

การวิเคราะห์โพลาริเซชันในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตัลรูอากาศรูปวงรี
โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพagation



นาย จิรวัดน์ ตั้งวันเจริญ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

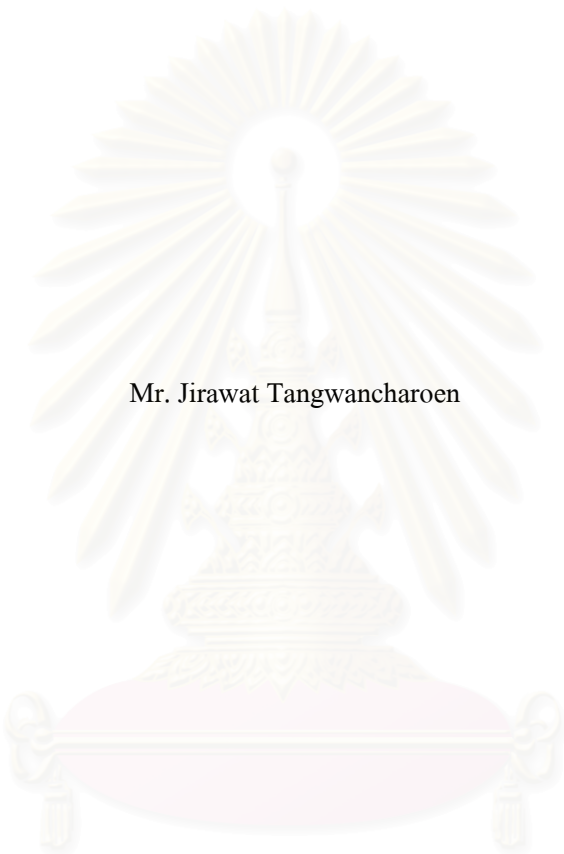
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1562-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF POLARIZATION IN AN ELLIPTICAL SHAPED AIR-HOLES PHOTONIC
CRYSTAL FIBER BY THE FINITE ELEMENT BEAM PROPAGATION METHOD



Mr. Jirawat Tangwancharoen

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-53-1562-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์โพลาริเซชันในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศ
รูปวงรีโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพากชัน
โดย นาย จิรวัดน์ ตั้งวันเจริญ
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์)

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

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ อัครเอกตลิต)

จิววัฒน์ ตั้งวันเจริญ : การวิเคราะห์โพลาไรเซชันในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรู
 อากาศรูปวงรีโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพาเกชัน. (ANALYSIS OF
 POLARIZATION IN AN ELLIPTICAL SHAPED AIR-HOLES PHOTONIC
 CRYSTAL FIBER BY THE FINITE ELEMENT BEAM PROPAGATION METHOD)
 อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ทับทิม อ่างแก้ว, 148 หน้า. ISBN 974-53-1562-1.

วิทยานิพนธ์มีจุดประสงค์นำเสนอ การวิเคราะห์โพลาไรเซชันในเส้นใยนำแสงโฟโตนิก
 คริสตอลรูอากาศรูปวงรีโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพาเกชันแบบเวกเตอร์ ใน
 วิทยานิพนธ์นี้ได้หาความสัมพันธ์ของการจัดเรียงรูอากาศรูปวงรี, ความยาวแกนเอก, ความยาวแกน
 โทและระยะห่างระหว่างรูอากาศรูปวงรีทั้งสองที่มีผลต่อโพลาไรเซชันโดยใช้ค่าไบรีฟรินเจนซ์เป็น
 ตัวชี้วัดการเปลี่ยนแปลง

การจัดเรียงรูอากาศรูปวงรีในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลที่มีแกนเอกขนานกับแกน y
 จะทำให้ค่าดรรชนีประสิทธิผลแนวแกน y มากกว่าค่าดรรชนีประสิทธิผลแนวแกน x ทำให้สามารถ
 ควบคุมโพลาไรเซชันของแสงได้

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์.....
 ปีการศึกษา.....2547.....

4470250521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: PHOTONIC CRYSTAL FIBER / FINITE ELEMENT BEAM PROPAGATION /
POLARIZATION

JIRAWAT TANGWANCHAROEN : ANALYSIS OF POLARIZATION IN AN
ELLIPTICAL SHAPED AIR-HOLES PHOTONIC CRYSTAL FIBER BY THE FINITE
ELEMENT BEAM PROPAGATION METHOD. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.
TUPTIM ANGKAEW Ph.D., 148 pp. ISBN 974-53-1562-1.

This thesis proposed an analysis of polarization in an elliptical shaped air holes photonic crystal fiber by the vectorial (FE-BPM). The FE-BPM has been employed to find the relation of arrays of an elliptical shape air holes, the length of major axis, the length of minor axis and distance of between two air holes which effect the polarization via birefrinence parameters.

Arrays of an elliptical shape air holes in photonic crystal fiber which have major axis paralleled to x-axis, give higher effective index in y-axis than x-axis. In addition polarization can be controlled by using the ratio of major axis to minor axis of elliptical air holes.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering Student's signature

Field of study Electrical Engineering Advisor's signature

Academic year 2004

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบคุณ นายสุรพัชร เจริญยิ่ง, นายณัฐวุฒิ พุทธประสิทธิ์, นายสุวิชาญ กาวาสาร, นายวรพงศ์ เพชรโพธิ์ทอง, นายปิยพงศ์ นิพัทธ์สานต์ ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำ, คำปรึกษาในงานวิทยานิพนธ์นี้และให้กำลังใจตลอดมา

นอกจากนั้นขอขอบคุณสมาชิกในห้องปฏิบัติการวิจัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อนๆ และน้องๆ ที่ยังศึกษาอยู่ทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณปู่, ย่า, พ่อ, แม่, ป้า, น้องชายและน้องสาวของผู้วิจัยที่ได้สนับสนุนด้านการเรียน ที่อยู่อาศัยและเป็นกำลังใจตลอดเวลาที่ได้ศึกษาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.5 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	5
บทที่ 2 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพagation.....	6
2.1 ความนำ.....	6
2.2 หลักการวิธีบีมพรอพagation.....	6
2.3 สมการบีมพรอพagation.....	8
2.3.1 สมการคลื่นในท่อนำคลื่นแสงทั่วไป.....	8
2.3.2 สมการบีมพรอพagation.....	11
2.4 การทดสอบความถูกต้องของวิธีการ.....	19
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนวงของ PCF กับสนามไฟฟ้า.....	26
2.5.1 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงกลม (PCF) 1 วง.....	26
2.5.2 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงกลม (PCF) 2 วง.....	35
2.5.3 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงกลม (PCF) 3 วง.....	44
2.5.4 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรี (EPCF) 1 วง.....	54
2.5.5 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรี (EPCF) 2 วง.....	63
2.5.6 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรี (EPCF) 3 วง.....	72

บทที่ 3 การวิเคราะห์โพลาริเซชันในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลโดยระเบียบวิธีไฟไนต์	
อีลีเมนต์บีมพรอดาเกชัน.....	82
3.1 ความนำ.....	82
3.2 หลักการวิเคราะห์โพลาริเซชัน.....	82
3.3 การคำนวณโพลาริเซชันเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศ	
รูปวงกลมและวงรี.....	83
3.4 การคำนวณโพลาริเซชันเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศ	
รูปวงกลมและวงรี.....	85
3.5 ตัวอย่างการควบคุมโพลาริเซชันในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอล	
รูอากาศรูปวงรี.....	111
3.6 ตัวอย่างการควบคุมโพลาริเซชันในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอล	
รูอากาศรูปวงรี.....	114
3.6.1 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงกลม (PCF) แกนวงกลม.....	114
3.6.2 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงกลม (PCF) แกนวงรี.....	119
3.6.3 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรี (EPCF) แกนวงกลม.....	124
3.6.4 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรี (EPCF) แกนวงรี.....	129
3.6.5 เปรียบเทียบกรณีประสิทธิภาพของ PCF และ EPCF แกนวงกลม.....	134
บทที่ 4 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	137
รายการอ้างอิง.....	139
ภาคผนวก.....	141
ภาคผนวก ก การพิสูจน์สมการคลื่นแสงในเส้นใยโฟโตนิกคริสตอล.....	142
ภาคผนวก ข ฟังก์ชันรูปร่างของอีลีเมนต์ขอบคองที่.....	144
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	148

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของ PML.....	9
ตารางที่ 3.1 ผลการแบ่งอิลีเมนต์รูอากาศที่มีพื้นที่ $A=0.1$	83
ตารางที่ 3.2 ผลการแบ่งอิลีเมนต์รูอากาศที่มีพื้นที่ $A=0.2$	89
ตารางที่ 3.3 ผลการแบ่งอิลีเมนต์รูอากาศที่มีพื้นที่ $A=0.3$	94
ตารางที่ 3.4 ผลการแบ่งอิลีเมนต์รูอากาศที่มีพื้นที่ $A=0.4$	99



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลของ Knight, Birks, Russell and Atkin (1996).....	1
รูปที่ 1.2 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลของ Bennett, Monro and Richardson (1999).....	2
รูปที่ 1.3 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลของ Birk, Moglievtsev, Knight and Russell (1999).....	2
รูปที่ 1.4 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลของนักวิจัย Kubota, Suzuki, Kawanishi, Nakazawa, Tanaka and Fujita (1999).....	3
รูปที่ 1.5 การผลิตเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอล.....	4
รูปที่ 2.1 การแบ่งระนาบหน้าตัดของเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูปร่างวงรี ออกเป็นจำนวน m ระนาบ.....	7
รูปที่ 2.2 การคำนวณด้วยวิธี BPM.....	8
รูปที่ 2.3 การแบ่งบริเวณของ PML.....	8
รูปที่ 2.4 ภาคตัดขวางในระนาบ xy ของเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน.....	19
รูปที่ 2.5 การแบ่งอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน.....	20
รูปที่ 2.6 สนามไฟฟ้าอินพุตในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน.....	21
รูปที่ 2.7 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน.....	21
รูปที่ 2.8 สนามไฟฟ้าตามขวางในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน ระยะ 50 ไมโครเมตร.....	22
รูปที่ 2.9 ขนาดสนามไฟฟ้าแนวแกน z ในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน ระยะ 50 ไมโครเมตร.....	22
รูปที่ 2.10 สนามไฟฟ้าตามขวางในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานระยะ 500 ไมโครเมตร.....	23
รูปที่ 2.11 ขนาดสนามไฟฟ้าแนวแกน z ในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน ระยะ 500 ไมโครเมตร.....	23
รูปที่ 2.12 สนามไฟฟ้าตามขวางในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานระยะ 1000 ไมโครเมตร.....	24
รูปที่ 2.13 ขนาดสนามไฟฟ้าแนวแกน z ในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน ระยะ 1000 ไมโครเมตร.....	24
รูปที่ 2.14 ขนาดสนามไฟฟ้าแนวแกน z ในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน ที่ระยะทางต่างๆ.....	25
รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบกรณีประสิทธิภาพของ Exact solution กับวิธี FEM-BPM.....	25
รูปที่ 2.16 ภาคตัดขวางในระนาบ xy ของ PCF 1 วง.....	26
รูปที่ 2.17 การแบ่งอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมใน PCF 1 วง.....	27
รูปที่ 2.18 สนามไฟฟ้าอินพุตใน PCF 1 วง.....	27

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.19 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ใน PCF 1 วง.....	28
รูปที่ 2.20 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 1 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร.....	29
รูปที่ 2.21 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 1 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร.....	29
รูปที่ 2.22 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 1 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร.....	30
รูปที่ 2.23 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 1 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร.....	30
รูปที่ 2.24 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 1 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร.....	31
รูปที่ 2.25 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 1 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร.....	31
รูปที่ 2.26 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 1 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร.....	32
รูปที่ 2.27 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 1 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร.....	32
รูปที่ 2.28 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 1 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร.....	33
รูปที่ 2.29 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 1 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร.....	33
รูปที่ 2.30 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 1 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร.....	34
รูปที่ 2.31 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 1 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร.....	34
รูปที่ 2.32 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 1 วงที่ระยะทางต่างๆ.....	35
รูปที่ 2.33 ภาคตัดขวางในระนาบ xy ของ PCF 2 วง.....	36
รูปที่ 2.34 การแบ่งอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมใน PCF 2 วง.....	36
รูปที่ 2.35 สนามไฟฟ้าอินพุตใน PCF 2 วง.....	37
รูปที่ 2.36 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ใน PCF 2 วง.....	37
รูปที่ 2.37 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 2 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร.....	38
รูปที่ 2.38 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ใน PCF 2 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร.....	38
รูปที่ 2.39 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 2 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร.....	39
รูปที่ 2.40 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ใน PCF 2 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร.....	39
รูปที่ 2.41 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 2 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร.....	40
รูปที่ 2.42 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ใน PCF 2 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร.....	40
รูปที่ 2.43 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 2 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร.....	41
รูปที่ 2.44 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ใน PCF 2 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร.....	41
รูปที่ 2.45 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 2 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร.....	42
รูปที่ 2.46 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ใน PCF 2 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร.....	42
รูปที่ 2.47 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 2 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร.....	43
รูปที่ 2.48 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ใน PCF 2 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร.....	43

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.49 ขนาดสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 2 วงที่ระยะทางต่างๆ.....	44
รูปที่ 2.50 ภาคตัดขวางในระนาบ xy ของ PCF 3 วง.....	45
รูปที่ 2.51 การแบ่งอิลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมใน PCF 3 วง.....	45
รูปที่ 2.52 สนามไฟฟ้าอินพุตใน PCF 3 วง.....	46
รูปที่ 2.53 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตในแกน z ใน PCF 3 วง.....	46
รูปที่ 2.54 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 3 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร.....	47
รูปที่ 2.55 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตในแกน z ใน PCF 3 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร.....	47
รูปที่ 2.56 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 3 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร.....	48
รูปที่ 2.57 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตในแกน z ใน PCF 3 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร.....	48
รูปที่ 2.58 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 3 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร.....	49
รูปที่ 2.59 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตในแกน z ใน PCF 3 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร.....	49
รูปที่ 2.60 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 3 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร.....	50
รูปที่ 2.61 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตในแกน z ใน PCF 3 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร.....	50
รูปที่ 2.62 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 3 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร.....	51
รูปที่ 2.63 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตในแกน z ใน PCF 3 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร.....	51
รูปที่ 2.64 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 3 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร.....	52
รูปที่ 2.65 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตในแกน z ใน PCF 3 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร.....	52
รูปที่ 2.66 ขนาดสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 2 วงที่ระยะทางต่างๆ.....	53
รูปที่ 2.67 เปรียบขนาดสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 1, 2 และ 3 วงที่ระยะทางต่างๆ.....	53
รูปที่ 2.68 ภาคตัดขวางในระนาบ xy ของ EPCF 1 วง.....	54
รูปที่ 2.69 การแบ่งอิลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมใน EPCF 1 วง.....	55
รูปที่ 2.70 สนามไฟฟ้าอินพุตใน EPCF 1 วง.....	55
รูปที่ 2.71 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตใน EPCF 1 วง.....	56
รูปที่ 2.72 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 1 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร.....	56
รูปที่ 2.73 ขนาดของสนามไฟฟ้าใน EPCF 1 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร.....	57
รูปที่ 2.74 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 1 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร.....	57
รูปที่ 2.75 ขนาดของสนามไฟฟ้าใน EPCF 1 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร.....	58
รูปที่ 2.76 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 1 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร.....	58
รูปที่ 2.77 ขนาดของสนามไฟฟ้าใน EPCF 1 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร.....	59
รูปที่ 2.78 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 1 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร.....	59

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.79 ขนาดของสนามไฟฟ้าใน EPCF 1 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร.....	60
รูปที่ 2.80 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 1 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร.....	60
รูปที่ 2.81 ขนาดของสนามไฟฟ้าใน EPCF 1 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร.....	61
รูปที่ 2.82 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 1 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร.....	61
รูปที่ 2.83 ขนาดของสนามไฟฟ้าใน EPCF 1 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร.....	62
รูปที่ 2.84 ขนาดสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 1 วงที่ระยะทางต่างๆ.....	62
รูปที่ 2.85 ภาควัดขวางในระนาบ xy ของ EPCF 2 วง.....	63
รูปที่ 2.86 การแบ่งอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมใน EPCF 2 วง.....	64
รูปที่ 2.87 สนามไฟฟ้าอินพุตใน EPCF 2 วง.....	64
รูปที่ 2.88 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตใน EPCF 2 วง.....	65
รูปที่ 2.89 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 2 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร.....	65
รูปที่ 2.90 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 2 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร.....	66
รูปที่ 2.91 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 2 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร.....	66
รูปที่ 2.92 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 2 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร.....	67
รูปที่ 2.93 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 2 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร.....	67
รูปที่ 2.94 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 2 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร.....	68
รูปที่ 2.95 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 2 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร.....	68
รูปที่ 2.96 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 2 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร.....	69
รูปที่ 2.97 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 2 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร.....	69
รูปที่ 2.98 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 2 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร.....	70
รูปที่ 2.99 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 2 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร.....	70
รูปที่ 2.100 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 2 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร.....	71
รูปที่ 2.101 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 2 วงที่ระยะทางต่างๆ.....	71
รูปที่ 2.102 ภาควัดขวางในระนาบ xy ของ EPCF 3 วง.....	72
รูปที่ 2.103 การแบ่งอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมใน EPCF 3 วง.....	73
รูปที่ 2.104 สนามไฟฟ้าอินพุตใน EPCF 3 วง.....	73
รูปที่ 2.105 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ใน EPCF 3 วง.....	74
รูปที่ 2.106 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 3 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร.....	74
รูปที่ 2.107 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 3 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร.....	75
รูปที่ 2.108 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 3 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร.....	75

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.109 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 3 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร	76
รูปที่ 2.110 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 3 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร	76
รูปที่ 2.111 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 3 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร	77
รูปที่ 2.112 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 3 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร	77
รูปที่ 2.113 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 3 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร	78
รูปที่ 2.114 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 3 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร	78
รูปที่ 2.115 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 3 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร	79
รูปที่ 2.116 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 3 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร	79
รูปที่ 2.117 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 3 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร	80
รูปที่ 2.118 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 3 วงที่ระยะทางต่างๆ	80
รูปที่ 2.119 เปรียบเทียบขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 1,2 และ 3 วง ที่ระยะทางต่างๆ	81
รูปที่ 3.1 ประเภทของโพลาริเซชัน	82
รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบกรณีประสิทธิภาพของงานวิจัย Steel and Osgood กับวิทยานิพนธ์	83
รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบไบรีฟรินเจนซ์ของงานวิจัย Steel and Osgood กับวิทยานิพนธ์	84
รูปที่ 3.4 โมด HE_{11}^y ของ PCF ที่มี $A=0.1$ และ $\eta = 1$	86
รูปที่ 3.5 โมด HE_{11}^x ของ PCF ที่มี $A=0.1$ และ $\eta = 1$	86
รูปที่ 3.6 โมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.1$ และ $\eta = 2$	87
รูปที่ 3.7 โมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.1$ และ $\eta = 2$	87
รูปที่ 3.8 โมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.1$ และ $\eta = 3$	88
รูปที่ 3.9 โมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.1$ และ $\eta = 3$	88
รูปที่ 3.10 โมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.1$ และ $\eta = 4$	89
รูปที่ 3.11 โมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.1$ และ $\eta = 4$	89
รูปที่ 3.12 ค่ากรณีประสิทธิภาพของ EPCF ที่พื้นที่ของรูอากาศ $A=0.1$	90
รูปที่ 3.13 โมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.2$ และ $\eta = 1$	91
รูปที่ 3.14 โมด HE_{11}^x ของ PCF ที่มี $A=0.2$ และ $\eta = 1$	92
รูปที่ 3.15 โมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.2$ และ $\eta = 2$	92
รูปที่ 3.16 โมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.2$ และ $\eta = 2$	93
รูปที่ 3.17 โมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.2$ และ $\eta = 3$	93
รูปที่ 3.18 โมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.2$ และ $\eta = 3$	94

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.19 โมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.2$ และ $\eta = 4$	94
รูปที่ 3.20 โมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.2$ และ $\eta = 4$	95
รูปที่ 3.21 ค่าธรรมเนียมประสิทธิผลของ EPCF ที่พื้นที่ของรูอากาศ $A=0.2$	95
รูปที่ 3.22. โมด HE_{11}^y ของ PCF ที่มี $A=0.3$ และ $\eta = 1$	96
รูปที่ 3.23 โมด HE_{11}^x ของ PCF ที่มี $A=0.3$ และ $\eta = 1$	97
รูปที่ 3.24 โมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.3$ และ $\eta = 2$	97
รูปที่ 3.25 โมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.3$ และ $\eta = 2$	98
รูปที่ 3.26 โมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.3$ และ $\eta = 3$	98
รูปที่ 3.27 โมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.3$ และ $\eta = 3$	99
รูปที่ 3.28 โมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.3$ และ $\eta = 4$	99
รูปที่ 3.29 โมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.3$ และ $\eta = 4$	100
รูปที่ 3.30 ค่าธรรมเนียมประสิทธิผลของ EPCF ที่พื้นที่ของรูอากาศ $A=0.3$	100
รูปที่ 3.31 โมด HE_{11}^y ของ PCF ที่มี $A=0.4$ และ $\eta = 1$	101
รูปที่ 3.32 โมด HE_{11}^x ของ PCF ที่มี $A=0.4$ และ $\eta = 1$	102
รูปที่ 3.33 โมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.4$ และ $\eta = 2$	102
รูปที่ 3.34 โมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.4$ และ $\eta = 2$	103
รูปที่ 3.35 โมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.4$ และ $\eta = 3$	103
รูปที่ 3.36 โมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.4$ และ $\eta = 3$	104
รูปที่ 3.37 โมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.4$ และ $\eta = 4$	104
รูปที่ 3.38 โมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.4$ และ $\eta = 4$	105
รูปที่ 3.39 ค่าธรรมเนียมประสิทธิผลของ EPCF ที่พื้นที่ของรูอากาศ $A=0.4$	105
รูปที่ 3.40 ค่าธรรมเนียมประสิทธิผลของ EPCF ที่พื้นที่ของรูอากาศ $A=0.1,0.2,0.3$ และ 0.4	106
รูปที่ 3.41 ค่าไบริฟรินเจนซ์ของ EPCF ที่พื้นที่ของรูอากาศ $A=0.1$	107
รูปที่ 3.42 ค่าไบริฟรินเจนซ์ของ EPCF ที่พื้นที่ของรูอากาศ $A=0.2$	107
รูปที่ 3.43 ค่าไบริฟรินเจนซ์ของ EPCF ที่พื้นที่ของรูอากาศ $A=0.3$	108
รูปที่ 3.44 ค่าไบริฟรินเจนซ์ของ EPCF ที่พื้นที่ของรูอากาศ $A=0.4$	108
รูปที่ 3.45 ค่าไบริฟรินเจนซ์ของ EPCF ที่มีค่า $\eta=2$	109
รูปที่ 3.46 ค่าไบริฟรินเจนซ์ของ EPCF ที่มีค่า $\eta=3$	110
รูปที่ 3.47 ค่าไบริฟรินเจนซ์ของ EPCF ที่มีค่า $\eta=4$	110
รูปที่ 3.48 ทิศของโพลาริเซชันทำมุม 30° กับแกน y	111

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.49 ทิศของโพลาริเซชันทำมุม 21.8° กับแกน y ที่ระยะทาง 10 ไมโครเมตร	111
รูปที่ 3.50 ทิศของโพลาริเซชันทำมุม 16° กับแกน y ที่ระยะทาง 30 ไมโครเมตร	112
รูปที่ 3.51 ทิศของโพลาริเซชันทำมุม 12.6° กับแกน y ที่ระยะทาง 50 ไมโครเมตร	112
รูปที่ 3.52 ทิศของโพลาริเซชันทำมุม 11.3° กับแกน y ที่ระยะทาง 80 ไมโครเมตร	113
รูปที่ 3.53 ทิศของโพลาริเซชันทำมุม 6.8° กับแกน y ที่ระยะทาง 100 ไมโครเมตร	113
รูปที่ 3.54 ทิศของโพลาริเซชันทำมุม 0° กับแกน y ที่ระยะทาง 120 ไมโครเมตร	114
รูปที่ 3.55 PCF แกนวงกลม	115
รูปที่ 3.56 สนามไฟฟ้าอินพุตใน PCF แกนวงกลม	115
รูปที่ 3.57 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงกลม ระยะ 10 ไมโครเมตร	116
รูปที่ 3.58 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงกลม ระยะ 50 ไมโครเมตร	116
รูปที่ 3.59 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงกลม ระยะ 100 ไมโครเมตร	117
รูปที่ 3.60 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงกลม ระยะ 250 ไมโครเมตร	117
รูปที่ 3.61 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงกลม ระยะ 500 ไมโครเมตร	118
รูปที่ 3.62 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงกลม ระยะ 1000 ไมโครเมตร	118
รูปที่ 3.63 PCF แกนวงรี	119
รูปที่ 3.64 สนามไฟฟ้าอินพุตใน PCF แกนวงรี	120
รูปที่ 3.65 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงรี ระยะ 10 ไมโครเมตร	120
รูปที่ 3.66 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงรี ระยะ 50 ไมโครเมตร	121
รูปที่ 3.67 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงรี ระยะ 100 ไมโครเมตร	121
รูปที่ 3.68 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงรี ระยะ 250 ไมโครเมตร	122
รูปที่ 3.69 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงรี ระยะ 500 ไมโครเมตร	122
รูปที่ 3.70 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงรี ระยะ 1000 ไมโครเมตร	123
รูปที่ 3.71 EPCF แกนวงกลม	124
รูปที่ 3.72 สนามไฟฟ้าอินพุตใน EPCF แกนวงกลม	125
รูปที่ 3.73 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แกนวงกลม ระยะ 10 ไมโครเมตร	125
รูปที่ 3.74 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แกนวงกลม ระยะ 50 ไมโครเมตร	126
รูปที่ 3.75 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แกนวงกลม ระยะ 100 ไมโครเมตร	126
รูปที่ 3.76 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แกนวงกลม ระยะ 250 ไมโครเมตร	127
รูปที่ 3.77 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แกนวงกลม ระยะ 500 ไมโครเมตร	127
รูปที่ 3.78 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แกนวงกลม ระยะ 1000 ไมโครเมตร	128

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.79 EPCF แคนวงรี.....	129
รูปที่ 3.80 สนามไฟฟ้าอินพุตใน EPCF แคนวงรี.....	130
รูปที่ 3.81 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แคนวงรี ระยะ 10 ไมโครเมตร.....	130
รูปที่ 3.82 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แคนวงรี ระยะ 50 ไมโครเมตร.....	131
รูปที่ 3.83 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แคนวงรี ระยะ 100 ไมโครเมตร.....	131
รูปที่ 3.84 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แคนวงรี ระยะ 250 ไมโครเมตร.....	132
รูปที่ 3.85 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แคนวงรี ระยะ 500 ไมโครเมตร.....	132
รูปที่ 3.86 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แคนวงรี ระยะ 1000 ไมโครเมตร.....	133
รูปที่ 3.87 เปรียบเทียบดรรชนีประสิทธิผลของ PCF แคนวงกลมและแคนวงรี.....	134
รูปที่ 3.88 เปรียบเทียบดรรชนีประสิทธิผลของ EPCF แคนวงกลมและแคนวงรี.....	135
รูปที่ 3.89 เปรียบเทียบไบรีฟรินเจนซ์ของ PCF, EPCF แคนวงกลมและแคนวงรี.....	135

คำอธิบายสัญลักษณ์

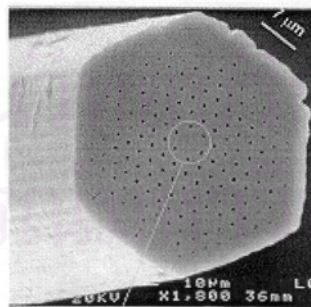
สัญลักษณ์	ความหมาย
PCF	เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงกลม
EPCF	เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรี
m	จำนวนระนาบที่มีการแบ่ง
n	ดัชนีหักเห
PML	เงื่อนไขขอบเขตแบบ Perfect Matched Layer
Δz	ระยะห่างระหว่างระนาบทั้งสองระนาบ
\vec{E}	เวกเตอร์ความเข้มสนามไฟฟ้า
\vec{H}	เวกเตอร์ความเข้มสนามแม่เหล็ก
\vec{B}	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
μ_r	ความซบซิมได้
μ_0	ความซบซิมได้ของอากาศว่าง
ϵ_r	สภาพยอมไฟฟ้า
ϵ_0	สภาพยอมไฟฟ้าของอากาศว่าง
k_0	เลขคลื่นของอากาศว่าง
ω	ความถี่เชิงมุม
[s]	เมทริกซ์ของพารามิเตอร์ของ PML
\vec{E}_t	เวกเตอร์ความเข้มสนามไฟฟ้าตามขวาง
E_z	เวกเตอร์ความเข้มสนามไฟฟ้าตามยาว
n_{eff}	ดัชนีหักเหของแสงประสิทธิผล
n_{eff}^x	ดัชนีหักเหของแสงประสิทธิผลแนวแกน x
n_{eff}^y	ดัชนีหักเหของแสงประสิทธิผลแนวแกน y
Δn_{eff}	ไบรีฟรินเจนซ์
λ	ความยาวคลื่นของแสง
β	ค่าคงที่ของการแพร่กระจาย
η	อัตราส่วนความยาวแกนเอกและความยาวแกนโทรูอากาศรูปวงรี

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

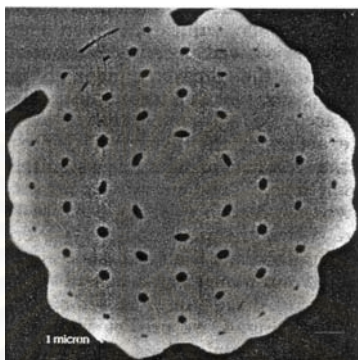
งานวิจัยริเริ่มจากการที่นักวิจัยหลายท่านที่ต้องการศึกษากลไกการนำแสงของเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอล (PCF) ซึ่งใช้ Bragg Reflection โดยมีการจัดเรียงรูอากาศรายคาบ (Periodic hole) สลับกับแก้วจะสามารถนำแสงได้หรือไม่ จึงได้มีการทดลองสร้างเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลขึ้นมาเพื่อทดลองหาคุณสมบัติต่างๆของเส้นใยนำแสงเช่น ดิสเพอร์ชันและความสูญเสียในเส้นใยนำแสง ดังนั้นได้มีการทดลองสร้างเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลของนักวิจัยกลุ่มแรก ในปี ค.ศ. 1996 โดย Knight, Birks, Russell และ Atkin เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลนี้มีแกนทำจากแท่งแก้วซิลิกาตันถูกล้อมรอบด้วยแท่งแก้วที่เจาะเป็นรูอากาศรูปวงกลมซึ่งจัดเรียงแบบรวงผึ้งตลอดทางยาวหลายวง โดยมีขนาดของแกนเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.6 ไมโครเมตร, ระยะพิทซ์ (ระยะห่างระหว่างรูอากาศที่ใกล้เคียงกัน) 2.3 ไมโครเมตร, ขนาดของรูอากาศ 0.2 ไมโครเมตรและความยาวของเส้นใยนำแสง 1 เมตร ดังรูปที่ 1.1 เมื่อกลุ่มนักวิจัยกลุ่มนี้ทดลองยิงแสงเลเซอร์ที่ต้นทางเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลแล้วนำกล้องไมโครสแกนอิเล็กตรอนไว้ที่ปลายทางของเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอล ปรากฏว่ามองเห็นแสงที่มีความเข้มของแสงหลายๆอยู่ที่บริเวณแกนกลางและความเข้มของแสงจะค่อยๆลดลงที่บริเวณระหว่างรูอากาศที่ใกล้เคียงกัน คุณสมบัติที่พบคือเกิดแบบแผนคลื่นเดี่ยว (single mode) ในช่วงความยาวคลื่นกว้างตั้งแต่ 337-1550 นาโนเมตร



รูปที่ 1.1 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลของ Knight, Birks, Russell and Atkin (1996)

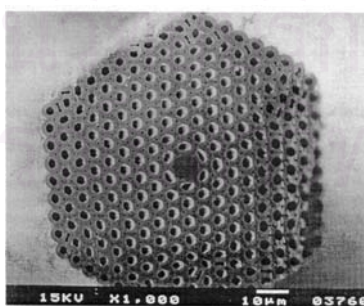
งานวิจัยของ Knight, Birks, Russell และ Atkin เป็นงานวิจัยที่ได้รับความสนใจอย่างมากในวงการของเส้นใยนำแสงจึงมีนักวิจัยอีกกลุ่มหนึ่งได้พัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตและการเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลกับเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน ในปี ค.ศ. 1999 โดย

Bennett, Monro และ Richardson ได้สร้างเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลที่มีความยาว 50 เมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 250 ไมโครเมตร, ขนาด 0.34 ไมโครเมตรและระยะพิชต์ 1.8 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 1.2 ได้ทดลองวัดการสูญเสียในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลได้ 0.24 dB/m หรือ 240 dB/km (เส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน 0.2 dB/km) และวัดดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตรได้ $50 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$



รูปที่ 1.2 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลของ Bennett, Monro and Richardson (1999)

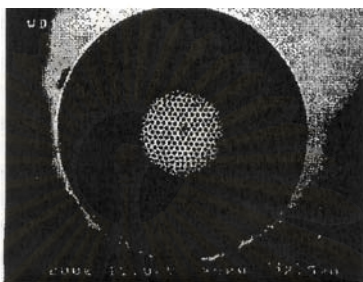
ในปีเดียวกันนั้นได้มีงานวิจัยของกลุ่มนักวิจัย Birk, Moglievtsev, Knight และ Russell ได้สร้างเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลที่มีดิสเพอร์ชันต่ำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกน 0.98 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 1.3 ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ Knight, Birks, Russell และ Atkin (1999) โดยสร้างเส้นใยนำแสงที่มีดิสเพอร์ชันสูงกว่าเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน เมื่อทำการทดลองวัดดิสเพอร์ชันแล้วได้ $-2,000 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน 100 เท่าซึ่งเป็นข้อดีของเส้นใยนำแสงประเภทนี้ที่สามารถใช้ชดเชยดิสเพอร์ชันได้ถึง $\pm 0.2\%$ และสามารถชดเชยดิสเพอร์ชันได้ถึง 35 เท่าของเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานที่อยู่ในช่วงความยาวของเส้นใยนำแสง 100 นาโนเมตร



รูปที่ 1.3 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลของ Birk, Moglievtsev, Knight and Russell (1999)

ในปี ค.ศ. 1999 ผลการทดลองเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลพบว่ามี การสูญเสียมากในเส้นใยนำแสงดังนั้นในปี ค.ศ. 2001 จึงมีกลุ่มนักวิจัย Kubota, Suzuki, Kawanishi,

Nakazawa, Tanaka และ Fujita สร้างเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลให้มีคุณสมบัติของการสูญเสียในเส้นใยนำแสงให้ลดลง เส้นใยนำแสงที่สร้างขึ้นมีความยาว 2 กิโลเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกน 3.1 ไมโครเมตร, ขนาดของรูอากาศ 1.51 ไมโครเมตร และระยะพิตซ์ 2.26 ไมโครเมตรดังรูปที่ 1.4 วัดการสูญเสียในเส้นใยนำแสงได้ 3.2 dB/km ที่ความยาวคลื่น 1,550 นาโนเมตร และมีดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ที่ 810 นาโนเมตรซึ่งการสูญเสียในเส้นใยนำแสงประเภทนี้ลดลงจากงานวิจัยปี ค.ศ. 1999 มากและใกล้เคียงกับเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน



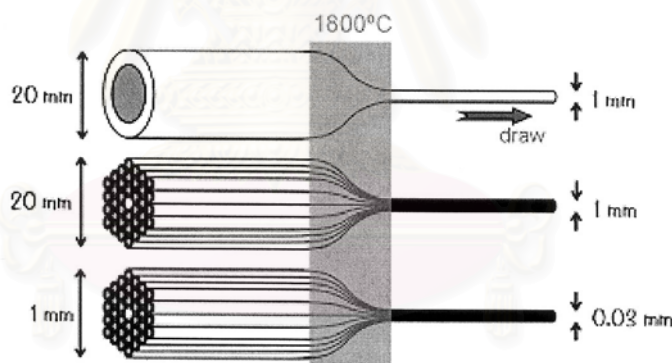
รูปที่ 1.4 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลของนักวิจัย Kubota, Suzuki, Kawanishi, Nakazawa, Tanaka and Fujita (1999)

จากงานวิจัยทั้ง 4 งานที่ผ่านมาจะสังเกตว่าเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลแต่ละแบบให้ค่าดิสเพอร์ชันและการสูญเสียในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลมากบ้างน้อยบ้างขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแกน, ขนาดของรูอากาศและระยะพิตซ์ ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยอีกกลุ่มหนึ่งที่พยายามหาวิธีคำนวณวิเคราะห์แสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อหาลักษณะการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนหน้าตัด, แถบช่องโฟโตนิกคริสตอล (photonic band gap) และแถบความยาวคลื่นที่ใช้งานในสถานะของการนำคลื่น (guide mode) ซึ่งมีวิธีการคำนวณหลายวิธีด้วยกัน เช่น plane wave expansion, scalar finite element, full vector finite element, semivectorial finite difference, two dimension cylindrical finite difference และ full vector imaginary distance beam propagation ในแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับว่าจะนำวิธีนั้นมาใช้คำนวณหาคุณสมบัติอะไรของเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอล

งานวิจัยเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลของ Steel and Osgood (2001) เป็นงานที่น่าสนใจ งานวิจัยนี้กล่าวถึงเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรีมีการจัดเรียงแบบรวงผึ้ง และมีแกนเอกขนานกับแกน y งานวิจัยของ Steel and Osgood (2001) นี้ได้คำนวณหาแบบแผนคลื่นนำ, แบบแผนคลื่นรั่ว, โพลาริเซชันและดิสเพอร์ชัน งานวิจัยนี้กล่าวว่าเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลชนิดนี้คือ ช่วยรักษาโพลาริเซชันให้คงที่ในแนวแกน y โดยได้ใช้วิธีคำนวณ plane wave expansion ซึ่งมีข้อเสียคือเป็นวิธีที่ไม่ยืดหยุ่น กล่าวคือวิธี plane wave expansion ใช้ได้กับโครงสร้างหน้าตัดที่มีรูปแบบคงที่เช่นการจัดเรียงรูอากาศวงรีที่มีแกนเอกตามแกน y ทั้งหมดแต่ไม่สามารถ

ใช้ได้กับกรณีที่มีรูอากาศรูปวงรีบางรูปที่มีแกนเอกตามแกน x ด้วย วิธีที่ยืดหยุ่นและสามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างหน้าตัดใดๆ ได้คือวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์นี้เป็นวิธีการวิเคราะห์หา eigen mode โดยแก้สมการ eigen mode ที่มีขนาดใหญ่แต่ไม่สามารถหาแบบแผนคลื่นรั่ว (leaky mode) ได้เพื่อแก้ปัญหาที่จึ้นนำวิธีบีบพรอพากชันใช้แก้ปัญหาแนวแกน z และคำนวณสนามตามแกน z ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ใช้ระเบียบ 2 วิธีคือ ไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อคำนวณสนามตามขวางหน้าตัดแบบใดๆ และใช้บีบพรอพากชันเพื่อคำนวณสนามตามยาว

การผลิตเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลมีกรรมวิธี 2 ขั้นตอนคือการจัดเรียงแท่งแก้ว (stack) ให้อยู่ในลักษณะของรวงผึ้งและการดึงแท่งแก้ว (draw) ขั้นตอนแรกนำแท่งแก้วต้นมาเจาะเป็นรูอากาศแล้วนำแท่งแก้วต้นที่มีขนาดตามที่ต้องการอยู่ตรงกลางโดยการจัดเรียงให้แท่งแก้วที่เจาะรูอากาศมีลักษณะคล้ายรวงผึ้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 20 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1.5 จากนั้นให้นำแท่งแก้วทั้งหมดไปหลอมด้วยอุณหภูมิ 1800°C แล้วใช้เครื่องมือดึงแท่งแก้วในทางยาวเพื่อให้แท่งแก้วยึดและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกลดลงเหลือเพียง 1 มิลลิเมตร ดังนั้นถ้าต้องการนำให้ขนาดของแกนลดลงอีกจึงนำไปหลอมและดึงอีกให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเหลือเพียง 0.03 มิลลิเมตร



รูปที่ 1.5 การผลิตเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอล

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. วิเคราะห์โพลาริเซชันในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรีด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์บีบพรอพากชัน
2. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการจัดเรียงรูอากาศรูปวงรี, ความยาวแกนเอก, ความยาวแกนโทของรูอากาศรูปวงรีและระยะพิชต์ที่มีผลต่อ โพลาริเซชันเดี่ยว (single polarization)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. วิเคราะห์โพลาริเซชันในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตัลรูอากาศรูปวงรีด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพากेशन
2. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการจัดเรียงรูอากาศรูปวงรี, ความยาวแกนเอก, ความยาวแกนโทของรูอากาศรูปวงรีและระยะพิตซ์ที่มีผลต่อโพลาริเซชันเดี่ยว (single polarization)
3. เปรียบเทียบผลที่ได้กับผลของนักวิจัยอื่นๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. วิธีการวิเคราะห์ปัญหาในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตัลรูอากาศรูปวงรีโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพากेशन
2. ได้แบบจำลองของเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตัลรูอากาศรูปวงรีที่รักษาโพลาริเซชันให้คงที่

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีและวิธีการวิเคราะห์ของเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตัลรูอากาศรูปวงรีที่มีผู้นำเสนอมาแล้ว
2. ศึกษาการรักษาโพลาริเซชันในเส้นใยแสงแบบมาตรฐาน
3. ศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพากेशन
4. เขียนโปรแกรมจำลองผลการวิเคราะห์
5. เปรียบเทียบผลที่ได้กับบทความที่มีผู้นำเสนอมาแล้ว
6. จัดทำเอกสารวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพากชัน

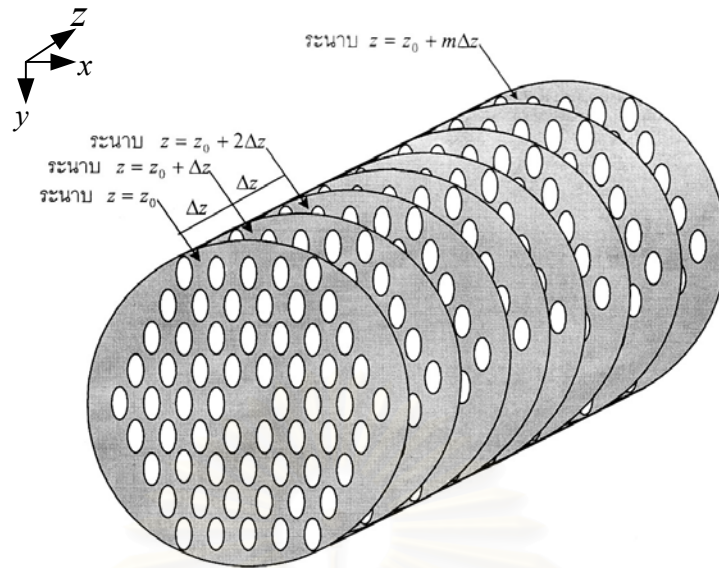
2.1 ความนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง หลักการและการคำนวณหาสมการของวิธีเวกเตอร์ไฟไนต์บีมพรอพากชันและผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าตามขวางและสนามไฟฟ้าแนวแกน z ของเส้นใยนำแสง 3 แบบ ได้แก่เส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน, เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงกลม 1 วง, 2 วง และ 3 วง และเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรี 1 วง, 2 วง และ 3 วง ที่ระยะทางต่างๆดังต่อไปนี้

2.2 หลักการของวิธีบีมพรอพากชัน

กระบวนการจำลองการเดินทางของคลื่นแสงในท่อนำคลื่นแสงด้วยระเบียบวิธีบีมพรอพากชัน (BPM) จะเริ่มต้นจากการแบ่งระนาบหน้าตัดของท่อนำคลื่นแสงออกเป็นระนาบส่วนย่อยจำนวน m ระนาบ โดยระนาบแต่ละระนาบจะวางตัวตั้งฉากกับทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่นแสงดังรูปที่ 2.1 ระนาบ $z = z_0$ จะอยู่ที่ต้นทางที่แสงถูกส่งเข้าสู่ท่อนำคลื่นแสง ส่วนระนาบ $z = z_0 + m\Delta z$ จะอยู่ที่ปลายทางด้านที่แสงออกจากท่อนำคลื่นแสงและระนาบแต่ละแผ่นจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ Δz จากนั้นจึงสร้างสมการคลื่นสำหรับคลื่นแสงที่เดินทางไปในท่อนำคลื่นแสงต่อมา จึงจัดรูปสมการคลื่นเพื่อให้ได้มาซึ่งสมการ (BPM) เพื่อใช้แสดงความสัมพันธ์ของคลื่นแสงบนระนาบแต่ละระนาบแต่ละระนาบที่อยู่ต่อเนื่องกัน

การกำหนดฟังก์ชันของคลื่นแสงเป็นอินพุตที่ระนาบ $z = z_0$ จะทำให้คำนวณหาค่าฟังก์ชันของคลื่นแสงที่ระนาบถัดไป คือ $z = z_0 + \Delta z$ ได้ฟังก์ชันของคลื่นแสงที่คำนวณได้นี้จะใช้เป็นคลื่นแสงอินพุตของระนาบถัดไปคือ $z = z_0 + 2\Delta z$ ดำเนินการคำนวณเช่นนี้ต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสามารถหาค่าฟังก์ชันคลื่นแสงที่ระนาบ $z = z_0 + m\Delta z$ ได้จึงเป็นการสิ้นสุดกระบวนการคำนวณ ทั้งนี้ในการคำนวณหาฟังก์ชันของคลื่นแสงบนระนาบแนวขวางของท่อนำคลื่นแสง จะทำได้โดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบอื่นๆ โดยงานวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์



รูปที่ 2.1 การแบ่งระนาบหน้าตัดของเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตัล
รูอากาศรูปวงรีออกเป็นจำนวน m ระนาบ

วิธีบีมพรอพagation ที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือ วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพagation (Finite Element Beam Propagation Method) โดยวิธีนี้นำวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์มาแก้ไขปัญหาในระนาบตัดขวาง (xy) และใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์มาแก้ไขปัญหาในแนวแกน (z) การใช้งานวิธีนี้มีข้อดีคือ วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์สามารถคำนวณบนหน้าตัดใดๆ ได้ดีกว่าวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์บีมพรอพagation โดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์สามารถแบ่งจำนวนอีลีเมนต์ให้เล็กมากๆ ได้และมีขนาดใดๆ ตามต้องการได้ซึ่งทำให้สามารถแบ่งพื้นที่การคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพและลดจำนวนโนดที่ใช้ในการคำนวณลง นอกจากนี้วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ยังสามารถปรับแต่งอีลีเมนต์ให้สอดคล้องกับสนามและรูปร่างของท่อนำคลื่นแสงในระหว่างขั้นตอนการคำนวณได้ ทำให้สามารถให้ผลการคำนวณที่ละเอียดแม่นยำขึ้น

สมการบีมพรอพagation เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามในระนาบทั้งสองดังสมการ (2.1) เมื่อป้อนสนามอินพุตเข้าที่ระนาบแรกจึงคำนวณด้วยสมการบีมพรอพagation หาเอาต์พุตที่ระนาบที่สอง ค่าสนามเอาต์พุตของการคำนวณในระนาบถัดไปดังรูปที่ 2.2 เมื่อคำนวณเป็นระนาบๆ ไปเรื่อยๆ จะสามารถหาสนามได้ตลอดความยาวของท่อนำคลื่นแสง

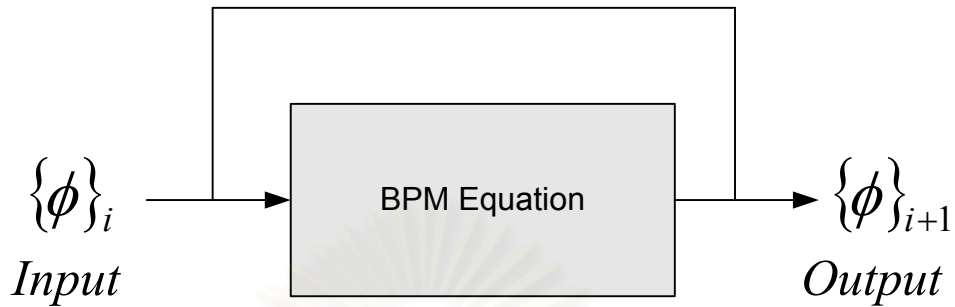
$$[A]\{\phi\}_{i+1} = [B]\{\phi\}_i \quad (2.1)$$

โดยที่

$$\{\phi\}_{i+1} \text{ คือ ขนาดของสนามที่ระนาบ } i+1$$

$\{\phi\}_i$ คือ ขนาดของสนามที่ระนาบ i

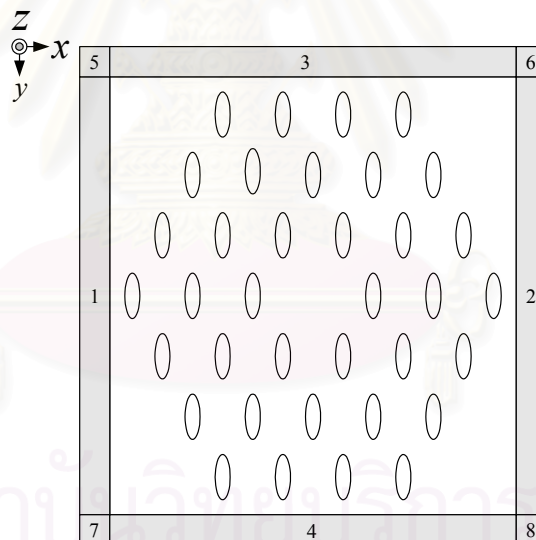
$[A]$, $[B]$ เป็นเมทริกซ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี BPM



รูปที่ 2.2 การคำนวณด้วยวิธี BPM

2.3 สมการบีบพรอพาเกชัน

2.3.1 สมการคลื่นในท่อนำคลื่นแสงทั่วไป



รูปที่ 2.3 การแบ่งบริเวณของ PML

เมื่อพิจารณาแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการแมกซ์เวลล์ในรูปโดเมนความถี่ที่ไม่มีแหล่งกำเนิดตัวกลางภายในแบบไอโซทรอปิก เมื่อใช้เงื่อนไขขอบเขตแอนไอโซทรอปิกประเภท PML (Perfect Matched Layer) ดังรูปที่ 2.3 จากงานวิจัยของ Saitoh and Koshiba (2002) จะได้สมการคลื่นแบบเวกเตอร์ดังนี้รายละเอียดดูที่ภาคผนวก ก, ข

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_r} [\mathbf{s}]^{-1} \nabla \times \mathbf{E} - k_0^2 \epsilon_r [\mathbf{s}] \mathbf{E} = 0 \quad (2.2)$$

โดยที่ $\mu_r = 1$ และ $\varepsilon_r = n^2$

กำหนดให้ n คือ ค่าครรชนหักเหของตัวกลางถ้าเป็นตัวกลางอากาศมีค่าเท่ากับ 1 ถ้าเป็นตัวกลางแก้วซิลิกามีค่าเท่ากับ 1.45

$$[s] = \begin{bmatrix} s_y s_z / s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_z s_x / s_y & 0 \\ 0 & 0 & s_x s_y / s_z \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

โดย s_x, s_y, s_z เป็นพารามิเตอร์ของ PML ในบริเวณต่างๆดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของ PML

พารามิเตอร์ PML	บริเวณของ PML							
	1	2	3	4	5	6	7	8
s_x	s_1	s_2	1	1	s_1	s_2	s_1	s_2
s_y	1	1	s_3	s_4	s_3	s_3	s_4	s_4

โดยกำหนดให้ $s_z = 1$ ทุกบริเวณของ PML ดังรูปที่ 2.3

เนื่องจากการวิเคราะห์นี้เป็นแบบแผนคลื่นรั่ว (leaky-mode) ดังนั้นพารามิเตอร์ของ PML จึงอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนดังนี้

$$s_j = 1 - j\alpha_j \quad (2.4)$$

โดยค่า $j=1,2,3,4$ และค่าของ α_j ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เป็นค่าคงที่คือ $\alpha_j = 1$ ทุกบริเวณของ PML มีค่า $s_j = 1 - j1$

จากสมการ (2.2) จะกำหนดให้ $p = \frac{1}{\mu_r}$ และ $q = \varepsilon_r$ เพื่อการจัดรูปสมการ (2.2) ใหม่ได้ดังนี้

$$\nabla \times p[s]^{-1} \nabla \times \vec{E} - k_0^2 q[s] \vec{E} = 0 \quad (2.5)$$

โดยแบ่งเวกเตอร์สนามไฟฟ้าออกเป็น 2 องค์ประกอบคือองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าตามขวางและองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าตามยาวไว้ดังนี้

$$\vec{E}(x, y, z) = \vec{E}_t(x, y, z) + E_z(x, y, z) \vec{i}_z \quad (2.6)$$

และตัวดำเนินการเดล (del operator) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\nabla = \nabla_t + \nabla_z \vec{i}_z \quad (2.7)$$

$$\nabla_t = \vec{i}_x \frac{\partial}{\partial x} + \vec{i}_y \frac{\partial}{\partial y} \quad (2.8)$$

$$\nabla_z = \frac{\partial}{\partial z} \quad (2.9)$$

นำสมการ (2.7) แทนลงใน (2.5) จะได้สมการที่มีทั้งสนามไฟฟ้าตามขวางและสนามไฟฟ้าตามแนวแกน ดังสมการ (2.10)

$$\nabla \times p[s]^{-1} \nabla \times (\vec{E}_t + E_z \vec{i}_z) - k_0^2 q[s] (\vec{E}_t + E_z \vec{i}_z) = 0 \quad (2.10)$$

จัดรูปสมการใหม่

$$\nabla \times p[s]^{-1} \nabla \times \vec{E}_t + \nabla \times p[s]^{-1} \nabla \times E_z \vec{i}_z - k_0^2 q[s] \vec{E}_t - k_0^2 q[s] E_z \vec{i}_z = 0 \quad (2.11)$$

นำสมการ (2.7) แทนลงในสมการ (2.11) แล้วจัดรูปจะได้

$$\begin{aligned} & \nabla \times p[s]^{-1} (\nabla_t + \nabla_z \vec{i}_z) \times \vec{E}_t + \nabla \times p[s]^{-1} (\nabla_t + \nabla_z \vec{i}_z) \times E_z \vec{i}_z \\ & - k_0^2 q[s] \vec{E}_t - k_0^2 q[s] E_z \vec{i}_z = 0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} & \nabla \times p[s]^{-1} \nabla_t \times \vec{E}_t + \nabla \times p[s]^{-1} \nabla_z \vec{i}_z \times \vec{E}_t + \nabla \times p[s]^{-1} \nabla_t \times E_z \vec{i}_z + \nabla \times p[s]^{-1} \nabla_z \vec{i}_z \times E_z \vec{i}_z \\ & - k_0^2 q[s] \vec{E}_t - k_0^2 q[s] E_z \vec{i}_z = 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} & (\nabla_t + \nabla_z \vec{i}_z) \times p[s]^{-1} \nabla_t \times \vec{E}_t + (\nabla_t + \nabla_z \vec{i}_z) \times p[s]^{-1} \nabla_z \vec{i}_z \times \vec{E}_t + (\nabla_t + \nabla_z \vec{i}_z) \times p[s]^{-1} \nabla_t \times E_z \vec{i}_z \\ & - k_0^2 q[s] \vec{E}_t - k_0^2 q[s] E_z \vec{i}_z = 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} & \nabla_t \times p[s]^{-1} \nabla_t + \nabla_z \bar{i}_z \times p[s]^{-1} \nabla_t \times \bar{E}_t + \nabla_t \times p[s]^{-1} \nabla_z \bar{i}_z \times \bar{E}_t + \nabla_z \bar{i}_z \times p[s]^{-1} \nabla_z \bar{i}_z \times \bar{E}_t \\ & + \nabla_t \times p[s]^{-1} \nabla_t \times E_z \bar{i}_z + \nabla_z \bar{i}_z \times p[s]^{-1} \nabla_t \times E_z \bar{i}_z - k_0^2 q[s] \bar{E}_t - k_0^2 q[s] E_z \bar{i}_z = 0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

โดยกำหนดให้

$$[s_t] = \begin{bmatrix} s_y s_z / s_x & 0 \\ 0 & s_z s_x / s_y \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$s_t = s_x s_y / s_z \quad (2.17)$$

จัดรูปเมทริกซ์ $[s]$ ใหม่จะได้

$$[s] = \begin{bmatrix} [s_t] & 0 \\ 0 & s_t \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$[s]^{-1} = \begin{bmatrix} [s_t]^{-1} & 0 \\ 0 & s_t^{-1} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

แทนสมการ (2.18) และ (2.19) ลงในสมการ (2.15) แล้วแยกองค์ประกอบตามขวางและองค์ประกอบตามยาวจะได้ 2 สมการคลื่นดังนี้

$$\nabla_t \times (p s_t^{-1} \nabla_t \times \bar{E}_t) + \nabla_z \{p [s_t]^{-1} (\nabla_t E_z - \nabla_z \bar{E}_t)\} = k_0^2 q [s_t] \bar{E}_t \quad (2.20)$$

และ

$$\nabla_t \times [\{p [s_t]^{-1} (\nabla_t E_z - \nabla_z \bar{E}_t)\} \times E_z] = k_0^2 q s_t E_z \bar{i}_z \quad (2.21)$$

2.3.2 สมการบีบพรอพาเกชัน

สมมติผลเฉลยของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่อยู่รูปของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลโดยใช้การประมาณแบบ slowly varying envelope คลื่นแสงจะมีขนาดค่อยๆ ลดลงตามระยะทางดังนี้

$$\bar{E}(x, y, z) = \bar{E}_t(x, y, z) \exp(-jk_0 n_0 z) + E_z(x, y, z) \exp(-jk_0 n_0 z) \bar{i}_z \quad (2.22)$$

โดย \vec{E}_t คือขนาดสนามของลำคลื่นแนวหน้าตัด และ E_z คือขนาดของสนามตามแนวแกน z และค่า n_0 คือ ดรรชนีหักเหอ้างอิง (reference refractive index) ที่มีค่าอยู่ระหว่างดรรชนีหักเหของแก้ว $n=1.45$ กับดรรชนีหักเหของรูอากาศ $n=1$ ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกค่า $n_0 = 1$ เมื่อแทนสมการ (2.22) ลงในสมการ (2.20) และ (2.21) จะได้

$$\begin{aligned} \nabla_t \times (ps_t^{-1} \nabla_t \times \vec{E}_t \exp(-jk_0 n_0 z)) + \nabla_z \{p[s_t]^{-1} (\nabla_t E_z \exp(-jk_0 n_0 z))\} \\ - \nabla_z \{p[s_t]^{-1} (\nabla_z \vec{E}_t \exp(-jk_0 n_0 z))\} = k_0^2 q[s_t] \vec{E}_t \exp(-jk_0 n_0 z) \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} \nabla_t \times [\{p[s_t]^{-1} (\nabla_t E_z \exp(-jk_0 n_0 z)) - \nabla_z \vec{E}_t \exp(-jk_0 n_0 z)\} \times E_z \exp(-jk_0 n_0 z)] \\ = k_0^2 qs_t E_z \vec{i}_z \exp(-jk_0 n_0 z) \end{aligned} \quad (2.24)$$

จัดรูปสมการ (2.31) และ (2.32) จะได้สมการ (2.33) และ (2.34)

$$\begin{aligned} \nabla_t \times (ps_t^{-1} \nabla_t \times \vec{E}_t) - (\nabla_z^2 - 2jk_0 n_0 \nabla_z - k_0^2 n_0^2) p[s_t]^{-1} \vec{E}_t \\ - k_0^2 q[s_t] \vec{E}_t + (\nabla_z - jk_0 n_0) p[s_t]^{-1} \nabla_t E_z = 0 \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\nabla_t \times [\{p[s_t]^{-1} \nabla_t E_z\} \times E_z] - \nabla_t \times [\{p[s_t]^{-1} (\nabla_z - jk_0 n_0) \vec{E}_t\} \times E_z] = k_0^2 qs_t E_z \vec{i}_z \quad (2.26)$$

ประมาณให้องค์ประกอบ E_i โดยที่ $i = x, y, z$ อยู่ในรูปของผลคูณของฟังก์ชันฐานแบบขอบและพารามิเตอร์ไม่ทราบค่าดังนี้

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{U\}^T \{E_t\}^e \\ \{V\}^T \{E_t\}^e \\ j\{N\}^T \{E_z\}^e \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$\{U\}, \{V\}$ เป็นฟังก์ชันรูปร่างดังนี้

$$\{U\} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} l_1(y_3 - y) \\ l_2(y_1 - y) \\ l_3(y_2 - y) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$\{V\} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} l_1(x - x_3) \\ l_2(x - x_1) \\ l_3(x - x_2) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

โดยที่ x_i, y_i คือ พิกัด x, y ของโนดที่ $i = 1, 2, 3$ A คือขนาดพื้นที่ของอีลีเมนต์สามเหลี่ยม l_i คือ ความยาวของด้านที่ $i = 1, 2, 3$ และเป็นค่าที่กำหนดทิศทางของเวกเตอร์ให้วิ่งในทิศทางที่เสริมกันโดยมีสูตรการหา ดังนี้

$$l_i = \begin{cases} \sqrt{b_k^2 + c_k^2} & \text{for } b_k < 0 \text{ or } b_k = 0, c_k > 0 \\ -\sqrt{b_k^2 + c_k^2} & \text{for } b_k > 0 \text{ or } b_k = 0, c_k < 0 \end{cases} \quad (2.30)$$

ในที่นี้ i, j, k หมุนวนแบบ modulo 3 เมื่อแทนฟังก์ชันฐานสมการ (2.27) ลงในสมการ (2.25) และ (2.26) แล้วหาผลคูณภายในตามระเบียบวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างแบบกานเลอดิน โดยเลือกฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักให้มีรูปแบบเดียวกันกับฟังก์ชันรูปร่าง โดยถ่วงน้ำหนักด้วยฟังก์ชันรูปร่างแบบเวกเตอร์ W_i และฟังก์ชันรูปร่างแบบสเกลาร์ W_z ดังนี้

$$W_i = \{U\} \bar{i}_x + \{V\} \bar{i}_y \quad (2.31)$$

$$W_z = j\{N\} \quad (2.32)$$

จะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} & \sum_e \iint W_i \cdot \nabla_i \times (p s_i^{-1} \nabla_i \times (\{U\}^T \{E_i\}^e \bar{i}_x + \{V\}^T \{E_i\}^e \bar{i}_y)) dx dy \\ & - \sum_e \iint W_i \cdot (\nabla_z^2 - 2jk_0 n_0 \nabla_z - k_0^2 n_0^2) p [s_i]^{-1} (\{U\}^T \{E_i\}^e \bar{i}_x + \{V\}^T \{E_i\}^e \bar{i}_y) dx dy \\ & - \sum_e \iint W_i \cdot k_0^2 q [s_i] (\{U\}^T \{E_i\}^e \bar{i}_x + \{V\}^T \{E_i\}^e \bar{i}_y) dx dy \\ & + \sum_e \iint W_i \cdot (\nabla_z - jk_0 n_0) p [s_i]^{-1} \nabla_i (j\{N\}^T \{E_z\}^e) dx dy = 0 \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} & \sum_e \iint W_z \cdot \nabla_i \times [p [s_i]^{-1} \nabla_i (j\{N\}^T \{E_z\}^e)] \times (j\{N\}^T \{E_z\}^e) dx dy \\ & - \sum_e \iint W_z \cdot \nabla_i \times [p [s_i]^{-1} (\nabla_z - jk_0 n_0) (\{U\}^T \{E_i\}^e \bar{i}_x + \{V\}^T \{E_i\}^e \bar{i}_y)] \times (j\{N\}^T \{E_z\}^e) dx dy \\ & - \sum_e \iint W_z k_0^2 q s_i (j\{N\}^T \{E_z\}^e) \bar{i}_z dx dy = 0 \end{aligned} \quad (2.34)$$

แทนสมการ (2.31) และ (2.32) ลงในสมการ (2.33) และ (2.34) แล้วจัดรูปใหม่จะได้

$$\begin{aligned}
& \sum_e \iint_e p \frac{s_z}{s_x s_y} \left(\frac{\partial \{U\}}{\partial y} \frac{\partial \{U\}^T}{\partial y} + \frac{\partial \{V\}}{\partial x} \frac{\partial \{V\}^T}{\partial x} - \frac{\partial \{U\}}{\partial y} \frac{\partial \{V\}^T}{\partial x} - \frac{\partial \{V\}}{\partial x} \frac{\partial \{U\}^T}{\partial y} \right) dx dy \{E_t\}^e \\
& + j \frac{\partial}{\partial z} \sum_e \iint_e \left(p \frac{s_y}{s_z s_x} \{U\} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial x} + p \frac{s_x}{s_y s_z} \{V\} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial y} \right) dx dy \{E_z\}^e \\
& - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \sum_e \iint_e \left(k_0^2 q \frac{s_y s_z}{s_x} \{U\} \{U\}^T + k_0^2 q \frac{s_z s_x}{s_y} \{V\} \{V\}^T \right) dx dy \{E_t\}^e \\
& - k_0^2 \sum_e \iint_e \left(q \frac{s_y s_z}{s_x} \{U\} \{U\}^T + q \frac{s_z s_x}{s_y} \{V\} \{V\}^T \right) dx dy \{E_t\}^e = 0
\end{aligned} \tag{2.35}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_e \iint_e \left(p \frac{s_y}{s_z s_x} \frac{\partial \{N\}}{\partial x} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial x} + p \frac{s_x}{s_y s_z} \frac{\partial \{N\}}{\partial y} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial y} \right) dx dy \{E_z\}^e \\
& + j \frac{\partial}{\partial z} \sum_e \iint_e \left(p \frac{s_y}{s_z s_x} \frac{\partial \{N\}}{\partial x} \{U\}^T + p \frac{s_x}{s_y s_z} \frac{\partial \{N\}}{\partial y} \{V\}^T \right) dx dy \{E_t\}^e \\
& - k_0^2 q \frac{s_x s_y}{s_z} \sum_e \iint_e \{N\} \{N\}^T dx dy \{E_z\}^e = 0
\end{aligned} \tag{2.36}$$

เนื่องจากเส้นใยนำแสงมีหน้าตัดขวางที่เหมือนกันตลอดแนวแกน z ดังนั้นจึงสามารถนำการประมาณแบบเฟรสเนลช่วยในการประมาณ โดยให้ $\frac{\partial^2}{\partial z^2} \approx 0$ การใช้การประมาณแบบเฟรสเนลช่วยลดเมทริกซ์ที่ใช้ในการคำนวณลงและช่วยลดเวลาในการคำนวณ ดังนั้นจะกำหนดสนามตามยาวดังสมการดังนี้

$$E_z(x, y, z) \exp(-jk_0 n_0 z) = j \frac{\partial}{\partial z} \{E'_z(x, y, z) \exp(-jk_0 n_0 z)\} \tag{2.37}$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$E_z(x, y, z) \exp(-jk_0 n_0 z) = j \{N\}^T \{E_z\}^e \exp(-jk_0 n_0 z) = j \left(j \frac{\partial \{N\}^T}{\partial z} \right) \{E_z\}^e \tag{2.38}$$

จะเห็นได้ว่าการแปลงตัวแปรองค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวยาว $\{N\}^T$ สามารถแทนด้วย $j \frac{\partial \{N\}^T}{\partial z}$ ได้ จะสังเกตว่าสมการ (2.35) มีเทอมของ $\frac{\partial^2}{\partial z^2}$ จึงสามารถตัดทิ้งได้แล้วจัดรูปใหม่ให้เหลืออนุพันธ์อันดับหนึ่งได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
& \sum_e \iint_e p \frac{s_z}{s_x s_y} \left(\frac{\partial \{U\}}{\partial y} \frac{\partial \{U\}^T}{\partial y} + \frac{\partial \{V\}}{\partial x} \frac{\partial \{V\}^T}{\partial x} - \frac{\partial \{U\}}{\partial y} \frac{\partial \{V\}^T}{\partial x} - \frac{\partial \{V\}}{\partial x} \frac{\partial \{U\}^T}{\partial y} \right) dx dy \{E_t\}^e \\
& + j \frac{\partial}{\partial z} \sum_e \iint_e \left(p \frac{s_y}{s_z s_x} \{U\} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial x} + p \frac{s_x}{s_y s_z} \{V\} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial y} \right) dx dy \{E'_z\}^e \\
& - k_0^2 \sum_e \iint_e \left(q \frac{s_y s_z}{s_x} \{U\} \{U\}^T + q \frac{s_z s_x}{s_y} \{V\} \{V\}^T \right) dx dy \{E_t\}^e = 0
\end{aligned} \tag{2.39}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_e \iint_e \left(p \frac{s_y}{s_z s_x} \frac{\partial \{N\}}{\partial x} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial x} + p \frac{s_x}{s_y s_z} \frac{\partial \{N\}}{\partial y} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial y} \right) dx dy \{E'_z\}^e \\
& + j \frac{\partial}{\partial z} \sum_e \iint_e \left(p \frac{s_y}{s_z s_x} \frac{\partial \{N\}}{\partial x} \{U\}^T + p \frac{s_x}{s_y s_z} \frac{\partial \{N\}}{\partial y} \{V\}^T \right) dx dy \{E_t\}^e \\
& - k_0^2 q \frac{s_x s_y}{s_z} \sum_e \iint_e \{N\} \{N\}^T dx dy \{E'_z\}^e = 0
\end{aligned} \tag{2.40}$$

จากนั้นจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง

$$-2jk_0 n_0 [M] \frac{d\{E\}}{dz} + ([K] - k_0^2 n_0^2 [M]) \{E\} = \{0\} \tag{2.41}$$

โดยมีพารามิเตอร์ดังนี้

$$\{E\} = \begin{bmatrix} \{E_t\} \\ \{E'_z\} \end{bmatrix} \tag{2.42}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} [K_{tt}] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \tag{2.43}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} [M_{tt}] & [M_{tz}] \\ [M_{zt}] & [M_{zz}] \end{bmatrix} \tag{2.44}$$

$$\begin{aligned}
[K_{tt}] = & \sum_e \iint_e \left[k_0^2 q \frac{s_y s_z}{s_x} \{U\} \{U\}^T + k_0^2 q \frac{s_z s_x}{s_y} \{V\} \{V\}^T \right. \\
& \left. - p \frac{s_z}{s_x s_y} \frac{\partial \{U\}}{\partial y} \frac{\partial \{U\}^T}{\partial y} - p \frac{s_z}{s_x s_y} \frac{\partial \{V\}}{\partial x} \frac{\partial \{V\}^T}{\partial x} \right]
\end{aligned}$$

$$+ p \frac{s_z}{s_x s_y} \frac{\partial \{U\}}{\partial y} \frac{\partial \{V\}^T}{\partial x} + p \frac{s_z}{s_x s_y} \frac{\partial \{V\}}{\partial x} \frac{\partial \{U\}^T}{\partial y} \Big] dx dy \quad (2.45)$$

$$[M_{xx}] = \sum_e \iint_e \left[p \frac{s_y}{s_z s_x} \{U\} \{U\}^T + p \frac{s_x}{s_y s_z} \{V\} \{V\}^T \right] dx dy \quad (2.46)$$

$$[M_{zz}] = [M_{zz}]^T$$

$$= \sum_e \iint_e \left[p \frac{s_y}{s_z s_x} \{U\} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial x} + p \frac{s_x}{s_y s_z} \{V\} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial y} \right] dx dy \quad (2.47)$$

$$[M_{zz}] = \sum_e \iint_e \left[-k_0^2 q \frac{s_x s_y}{s_z} \{N\} \{N\}^T + p \frac{s_y}{s_z s_x} \frac{\partial \{N\}}{\partial x} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial x} \right. \\ \left. + p \frac{s_x}{s_y s_z} \frac{\partial \{N\}}{\partial y} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial y} \right] dx dy \quad (2.48)$$

รายละเอียดเกี่ยวกับการอินทิเกรตของฟังก์ชันรูปร่าง ของสมการ 2.45 - 2.48 อยู่ที่ภาคผนวก ก, ข

จากสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งสมการ (2.41) แก้ปัญหาโดยใช้อัลกอริทึมแคลงนิโคลสัน (Crank-Nicholson algorithm) ซึ่งเป็นสมการบิหมพรอพาเกชันโดยใช้สมการ (2.49) แก้ไขปัญหาในแนวแกน z

$$[A]_i \{E\}_{i+1} = [B]_i \{E\}_i \quad (2.49)$$

โดยให้พารามิเตอร์ $[A]$ และ $[B]$ ดังนี้

$$[A]_i = -2jk_0 n_{0,i} [M]_i + 0.5\Delta z ([K]_i - k_0^2 n_{0,i}^2 [M]_i) \quad (2.50)$$

$$[B]_i = -2jk_0 n_{0,i} [M]_i - 0.5\Delta z ([K]_i - k_0^2 n_{0,i}^2 [M]_i) \quad (2.51)$$

ค่า Δz คือระยะห่างระหว่างหน้าตัดขวางของเส้นใยนำแสงที่ i กับ $i+1$ โดยหลักการคำนวณแล้ว เริ่มต้นคำนวณสนามไฟฟ้าที่ระนาบแรกด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แล้วจึงใช้สมการบิหมพรอพาเกชันสมการ (2.49) แก้สมการเพื่อหาสนามในระนาบที่สอง แล้วใช้สนามที่ได้จากระนาบที่สองไปหาสนามในระนาบที่สามทำเช่นนี้เรื่อยไปจะได้สนามไฟฟ้าที่ระยะต่างๆตามที่ต้องการ

เมื่อสามารถหาสนามไฟฟ้าได้คุณสมบัติต่อไปคือการหาค่าดัชนีประสิทธิผล (effective index) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่นแสงในเส้นใยนำแสง (β) กับค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่นแสงในอากาศ (k_0) ซึ่งเป็นดัชนีหักเหที่แสงใช้ในการเดินทางในเส้นใยนำแสงตามความยาวคลื่นต่างๆ ดังสมการ (2.61) ด้วยวิธีที่ได้เสนอในงานวิจัยของ Saitoh and Koshiba (2002) ได้นำวิธีการแพร่กระจายระยะทางจินตภาพ (Imaginary-distance propagation method) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้กับท่อนำคลื่นที่ให้แบบแผนคลื่นเป็นจำนวนเชิงซ้อนในการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างระนาบ (Δz) ให้เป็นระยะทางจินตภาพ แล้วนำ Δz นี้ไปหาดัชนีประสิทธิผล (n_{eff})

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k_0} \quad (2.61)$$

ความสัมพันธ์ในเส้นใยนำแสงโพโตนิคคริสตอลแล้วค่าของ n_{eff} จะมีค่าอยู่ระหว่างดัชนีหักเหของแก้ว ($n=1.45$) และดัชนีของรูอากาศ ($n=1$) ทุกค่าของความยาวคลื่น

สมมติให้ดัชนีประสิทธิผล ($n_{eff,j}$) ของลำดับ j เป็นแบบแผนเจาะจง (eigen mode) และมี $\{f_j\}$ เป็นสนามไฟฟ้าลำดับที่ j ดังนั้นสมการค่าเจาะจงดังสมการ (2.61)

$$[K]\{f_j\} = k_0^2 n_{eff,j}^2 [M]\{f_j\} \quad (2.62)$$

โดยค่า $[K]$ และ $[M]$ จากสมการ 2.43 และ 2.44 ตามลำดับ

จากสมการ (2.49)-(2.51) และ (2.62) จะได้สมการ (3.3)

$$\{f_j\}_{i+1} = \frac{-2jk_0n_0 - 0.5\Delta z k_0^2 (n_{eff,j}^2 - n_0^2)}{-2jk_0n_0 + 0.5\Delta z k_0^2 (n_{eff,j}^2 - n_0^2)} \{f_j\}_i \quad (2.63)$$

$$\{\phi\}_i = \sum_{j=1}^m A_{j,i} \{f_j\} \quad (2.64)$$

โดยที่ $A_{j,i}$ คือ แอมพลิจูดเชิงซ้อนของแบบแผนเจาะจง, $\{f_j\}$ คือการกระจายของสนาม

จะได้ค่า Δz ระยะห่างระหว่างระนาบที่เหมาะสมและ n_{eff} ดัชนีประสิทธิผล ดังสมการ (2.65) และ (2.66) ตามลำดับ

$$\Delta z = j \frac{4n_0}{(n_{eff,j}^2 - n_0^2)k_0} \quad (2.65)$$

$$n_{eff,ji}^2 = \frac{\{\phi\}_i^\dagger [K] \{\phi\}_i}{k_0^2 \{\phi\}_i^\dagger [M] \{\phi\}_i} \quad (2.66)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.67)$$

โดย λ คือความยาวคลื่นที่ใช้ป้อนในเส้นใยนำแสง

กำหนดให้ i คือ ขั้นตอนของการแพร่กระจาย (propagation step) และ เครื่องหมาย
สัญลักษณ์ \dagger คือการสังยุคเชิงซ้อน (complex conjugate) และ ทรานสโพส (transpose)

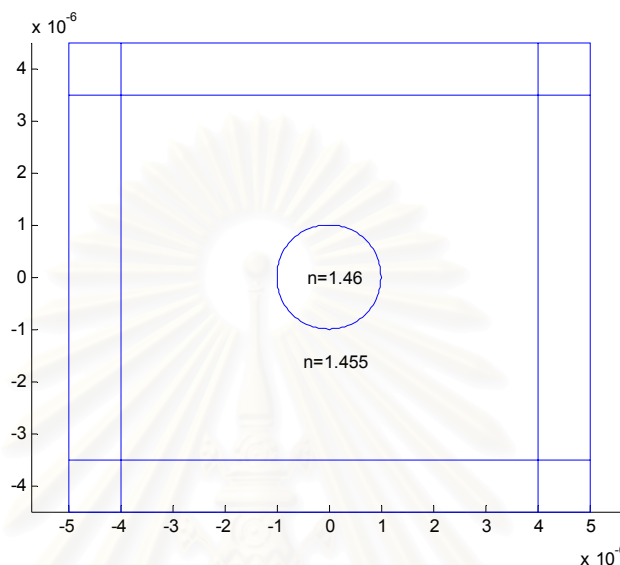
หลักการคำนวณหา Δz และ n_{eff} โดยใช้ Imaginary – distance propagation method เริ่มต้นจากการสมมุติค่า n_{eff} โดยเลือกค่าที่มากที่สุดแล้วจึงนำ n_{eff} มาคำนวณหา Δz จากสมการ (2.65) จากนั้นจึงนำค่า Δz ที่ถูกปรับไปคำนวณหา n_{eff} ที่คู่เข้าสู่คำตอบจากสมการ (2.66) ค่าของ n_0 ให้เลือกค่าดรรชนีหักเหที่น้อยที่สุด

เมื่อป้อนอินพุตเกาส์เซียนที่มีโพลาไรเซชันทางแกน y แล้วคำนวณค่าดรรชนี
ประสิทธิภาพที่ความยาวของเส้นใยนำแสงระยะหนึ่งที่มีค่าดรรชนีประสิทธิภาพแตกต่างกันไม่เกิน
ระดับ 0.001 จะได้ค่าดรรชนีประสิทธิภาพแนวแกน y (n_{eff}^y) และเช่นเดียวเมื่อป้อนอินพุตเกาส์เซียน
ที่มีโพลาไรเซชันทางแกน x แล้วคำนวณค่าดรรชนีประสิทธิภาพที่ความยาวของเส้นใยนำแสงระยะ
หนึ่งที่มีค่าดรรชนีประสิทธิภาพแตกต่างกันไม่เกินระดับ 0.001 จะได้ค่าดรรชนีประสิทธิภาพแนวแกน
 x (n_{eff}^x) การวัดค่าโพลาไรเซชันว่าเส้นใยนำแสงประเภทใดสามารถรักษาค่าโพลาไรเซชันให้
ค่าคงที่ต้องวัดจากไบรีฟรินเจนซ์ (Δn_{eff}) คือผลต่างของค่าดรรชนีประสิทธิภาพที่มีโพลาไรเซชัน
ทางแกน y กับค่าดรรชนีประสิทธิภาพที่มีโพลาไรเซชันทางแกน x ดังสมการ (2.68)

$$\Delta n_{eff} = |n_{eff}^y - n_{eff}^x| \quad (2.68)$$

2.4 การทดสอบความถูกต้องของวิธีการ

กรณีตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบความถูกต้องของระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพากชันคือ เส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน เหตุผลที่เลือกคือ เป็นเส้นใยนำแสงที่มีผลเฉลยแม่นยำ (exact solution) ที่ใช้เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีของวิทยานิพนธ์ได้



รูปที่ 2.4 ภาคตัดขวางในระนาบ xy ของเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน

เส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานมีลักษณะตามรูปที่ (2.4) ซึ่งแกนกลาง (core) เป็นทำจากวัสดุแก้วซิลิกาที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ 1.46 มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 ไมโครเมตร และถูกล้อมรอบด้วยวัสดุหุ้ม (clad) ที่ทำจากวัสดุแก้วซิลิกาที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ 1.455 ซึ่งมีดัชนีหักเหแตกต่างกัน 0.005 ซึ่งวัสดุหุ้มจะจำลองว่ามีวัสดุดูดกลืนคลื่นโดยใช้ PML (perfect match layer) เสมือนว่าเมื่อคลื่นแสงแผ่กระจายเข้าไปอย่างสม่ำเสมอที่ขนาด 5×5 ตารางไมโครเมตร ต่อไปจะเป็นการทดสอบสนามไฟฟ้าโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพากชันที่ระยะทางต่างๆและจากนั้นจะทดสอบเปรียบเทียบค่าดัชนีประสิทธิผลกับค่า v ของแต่ละวิธีโดยใช้ค่า v ของเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานดังสมการ (2.69) ซึ่งใช้บอกจำนวนแบบแผนคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน ในการเปรียบเทียบค่าดัชนีประสิทธิผลจะเลือกเฉพาะแบบแผนคลื่นเดี่ยวเท่านั้นซึ่งมีค่า $v < 2.405$

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} d \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (2.69)$$

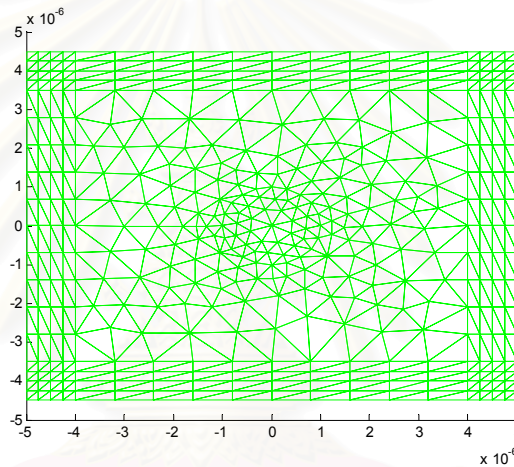
โดยที่ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแสง, n_{co} คือดัชนีหักเหของแกน, n_{cl} คือดัชนีหักเหของวัสดุหุ้ม

ส่วนค่า v ของวิธี FE-BEM เป็นไปตามความสัมพันธ์ดังสมการ (2.70)

$$v = \frac{\omega\Lambda}{2\pi c} \quad (2.70)$$

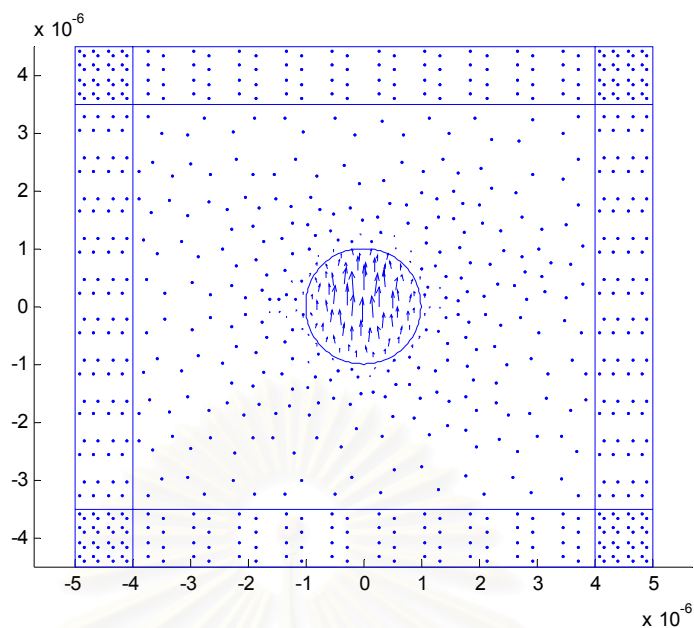
โดย ω คือความถี่เชิงมุม, Λ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน หรือระยะห่างระหว่างรูอากาศทั้งสองรูในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลและ c คือความเร็วของแสงในอากาศ

ขั้นตอนแรกก่อนการคำนวณหาสนามต้องแบ่งพื้นที่ของเส้นใยนำแสงออกเป็นอีลีเมนต์สามเหลี่ยมเพื่อหาตำแหน่งและพิกัดของแต่ละอีลีเมนต์ของขนาดเวกเตอร์สนามก่อนดังรูปที่ 2.5 จะสังเกตเห็นว่าการแบ่งอีลีเมนต์สามเหลี่ยมจะหนาแน่นที่บริเวณแกนเพราะเป็นบริเวณที่ใช้ นำแสงของเส้นใยนำแสง

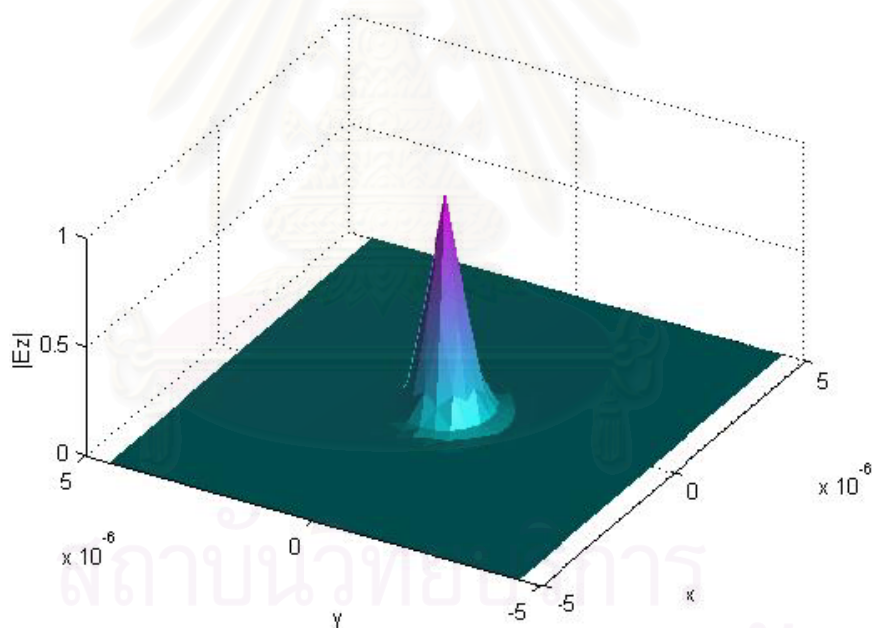


รูปที่ 2.5 การแบ่งอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน

เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าอินพุตดังรูป 2.6 กำหนดให้สนามไฟฟ้า \vec{E}_y อยู่ในรูปเกาส์เซียนมีขนาดจุด (spotsizes) เท่ากับ 0.5 ไมโครเมตร ให้ สนามไฟฟ้า $\vec{E}_x = 0$ โดยมีระยะขั้นการคำนวณ $\Delta z = 0.1$ ไมโครเมตร ความยาวคลื่นแสง 0.625 ไมโครเมตร ผลการคำนวณสนามที่ระยะทางต่างๆ

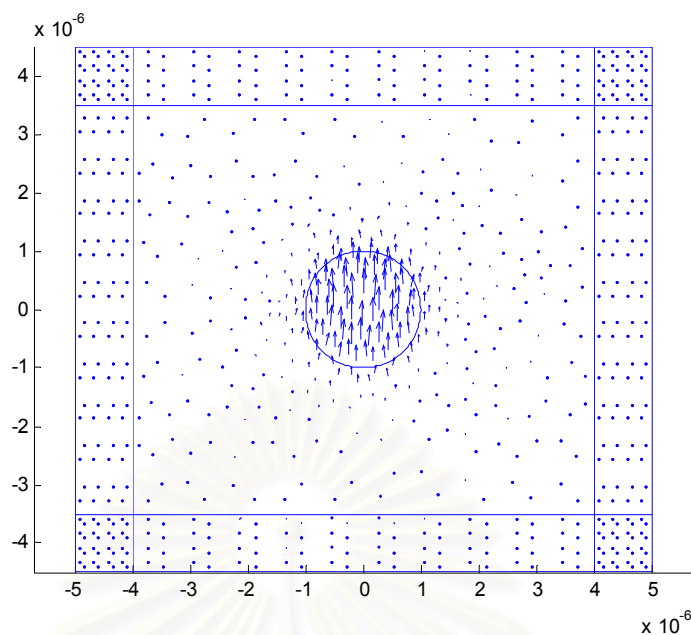


รูปที่ 2.6 สนามไฟฟ้าอินพุตในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน

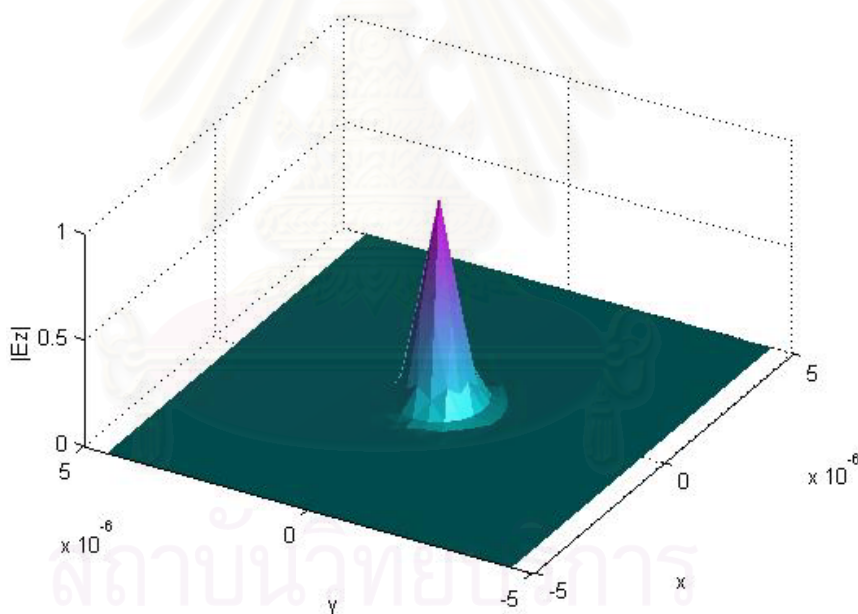


รูปที่ 2.7 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน

สนามไฟฟ้าอินพุตตามขวางจะอยู่บริเวณแกนกลางของเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานเท่านั้นในรูปที่ 2.6 กำหนดให้สนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z มีขนาดเท่ากับ 1 ในรูปที่ 2.7

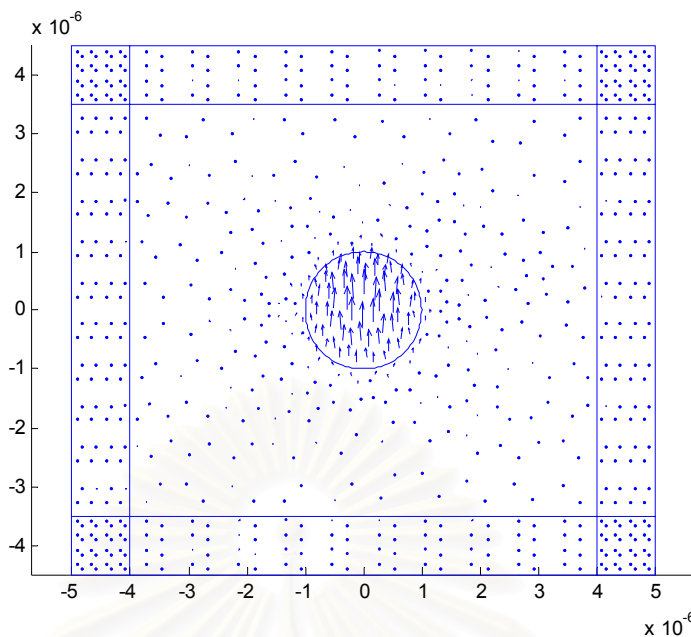


รูปที่ 2.8 สนามไฟฟ้าตามขวางในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน ระยะ 50 ไมโครเมตร

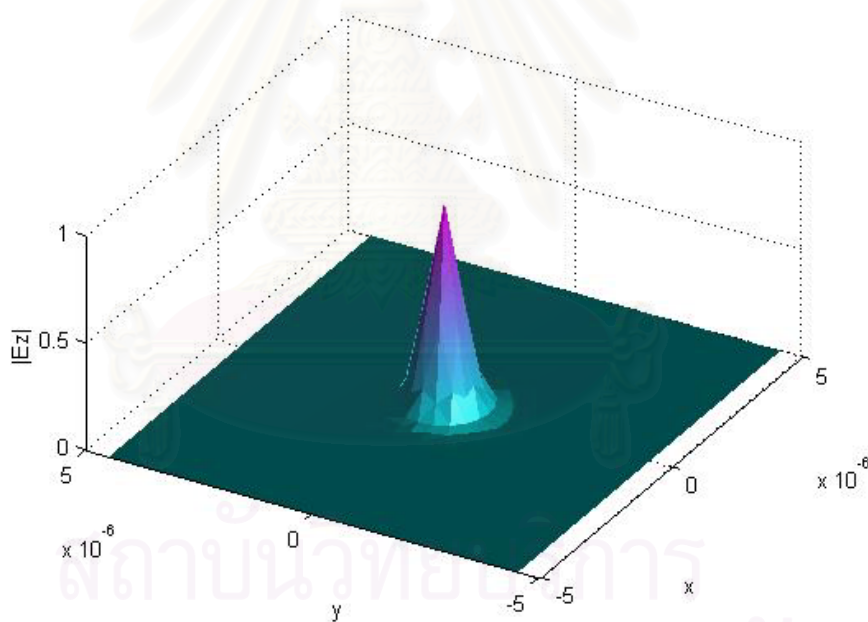


รูปที่ 2.9 ขนาดสนามไฟฟ้าแนวแกน z ในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน ระยะ 50 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานที่ระยะ 50 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าตามขวางส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานในรูปที่ 2.8 แต่มีสนามไฟฟ้าบางส่วนสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้บ้างตามกฎของสเนลล์ สนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 50 ไมโครเมตร ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.98 ในรูปที่ 2.9

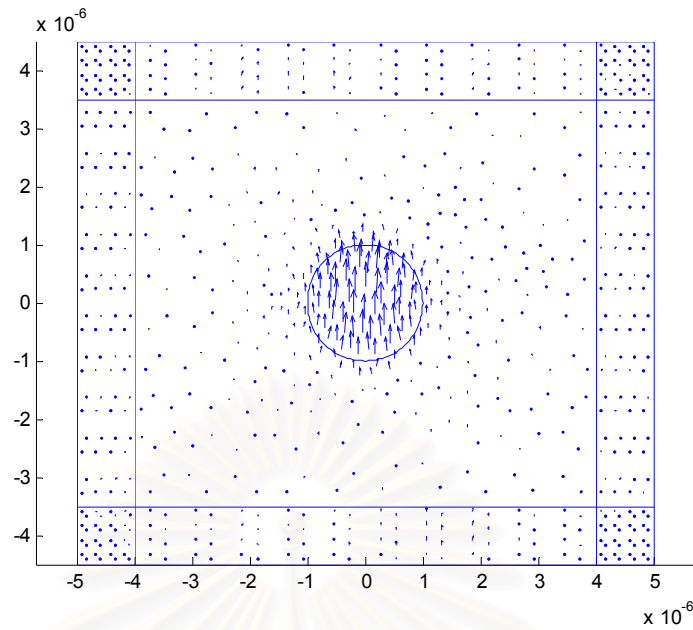


รูปที่ 2.10 สนามไฟฟ้าตามขวางในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานระยะ 500 ไมโครเมตร

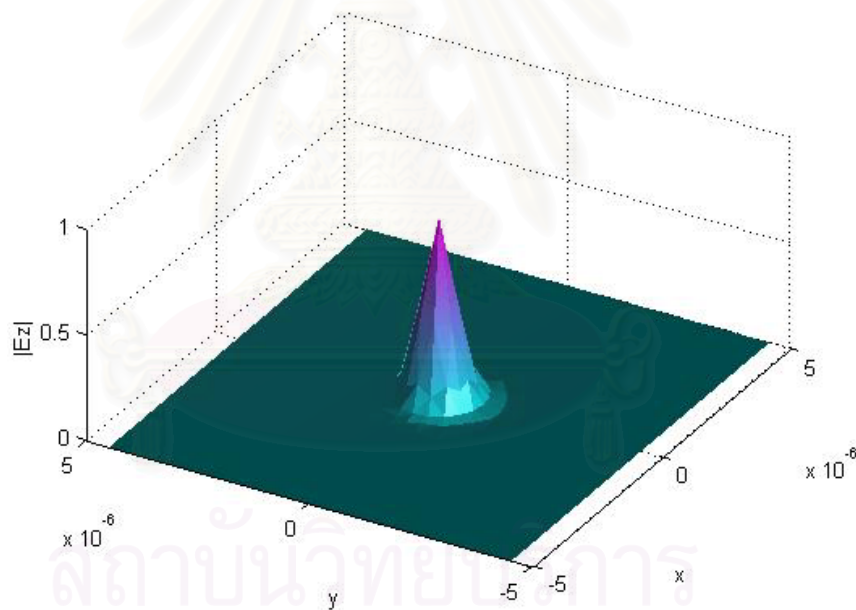


รูปที่ 2.11 ขนาดสนามไฟฟ้าแนวแกน z ในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานระยะ 500 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานที่ระยะ 500 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าตามขวางส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานในรูปที่ 2.10 แต่มีสนามไฟฟ้าบางส่วนสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้บ้างตามกฎของสแนลล์สนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 500 ไมโครเมตร ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.75 ในรูปที่ 2.11

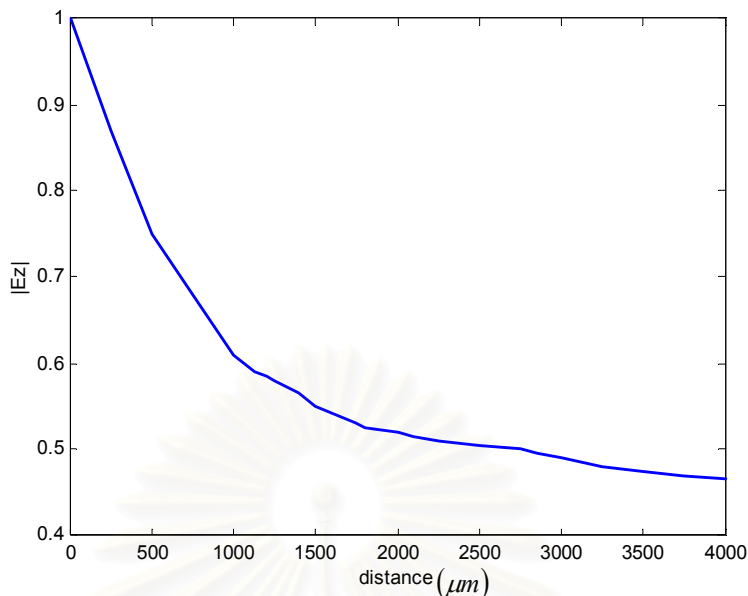


รูปที่ 2.12 สนามไฟฟ้าตามขวางในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานระยะ 1000 ไมโครเมตร



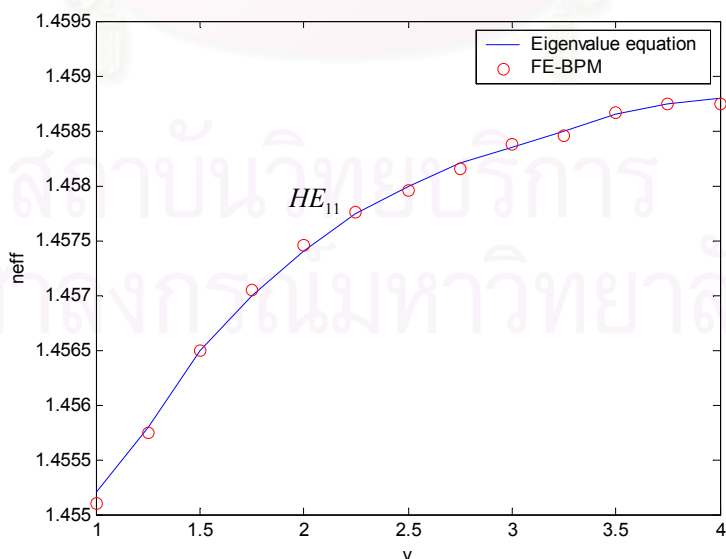
รูปที่ 2.13 ขนาดสนามไฟฟ้าแนวแกน z ในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานระยะ 1000 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานที่ระยะ 1000 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าตามขวางส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานในรูปที่ 2.12 แต่มีสนามไฟฟ้าบางส่วนสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้บ้างตามกฎของสเนลล์สนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 1000 ไมโครเมตร ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.61 ในรูปที่ 2.13 และสามารถสรุปความสัมพันธ์ของขนาดสนามไฟฟ้าตามแนวแกน z กับระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ขนาดสนามไฟฟ้าแนวแกน z ในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานที่ระยะทางต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z กับระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ระยะทางต่างๆสามารถสรุปได้ว่าเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ก็จะลดลงเร็วช่วงระยะทาง 0-2000 ไมโครเมตร แล้วจะลดลงช้าช่วงระยะทาง 2000-4000 ไมโครเมตร ต่อไปจะทดสอบความถูกต้องของวิธี Exact solution กับวิธี FE-BPM (finite element beam propagation method) โดยการคำนวณประสิทธิภาพของคลื่นแสงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานดังรูปที่ 2.15



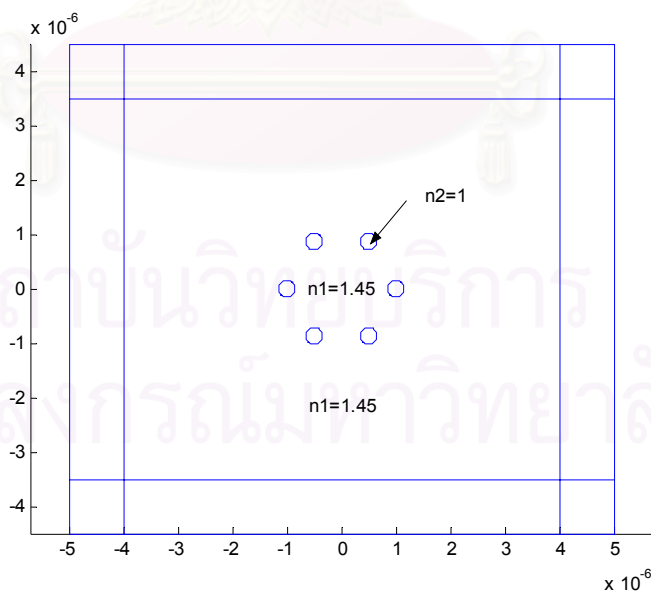
รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Exact solution กับวิธี FEM-BPM

จากรูปที่ 2.15 เป็นการเปรียบเทียบแบบแผนคลื่นนำโหมดแรก (HE_{11}) ของเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐานด้วยวิธี Exact solution กับวิธี FE-BPM จะสังเกตเห็นว่าคลื่นแสงจะนำแสงในเส้นใยนำแบบมาตรฐานช่วงระหว่างดรรชนีหักเหของแกน ($n=1.46$) กับดรรชนีของวัสดุหุ้ม ($n=1.455$) เมื่อค่า v มีค่าเพิ่มขึ้นค่าดรรชนีประสิทธิผลจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่ง v เท่ากับ 3.5 และ 4 ค่าดรรชนีประสิทธิผลจะเริ่มคงที่ การเปรียบเทียบระหว่างวิธีแบบ Exact solution กับวิธี FE-BPM วิธีคำนวณแบบ FE-BPM ให้ผลใกล้เคียงกับวิธีแบบ Exact solution จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธี FE-BPM สามารถนำมาใช้กับเส้นใยนำแสงประเภทต่างๆ ได้อย่างถูกต้อง

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนวงของ PCF กับสนามไฟฟ้า

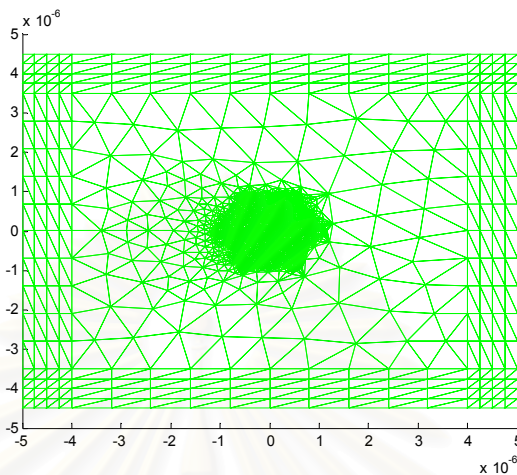
2.5.1 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงกลม (PCF) 1 วง

เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงกลมที่มีรูอากาศจัดเรียงคล้ายรวงผึ้ง 1 วง บริเวณตรงกลางเรียกว่าแกนซึ่งค่าดรรชนีหักเห $n_1 = 1.45$ และรูอากาศรูปวงกลมมีรัศมีเท่ากับ 0.1545 ไมโครเมตรซึ่งมีค่าดรรชนีหักเห $n_2 = 1$ นอกบริเวณของแกนทั้งหมดเรียกว่าวัสดุหุ้มซึ่งมีค่าดรรชนีหักเหเท่ากับแกน เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลถูกล้อมรอบด้วยวัสดุคูกคลื่นแบบ PML ดังรูป 2.16



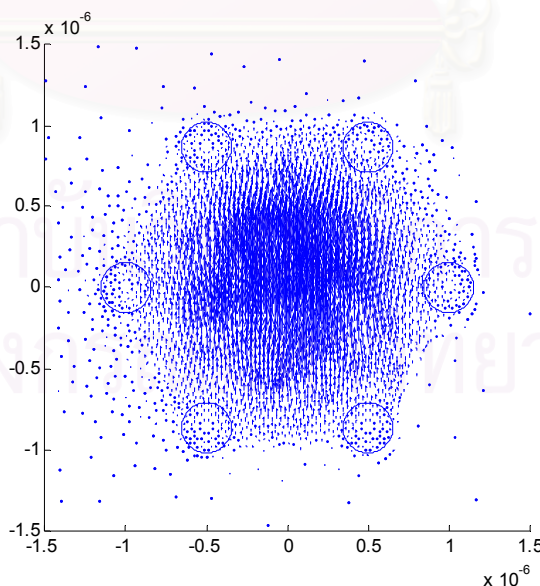
รูปที่ 2.16 ภาคตัดขวางในระนาบ xy ของ PCF 1 วง

เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมในแต่ละบริเวณเพื่อนำมาคำนวณสนามไฟฟ้าตามขวางและขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพาเกชันดังรูป 2.17



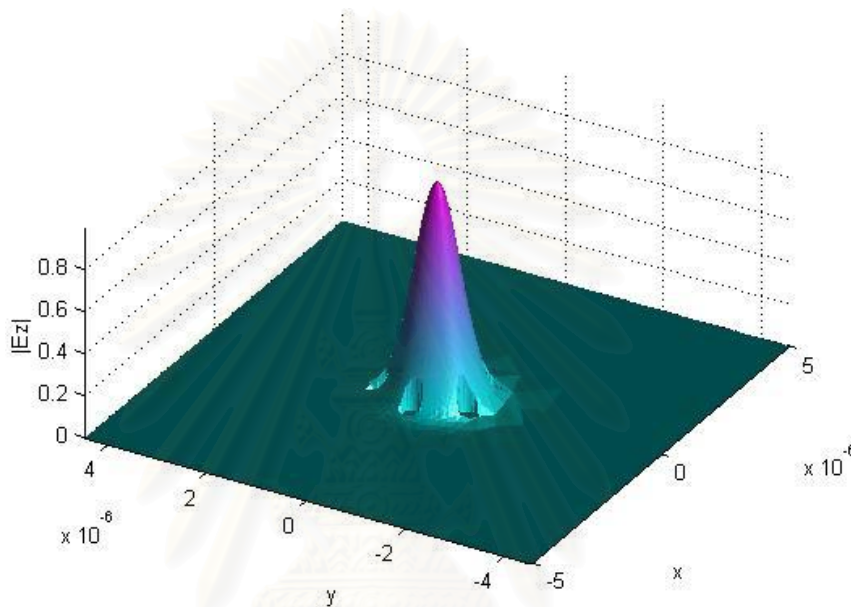
รูปที่ 2.17 การแบ่งอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมใน PCF 1 วง

เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าอินพุตดังรูป 2.18 กำหนดให้สนามไฟฟ้า \vec{E}_y อยู่ในรูปเกาส์เซียนมีขนาดจุด (spotsizes) เท่ากับ 0.7 ไมโครเมตร ให้สนามไฟฟ้า $\vec{E}_x = 0$ โดยมีระยะชั้นการคำนวณ $\Delta z = 1$ ไมโครเมตร ความยาวคลื่นแสง 0.625 ไมโครเมตร ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าตามขวางและขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะทางต่างๆมีดังนี้



รูปที่ 2.18 สนามไฟฟ้าอินพุตใน PCF 1 วง

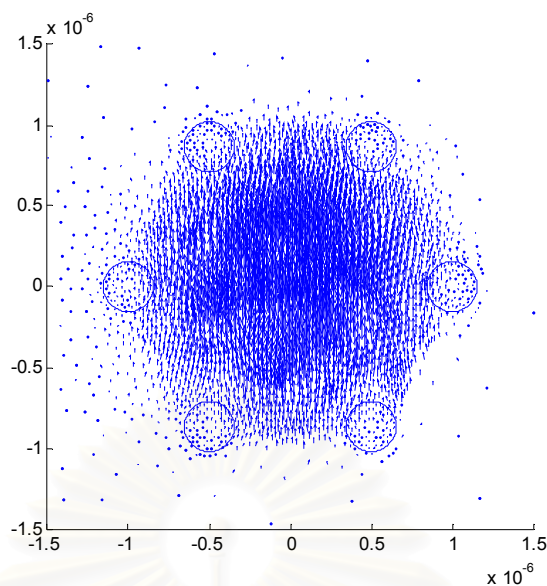
เนื่องจากเส้นใยแสงโฟโตนิกคริสตัลมี 2 แบบแผนคลื่นคือ แบบแผนคลื่นนำและแบบแผนคลื่นรั่ว ดังนั้นแบบแผนคลื่นนำจะอยู่แกนและแบบแผนคลื่นรั่วจะอยู่บริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่ติดกัน จะสังเกตว่าสนามไฟฟ้าอินพุตตามขวางใน PCF 1 วงแกนกลางจะมีความเข้มมากและมีสนามไฟฟ้าบางส่วนอยู่บริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่ติดกันมีความเข้มน้อยและบริเวณรูอากาศจะมีความเข้มน้อยมากดังรูปที่ 2.18 และสามารถคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าแนวแกน z ดังรูปที่ 2.19



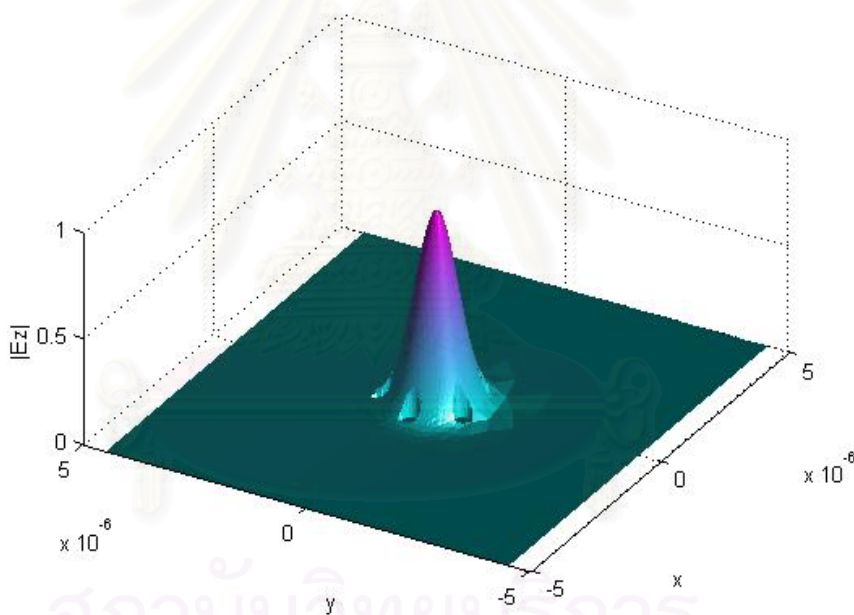
รูปที่ 2.19 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ใน PCF 1 วง

ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ในเส้นใยนำแสง PCF 1 วง กำหนดให้มีขนาดของสนามไฟฟ้าเท่ากับ 1 ที่แกนกลางของ PCF จะสังเกตว่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรูอากาศมีขนาดน้อยมากถือว่ามีค่าเป็นศูนย์จึงเห็นเป็นลักษณะเป็นโพรงยุบลงไป จากนั้นได้คำนวณสนามไฟฟ้าตามขวางและขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะทางต่างดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

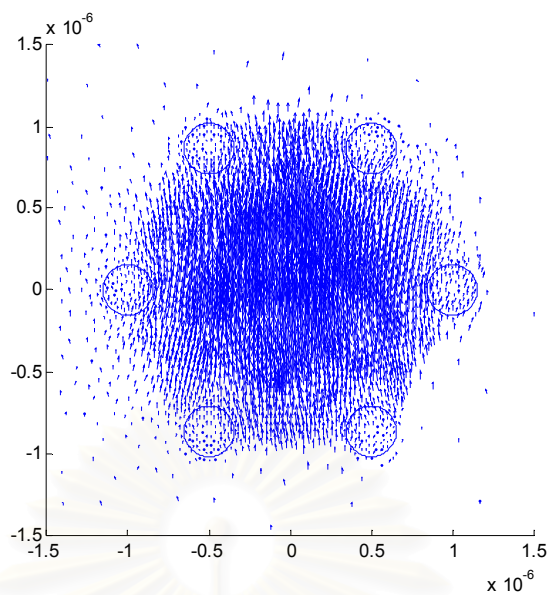


รูปที่ 2.20 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 1 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร

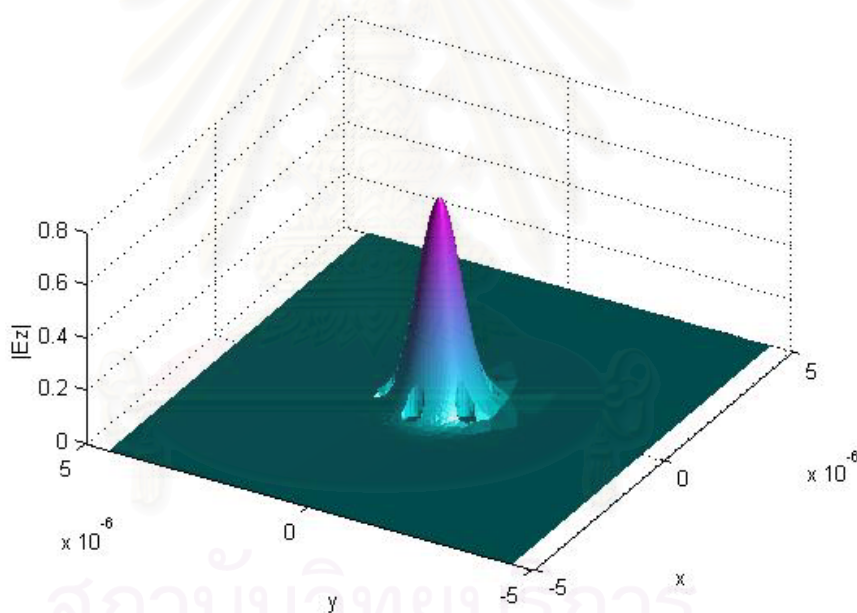


รูปที่ 2.21 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 1 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF ที่ระยะ 10 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF 1 วง ดังรูปที่ 2.20 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 10 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.98 ดังรูปที่ 2.21

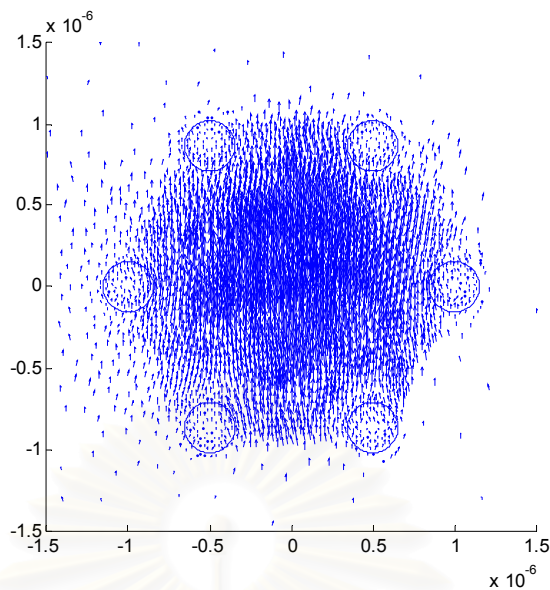


รูปที่ 2.22 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 1 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร

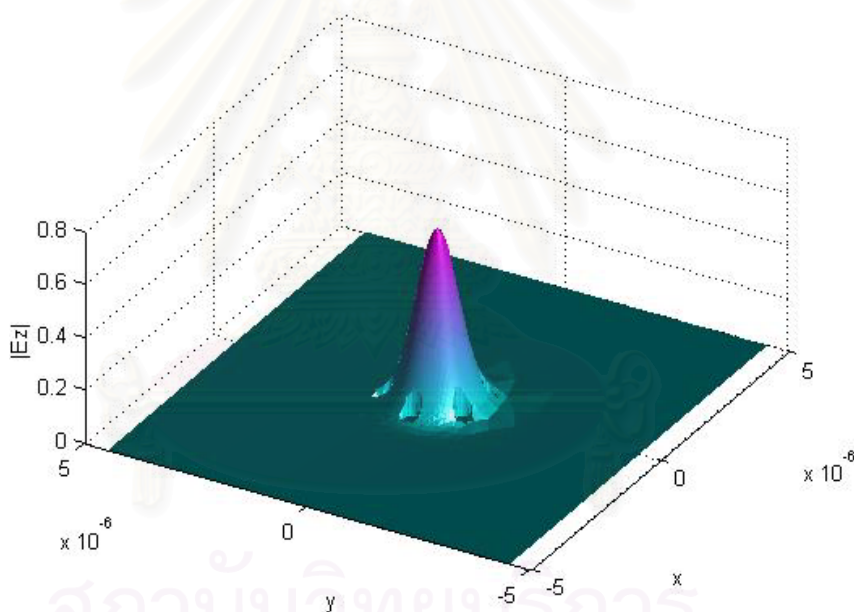


รูปที่ 2.23 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 1 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF ที่ระยะ 50 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF 1 วง ดังรูปที่ 2.22 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 50 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.94 ดังรูปที่ 2.23

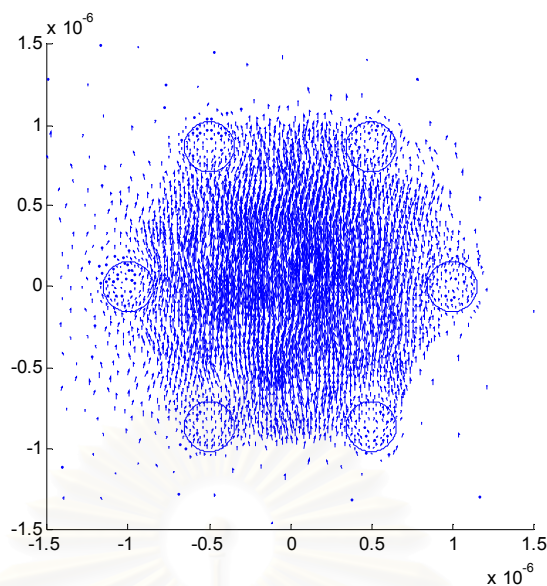


รูปที่ 2.24 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 1 วง รัศยะ 100 ไมโครเมตร

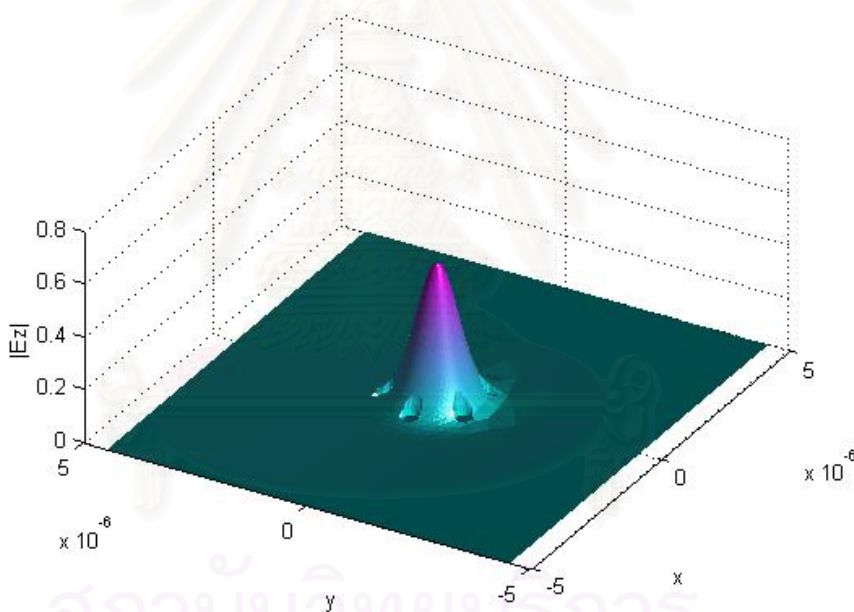


รูปที่ 2.25 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 1 วง รัศยะ 100 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF ที่รัศยะ 100 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF 1 วง ดังรูปที่ 2.24 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั้วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั้วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่รัศยะ 100 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.89 ดังรูปที่ 2.25

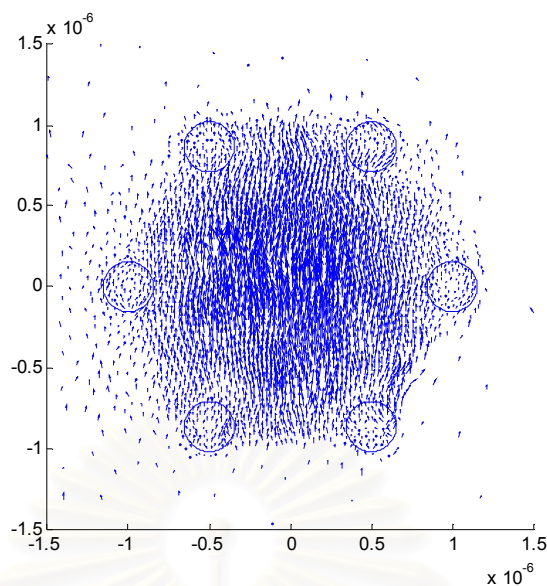


รูปที่ 2.26 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 1 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร

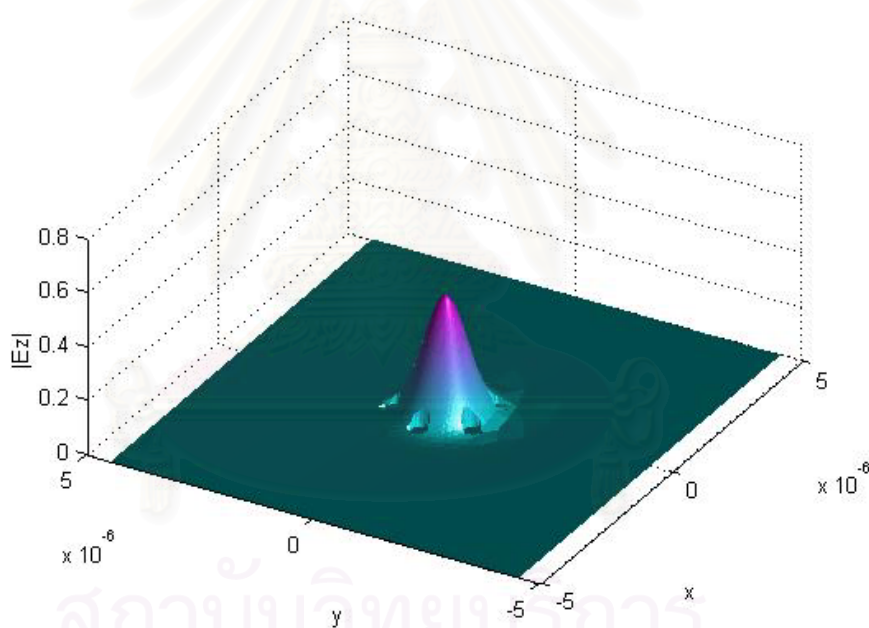


รูปที่ 2.27 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 1 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF ที่ระยะ 250 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF 1 วง ดังรูปที่ 2.26 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 250 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.83 ดังรูปที่ 2.27

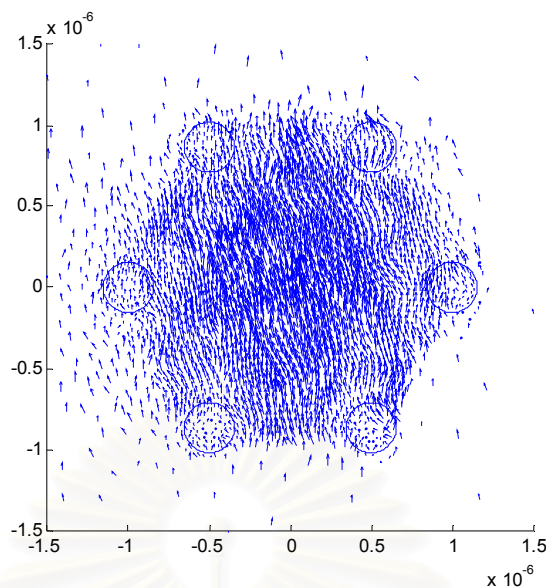


รูปที่ 2.28 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 1 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร

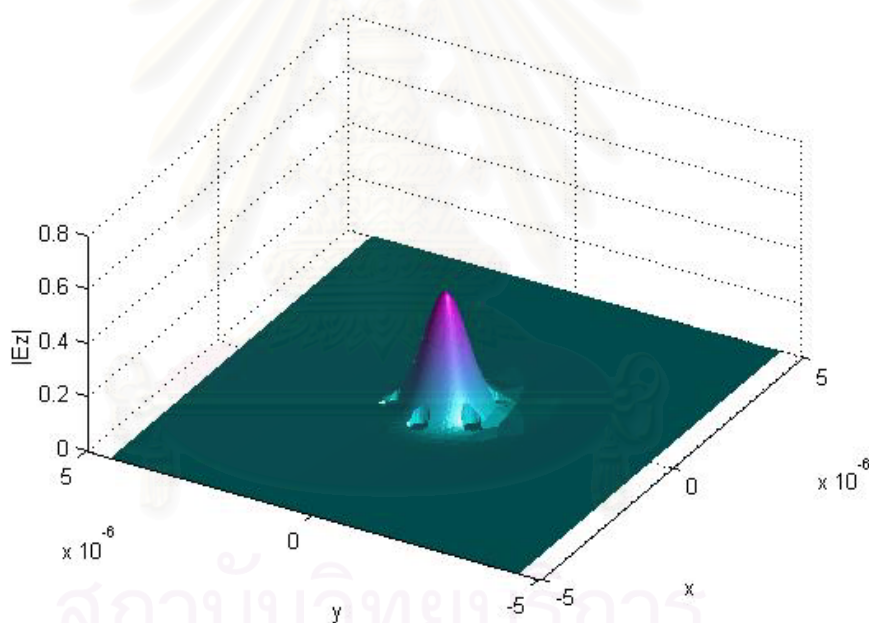


รูปที่ 2.29 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 1 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF ที่ระยะ 500 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF 1 วง ดังรูปที่ 2.28 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 500 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.70 ดังรูปที่ 2.29

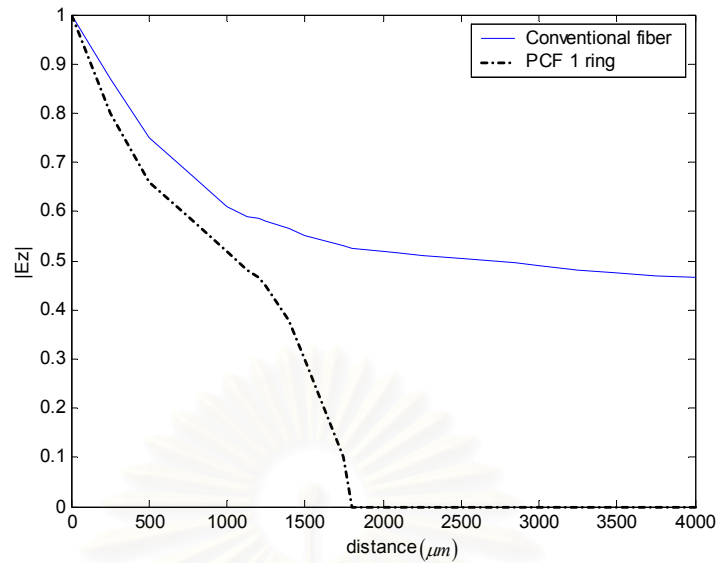


รูปที่ 2.30 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 1 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร



รูปที่ 2.31 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 1 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF ที่ระยะ 1000 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF 1 วง ดังรูปที่ 2.30 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 1000 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.59 ดังรูปที่ 2.31 และสามารถสรุปความสัมพันธ์ของขนาดสนามไฟฟ้าตามแนวแกน z กับระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ได้ดังรูปที่ 2.32

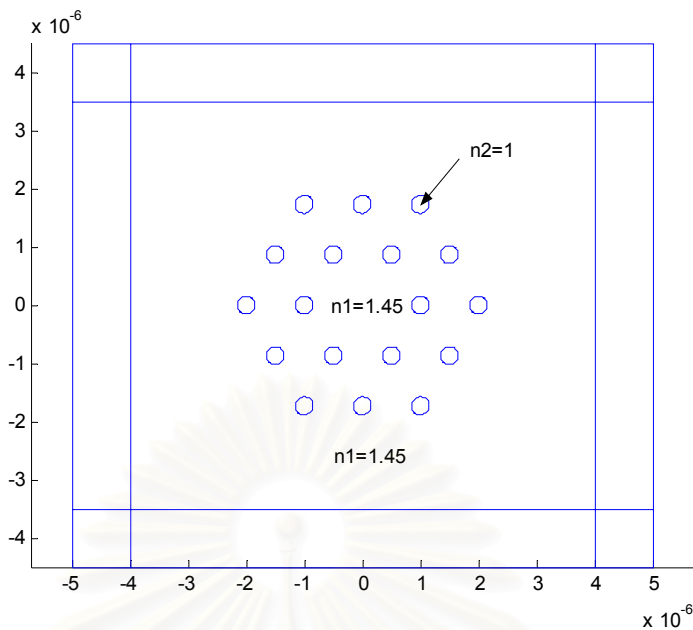


รูปที่ 2.32 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 1 วง ที่ระยะทางต่างๆ

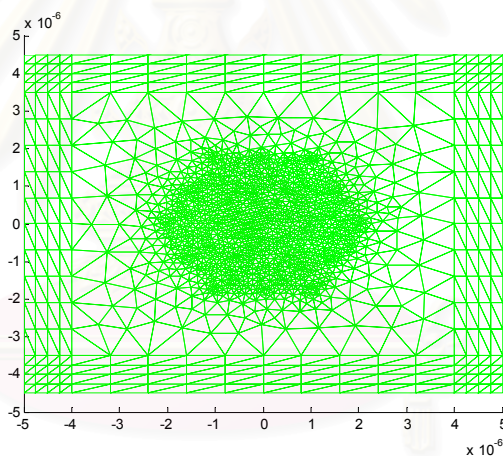
จากรูปที่ 2.32 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 1 วง จะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าเป็นเท่ากับศูนย์ที่ระยะ 1800 ไมโครเมตร เนื่องจาก PCF เพียง 1 วง ไม่สามารถกักคลื่นแสงได้ตลอดระยะทางการเคลื่อนที่เพราะคลื่นแสงจะรั่วออกจากบริเวณระหว่างรูอากาศตลอดเวลา

2.5.2 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงกลม (PCF) 2 วง

เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงกลมที่มีรูอากาศจัดเรียงคล้ายรวงผึ้ง 2 วง มี 18 รูอากาศ บริเวณตรงกลางเรียกว่าแกนซึ่งค่าดัชนีหักเห $n_1 = 1.45$ และรูอากาศรูปวงกลมมีรัศมีเท่ากับ 0.1545 ไมโครเมตรซึ่งมีค่าดัชนีหักเห $n_2 = 1$ นอกบริเวณของแกนทั้งหมดเรียกว่าวัสดุหุ้ม เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลถูกล้อมรอบด้วยวัสดุเคลือบคลื่นแบบ PML ขนาด 5×5 ไมโครเมตร ดังรูป 2.33 เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมในแต่ละบริเวณเพื่อนำมาคำนวณหาสนามไฟฟ้าตามขวางและขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพาเกชันดังรูปที่ 2.34

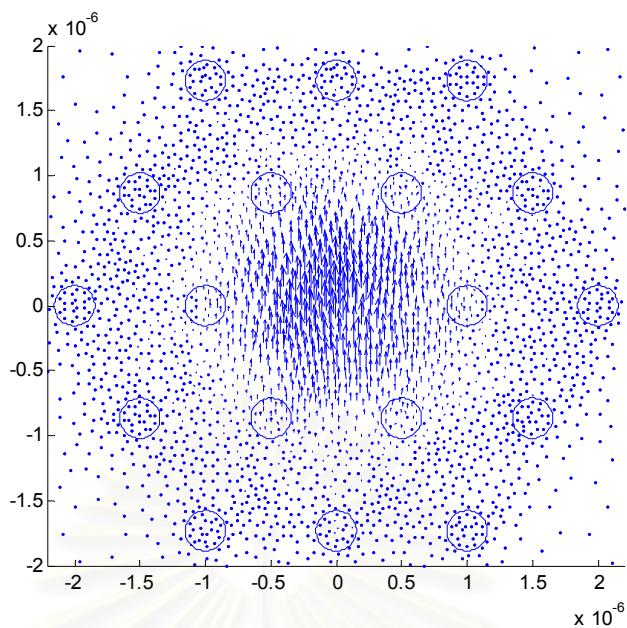


รูปที่ 2.33 ภาคตัดขวางในระนาบ xy ของ PCF 2 วง

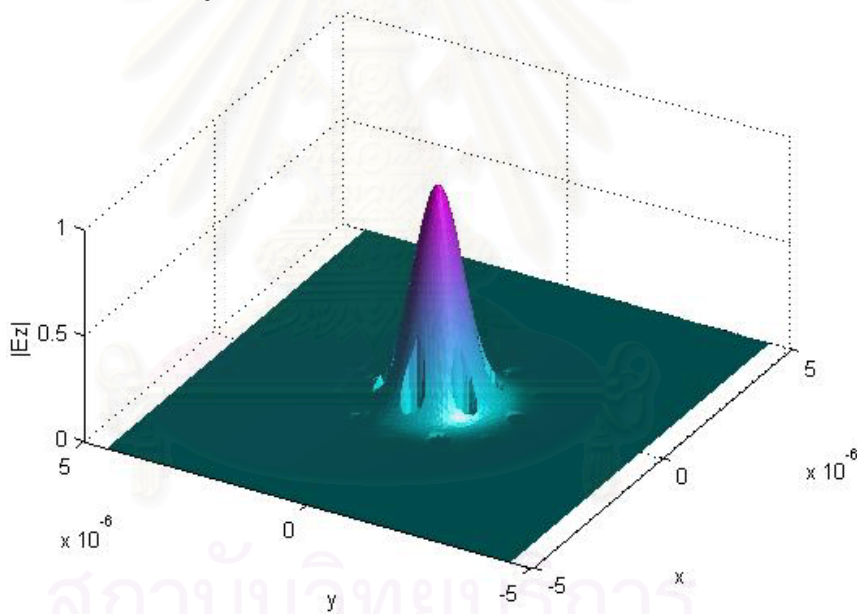


รูปที่ 2.34 การแบ่งอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมใน PCF 2 วง

เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าอินพุตดังรูป 2.35 กำหนดให้สนามไฟฟ้า \vec{E}_y อยู่ในรูปเกาส์เซียนมีขนาดจุด (spotsizes) เท่ากับ 0.7 ไมโครเมตร ให้ สนามไฟฟ้า $\vec{E}_x = 0$ โดยมีระยะชั้นการคำนวณ $\Delta z = 1$ ไมโครเมตร ความยาวคลื่นแสง 0.625 ไมโครเมตร ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าตามขวางและขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะทางต่างๆมีดังนี้

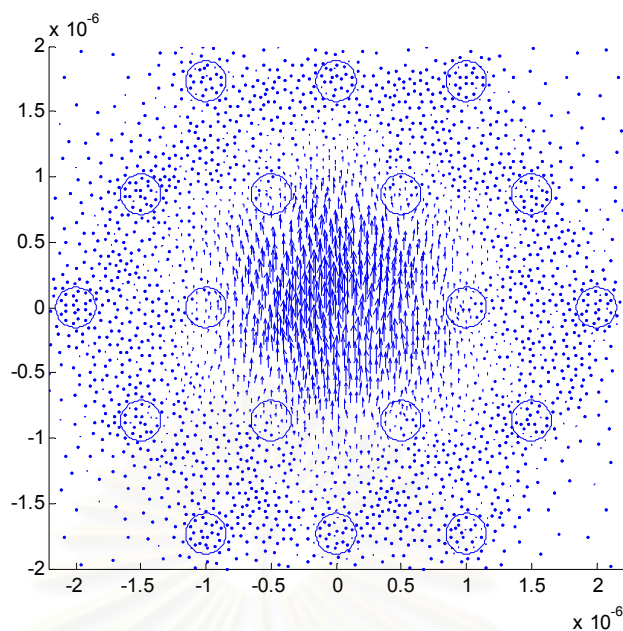


รูปที่ 2.35 สนามไฟฟ้าอินพุตใน PCF 2 วง

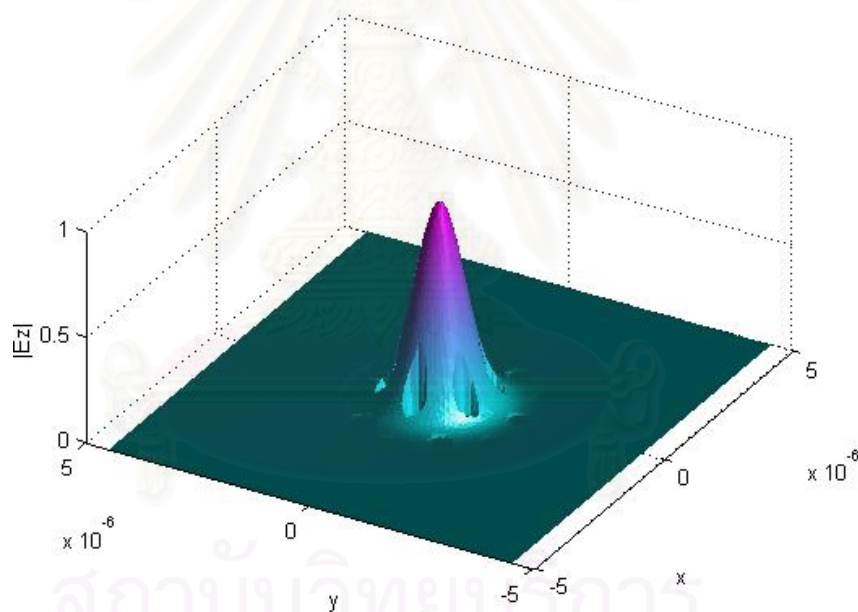


รูปที่ 2.36 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ใน PCF 2 วง

ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ในเส้นใยนำแสง PCF 2 วง กำหนดให้มีขนาดของสนามไฟฟ้าเท่ากับ 1 ที่แกนกลางของ PCF จะสังเกตว่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรูอากาศมีขนาดน้อยมากถือว่ามีค่าเป็นศูนย์จึงเห็นเป็นลักษณะเป็นโพรงยุบลงไป 2 วง จากนั้นได้คำนวณสนามไฟฟ้าตามขวางและขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะทางต่างดังนี้

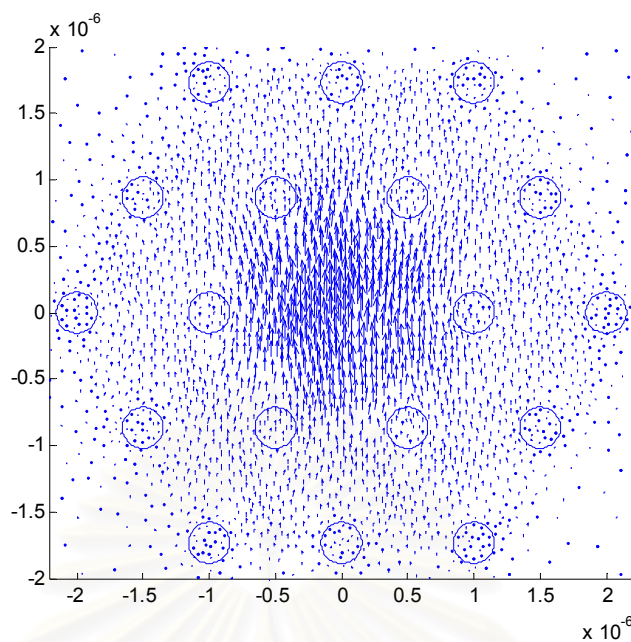


รูปที่ 2.37 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 2 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร

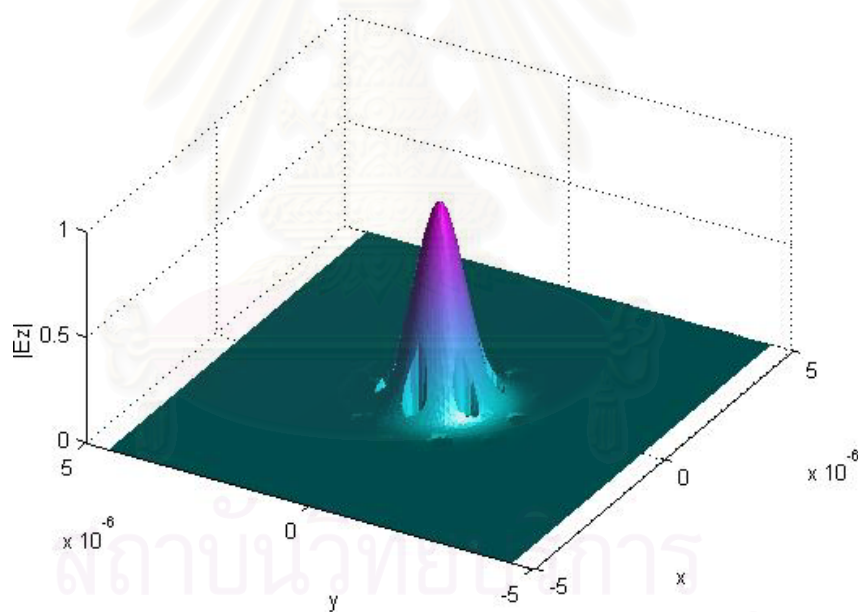


รูปที่ 2.38 ขนาดของสนามไฟฟ้าในแนวแกน z ใน PCF 2 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF ที่ระยะ 10 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF 2 วง ดังรูปที่ 2.37 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 10 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.985 ดังรูปที่ 2.38

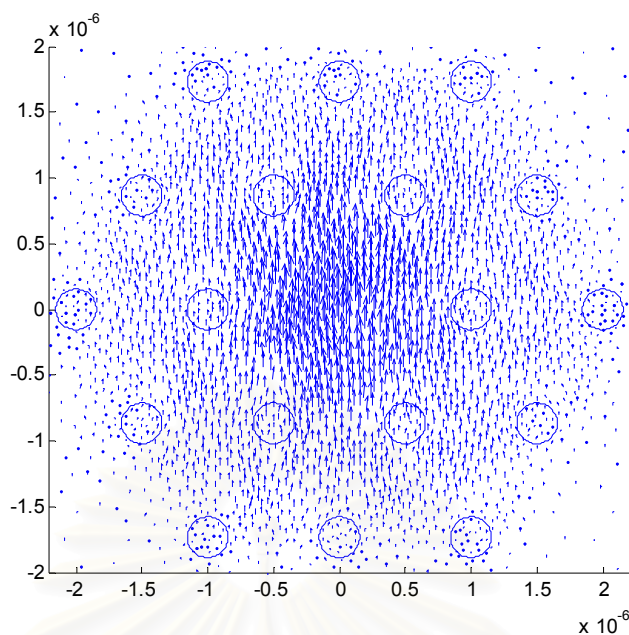


รูปที่ 2.39 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 2 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร

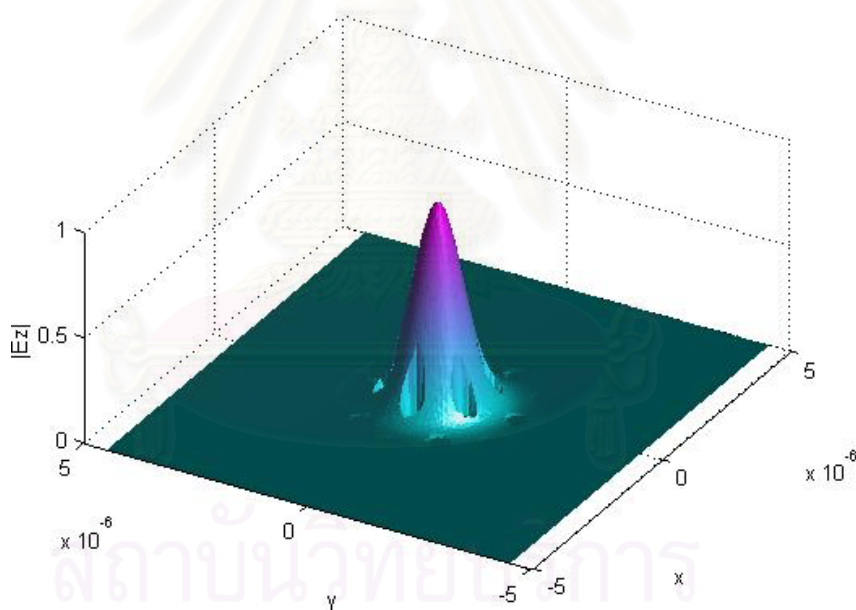


รูปที่ 2.40 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ใน PCF 2 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF ที่ระยะ 50 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF 2 วง ดังรูปที่ 2.39 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 50 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.95 ดังรูปที่ 2.40

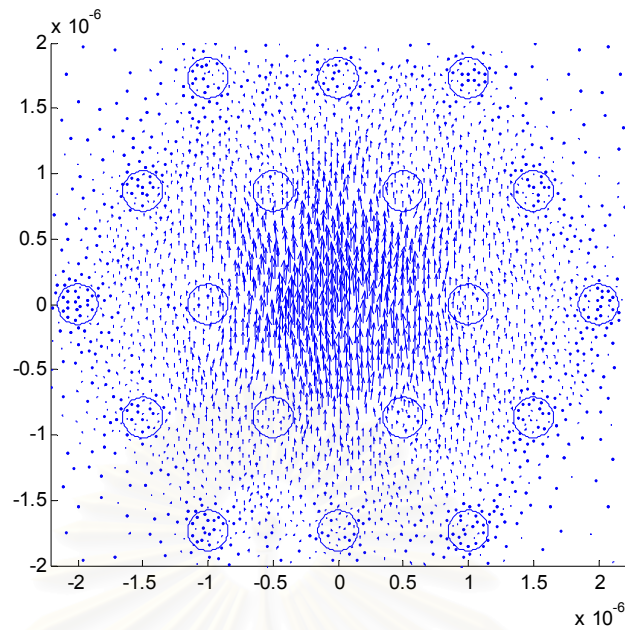


รูปที่ 2.41 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 2 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร

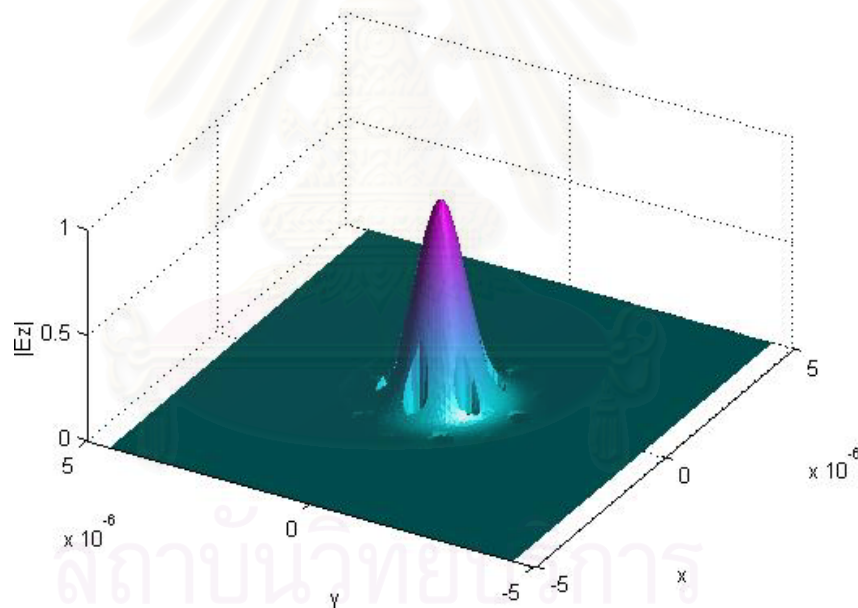


รูปที่ 2.42 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ใน PCF 2 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF ที่ระยะ 100 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF 2 วง ดังรูปที่ 2.41 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 100 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.90 ดังรูปที่ 2.40

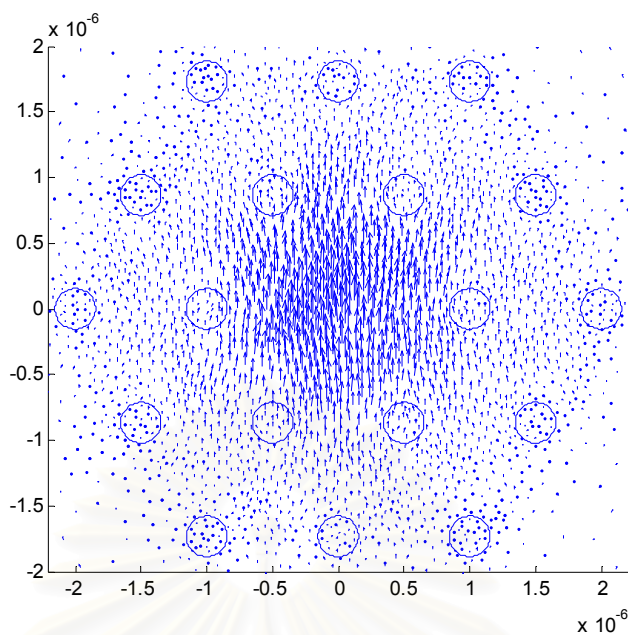


รูปที่ 2.43 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 2 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร

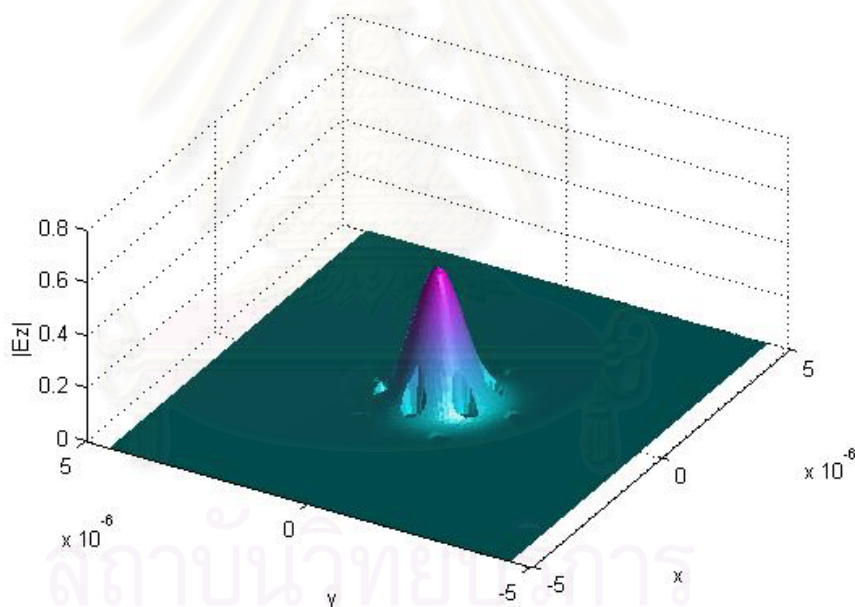


รูปที่ 2.44 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ใน PCF 2 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF ที่ระยะ 250 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF 2 วง ดังรูปที่ 2.43 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั้วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 250 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.84 ดังรูปที่ 2.44

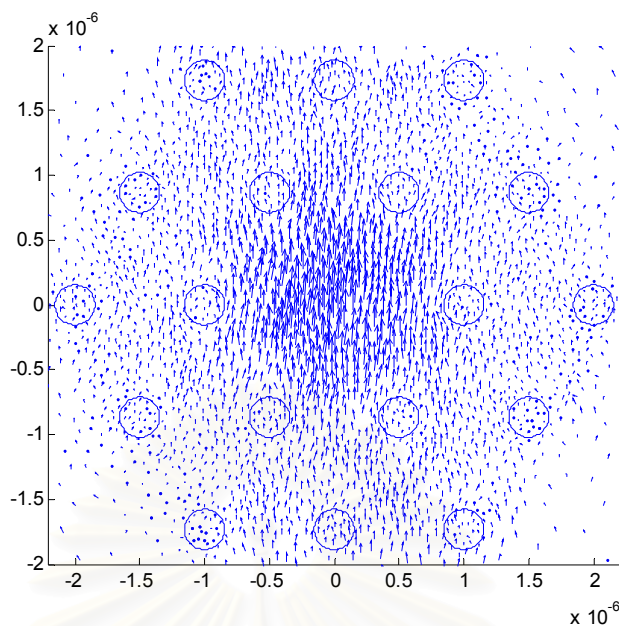


รูปที่ 2.45 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 2 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร

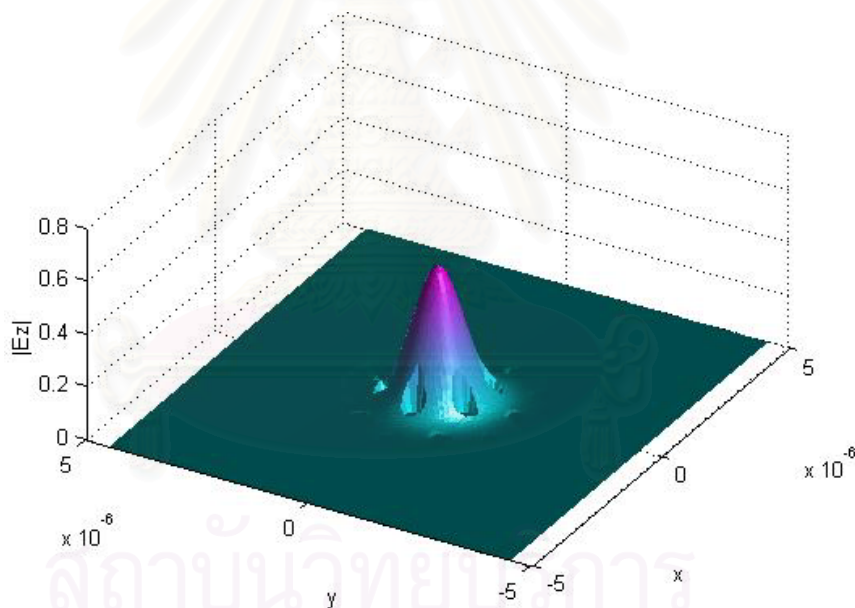


รูปที่ 2.46 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ใน PCF 2 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF ที่ระยะ 500 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF 2 วง ดังรูปที่ 2.45 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั้วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 500 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.72 ดังรูปที่ 2.46

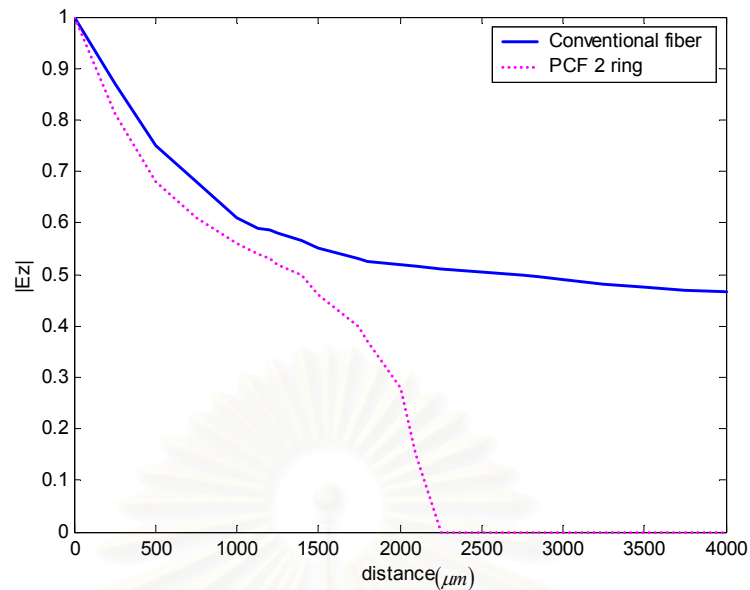


รูปที่ 2.47 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 2 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร



รูปที่ 2.48 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ใน PCF 2 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF ที่ระยะ 1000 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF 2 วง ดังรูปที่ 2.47 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรบกวนจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 1000 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.6 ดังรูปที่ 2.48 และสามารถสรุปความสัมพันธ์ของขนาดสนามไฟฟ้าตามแนวแกน z กับระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ได้ดังรูปที่ 2.49

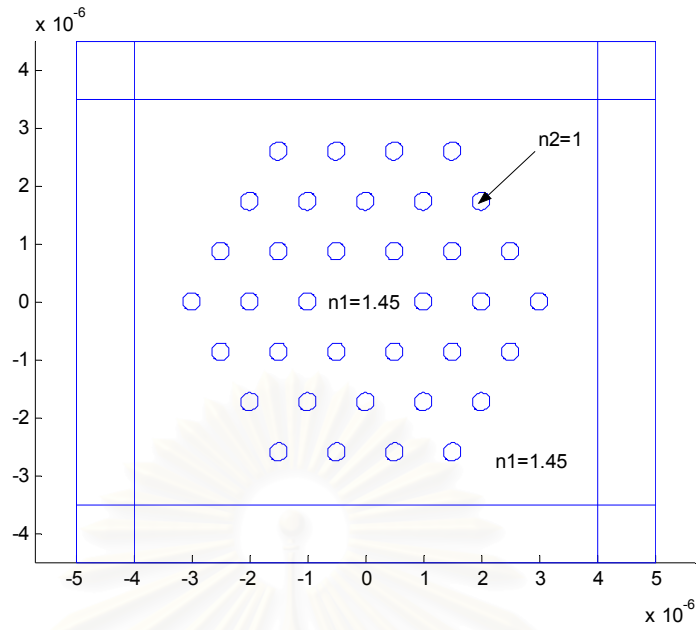


รูปที่ 2.49 ขนาดสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 2 วงที่ระยะทางต่างๆ

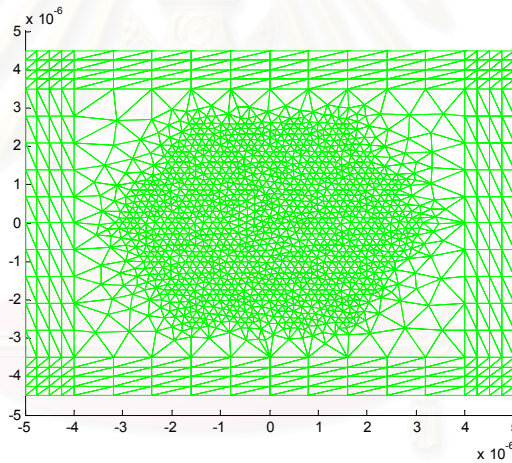
จากรูปที่ 2.49 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 2 วง จะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าเป็นเท่ากับศูนย์ที่ระยะ 2250 ไมโครเมตร เนื่องจาก PCF เพียง 2 วง ไม่สามารถกักคลื่นแสงได้ตลอดระยะทางการเคลื่อนที่เพราะคลื่นแสงจะรั่วออกจากบริเวณระหว่างรูอากาศตลอดเวลา

2.5.3 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงกลม (PCF) 3 วง

เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงกลมที่มีรูอากาศจัดเรียงคล้ายรวงผึ้ง 3 วง 36 รูอากาศบริเวณตรงกลางเรียกว่าแกน ซึ่งค่าดัชนีหักเห $n_1 = 1.45$ และรูอากาศรูปวงกลมมีรัศมีเท่ากับ 0.1545 ไมโครเมตรซึ่งมีค่าดัชนีหักเห $n_2 = 1$ นอกบริเวณของแกนทั้งหมดเรียกว่าวัสดุหุ้ม เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลถูกล้อมรอบด้วยวัสดุเคลือบคลื่นแบบ PML ขนาด 5×5 ไมโครเมตร ดังรูป 2.50 เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมในแต่ละบริเวณเพื่อนำมาคำนวณโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพากชันดังรูป 2.51

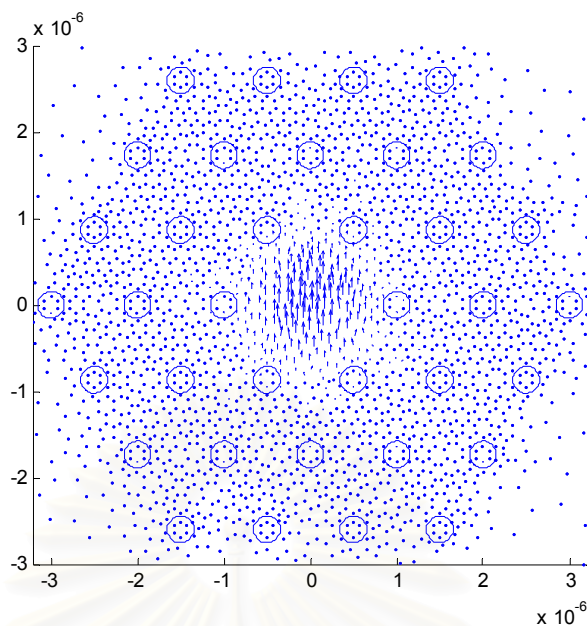


รูปที่ 2.50 ภาคตัดขวางในระนาบ xy ของ PCF 3 ชั้น

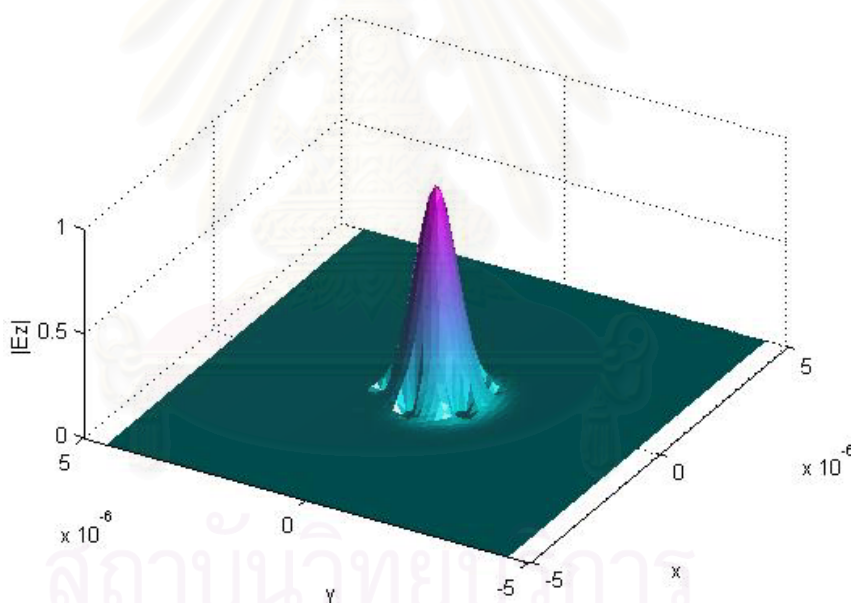


รูปที่ 2.51 การแบ่งอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมใน PCF 3 ชั้น

เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าอินพุตดังรูป 2.52 กำหนดให้สนามไฟฟ้า \vec{E}_y อยู่ในรูปเกาส์เซียนมีขนาดจุด (spotsizes) เท่ากับ 0.6 ไมโครเมตร ให้ สนามไฟฟ้า $\vec{E}_x = 0$ โดยมีระยะชั้นการคำนวณ $\Delta z = 1$ ไมโครเมตร ความยาวคลื่นแสง 0.625 ไมโครเมตร ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าตามขวางและขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะทางต่างๆมีดังนี้

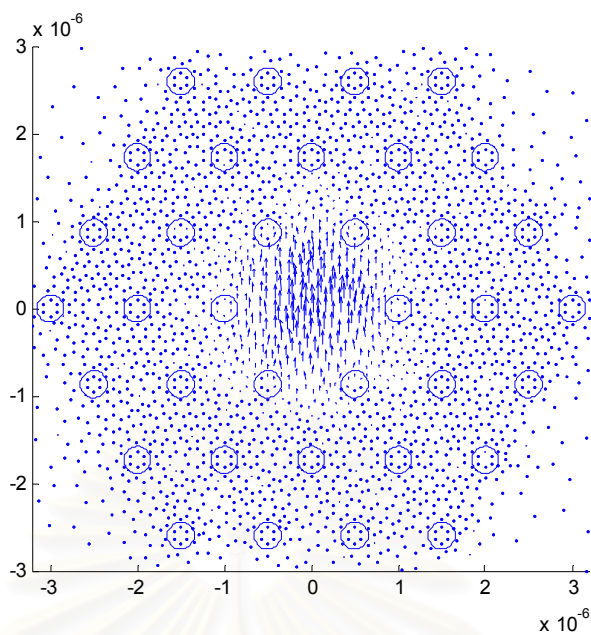


รูปที่ 2.52 สนามไฟฟ้าอินพุตใน PCF 3 วง

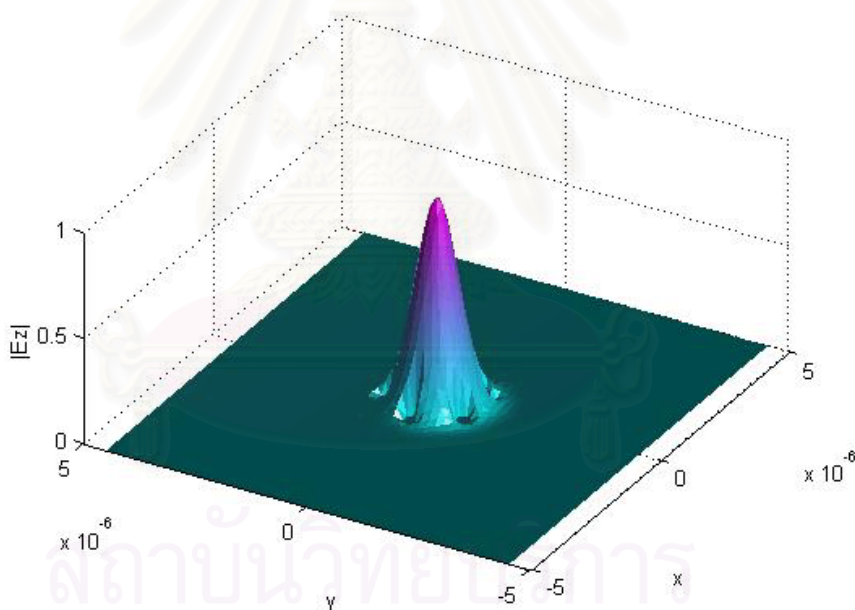


รูปที่ 2.53 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตในแกน z ใน PCF 3 วง

ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ในเส้นใยนำแสง PCF 3 วง กำหนดให้มีขนาดของสนามไฟฟ้าเท่ากับ 1 ที่แกนกลางของ PCF จะสังเกตว่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรูอากาศมีขนาดน้อยมากถือว่ามีค่าเป็นศูนย์จึงเห็นเป็นลักษณะเป็นโพรงยุบลงไป 1 วง เท่านั้น เพราะแสงถูกกักได้มากกว่า PCF 1 วงและ PCF 2 วง จึงไม่สามารถเห็นโพรงยุบวงที่ 2 และ 3 จากนั้นได้คำนวณสนามไฟฟ้าตามขวางและขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะทางต่างๆดังนี้

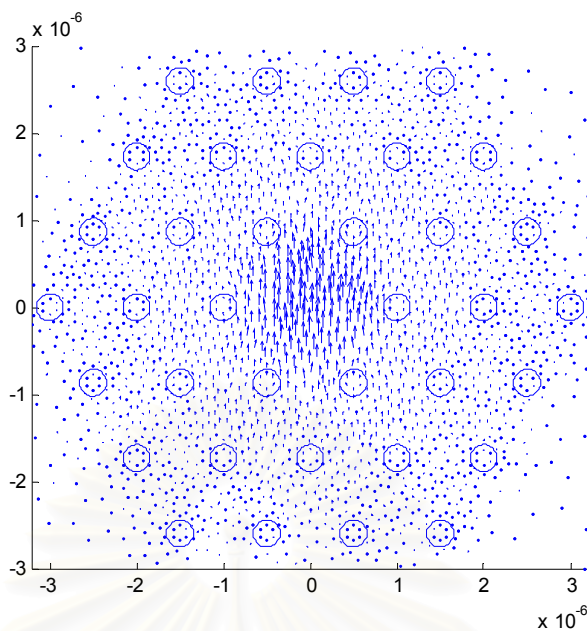


รูปที่ 2.54 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 3 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร

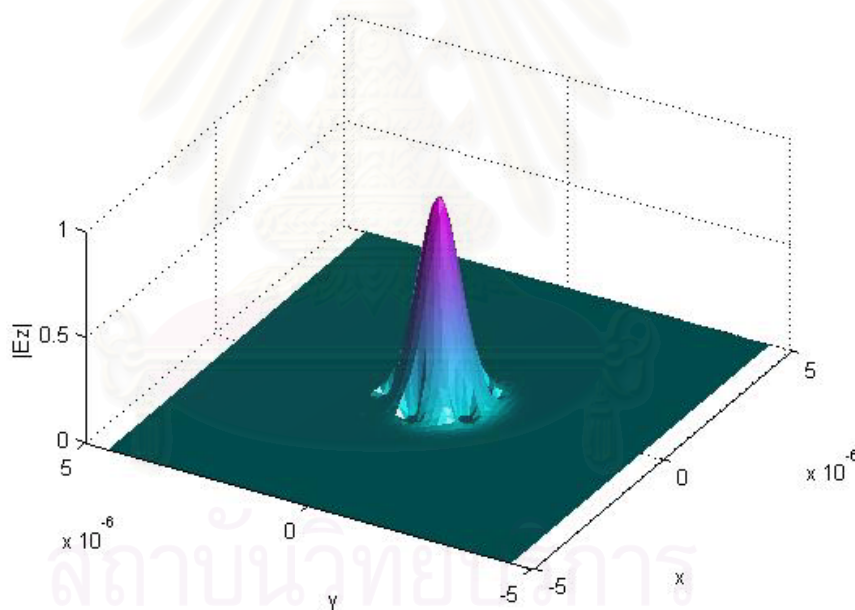


รูปที่ 2.55 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตในแกน z ใน PCF 3 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF ที่ระยะ 10 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF 3 วง ดังรูปที่ 2.54 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั้วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 10 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.99 ดังรูปที่ 2.55

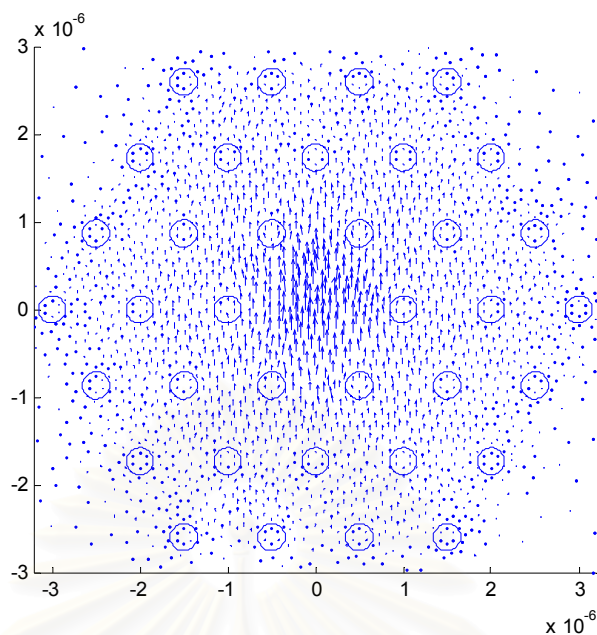


รูปที่ 2.56 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 3 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร

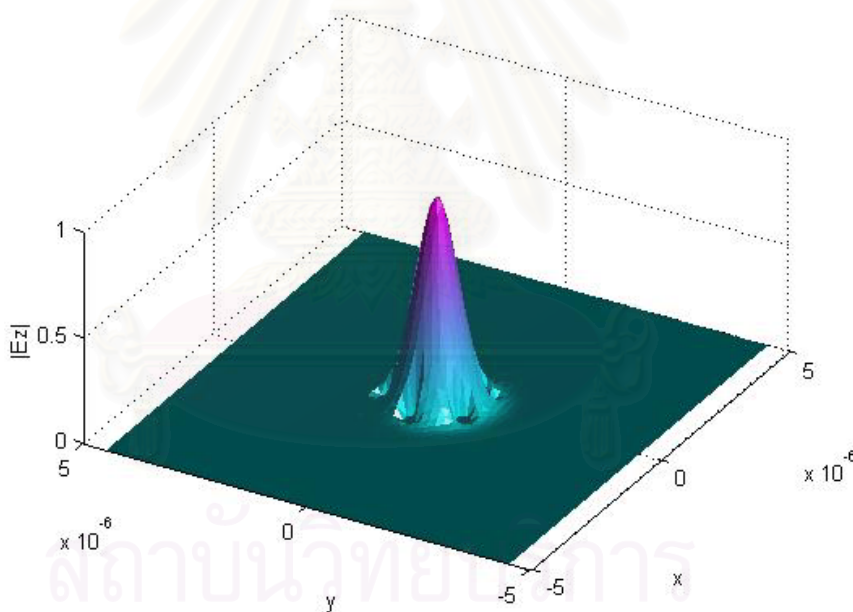


รูปที่ 2.57 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตในแกน z ใน PCF 3 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF ที่ระยะ 50 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF 3 วง ดังรูปที่ 2.56 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 50 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.965 ดังรูปที่ 2.57

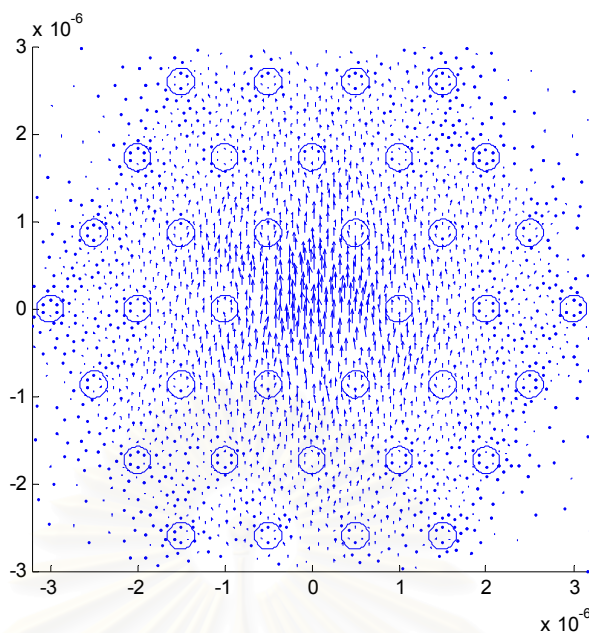


รูปที่ 2.58 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 3 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร

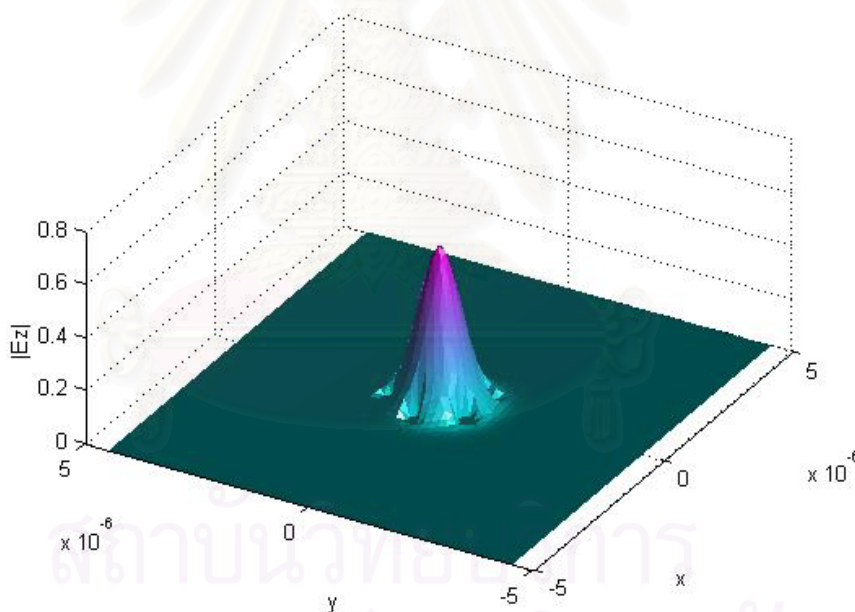


รูปที่ 2.59 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตในแกน z ใน PCF 3 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF ที่ระยะ 100 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF 3 วง ดังรูปที่ 2.58 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 100 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.92 ดังรูปที่ 2.59

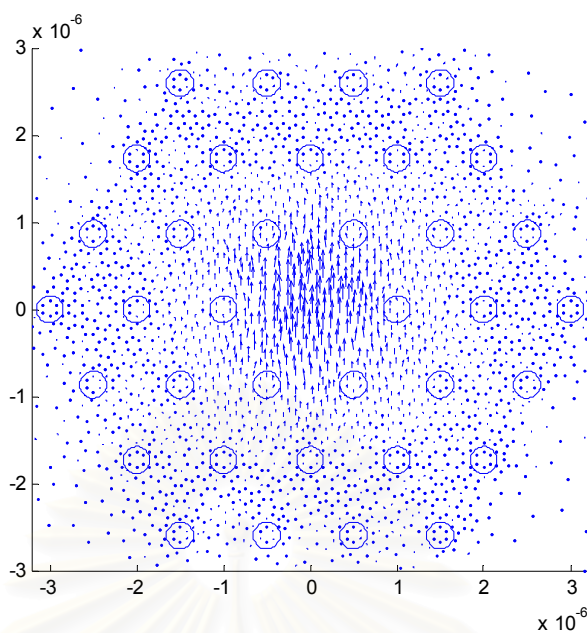


รูปที่ 2.60 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 3 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร

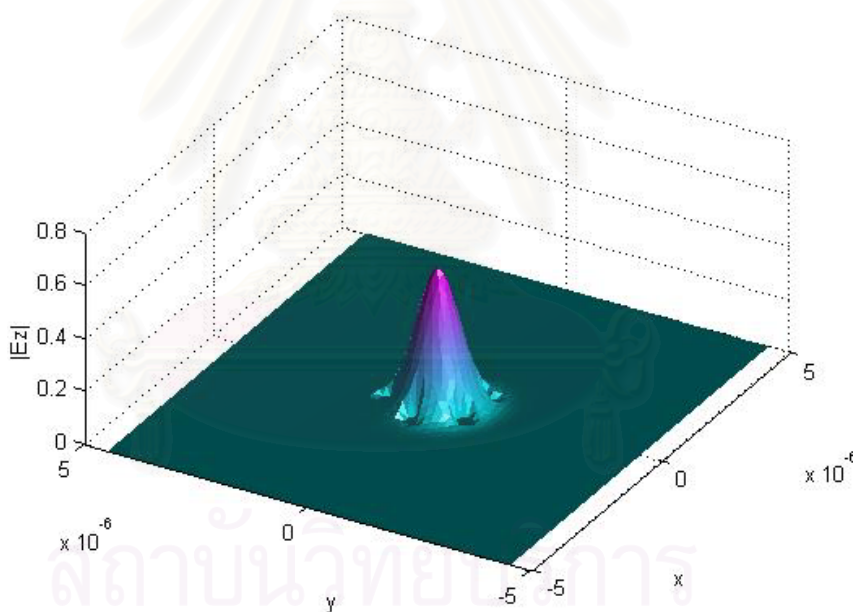


รูปที่ 2.61 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตในแกน z ใน PCF 3 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF ที่ระยะ 250 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF 3 วง ดังรูปที่ 2.60 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั้วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 250 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.85 ดังรูปที่ 2.61

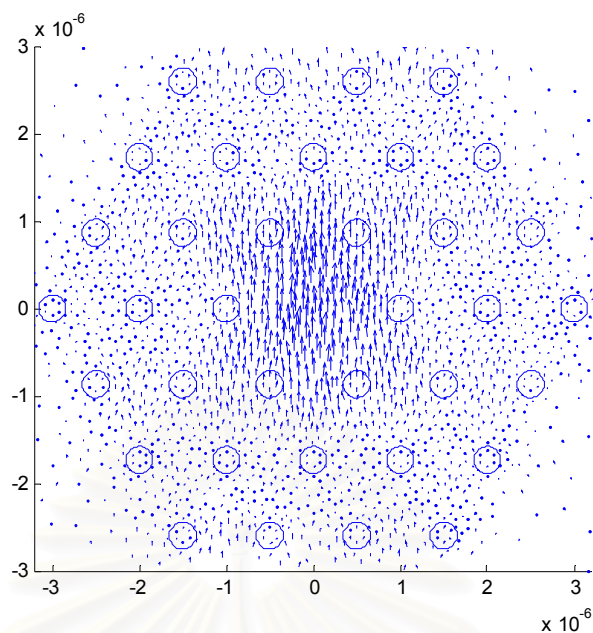


รูปที่ 2.62 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 3 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร

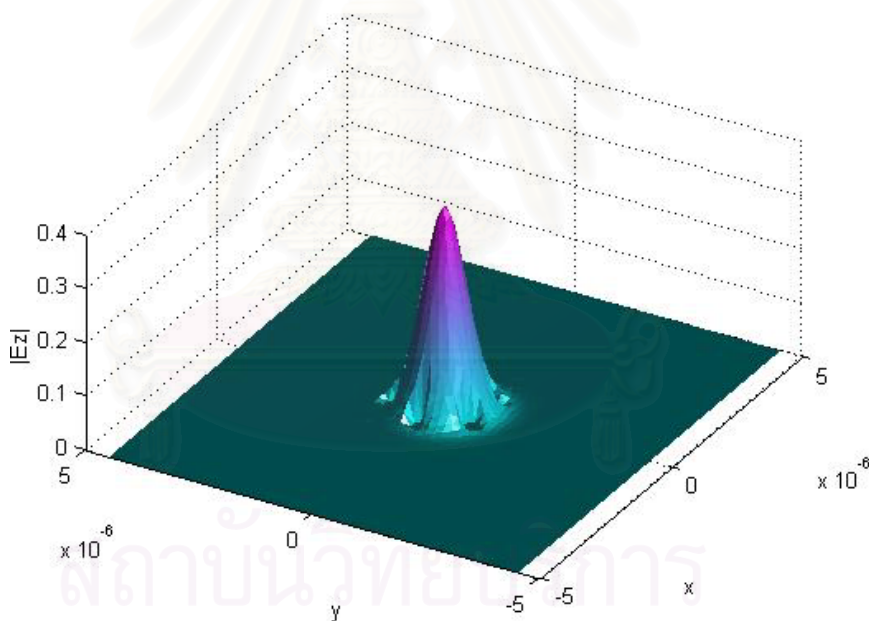


รูปที่ 2.63 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตในแกน z ใน PCF 3 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF ที่ระยะ 500 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF 3 วง ดังรูปที่ 2.62 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 500 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.74 ดังรูปที่ 2.63



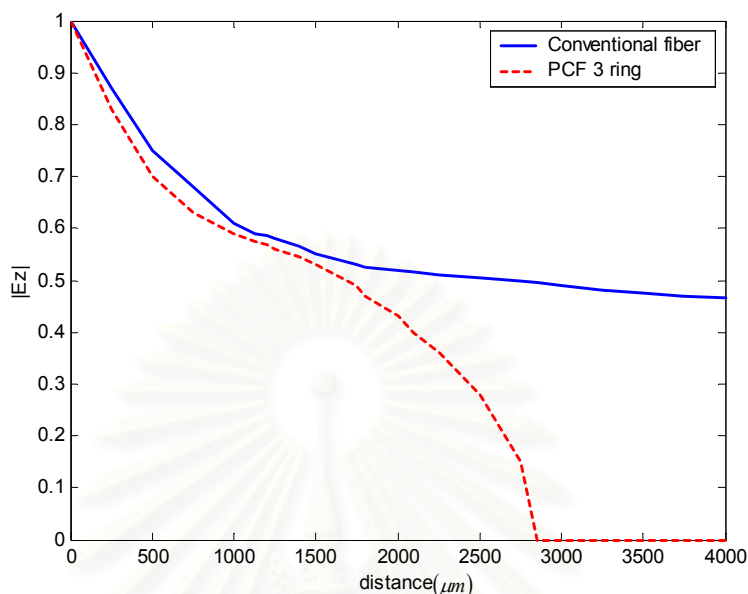
รูปที่ 2.64 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF 3 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร



รูปที่ 2.65 ขนาดของสนามไฟฟ้าในแกน z ใน PCF 3 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร

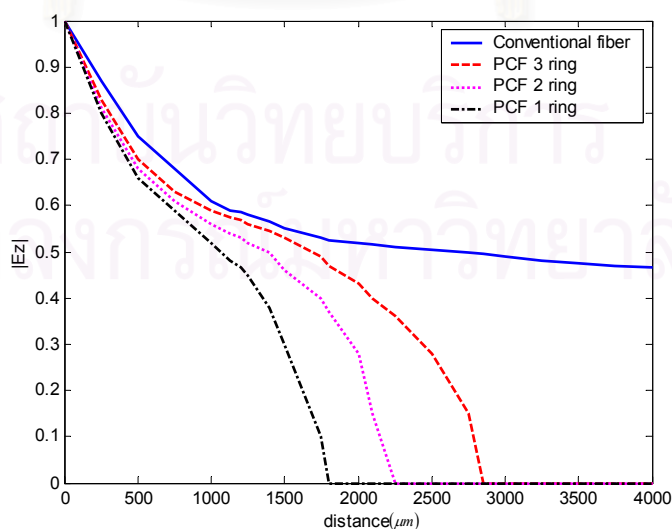
สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF ที่ระยะ 1000 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF 3 วง ดังรูปที่ 2.64 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 1000 ไมโครเมตรลดลงเหลือ

0.64 ดังรูปที่ 2.65 และสามารถสรุปความสัมพันธ์ของขนาดสนามไฟฟ้าตามแนวแกน z กับระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ได้ดังรูปที่ 2.66



รูปที่ 2.66 ขนาดสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 2 วงที่ระยะทางต่างๆ

จากรูปที่ 2.66 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 3 วง จะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าเป็นเท่ากับศูนย์ที่ระยะ 2850 ไมโครเมตร เนื่องจาก PCF เพียง 3 วง ไม่สามารถกักคลื่นแสงได้ตลอดระยะทางการเคลื่อนที่เพราะคลื่นแสงจะรั่วออกจากบริเวณระหว่างรูอากาศตลอดเวลา เมื่อนำผลการคำนวณขนาดสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 1, 2 และ 3 เปรียบเทียบกันได้ผลดังรูปที่ 2.67

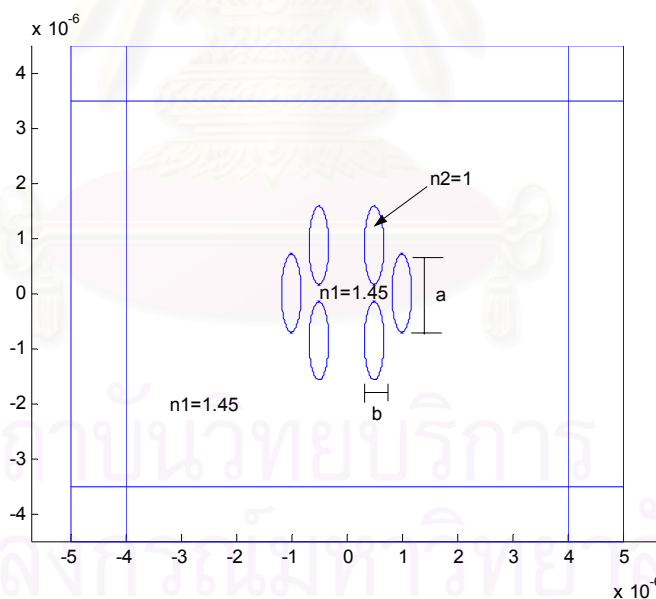


รูปที่ 2.67 เปรียบขนาดสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน PCF 1, 2 และ 3 วงที่ระยะทางต่างๆ

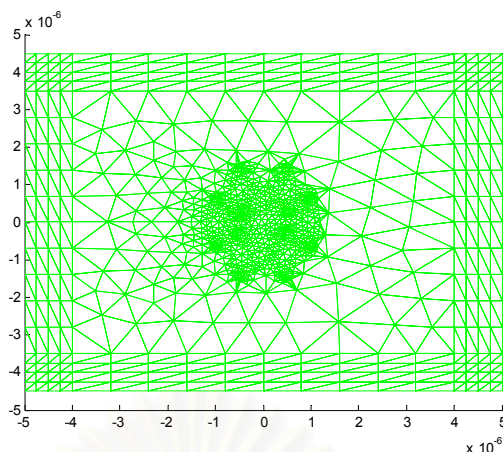
จะสังเกตเห็นว่า PCF ที่มี 3 วงนั้นจะสามารถกักคลื่นแสงได้ระยะทางมากกว่า PCF 2 วงและ PCF 1 วง ตามลำดับเพราะยิ่งจำนวนวงมากขึ้นแสดงว่าจะมีรูอากาศที่ค่อยๆ กักคลื่นแสงได้มากขึ้นทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z รั่วลดลงกว่า PCF ที่มีจำนวนวงน้อยกว่า

2.5.4 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรี (EPCF) 1 วง

เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรีที่มีรูอากาศจัดเรียงคล้ายรวงผึ้ง 1 วง บริเวณตรงกลางเรียกว่าแกนซึ่งค่าดัชนีหักเห $n_1 = 1.45$ และรูอากาศรูปวงรีมีความยาวแกนเอก (a) เท่ากับ 0.7136 ไมโครเมตรและมีความยาวแกนโท (b) เท่ากับ 0.1784 ไมโครเมตร ซึ่งรูอากาศรูปวงรีมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ $n_2 = 1$ มีแกนเอกขนานกับแกน y นอกบริเวณของแกนทั้งหมดเรียกว่าวัสดุหุ้ม เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลถูกล้อมรอบด้วยวัสดุฉนวนเคลือบแบบ PML ขนาด 5×5 ไมโครเมตร ดังรูป 2.68 เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมในแต่ละบริเวณเพื่อนำมาคำนวณหาสนามไฟฟ้าตามขวางและสนามไฟฟ้าแนวแกน z โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีบพรอพาเกชันดังรูป 2.69



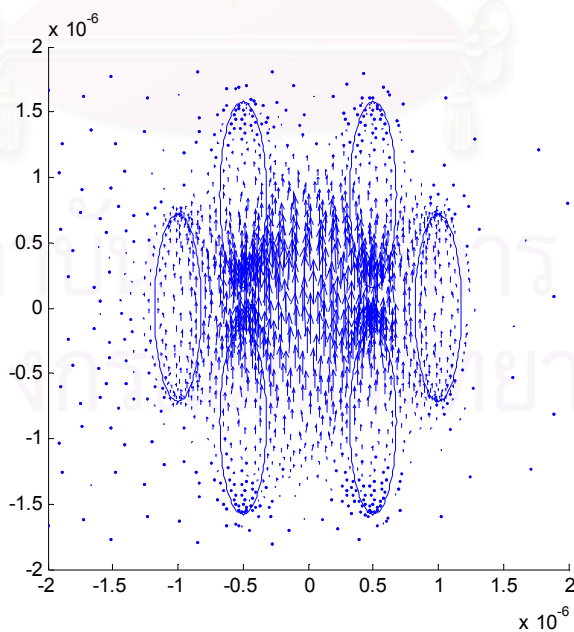
รูปที่ 2.68 ภาคตัดขวางในระนาบ xy ของ EPCF 1 วง



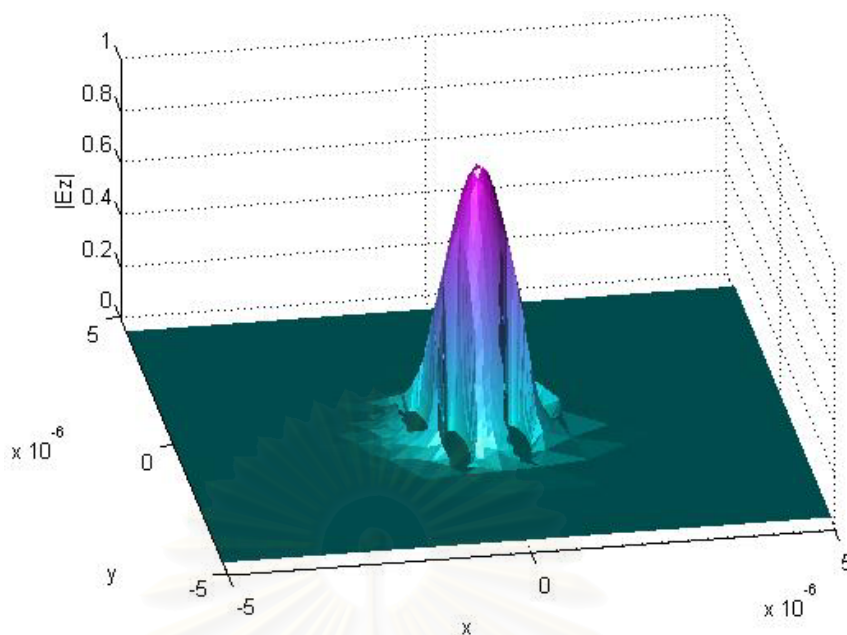
รูปที่ 2.69 การแบ่งอีลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมใน EPCF 1 วง

เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าอินพุตดังรูป 2.70 กำหนดให้สนามไฟฟ้า \vec{E}_y อยู่ในรูปเกาส์เซียนมีขนาดจุด (spotsizes) เท่ากับ 0.8 ไมโครเมตร ให้ สนามไฟฟ้า $\vec{E}_x = 0$ โดยมีระยะชั้นการคำนวณ $\Delta z = 1$ ไมโครเมตร ความยาวคลื่นแสง 0.625 ไมโครเมตร ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าตามขวางและสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะทางต่างๆ ดังนี้

สนามไฟฟ้าอินพุตตามขวางจะอยู่บริเวณแกนกลางและมีลักษณะเวกเตอร์ทิศทางขนานกับรูอากาศรูปวงรีซึ่งมีแกนเอกขนานกับแกน y บริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่ติดกันจะมีสนามไฟฟ้ารั่วออกไปซึ่งเป็นลักษณะของแบบแผนคลื่นรั่วดังรูปที่ 2.70

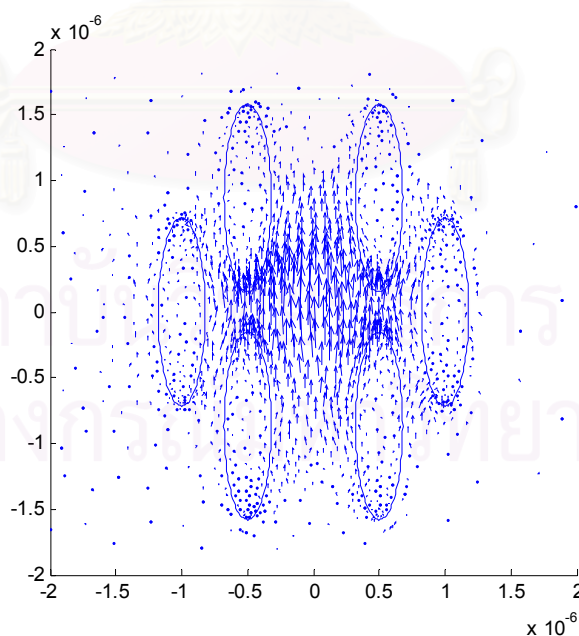


รูปที่ 2.70 สนามไฟฟ้าอินพุตใน EPCF 1 วง

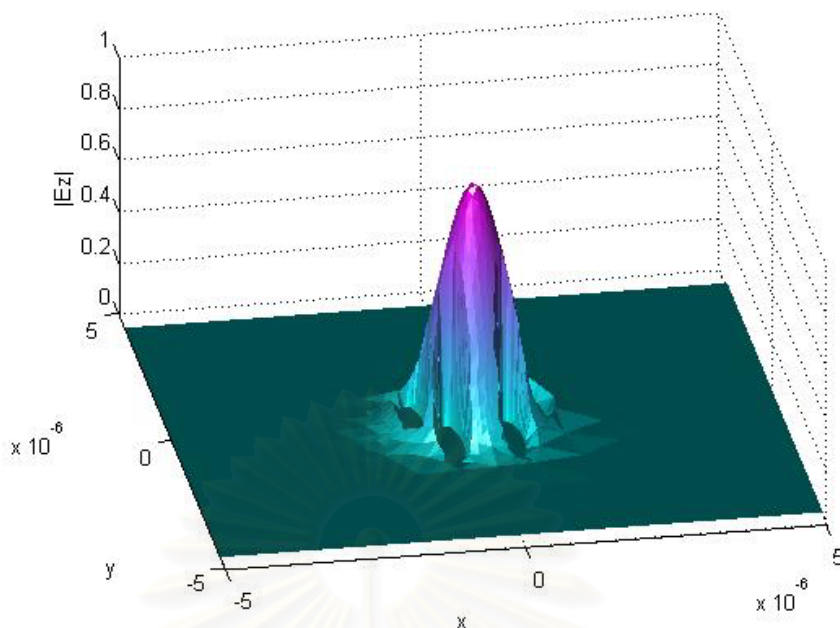


รูปที่ 2.71 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตใน EPCF 1 วง

ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ในเส้นใยนำแสง EPCF 1 วง กำหนดให้มีขนาดของสนามไฟฟ้าเท่ากับ 1 ที่แกนกลางของ EPCF จะสังเกตว่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรูอากาศมีขนาดน้อยมากถือว่ามีค่าเป็นศูนย์จึงเห็นเป็นลักษณะเป็นโพรงยุบเป็นรูปวงรี 1 วง จากนั้นได้คำนวณสนามไฟฟ้าตามขวางและขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะทางต่างๆดังนี้

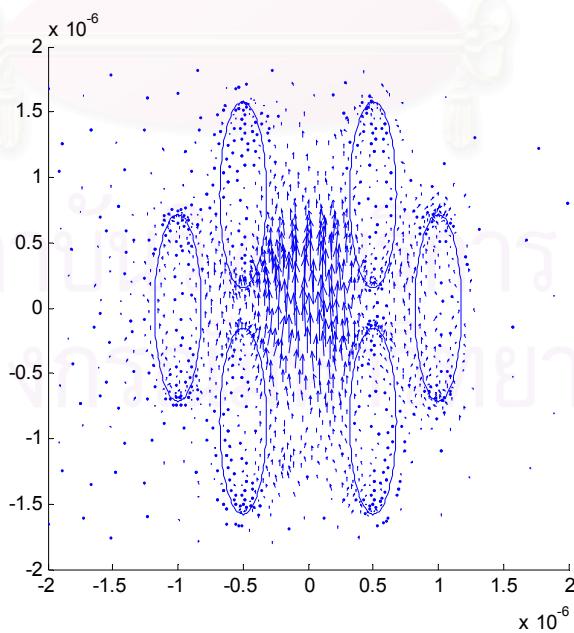


รูปที่ 2.72 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 1 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร

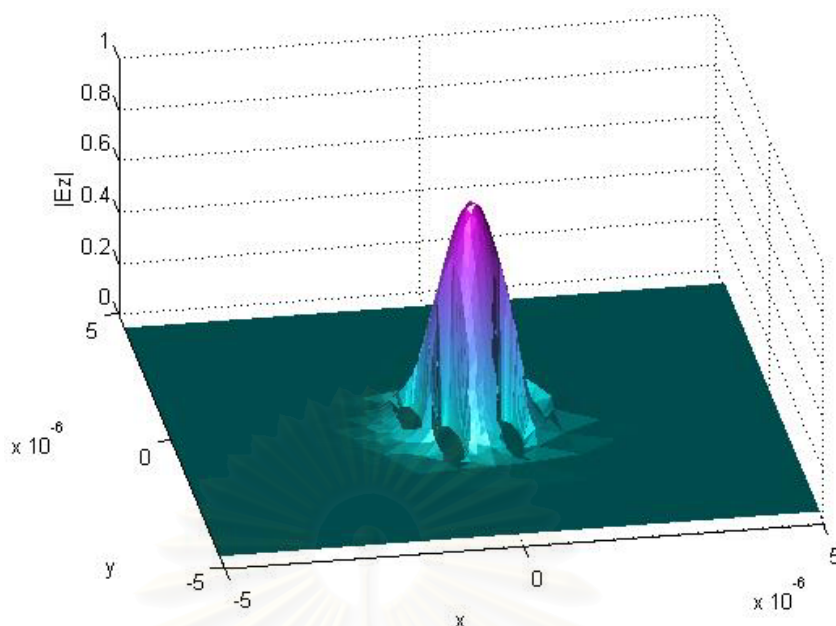


รูปที่ 2.73 ขนาดของสนามไฟฟ้าใน EPCF 1 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF ที่ระยะ 10 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ EPCF 1 วง ดังรูปที่ 2.72 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก EPCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 10 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.99 ดังรูปที่ 2.73

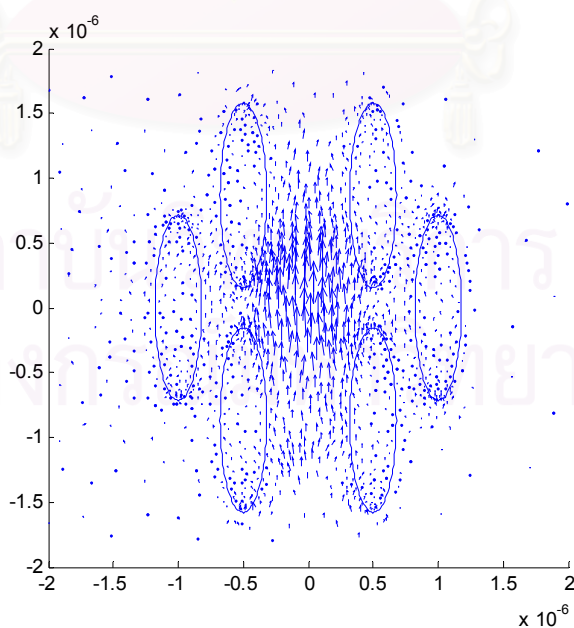


รูปที่ 2.74 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 1 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร

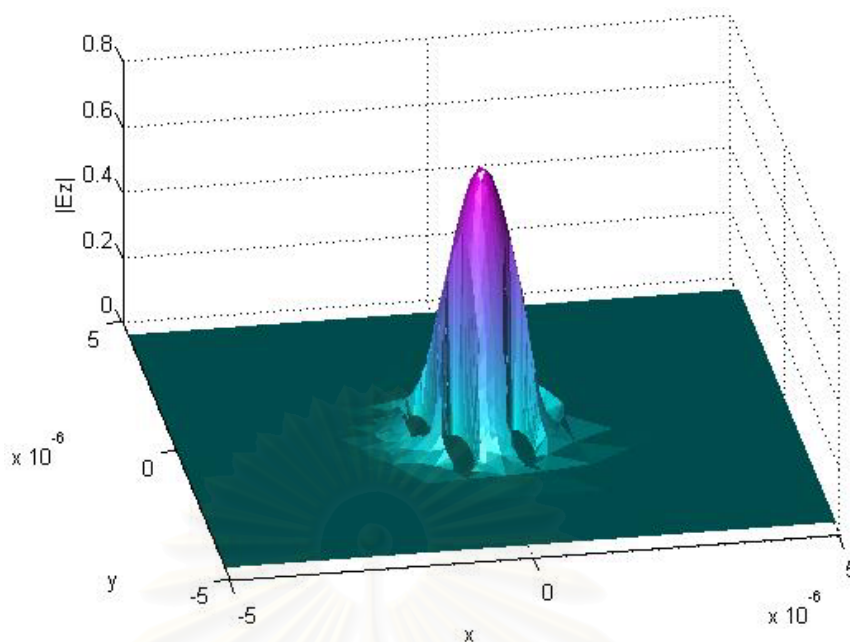


รูปที่ 2.75 ขนาดของสนามไฟฟ้าใน EPCF 1 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF ที่ระยะ 50 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ EPCF 1 วง ดังรูปที่ 2.74 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก EPCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 50 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.94 ดังรูปที่ 2.75

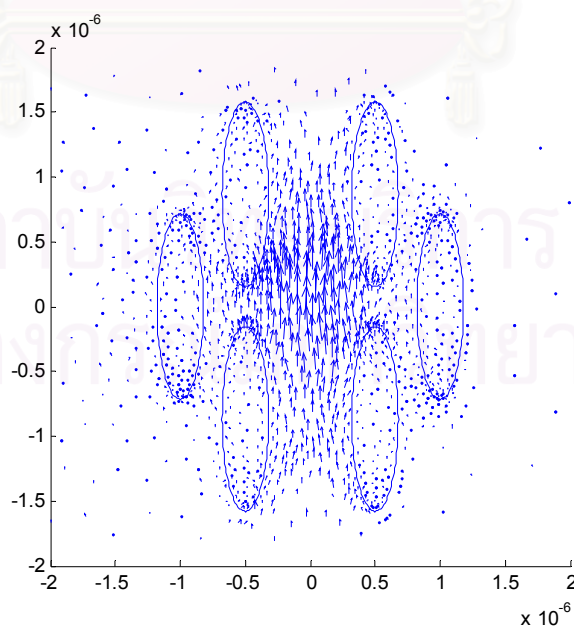


รูปที่ 2.76 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 1 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร

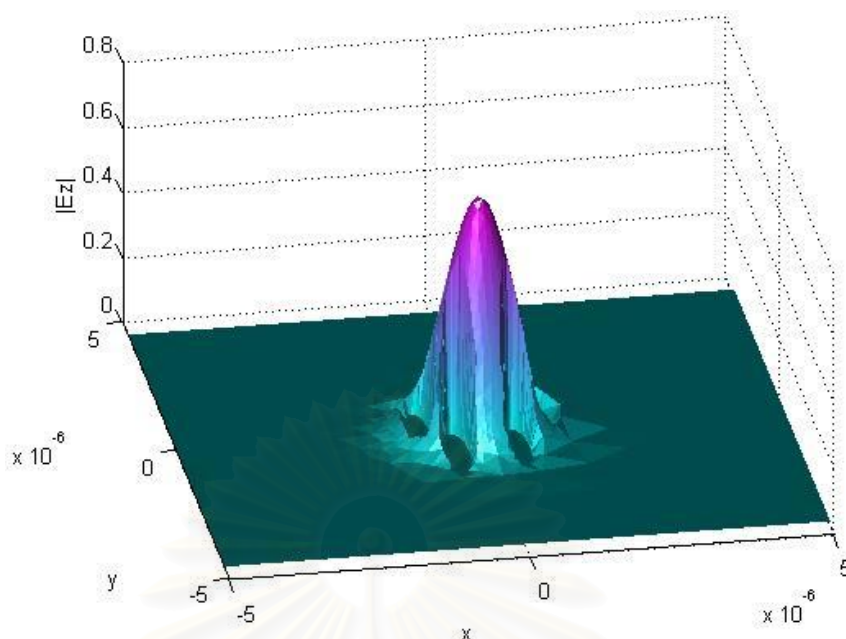


รูปที่ 2.77 ขนาดของสนามไฟฟ้าใน EPCF 1 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF ที่ระยะ 100 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ EPCF 1 วง ดังรูปที่ 2.76 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก EPCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 100 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.79 ดังรูปที่ 2.77

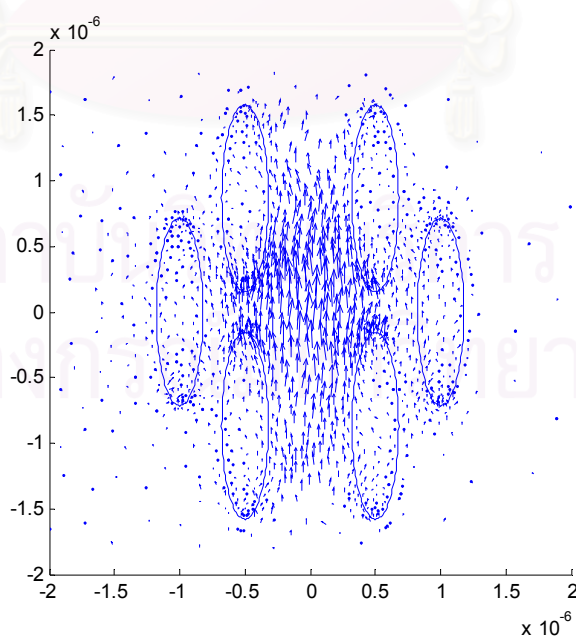


รูปที่ 2.78 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 1 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร

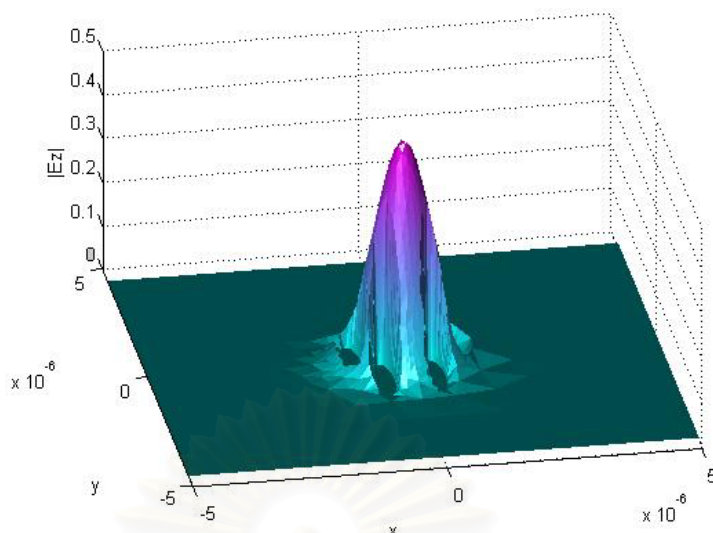


รูปที่ 2.79 ขนาดของสนามไฟฟ้าใน EPCF 1 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF ที่ระยะ 250 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ EPCF 1 วง ดังรูปที่ 2.78 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก EPCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 250 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.70 ดังรูปที่ 2.79

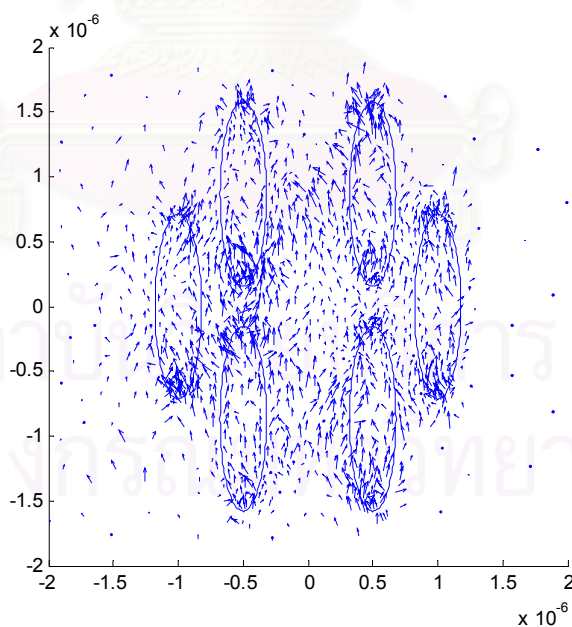


รูปที่ 2.80 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 1 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร

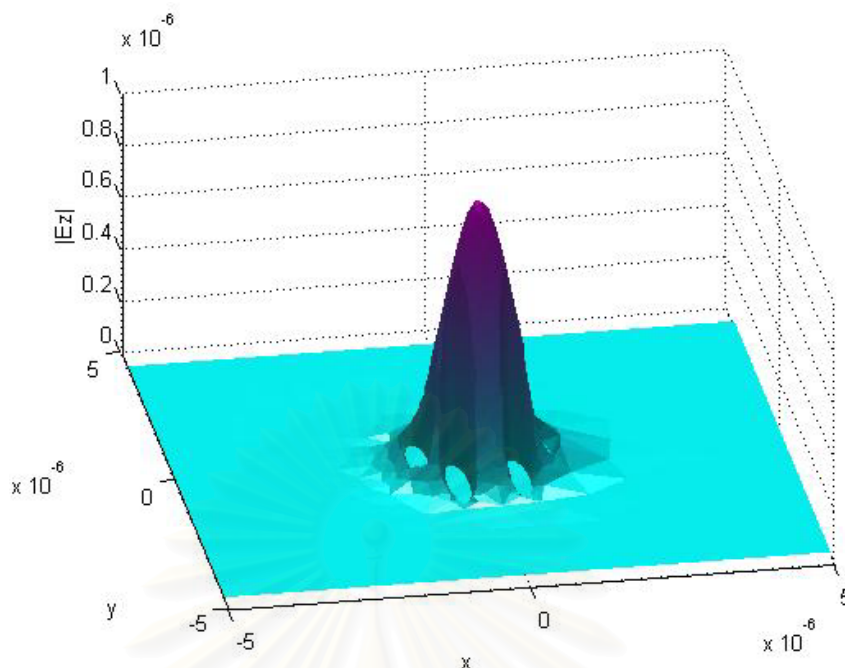


รูปที่ 2.81 ขนาดของสนามไฟฟ้าใน EPCF 1 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF ที่ระยะ 500 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ EPCF 1 วง ดังรูปที่ 2.80 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก EPCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 500 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.50 ดังรูปที่ 2.81

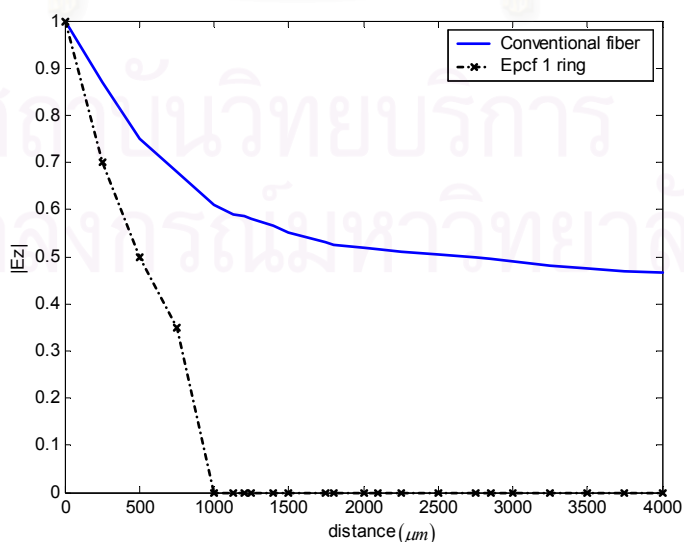


รูปที่ 2.82 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 1 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร



รูปที่ 2.83 ขนาดของสนามไฟฟ้าใน EPCF 1 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF ที่ระยะ 1000 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ EPCF 1 วง ดังรูปที่ 2.82 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก EPCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 1000 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.000001 ดังรูปที่ 2.83 และสามารถสรุปความสัมพันธ์ของขนาดสนามไฟฟ้าตามแนวแกน z กับระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ได้ดังรูปที่ 2.84

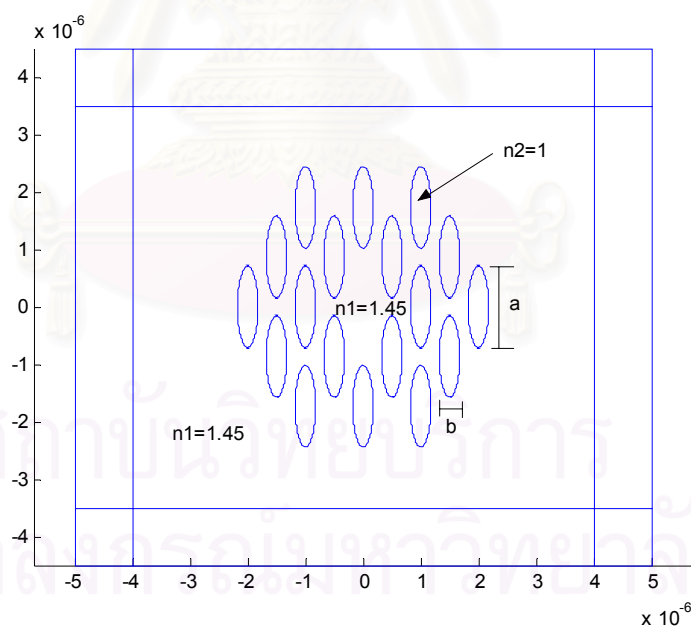


รูปที่ 2.84 ขนาดสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 1 วงที่ระยะทางต่างๆ

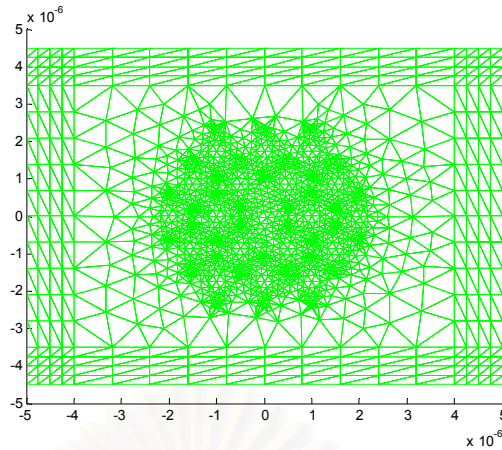
จากรูปที่ 2.84 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 1 วง จะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าเป็นเท่ากับศูนย์ที่ระยะ 1000 ไมโครเมตร เนื่องจาก EPCF เพียง 1 วง ไม่สามารถกักคลื่นแสงได้ตลอดระยะทางการเคลื่อนที่เพราะคลื่นแสงจะรั่วออกจากบริเวณระหว่างรูอากาศตลอดเวลา

2.5.5 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรี (EPCF) 2 วง

เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรีที่มีรูอากาศจัดเรียงคล้ายรวงผึ้ง 2 วง 36 รูอากาศ บริเวณตรงกลางเรียกว่าแกนซึ่งค่าดัชนีหักเห $n_1 = 1.45$ และรูอากาศรูปวงรีมีความยาวแกนเอก (a) เท่ากับ 0.7136 ไมโครเมตรและความยาวแกนโท (b) เท่ากับ 0.1784 ไมโครเมตร ซึ่งรูอากาศรูปวงรีมีค่าดัชนีหักเห $n_2 = 1$ นอกบริเวณของแกนทั้งหมดเรียกว่าวัสดุหุ้ม เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลถูกล้อมรอบด้วยวัสดุเคลือบคลื่นเคลื่อนแบบ PML ขนาด 5×5 ไมโครเมตร ดังรูป 2.85 เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมในแต่ละบริเวณเพื่อนำมาคำนวณโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพากชันดังรูป 2.85

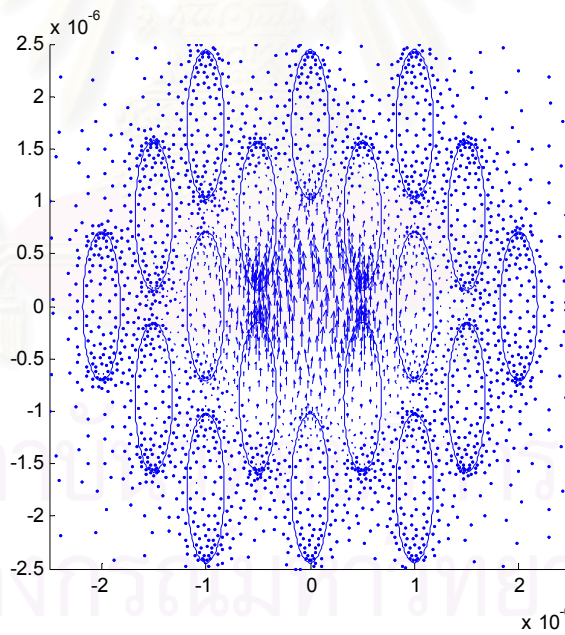


รูปที่ 2.85 ภาคตัดขวางในระนาบ xy ของ EPCF 2 วง

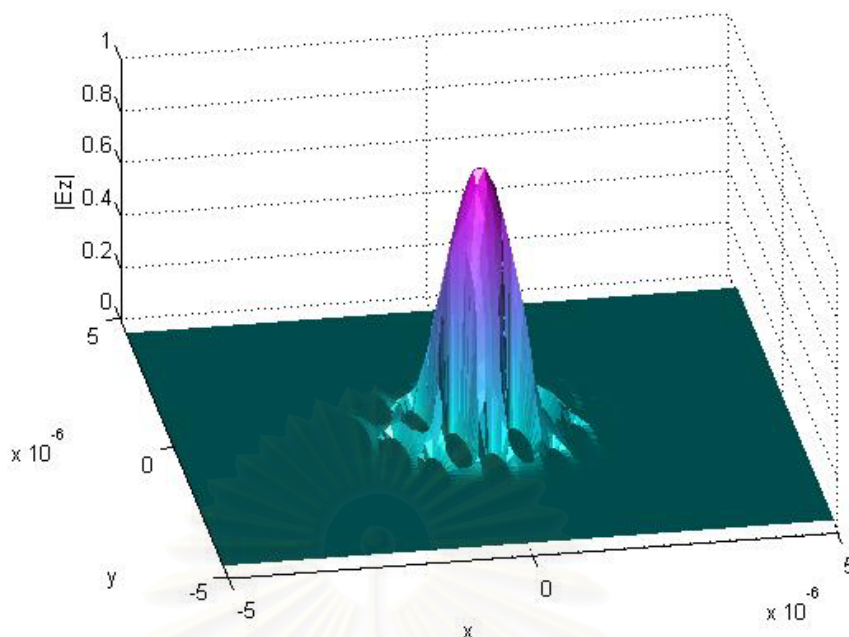


รูปที่ 2.86 การแบ่งอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมใน EPCF 2 วง

เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าอินพุตดังรูป 2.87 กำหนดให้สนามไฟฟ้า \vec{E}_y อยู่ในรูปเกาส์เซียนมีขนาดจุด (spotsizes) เท่ากับ 0.8 ไมโครเมตร ให้ สนามไฟฟ้า $\vec{E}_x = 0$ โดยมีระยะชั้นการคำนวณ $\Delta z = 1$ ไมโครเมตร ความยาวคลื่นแสง 0.625 ไมโครเมตร ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าตามขวางและสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะทางต่างๆดังนี้

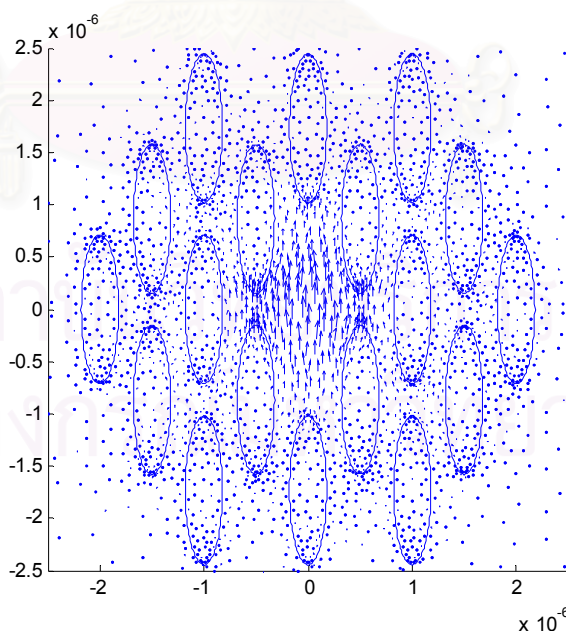


รูปที่ 2.87 สนามไฟฟ้าอินพุตใน EPCF 2 วง

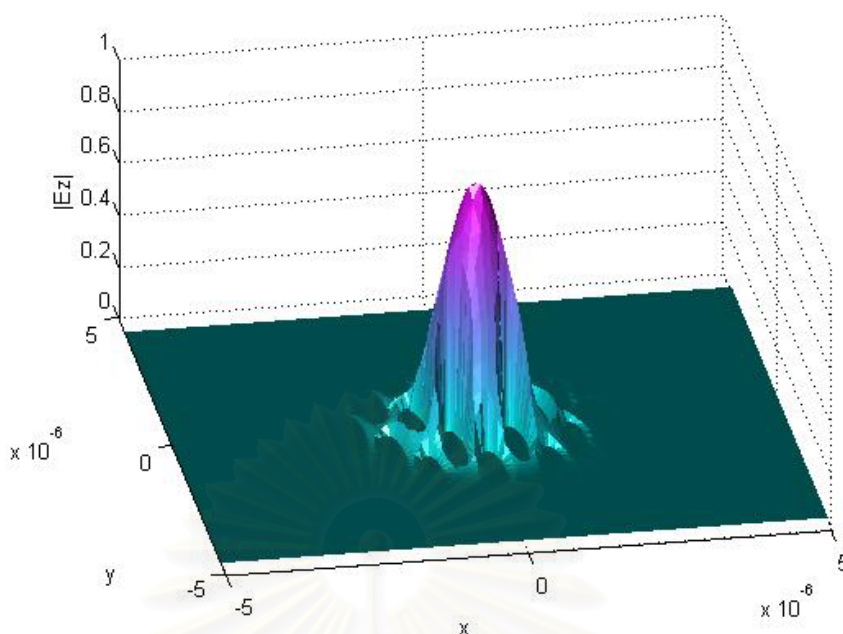


รูปที่ 2.88 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตใน EPCF 2 วง

ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ดังรูปที่ 2.88 ในเส้นใยนำแสง EPCF 2 วง กำหนดให้มีขนาดของสนามไฟฟ้าเท่ากับ 1 ที่แกนกลางของ EPCF จะสังเกตว่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรูอากาศมีขนาดน้อยมากถือว่ามีค่าเป็นศูนย์จึงเห็นเป็นลักษณะเป็นโพรงยุบเป็นรูปวงรี 2 วง จากนั้นได้คำนวณสนามไฟฟ้าตามขวางและขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะทางต่างๆดังนี้

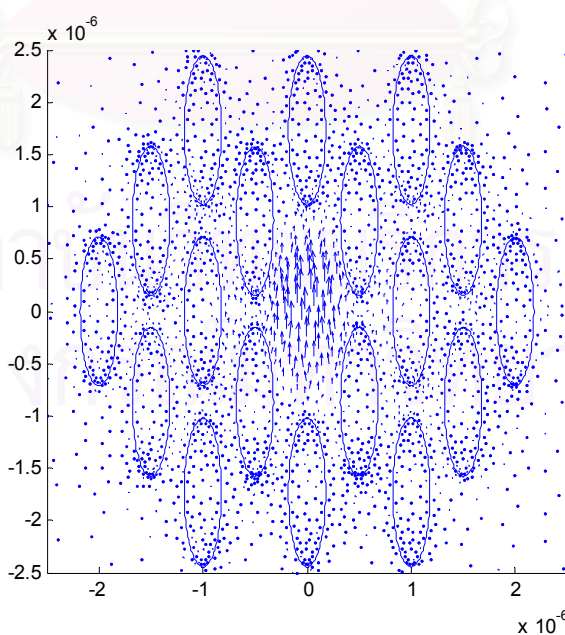


รูปที่ 2.89 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 2 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร

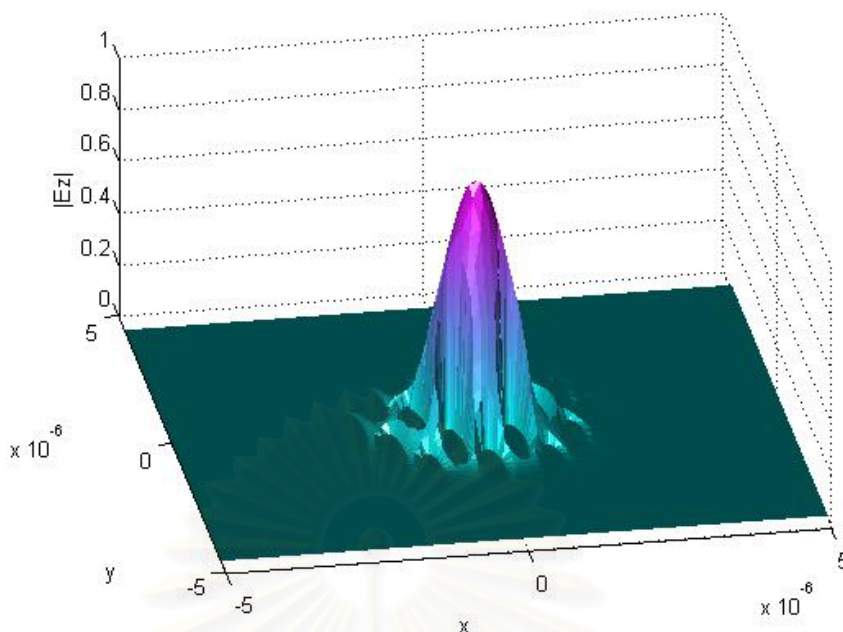


รูปที่ 2.90 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 2 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF ที่ระยะ 10 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ EPCF 2 วง ดังรูปที่ 2.89 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก EPCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 10 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.995 ดังรูปที่ 2.90

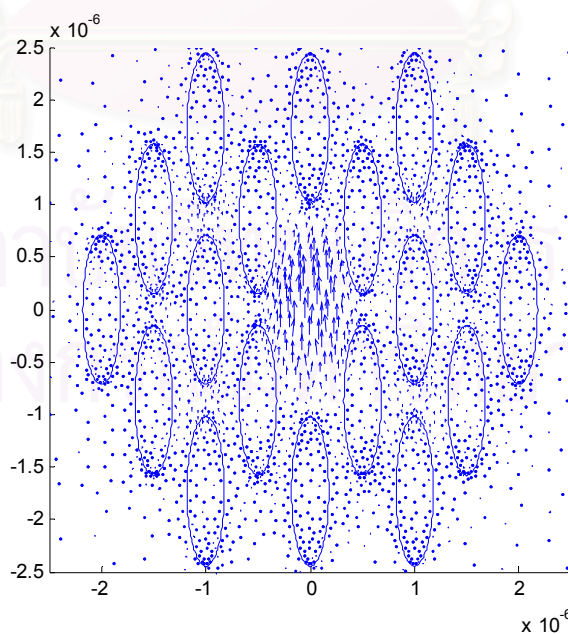


รูปที่ 2.91 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 2 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร

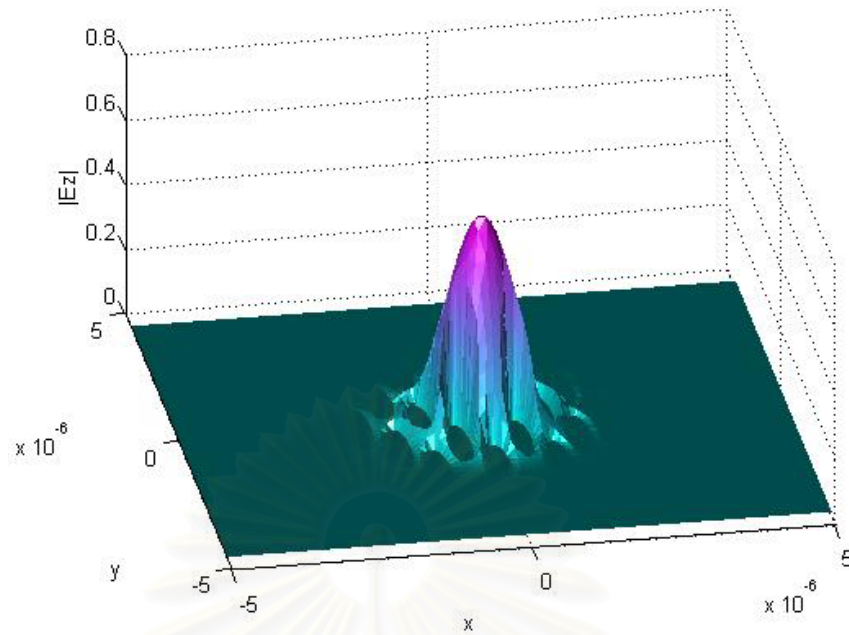


รูปที่ 2.92 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 2 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF ที่ระยะ 50 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ EPCF 2 วง ดังรูปที่ 2.91 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก EPCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 50 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.95 ดังรูปที่ 2.92

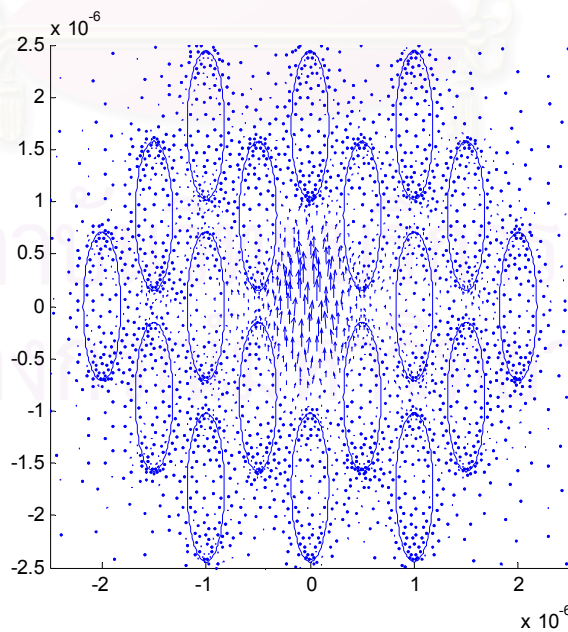


รูปที่ 2.93 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 2 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร

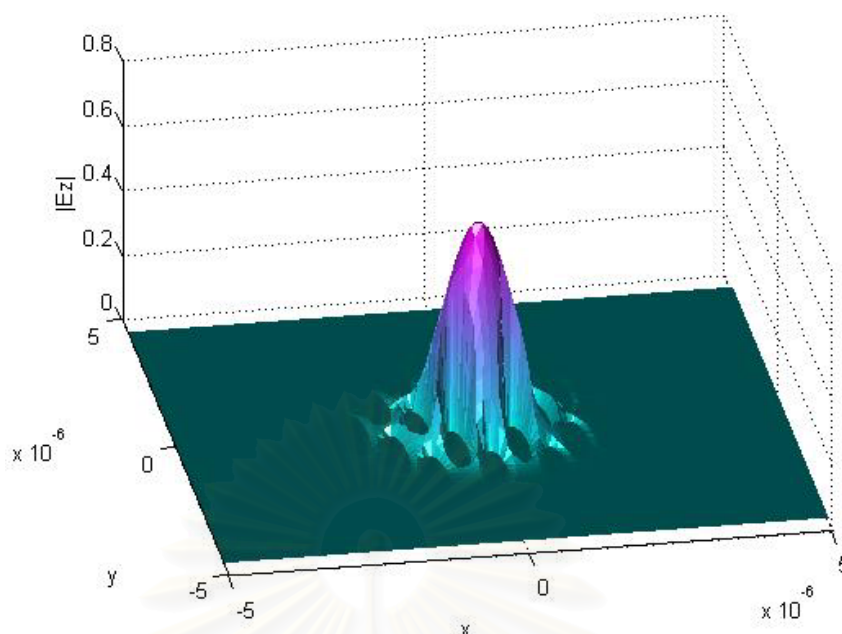


รูปที่ 2.94 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 2 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF ที่ระยะ 100 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ EPCF 2 วง ดังรูปที่ 2.93 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก EPCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 100 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.75 ดังรูปที่ 2.94

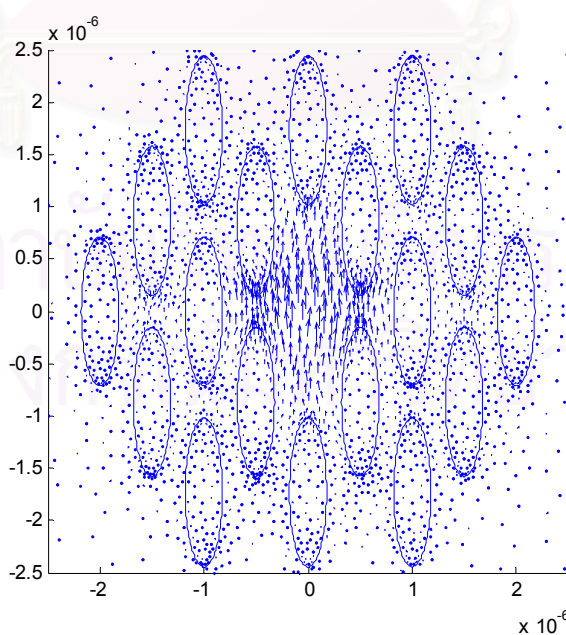


รูปที่ 2.95 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 2 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร

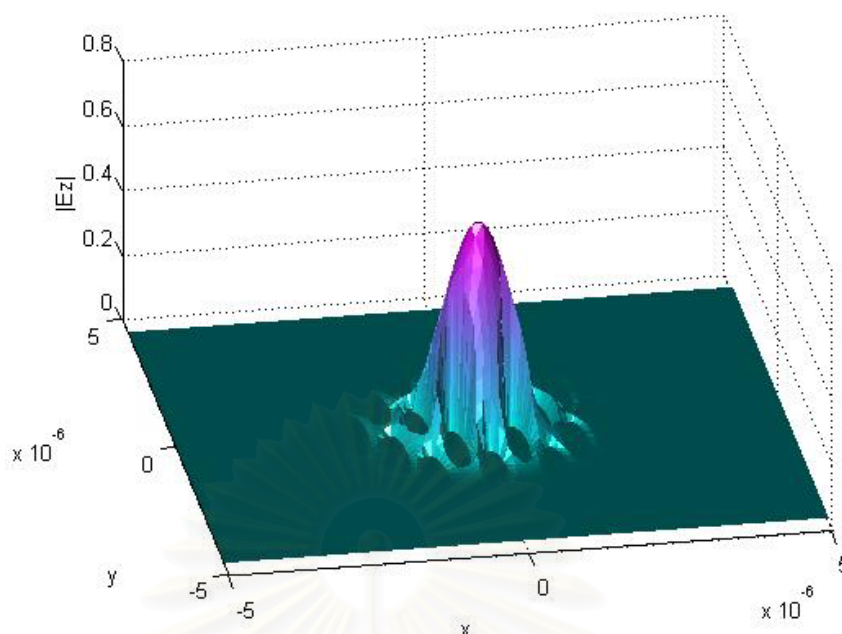


รูปที่ 2.96 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 2 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF ที่ระยะ 250 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ EPCF 2 วง ดังรูปที่ 2.95 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก EPCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 250 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.71 ดังรูปที่ 2.96

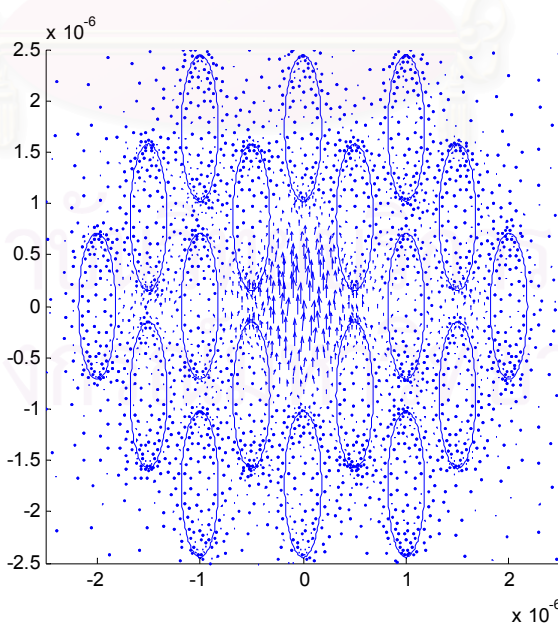


รูปที่ 2.97 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 2 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร

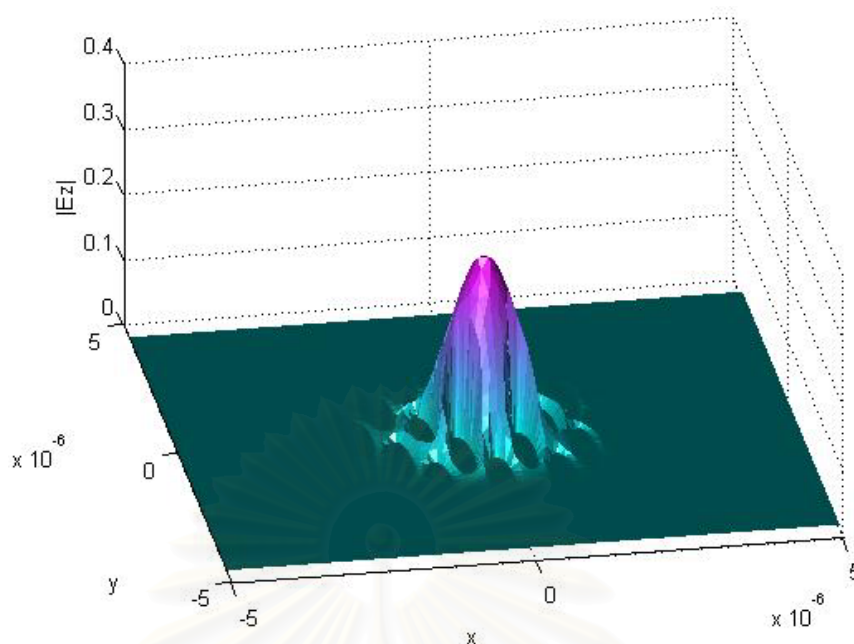


รูปที่ 2.98 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 2 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF ที่ระยะ 500 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ EPCF 2 วง ดังรูปที่ 2.97 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก EPCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 500 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.55 ดังรูปที่ 2.98

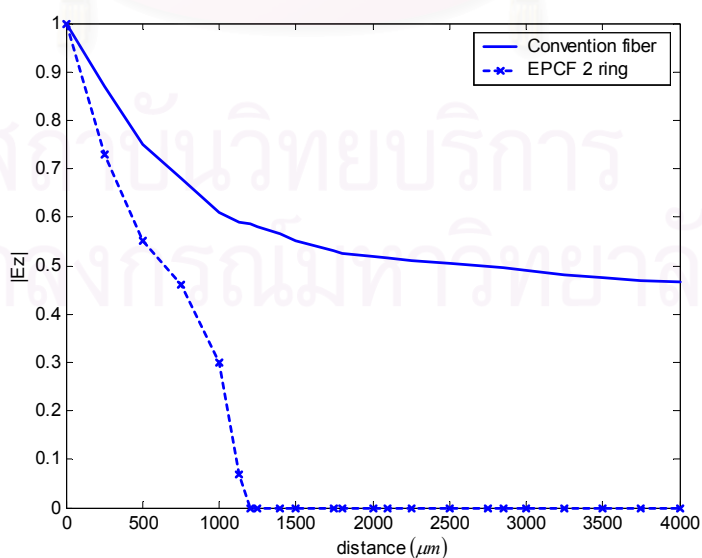


รูปที่ 2.99 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 2 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร



รูปที่ 2.100 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 2 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF ที่ระยะ 1000 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ EPCF 2 วง ดังรูปที่ 2.99 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก EPCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 1000 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.3 ดังรูปที่ 2.98 และสามารถสรุปความสัมพันธ์ของขนาดสนามไฟฟ้าตามแนวแกน z กับระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ได้ดังรูปที่ 2.100

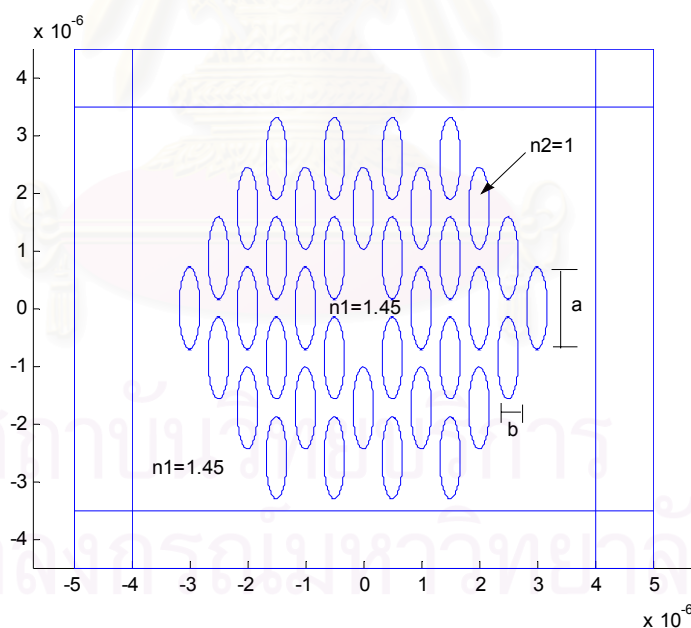


รูปที่ 2.101 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 2 วงที่ระยะทางต่างๆ

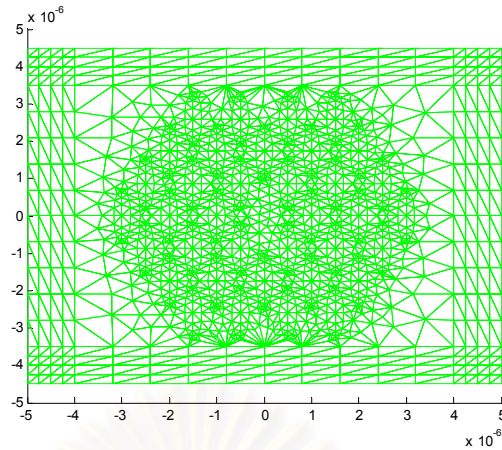
จากรูปที่ 2.101 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 2 วง จะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าเป็นเท่ากับศูนย์ที่ระยะ 1250 ไมโครเมตร เนื่องจาก EPCF เพียง 2 วง ไม่สามารถกักคลื่นแสงได้ตลอดระยะทางการเคลื่อนที่เพราะคลื่นแสงจะรั่วออกจากบริเวณระหว่างรูอากาศตลอดเวลา

2.5.6 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรี (EPCF) 3 วง

เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรีที่มีรูอากาศจัดเรียงคล้ายรวงผึ้ง 3 วง บริเวณตรงกลางเรียกว่าแกนซึ่งค่าดัชนีหักเห $n_1 = 1.45$ และรูอากาศรูปวงรีมีความยาวแกนเอก (a) เท่ากับ 0.7136 ไมโครเมตรและมีความยาวแกนโท (b) เท่ากับ 0.1784 ไมโครเมตร ซึ่งรูอากาศรูปวงรีมีค่าดัชนีหักเห $n_2 = 1$ นอกบริเวณของแกนทั้งหมดเรียกว่าวัสดุหุ้ม เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลถูกล้อมรอบด้วยวัสดุฉนวนคลื่นแบบ PML ขนาด 5×5 ไมโครเมตร ดังรูป 2.102 เมื่อทำการแบ่งอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมในแต่ละบริเวณเพื่อนำมาคำนวณโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์บีมพรอพาเกชันดังรูป 2.103

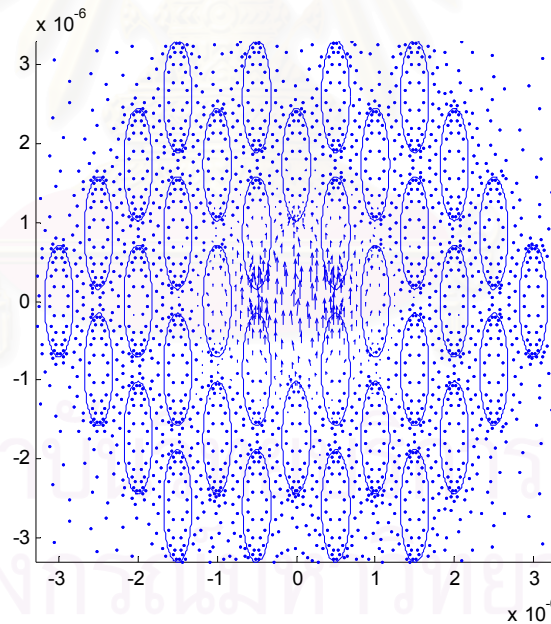


รูปที่ 2.102 ภาคตัดขวางในระนาบ xy ของ EPCF 3 วง

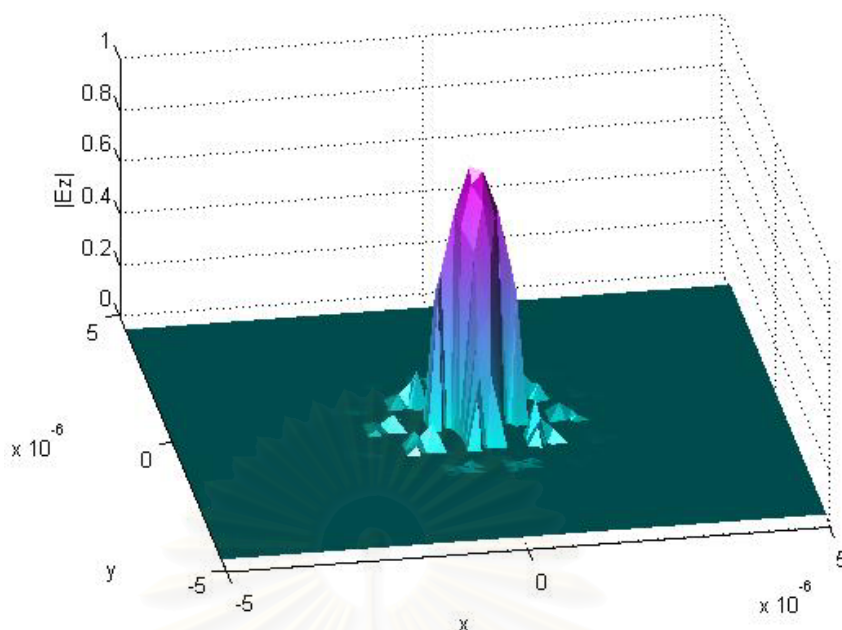


รูปที่ 2.103 การแบ่งอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมใน EPCF 3 วง

เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าอินพุตดังรูป 2.104 กำหนดให้สนามไฟฟ้า \vec{E}_y อยู่ในรูปเกาส์เซียนมีขนาดจุด (spotsizes) เท่ากับ 0.8 ไมโครเมตร ให้ สนามไฟฟ้า $\vec{E}_x = 0$ โดยมีระยะชั้นการคำนวณ $\Delta z = 1$ ไมโครเมตร ความยาวคลื่นแสง 0.625 ไมโครเมตร ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าตามขวางและสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะทางต่างๆ ดังนี้

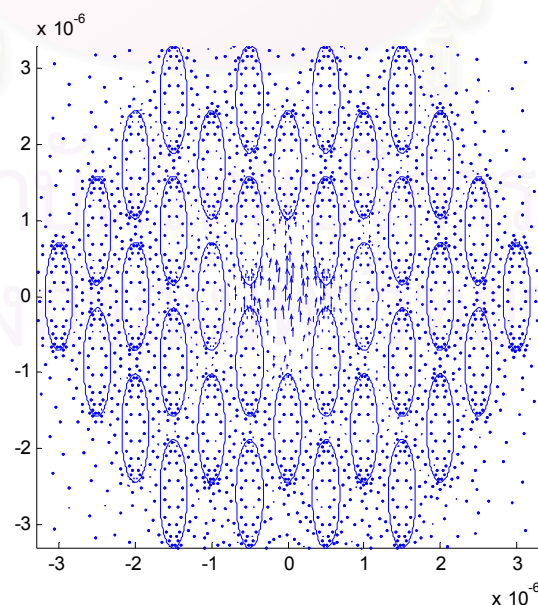


รูปที่ 2.104 สนามไฟฟ้าอินพุตใน EPCF 3 วง

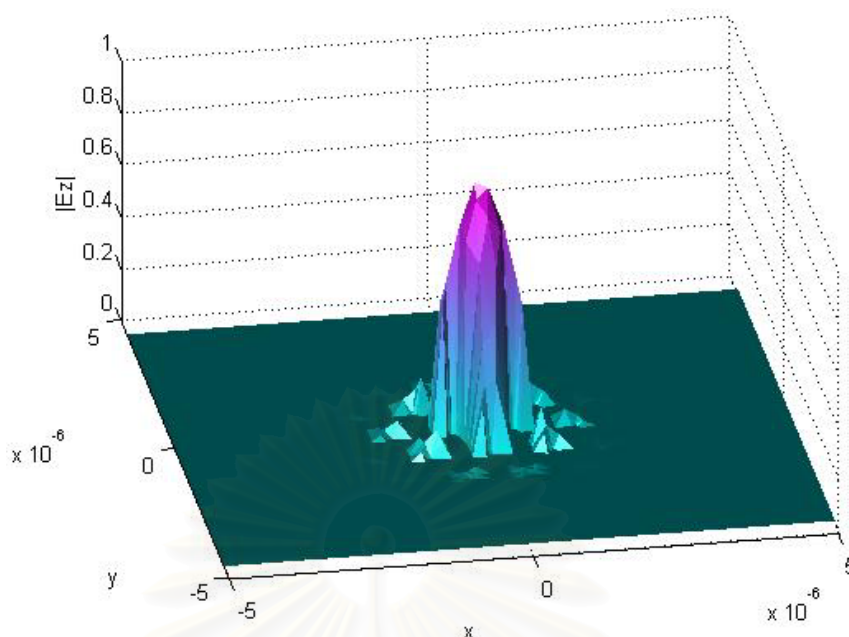


รูปที่ 2.105 ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ใน EPCF 3 วง

ขนาดของสนามไฟฟ้าอินพุตแนวแกน z ในเส้นใยนำแสง EPCF 3 วง 36 รูอากาศ กำหนดให้มีขนาดของสนามไฟฟ้าเท่ากับ 1 ที่แกนกลางของ EPCF จะสังเกตว่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรูอากาศมีขนาดน้อยมากถือว่ามีค่าเป็นศูนย์จึงเห็นเป็นลักษณะเป็นโพรงยุบลงไป 1 วงเท่านั้น เพราะแสงถูกกักได้มากกว่า EPCF 1 วงและ EPCF 2 วง จึงไม่สามารถเห็นโพรงยุบวงที่ 2 และ 3 จากนั้นได้คำนวณสนามไฟฟ้าตามขวางและขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะทางต่างๆดังนี้

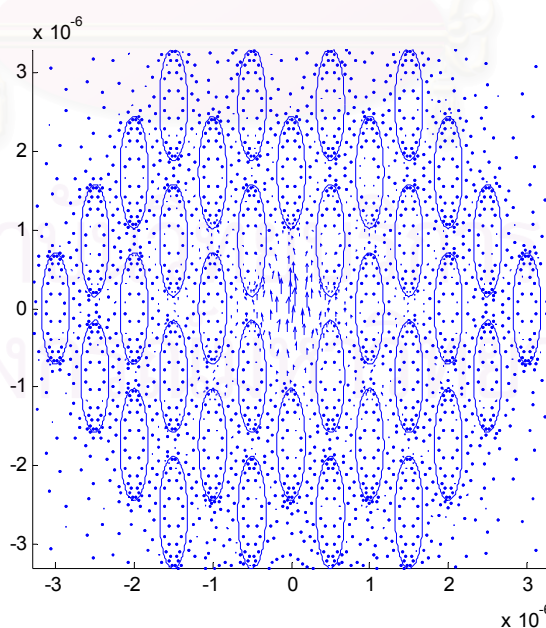


รูปที่ 2.106 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 3 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร

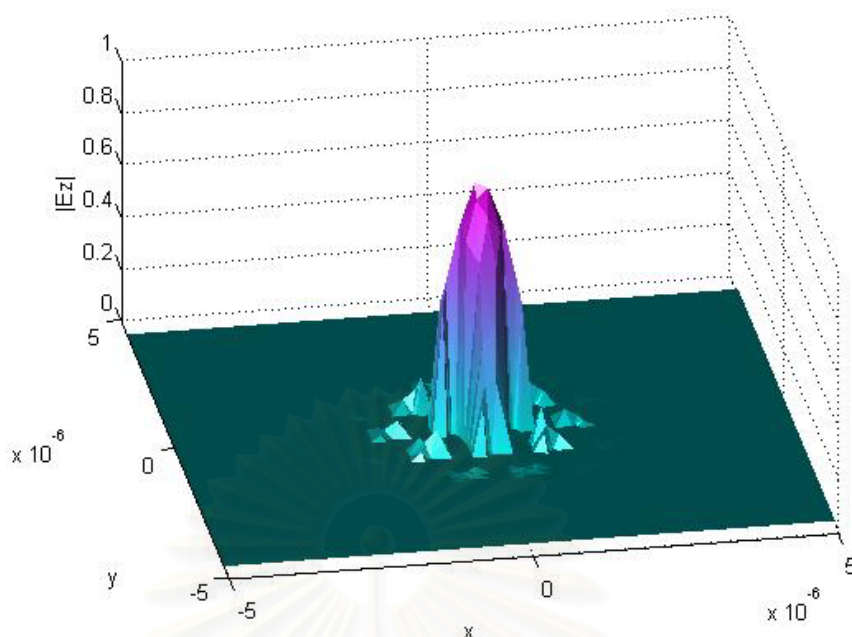


รูปที่ 2.107 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 3 วง ระยะ 10 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF ที่ระยะ 10 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ EPCF 3 วง ดังรูปที่ 2.106 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก EPCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 10 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.997 ดังรูปที่ 2.107

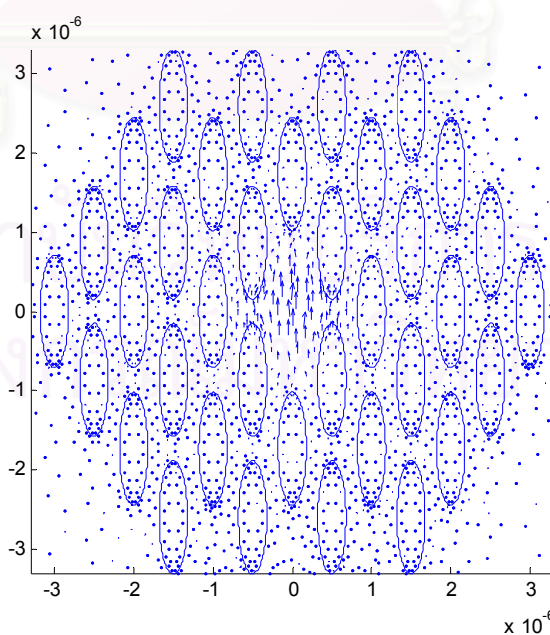


รูปที่ 2.108 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 3 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร

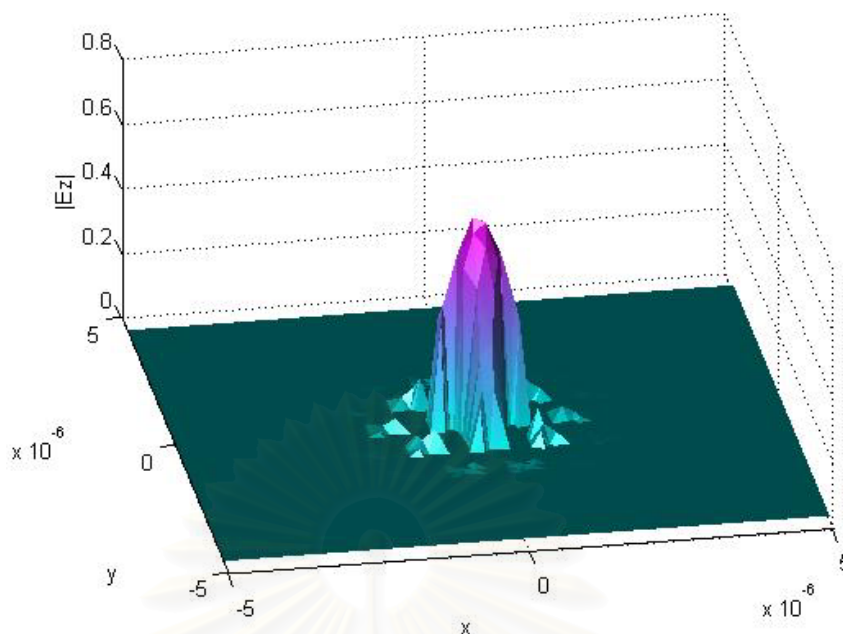


รูปที่ 2.109 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 3 วง ระยะ 50 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF ที่ระยะ 50 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ EPCF 3 วง ดังรูปที่ 2.108 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก EPCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 50 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.97 ดังรูปที่ 2.109

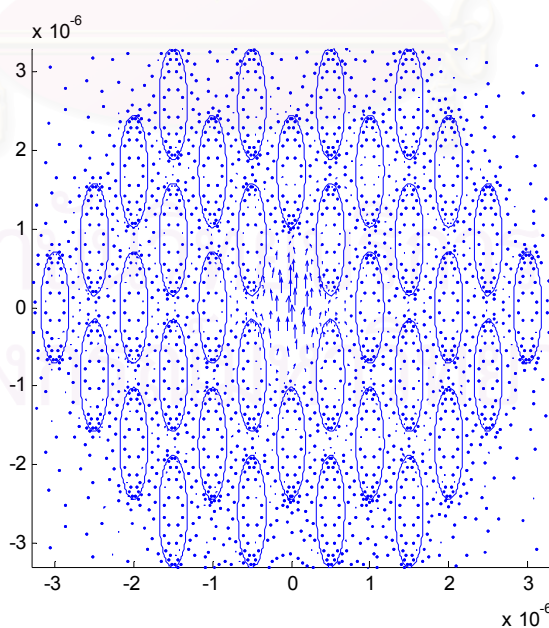


รูปที่ 2.110 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 3 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร

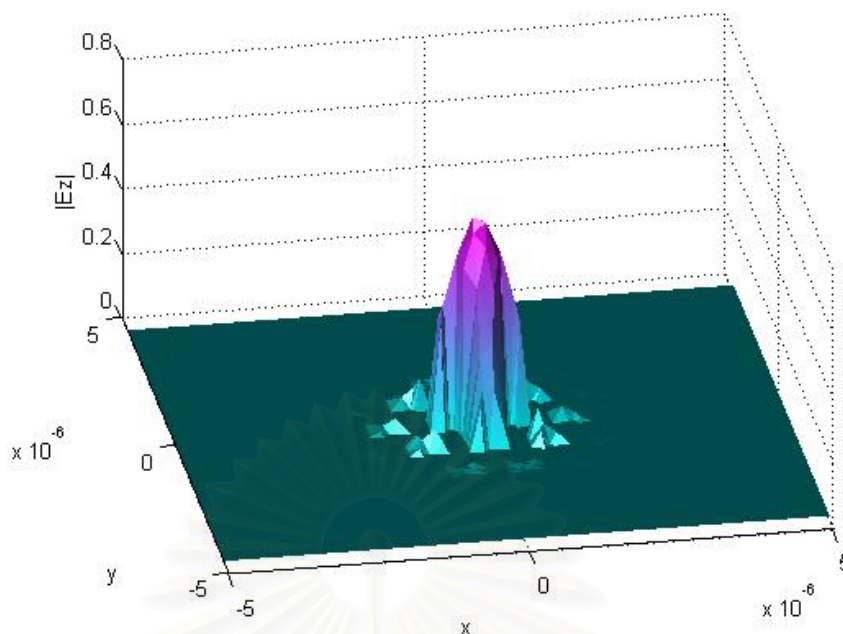


รูปที่ 2.111 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 3 วง ระยะ 100 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF ที่ระยะ 100 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ EPCF 3 วง ดังรูปที่ 2.110 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก EPCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 100 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.78 ดังรูปที่ 2.111

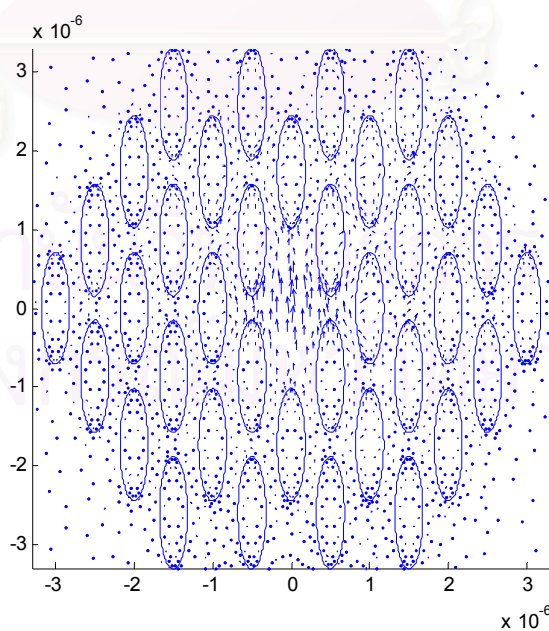


รูปที่ 2.112 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 3 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร

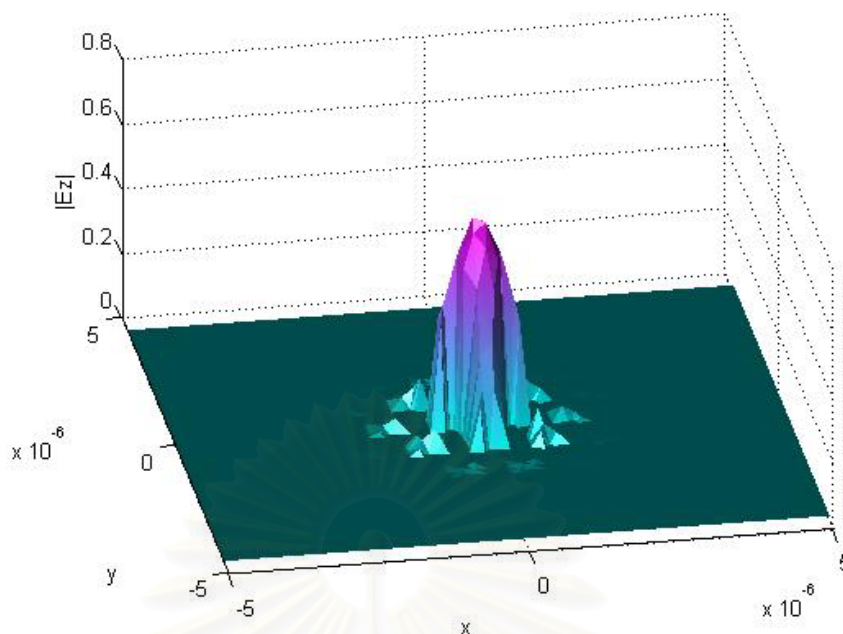


รูปที่ 2.113 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 3 วง ระยะ 250 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF ที่ระยะ 250 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ EPCF 3 วง ดังรูปที่ 2.112 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก EPCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 250 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.72 ดังรูปที่ 2.113

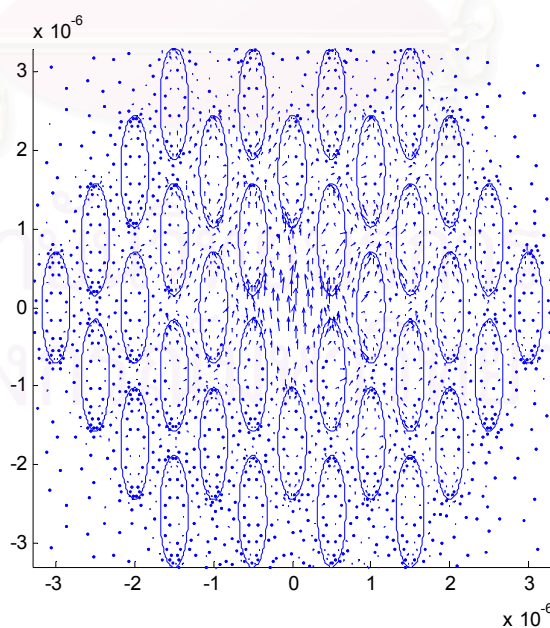


รูปที่ 2.114 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 3 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร

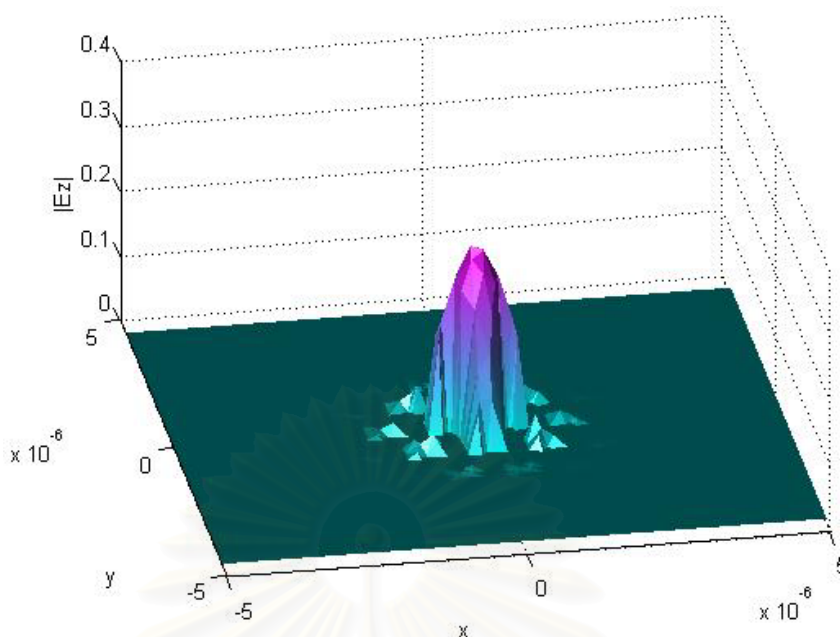


รูปที่ 2.115 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 3 วง ระยะ 500 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF ที่ระยะ 500 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ EPCF 3 วง ดังรูปที่ 2.114 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก EPCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 10 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.6 ดังรูปที่ 2.115

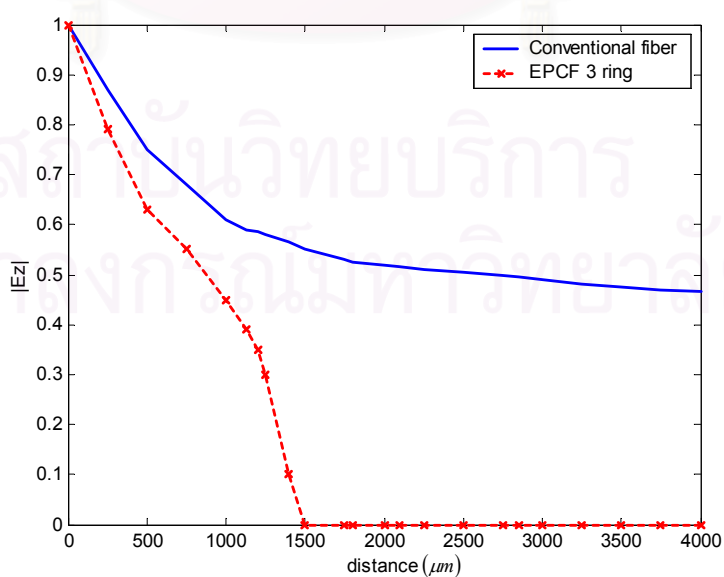


รูปที่ 2.116 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF 3 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร



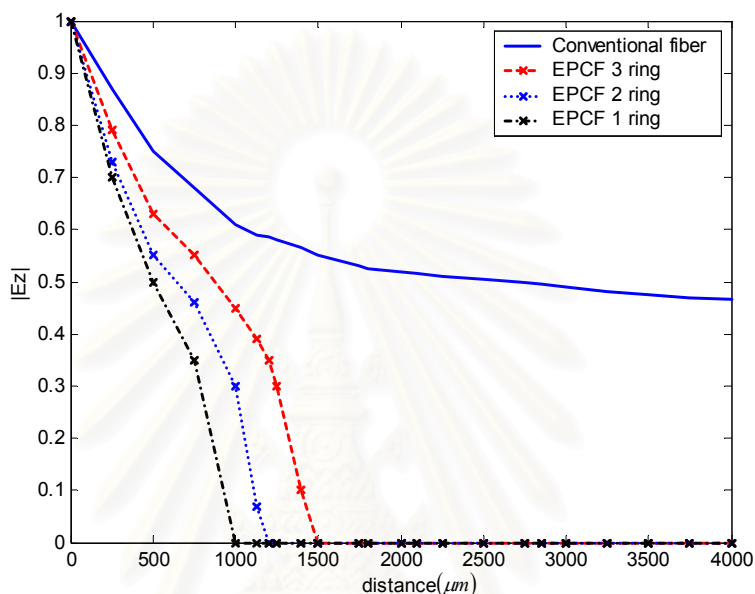
รูปที่ 2.117 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 3 วง ระยะ 1000 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF ที่ระยะ 1000 ไมโครเมตร สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ EPCF 2 วง ดังรูปที่ 2.116 แต่มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก EPCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป ทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ที่ระยะ 1000 ไมโครเมตรลดลงเหลือ 0.4 ดังรูปที่ 2.117 และสามารถสรุปความสัมพันธ์ของขนาดสนามไฟฟ้าตามแนวแกน z กับระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ได้ดังรูปที่ 2.118



รูปที่ 2.118 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 3 วงที่ระยะทางต่างๆ

จากรูปที่ 2.118 ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 3 วง จะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าเป็นเท่ากับศูนย์ที่ระยะ 1500 ไมโครเมตร เนื่องจาก EPCF เพียง 3 วง ไม่สามารถกักคลื่นแสงได้ตลอดระยะทางการเคลื่อนที่เพราะคลื่นแสงจะรั่วออกจากบริเวณระหว่างรูอากาศตลอดเวลา เมื่อนำผลการคำนวณขนาดสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 1, 2 และ 3 เปรียบเทียบกันได้ผลดังรูปที่ 2.119



รูปที่ 2.119 เปรียบเทียบขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z ใน EPCF 1,2 และ 3 วงที่ระยะทางต่างๆ

จะสังเกตเห็นว่า EPCF ที่มี 3 วงนั้นจะสามารถกักคลื่นแสงได้ระยะทางมากกว่า EPCF 2 วง และ EPCF 1 วง ตามลำดับเพราะยิ่งจำนวนวงมากขึ้นแสดงว่าการมีจำนวนรูอากาศมากขึ้นจะทำให้สามารถกักคลื่นแสงได้มากขึ้นทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z รั่วลดลงกว่า EPCF ที่มีจำนวนวงน้อยกว่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การวิเคราะห์โพลาริเซชันในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตัล

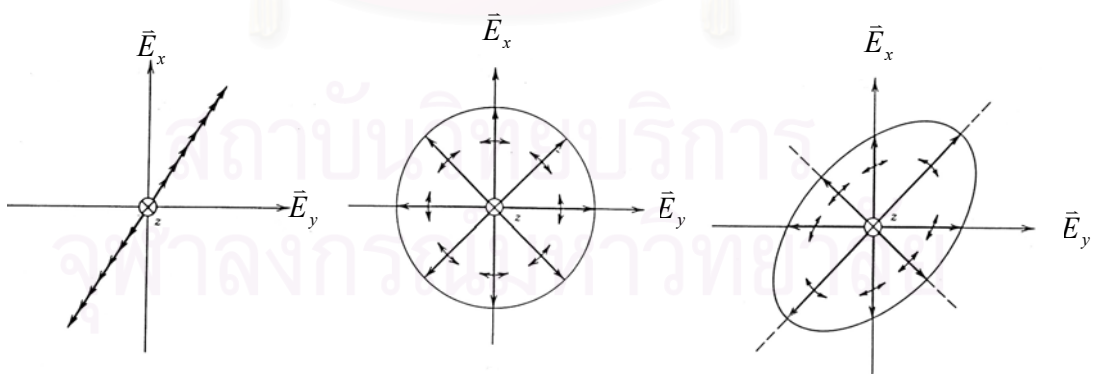
โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพากेशन

3.1 ความนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง หลักการวิเคราะห์โพลาริเซชันในเส้นใยนำแสงโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพากेशन เปรียบเทียบผลการคำนวณดรรชนีประสิทธิผลและไบรีฟรินเจนซ์ระหว่าง Steel and Osgood กับ งานวิทยานิพนธ์ หาความสัมพันธ์ของดรรชนีประสิทธิผลและไบรีฟรินเจนซ์ของเส้นใยนำแสง 2 ประเภท ได้แก่ เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตัลรูปร่างวงกลม 3 วง และเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตัลรูปร่างวงรี 3 วง ที่มีค่าพื้นที่ของรูอากาศและอัตราส่วนของความยาวแกนเอกและความยาวแกนโทในแต่ละกรณี วิเคราะห์การควบคุมโพลาริเซชันของเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตัลรูปร่างวงรี และเปรียบเทียบไบรีฟรินเจนซ์ของ pcf, Epcf ที่มีแกนลักษณะคล้ายวงกลมกับ pcf, Epcf ที่มีแกนลักษณะคล้ายวงรี

3.2 หลักการวิเคราะห์โพลาริเซชัน

โพลาริเซชันคือทิศทางการแพร่กระจายสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น, โพลาริเซชันแบบวงกลม และโพลาริเซชันแบบวงรี ดังรูป 3.1



(ก) แบบเชิงเส้น

(ข) แบบวงกลม

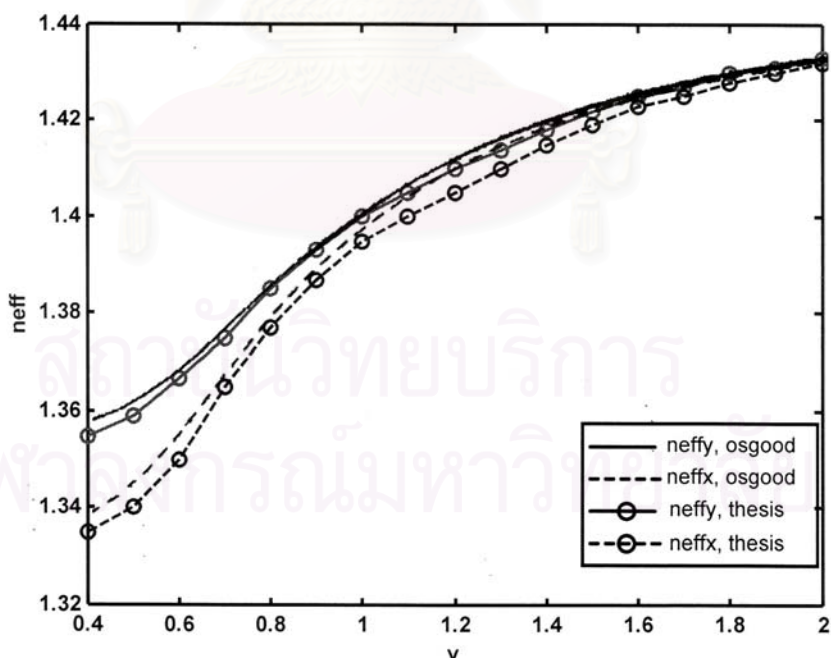
(ค) แบบวงรี

รูปที่ 3.1 ประเภทของโพลาริเซชัน

ในการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงโพลาริเซชันมีบทบาทสำคัญเพราะถ้าการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงสามารถทำให้เกิดโพลาริเซชันคงที่ได้จะทำให้การรับส่งข้อมูลมีความถูกต้องแต่ในความเป็นจริงแล้วโพลาริเซชันในเส้นใยนำแสงจะไม่คงที่ เนื่องจากความยาวของเส้นใยนำแสง, ครรชนหักเหของวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยนำแสงและความยาวคลื่นที่ใช้ ในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะโพลาริเซชันแบบเชิงเส้นที่มีทิศทางตามแกน x และทิศทางตามแกน y เท่านั้นแล้วนำมาเปรียบเทียบว่ามีค่าแตกต่างกันมากน้อยเพียงใดจะเรียกความแตกต่างของโพลาริเซชันแกน x และแกน y ว่า“ไบรีฟรินเจนซ์” สูตรการคำนวณที่หัวข้อ 2.3.2

3.3 การเปรียบเทียบงานวิจัย Steel and Osgood (2001) กับวิทยานิพนธ์

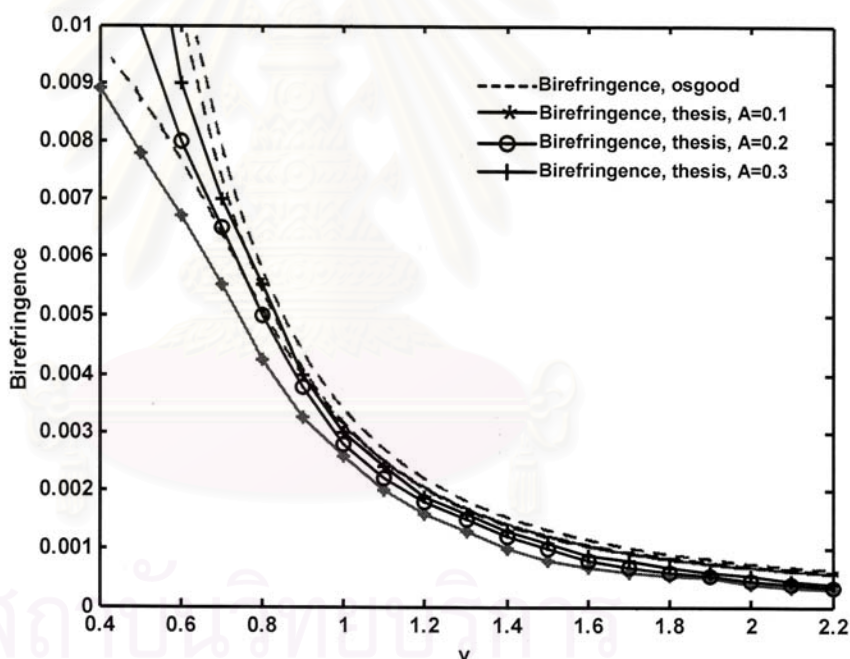
เพื่อการทดสอบความถูกต้องของวิทยานิพนธ์จึงได้นำงานวิจัยของ Steel และ Osgood ซึ่งเป็นงานวิจัยแรกออกแบบเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรีด้วยระเบียบวิธี plane wave expansion ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการคำนวณหาสนาม, ครรชนประสิทธิภาพซึ่งมีความแม่นยำใน ± 0.0003 และไบรีฟรินเจนซ์ ตัวอย่างที่ใช้ในการเปรียบเทียบเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรีที่มีพื้นที่ของรูอากาศเท่ากับ 0.2 และอัตราส่วนความยาวแกนเอกและแกนโทเท่ากับ $\eta = 2$ เมื่อคำนวณหาครรชนประสิทธิภาพโดยใช้ระเบียบวิธี plane wave expansion เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์บีมพรอพากेशनดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบครรชนประสิทธิภาพของงานวิจัย Steel and Osgood กับวิทยานิพนธ์

จะสังเกตเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีประสิทธิผลระหว่างงานวิจัยของ Steel and Osgood กับวิทยานิพนธ์ พบว่าเส้นกราฟของวิทยานิพนธ์ไม่ทับกับเส้นกราฟของ Steel and Osgood เนื่องจากเหตุผลที่งานวิจัยของ Steel and Osgood ใช้รูปแบบที่เสมือนว่ามีจะจำนวนรูอากาศมากมายแต่วิทยานิพนธ์ใช้รูปแบบกำหนดให้มีจำนวนรูอากาศเพียง 36 รูเท่านั้นเพราะใช้สมมติฐานที่ว่าคลื่นแสงส่วนใหญ่จะถูกกักที่บริเวณแกนและบริเวณห่างจากวงแรกไม่เกิน 3 วง จึงทำให้ผลการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนกับงานวิจัยของ Steel and Osgood แต่ค่าดัชนีประสิทธิผลที่คำนวณได้จากวิทยานิพนธ์ยังมีแนวโน้มที่คล้ายกับ งานวิจัยของ Steel and Osgood จึงยังสามารถนำวิธีจากวิทยานิพนธ์ไปใช้กับกรณีตัวอย่างแบบต่างๆได้

ต่อไปจะเปรียบเทียบค่าไบรีฟรินเจนซ์งานวิจัย Steel and Osgood กับวิทยานิพนธ์ โดยใช้เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรีที่มีค่า $\eta = 2$ และพื้นที่ของรูอากาศรูปวงรีเท่ากับ 0.1, 0.2 และ 0.3 ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบไบรีฟรินเจนซ์ของงานวิจัย Steel and Osgood กับวิทยานิพนธ์

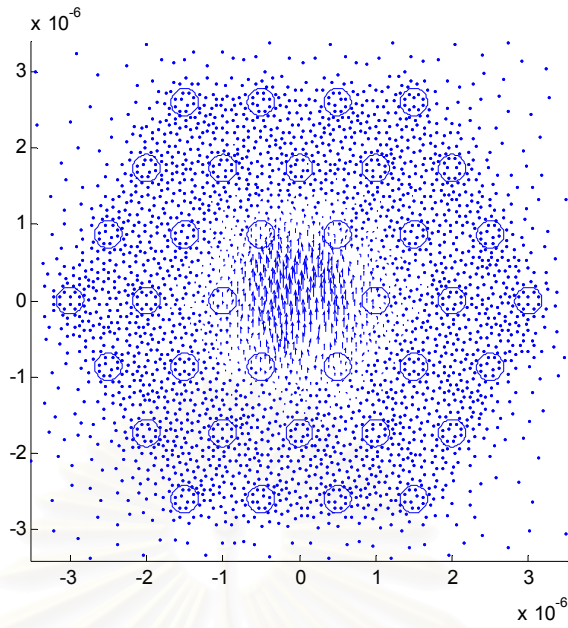
เมื่อเปรียบเทียบไบรีฟรินเจนซ์ของงานวิจัย Steel and Osgood กับวิทยานิพนธ์แล้วพบว่าช่วงระหว่างค่า v เท่ากับ 0.4 ถึง 1 มีความคลาดเคลื่อนมาก และช่วงระหว่างค่า v เท่ากับ 1 ถึง 2.2 จะมีความคลาดเคลื่อนลดลง ค่าดัชนีประสิทธิผลที่ได้จากวิทยานิพนธ์ถึงแม้จะคลาดเคลื่อนจากงานวิจัย Steel and Osgood แต่แนวโน้มคล้ายกันจึงสามารถนำวิทยานิพนธ์มาคำนวณในกรณีตัวอย่างแบบต่างๆได้

3.4 การคำนวณโพลาริเซชันเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตัลรูอากาศรูปวงกลมและรูปวงรี

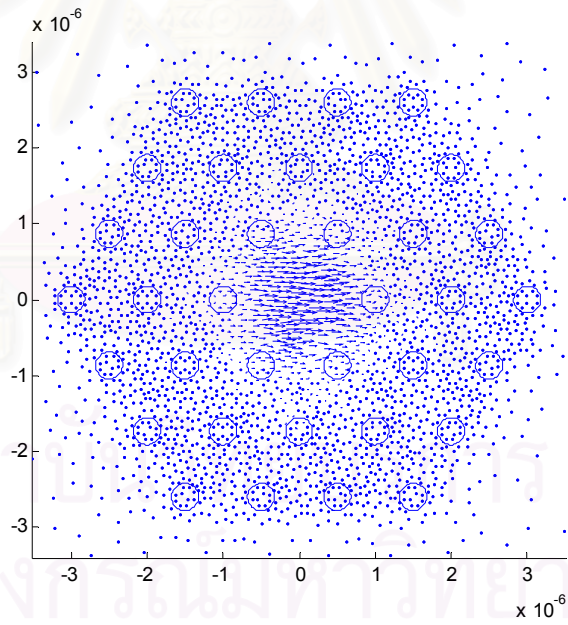
งานวิทยานิพนธ์นี้แบ่งงานไว้ 4 อย่าง โดยแบ่งตามเกณฑ์ของพื้นที่ของรูอากาศ (A) และค่าของ η คือ อัตราส่วนของความยาวแกนเอก (a) และความยาวแกนโท (b) ของรูอากาศรูปวงรี โดย a และ b มีหน่วยเป็นไมโครเมตร ถ้า $\eta = 1$ จะเป็นเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตัลรูอากาศรูปวงกลมและถ้า $\eta > 1$ จะเป็นเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตัลรูอากาศรูปวงรี กรณีตัวอย่างการแบ่งอิลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมว่ามีจำนวนโนดและจำนวนอิลีเมนต์ ตามลำดับ ดังตารางที่ 3.1-3.4 และได้นำเสนอรูปแบบของสนามอินพุตที่ใช้ในการป้อนเส้นใยนำแสงประเภท EPCF และ PCF ซึ่งมีโหมด 2 ประเภทคือ HE_{11}^y และ HE_{11}^x ซึ่งเป็นโหมดนำในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตัลที่มีพื้นที่รูอากาศ $A=0.1$ ดังรูป 3.4-3.11

ตารางที่ 3.1 กรณีตัวอย่างรูอากาศที่มีพื้นที่ $A=0.1$

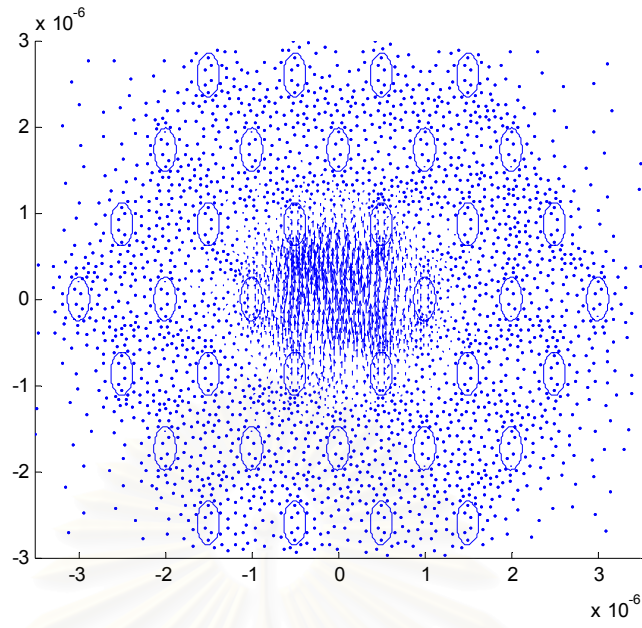
A	η	a	b	จำนวนโนด	จำนวนอิลีเมนต์
0.1	1	0.1784	0.1784	7521	3724
	2	0.2523	0.1262	7685	3806
	3	0.309	0.103	6357	3142
	4	0.3568	0.0892	5397	2662



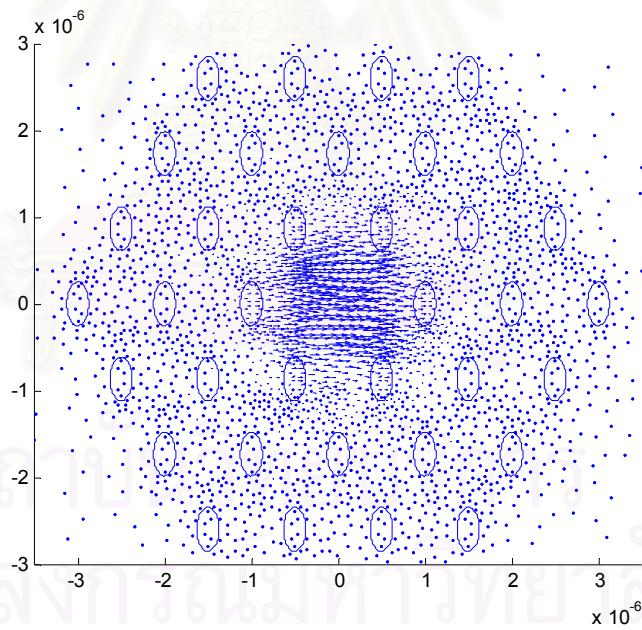
รูปที่ 3.4 โหมด HE_{11}^y ของ PCF ที่มี $A=0.1$ และ $\eta=1$



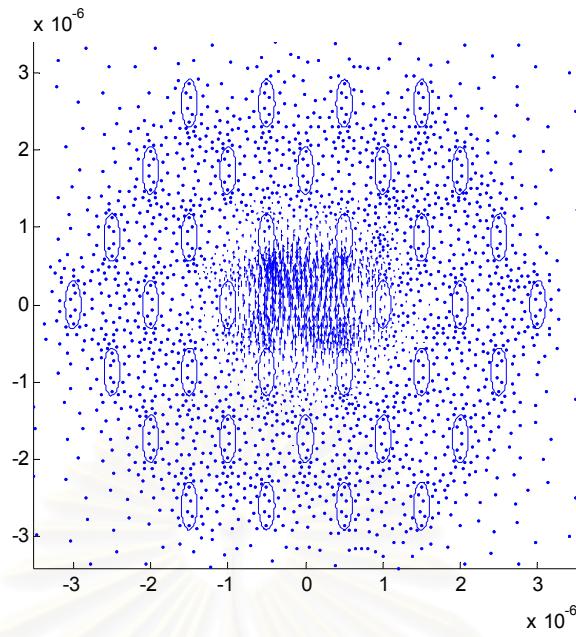
รูปที่ 3.5 โหมด HE_{11}^x ของ PCF ที่มี $A=0.1$ และ $\eta=1$



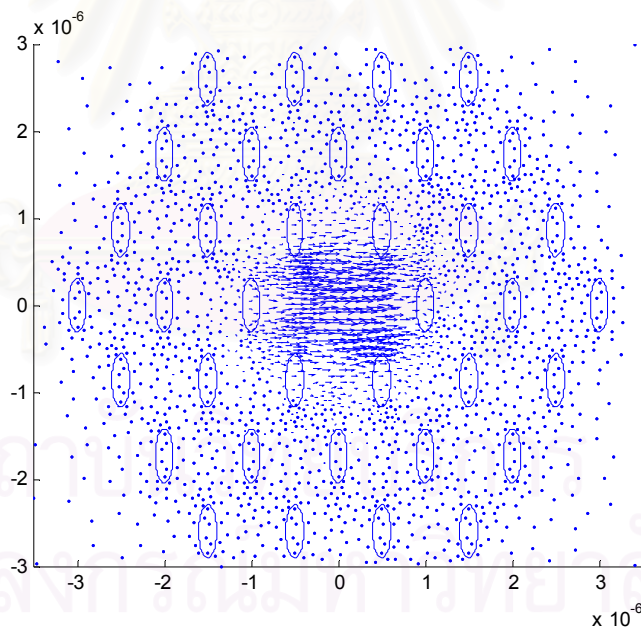
รูปที่ 3.6 โหมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.1$ และ $\eta = 2$



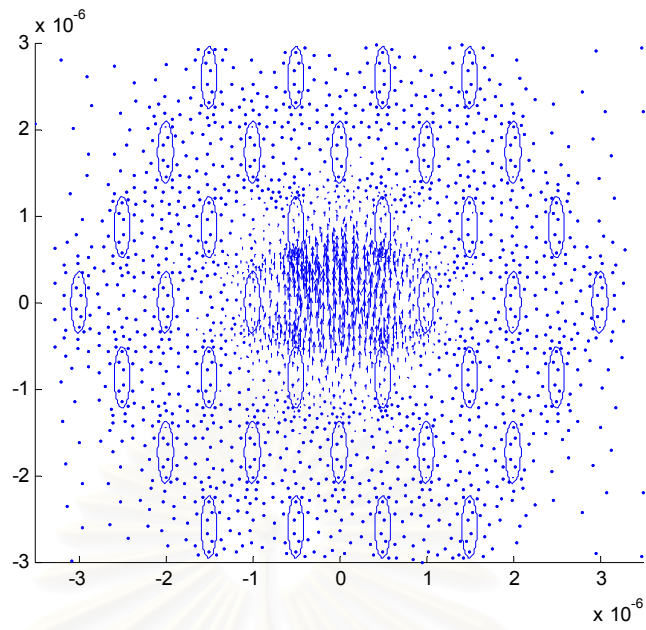
รูปที่ 3.7 โหมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.1$ และ $\eta = 2$



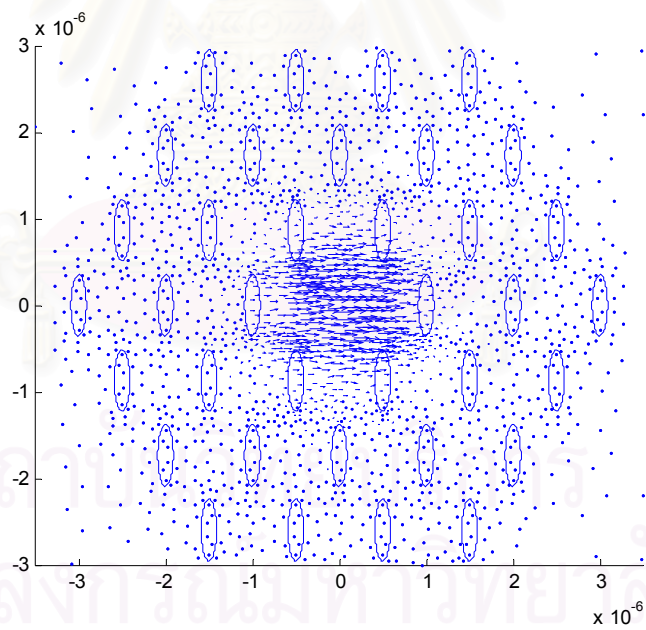
รูปที่ 3.8 โมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.1$ และ $\eta = 3$



รูปที่ 3.9 โมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.1$ และ $\eta = 3$

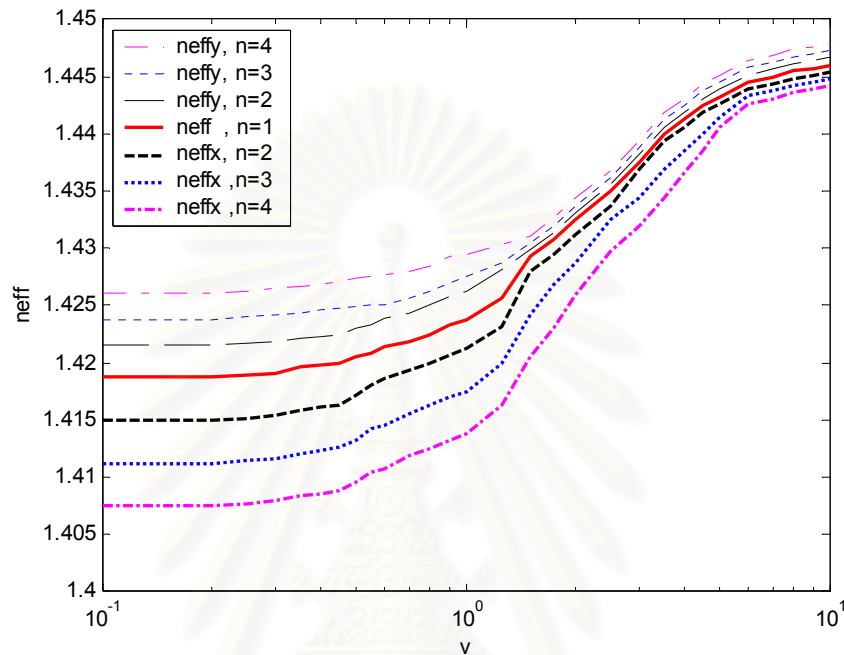


รูปที่ 3.10 โหมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.1$ และ $\eta = 4$



รูปที่ 3.11 โหมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.1$ และ $\eta = 4$

เมื่อป้อนสนามอินพุตเข้าไปในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลแล้วนำมาสนามอินพุตนี้หาค่าสนามไฟฟ้าในระนาบหน้าตัดถัดไปโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์บีมพรอพากชันแล้วผลที่ได้คือค่าดัชนีประสิทธิผล (n_{eff}) ซึ่งจะมี 2 ประเภท คือ n_{eff}^x และ n_{eff}^y ซึ่งจะแสดงค่าดัชนีประสิทธิผลได้ดังรูปที่ 3.12 ดังนี้



รูปที่ 3.12 ค่าดัชนีประสิทธิผลของ EPCF ที่พื้นที่ของรูอากาศ $A=0.1$

จากรูปที่ 3.12 ค่าดัชนีประสิทธิผลในแนวแกน y (n_{eff}^y) มีค่ามากกว่าดัชนีประสิทธิผลในแนวแกน x (n_{eff}^x) เพราะการจัดเรียงของเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรี ที่มีรูอากาศรูปวงรีมีแกนเอกขนานกับแกน y ทำให้คลื่นแสงมีทิศแพร่กระจายไปทางแกน y จึงทำให้ n_{eff}^y มากกว่า n_{eff}^x

สังเกตว่าถ้า n_{eff}^y ที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวแกนเอกกับความยาวแกนโท η มากจะทำให้ n_{eff}^y มีค่ามาก เพราะถ้า η มากจะทำให้พื้นที่แกนกลางของเส้นใยนำแสง EPCF มีมากขึ้นจะทำให้ n_{eff}^y มีค่ามากด้วย

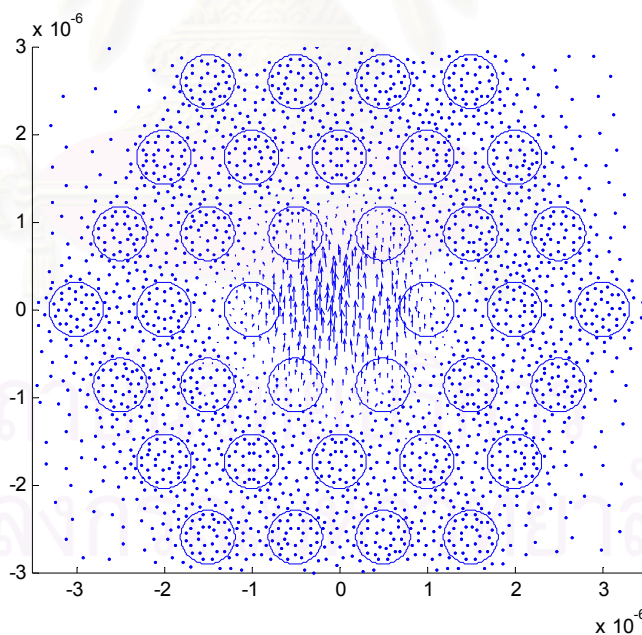
ถ้า $\eta=1$ หมายถึงเส้นใยนำแสง PCF รูอากาศรูปวงกลมจะมีค่า n_{eff}^y และ n_{eff}^x ใกล้เคียงกันมากหรือเส้นกราฟทับพอดี

ในช่วง v อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ค่า n_{eff}^y มีค่าห่างจาก n_{eff}^x มากจะทำให้สามารถควบคุมโพลาไรเซชันให้อยู่ให้แนวแกน y ได้ และช่วง v อยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 ค่าดัชนี

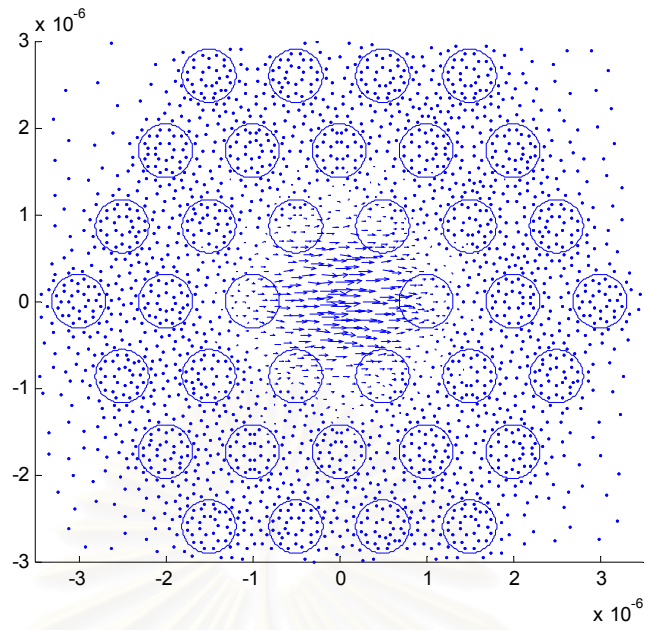
ประสิทธิภาพมีค่าใกล้เคียงกันมาก ไม่สามารถใช้ช่วงนี้ควบคุมโพลาไรเซชันได้ ไม่ว่ากรณีตัวอย่างในตารางที่ 3.2-3.4 มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน ตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 กรณีตัวอย่างรูอากาศที่มีพื้นที่ $A=0.2$

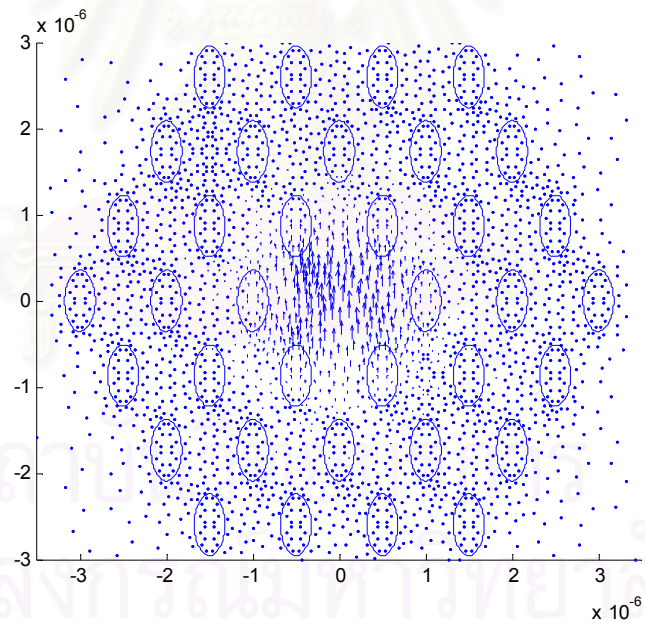
A	η	a	b	จำนวน โหนด	จำนวนอีลีเมนต์
0.2	1	0.2523	0.2523	6477	3202
	2	0.3568	0.1784	7010	3514
	3	0.4371	0.1457	3737	1832
	4	0.5046	0.1262	7227	3572



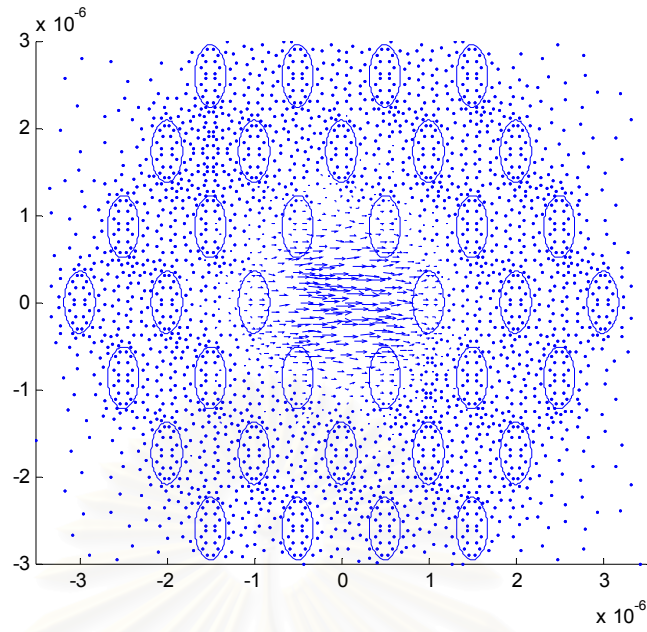
รูปที่ 3.13 โหมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.2$ และ $\eta=1$



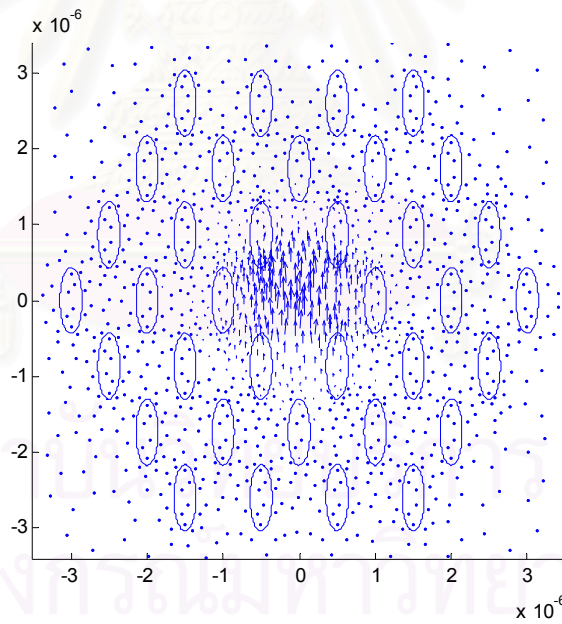
รูปที่ 3.14 โหมด HE_{11}^x ของ PCF ที่มี $A=0.2$ และ $\eta = 1$



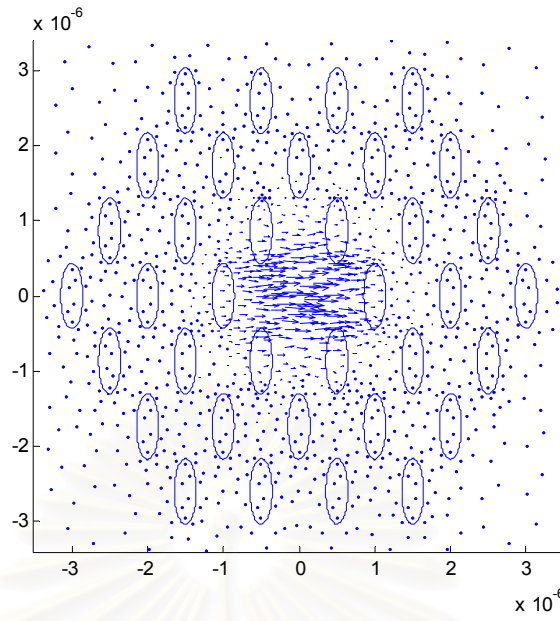
รูปที่ 3.15 โหมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.2$ และ $\eta = 2$



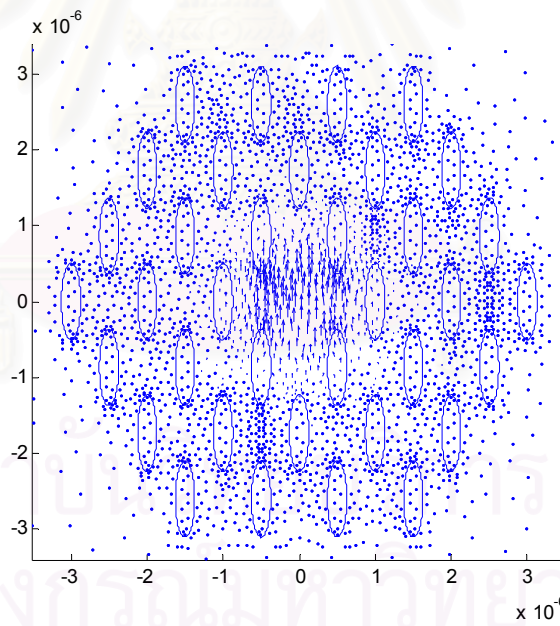
รูปที่ 3.16 โหมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.2$ และ $\eta = 2$



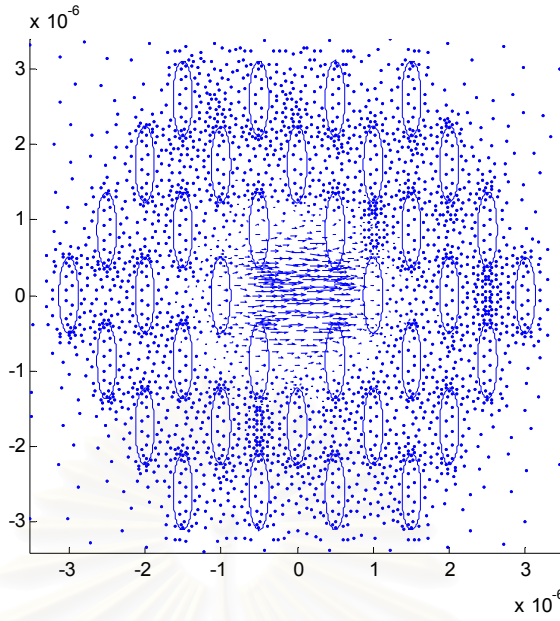
รูปที่ 3.17 โหมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.2$ และ $\eta = 3$



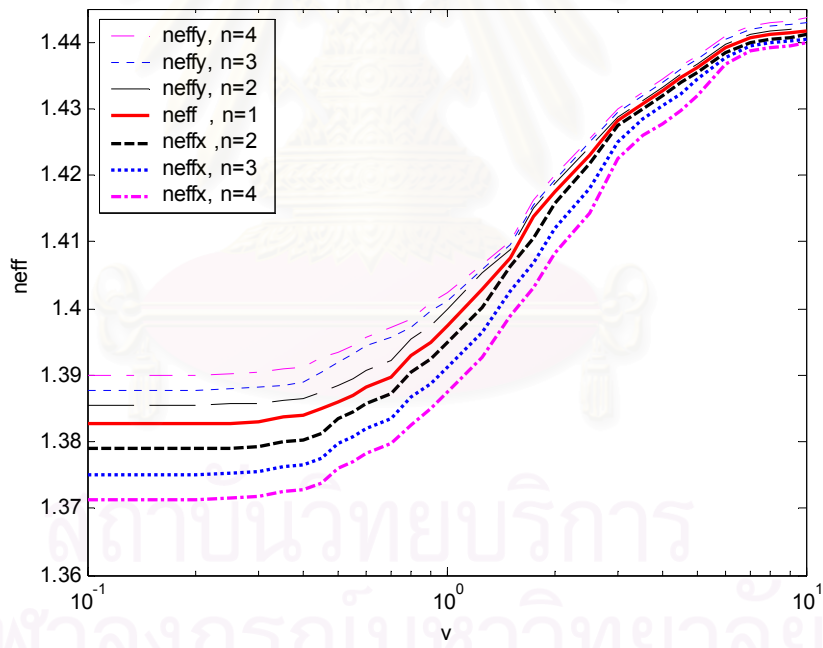
รูปที่ 3.18 โมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.2$ และ $\eta = 3$



รูปที่ 3.19 โมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.2$ และ $\eta = 4$



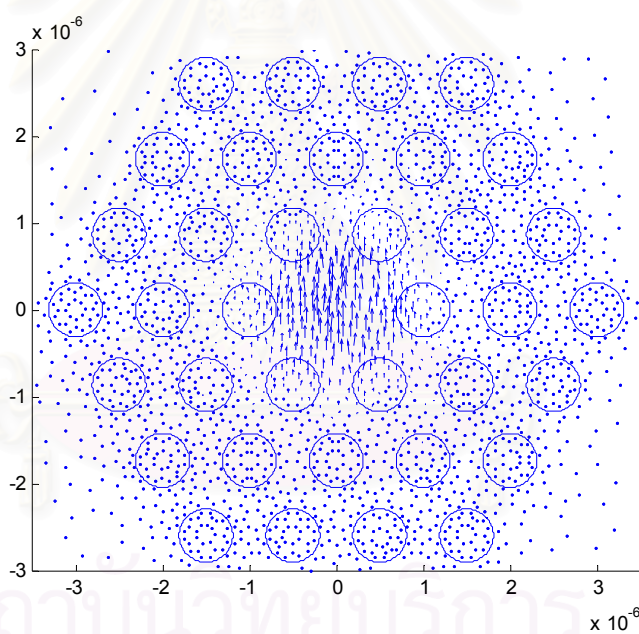
รูปที่ 3.20 โมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.2$ และ $\eta = 4$



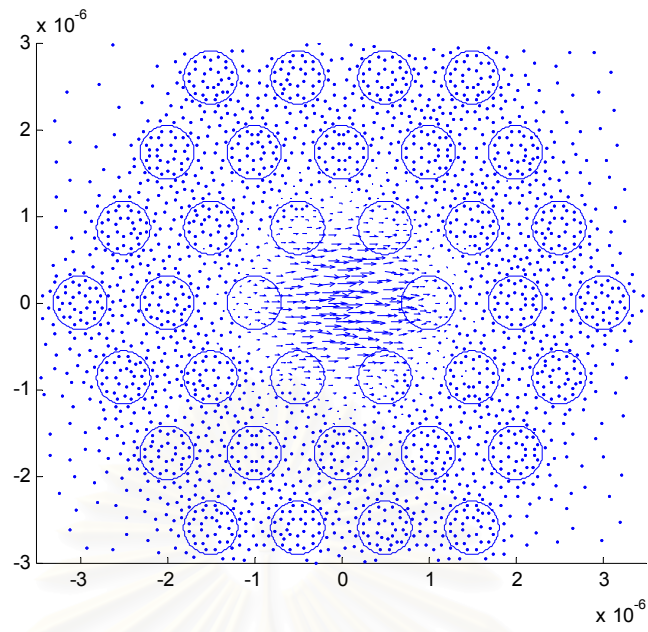
รูปที่ 3.21 ค่าธรรมเนียมประสิทธิภาพของ EPCF ที่พื้นที่ของรูอากาศ $A=0.2$

ตารางที่ 3.3 กรณีตัวอย่างรูอากาศที่มีพื้นที่ $A=0.3$

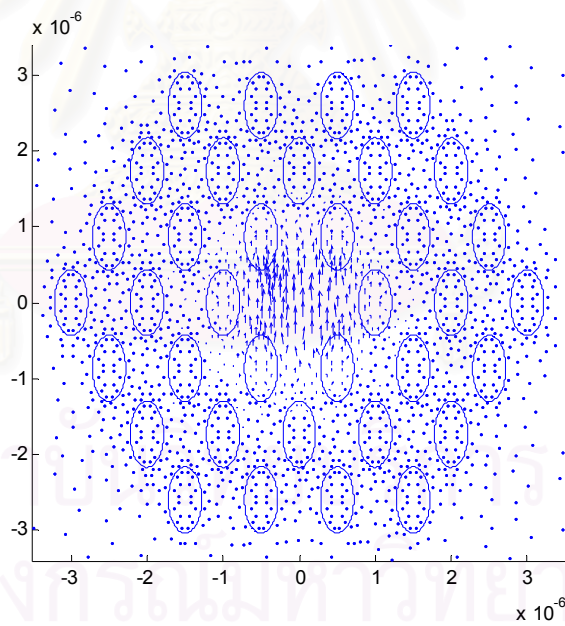
A	η	a	b	จำนวนโนด	จำนวนอีลีเมนต์
0.3	1	0.3090	0.3090	6329	3128
	2	0.4370	0.2185	5453	2690
	3	0.5352	0.1784	8649	4288
	4	0.6180	0.1545	7529	3728



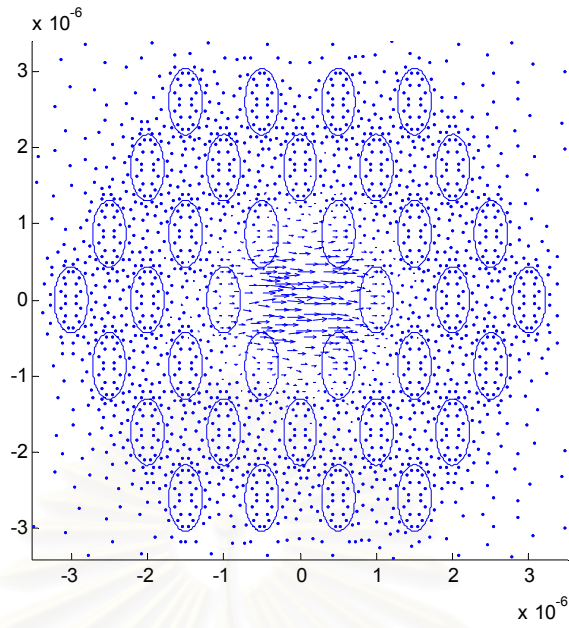
รูปที่ 3.22. โหมด HE_{11}^y ของ PCF ที่มี $A=0.3$ และ $\eta = 1$



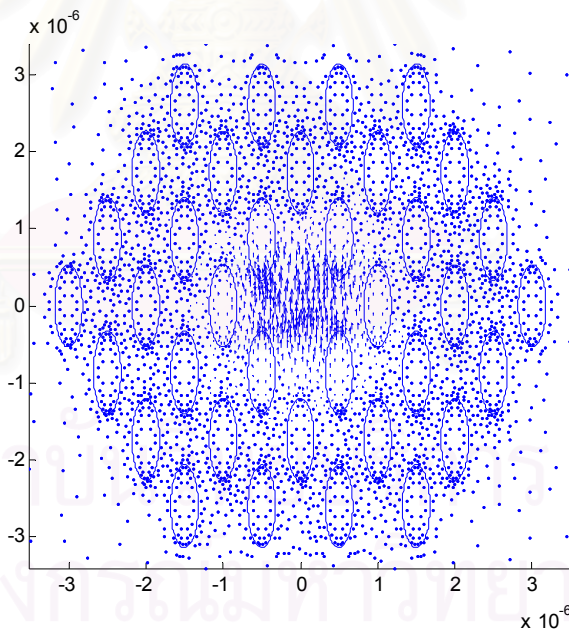
รูปที่ 3.23 โหมด HE_{11}^x ของ PCF ที่มี $A=0.3$ และ $\eta = 1$



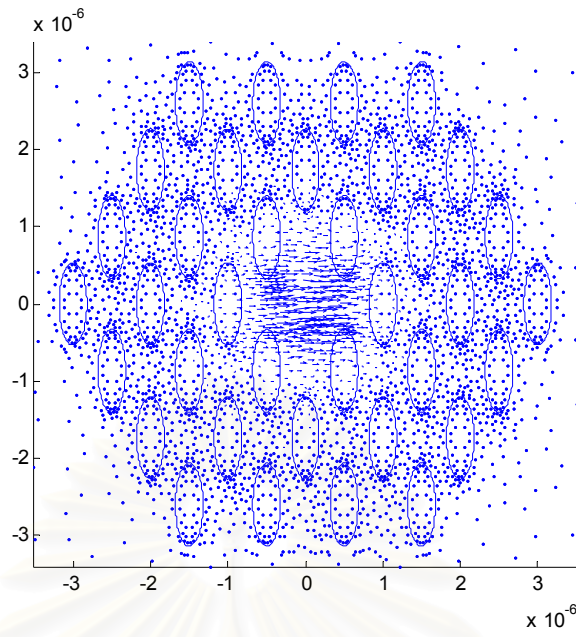
รูปที่ 3.24 โหมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.3$ และ $\eta = 2$



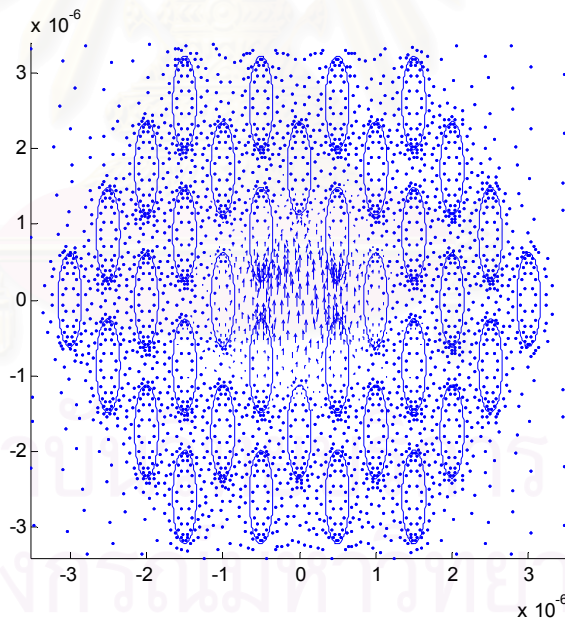
รูปที่ 3.25 โหมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.3$ และ $\eta = 2$



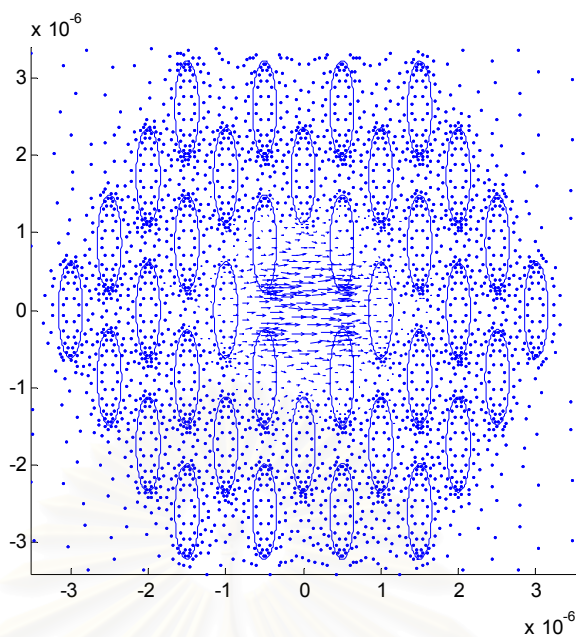
รูปที่ 3.26 โหมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.3$ และ $\eta = 3$



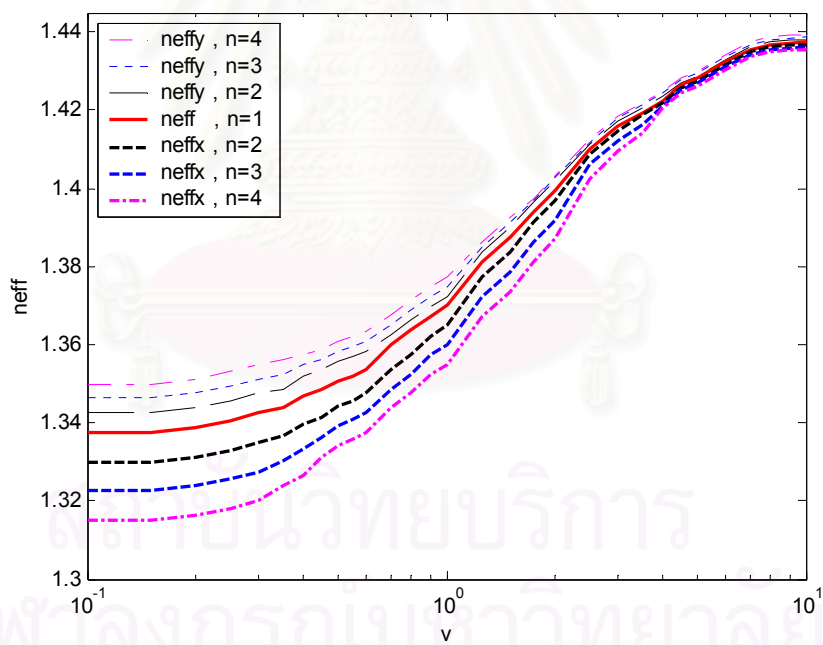
รูปที่ 3.27 โหมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.3$ และ $\eta = 3$



รูปที่ 3.28 โหมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.3$ และ $\eta = 4$



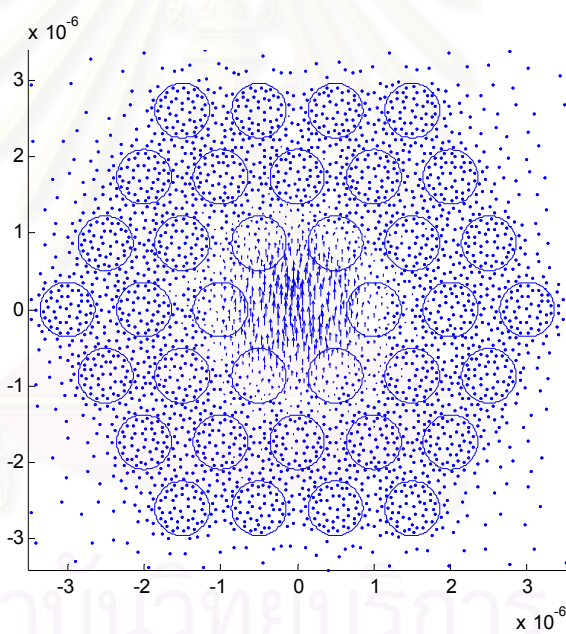
รูปที่ 3.29 โมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.3$ และ $\eta = 4$



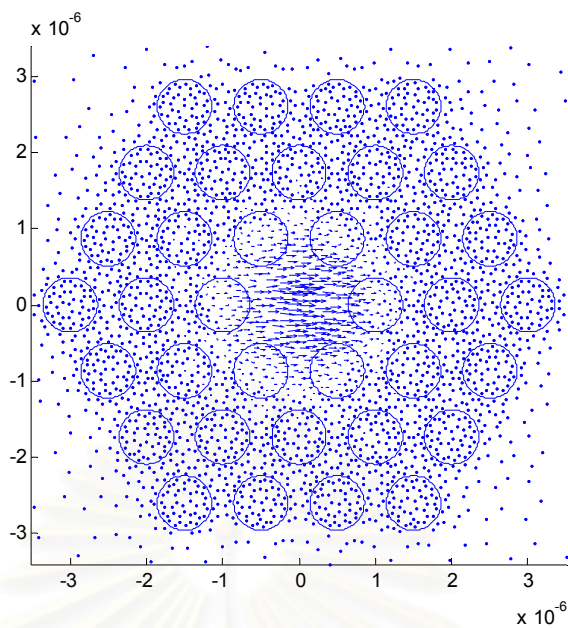
รูปที่ 3.30 ค่าดัชนีประสิทธิผลของ EPCF ที่พื้นที่ของรูอากาศ $A=0.3$

ตารางที่ 3.4 กรณีตัวอย่างรูอากาศที่มีพื้นที่ $A=0.4$

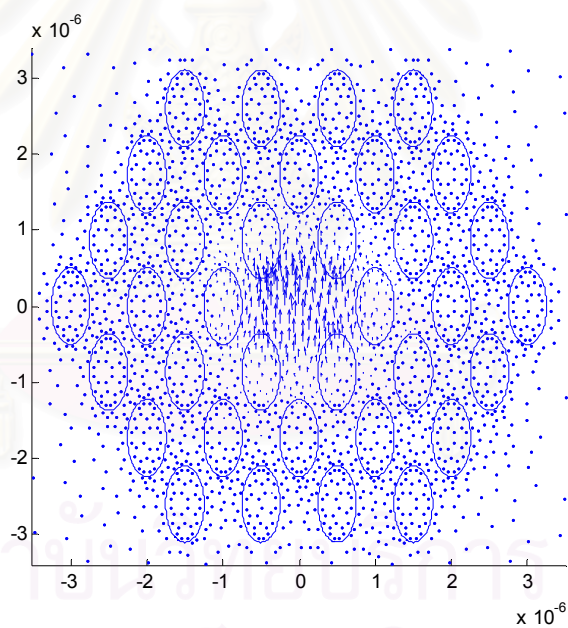
A	η	a	b	จำนวนโนด	จำนวนอีลีเมนต์
0.4	1	0.3568	0.3568	7525	3726
	2	0.5046	0.2523	6281	3104
	3	0.6180	0.2060	7397	3662
	4	0.7136	0.1784	6125	3026



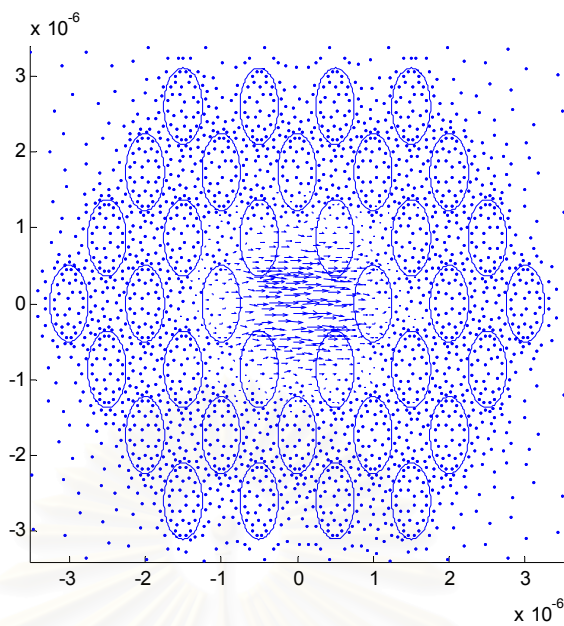
รูปที่ 3.31 โหมด HE_{11}^y ของ PCF ที่มี $A=0.4$ และ $\eta = 1$



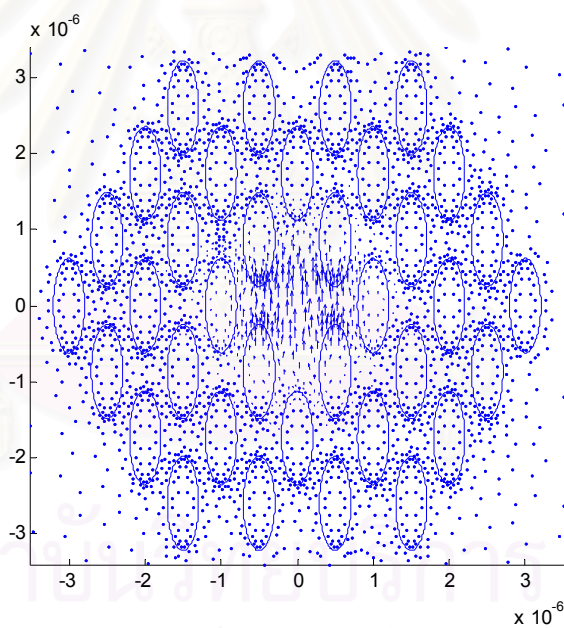
รูปที่ 3.32 โหมด HE_{11}^x ของ PCF ที่มี $A=0.4$ และ $\eta = 1$



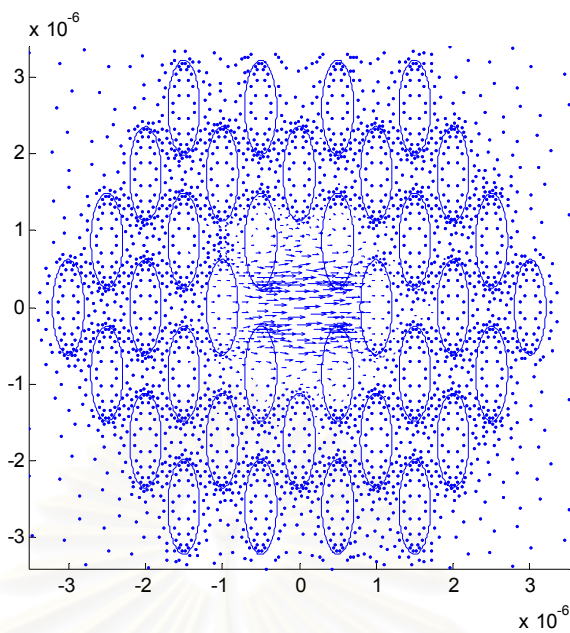
รูปที่ 3.33 โหมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.4$ และ $\eta = 2$



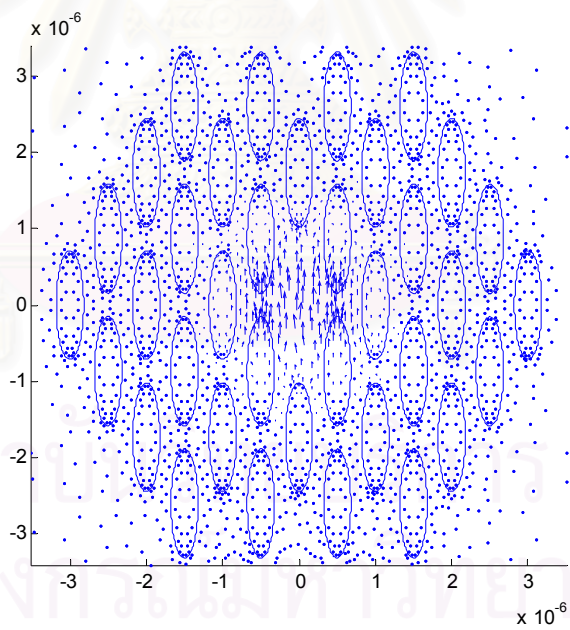
รูปที่ 3.34 โหมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.4$ และ $\eta = 2$



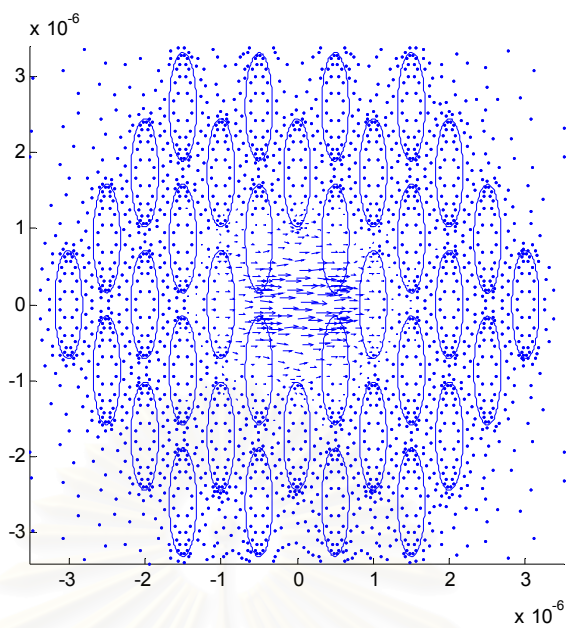
รูปที่ 3.35 โหมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.4$ และ $\eta = 3$



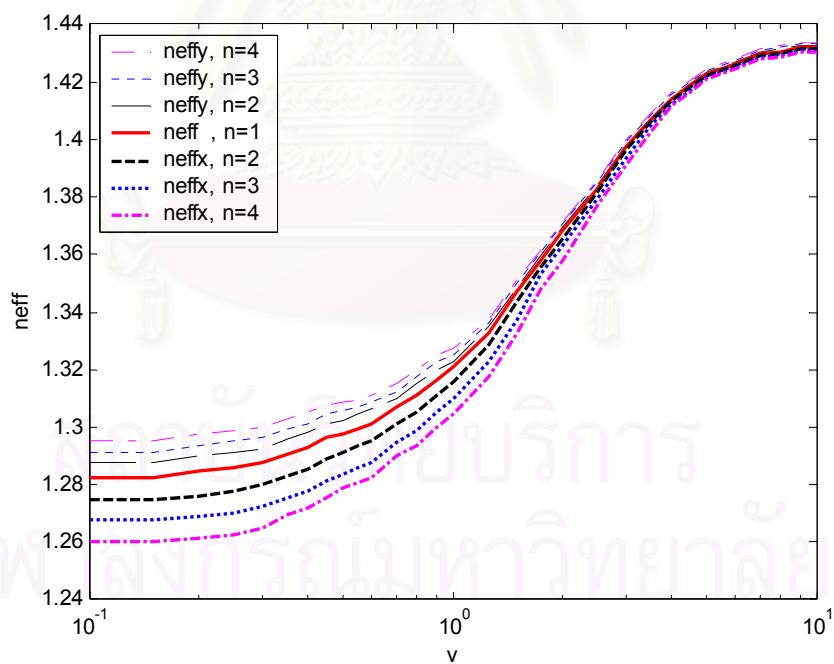
รูปที่ 3.36 โหมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.4$ และ $\eta = 3$



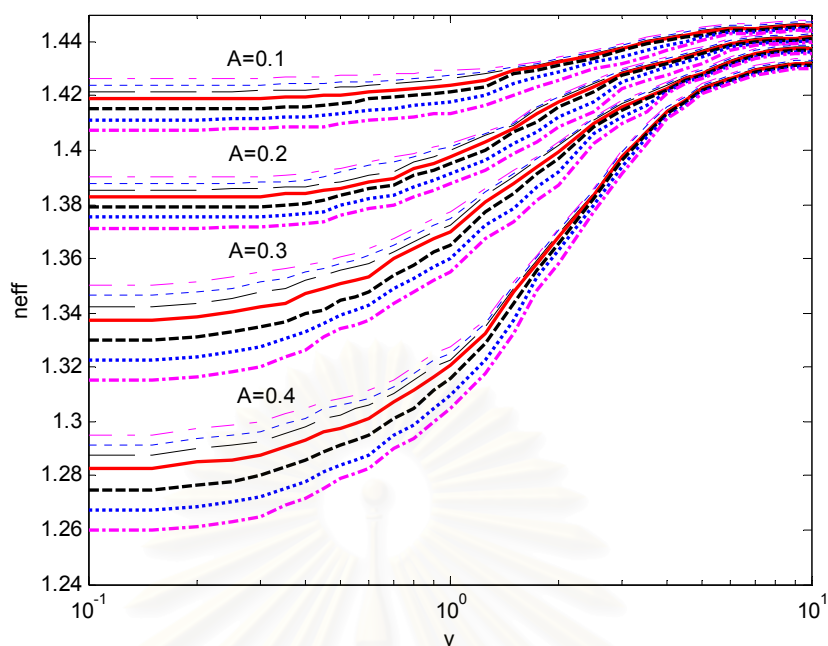
รูปที่ 3.37 โหมด HE_{11}^y ของ EPCF ที่มี $A=0.4$ และ $\eta = 4$



รูปที่ 3.38 โหมด HE_{11}^x ของ EPCF ที่มี $A=0.4$ และ $\eta = 4$



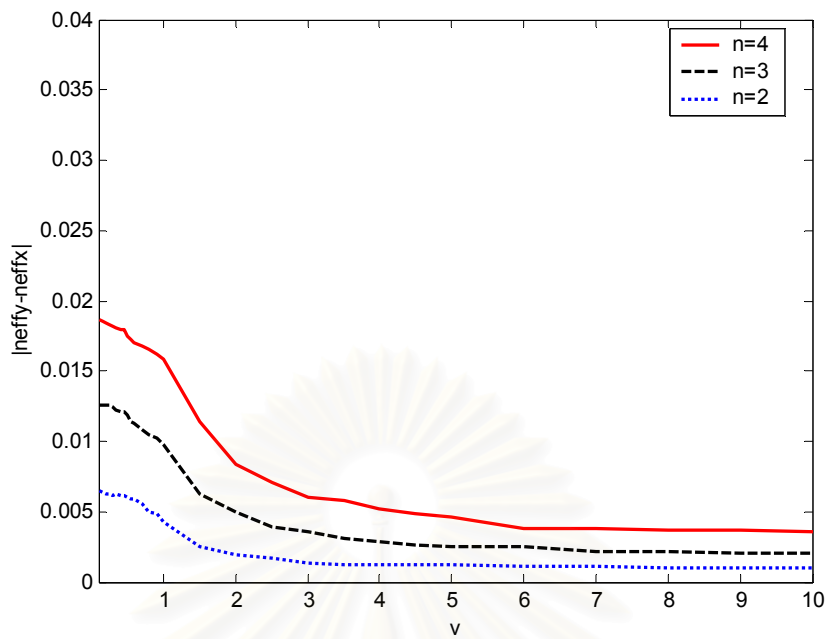
รูปที่ 3.39 ค่าดัชนีประสิทธิผลของ EPCF ที่พื้นที่ของรูอากาศ $A=0.4$



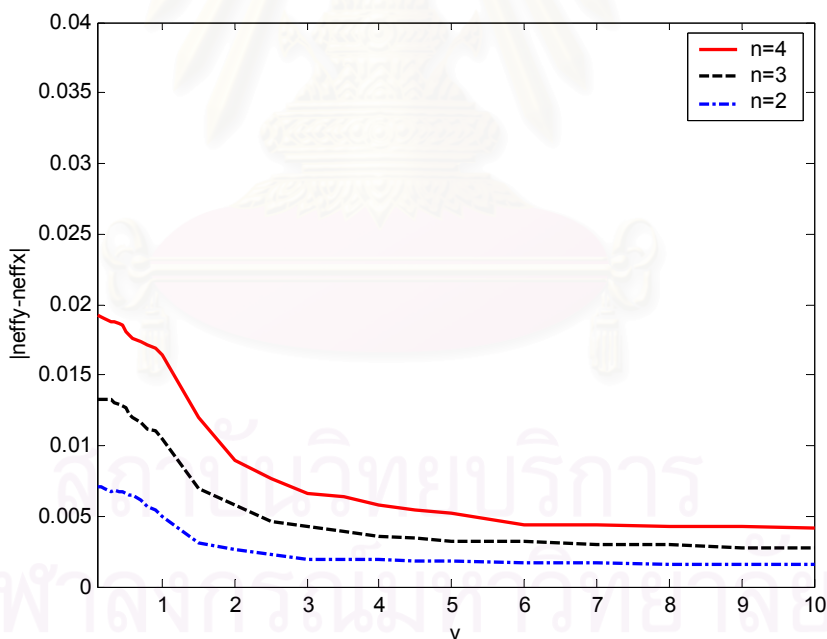
รูปที่ 3.40 ค่าดัชนีประสิทธิผลของ EPCF ที่พื้นที่ของรูอากาศ $A=0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4

เมื่อนำเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรีมาเปรียบเทียบกันสามารถสรุปได้ว่าพื้นที่ของรูอากาศรูปวงรีมีผลต่อค่าดัชนีประสิทธิผลซึ่งถ้าเส้นใยนำแสง EPCF มีพื้นที่ของรูอากาศน้อย ($A=0.1$) ทำให้ค่าดัชนีประสิทธิผลจะมากกว่าพื้นที่ของรูอากาศมาก ($A=0.4$) ดังรูป 3.40 และเมื่อเปรียบเทียบค่า η (อัตราส่วนของความยาวแกนเอกกับความยาวแกนโทของรูอากาศรูปวงรี) ถ้า η เท่ากัน พื้นที่รูอากาศรูปวงรีน้อยจะมีผลให้ค่าดัชนีประสิทธิผลมีค่ามากกว่าพื้นที่รูอากาศรูปวงรีมาก

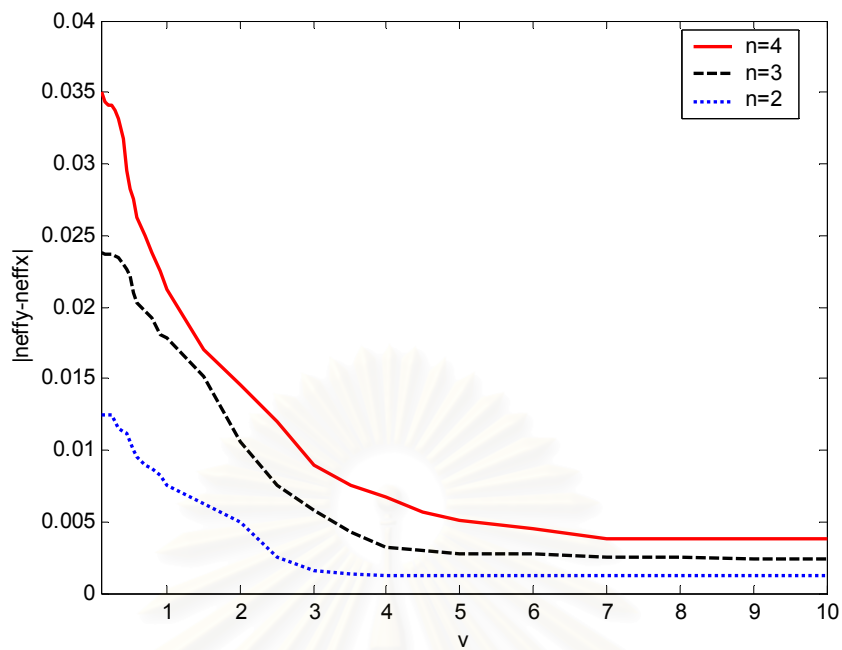
เมื่อสามารถหาค่าดัชนีประสิทธิผลได้แล้วจะนำค่าดัชนีประสิทธิผลแนวแกน x และดัชนีประสิทธิผลแนวแกน y หาผลต่างซึ่งจะได้ค่าไบรีฟรินเจนซ์ เปรียบเทียบว่าเส้นใยนำแสงที่มีคุณสมบัติอย่างไรที่จะทำให้โพลาริเซชันคงที่ ดังผลในรูปที่ 3.41-3.44 จะแสดงกราฟของไบรีฟรินเจนซ์ $|n_{eff}^y - n_{eff}^x|$ กับ $v = \omega\Lambda/2\pi c$, โดย ω คือความถี่เชิงมุม, Λ คือระยะห่างระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกัน (ระยะพิตช์), c คือความเร็วแสงในอากาศ



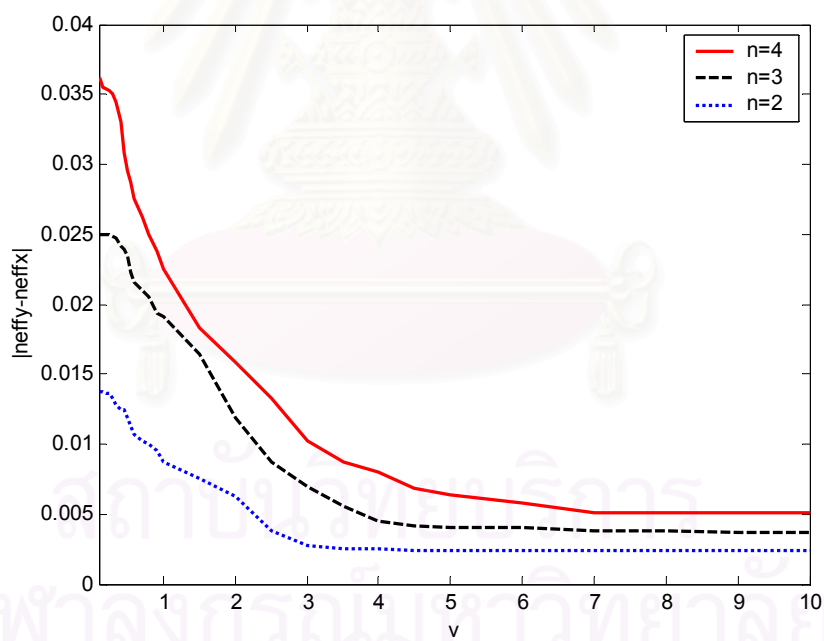
รูปที่ 3.41 ค่าไบรฟรินเจนซ์ของ EPCF ที่พื้นที่ของรูอากาศ A=0.1



รูปที่ 3.42 ค่าไบรฟรินเจนซ์ของ EPCF ที่พื้นที่ของรูอากาศ A=0.2

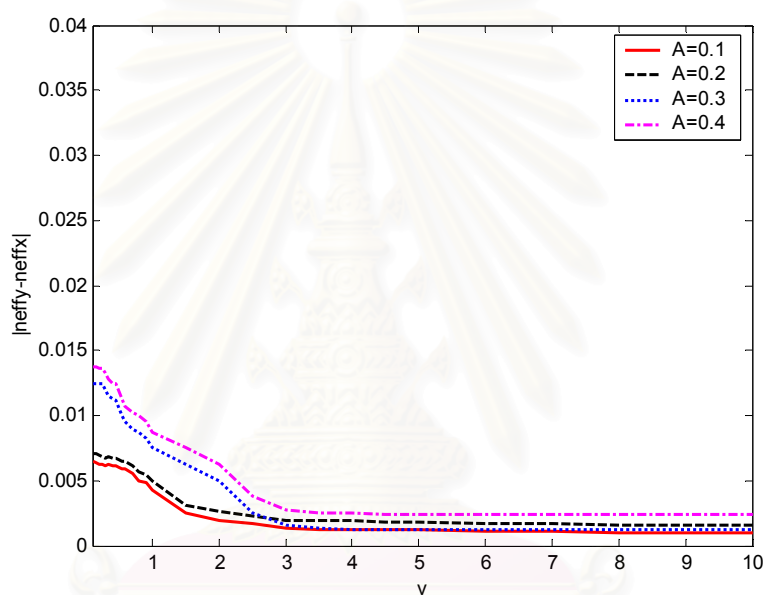


รูปที่ 3.43 ค่าไปริพริเจนซ์ของ EPCF ที่พื้นที่ของรูอากาศ A=0.3

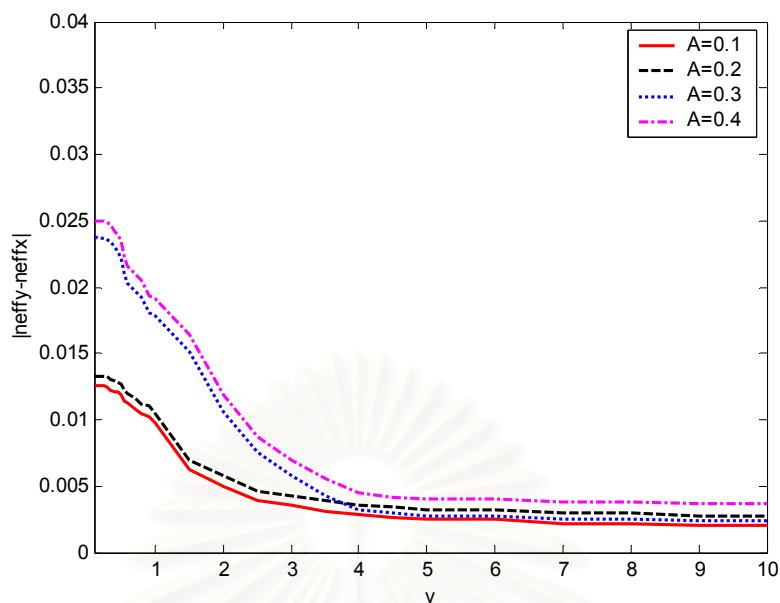


รูปที่ 3.44 ค่าไปริพริเจนซ์ของ EPCF ที่พื้นที่ของรูอากาศ A=0.4

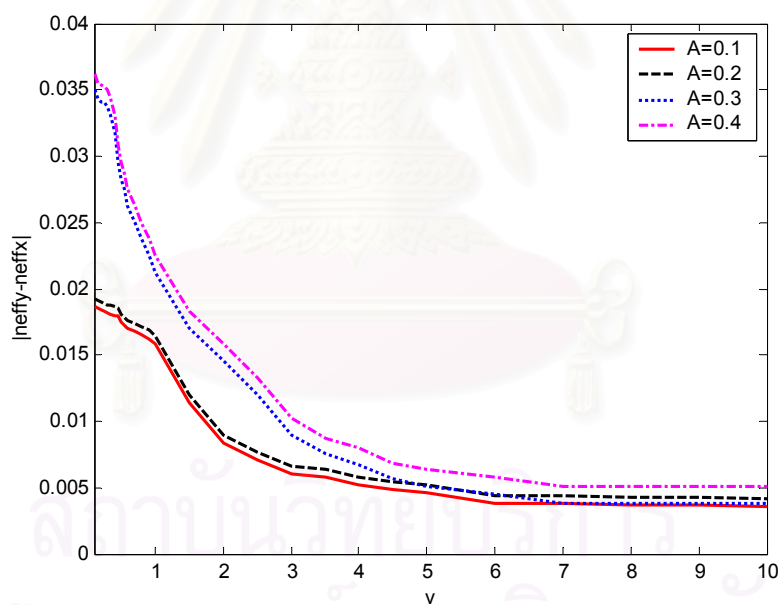
ค่าไบริพริเจนซ์เป็นค่าที่ใช้ในการวัดโพลาริเซชันว่าเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูปวงรีแบบไปนหรือองค์ประกอบอะไรที่มีผลทำให้เกิดโพลาริเซชันคงที่ซึ่งถ้าเปรียบเทียบเส้นใยนำแสง EPCF ที่มีพื้นที่ของรูอากาศเท่ากัน สรุปได้ว่าถ้าอัตราส่วนของความยาวแกนเอกกับความยาวแกนโทของรูอากาศรูปวงรี (η) มีค่ามากจะทำให้ไบริพริเจนซ์มีค่ามากกว่า η ที่มีค่าน้อย เช่น $\eta=4$ มีค่าไบริพริเจนซ์มากกว่า $\eta=2$ ซึ่งค่า η มากจะทำให้ค่าดรรชนีประสิทธิผลแนวแกน x และ y มีค่าต่างกันมากและทำให้จะรักษาโพลาริเซชันให้อยู่แนวแกนใดแกนหนึ่งได้ เมื่อเปรียบเทียบในกรณีที่ η เท่ากันบ้างค่าไบริพริเจนซ์จะมีค่าอย่างไรให้พิจารณาจากรูปที่ 3.45-3.47



รูปที่ 3.45 ค่าไบริพริเจนซ์ของ EPCF ที่มีค่า $\eta=2$



รูปที่ 3.46 ค่าไบริฟรินเจนซ์ของ EPCF ที่มีค่า $\eta=3$

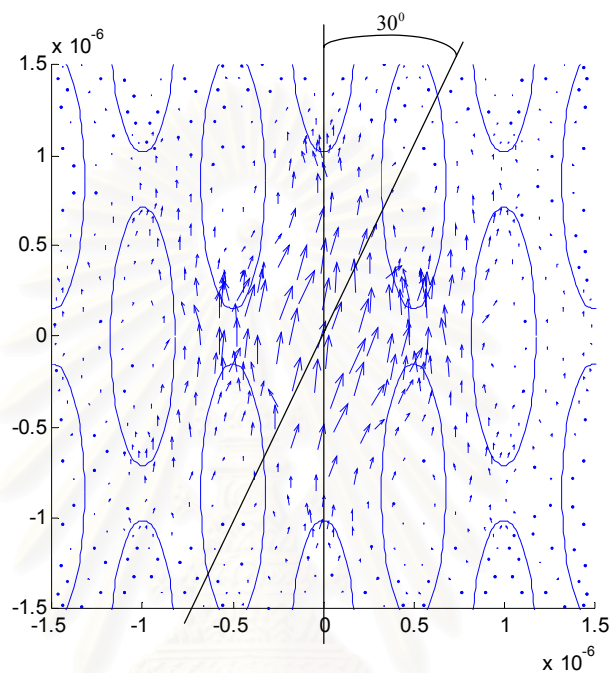


รูปที่ 3.47 ค่าไบริฟรินเจนซ์ของ EPCF ที่มีค่า $\eta=4$

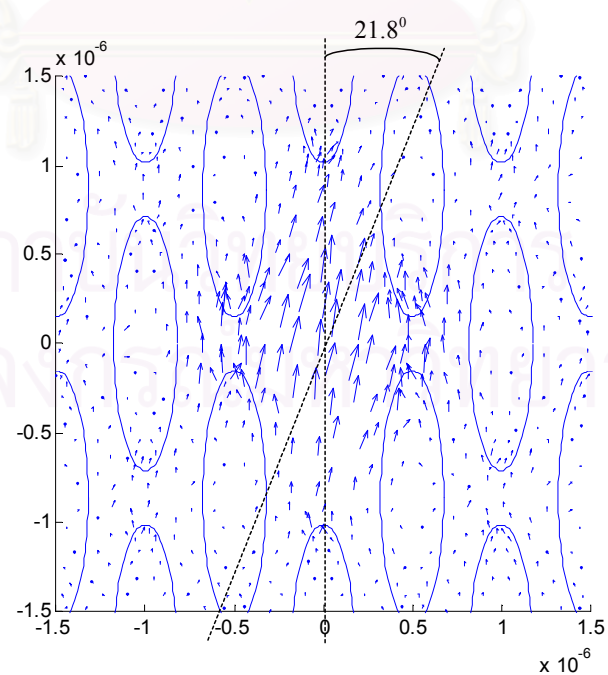
ข้อสรุปอีกอย่างหนึ่งคือถ้าเปรียบเทียบค่า η เท่ากัน เมื่อมีพื้นที่ของรูอากาศมาก ($A=0.4$) จะทำให้ค่าไบริฟรินเจนซ์มากกว่าพื้นที่ของรูอากาศน้อย ($A=0.1$) ทำให้พื้นที่ของรูอากาศมากสามารถควบคุมโพลาไรเซชันได้

3.5 ตัวอย่างการควบคุมโพลาไรเซชันในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตัลรูอากาศรูปวงรี

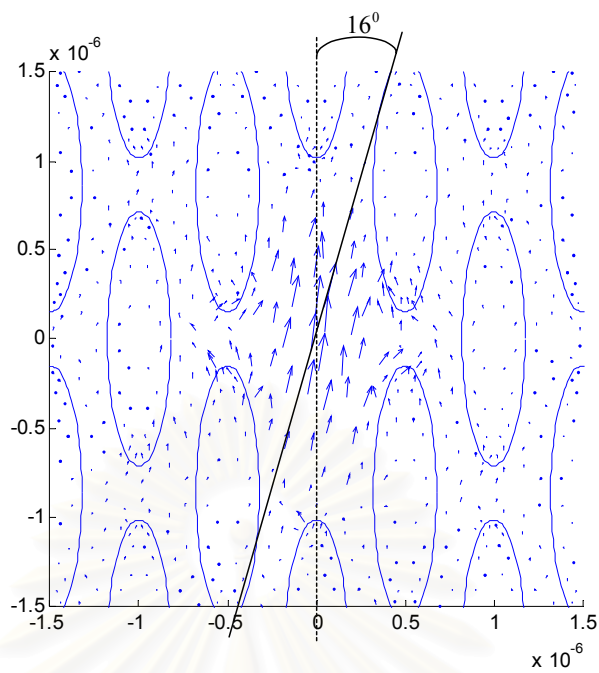
การทดสอบว่าเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตัลรูอากาศรูปวงรีสามารถควบคุมโพลาไรเซชันได้อย่างไร เริ่มต้นด้วยการป้อนอินพุตเกาส์เซียนที่มีโพลาไรเซชันทำมุม 30° กับแกน y คำนวณโดย FE-BPM ดังรูปที่ 3.46 เข้าไปใน EPCF ที่มี $A=0.4$ และ $\eta = 4$ ตามระยะทางต่างๆ



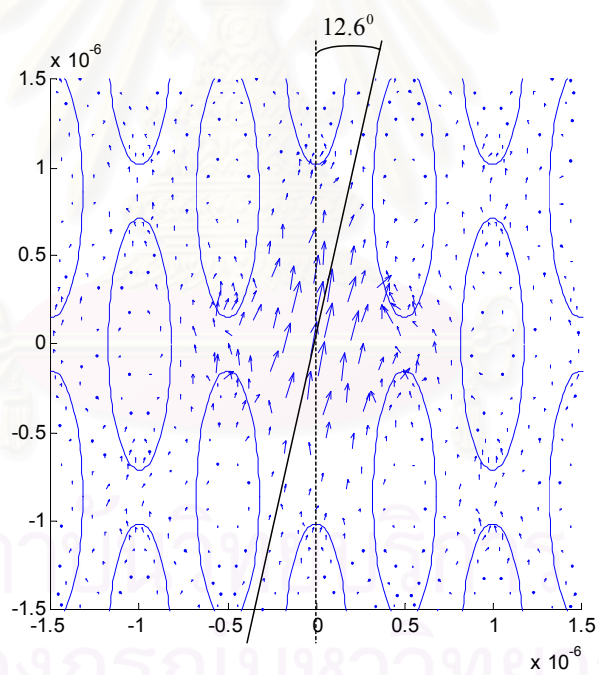
รูปที่ 3.48 ทิศของโพลาไรเซชันทำมุม 30° กับแกน y



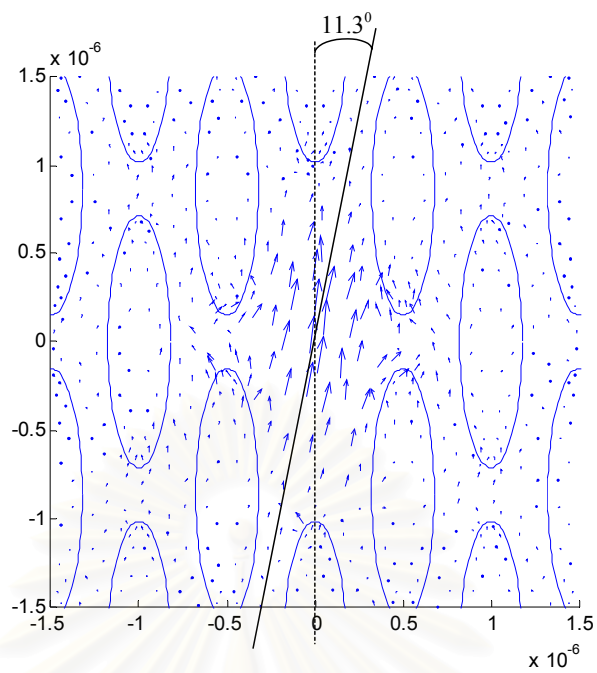
รูปที่ 3.49 ทิศของโพลาไรเซชันทำมุม 21.8° กับแกน y ที่ระยะทาง 10 ไมโครเมตร



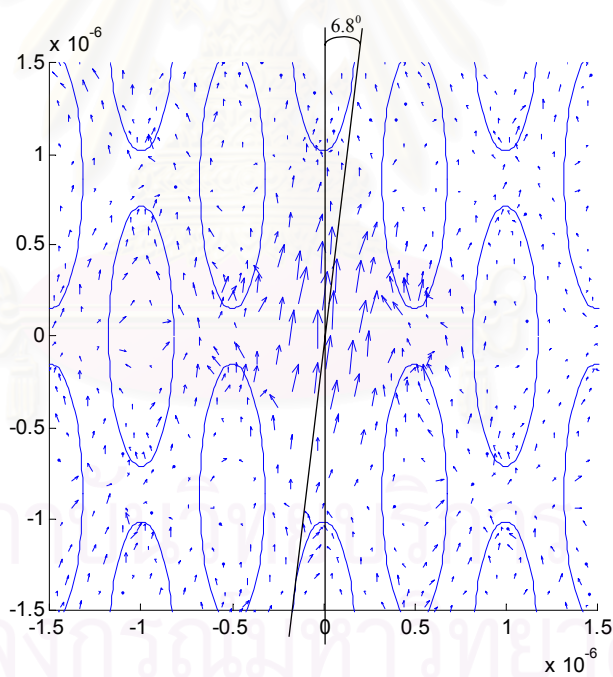
รูปที่ 3.50 ทิศของโพลาริเซชันทำมุม 16° กับแกน y ที่ระยะทาง 30 ไมโครเมตร



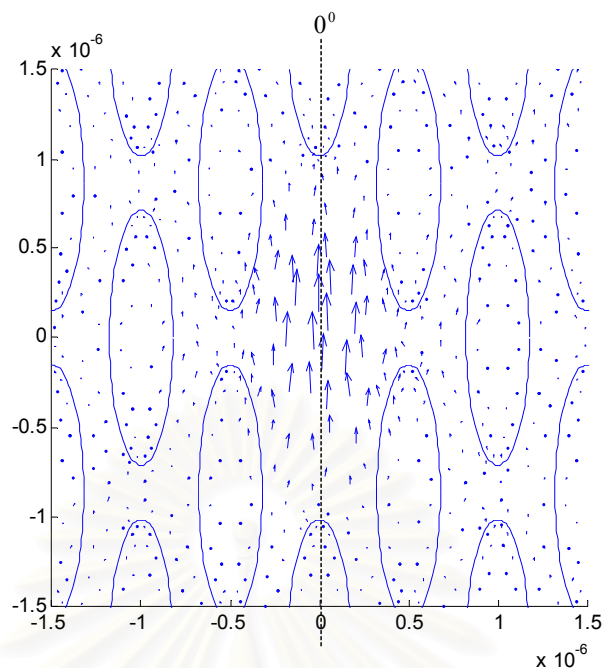
รูปที่ 3.51 ทิศของโพลาริเซชันทำมุม 12.6° กับแกน y ที่ระยะทาง 50 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.52 ทิศของโพลาไรเซชันทำมุม 11.3° กับแกน y ที่ระยะทาง 80 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.53 ทิศของโพลาไรเซชันทำมุม 6.8° กับแกน y ที่ระยะทาง 100 ไมโครเมตร



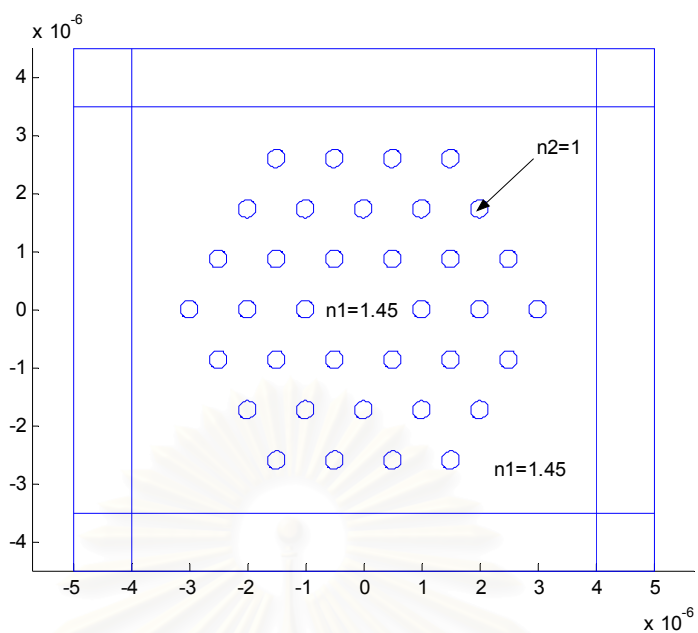
รูปที่ 3.54 ทิศของโพลาริเซชันทำมุม 0° กับแกน y ที่ระยะทาง 120 ไมโครเมตร

จากรูปที่ 3.48-3.54 ทิศของโพลาริเซชันค่อยๆปรับให้อยู่ในอยู่ในแนวเดียวกัน การวางตัวของแกนเอกของรูอากาศรูปวงรีซึ่งวางตัวขนานกับแกน y ดังนั้นเมื่อป้อนสนามอินพุตที่มี ทิศทางเท่าใด EPCF จะพยายามปรับทิศของโพลาริเซชันให้อยู่ทางเดียวกันแกน y

3.6 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแกนของเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอล

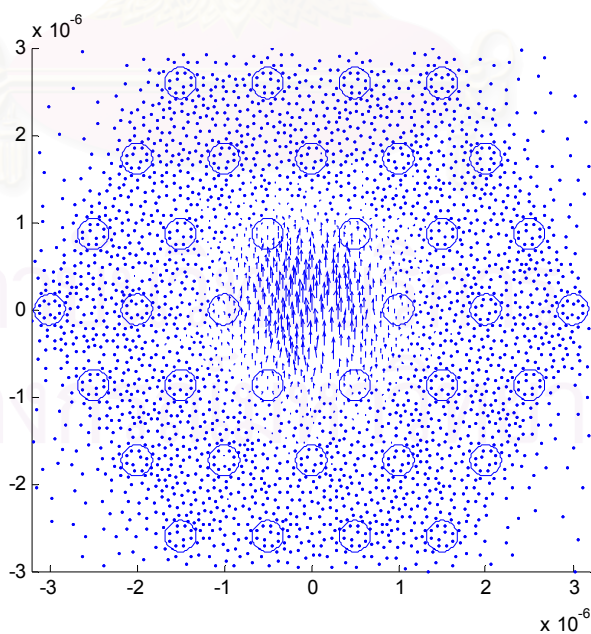
3.6.1 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงกลม (PCF) แกนวงกลม

หัวข้อนี้จะทดสอบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแกนของ PCF แกนวงกลมเปลี่ยนเป็น แกนวงรีจะมีผลต่อสนามไฟฟ้าตามขวาง, ธรรมชาติประสิทธิผลและค่าไบรีฟรินเจนซ์อย่างไร เริ่มต้น จาก PCF ที่มีรูอากาศรูปวงกลมมีรัศมี 0.2523 ไมโครเมตร พื้นที่ของรูอากาศเท่ากับ 0.2 แกนมีค่า ธรรมชาติหักเห $n_1 = 1.45$ และรูอากาศรูปวงกลมค่าธรรมชาติหักเห $n_2 = 1$ วัสดุหุ้มมีค่าธรรมชาติหักเห เท่ากับแกน เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลถูกล้อมรอบด้วยวัสดุดูดกลืนคลื่นแบบ PML ดังรูปที่ 3.55

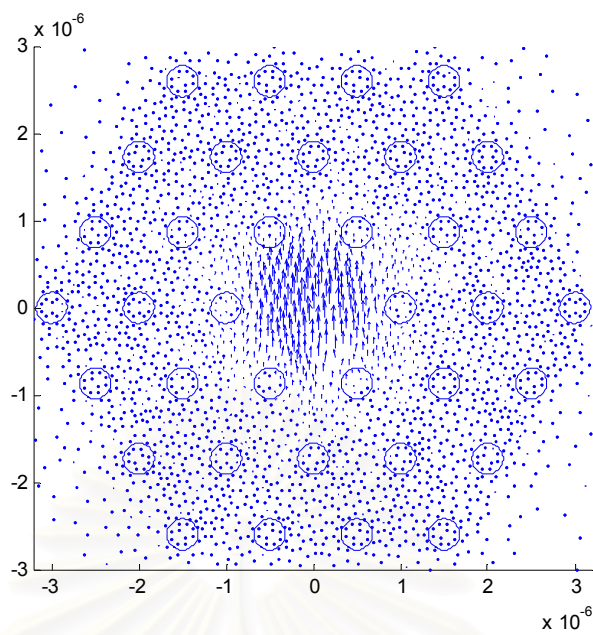


รูปที่ 3.55 PCF แกนวงกลม

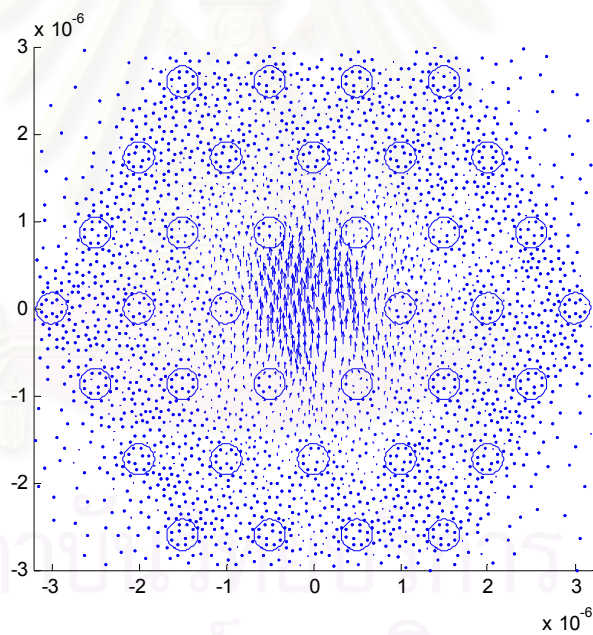
เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าอินพุตดังรูป 3.56 กำหนดให้สนามไฟฟ้า \vec{E}_y อยู่ในรูปเกาส์เซียนมีขนาดจุด (spotsizes) เท่ากับ 0.8 ไมโครเมตร ให้สนามไฟฟ้า $\vec{E}_x = 0$ โดยมีระยะชั้นการคำนวณ $\Delta z = 1$ ไมโครเมตร ความยาวคลื่นแสง 0.625 ไมโครเมตร ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าตามขวางที่ระยะทางต่างๆมีดังนี้



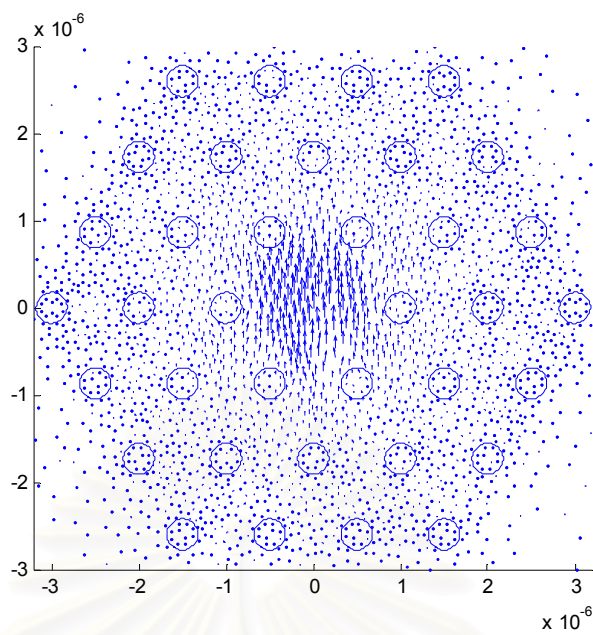
รูปที่ 3.56 สนามไฟฟ้าอินพุตใน PCF แกนวงกลม



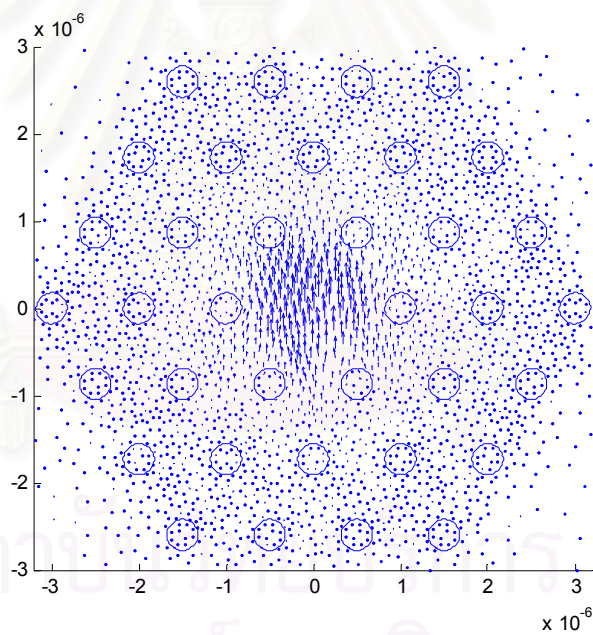
รูปที่ 3.57 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงกลม รัศมี 10 ไมโครเมตร



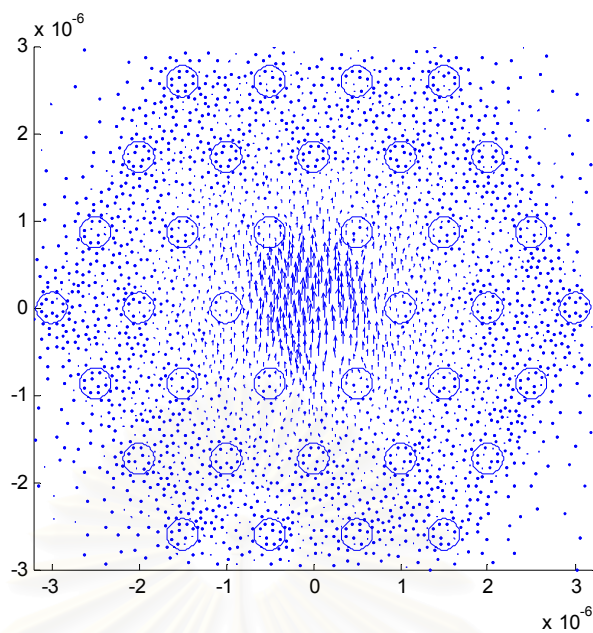
รูปที่ 3.58 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงกลม รัศมี 50 ไมโครเมตร



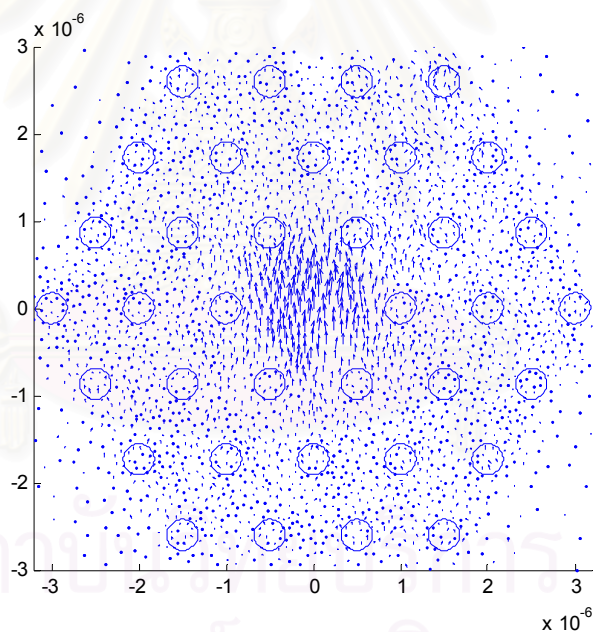
รูปที่ 3.59 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงกลม ระยะ 100 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.60 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงกลม ระยะ 250 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.61 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงกลม ระยะ 500 ไมโครเมตร

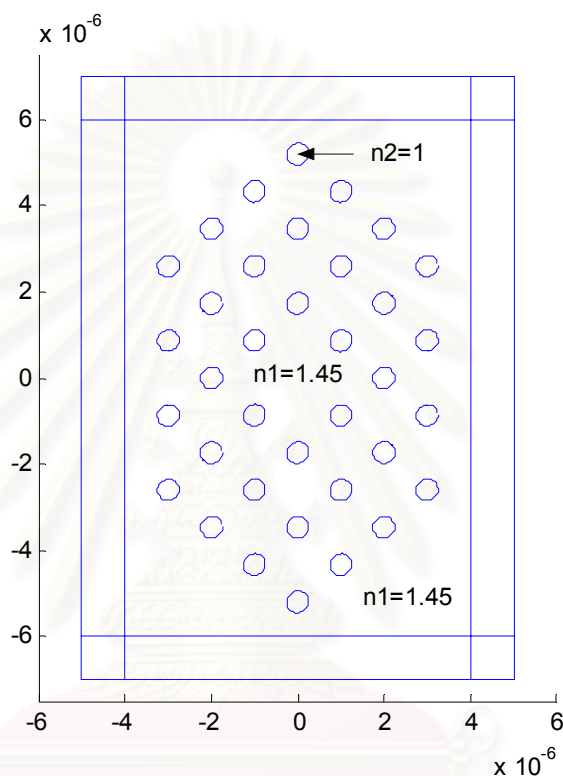


รูปที่ 3.62 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงกลม ระยะ 1000 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงกลมที่ระยะต่างๆ สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF ดังรูปที่ 3.57-3.62 มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั้วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป

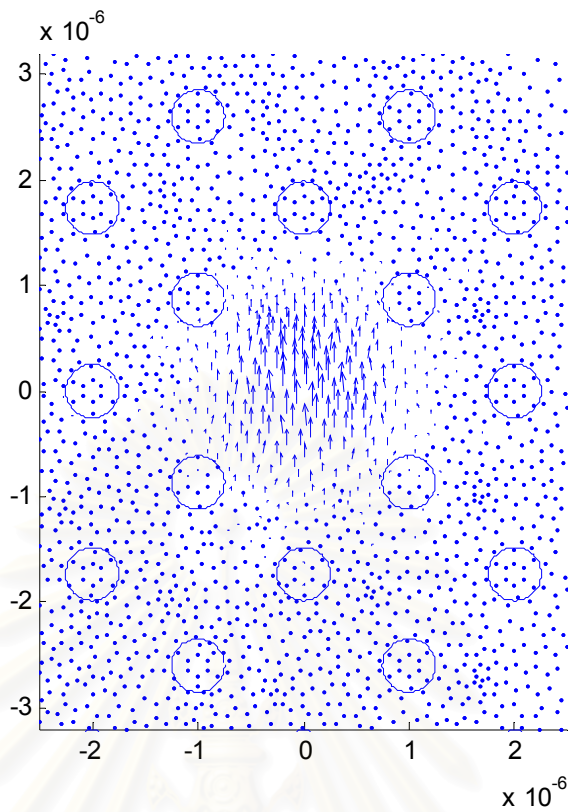
3.6.2 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงกลม (PCF) แกนวงรี

ต่อไปจะคำนวณของสนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงรีที่มีรูอากาศรูปวงกลม มีรัศมี 0.2523 ไมโครเมตร พื้นที่ของรูอากาศเท่ากับ 0.2 แกนมีค่าดัชนีหักเห $n_1 = 1.45$ และรูอากาศรูปวงกลมค่าดัชนีหักเห $n_2 = 1$ วัสดุหุ้มมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับแกน เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลถูกล้อมรอบด้วยวัสดุเคลือบแบบ PML ดังรูปที่ 3.63

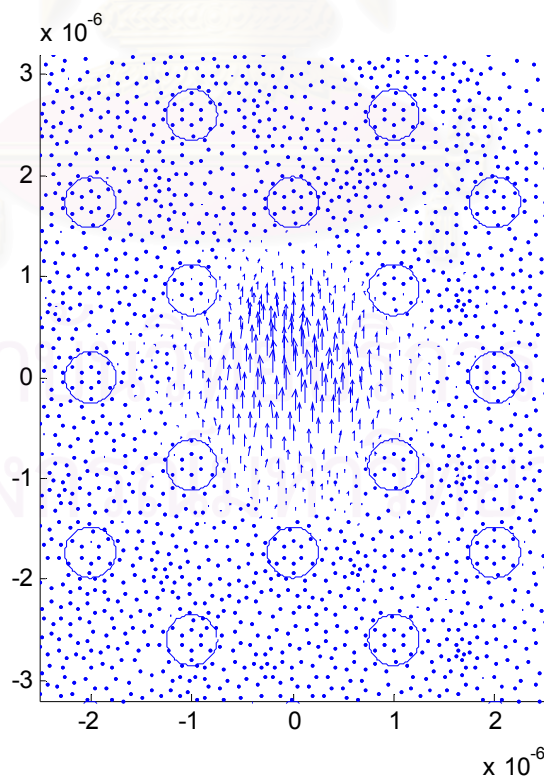


รูปที่ 3.63 PCF แกนวงรี

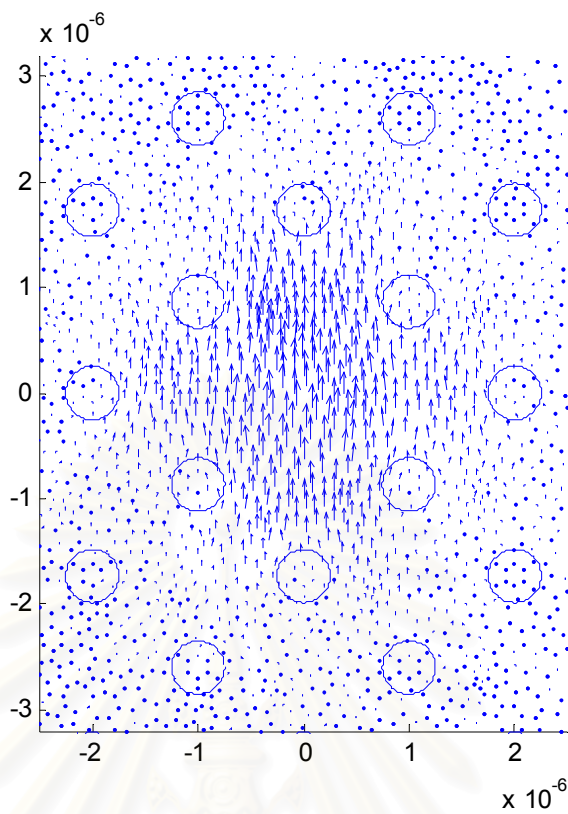
เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าอินพุตดังรูป 3.64 กำหนดให้สนามไฟฟ้า E_y อยู่ในรูปเกาส์เซียนมีขนาดจุด (spot size) เท่ากับ 0.8 ไมโครเมตร ให้สนามไฟฟ้า $E_x = 0$ โดยมีระยะชั้นการคำนวณ $\Delta z = 1$ ไมโครเมตร ความยาวคลื่นแสง 0.625 ไมโครเมตร ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าตามขวางที่ระยะทางต่างๆมีดังนี้



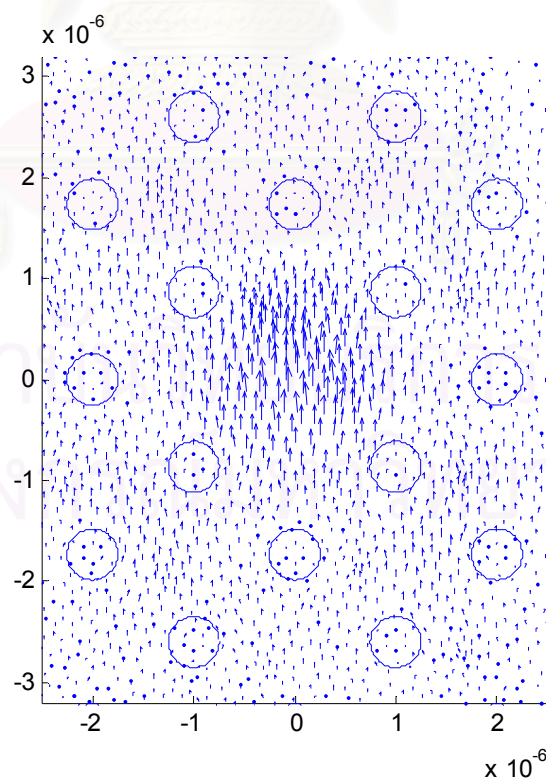
รูปที่ 3.64 สนามไฟฟ้าอินพุตใน PCF แถนวงรี



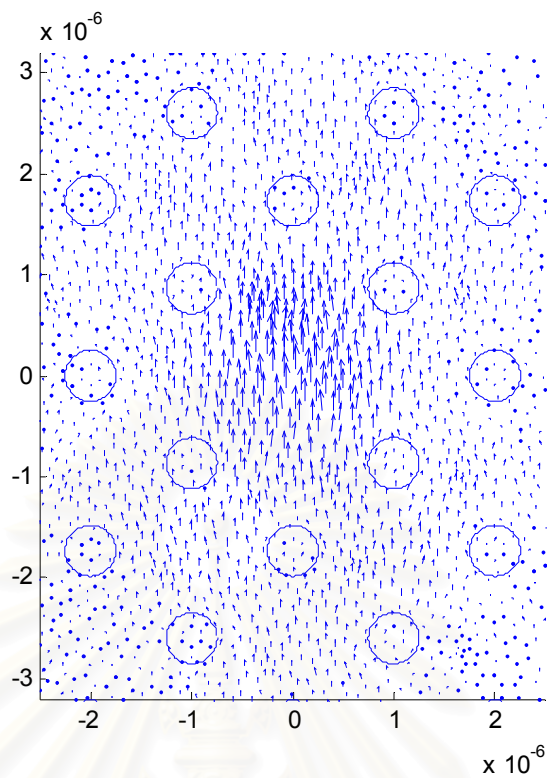
รูปที่ 3.65 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แถนวงรี ระยะ 10 ไมโครเมตร



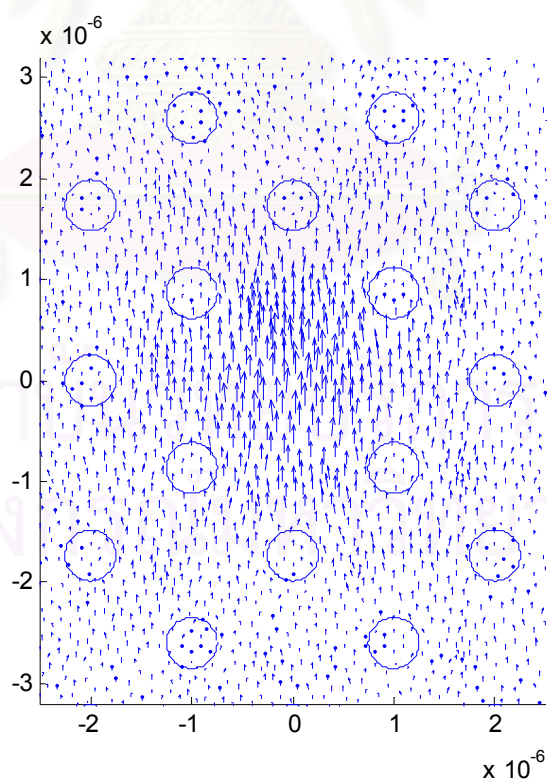
รูปที่ 3.66 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงรี ระยะ 50 ไมโครเมตร



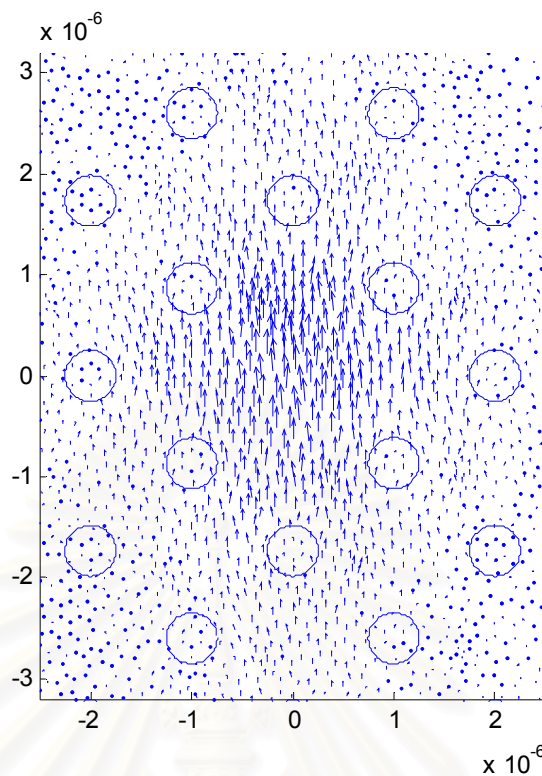
รูปที่ 3.67 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงรี ระยะ 100 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.68 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงรี ระยะ 250 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.69 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงรี ระยะ 500 ไมโครเมตร



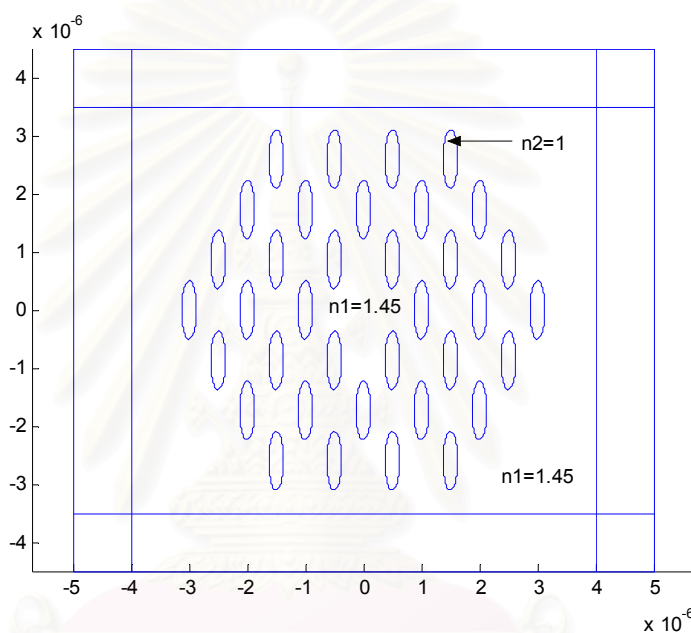
รูปที่ 3.70 สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงรี ระยะ 1000 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน PCF แกนวงรีที่ระยะต่างๆ สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF และจะกระจายไปแนวแกนวงรี ดังรูปที่ 3.65-3.70 มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

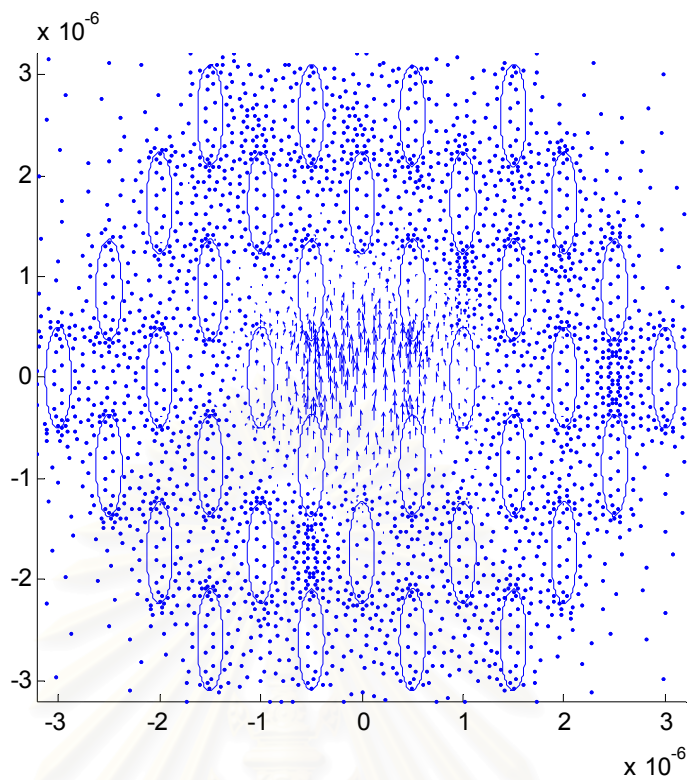
3.6.3 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรี (EPCF) แกนวงกลม

หัวข้อนี้จะทดสอบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแกนของ EPCF แกนวงกลมเปลี่ยนเป็น แกนวงรีจะมีผลต่อสนามไฟฟ้าตามขวาง, ครรชนีประสิทธิผลและค่าไบรีฟรินเจนซ์อย่างไร เริ่มต้น จาก PCF ที่มีรูอากาศรูปวงกลมมีความยาวแกนเอกเท่ากับ 0.5046 ไมโครเมตรและความยาวแกนโท เท่ากับ 0.1262 ไมโครเมตรและมีพื้นที่ของรูอากาศเท่ากับ 0.2 แกนมีค่าครรชนีหักเห $n_1 = 1.45$ และรูอากาศรูปวงกลมค่าครรชนีหักเห $n_2 = 1$ วัสดุหุ้มมีค่าครรชนีหักเหเท่ากับแกน เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลถูกล้อมรอบด้วยวัสดุฉนวนกั้นคลื่นแบบ PML ดังรูปที่ 3.71

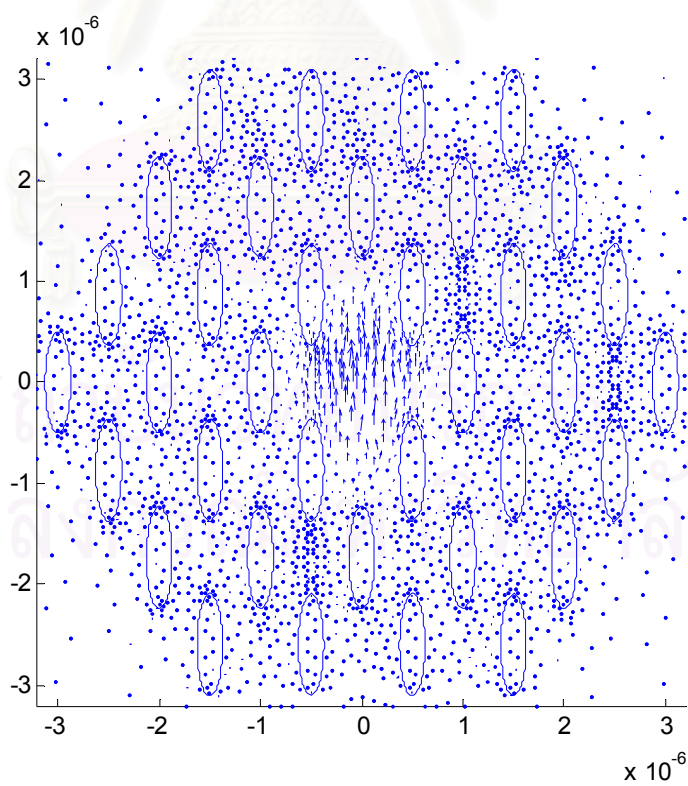


รูปที่ 3.71 EPCF แกนวงกลม

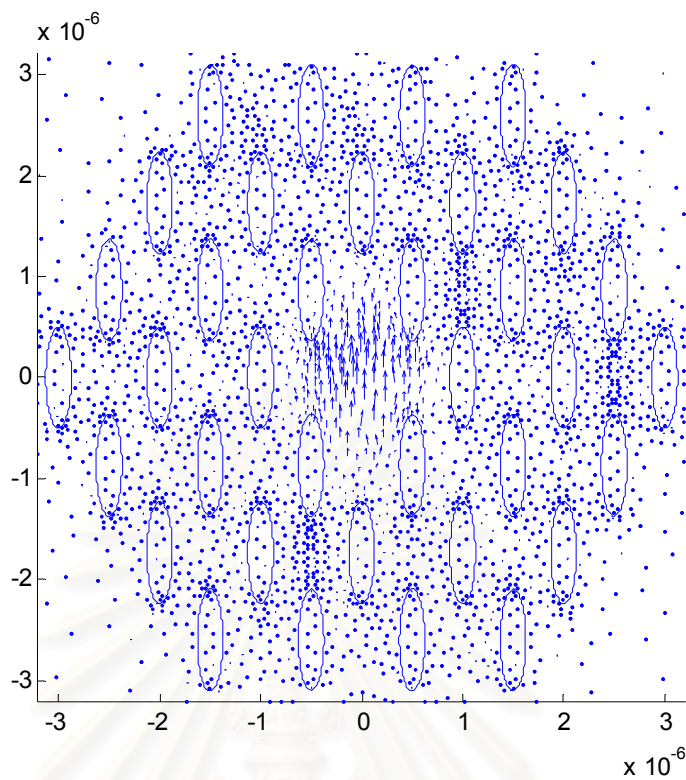
เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าอินพุตดังรูป 3.72 กำหนดให้สนามไฟฟ้า E_y อยู่ในรูปเกาส์เซียนมีขนาดจุด (spotsizes) เท่ากับ 0.8 ไมโครเมตร ให้สนามไฟฟ้า $E_x = 0$ โดยมีระยะชั้นการคำนวณ $\Delta z = 1$ ไมโครเมตร ความยาวคลื่นแสง 0.625 ไมโครเมตร ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าตามขวางที่ระยะทางต่างๆมีดังนี้



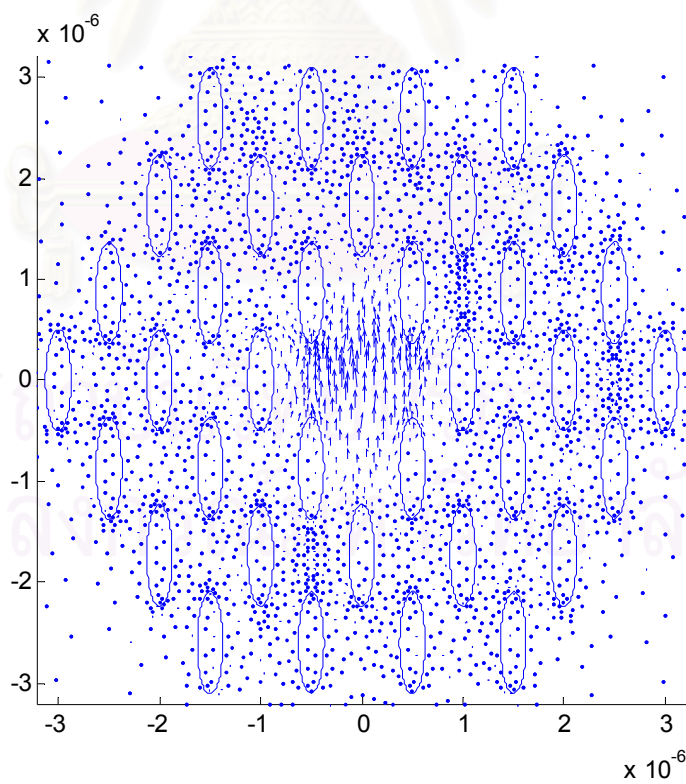
รูปที่ 3.72 สนามไฟฟ้าอินพุตใน EPCF แกนวงกลม



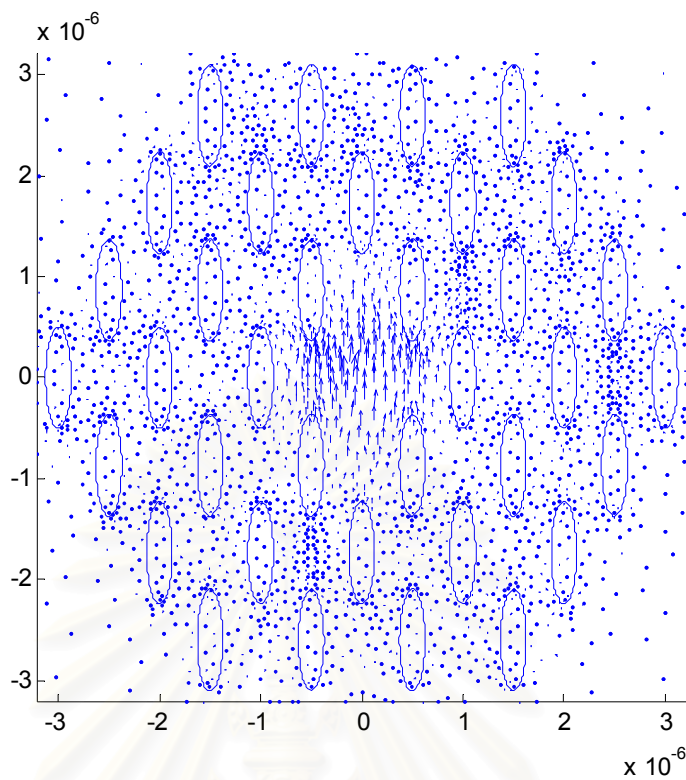
รูปที่ 3.73 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แกนวงกลม ระยะ 10 ไมโครเมตร



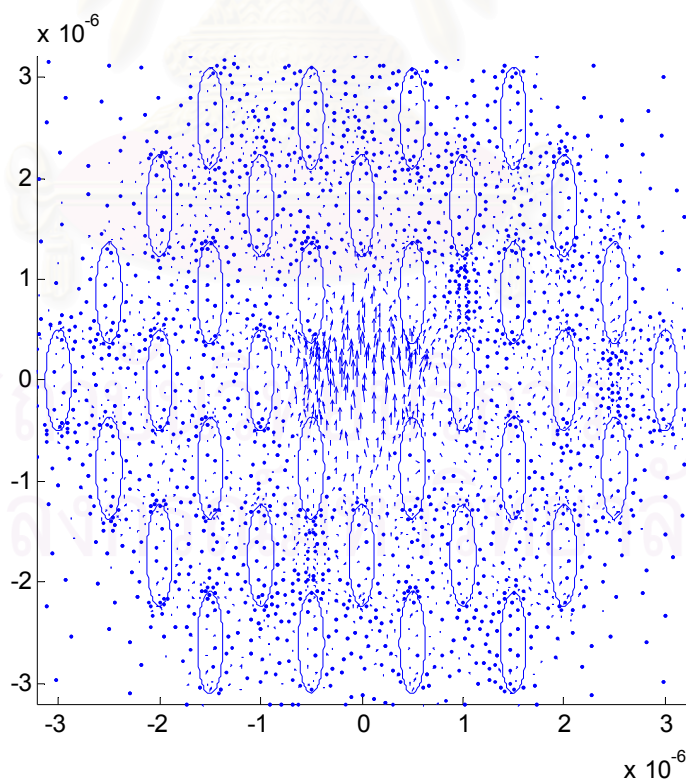
รูปที่ 3.74 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แถววงกลม ระยะ 50 ไมโครเมตร



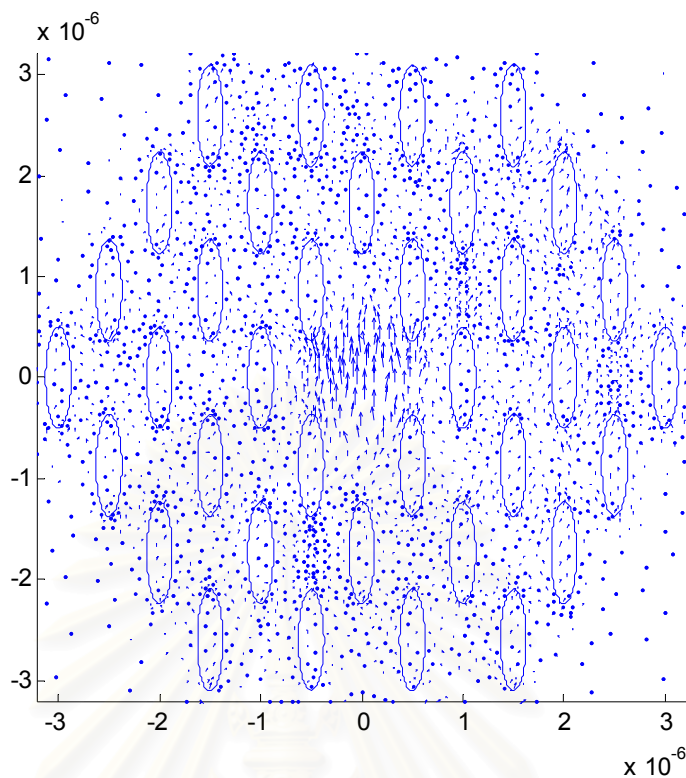
รูปที่ 3.75 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แถววงกลม ระยะ 100 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.76 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แถววงกลม ระยะ 250 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.77 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แถววงกลม ระยะ 500 ไมโครเมตร



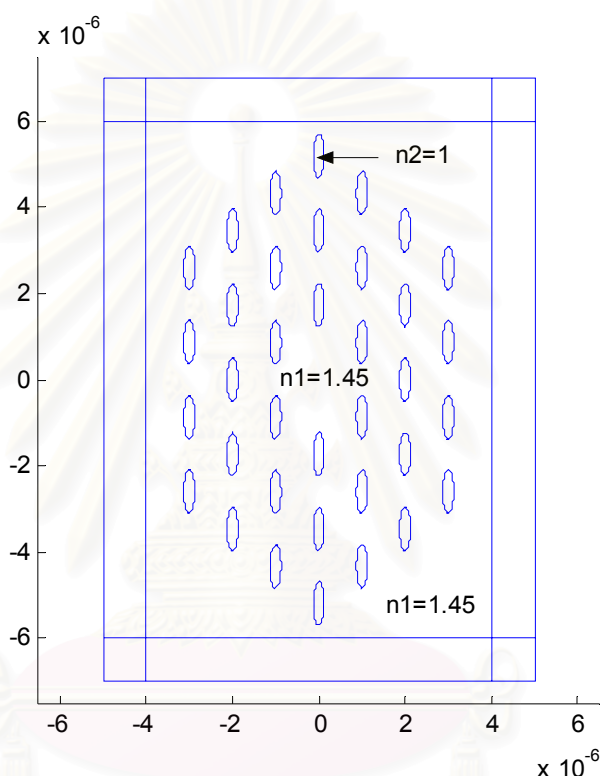
รูปที่ 3.78 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แถววงกลม ระยะ 1000 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แถววงกลมที่ระยะต่างๆ สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF ดังรูปที่ 3.73-3.78 มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

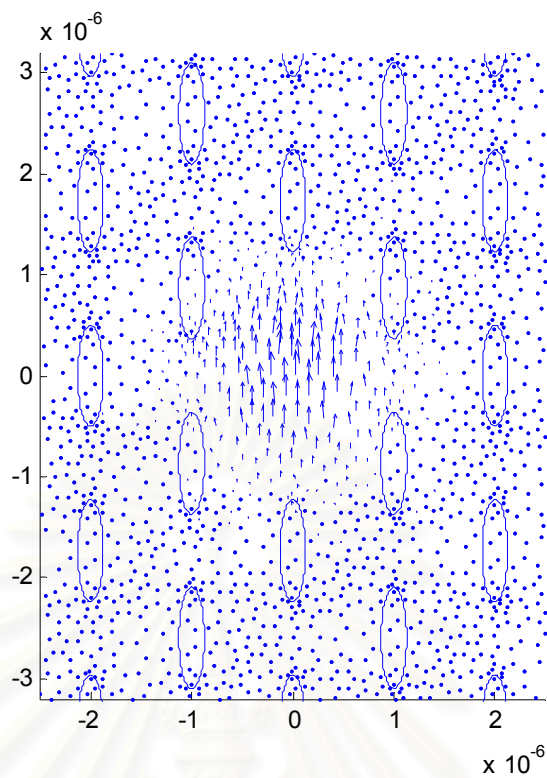
3.6.4 เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรี (EPCF) แถบวงรี

ต่อไปจะคำนวณของสนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แถบวงรีที่มีรูอากาศรูปวงรีมีความยาวแกนเอกเท่ากับ 0.5046 ไมโครเมตร, ความยาวแกนโทเท่ากับ 0.1262 ไมโครเมตร, พื้นที่ของรูอากาศเท่ากับ 0.2, อัตราส่วนความยาวแกนเอกกับความยาวแกนโท $\eta = 4$, แถบมีค่าดัชนีหักเห $n_1 = 1.45$ และรูอากาศรูปวงรีค่าดัชนีหักเห $n_2 = 1$ วัสดุหุ้มมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับแถบเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลถูกล้อมรอบด้วยวัสดุฉนวนแบบ PML ดังรูปที่ 3.79

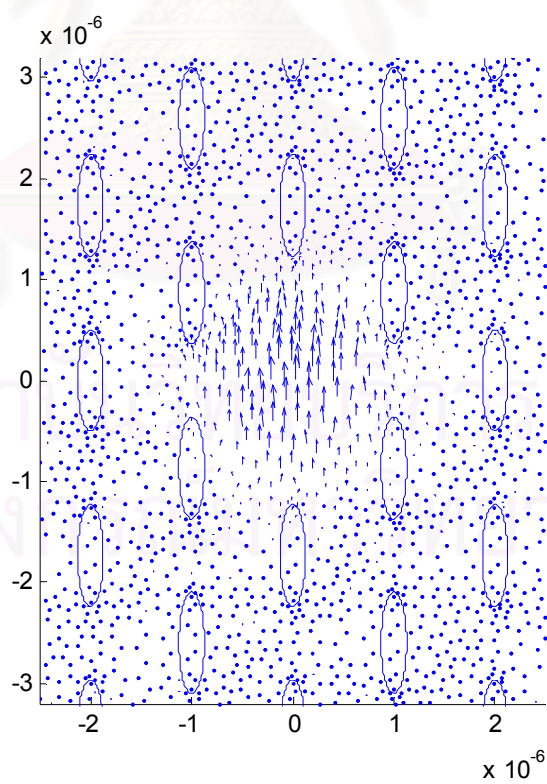


รูปที่ 3.79 EPCF แถบวงรี

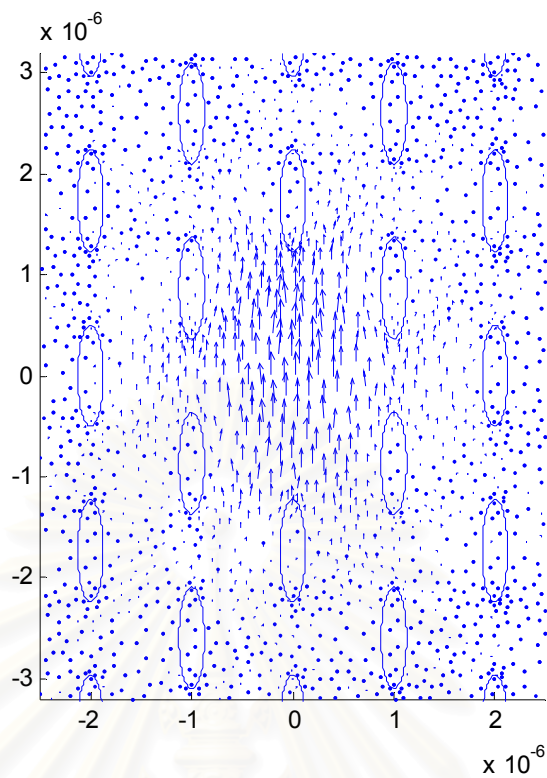
เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าอินพุตดังรูป 3.80 กำหนดให้สนามไฟฟ้า \vec{E}_y อยู่ในรูปเกาส์เซียนมีขนาดจุด (spotsizes) เท่ากับ 0.8 ไมโครเมตร ให้สนามไฟฟ้า $\vec{E}_x = 0$ โดยมีระยะชั้นการคำนวณ $\Delta z = 1$ ไมโครเมตร ความยาวคลื่นแสง 0.625 ไมโครเมตร ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าตามขวางที่ระยะทางต่างๆมีดังนี้



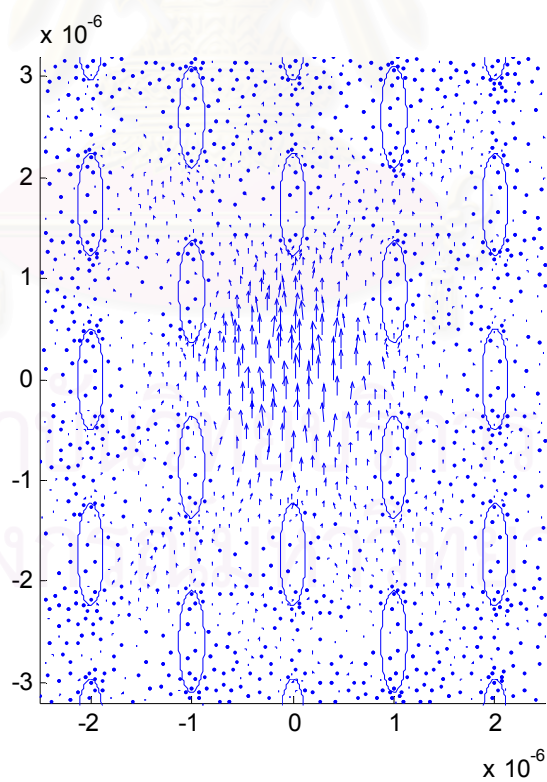
รูปที่ 3.80 สนามไฟฟ้าอินพุตใน EPCF แถบวงรี



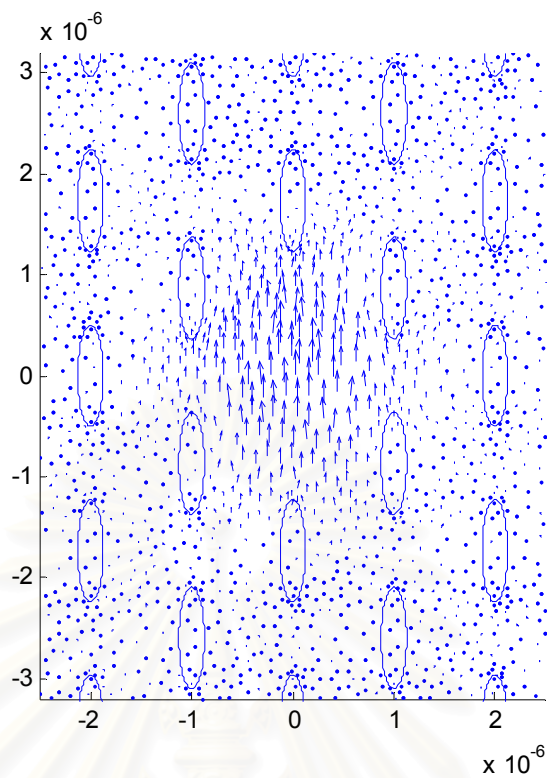
รูปที่ 3.81 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แถบวงรี ระยะ 10 ไมโครเมตร



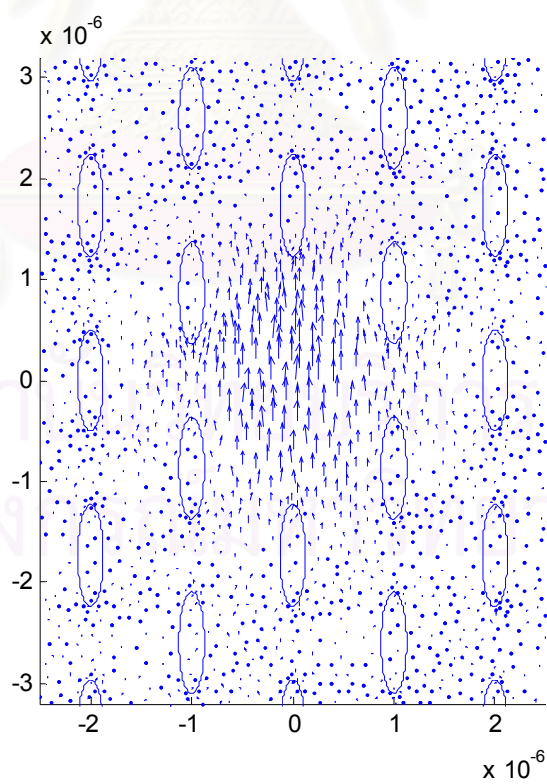
รูปที่ 3.82 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แถบวงรี ระยะ 50 ไมโครเมตร



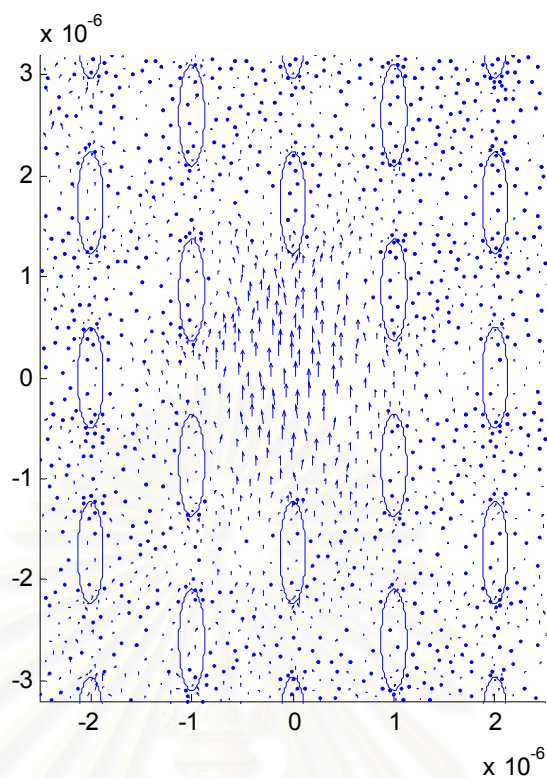
รูปที่ 3.83 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แถบวงรี ระยะ 100 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.84 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แถบวงรี ระยะ 250 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.85 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แถบวงรี ระยะ 500 ไมโครเมตร

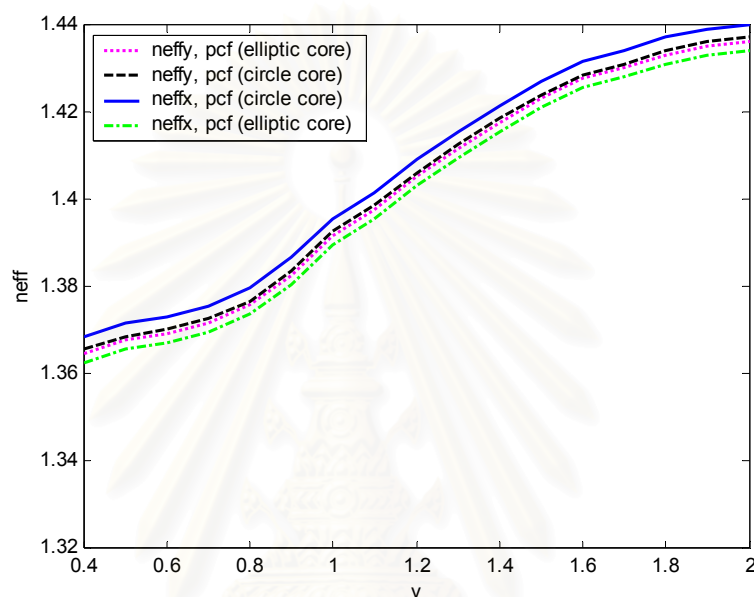


รูปที่ 3.86 สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แกนวงรี ระยะ 1000 ไมโครเมตร

สนามไฟฟ้าตามขวางใน EPCF แกนวงรีที่ระยะต่างๆ สนามไฟฟ้าส่วนมากจะอยู่บริเวณแกนกลางของ PCF และจะกระจายไปแนวแกนวงรี ดังรูปที่ 3.81-3.86 มีสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างรูอากาศทั้งสองที่อยู่ติดกันสามารถหลุดออกจากแกนกลางได้เนื่องจาก PCF มีแบบแผนคลื่นรั่วจึงทำให้คลื่นแสงสามารถรั่วออกไป

3.6.5 เปรียบเทียบครรชนีประสิทธิผลของ PCF และ EPCF

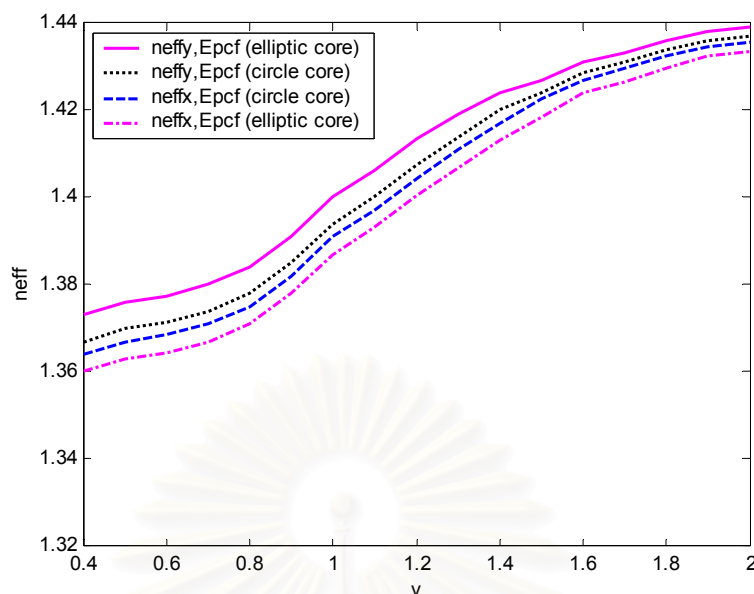
หัวข้อนี้จะเปรียบเทียบครรชนีประสิทธิผล (n_{eff}) ของเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงกลมที่มีแกนวงกลมและแกนวงรี เนื่องจาก PCF ปกติจะไม่สามารถปรับเปลี่ยนโพลาริเซชันได้เหมือน Epcf ดังนั้นวิธีการที่จะปรับเปลี่ยนได้ก็คือการปรับรูปร่างของแกนจากแกนวงกลมเป็นแกนวงรีดังรูปที่ 3.87



รูปที่ 3.87 เปรียบเทียบครรชนีประสิทธิผลของ PCF แกนวงกลมและแกนวงรี

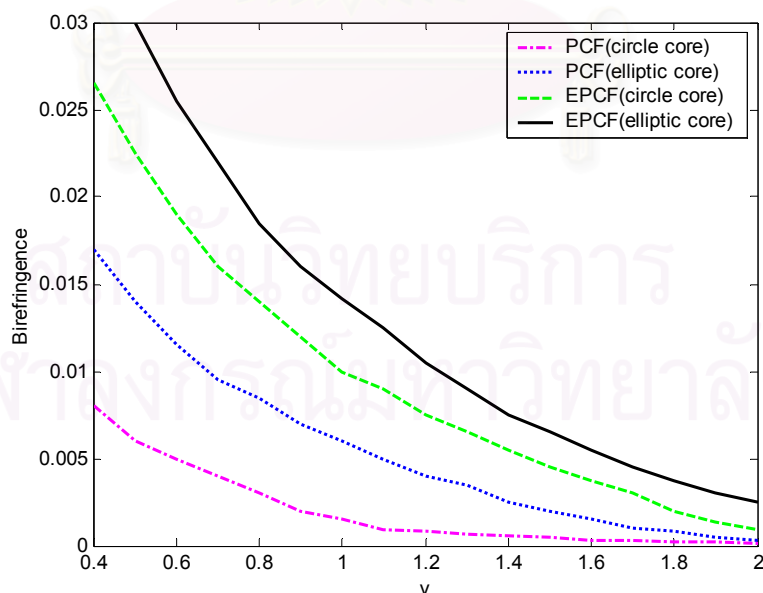
ค่าครรชนีประสิทธิผลของ PCF แกนวงกลมทั้งค่า n_{eff}^y และ n_{eff}^x มีค่าแตกต่างกันไม่มากแต่เมื่อเปลี่ยนรูปร่างแกนของ PCF จากแกนวงกลมเป็นแกนวงรีจะทำให้ค่า n_{eff}^y และ n_{eff}^x มีความแตกต่างกันมากขึ้นจึงทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.88 เปรียบเทียบคระชนีประสิทธิผลของ EPCF แกนวงกลมและแกนวงรี

เนื่องจากเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรี (EPCF) สามารถจะเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันได้แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแกนจากแกนวงกลมเป็นแกนวงรี จากดั่งรูปที่ 3.88 จะเห็นว่าค่าคระชนีประสิทธิผลทั้ง n_{eff}^y และ n_{eff}^x ของแกนวงรีจะมีค่าแตกต่างกันมากกว่าแกนวงกลมจึงทำให้สามารถควบคุมโพลาไรเซชันได้มากขึ้น



รูปที่ 3.89 เปรียบเทียบไบรีฟรินเจนซ์ของ PCF, EPCF แกนวงกลมและแกนวงรี

จากรูปที่ 3.89 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าไบรีพริเนชันของเส้นใยนำแสงโฟโตนิก คริสตอทรออากาศรูปวงกลมและวงรีทั้งแกนวงกลมและแกนวงรี ปรากฏว่าค่าไบรีพริเนชันของ EPCF ที่มีแกนวงรีมีค่ามากที่สุดรองลงคือ EPCF ที่มีแกนวงกลม, PCF ที่มีแกนวงรีและ PCF ที่มีแกนวงกลม ดังนั้น EPCF ที่มีแกนวงรีจะสามารถควบคุมโพลาริเซชันได้มากที่สุด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ นำระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์บีมพรอพาเกชันที่ใช้ในงานวิจัยของ Saitoh and Koshiba (2002) มาคำนวณหาสนามไฟฟ้าตามขวางและสนามไฟฟ้าแนวแกน z ของเส้นใยนำแสงแบบมาตรฐาน, เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงกลม 1 วง, 2 วง, 3 วง และเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรี 1 วง, 2 วง, 3 วง จากนั้นได้คำนวณหาค่าครรชนีประสิทธิผลของเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลของรูอากาศรูปวงกลมและวงกลมทั้งในแนวแกน x และแนวแกน y และคำนวณหาค่าไบรีฟรินเจนซ์ของเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรีแล้วความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความยาวแกนเอกและความยาวแกนโทของรูอากาศและพื้นที่ของรูอากาศรูปวงรีที่มีผลต่อโพลาริเซชัน จากนั้นวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแกนจากแกนวงกลมเป็นแกนวงรีแล้วหาค่าไบรีฟรินเจนซ์เปรียบเทียบกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่าครรชนีประสิทธิผลระหว่างงานวิจัยของ Steel and Osgood กับวิทยานิพนธ์ พบว่าเส้นกราฟของวิทยานิพนธ์ไม่ทับกับเส้นกราฟของ Steel and Osgood เนื่องจากเหตุผลที่งานวิจัยของ Steel and Osgood ใช้จำนวนรูอากาศมากมายแต่วิทยานิพนธ์ใช้จำนวนรูอากาศเพียง 36 รูเท่านั้นเพราะใช้สมมติฐานที่ว่าคลื่นแสงส่วนใหญ่จะถูกกักที่บริเวณแกนและบริเวณห่างจากแกนไม่เกิน 3 วง จึงทำให้ผลการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนกับงานวิจัยของ Steel and Osgood แต่ค่าครรชนีประสิทธิผลที่คำนวณได้จากวิทยานิพนธ์ยังมีแนวโน้มที่คล้ายกับ งานวิจัยของ Steel and Osgood จึงยังสามารถนำวิธีจากวิทยานิพนธ์ไปใช้กับกรณีตัวอย่างแบบต่างๆได้

ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนวงของเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลมีผลต่อขนาดของสนามไฟฟ้าแนวแกน z คือ ถ้าจำนวนวงของเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลมากจะทำให้กักคลื่นแสงได้ระยะทางไกลกว่าถ้าใช้จำนวนวงน้อยกว่าเพราะจำนวนวงมากสามารถป้องกันไม่ให้คลื่นแสงรั่วได้มากกว่า

เส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรีมีค่าครรชนีประสิทธิผลในแนวแกน y (n_{eff}^y) มีค่ามากกว่าครรชนีประสิทธิผลในแนวแกน x (n_{eff}^x) เพราะการจัดเรียงของเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรี ที่มีรูอากาศรูปวงรีมีแกนเอกขนานกับแกน y ทำให้คลื่นแสงมีทิศแพร่กระจายไปทางแกน y จึงทำให้ n_{eff}^y มากกว่า n_{eff}^x

ถ้า n_{eff}^y ที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวแกนเอกกับความยาวแกนโท η มากจะทำให้ n_{eff}^y มีค่ามาก เพราะถ้า η มากจะทำให้พื้นที่แกนกลางของเส้นใยนำแสง ถ้า $\eta=1$ หมายถึงเส้นใยนำแสง PCF รูอากาศรูปวงกลมจะมีค่า n_{eff}^y และ n_{eff}^x ใกล้เคียงกัน ในช่วง v อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ค่า n_{eff}^y มีความแตกต่าง n_{eff}^x มากจะทำให้สามารถควบคุมโพลาไรเซชันให้อยู่ในแนวแกน y ได้ และช่วง v อยู่ระหว่าง 1 ถึง 2.2 ค่าดัชนีประสิทธิผลมีค่าใกล้เคียงกันมาก จะไม่สามารถใช้ช่วงนี้ควบคุมโพลาไรเซชันได้

เมื่อนำเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรีมาเปรียบเทียบกับสามารถสรุปได้ว่าพื้นที่ของรูอากาศรูปวงรีมีผลต่อค่าดัชนีประสิทธิผลซึ่งถ้าเส้นใยนำแสง EPCF มีพื้นที่ของรูอากาศน้อย ($A=0.1$) ทำให้ค่าดัชนีประสิทธิผลจะมากกว่าพื้นที่ของรูอากาศมาก ($A=0.4$) ถ้า η เท่ากัน พื้นที่รูอากาศรูปวงรีน้อยจะมีผลให้ค่าดัชนีประสิทธิผลมีค่ามากกว่าพื้นที่รูอากาศรูปวงรีมาก

ถ้า η มีค่ามากไบรีฟรินเจนซ์จะมากกว่า η ที่มีค่าน้อย เช่น $\eta=4$ มีค่าไบรีฟรินเจนซ์มากกว่า $\eta=2$ ซึ่งค่า η มากจะทำให้ค่าดัชนีประสิทธิผลแนวแกน x และ y มีค่าต่างกันมาก และทำให้จะรักษาโพลาไรเซชันให้อยู่ในแนวแกนใดแกนหนึ่งได้

ถ้าคลื่นแสงอินพุตมีโพลาไรเซชันทิศต่างจากการวางตัวของรูอากาศรูปวงรีเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลจะพยายามปรับทิศโพลาไรเซชันให้อยู่ในแนวเดียวกับการวางตัวของรูอากาศรูปวงรี เมื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแกนเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลจากแกนวงกลมเป็นแกนวงรีจะทำให้ค่าไบรีฟรินเจนซ์สูงมากขึ้น

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้จะถูกต้องแม่นยำมากขึ้นควรจะเพิ่มจำนวนวงและจำนวนรูอากาศให้มากกว่านี้ประมาณ 10 วง และงานวิจัยนี้คำนวณหาเฉพาะผลของโพลาไรเซชันเท่านั้นแต่ยังมีประเด็นที่สำคัญอีกประเด็นที่น่าสนใจก็คือ ผลของความสูญเสีย (loss) ในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรี ควรทำต่อในงานวิจัยครั้งต่อไป เพราะความสูญเสียในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงรีเป็นความสูญเสียที่เกิดเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลที่มีแบบแผนคลื่นรั้ว ดังนั้นควรหาความสูญเสียเนื่องจากคลื่นแสงรั้วออกจากบริเวณแกนที่มงานวิจัยที่ต้องศึกษาคือ Saitoh and Koshiba (2003) งานวิจัยนี้ศึกษาความสูญเสียของเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตอลรูอากาศรูปวงกลมโดยมีแกนเป็นรูอากาศ

รายการอ้างอิง

- Bennett, P.J., Monro, T.M., and Richardson, D.J. Toward practical holey fiber technology: fabrication, splicing, modeling, and characterization. Optics Letters 24, 17 (October 1999) : 1203-1205.
- Birks, T.A., Mogilevtsev, D., Knight, J.C., and Russell, P.St.J. Dispersion compensation using single-material fiber. IEEE Photonic technology letters 11, 6 (June 1999) : 674-676.
- Broeng, J., Mogilevtsev, D., Stig, E., Libori, B., and Bjarklev, A. Polarization-preserving holey fibers. Laser and electro-optics, (CLEO/Pacific Rim 2001) 1 (2001) : 1-6.
- Cregan, B.J., Mangan, B.J., Knight, J.C., Birk, T.A., Russell, P.St.J., Roberts, P.J., and Allan, D.C. Single-mode photonic band gap guidance of light in air. Science 285 (September 1999) : 1537-1539.
- De Francisco, C.A., Borgers, B.V., and Romero, M.A. A Semivectorial Iterative Finite Difference method to model photonic crystal fibers. Microwave and optoelectronics conference 2001, IMOC2001, Proceeding of the 2001, SBMO/IEEE MTT-S International 1 (2001) :407-409.
- Franco, M.A.R., Hattori, H.T., Sireilli, F., Passaro, A., and Abe, N.M. Finite element analysis of photonic crystal fibers. Microwave and optoelectronics conference 2002, IMOC2001, Proceeding of the 2001, SBMO/IEEE MTT-S International 1 (2001) : 5-7.
- Guenneau, S., Nicolet, A., Zolla, F., and Lasquelles, S. Modeling of photonic crystal fiber with finite elements. IEEE Transactions on magnetics 38, 2 (March 2002) : 1261-1264.
- Hansen, T.P., Broeng, J., Libori, S.E.B., Knudsen, E., Bjarklev, A., Jensen, J.R., and Simonsen, H. Highly birefringent index-guiding photonic crystal fiber. IEEE Photonic technology letters 13, 6 (June 2001) : 588-590.
- Hasegawa, T., Sasaoka, E., Onishi, M., Nishimura, M., Tsuji, Y., and Koshiba, M. Novel hole-assisted lightguide fiber exhibiting large anomalous dispersion and low loss below 1 dB/km. IN Proc. Oct.Fiber Comun.(OFC) Conf. PD5-1, Anaheim, CA (Mar 2001).
- Knight, J.C., Birks, T.A., Russell, P.St.J., and Atkin, D.M. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding. Optics Letters 21, 19 (October 1996) : 1547-1549.
- Knight, J.C., Broeng, J., Birks, T.A., and Russell, P.St.J. Photonic band gap guidance in optical fibers. Science 282 (November 1998) : 1476-1478.

- Koshiha, M. Full-Vector analysis of photonic crystal fiber using the finite element method. IEICE Trans. Electron E85-C, 4 (April 2002) : 881-888.
- Kubota, H., Suzuki, K., Kawanishi, S., Nakazawa, M., Tanaka, M., and Fujita, M. Low-loss 2-km long photonic crystal fiber with zero GVD in the near IR suitable for picosecond pulse propagation at the 800 nm band. In Proc. Conf. Laser Electrooptics, Baltimore, MD (2001) : Postdeadline paper CPD3-1.
- Mogilevtsev, D., Birks, T.A., and Russell P.St.J. Group-velocity dispersion in photonic crystal fibers. Optics Letters 23, 21 (November 1998) : 1662-1664.
- Saitoh, K. and Koshiha, M. Confinement losses in air-guiding photonic bandgap fibers. IEEE Photonics technology letters 15, 2 (February 2003) : 236-238.
- Saitoh, K., and Koshiha, M. Full-vector imaginary-distance beam propagation method based on a finite element scheme: application to photonic crystal fibers. IEEE Journal of quantum electronics 38, 7 (July 2002) : 927-933.
- Saitoh, K., and Koshiha, M. Photonic bandgap fibers with high birefringence. IEEE Photonic technology letters 14, 9 (September 2002) : 1291-1293.
- Steel, M.J., and Osgood, R.M. Polarization and dispersive properties of elliptical hole photonic crystal fibers. Journal of lightwave technology 19, 4 (April 2001) : 495-503.
- West, J.A. Photonic crystal fibers. Lasers and Electro-Optics Society 1 (2001) : 112-113.
- Zhu, Y., Chen, Y., Huray, P., and Dong, X. Application of a 2D-CFDTD algorithm to the analysis of photonic crystal fibers (PCFs). SoutestCon,2002,Proceeding IEEE 2002 (2002) : 215-219.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การพิสูจน์สมการคลื่นแสงในเส้นใยนำแสงโฟโตนิกคริสตัล

พิจารณาการคำนวณเริ่มจากสมการแมกซ์เวลล์ในรูปโดเมนความถี่ที่ไม่มีแหล่งกำเนิดตัวกลางภายในแบบไอโซทรอปิกดังนี้

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu_0\mu_r\vec{H} \quad (\text{ก.1})$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r\vec{E} \quad (\text{ก.2})$$

จากรูปสมการ (ก.1) / μ_r จะได้

$$\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu_0\vec{H} \quad (\text{ก.3})$$

เมื่อนำสมการ (ก.3) มาเคิร์ลจะได้

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_r} \nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu_0 \nabla \times \vec{H} \quad (\text{ก.4})$$

แทนค่าสมการ (ก.3) ลงในสมการ (ก.4) จะได้

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_r} \nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu_0 (j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r\vec{E}) \quad (\text{ก.5})$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_r} \nabla \times \vec{E} = \omega^2\mu_0\varepsilon_0\varepsilon_r\vec{E} \quad (\text{ก.6})$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_r} \nabla \times \vec{E} = k_0^2\varepsilon_r\vec{E} \quad (\text{ก.7})$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_r} \nabla \times \vec{E} - k_0^2\varepsilon_r\vec{E} = 0 \quad (\text{ก.8})$$

การอินทิเกรตฟังก์ชันรูปร่าง

$$\iint_e \{U\}\{U\}^T dx dy = A_e \bar{a}_k \bar{a}_l + A_e y_c (\bar{a}_k \bar{c}_l + \bar{c}_k \bar{a}_l) + \frac{1}{12} A_e \bar{c}_k \bar{c}_l (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + 9y_c^2) \quad (\text{ก.9})$$

$$\iint_e \{V\}\{V\}^T dx dy = A_e \bar{b}_k \bar{b}_l - A_e x_c (\bar{b}_k \bar{c}_l + \bar{c}_k \bar{b}_l) + \frac{1}{12} A_e \bar{c}_k \bar{c}_l (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + 9x_c^2) \quad (\text{ก.10})$$

$$\begin{aligned} \iint_e \{U_y\}\{U_y\}^T dx dy &= \iint_e \{V_x\}\{V_x\}^T dx dy \\ &= -\iint_e \{U_y\}\{V_x\}^T dx dy \\ &= -\iint_e \{V_x\}\{U_y\}^T dx dy \\ &= A_e \bar{c}_k \bar{c}_l \end{aligned} \quad (\text{ก.11})$$

$$\iint_e \{U\}\{N_x\}^T dx dy = \frac{1}{2} (\bar{a}_k + \bar{c}_k y_c) b_l \quad (\text{ก.12})$$

$$\iint_e \{V\}\{N_y\}^T dx dy = \frac{1}{2} (\bar{b}_k - \bar{c}_k x_c) c_l \quad (\text{ก.13})$$

$$\iint_e \{N\}\{N\}^T dx dy = \frac{A_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{ก.14})$$

$$\iint_e \{N_x\}\{N_x\}^T dx dy = \frac{1}{4A_e} \begin{bmatrix} b_1^2 & b_1 b_2 & b_1 b_3 \\ b_1 b_2 & b_2^2 & b_2 b_3 \\ b_1 b_3 & b_2 b_3 & b_3^2 \end{bmatrix} \quad (\text{ก.15})$$

$$\iint_e \{N_y\}\{N_y\}^T dx dy = \frac{1}{4A_e} \begin{bmatrix} c_1^2 & c_1 c_2 & c_1 c_3 \\ c_1 c_2 & c_2^2 & c_2 c_3 \\ c_1 c_3 & c_2 c_3 & c_3^2 \end{bmatrix} \quad (\text{ก.16})$$

$$x_c = (x_1 + x_2 + x_3)/3 \quad (\text{ก.17})$$

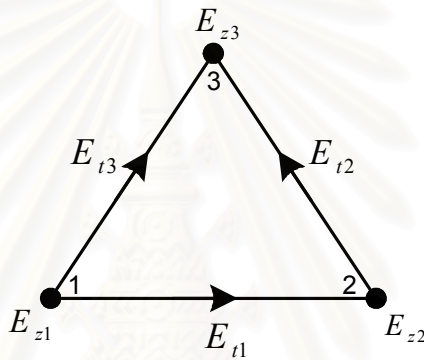
$$y_c = (y_1 + y_2 + y_3)/3 \quad (\text{ก.18})$$

โดยที่ $k,l=1,1,2,\dots,33$

ภาคผนวก ข

ฟังก์ชันรูปร่างของอีลีเมนต์ขอบคงที่

ฟังก์ชันรูปร่างประกอบด้วย ฟังก์ชันรูปร่าง โหนดและฟังก์ชันรูปร่างขอบ ซึ่งฟังก์ชันรูปร่าง โหนดใช้สำหรับประมาณสเกลาร์บนจุดแทนองค์ประกอบของสนามตามยาว ส่วนฟังก์ชันรูปร่างขอบใช้สำหรับประมาณเวกเตอร์บนด้านแทนองค์ประกอบของสนามตามขวางบนอีลีเมนต์สามเหลี่ยมรูปร่างใดๆ โดยมีพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า 3 ตัวบนขอบแทนตำแหน่งของสนามตามขวางและอีก 3 ตัวบน โหนดแทนตำแหน่งของสนามตามยาวภายในอีลีเมนต์แต่ละอีลีเมนต์ ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 พารามิเตอร์บนอีลีเมนต์ขอบคงที่

การประมาณองค์ประกอบของสนามตามยาวอยู่ในรูปของผลบวกของผลคูณระหว่างฟังก์ชันรูปร่าง โหนดกับพารามิเตอร์ไม่ทราบค่าทั้ง 3 จุด ดังสมการ

$$E_z^e = \sum_{i=1}^3 N_i^e E_{z_i}^e \quad (\text{ข.1})$$

การประมาณฟังก์ชันสเกลาร์ภายในรูปร่างสามเหลี่ยม โดยใช้ฟังก์ชันพหุนาม (polynomial function) อันดับหนึ่ง หรือฟังก์ชันเชิงเส้น (linear function) ซึ่งมีรูปสมการดังนี้

$$L_i^e = \frac{1}{2A_e} (a_i + b_i x + c_i y) \quad i = 1, 2, 3 \quad (\text{ข.2})$$

โดยที่

$$a_i = x_j y_k - x_k y_j \quad (\text{ข.3})$$

$$b_i = y_j - y_k \quad (\text{ข.4})$$

$$c_i = x_k - x_j \quad (\text{ข.5})$$

$$A_e = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \quad (\text{ข.6})$$

ซึ่งมีรหัสเวียน (cyclic code) เป็น $(i, j, k) = \{(1,2,3), (2,3,1), (3,1,2)\}$

$$N_i^e = L_i^e \quad (\text{ข.7})$$

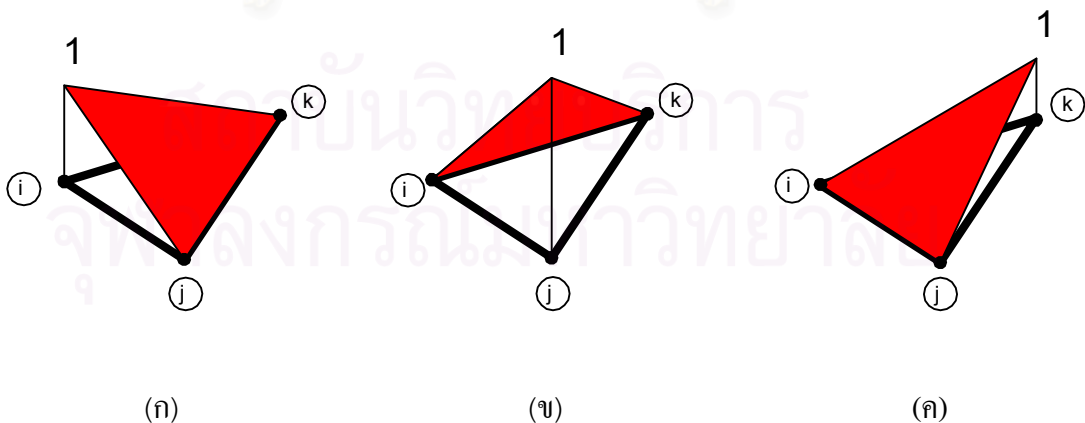
โดยฟังก์ชันรูปร่างโนดมีคุณสมบัติดังนี้ มีค่าเป็น 1 ในโนดแต่ละโนด และผลรวมของฟังก์ชันที่มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ข.2 ยกตัวอย่างเช่น ฟังก์ชัน L_1 มีค่าเป็น 0 ที่ด้านตรงข้ามกับโนดหนึ่ง (ด้าน 2-3) และมีค่าเป็น 1 ที่โนดหนึ่ง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันนี้เป็นไปอย่างเชิงเส้น ส่วนฟังก์ชัน L_2 และ L_3 มีคุณสมบัติเช่นเดียวกันกับฟังก์ชัน L_1

คุณสมบัติของฟังก์ชันที่จะเป็นดังสมการ

$$L_i^e = \begin{cases} 1, & \text{at node } i \\ 0, & \text{at node } j, k \end{cases} \quad (\text{ข.8})$$

$$\sum_{i=1}^3 L_i^e(x, y) = 1 \quad (\text{ข.9})$$

รหัสเวียนเป็น $(i, j, k) = \{(1,2,3), (2,3,1), (3,1,2)\}$

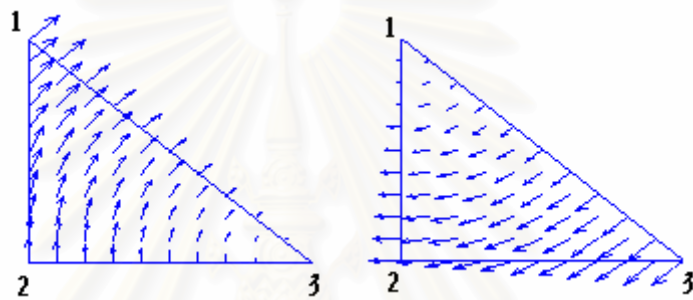
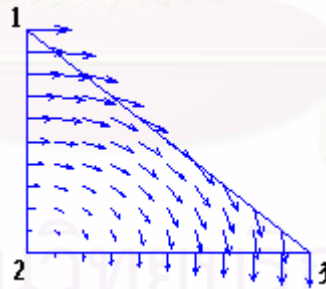


รูปที่ ข.2 ฟังก์ชันรูปร่างโนดเชิงเส้น

การประมาณองค์ประกอบของสนามตามขวาง อยู่ในรูปของผลบวกของผลคูณระหว่างฟังก์ชันรูปร่างกับพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า ทั้ง 3 ด้าน ดังสมการ

$$E_t^e = \sum_{i=1}^3 N_i^e E_{ti}^e \quad (\text{ข.9})$$

โดยพารามิเตอร์เป็นเวกเตอร์อยู่บนด้านมีคุณสมบัติคือ เปลี่ยนแปลงในแนวสัมผัสแบบคงที่ตลอดด้านและเปลี่ยนแปลงในแนวตั้งฉากแบบเชิงเส้น (Constant Tangential / Linear Normal : CT/LN) ดังรูปที่ ข.3 ยกตัวอย่างเช่น ฟังก์ชัน N_1^e พิจารณาด้าน 1-2 มีเวกเตอร์อยู่ในแนวสัมผัส ส่วนด้าน 2-3 และด้าน 3-1 มีเฉพาะเวกเตอร์ในแนวตั้งฉากเท่านั้น

(ก) N_1^e (ข) N_2^e (ค) N_3^e

รูปที่ ข.3 ฟังก์ชันฐานแบบอีลีเมนต์ขอบคงที่ปกติ (ก) N_1^e (ข) N_2^e (ค) N_3^e

องค์ประกอบตามขวางประกอบด้วย 2 องค์ประกอบคือ ϕ_x (E_x หรือ H_x) และ ϕ_y (E_y หรือ H_y) โดยที่องค์ประกอบตามขวางเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\phi_x = \{U(y)\}^T \{\phi_t\}_e = \{U\}^T \{\phi_t\}_e \quad (\text{ข.10})$$

$$\phi_y = \{V(x)\}^T \{\phi_t\}_e = \{V\}^T \{\phi_t\}_e \quad (\text{ข.11})$$

$$\{U\} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_1 + \tilde{c}_1 y \\ \tilde{a}_2 + \tilde{c}_2 y \\ \tilde{a}_3 + \tilde{c}_3 y \end{bmatrix} \quad (\text{ข.12})$$

$$\{V\} = \begin{bmatrix} \tilde{b}_1 - \tilde{c}_1 x \\ \tilde{b}_2 - \tilde{c}_2 x \\ \tilde{b}_3 - \tilde{c}_3 x \end{bmatrix} \quad (\text{ข.13})$$

โดยที่ $\{U\}$ และ $\{V\}$ เป็นฟังก์ชันรูปร่างแบบเวกเตอร์ของอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมและมีสัมประสิทธิ์ $\tilde{a}_k, \tilde{b}_k, \tilde{c}_k$ ดังนี้

$$\tilde{a}_k = \frac{(y_{m+3} \cos \theta_{m+3} - x_{m+3} \sin \theta_{m+3}) \sin \theta_{l+3} - (y_{l+3} \cos \theta_{l+3} - x_{l+3} \sin \theta_{l+3}) \sin \theta_{m+3}}{\Delta} \quad (\text{ข.14})$$

$$\tilde{b}_k = \frac{(y_{l+3} \cos \theta_{l+3} - x_{l+3} \sin \theta_{l+3}) \cos \theta_{m+3} - (y_{m+3} \cos \theta_{m+3} - x_{m+3} \sin \theta_{m+3}) \cos \theta_{l+3}}{\Delta} \quad (\text{ข.15})$$

$$\tilde{c}_k = (\cos \theta_{l+3} \sin \theta_{m+3} - \cos \theta_{m+3} \sin \theta_{l+3}) / \Delta \quad (\text{ข.16})$$

โดยที่

$$0 \leq \theta_{k+3} = \tan^{-1} \left(\frac{y_k - y_l}{x_k - x_l} \right) < \pi \quad (\text{ข.17})$$

$$\Delta = \sum_{k=1}^3 (y_{k+3} \cos \theta_{k+3} - x_{k+3} \sin \theta_{k+3}) \cdot (\cos \theta_{l+3} \sin \theta_{m+3} - \cos \theta_{m+3} \sin \theta_{l+3}) \quad (\text{ข.18})$$

กำหนดให้ $k = 1, 2, 3$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจิรวัดมน ตั้งวันเจริญ เกิดเมื่อวันที่ 21 มิถุนายน พ.ศ. 2520 ที่อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2543 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย