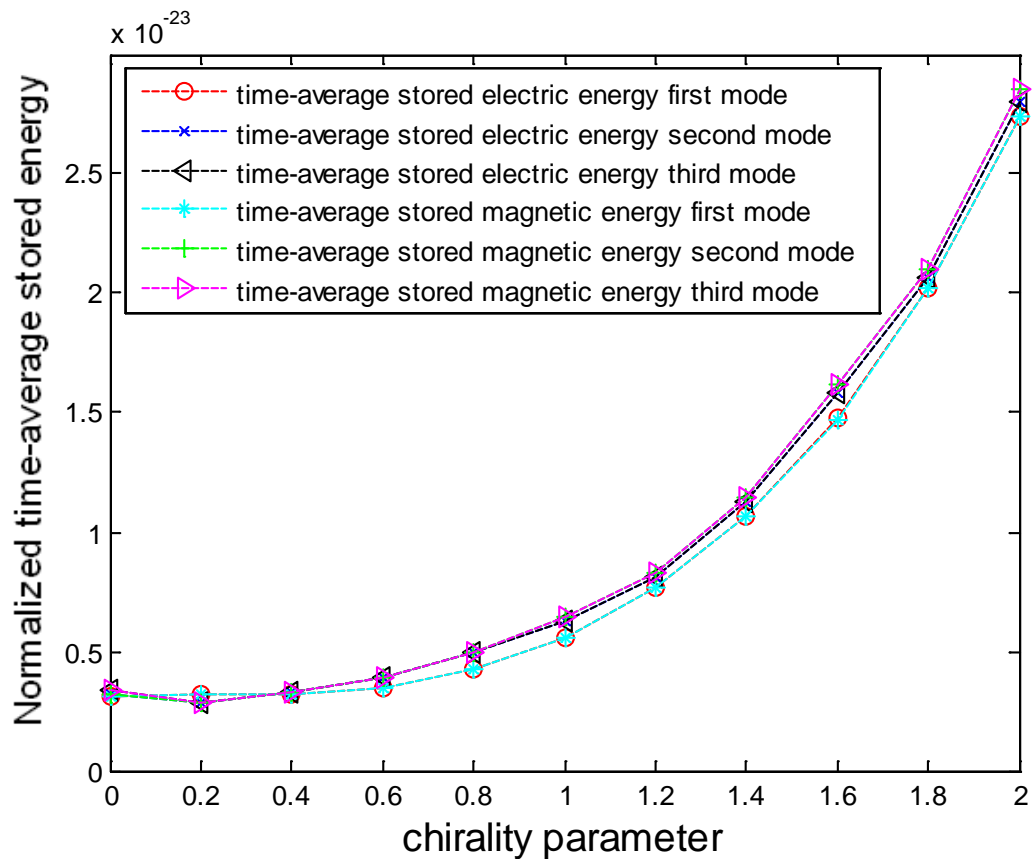
ในกรณีของเรโซเนเตอร์ที่ไร้ความสูญเสียโดยไม่มีแหล่งกำเนิดกระแส การถ่ายเทกำลังงานกำลังงานสูญเสีย และแหล่งจ่าย ดังนั้น $\oint_S \left(\frac{\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*}{2} \right) \cdot \mathbf{n}_0 dS = 0$, $\sigma = 0$ และ $\mathbf{J} = 0$ จะเห็นได้ว่าพลังงานสะสมในสนามไฟฟ้าเฉลี่ยตามเวลา และพลังงานสะสมในสนามแม่เหล็กเฉลี่ยตามเวลาในเรโซเนเตอร์จะมีค่าเท่ากัน โดยการแทนสมการสัมพันธ์ปรังแต่งคือสมการที่ (2.8) และ (4.1) ลงในสมการที่ (4.2) จะได้ว่าพลังงานสะสมในสนามไฟฟ้าเฉลี่ยตามเวลา W_E และพลังงานสะสมในสนามแม่เหล็กเฉลี่ยตามเวลา W_M สำหรับตัวกลางที่เป็นไครัลคือ

$$W_E = \sum_{e=1}^{\text{All elements}} \int_V \frac{1}{4} \left(\epsilon_e |\mathbf{E}^e|^2 + \frac{\kappa_e (\nabla \times \mathbf{E}^e) \cdot \mathbf{E}^e}{\omega_0 c_0 \mu_e} \right) dV \quad (4.3)$$

$$W_M = \sum_{e=1}^{\text{All elements}} \int_V \frac{1}{4} \left(\frac{(\nabla \times \mathbf{E}^e) \cdot (\nabla \times \mathbf{E}^e)}{\omega_0^2 \mu_e} - \frac{\kappa_e (\nabla \times \mathbf{E}^e) \cdot \mathbf{E}^e}{\omega_0 c_0 \mu_e} \right) dV \quad (4.4)$$

โดยที่ ω_0 คือความถี่เรโซแนนซ์เชิงมุม และดรรชนีบนและดรรชนีล่าง e แสดงถึงการคำนวณแต่ละเอลิเมนต์ พิจารณาสมการที่ (4.3) และ (4.4) จะเห็นได้ว่ามีเทอม chirality parameter (κ) เข้ามาทำให้ได้ว่าพลังงานสะสมเฉลี่ยในสนามไฟฟ้า และพลังงานสะสมเฉลี่ยในสนามแม่เหล็กสามารถเพิ่มขึ้นได้เนื่องจากผลของพารามิเตอร์ไครัลลิตี หรือถ้ามองในทางกายภาพ วัสดุไครัลเกิดจากการใส่ขดลวดสปริงเล็กๆ ลงในเรซิน และจากงานวิจัย [17] ได้ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตี ค่าสภาพยอม และค่าความซาบซึ่มได้จากแผ่นเรซินที่ประกอบไปด้วยขดลวดสปริง ผลปรากฏว่าเมื่อค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีมีค่าสูงขึ้น ค่าสภาพยอมจะมีค่ามากขึ้น ในขณะที่ค่าความซาบซึ่มได้จะมีค่าลดลง ในมุมมองทางสายส่งนั้นสามารถตีความได้ว่า ค่าสภาพยอมนั้นคือค่าความจุ ส่วนค่าความซาบซึ่มนั้นคือค่าความเหนียวนำ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตี จึงเป็นการเพิ่มค่าความจุ และลดค่าความเหนียวนำให้กับเรโซเนเตอร์ ภาพที่ 4.10 แสดงค่า

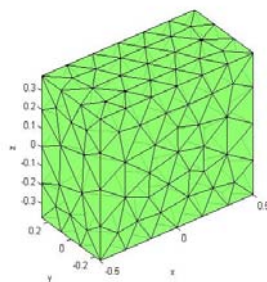
ของพลังงานสะสมในสนามไฟฟ้าเฉลี่ยตามเวลา และพลังงานสะสมในสนามแม่เหล็กเฉลี่ยตามเวลาโดยทำการเพิ่มค่า chirality parameter จาก 0 จนถึง 2 จะเห็นได้ว่าทั้งพลังงานสะสมเฉลี่ยในสนามไฟฟ้า และพลังงานสะสมเฉลี่ยในสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า chirality parameter ที่เพิ่มขึ้น และจะมีค่าเท่ากันสำหรับในแต่ละโหมด ณ ความถี่เรโซแนนซ์



ภาพที่ 4.10 พลังงานสะสมเฉลี่ยของเรโซเนเตอร์แบบทรงสี่เหลี่ยมถูกเติมด้วยวัสดุไครัลเพียงครั้งเดียว ดังแสดงในภาพที่ 4.8

4.2.4 ผลการจำลองของค่าตัวประกอบคุณภาพสำหรับตัวกลางไดอิเล็กตริกในอุปกรณ์เรโซเนเตอร์

การจำลองนี้จะเป็นการหาค่าตัวประกอบคุณภาพสำหรับโพรงทรงสี่เหลี่ยมที่ถูกเติมด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกดังภาพที่ 4.11 โดยขนาดของทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากมีขนาดดังนี้ คือ กว้าง 0.75 ซม. ยาว 1 ซม. สูง 0.5 ซม. สภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 2.25 และความขابซึมได้สัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 1 ส่วนแทนเจนต์การสูญเสียมีค่าเท่ากับ 0.0004 และโดเมนของทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากถูกแบ่งเป็นจำนวน 922 เอลิเมนต์



ภาพที่ 4.11 เวกเตอร์แบบทรงสี่เหลี่ยมถูกเติมด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก

ในกรณีนี้ผู้วิจัยสามารถตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยทำการเปรียบเทียบผลกับโปรแกรมจำลองสามมิติ CST เมื่อ chirality parameter มีค่าเท่ากับศูนย์เท่านั้น เพราะถ้าเป็นกรณีตัวกลางไครัล โปรแกรมจำลองสามมิติ CST ไม่สามารถทำการคำนวณได้ ตารางที่ 4.7 และ 4.8 เป็นการแสดงถึงความถี่เรโซแนนซ์และตัวประกอบคุณภาพในกรณีที่ chirality parameter มีค่าเท่ากับศูนย์ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้กับโปรแกรมจำลองสามมิติ CST โดยแสดงความถี่เรโซแนนซ์ของเวกเตอร์ในภาพที่ 4.11

| โมด | ผลที่ได้จากงานนี้ | ผลที่ได้จากโปรแกรม CST | ความผิดพลาด |
|-----|-------------------|------------------------|-------------|
| 1 | 16.60 GHz | 16.63 GHz | 0.18% |
| 2 | 22.25 GHz | 22.27 GHz | 0.09% |
| 3 | 23.86 GHz | 23.86 GHz | 0.29% |
| 4 | 23.97 GHz | 23.94 GHz | 0.13% |
| 5 | 25.84 GHz | 25.93 GHz | 0.35% |

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบผลของตัวประกอบคุณภาพที่มาจากการสูญเสียของวัสดุไดอิเล็กตริกจากสมการที่ (3.37) และโปรแกรมจำลองสามมิติ CST ของเวกเตอร์ในภาพที่ 4.11

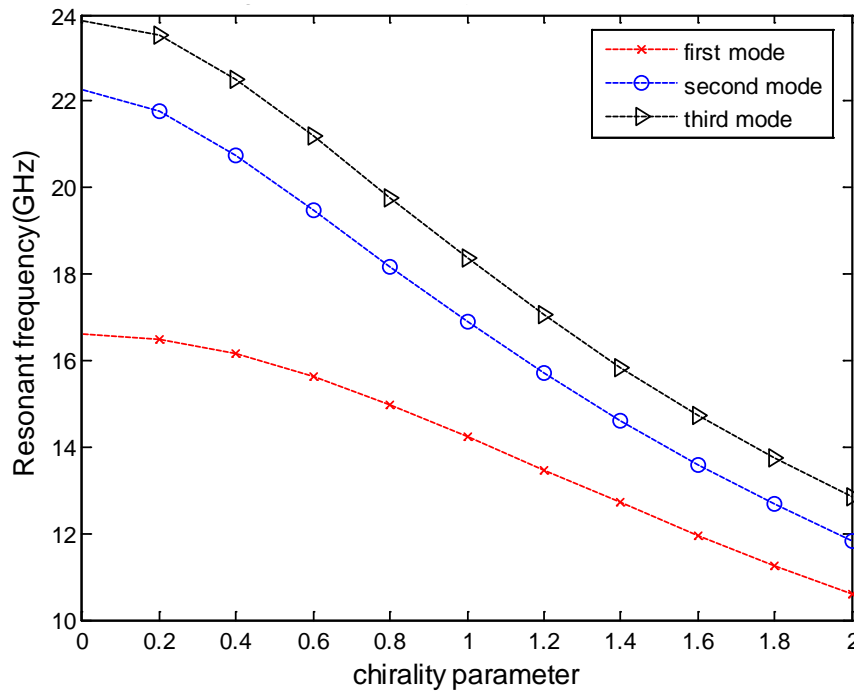
| โมด | ผลที่ได้จากงานนี้ | ผลที่ได้จากโปรแกรม CST | ความผิดพลาด |
|-----|-------------------|------------------------|-------------|
| 1 | 2500 | 2500 | 0% |
| 2 | 2500 | 2500 | 0% |
| 3 | 2500 | 2500 | 0% |
| 4 | 2500 | 2500 | 0% |
| 5 | 2500 | 2500 | 0% |

ในกรณีตัวกลางไดอิเล็กตริก ผู้วิจัยสามารถเปรียบเทียบผลกับโปรแกรมจำลองสามมิติ CST ได้และจากตารางที่ 4.7 และ 4.8 เห็นได้ว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน และจะเห็นได้ว่าในกรณีที่โมดสูงชันนั้นความผิดพลาดจะมากขึ้น เพราะเมื่อโมดสูงชันความถี่จะสูงชันตามไปด้วยทำให้เกิดความแปรปรวนมากขึ้นตาม แนวทางแก้ไขคือการเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ โดยหลักในการเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์คือ เพิ่มจำนวนเอลิเมนต์แล้วจึงเปรียบเทียบผลกับโปรแกรมจำลองสามมิติ CST เพื่อดูความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ถ้าหากความผิดพลาดนั้นยังมีค่ามากเกินไปจึงทำการเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ต่อไป สำหรับกรณีที่ไม่มีผลให้เปรียบเทียบนั้น สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์กับผลที่ได้จากตอนที่ยังไม่ได้เพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ โดยทำการเปรียบเทียบผล ถ้าผลต่างที่ได้มีค่ามากกว่าค่าที่ยอมรับได้จึงทำการเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ต่อไป โดยผลต่างที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์คือไม่เกิน 0.5%

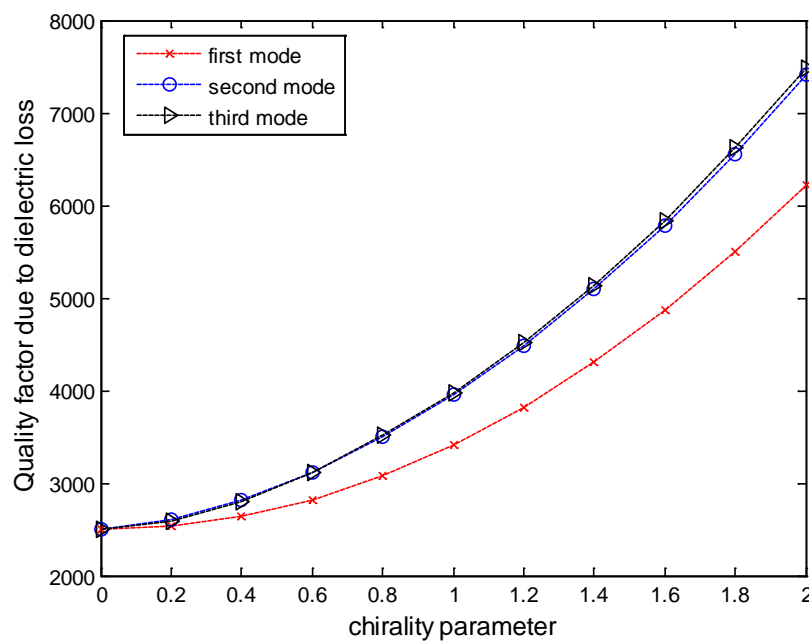
4.2.5 ผลการจำลองของค่าตัวประกอบคุณภาพสำหรับตัวกลางไครัลในอุปกรณ์เรโซเนเตอร์

ในหัวข้อนี้ได้ทำการจำลองการเติมวัสดุไครัลในอุปกรณ์เรโซเนเตอร์ดังภาพที่ 4.11 โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีตั้งแต่ 0 ถึง 2 จากภาพที่ 4.12 และภาพที่ 4.13 จะเห็นได้ว่านอกจากตัวกลางไครัลจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์มีค่าลดลงแล้ว ยังทำให้ค่าตัวประกอบคุณภาพที่มาจาก การสูญเสียของไดอิเล็กตริกมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ในงานวิจัย [5] และเป็นที่น่าสังเกตว่าที่ค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีเท่ากับ 2 ค่าตัวประกอบคุณภาพจะมากกว่าที่ค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีเป็นศูนย์ประมาณสามเท่า แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของตัวประกอบคุณภาพอย่างรวดเร็วซึ่งอาจจะไม่เป็นจริง เพราะเมื่อค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีมีค่าสูงๆนั้น อาจจะไม่เป็นจริงในทางปฏิบัติ [28] นอกจากนี้จากสมการที่ (3.38) เมื่อค่าประกอบตัวคุณภาพมีค่าสูงจะทำให้แบนด์วิดท์มีค่าน้อย ทำให้วงจรมีการตอบสนองที่รวดเร็ว

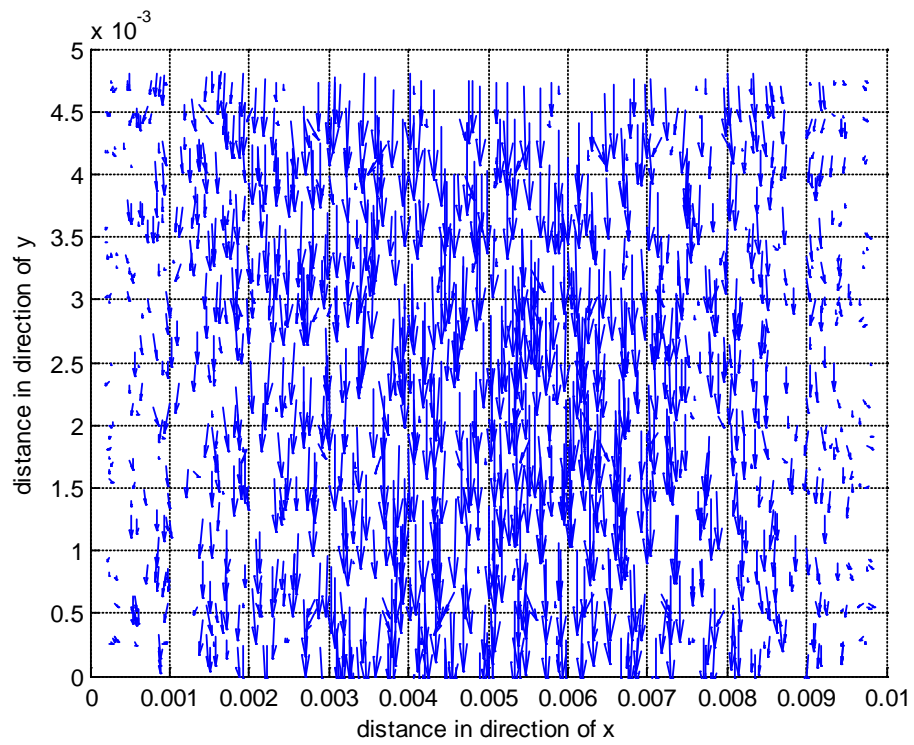
ต่อไปจะเป็นการพล็อตสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กของเรโซเนเตอร์ตั้งแต่ภาพที่ 4.14 ถึงภาพที่ 4.37 ทั้งในกรณีตัวกลางไดอิเล็กตริกและตัวกลางไครัล โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีดังนี้ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2



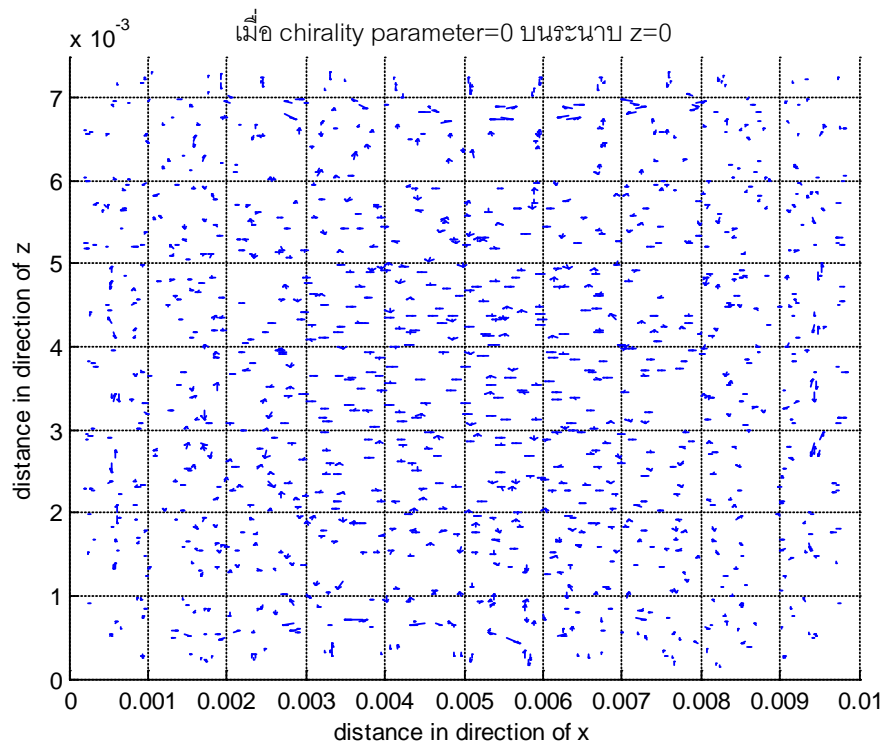
ภาพที่ 4.12 ความถี่เรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์แบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากในภาพที่ 4.11 โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์ไครลิตีตั้งแต่ค่า 0 ถึง 2



ภาพที่ 4.13 ตัวประกอบคุณภาพเนื่องจากการสูญเสียของวัสดุไดอิเล็กตริกของเรโซเนเตอร์แบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากในภาพที่ 4.11 โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์ไครลิตีตั้งแต่ค่า 0 ถึง 2 โดยได้มาจากสมการที่ (3.37)

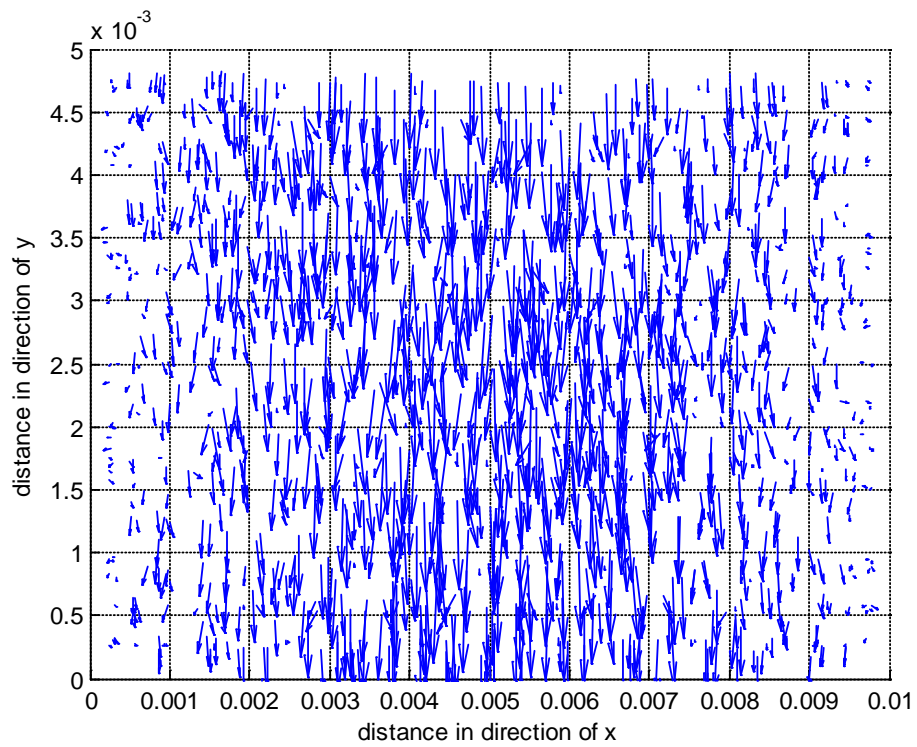


รูปที่ 4.14 สนามไฟฟ้าโมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11



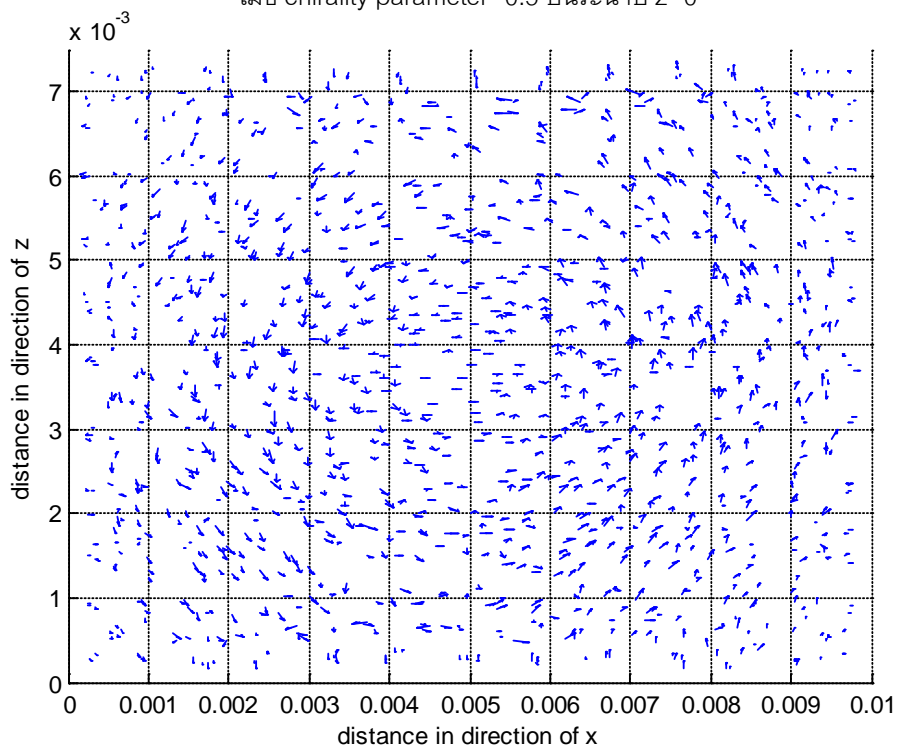
รูปที่ 4.15 สนามไฟฟ้าโมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11

เมื่อ chirality parameter=0 บนระนาบ y=0



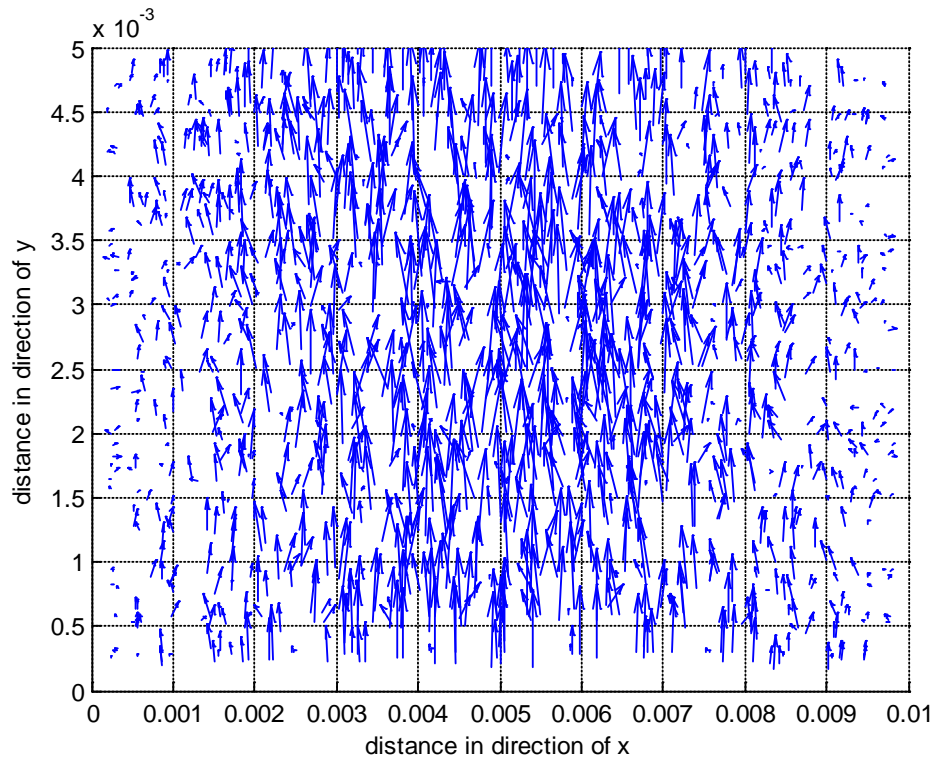
รูปที่ 4.16 สนามไฟฟ้าโมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11

เมื่อ chirality parameter=0.5 บนระนาบ $z=0$

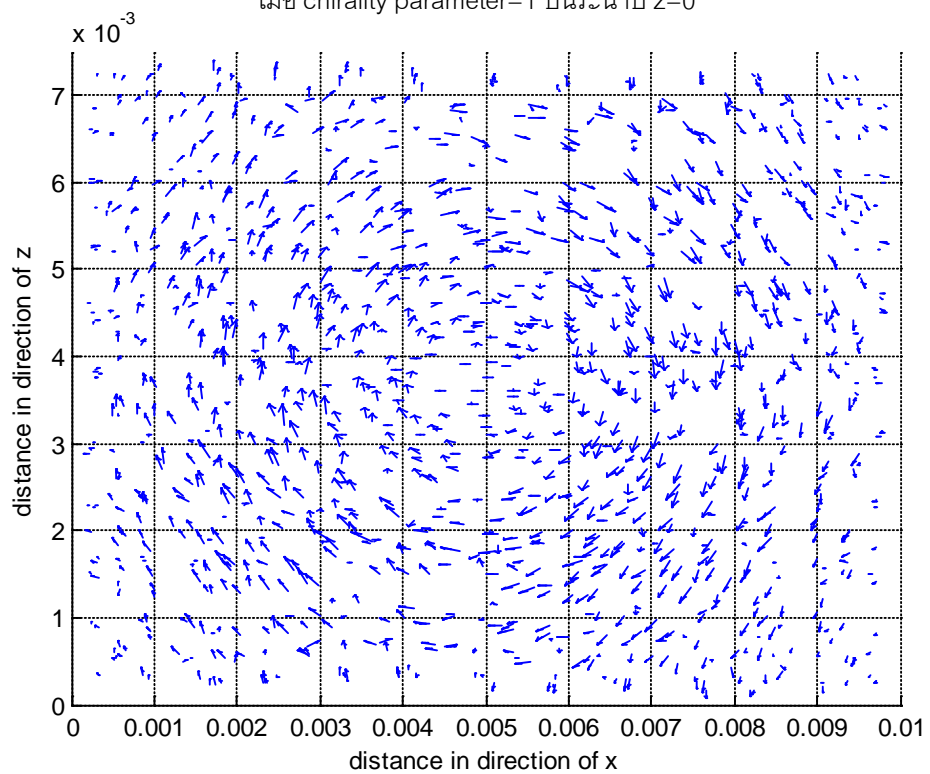


รูปที่ 4.17 สนามไฟฟ้าโมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11

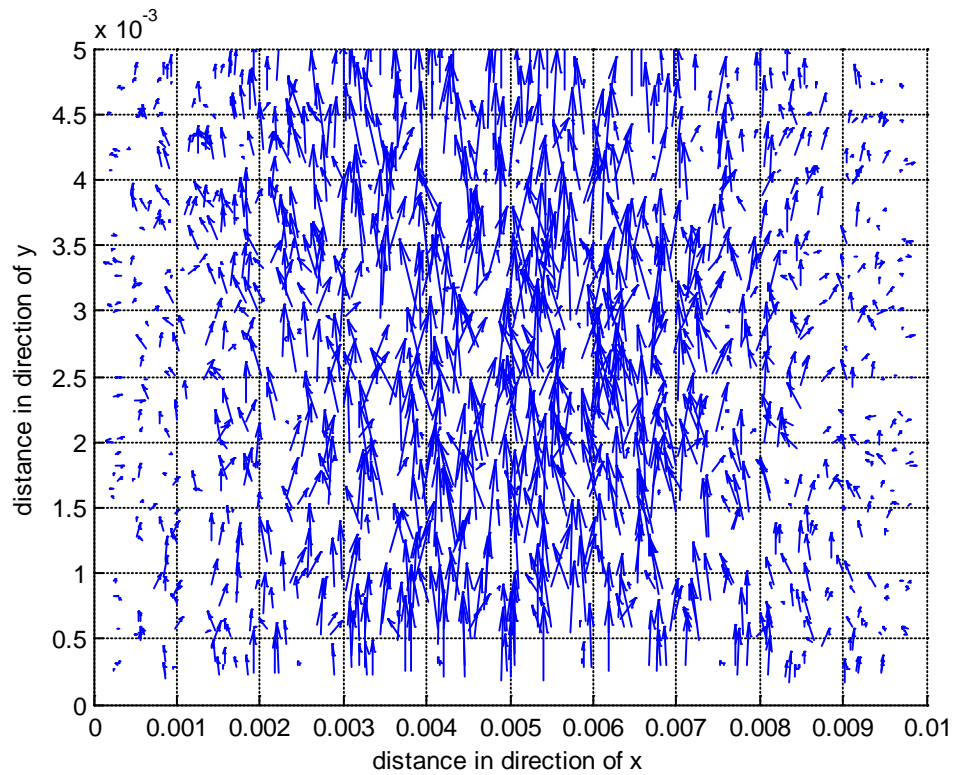
เมื่อ chirality parameter=0.5 บนระนาบ $y=0$



รูปที่ 4.18 สนามไฟฟ้าโหมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11
เมื่อ chirality parameter=1 บนระนาบ $z=0$

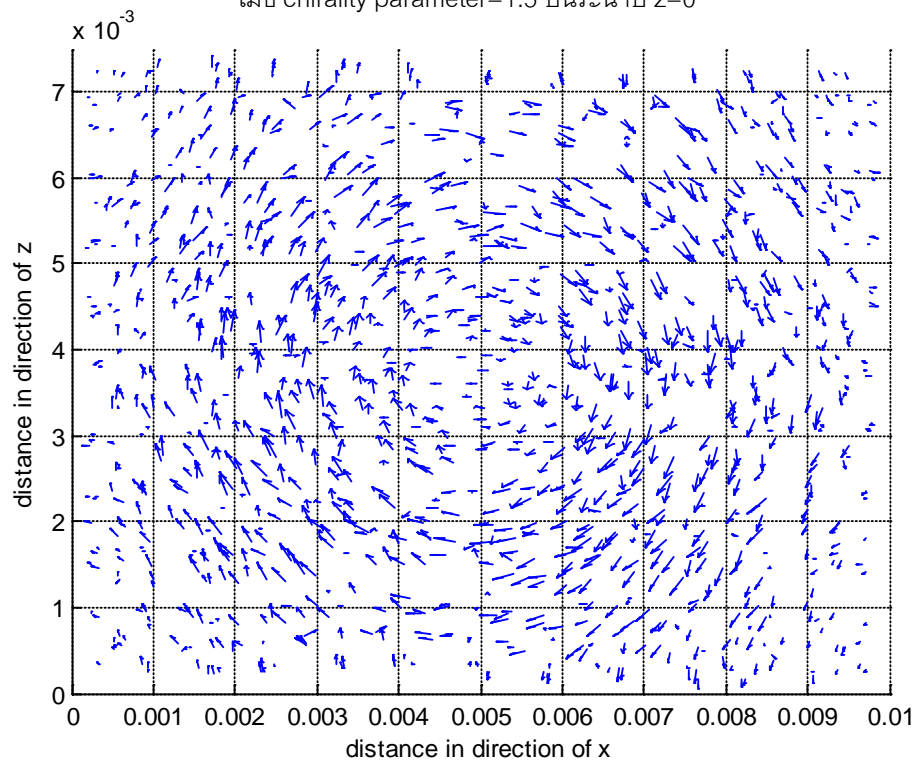


รูปที่ 4.19 สนามไฟฟ้าโหมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11
เมื่อ chirality parameter=1 บนระนาบ $y=0$



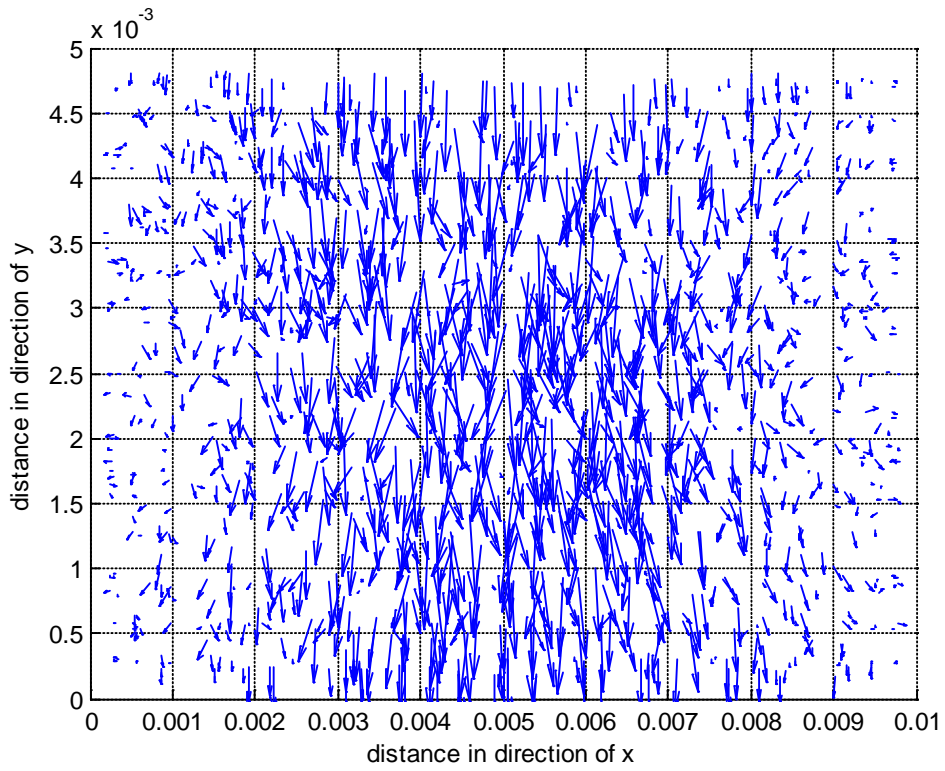
รูปที่ 4.20 สนามไฟฟ้าโหมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11

เมื่อ chirality parameter=1.5 บนระนาบ $z=0$



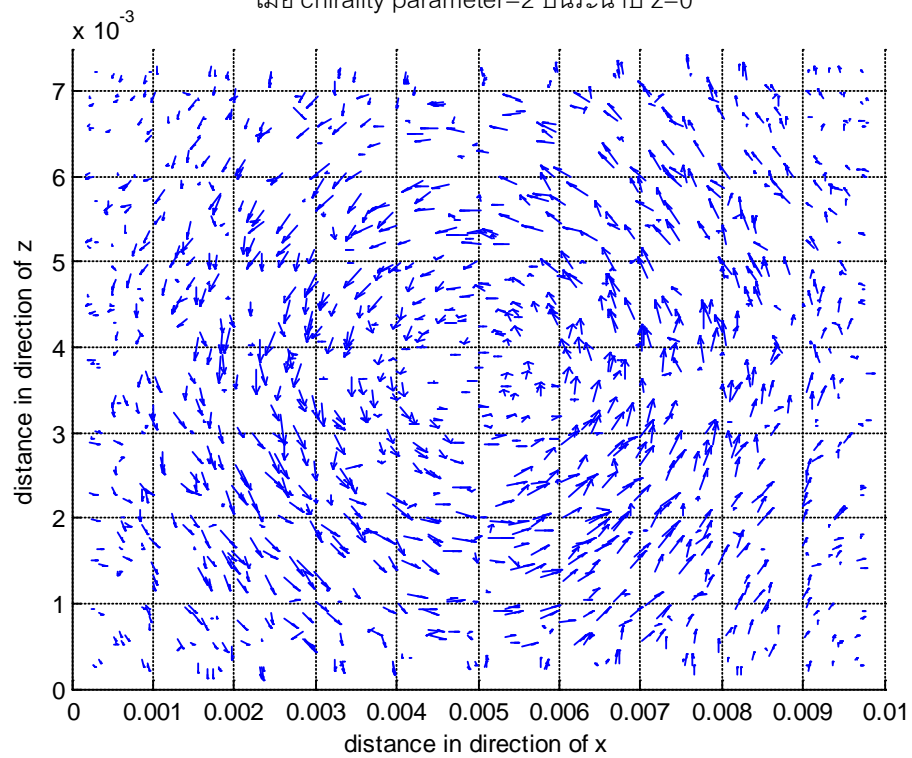
รูปที่ 4.21 สนามไฟฟ้าโหมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11

เมื่อ chirality parameter=1.5 บนระนาบ $y=0$



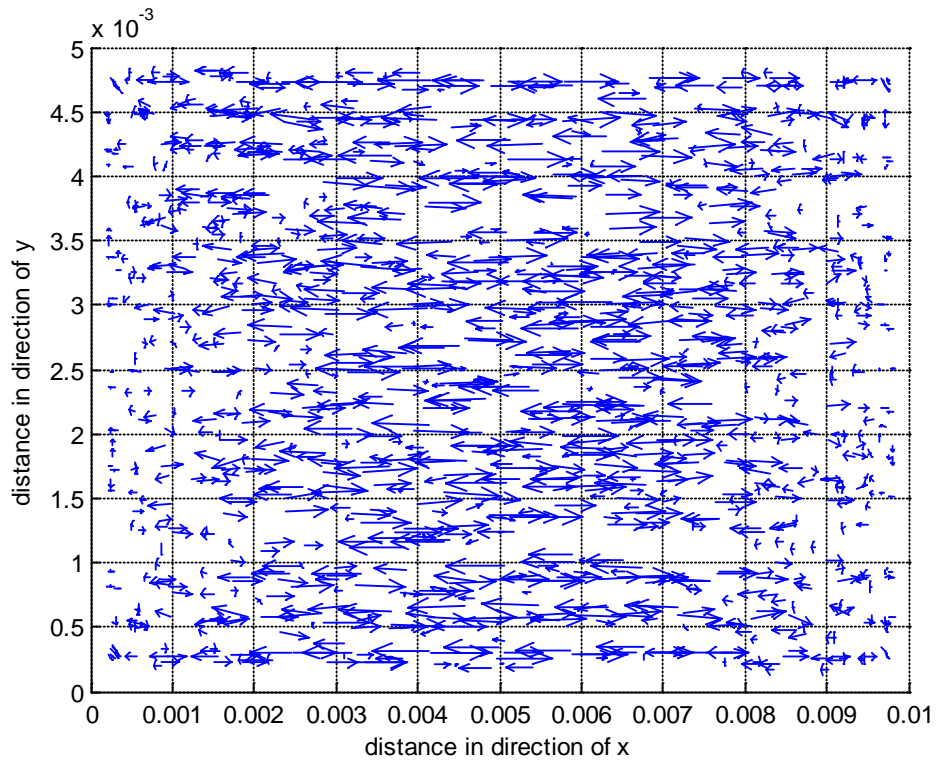
รูปที่ 4.22 สนามไฟฟ้าโมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11

เมื่อ chirality parameter=2 บนระนาบ $z=0$

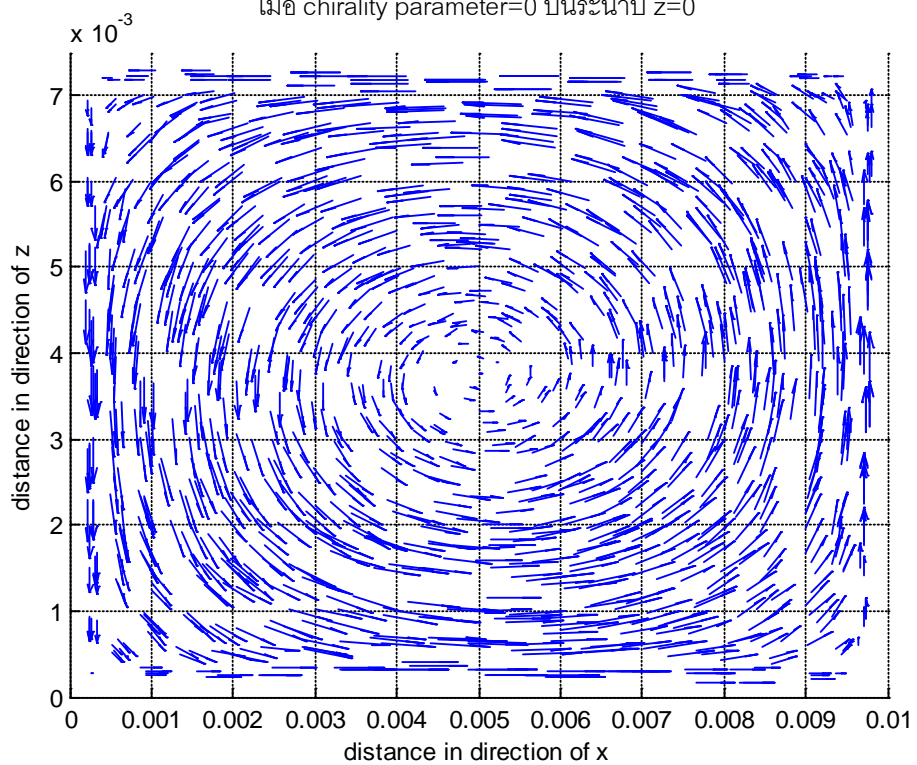


รูปที่ 4.23 สนามไฟฟ้าโมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11

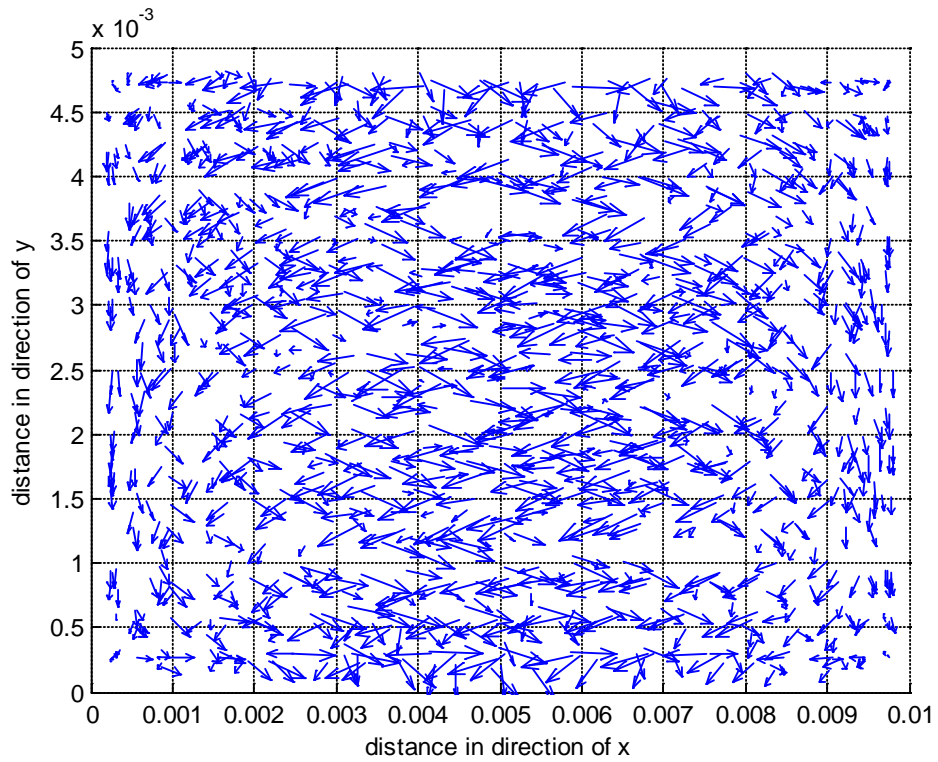
เมื่อ chirality parameter=2 บนระนาบ $y=0$



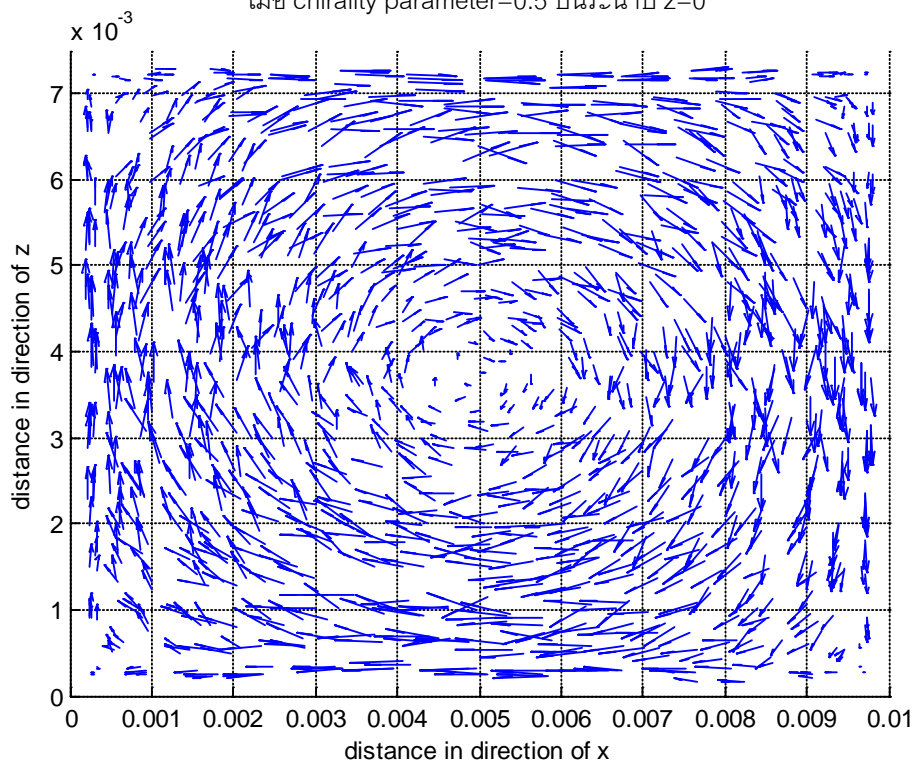
รูปที่ 4.24 สนามแม่เหล็กโมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11
เมื่อ chirality parameter=0 บนระนาบ $z=0$



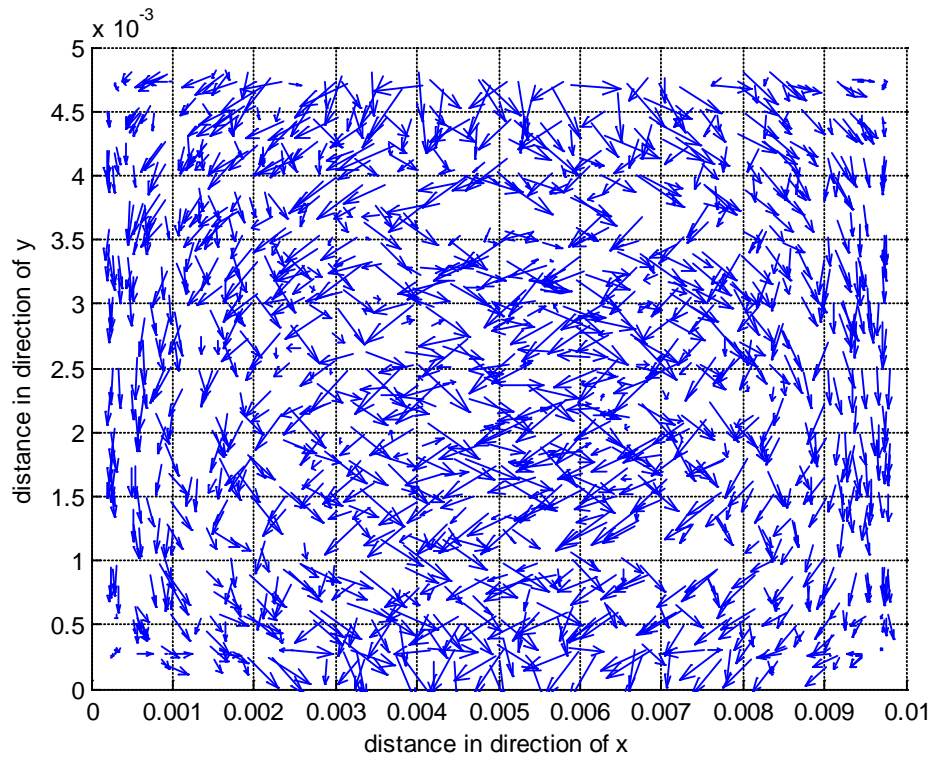
รูปที่ 4.25 สนามแม่เหล็กโมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11
เมื่อ chirality parameter=0 บนระนาบ $y=0$



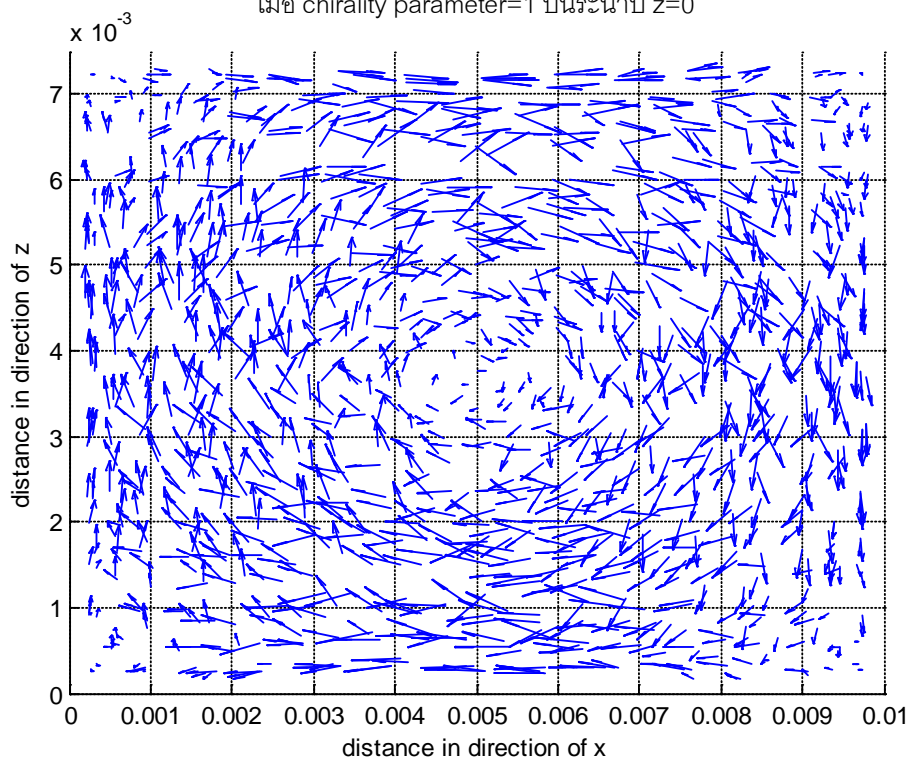
รูปที่ 4.26 สนามแม่เหล็กโมดแรกของเราโซเนตอรีในภาพที่ 4.11
เมื่อ chirality parameter=0.5 บนระนาบ z=0



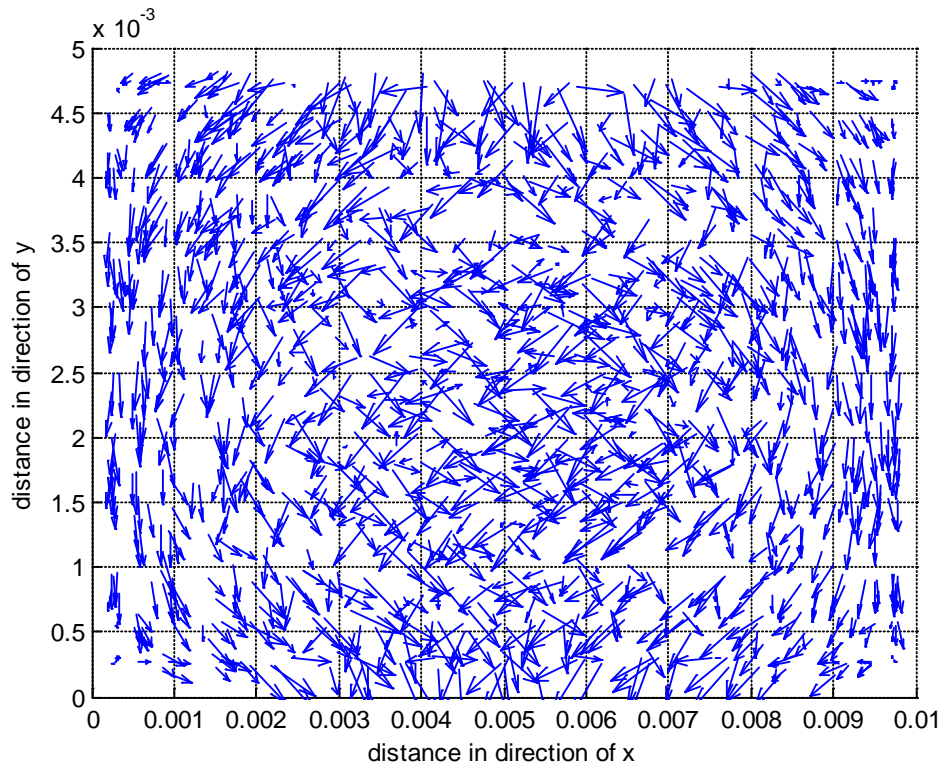
รูปที่ 4.27 สนามแม่เหล็กโมดแรกของเราโซเนตอรีในภาพที่ 4.11
เมื่อ chirality parameter=0.5 บนระนาบ y=0



รูปที่ 4.28 สนามแม่เหล็กโมดแรกของเราในเตอร์ในภาพที่ 4.11
เมื่อ chirality parameter=1 บนระนาบ $z=0$

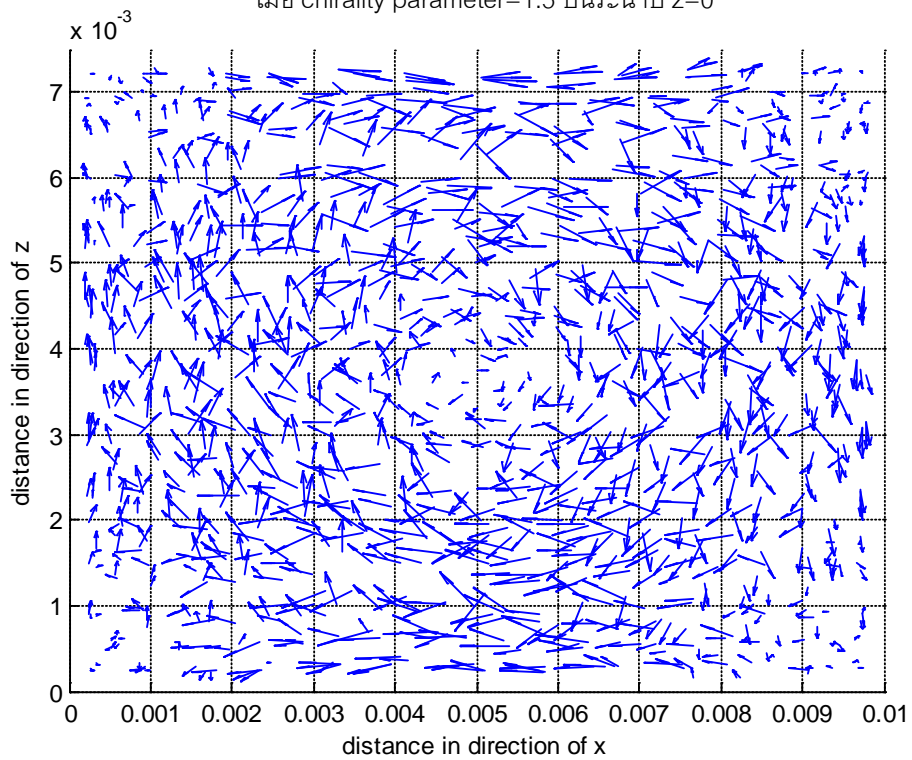


รูปที่ 4.29 สนามแม่เหล็กโมดแรกของเราในเตอร์ในภาพที่ 4.11
เมื่อ chirality parameter=1 บนระนาบ $y=0$



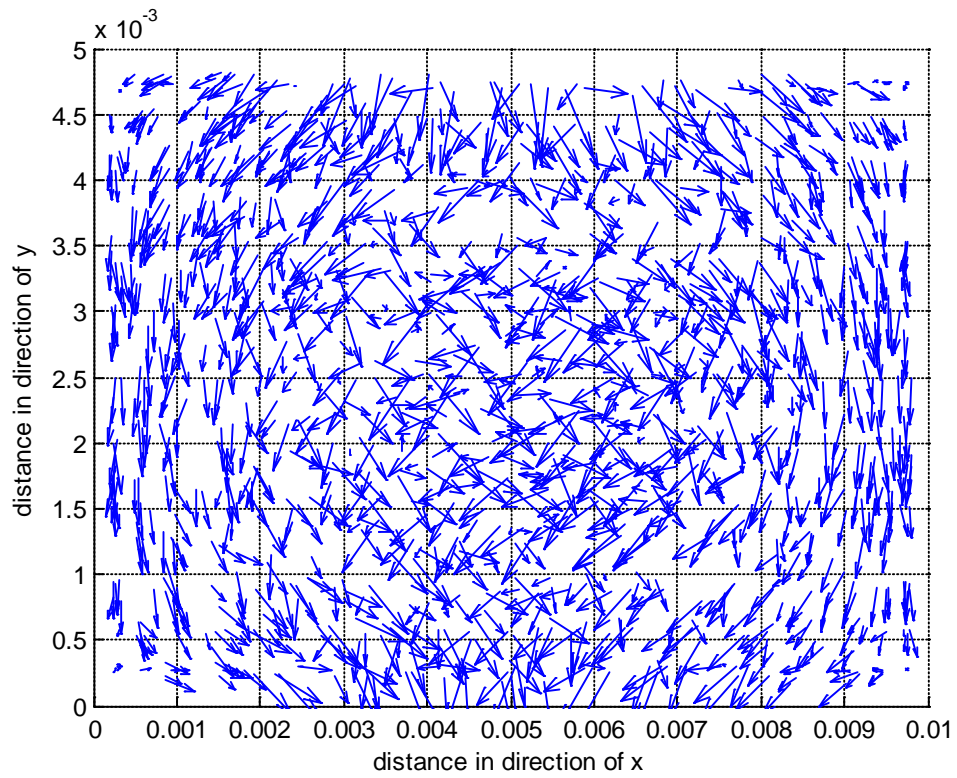
รูปที่ 4.30 สนามแม่เหล็กโหมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11

เมื่อ chirality parameter=1.5 บนระนาบ $z=0$



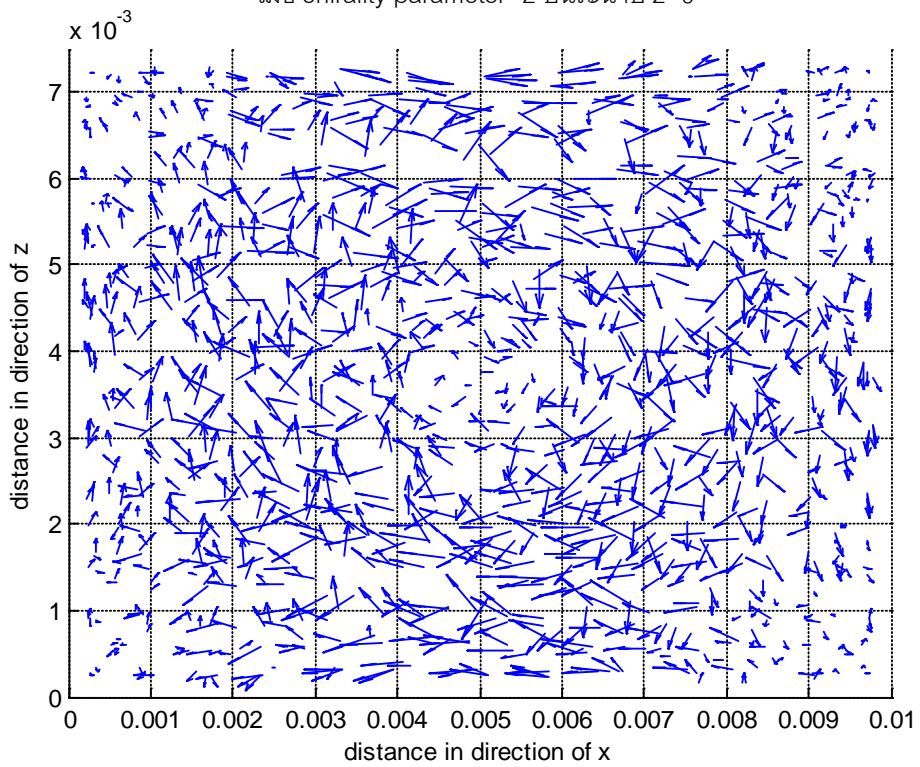
รูปที่ 4.31 สนามแม่เหล็กโหมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11

เมื่อ chirality parameter=1.5 บนระนาบ $y=0$



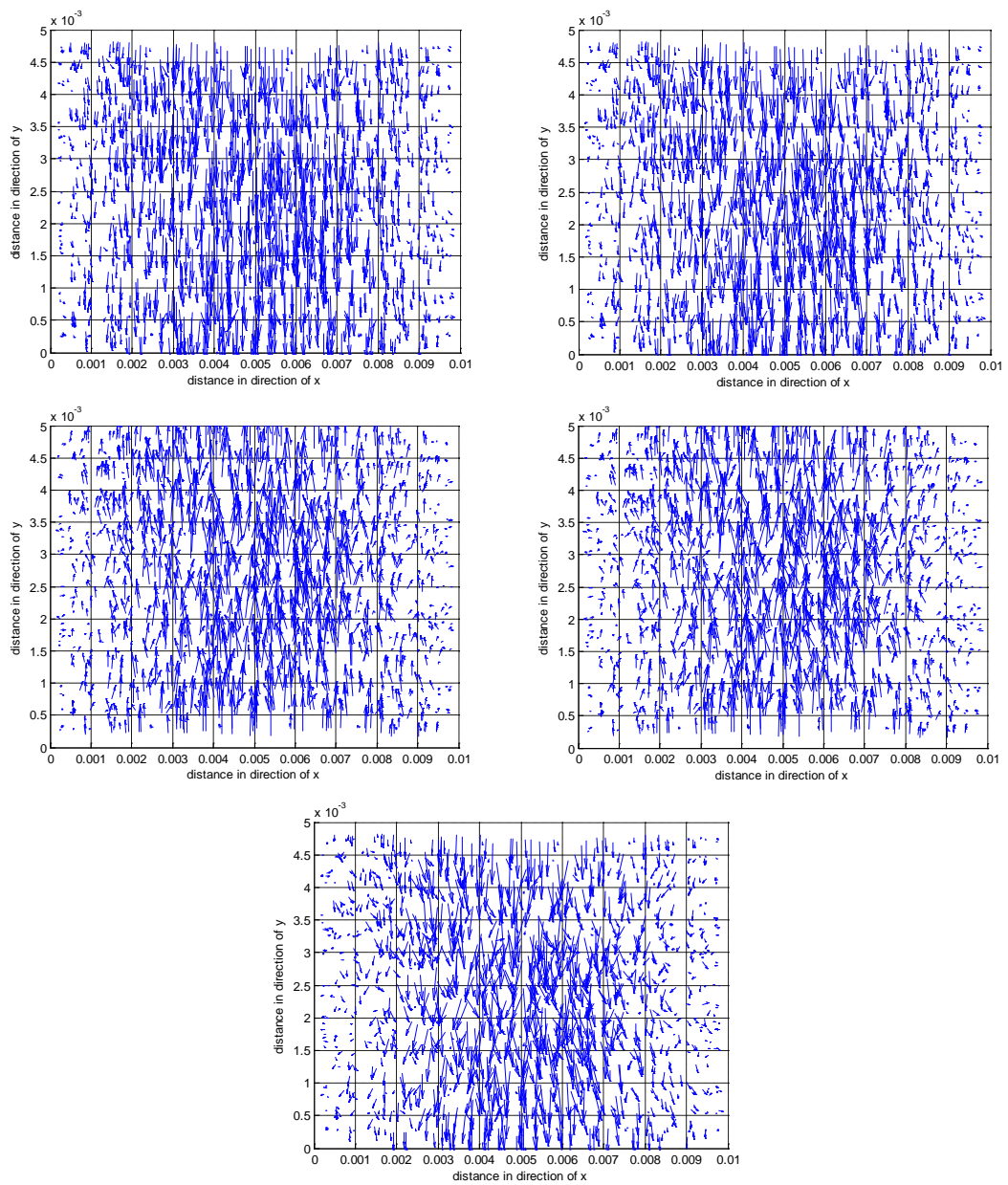
รูปที่ 4.32 สนามแม่เหล็กโมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11

เมื่อ chirality parameter=2 บนระนาบ $z=0$

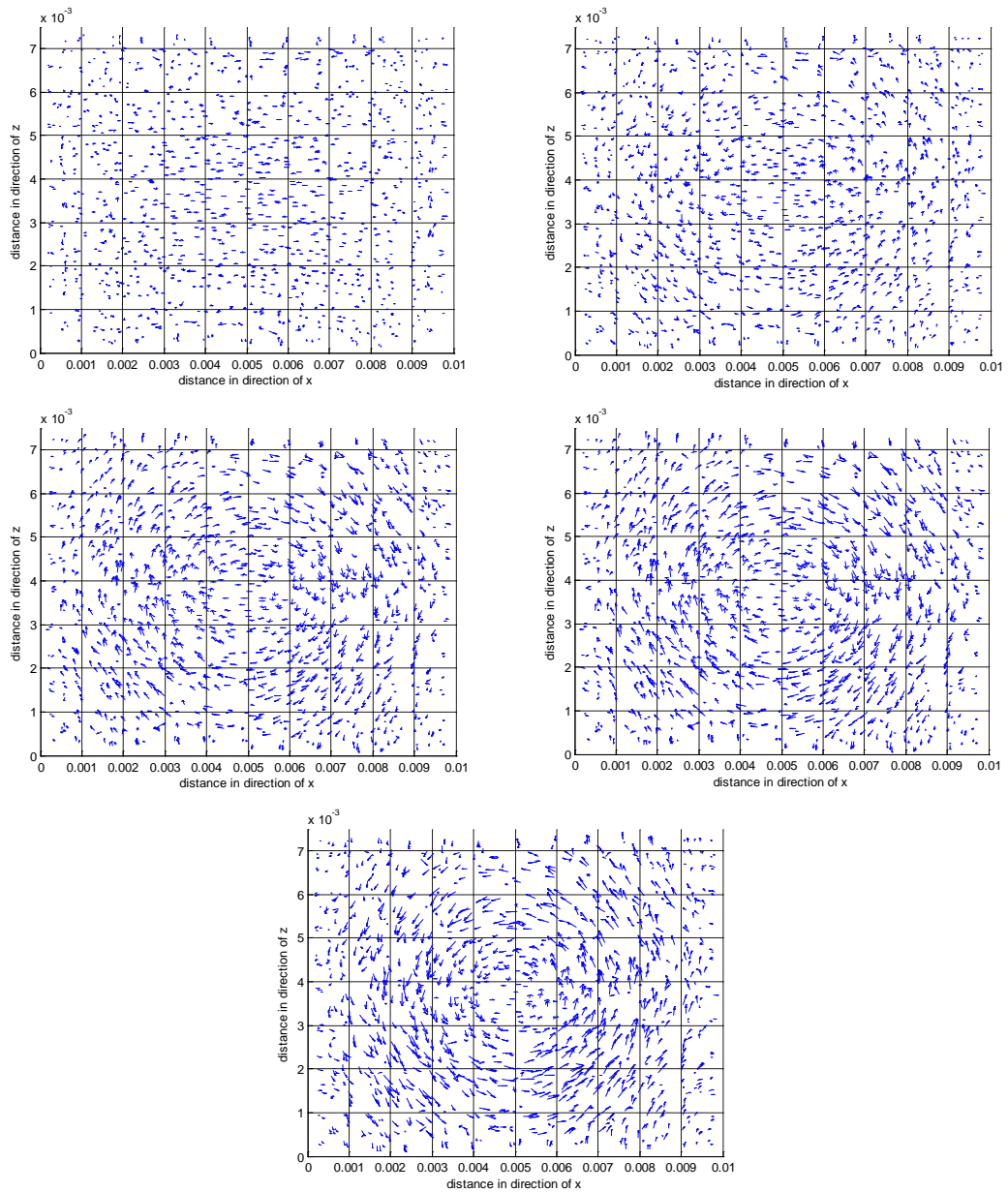


รูปที่ 4.33 สนามแม่เหล็กโมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11

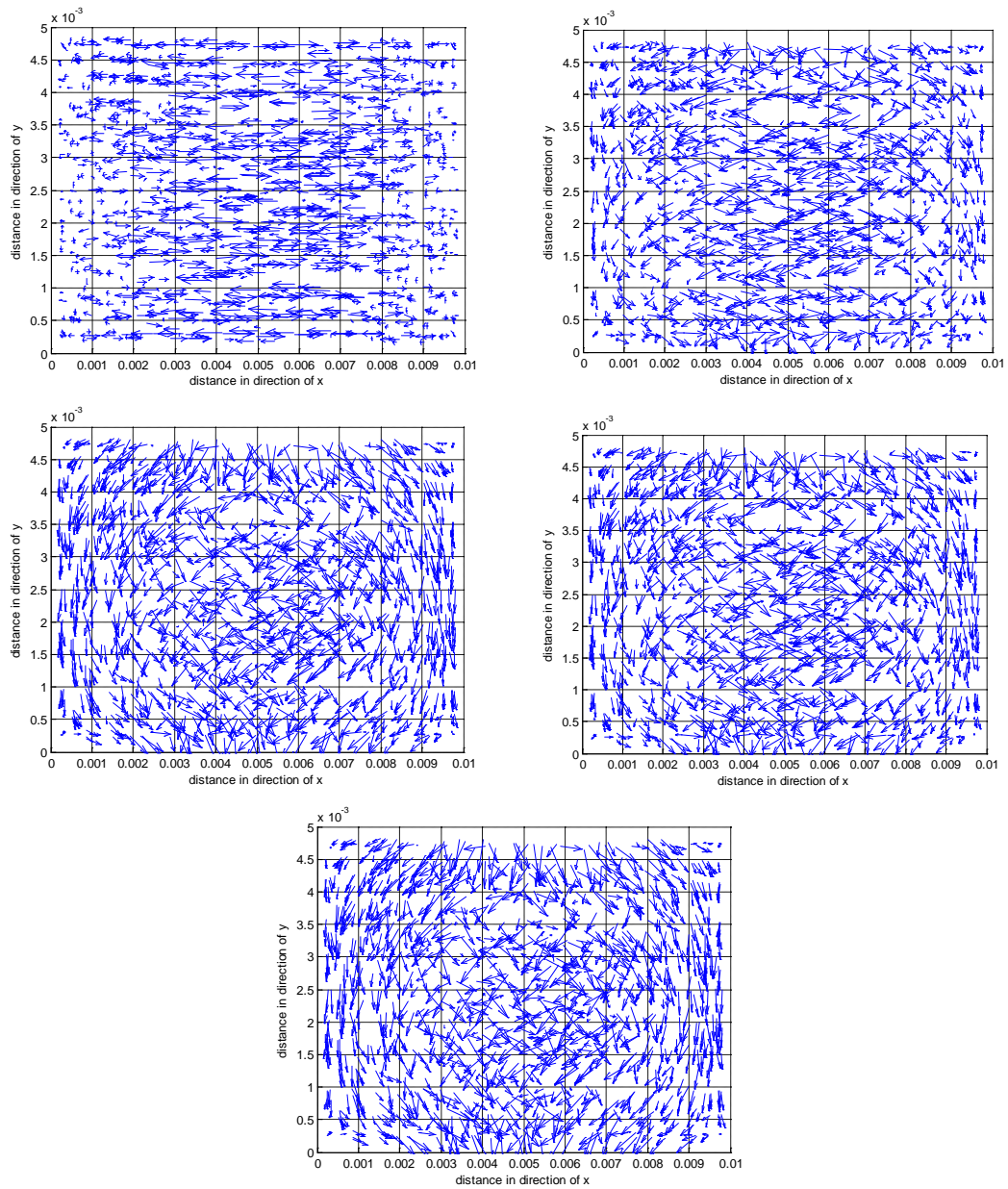
เมื่อ chirality parameter=2 บนระนาบ $y=0$



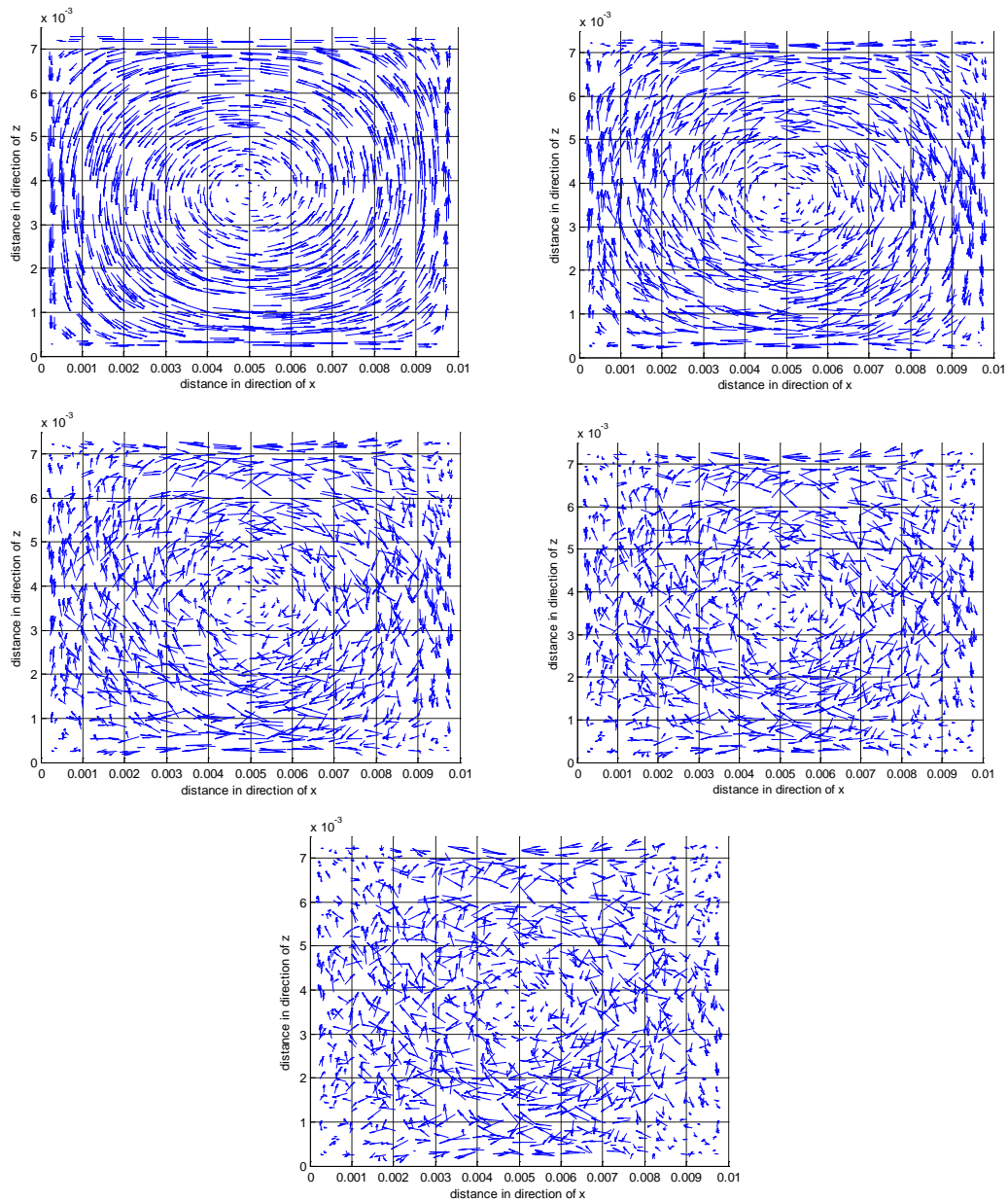
รูปที่ 4.34 สนามไฟฟ้าโมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11 เมื่อ chirality parameter=0, 0.5, 1, 1.5 และ 2 บนระนาบ $z=0$ โดยเรียงลำดับจากซ้ายไปขวา และบนลงล่าง



รูปที่ 4.35 สนามไฟฟ้าโมดแรกของเวกซ์เตอร์ในภาพที่ 4.11 เมื่อ chirality parameter=0, 0.5, 1, 1.5 และ 2 บนระนาบ $y=0$ โดยเรียงลำดับจากซ้ายไปขวา และบนลงล่าง



รูปที่ 4.36 สนามแม่เหล็กโมดแรกของเรซินเตอร์โนภาพที่ 4.11 เมื่อ chirality parameter=0, 0.5, 1, 1.5 และ 2 บนระนาบ $z=0$ โดยเรียงลำดับจากซ้ายไปขวา และบนลงล่าง



รูปที่ 4.37 สนามแม่เหล็กโมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.11 เมื่อ chirality parameter=0, 0.5, 1, 1.5 และ 2 บนระนาบ $y=0$ โดยเรียงลำดับจากซ้ายไปขวา และบนลงล่าง

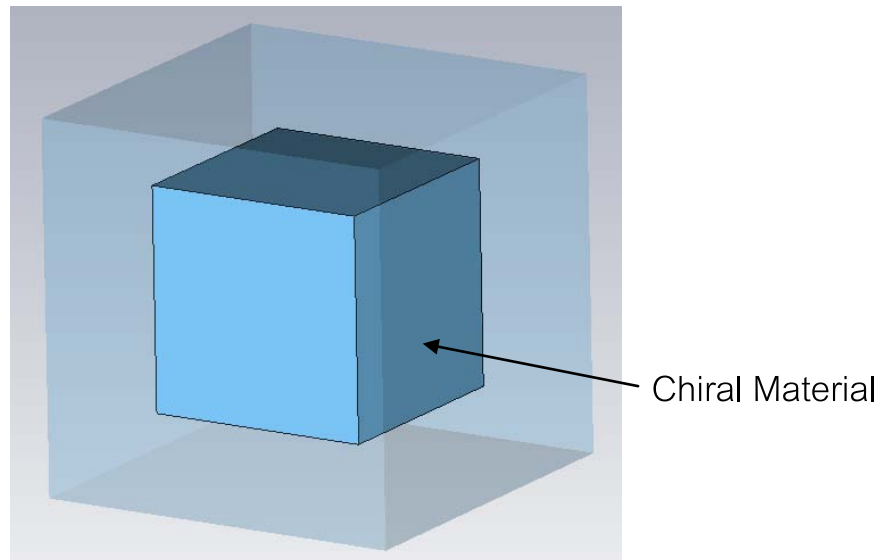
จากภาพที่ 4.14 ถึง 4.37 จะเห็นได้ว่าผลของพารามิเตอร์ไครัลลิตีทำให้สนามไฟฟ้าโมดแรกมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือสำหรับสนามไฟฟ้าในแนวระนาบ $z=0$ นั้นเมื่อทำการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีจะทำให้สนามไฟฟ้ามีทิศทางที่หักเหไปจากเดิมและมีการเปลี่ยนทิศทางสลับไปมาโดยบริเวณด้านข้างจะเกิดสนามเรียงตัวในแนวโค้งเล็กน้อย สำหรับสนามไฟฟ้า

ในแนวระนาบ $y=0$ นั้นเมื่อทำการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีจะทำให้สนามไฟฟ้าเกิดการหมุนทั้งทิศตามเข็มนาฬิกา และทิศทวนเข็มนาฬิกาสลับไปมา และจะมีการหมุนวนมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีมากขึ้น สำหรับในระนาบ $x=0$ สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ยาก สำหรับในกรณีสนามแม่เหล็กในแนวระนาบ $z=0$ เมื่อทำการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีจะทำให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กจะมีทิศทางเปลี่ยนไปจากในแนวแกน x ไปยังในแนวแกน y โดยค่อยๆมีการเปลี่ยนทิศทางตามค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีที่เพิ่มขึ้น ส่วนในแนวระนาบ $y=0$ นั้นจะมีการหมุนวนตามเข็มนาฬิกา ซึ่งจะแตกต่างกับกรณีตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการหมุนวนตามทิศทวนเข็มนาฬิกา และเมื่อเพิ่มค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีจะทำให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กยังคงหมุนตามทิศเข็มนาฬิกาแต่จะมีการเปลี่ยนแปลงของทิศสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น สำหรับในระนาบ $x=0$ สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ยาก

4.2.6 การเปรียบเทียบผลการจำลองของค่าตัวประกอบคุณภาพสำหรับตัวกลางไครัลในอุปกรณ์เรโซเนเตอร์

เพื่อเป็นการยืนยันว่าการคำนวณตัวประกอบคุณภาพที่มาจากการสูญเสียของไดอิเล็กตริกนั้นถูกต้อง ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณทั้งค่าความถี่เรโซแนนซ์และตัวประกอบคุณภาพในกรณีตัวกลางไครัลไม่เป็นเนื้อเดียว และทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากสมการที่ (3.36) โดยคำนวณจากพลังงานที่สะสมและกำลังงานที่สูญเสียในเรโซเนเตอร์ และสำหรับสมการที่ (3.37) โดยคำนวณจากความถี่เรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์ โดยมีรายละเอียดของเรโซเนเตอร์ที่ใช้ในการจำลองดังนี้คือ สำหรับสี่เหลี่ยมเล็กมีขนาดกว้าง 0.6 ซม. ยาว 0.6 ซม. สูง 0.6 ซม. เต็มด้วยสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ $5-0.001j$, ความซาบซึมได้สัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ $1-0.002j$ และค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับสี่เหลี่ยมใหญ่มีขนาดกว้าง 1 ซม. ยาว 1 ซม. สูง 1 ซม. เต็มด้วย สภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ $3-0.001j$, ความซาบซึมได้สัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ $1-0.001j$ และมีค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีมีค่าเท่ากับ 0 จำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ 1029 เอลิเมนต์ดังภาพที่ 4.38

จากตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบคุณภาพที่ได้จากสมการที่ (3.36) และ (3.37) มีความสอดคล้องกัน นั้นแสดงว่า เรโซเนเตอร์ที่ใช้วัสดุไครัลเป็นส่วนประกอบสามารถเปลี่ยนเป็นวงจรสมมูลของตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำได้



ภาพที่ 4.38 เรโซเนเตอร์สี่เหลี่ยมมุมฉากโดยมีตัวกลางไดอิเล็กตริกที่ไม่เป็นเนื้อเดียว และถูกเติมด้วยวัสดุไครัลบางส่วน

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบผลของตัวประกอบคุณภาพที่มาจากการสูญเสียของวัสดุไดอิเล็กตริก จากสมการที่ (3.36) และ (3.37) ของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.38

| ความถี่เรโซแนนซ์ | ค่าตัวประกอบคุณภาพ จากสมการที่ (3.36) | ค่าตัวประกอบคุณภาพ จากสมการที่ (3.37) |
|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| โหมดแรก 10.041 GHz | 774.585 | 774.322 |
| โหมดสอง 10.064 GHz | 773.029 | 772.767 |
| โหมดสาม 10.078 GHz | 773.792 | 773.530 |
| โหมดสี่ 13.689 GHz | 747.861 | 747.597 |
| โหมดห้า 13.719 GHz | 747.667 | 747.403 |

4.2.7 การหาค่าความเหนี่ยวนำรวมและค่าความจรรวมของเรโซเนเตอร์ที่ถูกเติมด้วยวัสดุไครัล

ในกรณีวงจรเรโซเนเตอร์ที่เป็นวงจรมหัพภาค RLC จะได้ว่า [1]

$$Q = \omega_0 RC = \frac{R}{\omega_0 L} \quad (4.5)$$

และที่ความถี่เรโซแนนซ์จะได้

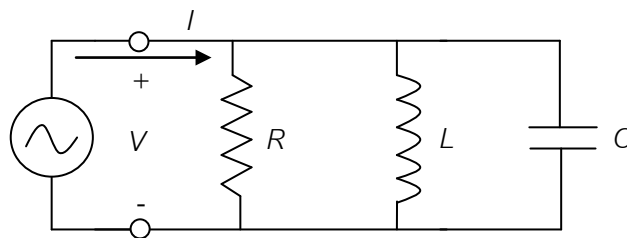
$$LC = \frac{1}{\omega_0^2} \quad (4.6)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4.5) และ (4.6) จึงได้ว่า

$$L = \frac{R}{\omega_0 Q} \quad (4.7)$$

$$C = \frac{Q}{\omega_0 R} \quad (4.8)$$

จากสมการที่ (4.7) และ (4.8) จะสามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำรวม และค่าความเก็บประจุรวมในรูปจำนวนเท่าของความต้านทานได้ เพราะสามารถหาค่าความถี่เชิงมุมเรโซแนนซ์ และค่าตัวประกอบคุณภาพได้ แต่เนื่องจากเรโซเนเตอร์ที่ใช้ถูกปิดหมดจึงยังไม่มีทางเข้าออก และไม่มีแหล่งจ่าย ดังนั้นจึงยังไม่สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำรวม ค่าความจุรวม และค่าความต้านทานรวมพร้อมกันทุกค่าได้ เพราะไม่สามารถคำนวณหากระแสที่ไหลในวงจรอันเนื่องมาจากแหล่งจ่ายได้ดังภาพที่ 4.39



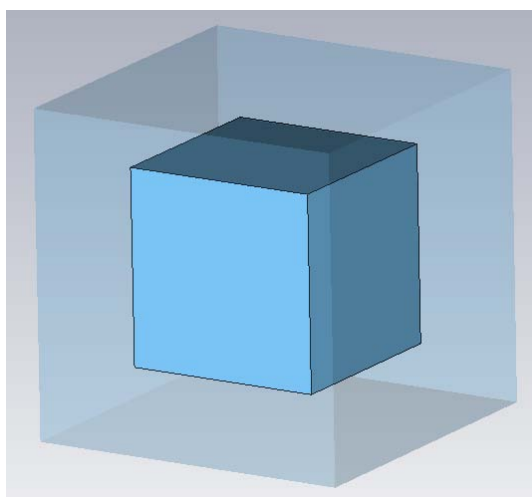
ภาพที่ 4.39 วงจรสมมูลของไครัลเรโซเนเตอร์แบบวงจรขนาน

จากภาพที่ 4.39 V คือแรงดันที่ตกคร่อมแหล่งจ่าย I คือกระแสที่ไหลในวงจร R คือค่าความต้านทานรวม L คือค่าความเหนี่ยวนำรวม C คือค่าความจุรวม

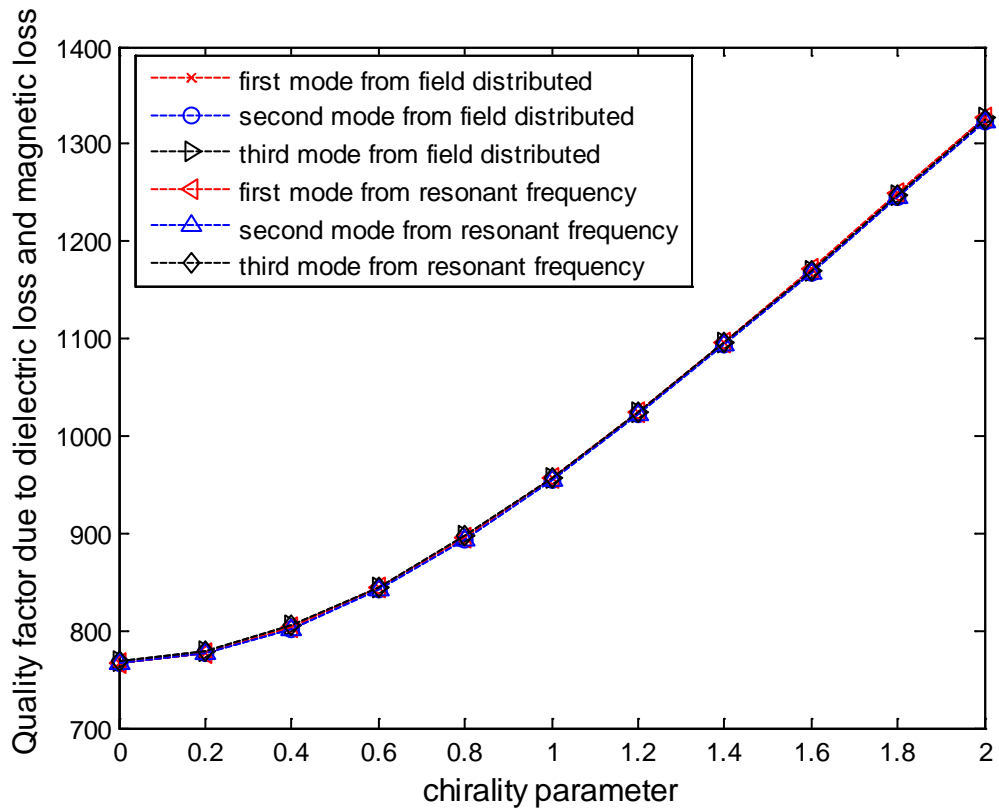
ผู้วิจัยต้องการหาวงจรมูลของเรโซเนเตอร์ที่มีส่วนประกอบที่เป็นวัสดุไครัลได้จากค่าตัวประกอบคุณภาพ โดยวงจรมูลเป็นตัวต้านทาน , ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ และเลือกวงจรมูลเป็นวงจรขนานเพื่อให้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากงานวิจัย [17] ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.2.3 และทำการปรับค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีเพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ เพราะการที่ใส่วัสดุ เช่น ขดลวดสปริงเพิ่มเข้ามาผู้วิจัยถือว่าเป็นตัวกลางที่

ไว้การสูญเสีย แต่สำหรับวัสดุไดอิเล็กตริกที่เป็นตัวประสานจะมีการใส่การสูญเสียเข้าไปเพื่อให้สามารถคำนวณค่าตัวประกอบคุณภาพได้ ดังนั้นการสูญเสียจะคงที่นั่นคือ ค่าความต้านทานรวมจะคงที่ แต่สำหรับค่าความเก็บประจุ และค่าความเหนี่ยวนำจะไม่คงที่เพราะมีการปรับค่าพารามิเตอร์ไคร์ลิตี๊ จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าพลังงานสะสมในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเฉลี่ยตามเวลาที่เกิดขึ้นในเรโซเนเตอร์จะเพิ่มขึ้นซึ่งเห็นได้จากค่าตัวประกอบคุณภาพที่เพิ่มขึ้นเมื่อค่าพารามิเตอร์ไคร์ลิตี๊เพิ่มขึ้น แสดงว่าค่าความจรรวมจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเหนี่ยวนำรวมจะลดลงในกรณีที่เป็นวงจรแบบขนาน หรือตรงข้ามกันในกรณีวงจรแบบอนุกรม

ผู้วิจัยสามารถแสดงการเพิ่มขึ้นของค่าความจรรวม และการลดลงของค่าความเหนี่ยวนำรวมในกรณีที่เป็นวงจรแบบขนาน เมื่อมีการปรับค่าพารามิเตอร์ไคร์ลิตี๊ให้เพิ่มขึ้น ด้วยการจำลองต่อไปนี้ เรโซเนเตอร์แบบสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ไม่เป็นเนื้อเดียวแต่ถูกเติมด้วยวัสดุไคร์ลิตี๊ทั้งหมด โดยมีรายละเอียดดังนี้สำหรับสี่เหลี่ยมเล็กมีขนาดกว้าง 0.6 ซม. ยาว 0.6 ซม. สูง 0.6 ซม. ถูกเติมด้วยสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 5-0.005j, ความซาบซึมได้สัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 1 และมีพารามิเตอร์ค่าไคร์ลิตี๊มีค่าตั้งแต่ 0-2 สำหรับสี่เหลี่ยมใหญ่มีขนาดกว้าง 1 ซม. ยาว 1 ซม. สูง 1 ซม. เติมด้วยสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 3, ความซาบซึมได้สัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 1-0.001j และปรับค่าพารามิเตอร์ไคร์ลิตี๊มีค่าตั้งแต่ 0-2 จำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองคือ 1029 เอลิเมนต์ แสดงดังภาพที่ 4.40



ภาพที่ 4.40 เรโซเนเตอร์สี่เหลี่ยมมุมฉากที่ประกอบด้วยตัวกลางไดอิเล็กตริกที่ไม่เป็นเนื้อเดียว และเรโซเนเตอร์ถูกเติมด้วยวัสดุไคร์ลิตี๊ทั้งหมด



ภาพที่ 4.41 เปรียบเทียบค่าตัวประกอบคุณภาพที่ได้จากสมการที่ (3.36) และสมการที่ (3.37) ของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.40

ตารางที่ 4.10 ความถี่เรโซแนนซ์ ณ ค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีเป็น 0 ของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.40

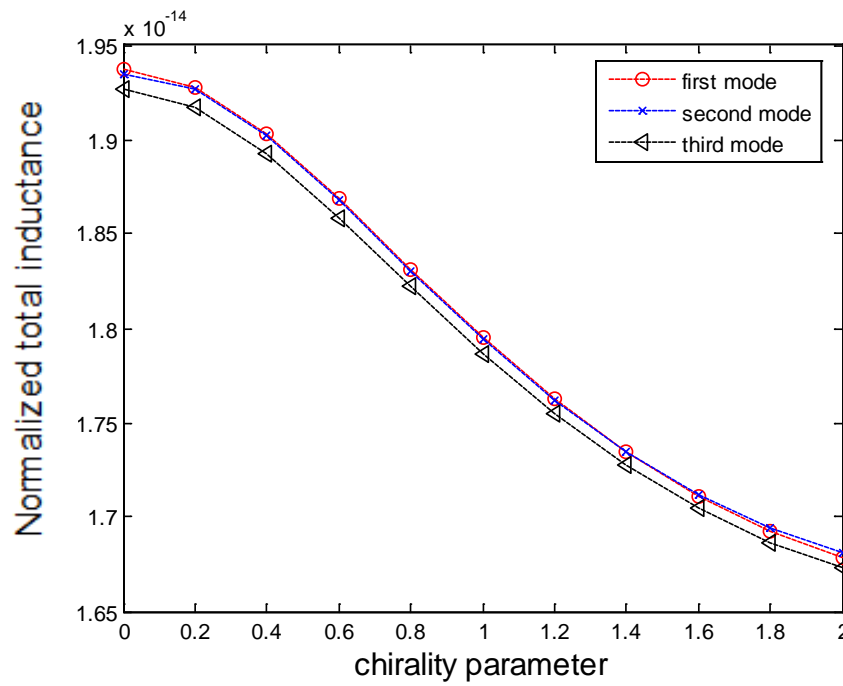
| ความถี่เรโซแนนซ์ | ณ ค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีเป็น 0 |
|------------------|---------------------------------|
| โหมดแรก | 10.710 GHz |
| โหมดที่สอง | 10.718 GHz |
| โหมดที่สาม | 10.746 GHz |

ตารางที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบผลของตัวประกอบคุณภาพที่มาจากการสูญเสียของวัสดุไดอิเล็กตริกจากสมการที่ (3.36) ตัวประกอบคุณภาพจากสนามที่กระจายตัวและสมการที่ (3.37) ตัวประกอบคุณภาพจากความถี่เรโซแนนซ์ จากเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.40

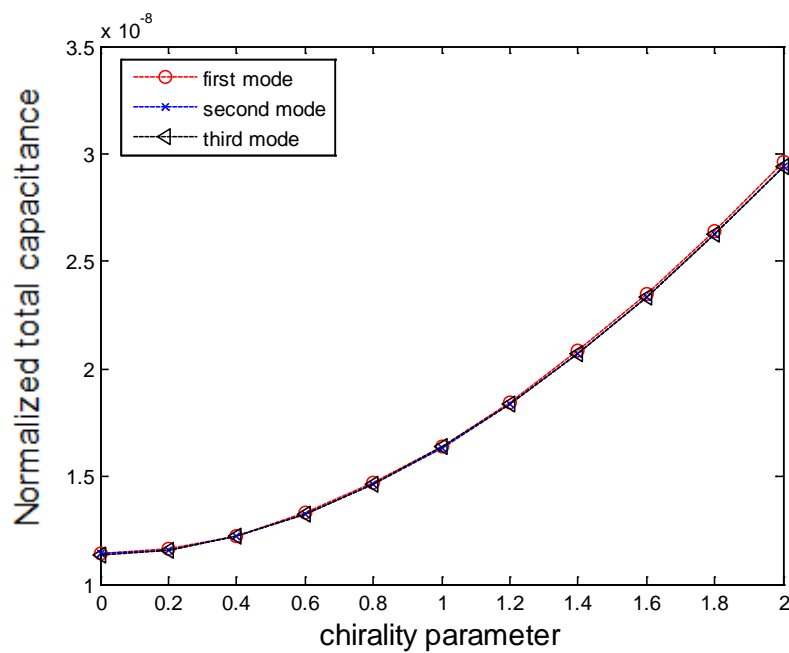
| mode | $\kappa = 0$ | | $\kappa = 1$ | | $\kappa = 2$ | |
|------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| | Q factor from field distributed | Q factor from resonant freq. | Q factor from field distributed | Q factor from resonant freq. | Q factor from field distributed | Q factor from resonant freq. |
| 1 | 767.06 | 766.94 | 956.26 | 956.28 | 1328.05 | 1328.29 |
| 2 | 767.52 | 767.41 | 954.79 | 954.81 | 1323.27 | 1323.51 |
| 3 | 768.75 | 768.63 | 956.98 | 957.00 | 1326.18 | 1326.42 |

สำหรับตารางที่ 4.10 ได้แสดงถึงความถี่เรโซแนนซ์ ณ ค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีที่มีค่าเท่ากับ 0 ของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.40 สำหรับภาพที่ 4.41 เป็นการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบคุณภาพที่มาจากการสูญเสียของไดอิเล็กตริกที่ได้จากพลังงานสะสมจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสมการที่ (3.36) และที่ได้จากความถี่เรโซแนนซ์จากสมการที่ (3.37) ของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.40 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากสมการที่ (3.36) และ (3.37) นั้นมีความสอดคล้องกัน โดยเมื่อค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีเพิ่มขึ้น ตัวประกอบคุณภาพจะมีค่าเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ยังสามารถสังเกตได้จากค่าตัวเลขของค่าตัวประกอบคุณภาพในตารางที่ 4.11 โดยแสดงค่าตัวประกอบคุณภาพเฉพาะที่ $\kappa = 0, 1$ และ 2

จากภาพที่ 4.42 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีที่มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความเหนี่ยวนำรวมจะลดลงในแต่ละโหมด ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานสะสมเฉลี่ยในเรโซเนเตอร์ที่เพิ่มขึ้นจากภาพที่ 4.41 สำหรับภาพที่ 4.43 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตี ค่าความจรรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นในแต่ละโหมดซึ่งสอดคล้องกับพลังงานที่สะสมในเรโซเนเตอร์ที่เพิ่มขึ้นจากภาพที่ 4.41 สำหรับตารางที่ 4.12 ได้แสดงถึง ค่าความเหนี่ยวนำรวม และค่าความจรรวมของโหมดแรกสำหรับเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.40 โดยแสดง ณ ค่า chirality parameter ต่างๆ ดังตาราง สามารถสังเกตได้ว่า ค่าความเหนี่ยวนำรวมจะลดลง ส่วนค่าความจรรวมจะเพิ่มขึ้น ตามค่า chirality parameter ที่เพิ่มขึ้นสำหรับกรณีวงจรรเรโซแนนซ์ที่ต่อกันแบบขนาน อธิบายตามทางกายภาพได้ว่าการใส่ขดลวดสปริงเข้าไปในวัสดุตัวกลางเป็นการลดค่าความเหนี่ยวนำ และทำให้เพิ่มค่าความจุในกรณีที่เป็นวงจรรขนานซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ในงานวิจัย [17]



ภาพที่ 4.42 ค่าความเหนี่ยวนำรวมโดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีตั้งแต่ 0 ถึง 2 จากเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.40



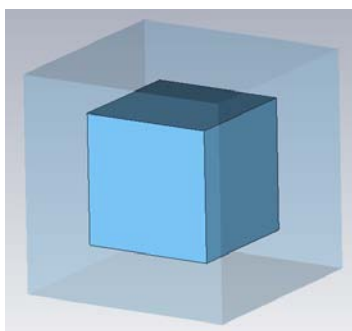
ภาพที่ 4.43 ค่าความจุรวมโดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีตั้งแต่ 0 ถึง 2 จากเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.40

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความเหนี่ยวนำรวม และค่าความจุรวมของโหมดแรกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.40 โดยเปลี่ยนค่าตาม chirality parameter ดังตาราง โดยได้ค่ามาจากภาพที่ 4.42 และภาพที่ 4.43

| First mode | $\kappa = 0$ | $\kappa = 0.4$ | $\kappa = 1$ | $\kappa = 1.6$ | $\kappa = 2$ |
|---------------------------------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
| Normalized total inductance (fH*ohm) | 19.38 | 19.03 | 17.95 | 17.11 | 16.79 |
| Normalized total capacitance (nF/ohm) | 11.40 | 12.26 | 16.42 | 23.48 | 29.62 |

4.2.8 การเปรียบเทียบผลการจำลองของจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริกและวัสดุไครัลในอุปกรณ์เรโซเนเตอร์

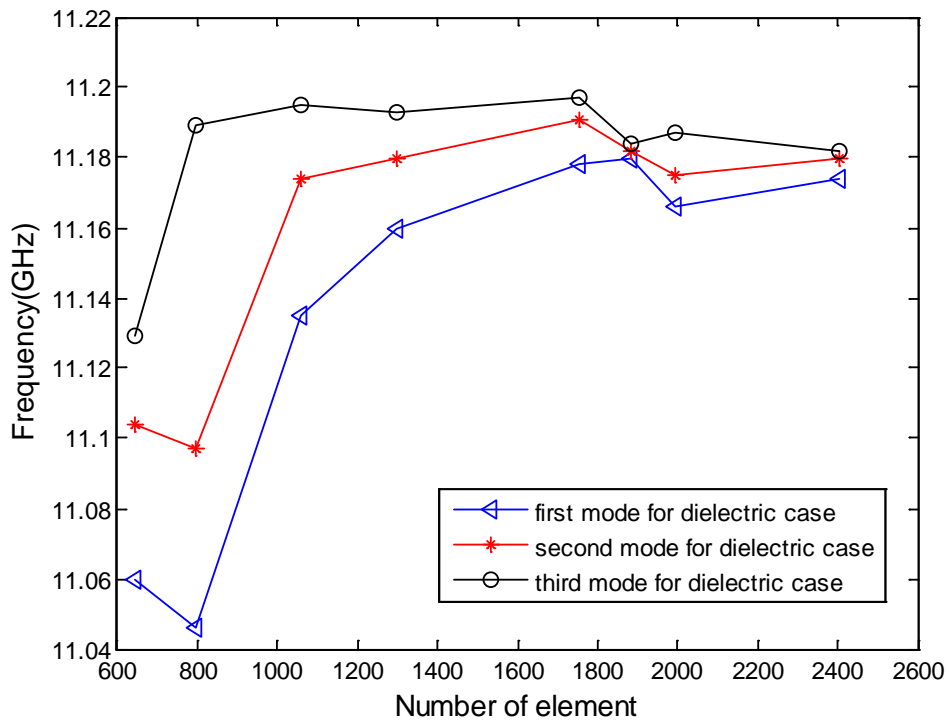
ในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลของจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริก และวัสดุไครัลโดยจะทำการเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์แล้วจึงเปรียบเทียบผลกับผลจำลองที่ได้ก่อนหน้านี้ (จำนวนเอลิเมนต์น้อยกว่า) โดยทำการเปรียบเทียบผลของความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้จากการจำลอง ในการจำลองนี้เรโซเนเตอร์มีขนาดเป็นกว้าง 1 ซม. ยาว 1 ซม. สูง 1 ซม. ถูกเติมด้วย สภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ $3-0.001j$, ความซาบซึมได้สัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ $1-0.001j$ เรโซเนเตอร์นี้มีโหนดขนาดกว้าง 0.5 ซม. ยาว 0.5 ซม. สูง 0.5 ซม. ถูกเติมด้วย สภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ $5-0.001j$, ความซาบซึมได้สัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ $1-0.002j$ สำหรับกรณีวัสดุไครัล โหนดจะถูกเติมด้วยค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีมีค่าเท่ากับ 1 เรโซเนเตอร์นี้แสดงได้ดังภาพที่ 4.44



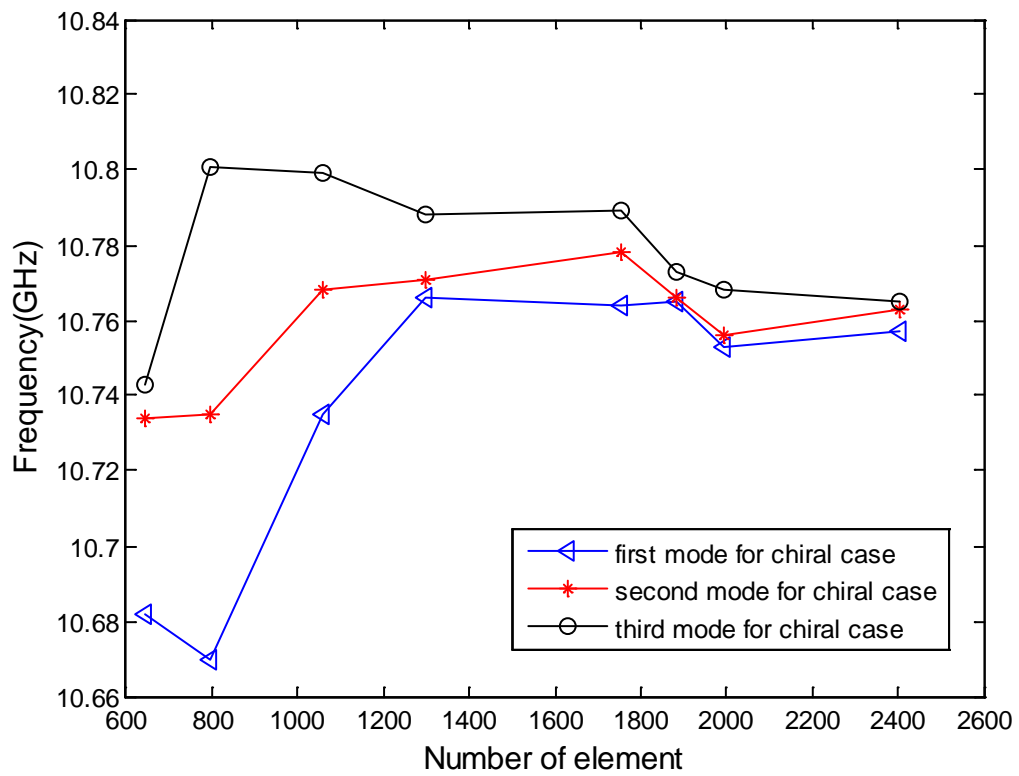
ภาพที่ 4.44 เรโซเนเตอร์สี่เหลี่ยมมุมฉากที่ประกอบด้วยตัวกลางไดอิเล็กตริกที่ไม่เป็นเนื้อเดียว

ตารางที่ 4.13 แสดงเวลาที่ใช้ในการจำลองเรโซเนเตอร์สำหรับวัสดุไดอิเล็กตริกและวัสดุโครัล
สำหรับเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.44

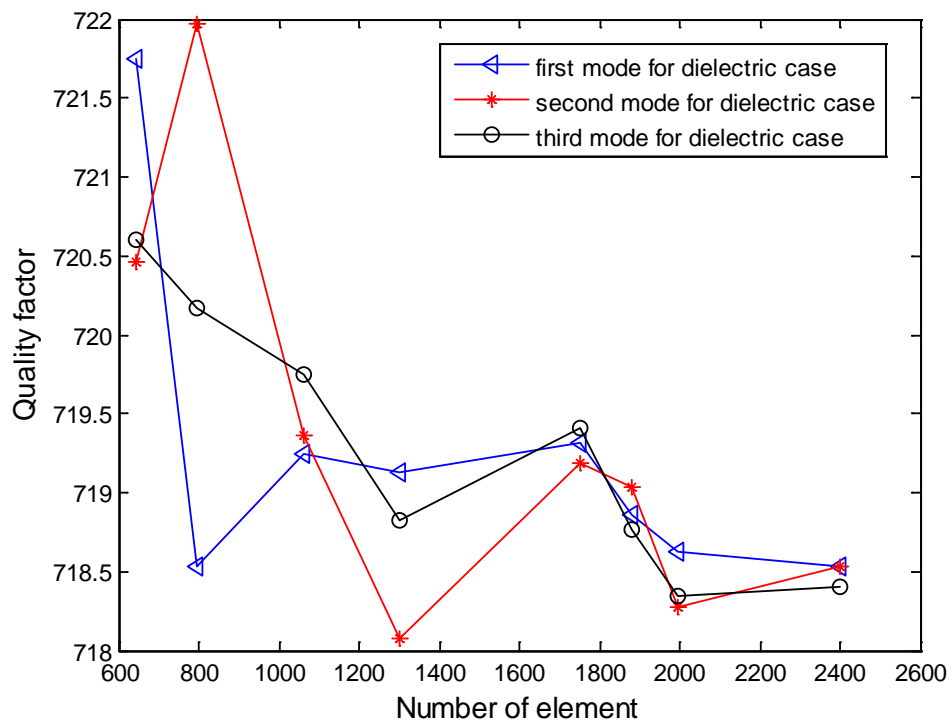
| จำนวนเอลิเมนต์ | เวลาที่ใช้ (วินาที) | |
|----------------|---------------------|------------|
| | วัสดุไดอิเล็กตริก | วัสดุโครัล |
| 644 | 10.79 | 73.04 |
| 794 | 21.75 | 149.78 |
| 1060 | 62.12 | 438.57 |
| 1300 | 120.41 | 767.60 |
| 1753 | 312.36 | 2168.42 |
| 1882 | 415.29 | 2551.50 |
| 1994 | 563.40 | 3534.64 |
| 2402 | 1620.20 | 5758.72 |



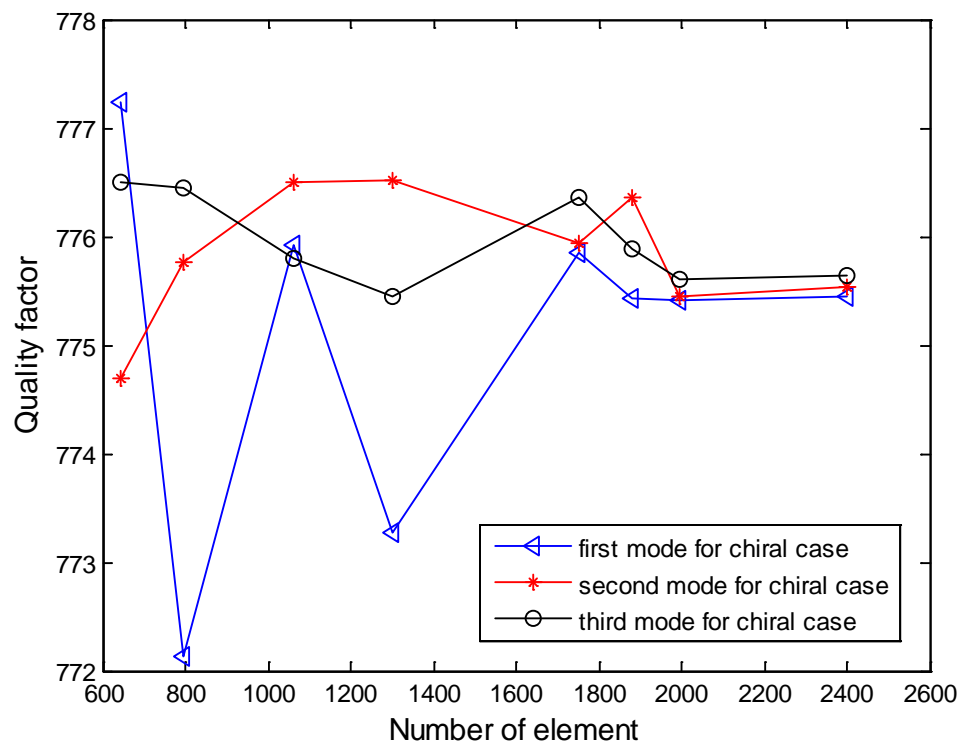
ภาพที่ 4.45 ความถี่เรโซแนนซ์ในกรณีวัสดุไดอิเล็กตริกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.44



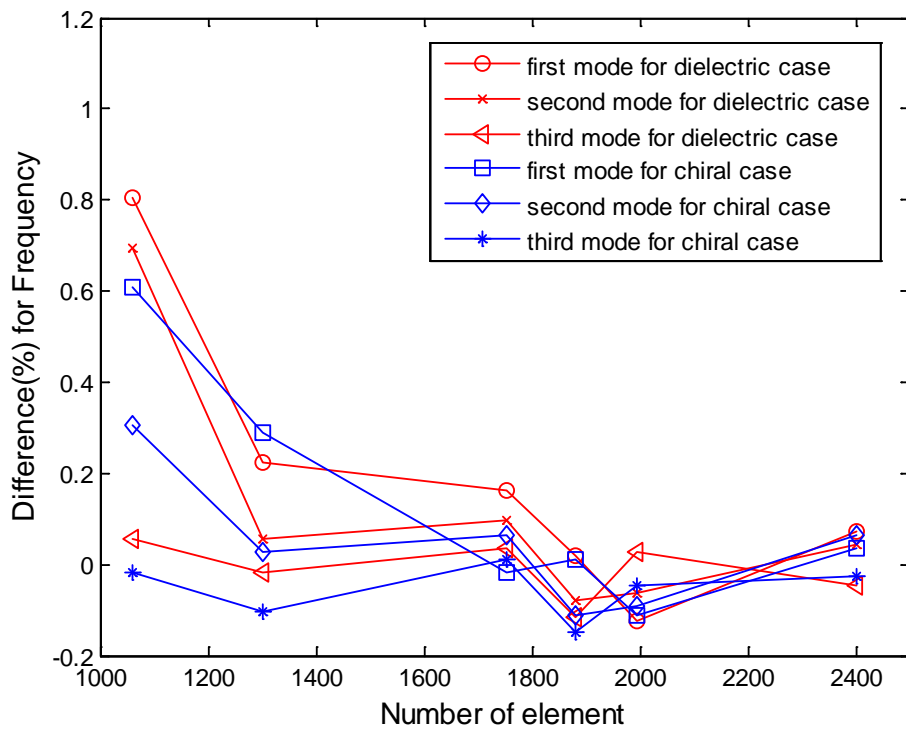
ภาพที่ 4.46 ความถี่เรโซแนนซ์ในกรณีวัสดุไครัลของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.44



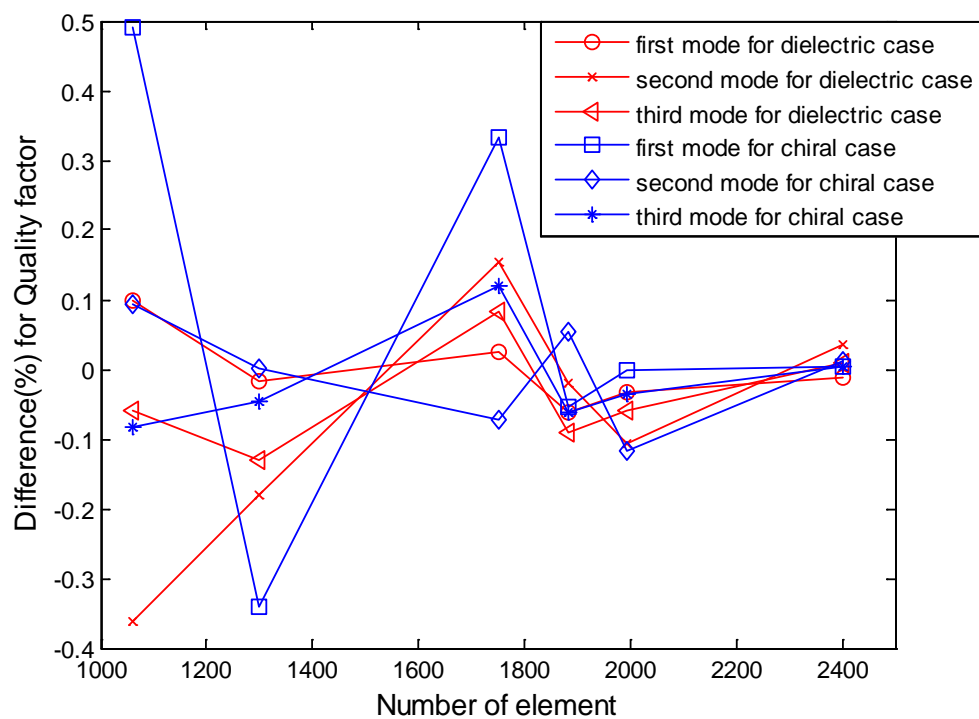
ภาพที่ 4.47 ค่าตัวประกอบคุณภาพในกรณีวัสดุไดอิเล็กตริกของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.44



ภาพที่ 4.48 ค่าตัวประกอบคุณภาพในกรณีวัสดุไครัลของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.44



ภาพที่ 4.49 แสดงค่าความแตกต่างของความถี่เรโซแนนซ์ทั้งในกรณีวัสดุไดอิเล็กตริก และกรณีวัสดุไครัลของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.44



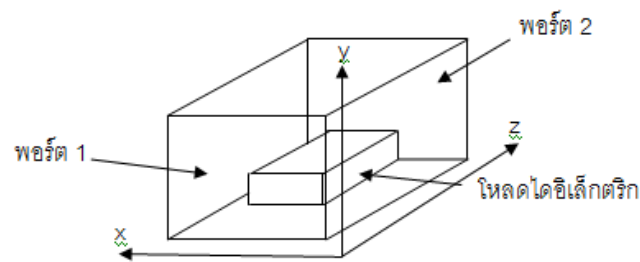
ภาพที่ 4.50 แสดงค่าความแตกต่างของค่าตัวประกอบคุณภาพทั้งในกรณีวัสดุไดอิเล็กตริก และกรณีวัสดุไครัลของเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.44

จากภาพที่ 4.45 และ 4.46 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ ความถี่เรโซแนนซ์ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกโมดสำหรับวัสดุไดอิเล็กตริก สำหรับวัสดุโครัลนั้นความถี่เรโซแนนซ์จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสำหรับโมดแรก และมีแนวโน้มคงที่และลดลงสำหรับโมดที่สองและสามตามลำดับ โดยเมื่อจำนวนเอลิเมนต์เพิ่มขึ้นจนมีจำนวนมากจนถึง 2402 เอลิเมนต์ จะเห็นได้ว่าความถี่เรโซแนนซ์ของทั้งสามโมดแรกมีค่าใกล้เคียงกันทั้งในกรณีวัสดุไดอิเล็กตริกและวัสดุโครัล แสดงให้เห็นถึงการลู่เข้าของคำตอบของความถี่เรโซแนนซ์เมื่อจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองมีมากเพียงพอ สำหรับค่าตัวประกอบคุณภาพจากภาพที่ 4.47 และ 4.48 จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบคุณภาพในช่วงแรกนั้น มีค่าแกว่งไปมาจนกระทั่งจำนวนเอลิเมนต์มีจำนวน 1882 เอลิเมนต์ ค่าตัวประกอบคุณภาพทั้งสามโมดเริ่มจะมีค่าเท่ากันทั้งในกรณีวัสดุไดอิเล็กตริกและวัสดุโครัล แสดงให้เห็นถึงการลู่เข้าของคำตอบของค่าตัวประกอบคุณภาพ สำหรับภาพที่ 4.49 และ 4.50 จะเห็นได้ว่าค่าความแตกต่างระหว่างการเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ก่อนและหลังนั้น ความแตกต่างจะมีแนวโน้มลดลงเข้าใกล้ศูนย์ทั้งในกรณีความถี่เรโซแนนซ์และค่าตัวประกอบคุณภาพ และความแตกต่างนี้มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันทั้งในกรณีวัสดุไดอิเล็กตริกและวัสดุโครัล เพราะมีการลู่เข้าที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ตัวกลางโครัล สามารถใช้จำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้เพื่อวิเคราะห์ตัวกลางไดอิเล็กตริกได้ แต่อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการคำนวณในกรณีตัวกลางโครัลจะมีค่ามากกว่ากรณีตัวกลางไดอิเล็กตริก เพราะขนาดของเมตริกซ์ในการคำนวณวัสดุโครัลจะมีขนาดเป็นสองเท่าของกรณีวัสดุไดอิเล็กตริก โดยสามารถสังเกตได้จากสมการที่ (3.33) โดยเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งในกรณีวัสดุไดอิเล็กตริกและวัสดุโครัลได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.13

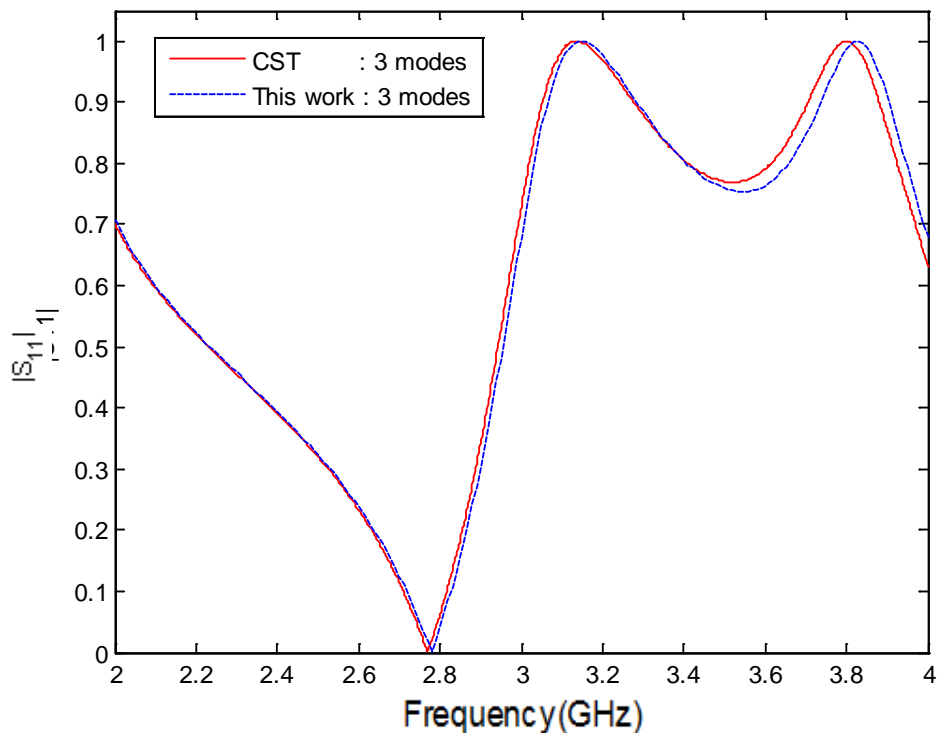
4.3 ผลการจำลองของพารามิเตอร์การกระเจิงในตัวกลางไดอิเล็กตริก

ในหัวข้อนี้ได้ทำการเปรียบเทียบการจำลองกับโปรแกรมจำลองสามมิติ CST ดังภาพที่ 4.51 โดยในการจำลองจากภาพที่ 4.51 นั้น พอร์ตของเรโซเนเตอร์นี้เป็นแบบรูปลี่เหลี่ยม มีการใส่โมดเข้าไปทั้งพอร์ตหนึ่งและสองอย่างละสามโมด โดยการเลือกโมดที่ใส่เข้าไปยังพอร์ตนั้นได้พิจารณาจากความถี่ตัด (cutoff frequency) โดยคำนวณจากความกว้างและความยาวของพอร์ตทั้งสองพอร์ต โดยที่ขนาดของเรโซเนเตอร์คือ สำหรับรูปร่างสี่เหลี่ยมรูปใหญ่มีขนาดกว้าง 0.004 เมตร ยาว 0.008 เมตร และสูง 0.0096 เมตร เติมด้วยสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นได้สัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับรูปร่างสี่เหลี่ยมรูปเล็กมีขนาดกว้าง 0.0032 เมตร ยาว 0.0036 เมตร และสูง 0.0016 เมตร ถูกเติมด้วยสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 6 และความหนาแน่นได้สัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 1 จำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ 23265 เอลิเมนต์ ในการจำลองนี้ความกว้างของ

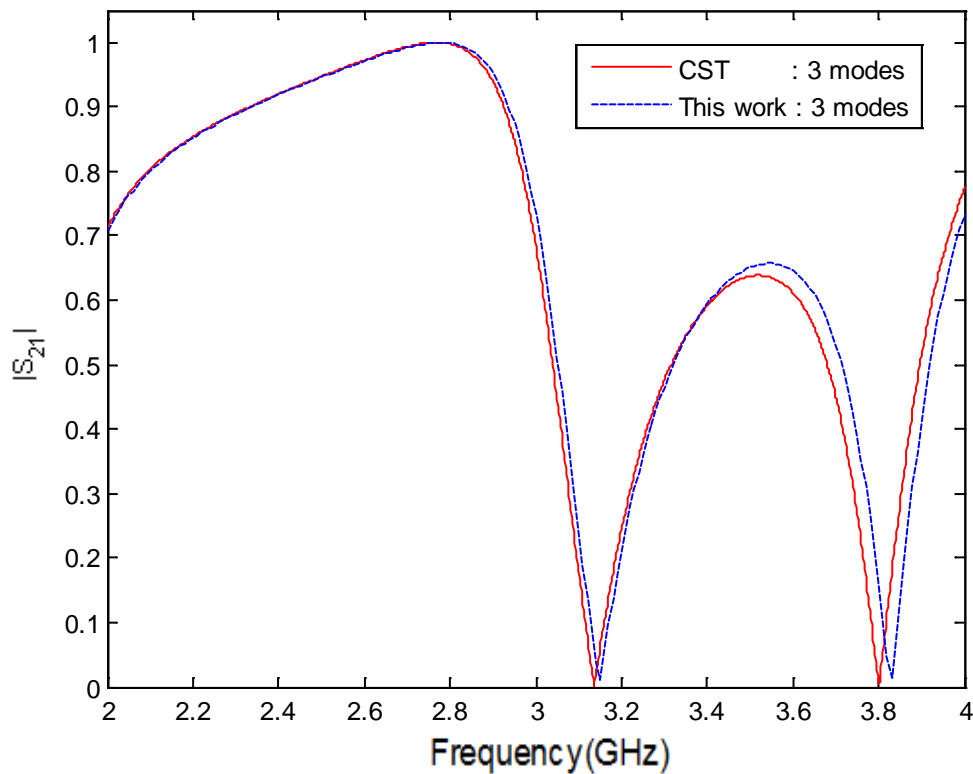
พอร์ตทั้งสองคือ 0.004 เมตร ส่วนความยาวของพอร์ตทั้งสองคือ 0.008 เมตร จึงได้ว่าในช่วงความถี่ 20-40 GHz จะมีโหมด TE_{10} , TE_{01} และ TE_{20} เกิดที่ 18.75 GHz, 37.5 GHz และ 37.5 GHz ตามลำดับที่เกิดขึ้น จะเห็นได้ว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกัน ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 4.52 และ 4.53 แต่จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในช่วงความถี่ความถี่ตั้งแต่ 34 GHz เป็นต้นไป แนวทางแก้ไขสามารถทำได้โดยเพิ่มจำนวนโหมดให้มากขึ้นหรือเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์



ภาพที่ 4.51 เรโซเนเตอร์สองพอร์ตที่มีโหนดเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก



ภาพที่ 4.52 ผลของพารามิเตอร์การกระเจิงสำหรับสัมประสิทธิ์การสะท้อนเทียบกับความถี่ที่ 20-40 GHz สำหรับเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.51

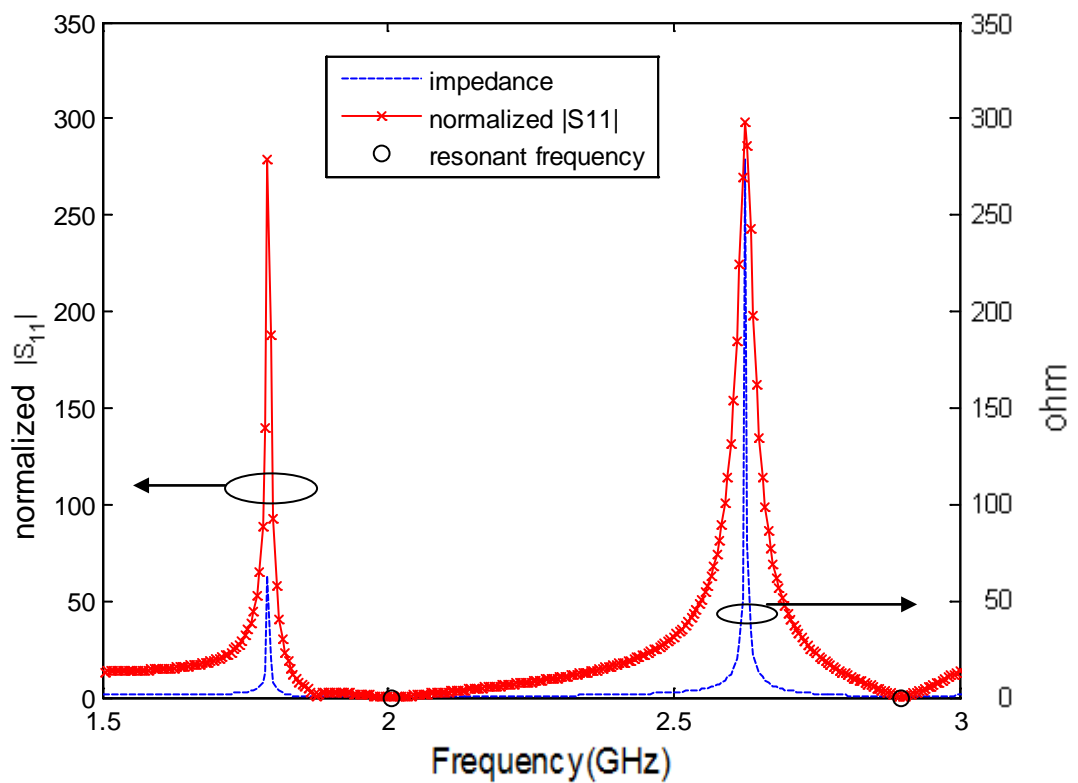


ภาพที่ 4.53 ผลของพารามิเตอร์การกระเจิงสำหรับสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเทียบกับความถี่ที่ 20-40 GHz สำหรับเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.51

หลังจากที่ได้คำนวณพารามิเตอร์การกระเจิงสำหรับตัวกลางไดอิเล็กตริกสำหรับท่อนำคลื่นสองพอร์ตและเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้กับโปรแกรมจำลองสามมิติ CST เพื่อยืนยันความถูกต้องแล้ว ผู้วิจัยจึงได้ทำการลดพอร์ตลงหนึ่งพอร์ตเพื่อพิจารณาปัญหาการหาพารามิเตอร์การกระเจิงสำหรับเรโซเนเตอร์ โดยทำการหาอิมพีแดนซ์, พารามิเตอร์การกระเจิงและความถี่เรโซแนนซ์ โดยภาพที่ 4.54 แสดงถึงผลของพารามิเตอร์การกระเจิงและเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ในกราฟเดียวกัน โดยที่พารามิเตอร์การกระเจิงได้ทำการนอร์มัลไลซ์ด้วยการคูณด้วยค่า 300 เพื่อสามารถทำให้เปรียบเทียบกับอิมพีแดนซ์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่าที่บริเวณใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์นั้นอิมพีแดนซ์จะมีค่ามากขึ้นกว่าที่ความถี่อื่นที่ไม่ใช่ความถี่เรโซแนนซ์ นั่นก็เป็นเพราะว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์นั้นอิมพีแดนซ์จะมีค่ามากกว่าบริเวณความถี่อื่น และพิจารณาความสัมพันธ์

$$S_{11} = \frac{Z_{11} - 1}{Z_{11} + 1} \quad (4.9)$$

จะเห็นได้ว่าถ้าหากค่าอิมพีแดนซ์มีค่ามากจะทำให้พารามิเตอร์การกระเจิงจะมีค่าเข้าใกล้หนึ่งซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองที่ได้ นั่นแสดงว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์ เรโซเนเตอร์จะมีการสะท้อนของกำลังงานทั้งหมด นอกจากนี้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้จากการคำนวณค่าเจาะจงมีความใกล้เคียงกับบริเวณที่พารามิเตอร์การกระเจิงมีการสะท้อนกลับหมด และบริเวณที่อิมพีแดนซ์มีค่ามากที่สุด เป็นการยืนยันได้ว่าการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์ที่คำนวณจากค่าเจาะจงนั้นถูกต้องอีกทางหนึ่ง



ภาพที่ 4.54 ผลของพารามิเตอร์การกระเจิงสำหรับสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ที่ 15-30 GHz สำหรับเรโซเนเตอร์ในภาพที่ 4.51

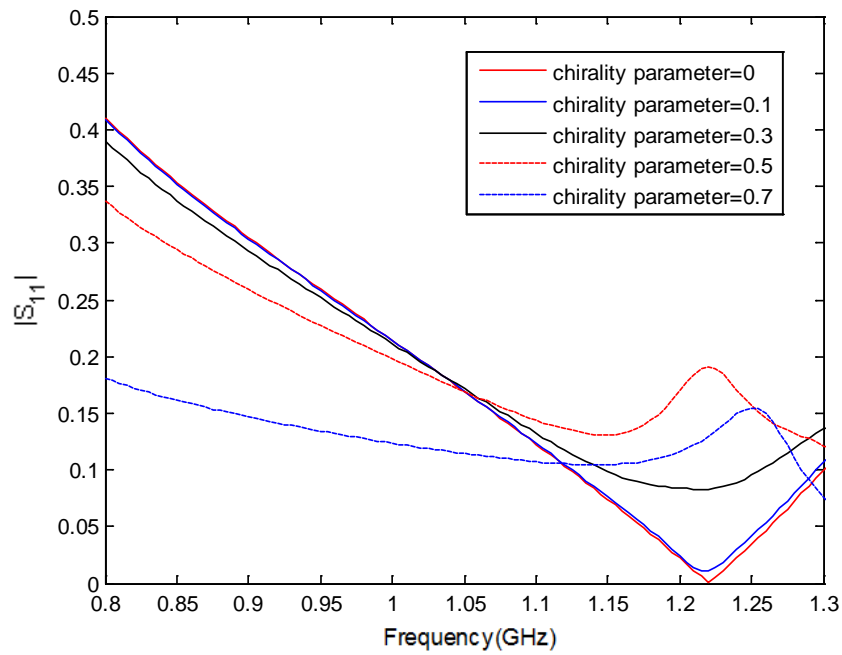
4.4 ผลการจำลองของพารามิเตอร์การกระเจิงในตัวกลางไครัล

ในหัวข้อนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับงานวิจัย [7] ในการจำลองนี้ผู้วิจัยได้คำนวณสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโหนดที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมโดยมีขนาดเป็น กว้าง 0.012 เมตร ยาว 0.00508 เมตร สูง W เมตร และถูกเติมด้วยสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 2.56 และความหนาซีมีได้สัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 1 โดยที่ W ได้แสดงค่าพร้อมกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่ 10 GHz ดังตารางที่ 4.13 โดยที่โหนดนี้ได้ถูกวางไว้ในท่อนำคลื่น WR 75 ซึ่งมีความกว้าง 0.02286 เมตร ความยาว 0.01016 เมตร ส่วนความสูง (L) นั้นได้กำหนดให้แปรตามค่า W โดยมีอัตราส่วนเป็น $\frac{L}{W} = 2$ แสดงได้ดังตารางที่ 4.14 จำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้สำหรับ W=7.62 mm คือ 5,339 เอลิเมนต์ สำหรับ W=10.16 mm คือ 7,175 เอลิเมนต์ จะเห็นได้ว่าผลการจำลองที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัย [7] จำนวนโมดที่ใช้ทั้งสองกรณีคือ 20 โมดแรก

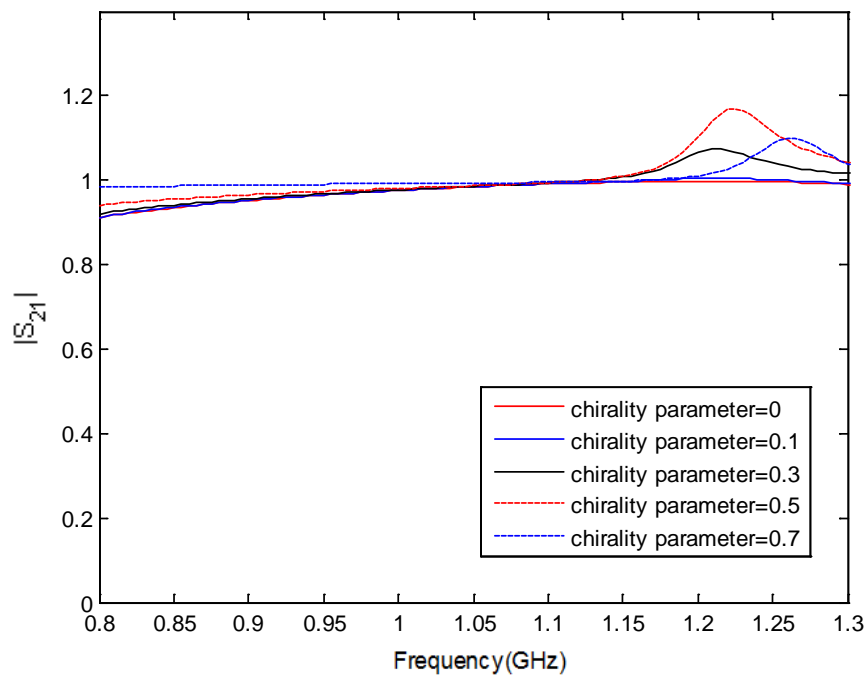
ตารางที่ 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการจำลองในกรณีตัวกลางไครัล

| $ S_{11} $ | $\kappa = 0$ | | $\kappa = 0.1178$ | |
|------------|-------------------|----------|-------------------|----------|
| | งานวิจัยนี้ | FDTD [7] | งานวิจัยนี้ | FDTD [7] |
| W=7.62 mm | 0.290 | 0.296 | 0.287 | 0.293 |
| W=10.16 mm | 0.215 | 0.220 | 0.214 | 0.217 |
| $ S_{11} $ | $\kappa = 0.2356$ | | $\kappa = 0.3534$ | |
| | งานวิจัยนี้ | FDTD [7] | งานวิจัยนี้ | FDTD [7] |
| W=7.62 mm | 0.280 | 0.285 | 0.266 | 0.269 |
| W=10.16 mm | 0.213 | 0.207 | 0.210 | 0.190 |

ต่อไปจะเป็นการพล็อตค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสำหรับกรณี W=10.16 มม. โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีเป็น 0, 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 ดังภาพที่ 4.52 และ 4.53



ภาพที่ 4.55 ผลของพารามิเตอร์การกระเจิงสำหรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน
เทียบกับความถี่ที่ 8-13 GHz กรณี $W=10.16$ mm



ภาพที่ 4.56 ผลของพารามิเตอร์การกระเจิงสำหรับสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน
เทียบกับความถี่ที่ 8-13 GHz กรณี $W=10.16$ mm

สำหรับสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากภาพที่ 4.55 นั้นมีแนวโน้มที่การสะท้อนที่เพิ่มขึ้น ภูมิภาคที่สามารถใช้งานได้ (12.2 GHz) โดยจะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ค่าพารามิเตอร์ไคร์ลิตีมีค่าประมาณ 0.5 จากนั้นจึงเริ่มลดลง และในช่วงความถี่ต่ำตั้งแต่ 10 GHz ลงมาเมื่อค่าพารามิเตอร์ไคร์ลิตีมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าลดลง สำหรับสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากภาพที่ 4.56 นั้นเมื่อค่าพารามิเตอร์ไคร์ลิตีมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้สัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ที่ใช้งาน แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงความถี่ที่มากกว่าความถี่ที่ใช้งาน

จะเห็นได้ว่าผลของไคร์ลิตีที่มีต่อพารามิเตอร์การกระเจิงนั้นทำให้บางช่วงความถี่จะมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่น้อยลง บางช่วงความถี่ทำให้มีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เพิ่มขึ้นจึงน่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านอุปกรณ์สื่อสารได้ เช่น ท่อนำคลื่น เรโซเนเตอร์ และฟิลเตอร์ เป็นต้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในงานวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอสมการทั่วไปของคลื่นในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์และคำนวณค่าเจาะจงจากสมการแมกซ์เวลล์ เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์และค่าตัวประกอบกำลังสำหรับเรโซเนเตอร์ที่บรรจุตัวกลางไปแอนไอโซทรอปิก นอกจากนี้ยังได้มีการคำนวณพารามิเตอร์การกระเจิงเพื่อใช้ดูกำลังงานที่สะท้อนและกำลังที่ส่งผ่าน ทำให้ทราบถึงช่วงความถี่ที่ควรใช้งาน

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาโปรแกรมในการจำลองผลของการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์, ค่าตัวประกอบกำลัง และพารามิเตอร์การกระเจิงของอุปกรณ์เรโซเนเตอร์โดยมีโหนดเป็นวัสดุไปแอนไอโซทรอปิก เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าผลการจำลองในงานวิทยานิพนธ์นี้ถูกต้อง ผู้วิจัยได้แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองมีดังนี้

ในขั้นตอนแรกจะทำการเปรียบเทียบผลของความถี่เรโซแนนซ์สำหรับวัสดุที่เป็นไดอิเล็กทริกกับงานวิจัย [9] ซึ่งเป็นการหาผลเฉลยแม่นยำตรง โดยทำการเปรียบเทียบกันในกรณีที่เราโซเนเตอร์เป็นรูปทรงต่างๆ เช่น รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงกลม รูปทรงกระบอก เป็นต้น ผลปรากฏว่าผลที่ได้จากงานวิทยานิพนธ์มีความสอดคล้องกับงานวิจัย [9] เป็นการยืนยันได้ว่าโปรแกรมในงานวิทยานิพนธ์นี้มีความถูกต้องในการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์ในกรณีตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กทริกแบบเอกพันธ์หรือแบบไม่เอกพันธ์ อีกทั้งยังสามารถคำนวณรูปทรงที่มีรูปร่างต่างๆ ได้หลายแบบ

ในขั้นที่สองจะทำการเปรียบเทียบผลของความถี่เรโซแนนซ์สำหรับวัสดุที่เป็นไครัลกับงานวิจัย [12] ซึ่งเป็นการหาผลเฉลยแม่นยำตรง โดยทำการเปรียบเทียบกันในกรณีที่เรโซเนเตอร์มีรูปร่างทรงกลมและถูกเติมด้วยวัสดุไครัลทั้งหมด ผลปรากฏว่าผลที่ได้จากงานวิทยานิพนธ์มีความสอดคล้องกับงานวิจัย [12] เป็นการยืนยันได้ว่าโปรแกรมในงานวิทยานิพนธ์นี้มีความถูกต้องในการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์ในกรณีตัวกลางที่เป็นไครัล ผลของไครัลลิตีที่มีต่อความถี่เรโซแนนซ์คือจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์มีค่าลดลง โดยเมื่อทำการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ไครัลลิตีมากขึ้น ก็จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ลดลงมากขึ้นตามไปด้วย แสดงว่าหากนำวัสดุไครัลไปใช้ในการสร้างทำเป็น

เรโซเนเตอร์จะสามารถออกแบบให้เรโซเนเตอร์มีขนาดเล็กลงได้ เนื่องจากผลของความถี่เรโซแนนซ์ที่มีค่าลดลง

ในขั้นที่สามจะทำการเปรียบเทียบผลของค่าตัวประกอบคุณภาพสำหรับวัสดุที่เป็นไดอิเล็กตริกกับโปรแกรมจำลองสามมิติ CST ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้การคำนวณเชิงเลขในการคำนวณโดยทำการเปรียบเทียบกันในกรณีที่เราโซเนเตอร์มีรูปร่างทรงสี่เหลี่ยม ผลปรากฏว่าผลที่ได้จากงานวิทยานิพนธ์มีความสอดคล้องกับโปรแกรมจำลองสามมิติ CST เป็นการยืนยันได้ว่าโปรแกรมในงานวิทยานิพนธ์นี้มีความถูกต้องในการคำนวณค่าตัวประกอบคุณภาพในกรณีตัวกลางที่ไดอิเล็กตริก

ในขั้นที่สี่จะทำการเปรียบเทียบผลของค่าตัวประกอบคุณภาพสำหรับวัสดุที่เป็นโครัล ด้วยวิธีการสองวิธี วิธีแรกเป็นการคำนวณหาค่าตัวประกอบคุณภาพจากทฤษฎีพอยน์ติง กล่าวคือ การคำนวณด้วยวิธีนี้จะทำการคำนวณจากพลังงานสะสมทั้งในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก รวมทั้งกำลังงานที่สูญเสียที่มาจากตัวกลางไดอิเล็กตริกและตัวกลางแม่เหล็ก สำหรับวิธีที่สองจะเป็นการคำนวณหาค่าตัวประกอบคุณภาพจากความถี่เรโซแนนซ์ กล่าวคือ ในกรณีที่ตัวกลางมีการสูญเสียเกิดขึ้นจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เป็นจำนวนเชิงซ้อน และสามารถหาค่าตัวประกอบคุณภาพได้โดยตรง ผลปรากฏว่าผลที่ได้จากทั้งสองวิธีนี้มีความสอดคล้องกัน เป็นการยืนยันได้ว่าโปรแกรมในงานวิทยานิพนธ์นี้มีความถูกต้องในการคำนวณค่าตัวประกอบคุณภาพในกรณีตัวกลางที่โครัล โดยผลของตัวกลางโครัลที่มีต่อเรโซเนเตอร์คือ เมื่อทำการเพิ่มค่าของพารามิเตอร์โครัลที่ดีจะสามารถทำให้ค่าตัวประกอบคุณภาพมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าพารามิเตอร์โครัลที่ดี แสดงว่าหากนำวัสดุโครัลไปใช้ในการสร้างเป็นเรโซเนเตอร์จะสามารถเพิ่มค่าตัวประกอบคุณภาพของเรโซเนเตอร์ทำให้เรโซเนเตอร์มีสมรรถนะภาพที่ดีขึ้น เนื่องจากผลของค่าตัวประกอบคุณภาพที่เพิ่มขึ้น

ในขั้นที่ห้าจะทำการเปรียบเทียบผลของพารามิเตอร์การกระเจิงสำหรับวัสดุไดอิเล็กตริกกับโปรแกรมจำลองสามมิติ CST โดยทำการเปรียบเทียบในกรณีที่เรโซเนเตอร์มีโหนดเป็นไดอิเล็กตริกทรงสี่เหลี่ยม และเรโซเนเตอร์มีพอร์ตจำนวนสองพอร์ต ผลปรากฏว่าผลที่ได้จากงานวิทยานิพนธ์นี้มีความสอดคล้องกับโปรแกรมจำลองสามมิติ CST เป็นการยืนยันได้ว่าโปรแกรมในงานวิทยานิพนธ์นี้มีความถูกต้องในการคำนวณพารามิเตอร์การกระเจิงในกรณีตัวกลางไดอิเล็กตริกซึ่งวางอยู่ในท่อนำคลื่นสองพอร์ต

ในขั้นที่หกจะทำการเปรียบเทียบผลของพารามิเตอร์การกระเจิงสำหรับวัสดุโครัลกับงานวิจัย [7] ซึ่งใช้วิธีเชิงเลขในการคำนวณเช่นเดียวกัน นั่นคือวิธี(FDTD: Finite Difference Time Domain) โดยทำการเปรียบเทียบในกรณีที่เราใช้เรโซเนเตอร์มีโหนดเป็นโครัลรูปทรงสี่เหลี่ยม และวางอยู่ในท่อนำคลื่นสองพอร์ต ผลปรากฏว่าผลที่ได้จากงานวิทยานิพนธ์นี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัย [7] เป็นการยืนยันได้ว่าโปรแกรมในงานวิทยานิพนธ์นี้มีความถูกต้องในการคำนวณพารามิเตอร์การกระเจิงในกรณีตัวกลางโครัลซึ่งวางอยู่ในท่อนำคลื่นสองพอร์ต นอกจากนี้ยังได้มีการพล็อตค่าพารามิเตอร์การกระเจิงทำให้สามารถรู้แนวโน้มผลของพารามิเตอร์โครัลได้ดี เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ท่อนำคลื่น เรโซเนเตอร์ และฟิลเตอร์ เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. งานวิทยานิพนธ์นี้สามารถวิเคราะห์ได้เพียงพอร์ตที่มีรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมเท่านั้น และมีจำนวนจำกัดเพียงสองพอร์ต งานวิจัยในอนาคตจึงสามารถขยายไปยังพอร์ตที่มีรูปร่างใดๆ และสามารถวิเคราะห์กับจำนวนพอร์ตที่มากกว่าสองพอร์ตขึ้นไปได้
2. ได้มีงานวิจัย [17] ได้ทำการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์การกระเจิงสำหรับตัวกลางโครัลในท่อนำคลื่นที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม จึงเหมาะที่จะใช้เป็นแนวทางในการวัดและทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลต่อไป
3. การคำนวณหาค่าเจาะจงในงานวิจัยนี้ได้ใช้คำสั่งที่มีอยู่ในโปรแกรมแมทแลบจึงไม่สามารถที่จะควบคุมเวลาได้ อีกทั้งจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้เพราะถ้าหากขนาดของเมตริกซ์มีขนาดมากกว่า 4000×4000 จะทำให้การคำนวณจะเกิดความล่าช้าเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นที่จะต้องใช้วิธีการที่ดีกว่านี้ในการคำนวณหาค่าเจาะจง เช่น วิธีการเชิงเลข (numerical technique) เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- [1] Pozar, D.M. Microwave Engineering. 3rd, New Jersey: Wiley, 2005.
- [2] Tretyakov, S. A., and Sochava, A. A. Reflection and Transmission of plane Electromagnetic waves in Uniaxial Bianisotropic Materials. International Journal of Infrared and Millimeter Waves 15 (1994): 829-856.
- [3] Krowne, C. M. Electromagnetic Properties of Nonreciprocal Composite Chiral-Ferrite Media. IEEE Trans. Antennas Propagat. 41 (September 1993): 1289-1295.
- [4] Barba, I., Cristina, A., Cabeceira, C., Gomez, A., and Represa, J. Chiral Media Based on Printed-Circuit Board Technology: A Numerical Time-Domain Approach. IEEE Trans. on Magn. 45 (Mar 2009): 1170-1173.
- [5] Worasawate, D., Mautz, J.R., and Arvas, E. Electromagnetic Resonances and Q Factors of a Chiral Sphere. IEEE Trans. Antennas Propagat. 52 (January 2004): 213-219
- [6] Worasawate, D., and Shahzad, M.A. Electromagnetic Resonances and Field distributions of a Chiral filled Spherical perfectly conducting Cavity. Progress in Electro. Research 82 (2008): 77-94.
- [7] Cao, D. -A., and Chu, Q. -X. FDTD Analysis of Chiral Discontinuities in Waveguide. Progress In Electromagnetic Research Letters 20 (2011): 19-26.
- [8] Gomez, A., Vegas, A., and Solano, M. A. On two different formulations of the Coupled Mode Method: Application to 3D rectangular chirowaveguides. Int. J. Electron. Commun. (October 2005)
- [9] Reddy, C. J., Deshpande M. D., Cockrell, C. R., and Beck, F. B. Finite element method for eigenvalue problems in electromagnetic. NASA Technical Paper 3485 (December 1994): 1-27.
- [10] Chen, R. S., Yung, E.K.N., Xie, Z. M., and Han, Y. F. Three dimensional edge FEM analysis of inhomogeneous chiral medium loaded waveguide discontinuity. IEEE Anten. and Propag. Soc. Inter. Sym.1 (August 1999): 310-313.

- [11] Rubio, J., Arroyo, J., and Zapata, J. Analysis of Passive Microwave Circuits by Using a Hybrid 2-D and 3-D Finite-Element Mode-Matching Method. IEEE Trans. on Microw. Theory & Tech. 47 (September 1999): 1-4.
- [12] Mukhartova, Yu. V. A resonator with a chiral filling. Vestnik Moskovskogo Universiteta. Fizika. 6 (2009): 25-28.
- [13] Kong, J. A. Electromagnetic Wave Theory. John Wiley & Sons, 1986.
- [14] Maruyama, S., and Koshiya, M. A vector Finite Element Formulation for General Bi-Anisotropic Waveguides. IEEE Trans. on Magn. 33 (Mar 1997): 1528-1531.
- [15] Jaggard, D. J., Mickelson, A. R., and Paps, C. H. On electromagnetic waves in chiral media. Appl. Phys. 18 (1979): 211-216.
- [16] Sassan Bassiri. Electromagnetic Wave Propagation and Radiation in Chiral Media. Doctoral dissertation, California Institute of Technology, California, 1987.
- [17] Gomez, A., et al. Full-Wave Hybrid Technique for 3-D Isotropic-Chiral-Material Discontinuities in Rectangular Waveguides: Theory and Experiment. IEEE Trans. on Microw. Theory & Tech. 56 (December 2008)
- [18] Barba, I., Cristina, A., Cabeceira, C., Gomez, A., and Represa, J. Chiral Media Based on Printed-Circuit Board Technology: A Numerical Time-Domain Approach. IEEE Trans. on MAG. 45 (Mar 2009): 1170-1173.
- [19] Hussain, A., Faryad, M., and Naqvi, Q. A. Fractional curl operator and fractional chiro-waveguide. J. Electromagn. Waves Appl. 21 (2007): 1119-1129.
- [20] Panin, S. B., Smith, P. D., and Poyedinchuk, A. Y. Elliptical to linear polarization transformation by a grating on a chiral medium. J. Electromagn. Waves Appl. 21 (2007): 1885-1899.
- [21] Nair, A., and Choudhury, P. K. On the analysis of field patterns in chirofibers. J. Electromagn. Waves Appl. 21 (2007): 2277-2286.
- [22] Engheta, N., and Kowarz, M. W. Antenna radiation in the presence of a chiral sphere. J. Appl. Phys. 67 (1990): 639-647.

- [23] Li, L. W., Leong, M. S., Jiao, P. N., and Zhang, W. X. Analysis of a passive circular loop antenna radiating in the presence of a layered chiral sphere using method of moments. J. Electromagn. Waves Appl. 16 (2002): 1593-1611.
- [24] Pelet, P., and Engheta, N. The theory of chirowaveguides. IEEE Trans. Antennas Propagat. 38 (January 1990): 90-98.
- [25] Tretyakov, S. A., and Sochava, A. A. Proposed composite material for nonreflecting shields and antenna radomes. Electronic Letters 29 (June 1993): 1048-1049.
- [26] Li, Z., Alici, K. B., Colak, E., and Ozbay, E. Complementary chiral metamaterials with giant optical activity and negative refractive index. Appl. Phys. Lett. 98 (2011): 1-3.
- [27] Chatterjee, A., Jin, J. M., and Volakis, J. L. Computation of Cavity Resonances Using Edge-Based Finite Elements. IEEE Trans. on Microw. Theory & Tech. 40 (November 1992): 2106-2108.
- [28] Hui, H. T., and Yung, E. K. N. The Quality factor of a Spherical Cavity filled with a Chiral Medium. J. Electromagn. Waves Appl. 15 (2001): 41-52.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายยุรนันท์ ลิมนันทวุฒิ เกิดเมื่อวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2531 ที่จังหวัดราชบุรี สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับที่ 2 จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิชาไฟฟ้าสื่อสาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552 มีผลงาน ตีพิมพ์ในระดับนานาชาติเรื่อง “Finite Element Analysis of Eigenmodes in a Resonator Loaded with Chiral Metamaterials” ในงานประชุม The Asia-Pacific Microwave Conference 2011 กรุงเมลเบิร์น ประเทศออสเตรเลีย ได้รับทุนการศึกษา NTC (National Telecommunications Commission) ระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโทที่ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และมีประสบการณ์การทำงาน เป็นผู้ช่วยสอนระดับปริญญาบัณฑิตระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท