

การวิเคราะห์และออกแบบเส้นใยแสงน้อยแบบแผนคลื่นสำหรับ
การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแบบแผนคลื่น



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS AND DESIGN OF FEW MODE OPTICAL FIBER FOR
MODE DIVISION MULTIPLEXING

Mr. Nattapon Rattanajiamrangsri



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์และออกแบบเส้นใยแสงน้อยแบบแบนคลื่น
สำหรับการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแบบแบนคลื่น

โดย

นายณัฐพล รัตนเจียมรังษี

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พสุ แก้วปลั่ง)

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

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

ณัฐพล รัตนเจียมรังษี : การวิเคราะห์และออกแบบเส้นใยแสงน้อยแบบแผนคลื่นสำหรับการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแบบแผนคลื่น (ANALYSIS AND DESIGN OF FEW MODE OPTICAL FIBER FOR MODE DIVISION MULTIPLEXING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ทับทิม อ่างแก้ว, 77 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์โหมดและออกแบบเส้นใยแสงน้อยแบบแผนคลื่นด้วยการประมาณค่าโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และโปรแกรมออปติซิส ซึ่งวิเคราะห์หาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงเพื่อนำไปหาค่าความแตกต่างประวิงเวลาและดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดไฮบริดสองโหมดคือ HE11 และ HE21 นอกจากนี้ยังได้ออกแบบเส้นใยแสงแบบน้อยแผนคลื่นจากการวิเคราะห์ความแตกต่างประวิงเวลา และค่าดิสเพอร์ชันระหว่างสองไฮบริดโหมดคือ HE11 และ HE21 โดยการออกแบบได้กำหนดค่าดัชนีหักเหของแคลคูลิง ความกว้างของหน้าตัดเส้นใยแสงที่ต่างกันในช่วงความยาวคลื่น C+L ผลสรุปที่ได้นำไปสู่การนำเสนอโครงสร้างเส้นใยแสงน้อยแบบแผนคลื่นที่เหมาะสมความยาวคลื่นในระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแบบแผนคลื่น



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5470197221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MODE ANALYSIS / GROUP VELOCITY / DIFFERENTIAL GROUP DELAY / FEW MODE FIBERS / MODE DIVISION MULTIPLEXING / CAPACITY LIMITED / OPTICAL COMMUNICATION / STEP INDEX FIBER / DIFFERENTIAL MODAL DISPERSION

NATTAPON RATTANAJIAMRANGSRI: ANALYSIS AND DESIGN OF FEW MODE OPTICAL FIBER FOR MODE DIVISION MULTIPLEXING. ADVISOR: ASST. PROF. DR. TUPTIM ANGKAEW, 77 pp.

This thesis presents the analysis and design few mode optical fiber. The finite element method and OPTISYS program are applied to analyse wave pattern in optical fiber geometry. The calculated propagation constants from OPTISYS are described for the differential group delay and differential modal dispersion between two hybrid mode HE₁₁ and HE₂₁. As the result, the differential group delay and differential modal dispersion between two hybrid modes HE₁₁ and HE₂₁ are determined by Cladding refractive index and fiber core width in wavelength C+L band. these had led to propose few mode optical fiber design for mode division multiplexing system.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Electrical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นท่านแรก ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ข้อคิดเห็น และตลอดจนแนวทางการใช้ชีวิตของนักวิจัยต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการวิจัย อย่างครบถ้วน ขอขอบคุณพี่เรีองรอง แก้วอินทนิล (พี่ดาว) ที่ช่วยเหลือเรื่องเอกสารทุกอย่าง และขอขอบคุณพี่ทรรศพร อินทร์ไชยา (พี่อ้อ) ที่ได้สละเวลาเป็นธุระดำเนินการต่างๆ เป็นอย่างดี ขอขอบคุณสมาชิกในห้องปฏิบัติการวิจัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกท่านที่คอยช่วยเหลือกันตลอดเวลา และท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ นายวุฒิพงษ์-นางกาญจนา รัตน์เจียมรังษี และน้องชาย ซึ่งคอยให้การสนับสนุนด้านกำลังใจทรัพย์และ ให้กำลังใจเสมอจนสำเร็จการศึกษา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	11
1.1 แนวทางและความสำคัญของปัญหา.....	11
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	13
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	14
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	14
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐาน.....	15
2.1 เส้นใยแสง.....	15
2.2 คุณสมบัติการสะท้อนและการหักเหของแสงด้วยกระบวนการติดตามรังสี.....	16
2.3 การเกิดโหมดในเส้นใยนำแสง.....	20
2.4 ความเร็วกลุ่ม (Group velocity)	24
2.5 ดิสเพอร์ชันระหว่างโหมด (Modal dispersion).....	26
2.6 การวิเคราะห์โหมดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Modal analysis by finite element method).....	27
2.6.1 การตรวจสอบของวิธีที่นำเสนอ และตัวอย่างการคำนวณหาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในท่อนำคลื่น.....	29
2.6.2 ท่อนำคลื่นชนิดไดอิเล็กทริกเป็นรูปทรงแปดเหลี่ยม.....	31
บทที่ 3 การวิเคราะห์หาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น.....	33
3.1 กำหนดพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการออกแบบเส้นใยแสงน้อยแบบแผนคลื่น.....	33

ภาพที่ 3.1 รูปโครงสร้างดัชนีหักเหของเส้นใยแสงน้อยแบนคลื่น.....	33
3.1.1 การทดลองหาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 1 ประกอบไปด้วยดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.495$) ในตารางประกอบไปด้วย ความยาวคลื่น (ไมครอน), เลขคลื่น (Free space wave number: k_0).....	33
3.1.2 การทดลองหาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 2 ประกอบไปด้วยดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.496$) ในตารางประกอบไปด้วย ความยาวคลื่น (ไมครอน), เลขคลื่น (Free space wave number: k_0).....	35
3.1.3 การทดลองหาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 3 ประกอบไปด้วยดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.497$) ในตารางประกอบไปด้วย ความยาวคลื่น (ไมครอน), เลขคลื่น (Free space wave number: k_0).....	36
3.2 การหาค่าประวิงเวลาและดิสเพอร์ชัน.....	38
3.2.1 การทดลองเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 1 ประกอบไปด้วยดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.495$) ในตารางประกอบไปด้วย ความยาวคลื่น (ไมครอน), เลขคลื่น (Free space wave number: k_0).....	38
3.2.2 การทดลองเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 2 ประกอบไปด้วยดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.496$) ในตารางประกอบไปด้วย ความยาวคลื่น (ไมครอน), เลขคลื่น (Free space wave number: k_0).....	39
3.2.3 การทดลองเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 3 ประกอบไปด้วย ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.497$) ในตารางประกอบไปด้วย ความยาวคลื่น (ไมครอน), เลขคลื่น (Free space wave number: k_0).....	41
3.3 การวิเคราะห์ค่าประวิงเวลาและค่าความแตกต่างประวิงเวลาเชิงความยาวคลื่น	42
3.3.1 การทดลองเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 1 ประกอบไปด้วยดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.495$) ในตารางประกอบไปด้วย ความยาวคลื่น (ไมครอน), เลขคลื่น (Free space wave number: k_0).....	42

3.3.2 การทดลองเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 2 ขนาดรัศมีแกน 7 ไมครอน ประกอบไปด้วยดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.496$) ในตารางประกอบไปด้วย ความยาวคลื่น (ไมครอน), เลขคลื่น (Free space wave number: k_0).....	44
3.3.2 การทดลองเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 3 ขนาดรัศมีแกน 8 ไมครอน ประกอบไปด้วยดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.497$) ในตารางประกอบไปด้วย ความยาวคลื่น (ไมครอน), เลขคลื่น (Free space wave number: k_0).....	45
บทที่ 4 การทดสอบและผลการวิเคราะห์.....	47
4.1 การทดสอบหาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น, ค่าความแตกต่างประวิงเวลาและดิสเพอร์ชัน ระหว่างโหมด ในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 1	47
4.1.1 ขนาดรัศมีของแกน 6 ไมครอน ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสง ของแคลดดิ้ง ($n_2=1.495$).....	47
4.1.2 ขนาดรัศมีของแกน 7 ไมครอน ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสง ของแคลดดิ้ง ($n_2=1.495$).....	50
4.1.3 ขนาดรัศมีของแกน 8 ไมครอน ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสง ของแคลดดิ้ง ($n_2=1.495$).....	53
4.2 การทดสอบหาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น, ค่าความแตกต่างประวิงเวลาและดิสเพอร์ชัน ระหว่างโหมด ในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 2	56
4.2.1 ขนาดรัศมีของแกน 6 ไมครอน ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสง ของแคลดดิ้ง ($n_2=1.496$).....	56
4.2.2 ขนาดรัศมีของแกน 7 ไมครอน ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสง ของแคลดดิ้ง ($n_2=1.496$).....	58
4.2.3 ขนาดรัศมีของแกน 8 ไมครอน ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสง ของแคลดดิ้ง ($n_2=1.496$).....	61

4.3 การทดสอบหาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น, ค่าความแตกต่างประวิงเวลาและดิสเพอร์ชัน ระหว่างโหนด ในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 3	64
4.3.1 ขนาดรัศมีของแกน 6 ไมครอน ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสง ของแคลดดิ้ง ($n_2=1.497$)	64
4.3.2 ขนาดรัศมีของแกน 7 ไมครอน ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสง ของแคลดดิ้ง ($n_2=1.497$)	67
4.3.2 ขนาดรัศมีของแกน 8 ไมครอน ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสง ของแคลดดิ้ง ($n_2=1.497$)	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	73
ข้อเสนอแนะ	74
รายการอ้างอิง	75
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	77

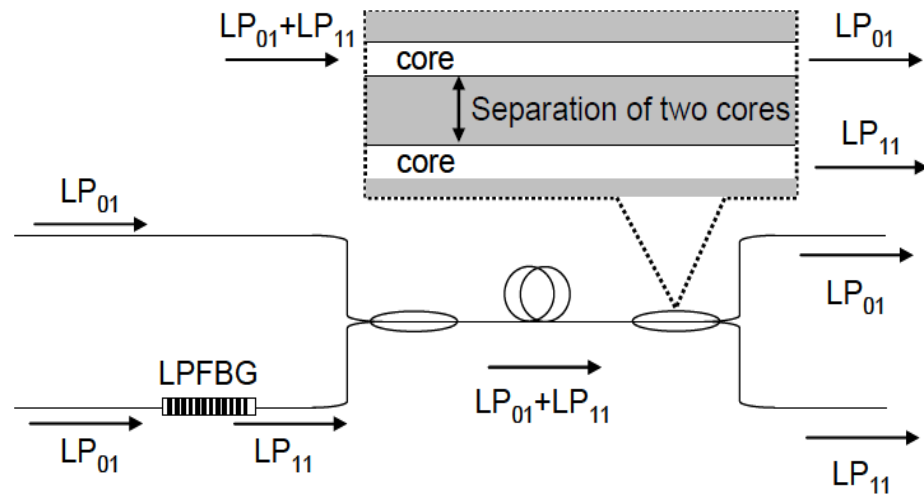
บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวทางและความสำคัญของปัญหา

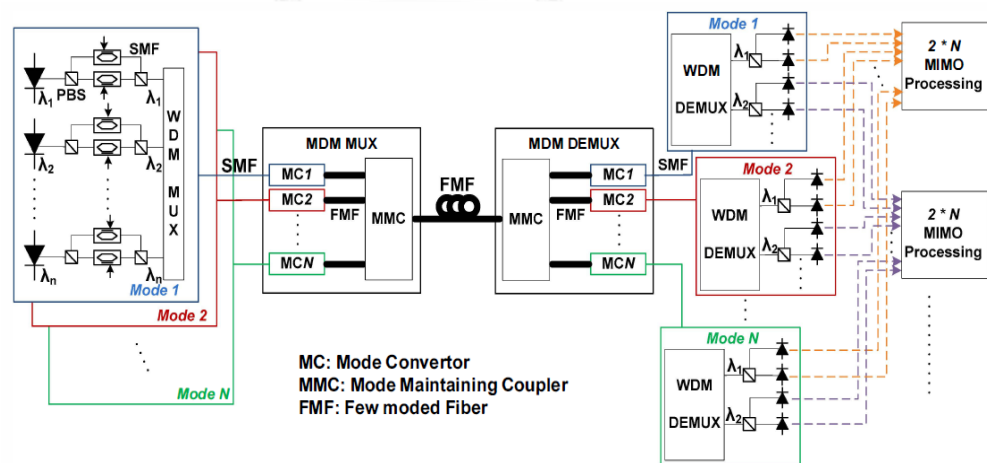
ระบบสื่อสารทางแสงเป็นระบบการสื่อสารที่มีการพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในระบบการสื่อสารโดยมีวัตถุประสงค์หลัก 3 ประการคือ 1. เพื่อเพิ่มระยะทางการส่งสัญญาณ 2. เพื่อเพิ่มช่องสัญญาณ (อัตราบิต) 3. ลดค่าใช้จ่ายในระบบสื่อสาร เนื่องด้วยข้อดีต่างๆ มากมาย ความสำเร็จในการสื่อสารด้วยแสงนั้นทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อเพิ่มช่องสัญญาณในระบบสื่อสารด้วยแสง เช่น การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวแสง (Wavelength Division Multiplexing) โดยปัจจุบันการระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงนิยมใช้เส้นใยแสงชนิดโหมดเดี่ยว โดยเส้นใยแสงชนิดโหมดเดี่ยวมีข้อดีที่สามารถลดปัญหาการประวิงเวลาที่ต่างการของโหมด และการกวนกันระหว่างโหมดซึ่งทำให้เกิดปัญหาการบานออกของสัญญาณหรือการเกิดดิสเพอร์ชัน (Modal dispersion) [1] ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของระบบการสื่อสารทางแสง และผลจากการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับช่องสัญญาณเสมือนเป็นการเพิ่มกำลังส่งกับเส้นใยแสงโดยตรง เส้นใยแสงโหมดเดี่ยว [2] ที่มีเส้นหน้าตัดแกน 8-10 ไมครอน กำลังส่งที่มากขึ้นทำให้เส้นใยแสงร้อน [3] และเสียหายได้ ซึ่งทำให้ระบบการสื่อสารด้วยแสงโดยการใช้เส้นใยแสงโหมดเดี่ยวในปัจจุบันอาจไม่เหมาะสมกับเทคโนโลยีเพิ่มช่องสัญญาณเพื่อให้ระบบมีการส่งผ่านสัญญาณที่รวดเร็วในอนาคต อีกทั้งการเติบโตของจราจรทางอินเทอร์เน็ตที่เพิ่มขึ้นมากทุกปี ทำให้ความต้องการใช้ข้อมูลของผู้ใช้สูงขึ้น ซึ่งเป็นปัญหาการจำกัดของช่องสัญญาณอีกหนึ่งปัญหา [4] เพื่อรองรับความต้องการการใช้ระบบสำหรับการส่งข้อมูลขนาดใหญ่ขึ้น ได้มีการออกแบบระบบการสื่อสารเส้นใยแสงอีกชนิดซึ่งมีการเพิ่มช่องสัญญาณขึ้นโดยการรวมจำนวนโหมดที่ส่งมากกว่าหนึ่งโหมดส่งผ่านไปในช่วงสัญญาณช่องเดี่ยวพร้อมกัน เรียกว่า การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแบบแผนคลื่น (Mode division multiplexing) [5]

งานวิจัย [6] ในภาพที่ 2 ได้ออกแบบระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแบบแผนคลื่นใช้เส้นใยแสงแบบแบรกก์คาบยาว (Long period fiber Bragg grating) โดยคุณสมบัติของเส้นใยแสงนี้ทำหน้าที่เสมือนตัวกรองสะท้อนโหมดต่ำ (Fundamental mode) ไม่ให้ผ่านและให้โหมดลำดับสูง (High order mode) ให้ส่งผ่านไปได้ และใช้โหมดตัวคู่ต่อ (Mode coupler) จากฝั่งส่งโดยทำหน้าที่เป็นการรวมสัญญาณร่วมสื่อ (MUX) และฝั่งรับโดยทำหน้าที่เป็นการแยกสัญญาณร่วมสื่อ (Demux)



ภาพที่ 1.1 แนวคิดพื้นฐานการออกแบบระบบโหมดการรวมสัญญาณร่วมสื่อโดยใช้โหมดตัวคู่ต่อ (Mode coupler) [6]

โดยงานวิจัย [7] ได้มีการออกแบบระบบการมัลติเพล็กซ์ทางโหมดจากภาพที่ 1.2 โดยใช้ร่วมกับโพลาริเซชันมัลติเพล็กซ์และการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวแสงขึ้นรองรับโหมดการส่งสองโหมด คือ LP01 และ LP11 ในเส้นใยแสงแบบน้อยแบน ในระบบที่ออกแบบนี้มีการใช้หลักการ multi input multi output (MIMO) สร้างระบบประมวลผลสัญญาณทางดิจิทัลเพื่อชดเชยการกวนกันระหว่างโหมดทางฝั่งรับอีกด้วย



ภาพที่ 1.2 ระบบโหมดมัลติเพล็กซ์ใช้งานร่วมกับโพลาริเซชันมัลติเพล็กซ์และการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวแสง

และยังมีงานวิจัยเกี่ยวกับการมัลติเพล็กซ์ทางโหมดโดยใช้เส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น งานวิจัย [8],[9],[10] ระบบโหมดมัลติเพล็กซ์ใช้การส่งผ่านโหมดมากกว่าหนึ่งโหมดจึงทำให้ได้มีการใช้วิธีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงที่แตกต่างกับเส้นใยนำแสงในปัจจุบันขึ้นมา เส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น ได้รับความสนใจในการวิจัยมานานสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบการมัลติเพล็กซ์ทางโหมด ดังเช่นงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งจะเห็นว่าระบบที่ออกแบบใช้เส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นมีปัญหาหลักที่การกวนกันและการเกิดดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดทำให้การส่งไม่มีประสิทธิภาพเท่าไรนัก [1] ดังนั้นปัญหาการพิจารณาค่าความแตกต่างของการประวิงของเวลาของโหมดแสงซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญของการกวนกันของโหมดในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นจึงเป็นจุดน่าสนใจสำหรับงานวิจัยนี้ โดยงานวิจัยเริ่มจากการวิเคราะห์โหมดในเส้นใยแสงเพื่อหาค่าคงที่การแพร่กระจายของคลื่นแสงแต่ละโหมดในเส้นใยแสง ซึ่งการวิเคราะห์โหมดในเส้นใยแสงนั้นมีการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างวุ่นวาย ดังนั้นผู้วิจัยได้เสนอวิธีวิเคราะห์โหมดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [11] และโปรแกรม OPTIMODETEM [12] เข้ามาช่วยวิเคราะห์ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น

เนื้อหาในเล่มวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งในบทที่ 2 จะกล่าวถึงหลักการระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และพื้นฐานทั่วไปของเส้นใยแสง คุณสมบัติต่างๆ การเกิดโหมดในเส้นใยแสง ดิสเพอร์ชันระหว่างโหมด วิธีการหาค่าประวิงเวลา และความแตกต่างการประวิงทาง ในบทที่ 3 ออกแบบการวิเคราะห์ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงในเส้นใยแสงด้วยโปรแกรม OPTIMODE ด้วยการกำหนดค่าดัชนีหักเหของแสง ของแคลคูลิงที่ต่างกัน และ ความยาวรัศมีของเส้นใยแสง ในช่วงความยาวคลื่นที่ 1530-1630 นาโนเมตร จากนั้นในบท 4 จะนำค่าการแพร่คลื่นที่หามาได้มาคำนวณค่าประวิงทางเวลา และหาความแตกต่างการประวิงทางเวลาเพื่อออกแบบเส้นใยแสงแบบน้อยแบนในย่านความยาวคลื่นที่ใช้งาน สุดท้ายสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในบทที่ 5

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1.2.1 นำเสนอการวิเคราะห์หาค่าคงที่การแพร่กระจายของคลื่นแสงในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และโปรแกรม OPTIMODE
- 1.2.2 วิเคราะห์เส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมี และค่าดัชนีหักเหที่ต่างกัน โดยพิจารณาจากค่าความต่างประวิงเวลาระหว่างโหมด และดิสเพอร์ชันระหว่างโหมด
- 1.2.3 นำเสนอตัวอย่างการออกแบบเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นที่เหมาะสมกับช่วงความยาวคลื่น C+L

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.3.1 วิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นแสงในเส้นใยแสงแบบน้อยแบน ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และโปรแกรม OPTIMODE
- 1.3.2 นำค่าคุณลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นแสงในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น ไปคำนวณหาค่าประวิงเวลา และความแตกต่างการประวิงเวลาของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น และค่าดิสเพอร์ชันระหว่างโหมด
- 1.3.3 ออกแบบเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นสำหรับใช้ในระบบการมัลติเพล็กซ์ทาง และสรุปผลการออกแบบเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นที่เหมาะสมกับช่วงความยาวคลื่น C+L

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาหลักการและทฤษฎีพื้นฐานของการวิเคราะห์ค่าคงที่การแพร่กระจายของคลื่นแสงในเส้นใยแสงน้อยแบนคลื่น
- 1.4.2 ใช้โปรแกรม OPTIMODE วิเคราะห์หาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสง
- 1.4.3 นำค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นโปรแกรม OPTIMODE มาคำนวณค่าประวิงเวลา ความแตกต่างประวิงเวลา และดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดเพื่อออกแบบเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น
- 1.4.4 ออกแบบเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น ในค่าดัชนีหักเห และขนาดแกนรัศมีที่ต่างกัน สรุปผลการออกแบบ และเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบถึงวิธีการวิเคราะห์โหมดในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนด้วยวิธีที่มีประสิทธิภาพ
- 1.5.2 ได้ความรู้ถึงตัวแปรสำคัญ ซึ่งเป็นผลกระทบต่อเส้นใยแสง และต่อระบบการมัลติเพล็กซ์ทางโหมด ในช่วงความยาวคลื่น C+L

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 เส้นใยแสง

เส้นใยแสง (optical fibers) [13] เป็นสื่อสัญญาณสำหรับการรับส่งข้อมูลประเภทหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากในระบบสื่อสารข้อมูล การใช้งานของเส้นใยนำแสงในขณะนี้มีการขยายตัวเข้าไปในระบบสื่อสารความเร็วสูงแทบทุกชนิด ทั้งในระบบการสื่อสารทางไกลและไกล เช่น ระบบโทรศัพท์และระบบสื่อสารทางไกลระหว่างทวีป เป็นต้น โดยเส้นใยนำแสงมีคุณสมบัติพิเศษที่สำคัญ คือ 1. มีขนาดของแบนด์วิดท์ที่ใหญ่มหาศาล สามารถใช้รับส่งข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและในปริมาณมาก 2. เส้นใยนำแสงมีค่าการลดทอนของสัญญาณที่ต่ำมาก ทำให้สามารถส่งสัญญาณระยะทางไกลๆ ได้โดยไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (repeaters) ข้อดีอื่นๆ เมื่อเทียบกับสื่อสัญญาณแบบอื่น เช่น สายคู่ตีเกลียว (twisted pair) สายโคแอกซ์ (coaxial cables) หรือช่องสัญญาณวิทยุ (radio channel) มีดังนี้

2.1.1 มีค่าการลดทอนสัญญาณแสงต่ำและแบนด์วิดท์ที่กว้าง เส้นใยนำแสงเป็นสายส่งสัญญาณที่มีค่าการลดทอนต่ำและมีค่าแบนด์วิดท์ที่กว้างกว่าสายส่งสัญญาณชนิดอื่นๆ ทำให้สามารถส่งข้อมูลในปริมาณที่มากได้ และส่งข้อมูลในระยะทางที่ไกลมากกว่าเดิมได้ ข้อดีที่ได้รับคือเป็นการลดจำนวนของสายส่งสัญญาณและจำนวนของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง อีกทั้งยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายและความซับซ้อนของระบบอีกด้วย

2.1.2 มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ในท่อร้อยสายจำนวนมากที่วางใต้ดินในเมืองและในการติดตั้งเคเบิลบนเพดานเส้นใยแก้วที่มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาจะเหมาะสมกว่าเคเบิลชนิดอื่นๆ ที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก

2.1.3 มีภูมิคุ้มกันต่อการแทรกสอดทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ electromagnetic interference (EMI) และผลกระทบจากพัลส์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ electromagnetic pulse (EMP) ที่เกิดขึ้นจากระบบสื่อสารของอื่นๆ ได้

2.1.4 ไม่เกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าในเส้นใยนำแสง เนื่องจากเส้นใยนำแสงทำจากแก้วที่เป็นวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า จึงไม่ต้องเป็นห่วงเกี่ยวกับลูปกราวนด์ (ground loop) และครอสทอล์ก (crosstalk) ที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยนำแสงด้วยกันเอง (ค่าที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำมากๆ) รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่ออุปกรณ์ก็มีน้อย

2.1.5 ข้อมูลที่ส่งผ่านเส้นใยนำแสงมีความปลอดภัยสูง - เนื่องจากสัญญาณแสงจะถูกกักไว้ในแกนในเท่านั้น แสงที่กระเจิงออกจากแกนใน (Core) จะถูกดูดกลืนด้วยแกนนอก (Cladding) และวัสดุเคลือบหุ้มของเส้นใยนำแสง

การแบ่งชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงตามจำนวนการแพร่กระจายของโหมดแสงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

เส้นใยแสงแบบโหมดเดียว (Single Mode optic fiber) เส้นใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียวนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกลาง ประมาณ 5-10 ไมครอน และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ Cladding ประมาณ 125 ไมครอน ซึ่งส่วนของแกน ที่มีขนาดเล็กมากนี้เองมีผลทำให้แสงเดินทางออกมาเพียงโหมดเดียว มีการแตกกระจายของสัญญาณ (Dispersion) เกิดขึ้นได้ยาก ทำให้มีแบนด์วิดท์ที่กว้าง

เส้นใยแสงแบบหลายโหมด (Multi-Mode optic fiber) เส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมดนี้ มีขนาดของแกนกลาง ประมาณ 50 ไมครอน และมีขนาดของ Cladding ประมาณ 125 ไมครอน ซึ่งจะเป็นว่าขนาดของ Core จะมีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียว มีผลทำให้แสงที่ตกกระทบที่ปลายอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงมีมุมตกกระทบที่แตกต่างกันหลายค่า ทำให้มีแนวลำแสงเกิดขึ้นหลายโหมด ซึ่งทำให้เกิดการแตกกระจายของโหมดแสง

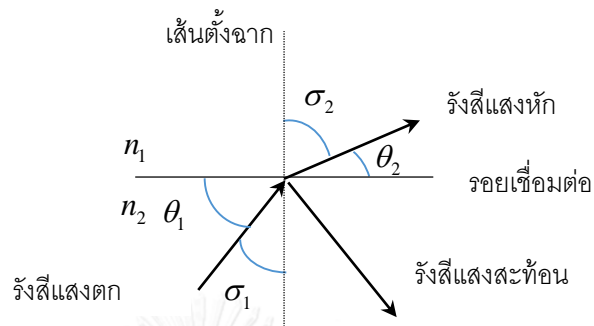
2.2 คุณสมบัติการสะท้อนและการหักเหของแสงด้วยกระบวนการติดตามรังสี

เป็นการพิจารณาพฤติกรรมของรังสีแสงของคลื่นระนาบที่เดินทางในตัวกลางไดอิเล็กทริก เมื่อรังสีแสงตกกระทบกับรอยเชื่อมต่อ (Interface หรือ boundary) ระหว่าง 2 ตัวกลางที่ต่างกัน ส่วนหนึ่งของรังสีแสงจะสะท้อนกลับมายังตัวกลางแรกและบางส่วนจะหักเหเข้าไปในตัวกลางที่ 2 การหักเหของแสงดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากันใน 2 ตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสง () ต่างกัน ถ้าเรากำหนดให้มี 2 ตัวกลางที่เชื่อมต่อกัน ค่า เราจะสมการความสัมพันธ์ที่เป็นไปตามกฎของสเนลล์ (Snell's law) ดังนี้

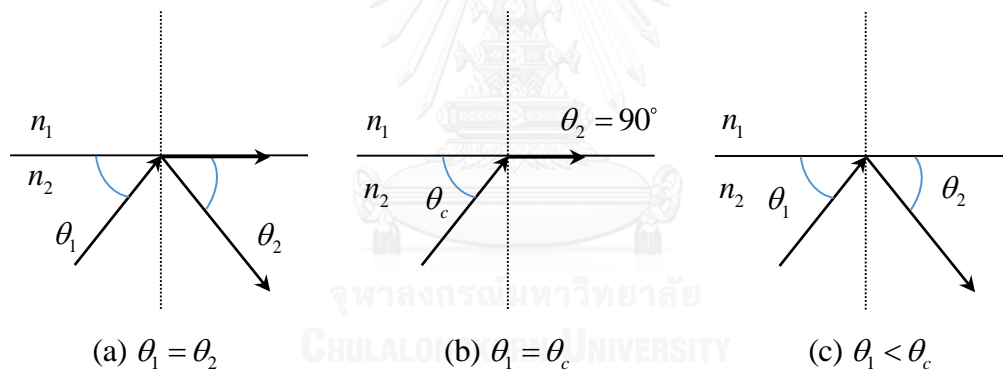
$$n_1 \sin \sigma_1 = n_2 \sin \sigma_2 \quad (2.1)$$

$$\text{หรือ } n_1 \cos \theta_1 = n_2 \cos \theta_2 \quad (2.2)$$

จากสมการ(1),(2) ข้างบน ไปใช้งานเราจะใช้ฟังก์ชันไซน์ในสมการที่ (1) ได้เมื่อเราพิจารณามุมที่กระทำกับnormal line และใช้ฟังก์ชันโคไซน์ในสมการ (2) เมื่อเราพิจารณามุมที่กระทำกับรอยเชื่อมต่อของตัวกลาง เราจะใช้กฎการสะท้อนอธิบายภาพที่ 2.1 ได้ดังนี้



ภาพที่ 2.1 การหักเหและการสะท้อนของรังสีแสงที่รอยเชื่อมต่อระหว่าง 2 ตัวกลาง



ภาพที่ 2.2 ปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของรังสีแสงที่รอยเชื่อมต่อระหว่าง 2 ตัวกลาง

1. มุมตกกระทบของรังสีแสง (θ_1) จะเท่ากับมุมสะท้อนกลับ (θ_1) ในตัวกลางเดียวกัน
2. ถ้ารังสีแสงตกกระทบตั้งฉากกับรอยเชื่อมต่อ รังสีแสงจะสะท้อนกลับออกมาทั้งหมดในแนวตั้งฉากในตัวกลางเดียวกัน
3. ถ้ารังสีแสงหักเหออกจากตัวกลางที่ 1 (ค่าดัชนีหักเหแสงที่สูงกว่า) ไปยังตัวกลางที่ 2 เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์สะท้อนออกหมด (External reflection)

4. ถ้ารังสีแสงสะท้อนกลับเข้ามาในตัวกลางที่ 1 โดยไม่มีการหักเหเข้าไปในตัวกลางที่ 2 เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมด (Internal reflection)

ภาพที่ 2.1 เป็นภาพที่นำมาแสดงเพื่อให้เข้าใจมากขึ้นจากภาพที่ 2 โดยยังคงกำหนดให้แสงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่ 1 ไปยัง 2 ค่า $n_1 > n_2$ และค่ามุมต่างๆถูกกำหนดเหมือนเดิม มีคำอธิบายดังนี้

ในภาพที่ 2.2(a) เป็นปรากฏการณ์ที่รังสีแสงมีมุมตกกระทบ (θ_1) จะเท่ากับมุมสะท้อน (θ_1) และรังสีแสงบางส่วนที่หักเหออกไปในตัวกลางที่ 2 ด้วยมุม θ_2 ที่กระทำกับรอยเชื่อมต่อ

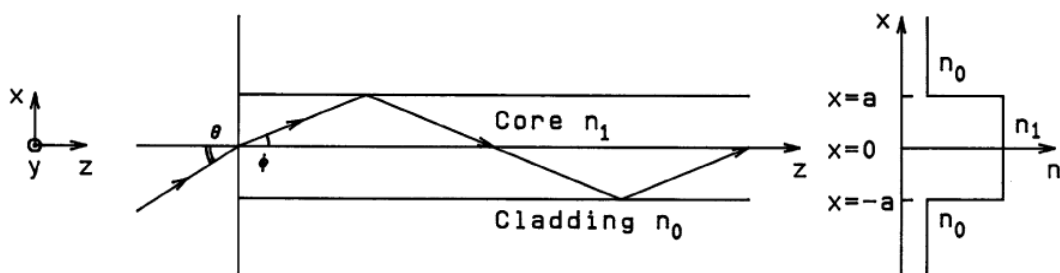
ในภาพที่ 2.2(b) เป็นปรากฏการณ์ที่รังสีแสงมีมุมตกกระทบ (θ_1) ลดลงจนทำให้มุมหักเหของรังสีแสง (θ_2) มีค่าเท่ากับ 0 เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์เริ่มสะท้อนกลับหมด ซึ่งมุม (θ_1) ดังกล่าวถูกเรียกว่า มุมวิกฤติ (Critical angle) หรือ θ_c

ในภาพที่ 2.2(c) เป็นปรากฏการณ์ที่รังสีแสงมีมุมตกกระทบ (θ_1) ที่มีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤติ (θ_c) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแสงไม่มีการหักเหเข้าไปในตัวกลางที่ 2 เลย แสงจะสะท้อนกลับเข้ามาด้วยมุม (θ_1) เช่นเดิม เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมด

ซึ่งปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดนั้นเป็นปรากฏการณ์ในอุดมคติ ในทางปฏิบัติจะมีแสงบางส่วนหักเหออกไปจากรอยเชื่อมต่อเสมอ แต่มีปริมาณพลังงานไม่มากนัก ค่ามุม θ_c นี้หาค่าได้ดังนี้

$$\theta_c = \arccos \frac{n_2}{n_1} \quad (2.3)$$

ปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดในหัวข้อนี้เป็นหลักการพื้นฐานที่สำคัญที่แสดงให้เห็นว่าแสงสามารถเดินทางในท่อนำคลื่นบริเวณที่ 1 ที่ถูกจำกัดขอบเขตด้วยบริเวณที่ 2 ได้และทำให้คลื่นแสงเดินทางไปได้ไกลโดยมีค่าการสูญเสียกำลังแสงในตัวกลางที่ต่ำได้ ดังนั้น จึงได้นำหลักการนี้ไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างของเส้นใยนำแสงที่ใช้ส่งแสงได้นั่นก็คือเส้นใยนำแสงที่ใช้งานในปัจจุบัน



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างพื้นฐานและค่าดัชนีหักเหของท่อนำคลื่นแสง [13].

เส้นใยแสงและท่อนำคลื่นแสงประกอบด้วยแกนใน (Core) ซึ่งแสงถูกจำกัดให้อยู่ในบริเวณนี้ และถูกล้อมรอบด้วยแกนนอก (cladding) หรือวัสดุไดอิเล็กตริกดังแสดงในภาพที่ 2.3 โดยดัชนีหักเหของแกนใน n_1 สูงกว่าแกนนอก n_0 ตามกฎของสเนลล์ (Snell's law) แล้ว หากมุมตกกระทบ (θ) ที่มีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤติ (θ_c) แสงจะสะท้อนกลับเข้ามาด้วยมุม (ϕ) เกิดปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดภายใน (Total Internal Reflection :TIR) เงื่อนไขสำหรับการสะท้อนแสงภายในทั้งหมดที่ผิวรอยต่อระหว่างแกนใน (Core) และ แกนนอก (Cladding) คือ $n_1 \sin(\frac{\pi}{2} - \phi)$ ดังนั้นมุม ϕ ที่เกี่ยวข้องกับมุมตกกระทบ (θ) ได้เป็น $\sin \theta = n_1 \sin \phi \leq \sqrt{n_1^2 - n_0^2}$ และเงื่อนไขสำคัญสำหรับการสะท้อนกลับหมดภายในได้เป็น

$$\theta \leq \sin^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_0^2} \equiv \theta_{\max} \quad (2.4)$$

ซึ่งค่าความแตกต่างระหว่างดัชนีหักเหภายในแกนในและแกนนอก คือ ดังนั้น สมการ (4) ประมาณได้เป็น

$$\theta_{\max} \cong \sqrt{n_1^2 - n_0^2} \quad (2.5)$$

ค่า θ_{\max} แสดงถึงมุมของช่องรับแสงสูงสุดของท่อนำคลื่นแสงเรียกว่า ค่าที่บอกความสามารถในการรับแสงของเส้นใยนำแสง (Numerical aperture: NA) โดย NA เป็นค่าที่ไม่มีหน่วยและมีค่าน้อยกว่า 1 นอกจากนี้ยังมีการนิยามความสัมพันธ์ของค่าความแตกต่างดัชนีหักเหระหว่าง n_1 และ n_0 เรียกว่า ผลต่างของค่าดัชนีหักเห (Refractive index difference) สัญลักษณ์คือ Δ เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_0^2}{2n_1^2} \cong \frac{n_1 - n_0}{n_1} \quad (2.6)$$

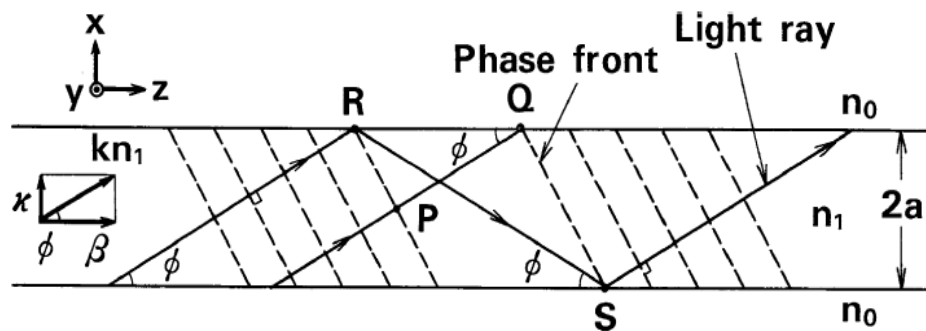
ซึ่งค่า NA มีความสัมพันธ์กับ ดังนี้

$$NA = \theta_{\max} \cong n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.7)$$

โดยค่าตัวแปรต่างๆ สำหรับท่อนำคลื่นแสงทั่วไปมีดังนี้ ค่า $NA = 0.21$, $\theta_{\max} = 12^\circ$ ($\Phi_{\max} = 8.1^\circ$) เมื่อ $n_1 = 1.47$, $\Delta = 1\%$ (สำหรับ $n_0 = 1.455$)

2.3 การเกิดโหมดในเส้นใยนำแสงแสง

จากหัวข้อย่อยที่แล้วได้พูดถึงมุมตกกระทบของแสงมีผลต่อการแพร่กระจายแสงหรือการเดินทางของแสงภายในแกนใน (core) หัวข้อนี้จะอธิบายการตัวแปรอื่นที่มีผลต่อการแพร่กระจายแสง โดยพิจารณาจากการก่อตัวโหมด (Formation of Guided Modes) ด้วยรังสีแสงในท่อนำคลื่นดังภาพที่ 5



ภาพที่ 2.4 มุม (Phase) และรังสี (Ray) แสงภายในท่อนำคลื่น [13].

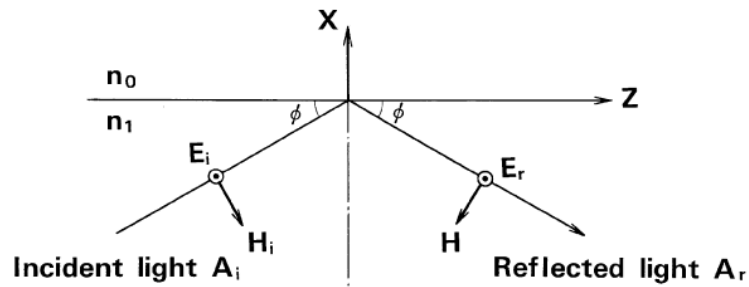
ดังแสดงในรูป 2.4 พิจารณาการแพร่กระจายของคลื่นระนาบในทิศทาง Z และมุมเอียงของรังสีตกกระทบ เฟสด้านหน้าของคลื่นระนาบตั้งฉากกับรังสีของแสง, ความยาวคลื่น (Wavelength) และเลขคลื่น (Wavenumber) ของแสงในแกนใน (Core) คือ และ ตามลำดับ โดยที่ คือความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ, ค่าคงที่การแพร่กระจาย (Propagation constants) ตามแกน z และ x (ทิศทางข้าง) แทนด้วย

$$\beta = kn_1 \cos \phi, \quad (2.8)$$

$$k = kn_1 \sin \phi, \quad (2.9)$$

จากภาพที่ 2.5 มุมตกกระทบของแสงและมุมสะท้อนที่เกิดจากการสะท้อนกลับหมดของแสงได้เป็น

$$r = \frac{A_r}{A_i} = \frac{n_1 \sin \phi + j \sqrt{n_1^2 \cos^2 \phi - n_0^2}}{n_1 \sin \phi - j \sqrt{n_1^2 \cos^2 \phi - n_0^2}} \quad (2.10)$$



ภาพที่ 2.5 การสะท้อนกลับหมดของคลื่นระนาบที่ผิวไดอิเล็กทริก [13]

เมื่อเราแทน r (Complex reflection coefficient) เท่ากับ $r = \exp(-j\Phi)$ การเลื่อนของเฟส (Phase shift) Φ ที่ได้คือ

$$\Phi = -2 \tan^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 \cos^2 \phi - n_0^2}}{n_1 \sin \phi} = -2 \tan^{-1} \sqrt{\frac{2\Lambda}{\sin^2 \phi} - 1} \quad (2.11)$$

จากภาพที่ 2.4 เงื่อนไข เฟสแมชชิง สำหรับเส้นทางแสง PQ และ RS เป็นดังนี้

$$(kn_1 l_2 + 2\Phi) - kn_1 l_1 = 2m\pi, \quad (2.12)$$

ระยะห่างระหว่างจุด R และ S เป็นดังนี้

$$l_2 = \frac{2a}{\sin \phi}, \quad (2.13)$$

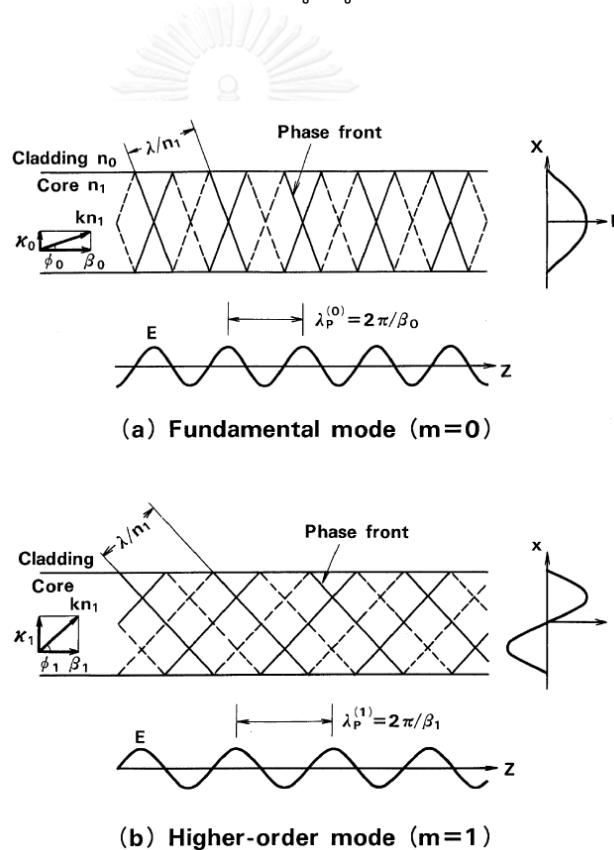
เมื่อเราแทน (Complex reflection coefficient) เท่ากับ $2a/\tan \phi - 2a \tan \phi$ ซึ่งจากระยะห่าง Q และ R สามารถหาระยะห่าง P และ Q ได้เป็นดังนี้

$$l_1 = \left(\frac{2a}{\tan \phi} - 2a \tan \phi \right) \cos \phi = 2a \left(\frac{1}{\sin \phi} - 2 \sin \phi \right), \quad (2.14)$$

แทน สมการที่ (2.11), (2.12) และ (2.13) ลงใน สมการที่ 2.14 จะได้เงื่อนไขสำหรับมุมการแพร่กระจาย ϕ ดังนี้

$$\tan\left(kn_1 a \sin \phi - \frac{m\pi}{2}\right) = \sqrt{\frac{2\Delta}{\sin^2 \phi} - 1}, \quad (2.15)$$

สมการที่ (2.15) แสดงให้เห็นว่ามุมการแพร่กระจายของรังสีแสงนั้นไม่ต่อเนื่องและถูกกำหนดโดยโครงสร้างของท่อนำแสง (รัศมีของแกนใน a , ค่าดัชนีหักเหของแสง n_1 , ค่าผลต่างดัชนีหักเหของแสง Δ) และความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง λ (เลขคลื่น $k = 2\pi/\lambda$) การกระจายของสนามภายในเส้นใยนำแสงที่สอดคล้องกับเงื่อนไขเฟสแมชซิ่ง เรียกว่า “โหมด (Mode)” จากสมการ (2.15) โหมดที่มีมุม ϕ ต่ำที่สุด ($m=0$) คือโหมดพื้นฐาน (Fundamental mode) และโหมดอื่นที่มีมุม ϕ ใหญ่ขึ้น ($m \geq 1$) คือ โหมดสูง (Higher order mode) ค่าคงที่การแพร่กระจาย (Propagation constant β) เป็นค่าที่ไม่ต่อเนื่องเช่นกันและแสดงอยู่ในรูปค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalue)



ภาพที่ 2.6 การเกิดรูปแบบของโหมด (a) โหมดพื้นฐาน(Fundamental mode), (b) โหมดสูง (Higher-order mode)

เมื่อ $n_1 \sin \phi = \sin \theta \leq \sqrt{n_1^2 - n_0^2}$ จากภาพที่ 2.6 , สมการ (2.8) และสมการที่ (2.9) ได้มุมการแพร่กระจายเป็น $\sin \phi \leq \sqrt{2\Delta}$ เขียนในรูปของตัวแปรใหม่ได้ดังนี้

$$\xi = \frac{\sin \phi}{\sqrt{2\Delta}}, \quad (2.16)$$

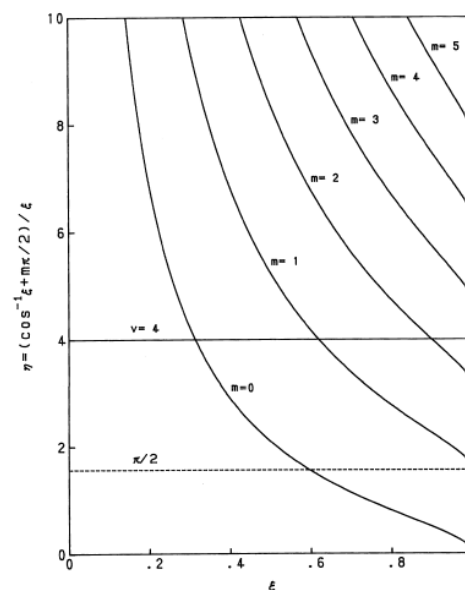
แล้วทำการนอร์มอลไลส์ ให้มีค่าเป็น 1 สมการเฟสแมชซิง (2.16) สามารถเขียนได้ใหม่คือ

$$kn_1 a \sqrt{2\Delta} = \frac{\cos^{-1} \xi + m\pi/2}{\xi}, \quad (2.17)$$

เทอมด้านซ้ายของสมการที่ (2.17) เรียกว่า ความถี่นอร์มอลไลส์ (Normalized frequency) เขียนได้ดังนี้

$$v = kn_1 a \sqrt{2\Delta}, \quad (2.18)$$

ความถี่นอร์มอลไลส์ v สามารถปรับไปใช้ได้กับคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นทั่วไปได้ (ไม่จำกัดโครงสร้างในแต่ละท่อนำคลื่นใดๆ) ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่นอร์มอลไลส์ v และ ξ (Propagation constant β) สมการที่ (2.18) เรียกว่า สมการดิสเพอร์ชัน (Dispersion equation)

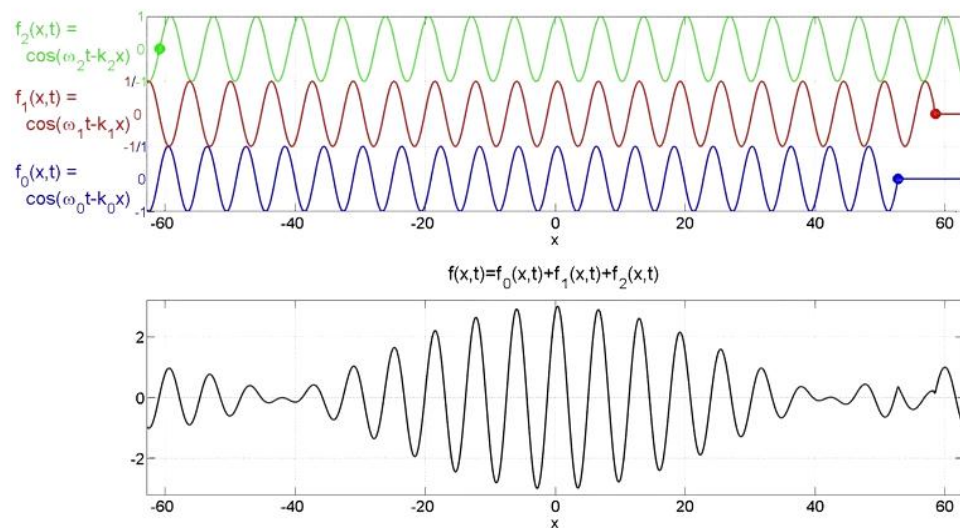


ภาพที่ 2.7 กราฟเส้นโค้งดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นแบบสแลป

จากภาพที่ 2.7 แสดงถึงเส้นโค้งดิสเพอร์ชันของท่อนำคลื่นแบบสแลปจุดตัดกันระหว่าง $\eta = (\cos^{-1} \xi + m\pi/2)/\xi$ และ $\eta = v$ ให้ ξ_m สำหรับแต่ละจำนวนโหมด m และค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น β_m ได้จากสมการ (2.17), (2.18) ในภาพที่ 2.7 นั้นโหมดพื้นฐาน ($m=0$) เกิดได้เมื่อ $v < v_c = \pi/2$ โดย v_c ได้กำหนดเป็นเงื่อนไขของโหมดเดี่ยวบนท่อนำคลื่นแบบสแลป กล่าวได้คือเงื่อนไขที่ตัดการเกิดโหมดสูงขึ้นภายในท่อนำคลื่น เพราะฉะนั้นจึงเรียกว่า ค่า v cut off เขียนได้ในเทอมของความยาวคลื่นได้เป็น

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{v_c} a n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (2.19)$$

2.4 ความเร็วกลุ่ม (Group velocity)



ภาพที่ 2.8 การแทรกสอดกันของคลื่นแสงในเส้นใยนำแสง

การที่พัลส์แสง (optical pulse) ในเส้นใยแสง ซึ่งประกอบหลายความยาวคลื่นเดินทางจากฝั่งส่งเดินทางถึงฝั่งรับ ด้วยความเร็วเฟสที่ต่างกัน จึงมีการแทรกสอดกันของคลื่นแสงเป็นกลุ่มคลื่น ดังนั้นการจึงต้องพิจารณาจากคลื่นทั้งกลุ่ม คือความเร็วกลุ่ม (Group velocity V_g) [14] สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_g = \left(\frac{d\beta}{d\omega} \right)^{-1} \quad (2.20)$$

β คือ ค่าคงที่การแพร่กระจายของคลื่นแสงในเส้นใยแสง

ω คือ ค่าความเร็วเชิงมุมของคลื่นแสงคำนวณได้ดังนี้ $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$ โดย c, λ คือความเร็วแสง และความยาวคลื่นของแสง ตามลำดับ

การพิจารณาในเชิงเวลาของคลื่นเรียกว่า การประวิงเวลาแบบกลุ่ม (Group delay)[14] สามารถคำนวณได้จากค่าความเร็วของกลุ่มดังนี้

$$T_g = \frac{1}{V_g} \quad (2.21)$$

$$\tau_g = \frac{d\beta}{d\omega} = \frac{d\beta}{\frac{-2\pi c}{\lambda^2} d\lambda}$$

$$\therefore \tau_g = \frac{-\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\beta}{d\lambda} \quad (2.22)$$

τ_g คือ การประวิงเวลาแบบกลุ่ม (Group delay) ตามลำดับ โดยค่าคงที่การแพร่กระจายของคลื่น (β) ของแต่ละโหมดแสงจะมีค่าต่างกัน

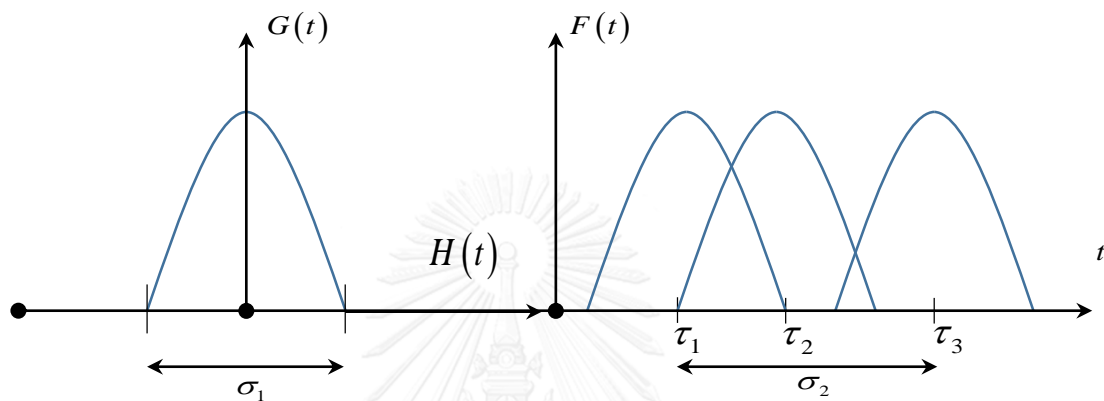
$$DGD = \tau_{g1} - \tau_{g2} \quad (2.23)$$

โดย τ_{g1}, τ_{g2} คือการประวิงเวลาของคลื่นแสงโหมดที่ 1 และโหมดที่ 2 ตามลำดับ

เส้นใยแสงที่เหมาะสมกับการใช้งานควรมีค่าความต่างในเส้นใยแสงควรเป็นศูนย์[15]หรือใกล้เคียงศูนย์ใน ความยาวคลื่นแสงที่พิจารณา

2.5 ดิสเพอร์ชันระหว่างโหมด (Modal dispersion)

ดิสเพอร์ชันระหว่างโหมด เป็นการบานออกของสัญญาณพัลส์แสง เนื่องมาจากเวลาที่ใช้ในการเดินทางของแสงในแต่ละโหมดมีค่าไม่เท่ากัน เป็นปัญหาหลัก [16] ที่เกิดขึ้นในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น ซึ่งการบานออกของพัลส์แสงจะส่งผลให้อัตราการส่ง (Bit rate) ต่ำลง สามารถคำนวณได้ดังนี้



ภาพที่ 2.9 การเกิดดิสเพอร์ชันในเส้นใยแสงน้อยแบนคลื่น และพัลส์แสงบานออกจากผลการประวิงเวลาของโหมด

กำหนดให้อินพุตเป็น พัลส์ $G(t)$ ในทางเวลา โดยป้อนไปในเส้นใยแสงที่มีค่าฟังก์ชันถ่ายโอน $H(t)$ ได้สัญญาณซึ่งเกิดการประวิงเวลาทำให้พัลส์บานออก เป็น $F(t)$ เขียนเป็นสมการในโดเมนความถี่ได้

$$H(\omega) = \sum_{m=1}^M A_m e^{-j\beta_m \omega L} \quad (2.24)$$

โดยที่ A_m คือ แอมพลิจูดของแต่ละโหมดคลื่น

β_m คือค่าคงที่การแพร่กระจายของคลื่นที่ m , $m = 1, 2, 3, \dots, M$

ω คือ ความถี่เชิงมุมของคลื่น

ซึ่งจากภาพที่ 2.9 สมการ 2.24 เฟสของแต่ละโหมดเขียนได้เป็น $\phi_m(\omega) = -\beta_m L$ และค่าประวิงเวลา (τ) หาได้จาก $\tau_m(\omega) = -\frac{d\phi_m(\omega)}{d\omega}$ ดังนั้นเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างเฟสกับค่าประวิงเวลาของโหมดได้

$$\tau_m(\omega) = \frac{L d\beta_m}{d\omega} \quad (2.25)$$

$$\text{และ } \tau_m(\omega) = \frac{L}{C} \frac{d\beta_m}{dk} \quad (2.26)$$

การหาดีสเพอร์ชันทำได้โดยการหาจากภาพ 2.9 โดย $\sigma^2 = \frac{1}{A_n} \gamma^2(\omega)$, $\gamma^2(\omega)$ คือเฟสของคลื่นในเชิงความถี่

$$\sigma_2^2 = \sigma_1^2 + \langle \tau_m^2 \rangle - \langle \tau_m \rangle^2 \quad (2.27)$$

$$\text{โดย } \langle \tau_m^2 \rangle = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \tau_m^2 : \text{Geometric mean} \quad (2.28)$$

$$\langle \tau_m \rangle = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \tau_m : \text{Arithmetic mean} \quad (2.29)$$

2.6 การวิเคราะห์โหมดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Modal analysis by finite element method)

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์การประมาณค่าที่ใช้ในการหาคำตอบของท่อนำคลื่นชนิดหนึ่ง โดยการใช้การแบ่งโครงสร้างที่พิจารณาออกเป็นรูปเหลี่ยมย่อยๆ วิธีที่นำเสนอนี้ [11] เริ่มด้วยการเขียนปัญหาท่อนำคลื่นในรูปสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กทางเวลา ได้ดังนี้

$$E(x, y, z, t) = (e_t(x, y) + e_z(x, y))e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.30)$$

$$H(x, y, z, t) = (h_t(x, y) + h_z(x, y))e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.31)$$

โดย $E(x, y, z, t)$ คือสนามไฟฟ้า ในโครงสร้างท่อนำคลื่นในแกน x,y และ z ในโดเมนเวลา

$H(x, y, z, t)$ คือสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในโครงสร้างท่อนำคลื่นในแกน x, y และ z ในโดเมนเวลา

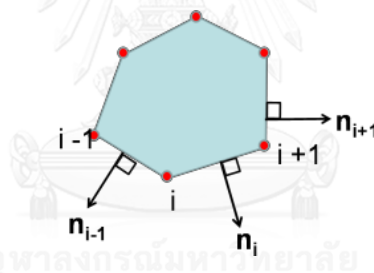
โดยคำตอบของปัญหา อยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

$$\beta(e_t, h_t) = \frac{A(e_t, h_t)}{B(e_t, h_t)} \quad (2.32)$$

$$\text{โดยที่ } A(e_t, h_t) = \int_{\Omega} \{ \omega \epsilon e_t^* \cdot e_t + \omega \mu h_t^* \cdot h_t - \frac{1}{\omega \mu} (\nabla \times e_t^*) \cdot (\nabla \times e_t) - \frac{1}{\omega \epsilon} (\nabla \times h_t^*) \cdot (\nabla \times h_t) \} ds$$

$$B(e_t, h_t) = \int_{\Omega} \{ U_z \cdot (e_t^* \times h_t + e_t \times h_t^*) \} ds$$

และ $\int_{\Omega} ds$ หมายถึง พื้นที่ผิวหน้าตัดของท่อนำคลื่นที่พิจารณา



ภาพที่ 2.10 เอลิเมนต์ย่อยขอบรูปหลายเหลี่ยม

N_G คือ จำนวนโนหนดในรูปเอลิเมนต์ เช่นในตัวอย่าง ภาพที่ 2.10

โดยแต่ละเอลิเมนต์ย่อยสามารถเขียนเป็นสมการการหาคำตอบไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ดังนี้

$$e_t^e(x, y) = \sum_{i=1}^{N_G} N_i^e(x, y) \phi_i^e \quad (2.33)$$

$$h_t^e(x, y) = \sum_{i=1}^{N_G} N_i^e(x, y) \psi_i^e \quad (2.34)$$

เวกเตอร์ขอบดังภาพที่ 2.10 เขียนได้ดังนี้ $N_i^e = \frac{n_{i-1}}{i_z \cdot (n_i \times n_{i-1})} L_i + \frac{n_{i+1}}{i_z \cdot (n_i \times n_{i+1})} L_{i+1}$

n_i คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยจากขอบ i^{th}

L_i คือ พิกัด barycentric ของเอลิเมนต์หลายเหลี่ยมมีคุณสมบัติ ดังนี้ $L_i(x, y) = 1$ ที่จุดโหนด (x_i, y_i) , $L_i(x, y) = 0$ ที่จุดโหนด (x_j, y_j) , $j \neq i$

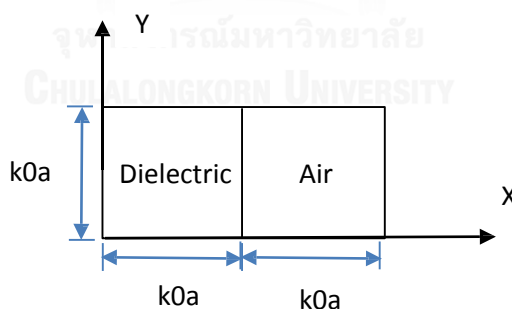
เงื่อนไขขอบเขตระหว่างเอลิเมนต์ย่อยและขอบเขตเอลิเมนต์สามารถกำหนดโดยการกำหนดเงื่อนไขโดยตรงโดยพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่ารวมเข้าด้วยกัน โดยการใส่ฟังก์ชันตัวอย่างของไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงในรูปแบบเมทริกซ์สมการค่าไอเกน (eigenvalue) ได้ดังนี้

$$[A]\{\Phi\} = \beta[B]\{\Phi\} \quad (2.35)$$

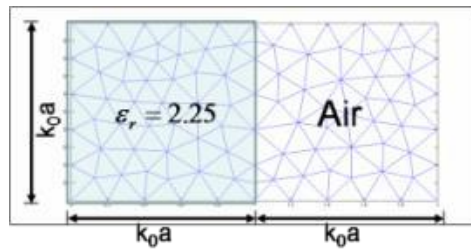
จากสมการ 2.35 แก่สมการเพื่อหาค่าตอบอยู่ในรูปของค่าไอเกน (eigenvalue) ที่สอดคล้องกับเวกเตอร์ไอเกน (eigenvector) จากการแพร่กระจายของโหมดในรูปของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

2.6.1 การตรวจสอบของวิธีที่นำเสนอ และตัวอย่างการคำนวณหาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในท่อนำคลื่น

ทำการทดสอบด้วยท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (rectangular waveguide) ซึ่งแบ่งเป็นสองส่วนคือ ไดอิเล็กทริก (dielectric) และ อากาศ (air) ดังภาพที่ 2.11

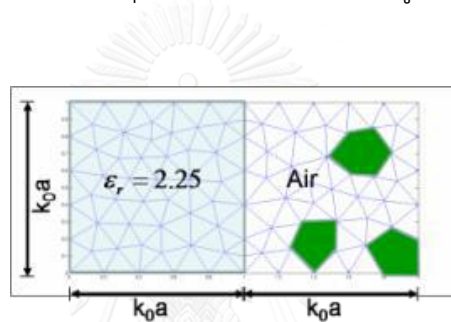


ภาพที่ 2.11 ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมประกอบไปด้วยส่วนไดอิเล็กทริกสมบูรณ์และอากาศ



ภาพที่ 2.12 การแบ่งเอลิเมนต์ย่อยรูปสามเหลี่ยมในท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยม

ภาพที่ 2.12 เป็นการแบ่งโครงสร้างท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมเป็นเอลิเมนต์ย่อยรูปสามเหลี่ยมชนิดเดียว และภาพที่ 2.13 โครงสร้างท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมเป็นเอลิเมนต์ย่อยรูปสามเหลี่ยมผสมกับเอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยม โดยขอบของท่อนำคลื่นสมมุติให้เป็นไดอิเล็กทริกสมบูรณ์ (perfect dielectric)



ภาพที่ 2.13 การแบ่งเอลิเมนต์ย่อยรูปสามเหลี่ยมและเอลิเมนต์ขอบรูปหลายเหลี่ยมในท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยม

โดยผลการคำนวณค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในภาพที่ 2.12 และภาพที่ 2.13 แสดงในตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2 ตามลำดับ

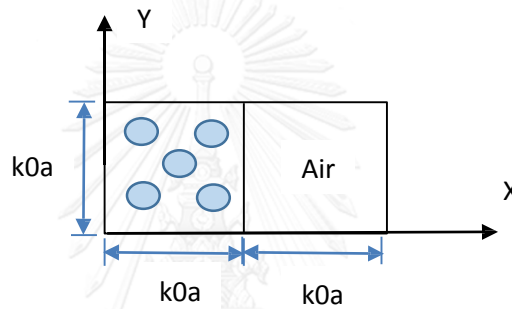
Exact Solution	FEM Solution	Error %
± 1.27576	± 1.28292	0.56 %
± 0.97154	± 0.98939	1.83 %
± 0.72865	± 0.60542	2.4 %

ตารางที่ 2.1 ผลคำนวณค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นชนิดเอลิเมนต์ย่อยรูปสามเหลี่ยมเทียบกับผลการคำนวณด้วยการแก้ปัญหามาแบบแม่นยำตรง (exact solution)

Exact Solution	FEM Solution	Error %
± 1.27576	± 1.27954	0.29 %
± 0.97154	± 0.98662	1.55 %
± 0.72865	± 0.73550	0.94 %

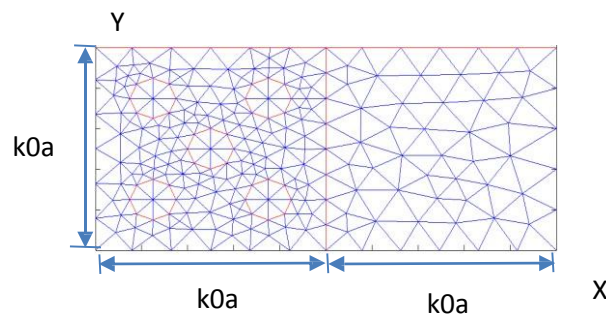
ตารางที่ 2.2 ผลคำนวณค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นชนิดเอลิเมนต์ย่อยรูปสามเหลี่ยมผสมกับรูปหลายเหลี่ยมเทียบกับผลการคำนวณด้วยการแก้ปัญหาลักษณะตรง (exact solution)

2.6.2 ท่อนำคลื่นชนิดไดอิเล็กทริกเป็นรูพรุน

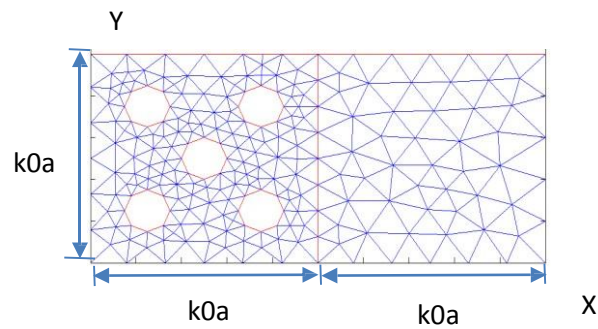


ภาพที่ 2.14 ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมประกอบไปด้วยส่วนไดอิเล็กทริกสมบูรณที่มีรูพรุนและอากาศ

ในงานวิจัยนี้เป็นส่วนที่แสดงถึงข้อดีของการใช้เอลิเมนต์ย่อยขอบรูปหลายเหลี่ยม โดยการทดสอบในโครงสร้างท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมและให้มีการแบ่งเอลิเมนต์ย่อยในส่วนไดอิเล็กทริกเป็นสามเหลี่ยมผสมกับเอลิเมนต์ขอบรูปหลายเหลี่ยม ดังภาพที่ 2.15 และออกแบบท่อนำคลื่นที่โครงสร้างเดียวกันแต่ ใช้ขอบเอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมเป็นรูพรุน (air) ที่มีรัศมี = $0.1k_0a$ ดังภาพที่ 2.16

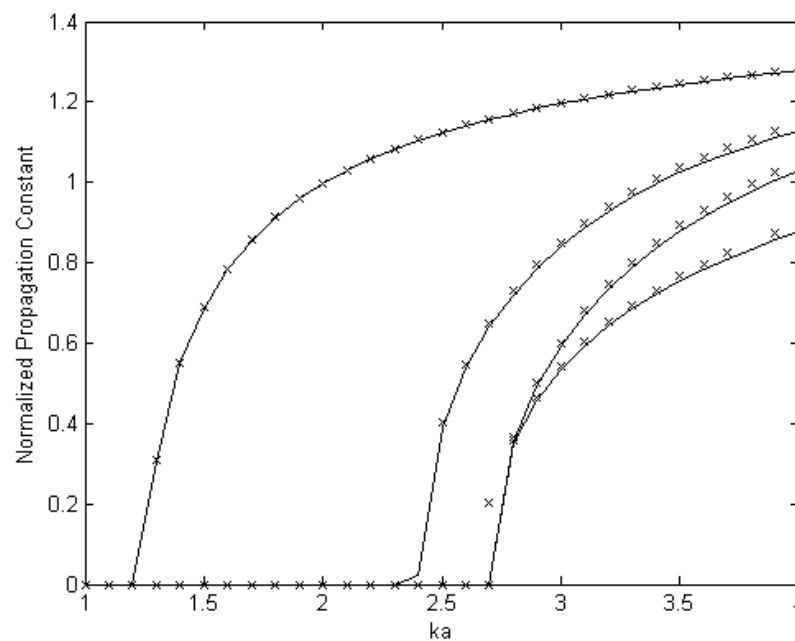


ภาพที่ 2.15 13 การแบ่งเอลิเมนต์ย่อยรูปสามเหลี่ยมไดอิเล็กทริกของท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 2.16 การแบ่งเอลิเมนต์ย่อยรูปสามเหลี่ยมและการสร้างรูพรุนในเอลิเมนต์ขอบรูปหลายเหลี่ยมในส่วนโดเมนเล็กทริกของท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยม

โดยทดลองหาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นจากโครงสร้างทั้งสอง และนำไปพล็อตกราฟดิสเพอร์ชันเปรียบเทียบผลค่าคงที่การแพร่กระจายของทั้งสองโครงสร้าง ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 การเปรียบเทียบค่าดิสเพอร์ชันที่ได้จากการคำนวณระหว่างโครงสร้างท่อนำคลื่นเอลิเมนต์ย่อยหลายเหลี่ยมและเอลิเมนต์ย่อยรูพรุน

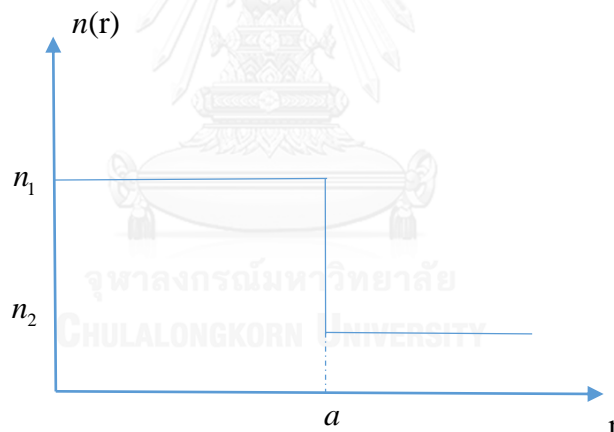
โดยผลการทดลองในภาพที่ 2.17 จะเห็นว่าค่าดิสเพอร์ชันของระหว่างโครงสร้างทั้งสองคือโครงสร้างเอลิเมนต์ย่อยหลายเหลี่ยมและเอลิเมนต์ย่อยที่มีรูพรุน มีค่าที่ไม่ต่างกันนัก แต่โครงสร้างที่มีเอลิเมนต์รูพรุนจะประหยัดเอลิเมนต์ที่ใช้คำนวณมากกว่า ทำให้สามารถลดภาระการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ที่ใช้คำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้

บทที่ 3

การวิเคราะห์หาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น

3.1 กำหนดพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการออกแบบเส้นใยแสงน้อยแบนด์คลื่น

การวิเคราะห์หาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นนั้นมีจุดประสงค์คือ การนำไปหาค่าประวิงเวลา (Time delay) ความแตกต่างของค่าประวิงเวลา (Differential group delay) และค่าดิสเพอร์ชัน ในแต่ละโหมดในเส้นใยแสงที่เราออกแบบ เริ่มต้นด้วยการกำหนดพารามิเตอร์ค่าความยาวคลื่นสำหรับเส้นใยนำแสงแบบน้อยแบนด์คลื่นที่ต้องการออกแบบ ในช่วงความยาวคลื่น $C+L$ คือ 1530 ถึง 1630 นาโนเมตร ค่าดัชนีหักเหแสงและรัศมีของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนด์ที่ต้องการออกแบบ โดยผู้วิจัยได้ออกแบบเส้นใยแสงแบบน้อยแบนด์คลื่นชนิดสเต็ปอินเดกซ์ และกำหนดให้รัศมีของแกนเส้นใยแสงมีขนาด 3 ขนาดคือ 6, 7 และ 8 ไมครอน ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็นสามส่วนตามรูปแบบค่าดัชนีหักเหแสงของเส้นใยแสงดังภาพที่ 3.1 เพื่อหาค่าประวิงเวลา และ ความแตกต่างประวิงเวลา เขียนเป็นตารางกำหนดค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้



ภาพที่ 3.1 รูปโครงสร้างดัชนีหักเหของเส้นใยแสงน้อยแบนด์คลื่น

3.1.1 การทดลองหาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนด์คลื่นแบบที่ 1 ประกอบไปด้วยดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.495$) ในตารางประกอบไปด้วย ความยาวคลื่น (ไมครอน), เลขคลื่น (Free space wave number: k_0)

ความยาวคลื่น (ไมโครเมตร)	$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$	Mode index (HE11) $(\beta_{HE_{11}}/k_0)$	Mode index (HE21) $(\beta_{HE_{21}}/k_0)$	ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น $(\beta_{HE_{11}})$	ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น $(\beta_{HE_{21}})$
1.530	4106657.064	1.49826907	1.49591282	6152877.259	6143200.949
1.535	4093280.33	1.49826106	1.49589723	6132802.527	6123126.708
1.540	4079990.459	1.49825306	1.4958817	6112858.19	6103183.064
1.545	4066786.607	1.49824506	1.49586623	6093042.943	6083368.749
1.550	4053667.94	1.49823705	1.49585083	6073355.496	6063682.553
1.555	4040633.638	1.49822905	1.49583549	6053794.697	6044123.198
1.560	4027682.889	1.49822105	1.49582021	6034359.287	6024689.465
1.565	4014814.893	1.49821305	1.495805	6015048.066	6005380.191
1.570	4002028.858	1.49820504	1.49578985	5995859.805	5986194.145
1.575	3989324.005	1.49819704	1.49577477	5976793.415	5967130.195
1.580	3976699.562	1.49818904	1.49575977	5957847.698	5948187.221
1.585	3964154.768	1.49818104	1.49574483	5939021.513	5929363.999
1.590	3951688.872	1.49817305	1.49572996	5920313.771	5910659.439
1.595	3939301.133	1.49816505	1.49571516	5901723.279	5892072.424
1.600	3926990.817	1.49815705	1.49570044	5883248.978	5873601.893
1.605	3914757.201	1.49814906	1.49568579	5864889.82	5855246.716
1.610	3902599.57	1.49814106	1.49567122	5846644.656	5837005.86
1.615	3890517.218	1.49813307	1.49565672	5828512.504	5818878.221
1.620	3878509.449	1.49812508	1.4956423	5810492.278	5800862.793
1.625	3866575.574	1.49811709	1.49562796	5792582.947	5782958.537

1.630	3854714.912	1.49810911	1.4956137	5774783.527	5765164.433
-------	-------------	------------	-----------	-------------	-------------

ตารางที่ 3.1 ตารางกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อหาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น

โดยค่า พารามิเตอร์ในตาราง mode index (HE11) , mode index (HE21) คือโหมดแสงที่ 1,2 ในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น ตามลำดับ คำนวณจากโปรแกรม OPTIMODE โดยที่ $n_2 < \text{Mode index (HE11)} < n_1$ และ β_1, β_2 คือค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น คำนวณได้จาก

$$\beta_n = \kappa_0 * \text{mode index (HE}n\text{)} \quad (3.1)$$

$$\text{โดยที่ } \kappa_0 = \frac{2\pi}{\lambda}, N = 1, 2$$

3.1.2 การทดลองหาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 2 ประกอบไปด้วยดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของเคลดดิ้ง ($n_2=1.496$) ในตารางประกอบไปด้วย ความยาวคลื่น (ไมครอน), เลขคลื่น (Free space wave number: k_0)

ความยาวคลื่น (ไมโครเมตร)	$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$	Mode index (HE11) ($\beta_{HE_{11}}/k_0$)	Mode index (HE21) ($\beta_{HE_{21}}/k_0$)	ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น ($\beta_{HE_{11}}$)	ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น ($\beta_{HE_{21}}$)
1.530	4106657.064	1.49861732	1.49664026	6154307.403	6146188.295
1.535	4093280.33	1.49861055	1.49662535	6134233.087	6126107.107
1.540	4079990.459	1.49860378	1.49661046	6114289.125	6106156.398
1.545	4066786.607	1.498597	1.49659558	6094474.208	6086334.86
1.550	4053667.94	1.49859022	1.49658073	6074787.13	6066641.325
1.555	4040633.638	1.49858344	1.4965659	6055226.657	6047074.517
1.560	4027682.889	1.49857666	1.49655108	6035791.572	6027633.178

1.565	4014814.893	1.49856987	1.49653629	6016480.632	6008316.185
1.570	4002028.858	1.49856308	1.49652152	5997292.692	5989122.31
1.575	3989324.005	1.49855628	1.49650677	5978226.54	5970050.381
1.580	3976699.562	1.49854949	1.49649203	5959281.1	5951099.199
1.585	3964154.768	1.49854269	1.49647733	5940455.15	5932267.743
1.590	3951688.872	1.49853588	1.49646264	5921747.562	5913554.763
1.595	3939301.133	1.49852908	1.49644798	5903157.303	5894959.223
1.600	3926990.817	1.49852227	1.49643334	5884683.193	5876479.984
1.605	3914757.201	1.49851546	1.49641872	5866324.187	5858115.959
1.610	3902599.57	1.49850864	1.49640413	5848079.174	5839866.114
1.615	3890517.218	1.49850182	1.49638957	5829947.132	5821729.387
1.620	3878509.449	1.49849501	1.49637503	5811927.055	5803704.693
1.625	3866575.574	1.49848818	1.49636052	5794017.794	5785791.036
1.630	3854714.912	1.49848136	1.49634603	5776218.444	5767987.356

ตารางที่ 3.2 ตารางกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อหาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงในเส้นใยแสงแบบ
น้อยแบนคลื่น

โดยค่า พารามิเตอร์ในตาราง mode index (HE11) , mode index (HE21) คือโหมดแสงที่ 1,2 ในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น ตามลำดับ คำนวณจากโปรแกรม OPTIMODE ส่วนค่า $\beta_{HE_{11}}$, $\beta_{HE_{21}}$ คือค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น คำนวณได้จากสมการ (23)

3.1.3 การทดลองหาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 3 ประกอบไปด้วยดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.497$) ในตารางประกอบไปด้วย ความยาวคลื่น (ไมครอน), เลขคลื่น (Free space wave number: k_0)

ความยาวคลื่น (ไมโครเมตร)	$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$	Mode index (HE11) $(\beta_{HE_{11}}/k_0)$	Mode index (HE21) $(\beta_{HE_{21}}/k_0)$	ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น $(\beta_{HE_{11}})$	ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น $(\beta_{HE_{21}})$
1.530	4106657.064			0	0
1.535	4093280.33			0	0
1.540	4079990.459			0	0
1.545	4066786.607			0	0
1.550	4053667.94			0	0
1.555	4040633.638			0	0
1.560	4027682.889			0	0
1.565	4014814.893			0	0
1.570	4002028.858			0	0
1.575	3989324.005			0	0
1.580	3976699.562			0	0
1.585	3964154.768			0	0
1.590	3951688.872			0	0
1.595	3939301.133			0	0
1.600	3926990.817			0	0
1.605	3914757.201			0	0
1.610	3902599.57	1.49878009	1.49700607	5849138.534	5842215.245
1.615	3890517.218	1.49877427	1.49699277	5831007.103	5824076.147
1.620	3878509.449	1.49876844	1.49697947	5812987.556	5806049.019
1.625	3866575.574	1.49876261	1.49696617	5795078.899	5788132.828

1.630	3854714.912	1.49875678	1.49695288	5777280.11	5770326.59
-------	-------------	------------	------------	------------	------------

ตารางที่ 3.3 ตารางกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อหาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงในเส้นใยแสงแบบ
น้อยแบนคลื่น

โดยค่า พารามิเตอร์ในตาราง mode index (HE11) , mode index (HE21) คือโหมดแสงที่ 1,2 ในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น ตามลำดับ คำนวณจากโปรแกรม OPTIMODE ส่วนค่า $\beta_{HE_{11}}$, $\beta_{HE_{21}}$ คือค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น คำนวณได้จากสมการ (23)

3.2 การหาค่าประวิงเวลาและดิสเพอร์ชัน

จากข้อมูลในตารางหัวข้อ 3.1.1-3.1.3 เราจะได้ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงซึ่งคำนวณจากโปรแกรม OPTIMODE การหาค่าประวิงเวลา หาได้จาก สมการ (19), (20) ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.4 โดยคำนวณทุกค่าความยาวคลื่นช่วง 1530-1630 ไมครอน จนครบเขียนเป็นตารางได้ดังนี้

3.2.1 การทดลองเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 1 ประกอบไปด้วยดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.495$) ในตารางประกอบไปด้วย ความยาวคลื่น (ไมครอน), เลขคลื่น (Free space wave number: k_0)

ความยาว คลื่น (ไมโครเมตร)	ค่าคงที่การ แพร่กระจาย คลื่น ($\beta_{HE_{11}}$)	ค่าคงที่การ แพร่กระจาย คลื่น ($\beta_{HE_{21}}$)	ค่าประวิง เวลาโหมด HE11	ค่าประวิง เวลาโหมด HE21
1.530	6152877.259	6143200.949	5.0024E-09	5.0023E-09
1.535	6132802.527	6123126.708	5.0024E-09	5.0025E-09
1.540	6112858.19	6103183.064	5.0023E-09	5.0019E-09
1.545	6093042.943	6083368.749	5.0024E-09	5.0012E-09
1.550	6073355.496	6063682.553	5.0024E-09	5.0005E-09
1.555	6053794.697	6044123.198	5.0023E-09	5.0019E-09

1.560	6034359.287	6024689.465	5.00239E-09	5.0092E-09
1.565	6015048.066	6005380.191	5.0024E-09	5.0015E-09
1.570	5995859.805	5986194.145	5.0024E-09	5.0079E-09
1.575	5976793.415	5967130.195	5.0023E-09	5.0011E-09
1.580	5957847.698	5948187.221	5.0023E-09	5.0063E-09
1.585	5939021.513	5929363.999	5.0023E-09	5.0017E-09
1.590	5920313.771	5910659.439	5.0023E-09	5.0049E-09
1.595	5901723.279	5892072.424	5.0023E-09	5.0011E-09
1.600	5883248.978	5873601.893	5.0023E-09	5.0033E-09
1.605	5864889.82	5855246.716	5.0023E-09	5.0025E-09
1.610	5846644.656	5837005.86	5.0023E-09	5.0017E-09
1.615	5828512.504	5818878.221	5.0023E-09	5.0009E-09
1.620	5810492.278	5800862.793	5.0023E-09	5.001E-09
1.625	5792582.947	5782958.537	5.0023E-09	5.00092E-9
1.630	5774783.527	5765164.433	5.0023E-09	5.00083E-9

ตารางที่ 3.4 ตารางกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อหาประวิงเวลาในเส้นใยแสงแบบน้อยแผนคลื่น

3.2.2 การทดลองเส้นใยแสงแบบน้อยแผนคลื่นแบบที่ 2 ประกอบไปด้วยดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.496$) ในตารางประกอบไปด้วย ความยาวคลื่น (ไมครอน), เลขคลื่น (Free space wave number: k_0)

ความยาวคลื่น (ไมโครเมตร)	ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น ($\beta_{HE_{11}}$)	ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น ($\beta_{HE_{21}}$)	ค่าประวิงเวลาโหมด HE11	ค่าประวิงเวลาโหมด HE21
1.530	6153353.755	6144865.295	5.00186E-9	4.9994E-9
1.535	6133281.195	6124803.029	5.00186E-09	4.9993E-9
1.540	6113338.976	6104871.527	5.00185E-09	4.9912E-9
1.545	6093525.874	6085069.439	5.00185E-09	4.9901E-9
1.550	6073840.599	6065395.552	5.00185E-09	4.9989E-9
1.555	6054281.917	6045848.67	5.00184E-09	4.9977E-9
1.560	6034848.651	6026427.571	5.00184E-09	4.9985E-9
1.565	6015539.559	6007131.011	5.00184E-09	4.9953E-9
1.570	5996353.456	5987957.839	5.00183E-09	4.9984E-9
1.575	5977289.208	5968906.921	5.00183E-09	4.9987E-9
1.580	5958345.621	5949977.054	5.00182E-09	4.9984E-9
1.585	5939521.591	5931167.135	5.00182E-9	4.9979E-9
1.590	5920815.951	5912476.07	5.00181E-09	4.9978E-9
1.595	5902227.628	5893902.703	5.00181E-09	4.9977E-9
1.600	5883755.481	5875445.968	5.0018E-09	4.9956E-9
1.605	5865398.465	5857104.778	5.0018E-09	4.9974E-9
1.610	5847155.467	5838878.093	5.0018E-09	4.9974E-9
1.615	5829025.43	5820764.85	5.00179E-09	4.9978E-9
1.620	5811007.344	5802763.999	5.00179E-09	4.9961E-9
1.625	5793100.14	5784874.542	5.00178E-09	4.9974E-9

1.630	5775302.834	5767095.452	5.00177E-09	4.9956E-9
-------	-------------	-------------	-------------	-----------

ตารางที่ 3.5 ตารางกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อหาประวิงเวลาในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น

3.2.3 การทดลองเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 3 ประกอบไปด้วย ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.497$) ในตารางประกอบไปด้วย ความยาวคลื่น (ไมครอน), เลขคลื่น (Free space wave number: k_0)

ความยาว คลื่น (ไมโครเมตร)	ค่าคงที่การ แพร่กระจาย คลื่น ($\beta_{HE_{11}}$)	ค่าคงที่การ แพร่กระจาย คลื่น ($\beta_{HE_{21}}$)	ค่าประวิงเวลา โหมด HE11	ค่าประวิง เวลาโหมด HE21
1.530	6155082.082	6148760.99	5.00141E-09	4.99975E-9
1.535	6135011.343	6128697.00	5.0014E-09	4.99968E-9
1.540	6115070.973	6108763.63	5.0014E-09	4.9996E-09
1.545	6095259.667	6088959.56	5.0014E-09	4.99953E-9
1.550	6075576.177	6069283.58	5.0014E-09	4.99944E-9
1.555	6056019.268	6049734.46	5.00139E-09	4.99936E-9
1.560	6036587.764	6030310.98	5.00138E-09	4.99928E-9
1.565	6017280.423	6011011.93	5.00138E-09	4.9992E-09
1.570	5998096.059	5991836.12	5.00138E-09	4.99911E-9
1.575	5979033.5	5972782.42	5.00138E-09	4.99902E-9
1.580	5960091.631	5953849.64	5.00137E-09	4.99893E-9
1.585	5941269.268	5935036.66	5.00137E-09	4.99883E-9
1.590	5922565.285	5916342.36	5.00137E-09	4.99874E-9
1.595	5903978.608	5897765.62	5.00136E-09	4.99864E-9
1.600	5885508.097	5879305.37	5.00136E-09	4.99854E-9

1.605	5867152.668	5860960.5	5.00136E-09	4.99843E-9
1.610	5848911.247	5842729.99	5.00136E-09	4.99832E-9
1.615	5830782.815	5824612.72	5.00135E-09	4.99822E-9
1.620	5812766.287	5806607.68	5.00135E-09	4.99811E-9
1.625	5794860.669	5788713.85	5.00134E-09	4.99799E-9
1.630	5777064.901	5770930.23	5.00134E-09	4.99786E-9

ตารางที่ 3.6 ตารางกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อหาประวิงเวลาในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น

3.3 การวิเคราะห์ค่าประวิงเวลาและค่าความแตกต่างประวิงเวลาเชิงความยาวคลื่น

จากข้อมูลในตารางหัวข้อ 3.2.1-3.2.3 เราจะได้ค่าประวิงเวลาและค่าความแตกต่างประวิงเวลาซึ่งคำนวณจากโปรแกรม OPTIMODE จากทุกค่าความยาวคลื่นช่วง 1530-1630 ไมครอน จนครบเราสามารถวิเคราะห์ค่าประวิงเวลาและค่าความแตกต่างประวิงเวลาเชิงความยาวคลื่นได้จากสูตรบทที่ 2 สมการ (22) โดยทำการคำนวณและเขียนข้อมูลลงตารางได้ดังนี้

3.3.1 การทดลองเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 1 ประกอบไปด้วยดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.495$) ในตารางประกอบไปด้วย ความยาวคลื่น (ไมครอน), เลขคลื่น (Free space wave number: k_0)

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	(ค่าประวิงเวลาโหมด HE11)	(ค่าประวิงเวลาโหมด HE21)	ค่าความต่างประวิงเวลา (DGD)	ค่าความต่างดิสเพอร์ชัน (DMD)
1.530	1.5007185	1.50069257	0.0867509	86.7500001
1.535	1.5007186	1.50067418	0.1480682	148.0666668
1.540	1.5007170	1.50065573	0.2044354	204.4333333
1.545	1.5007186	1.50063568	0.2764028	276.3999999

1.550	1.5007186	1.50061556	0.3434869	343.4833333
1.555	1.5007170	1.50059693	0.4004041	400.4000000
1.560	1.5007170	1.50057668	0.4678881	467.8833333
1.565	1.5007186	1.50055637	0.5408055	540.8000001
1.570	1.5007186	1.50053599	0.6087395	608.7333332
1.575	1.5007170	1.50051241	0.6821068	682.1000000
1.580	1.5007170	1.50049032	0.7557409	755.7333334
1.585	1.5007154	1.50046975	0.8190414	819.0333334
1.590	1.5007154	1.50044752	0.8931088	893.0999999
1.595	1.5007170	1.50042364	0.9780429	978.0333332
1.600	1.5007154	1.50039967	1.0526102	1052.6000001
1.605	1.5007154	1.50037564	1.1327109	1132.7000000
1.610	1.5007154	1.50035152	1.2131117	1213.1000000
1.615	1.5007138	1.50032734	1.2883456	1288.3333332
1.620	1.5007138	1.50030146	1.3746130	1374.5999999
1.625	1.5007122	1.5002755	1.4557471	1455.7333334
1.630	1.5007122	1.50024946	1.5425311	1542.5166667

ตารางที่ 3.7 ตารางกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อหาประวิงเวลาและความแตกต่างประวิงเวลาในเส้นใย
แสงแบบน้อยแผนคลื่น

3.3.2 การทดลองเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 2 ขนาดรัศมีแกน 7 ไมครอน ประกอบไปด้วย ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.496$) ในตารางประกอบไปด้วย ความยาวคลื่น (ไมครอน), เลขคลื่น (Free space wave number: k_0)

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	(ค่าประวิง เวลาโหมด HE11)	(ค่าประวิง เวลาโหมด HE21)	ค่าความต่าง ประวิงเวลา (DGD)	ค่าความต่างดิส เพอร์ชัน (DMD)
1.530	5.00186E-09	4.99934E-09	1.7228517	2514.0333333
1.535	5.00186E-09	4.99923E-09	1.7024180	2626.4000000
1.540	5.00185E-09	4.99912E-09	1.6819177	2734.0500001
1.545	5.00185E-09	4.99901E-09	1.6562173	2836.8666666
1.550	5.00185E-09	4.99889E-09	1.6304169	2955.4999999
1.555	5.00184E-09	4.99877E-09	1.6148833	3074.5333333
1.560	5.00184E-09	4.99865E-09	1.5889496	3188.7500001
1.565	5.00184E-09	4.99853E-09	1.5576825	3308.5333334
1.570	5.00183E-09	4.9984E-09	1.5315655	3433.9333332
1.575	5.00183E-09	4.99827E-09	1.5158152	3559.7333335
1.580	5.00182E-09	4.99814E-09	1.4895649	3685.9333335
1.585	5.00182E-09	4.99799E-09	1.4526144	3823.0666664
1.590	5.00181E-09	4.99785E-09	1.4314474	3960.6666665
1.595	5.00181E-09	4.99771E-09	1.4049138	4098.6666668
1.600	5.0018E-09	4.99756E-09	1.3782801	4242.4500000
1.605	5.0018E-09	4.9974E-09	1.3462463	4392.0000000
1.610	5.0018E-09	4.99724E-09	1.3087292	4552.7500000
1.615	5.00179E-09	4.99708E-09	1.2872123	4708.6333333

1.620	5.00179E-09	4.99691E-09	1.2548952	4870.3666667
1.625	5.00178E-09	4.99674E-09	1.2224115	5038.0333334
1.630	5.00177E-09	4.99656E-09	1.1953112	5211.6166666

ตารางที่ 3.7 ตารางกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อหาประวิงเวลาและความแตกต่างประวิงเวลาในเส้นใย
แสงแบบน้อยแบนคลื่น

3.3.2 การทดลองเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 3 ขนาดรัศมีแกน 8 ไมครอน ประกอบไปด้วย
ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.497$) ในตารางประกอบไป
ด้วย ความยาวคลื่น (ไมครอน), เลขคลื่น (Free space wave number: k_0)

ความยาว คลื่น (นาโนเมตร)	(ค่าประวิง เวลาโหมด HE11)	(ค่าประวิง เวลาโหมด HE21)	ค่าความต่าง ประวิงเวลา (DGD)	ค่าความต่างดิส เพอร์ชัน (DMD)
1.530				
1.535				
1.540				
1.545				
1.550				
1.555				
1.560				
1.565				
1.570				
1.575				
1.580				
1.585				
1.590				

1.595				
1.600				
1.605				
1.610				
1.615				
1.620				
1.625				
1.630				

ตารางที่ 3.7 ตารางกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อหาประวิงเวลาและความแตกต่างประวิงเวลาในเส้นใย
แสงแบบน้อยแบนคลื่น

เนื่องจากในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรเกิดโหมตมากกว่า 2 โหมต ค่าประวิง
เวลาและค่าดิสเพอร์ชันจึงไม่นำมาพิจารณา

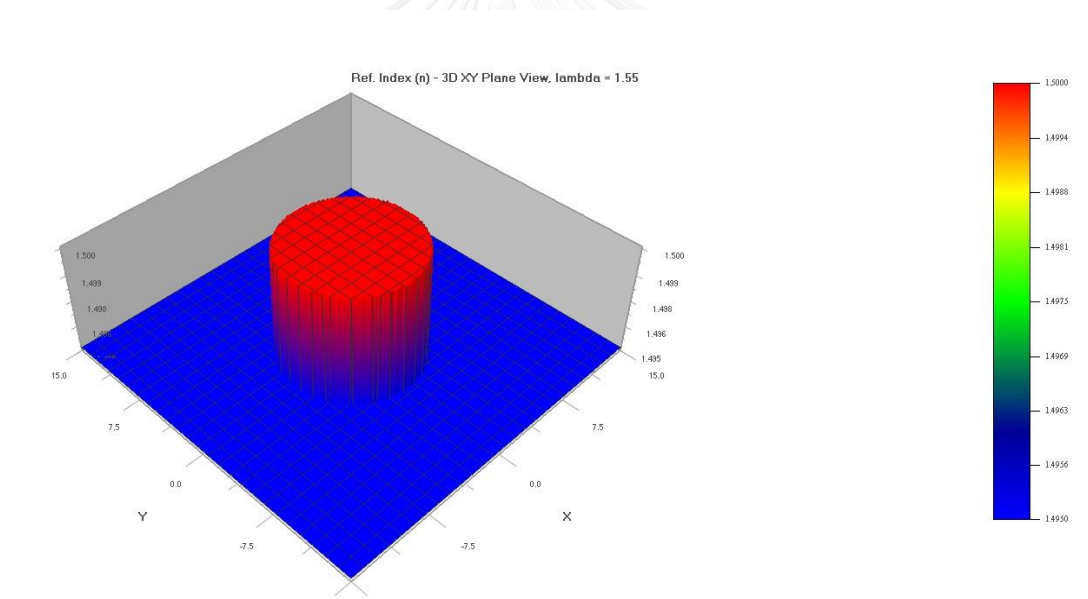
บทที่ 4

การทดสอบและผลการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดสอบและวิเคราะห์ค่าคงที่การแพร่กระจายของคลื่นแสง จากบทที่ 3 เราได้ออกแบบการทดลองเพื่อ หาวิเคราะห์ค่าคงที่การแพร่กระจายของคลื่นแสงได้แบ่งออกตามค่าดัชนีหักเหของแคลดดิ้ง (n_2) ที่มีค่าต่างกัน 3 ค่า คือ 1.495, 1.496, และ 1.497

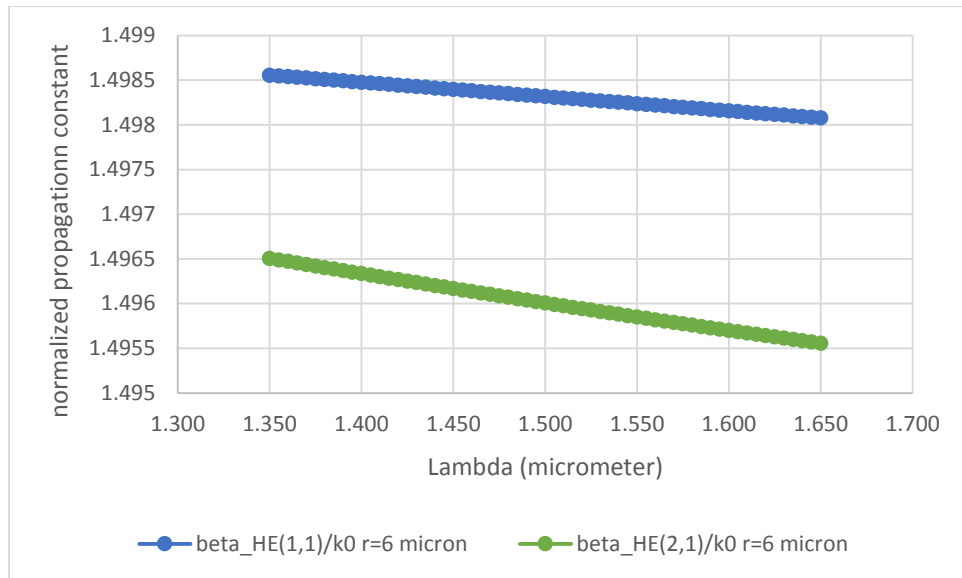
4.1 การทดสอบหาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น, ค่าความแตกต่างประวิงเวลาและดิสเพอร์ชันระหว่างโหมด ในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 1

4.1.1 ขนาดรัศมีของแกน 6 ไมครอน ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.495$)



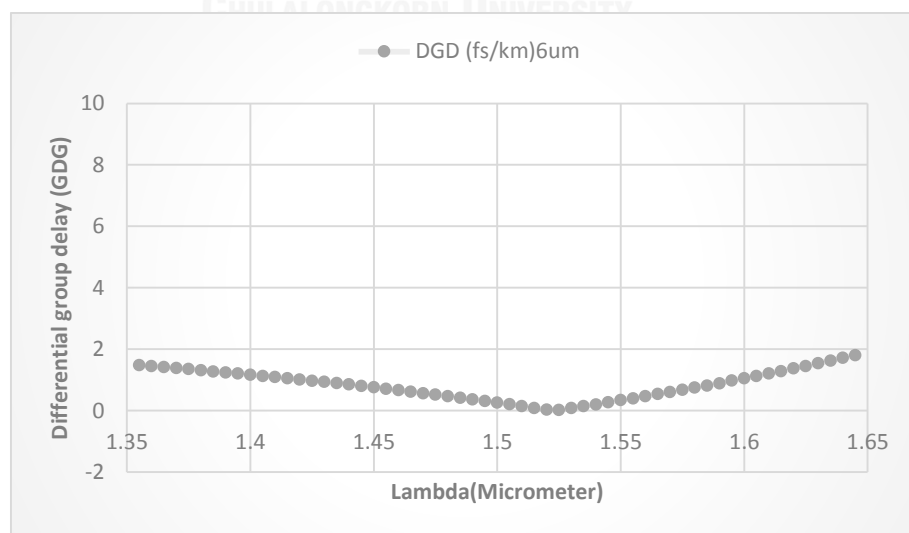
ภาพที่ 4.1 ขนาดแกนของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น รัศมี 6 ไมครอน

ใส่ค่าพารามิเตอร์ ที่กำหนดไว้คือ n_1 , n_2 , ความยาวคลื่นทุกค่าในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตร โดยเริ่มจาก 1530 นาโนเมตร เพิ่มขึ้นทีละ 5 นาโนเมตร จนถึง 1630 นาโนเมตร แล้วรันโปรแกรมเพื่อหาค่า Mode index(HE11) และ Mode index(HE21) จากนั้นคำนวณหาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นของทั้งสองโหมด ค่า Mode index ที่หาได้จากโปรแกรม อยู่ในรูป $(\frac{\beta_n}{k_0}$, $n=1,2$) ดังนั้นค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นหาได้โดยนำค่า k_0 คูณกลับเข้าไป จากนั้นพล็อตกราฟแสดงค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในช่วงความยาวคลื่นที่พิจารณา 1530-1630 นาโนเมตร

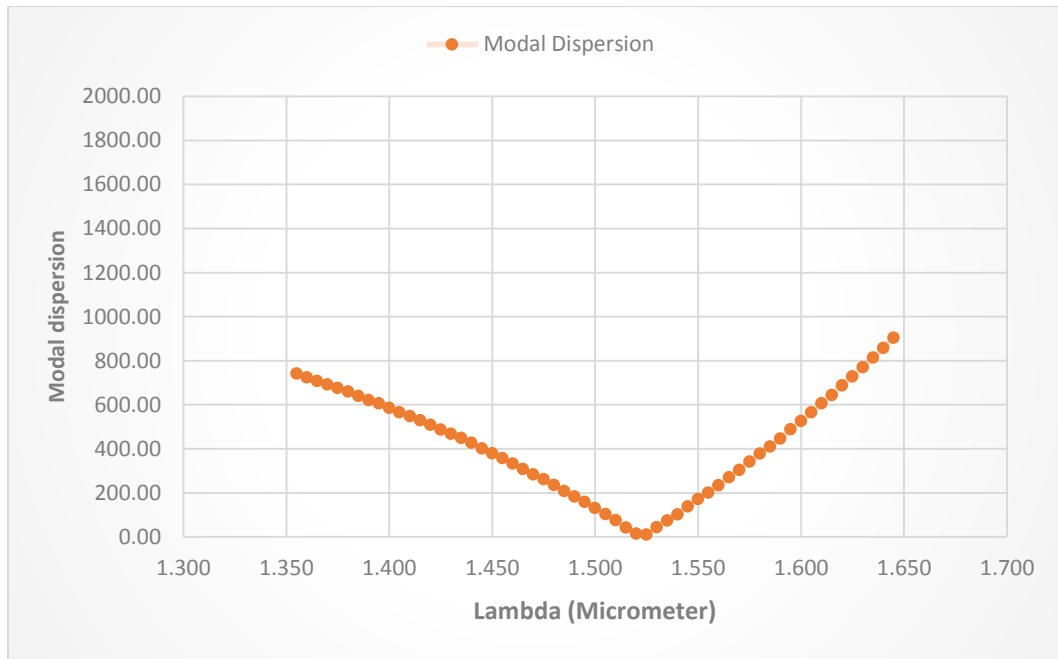


ภาพที่ 4.2 ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมี 6 ไมครอน ในช่วงความยาวคลื่น 1350-1650 นาโนเมตร

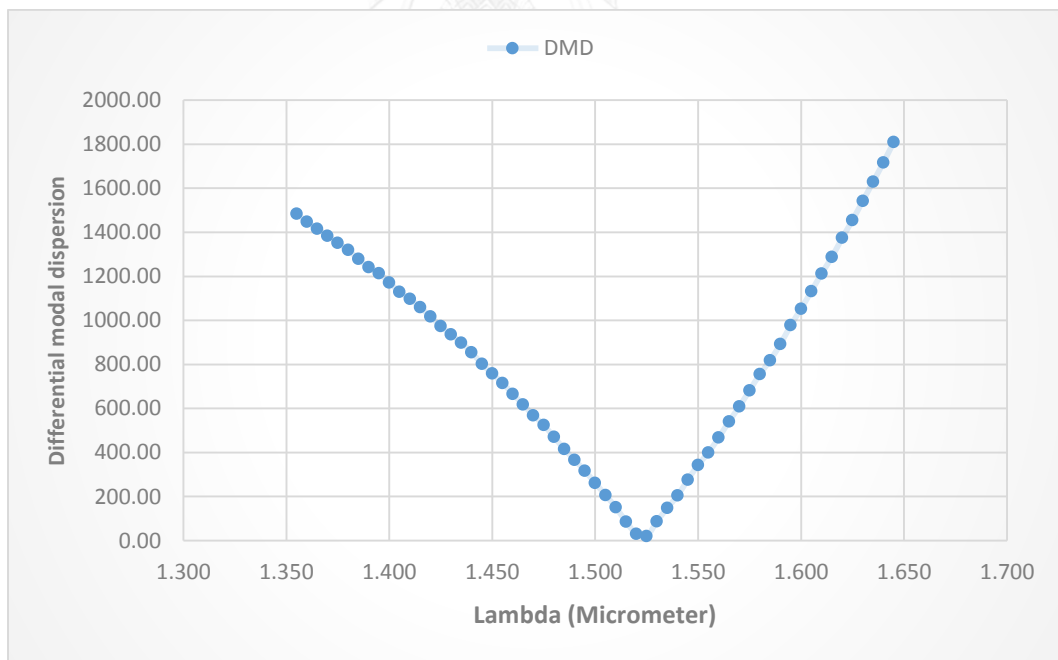
จากนั้นนำค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากโปรแกรมไปหาค่าประวิงเวลา โดยการประวิงเวลา(Group delay:GD) หาได้จาก $GD = \tau_g = \frac{-\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\beta}{d\lambda}$ และค่าความแตกต่างประวิงเวลา (Differential group delay:DGD) หาได้จาก $DGD = GD_{HE11} - GD_{HE21}$ พล็อตกราฟแสดงค่าความต่างประวิงเวลา และค่าดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตร



ภาพที่ 4.3 ค่าความต่างประวิงเวลาในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมี 6 ไมครอน



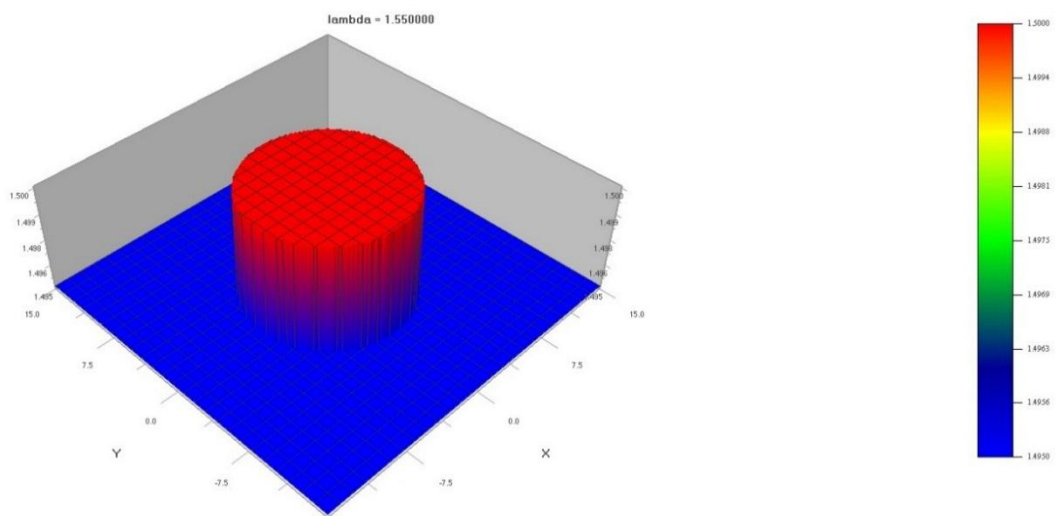
ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดใน ช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของ เส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมีแกน 6 ไมครอน



ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงค่าความต่างดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดใน ช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมีแกน 6 ไมครอน

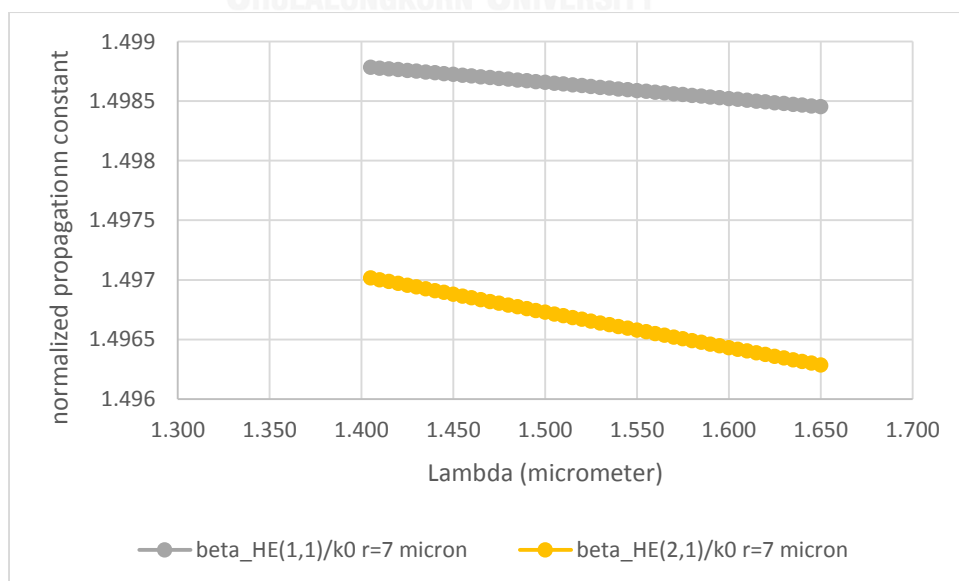
จากกราฟ 4.2 จะเห็นว่าโหมดเกิดขึ้นในเส้นใยแสงสองโหมดคือ HE11 และ HE21 ในช่วงความยาวคลื่น 1350 นาโนเมตรและจากภาพ 4.3 และ 4.4 จะเห็นได้ว่า ค่าความต่างประวิงเวลาและค่าดิสเพอร์ชันมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่ความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร ดังนั้นเส้นใยแสงแบบนี้จะเหมาะที่จะใช้เป็นเส้นใยแสงที่ใช้งานได้ในความยาวคลื่นที่ 1525 นาโนเมตร

4.1.2 ขนาดรัศมีของแกน 7 ไมครอน ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.495$)

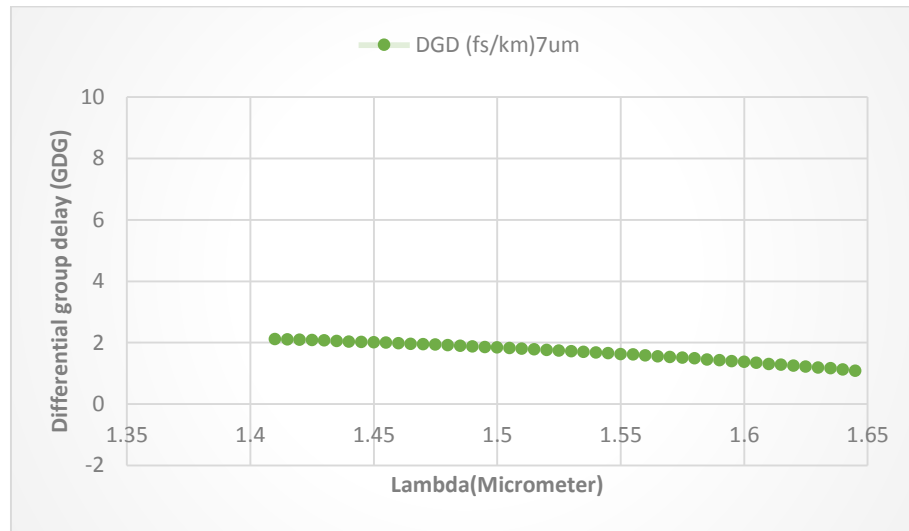


ภาพที่ 4.6 ขนาดแกนของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น รัศมี 7 ไมครอน

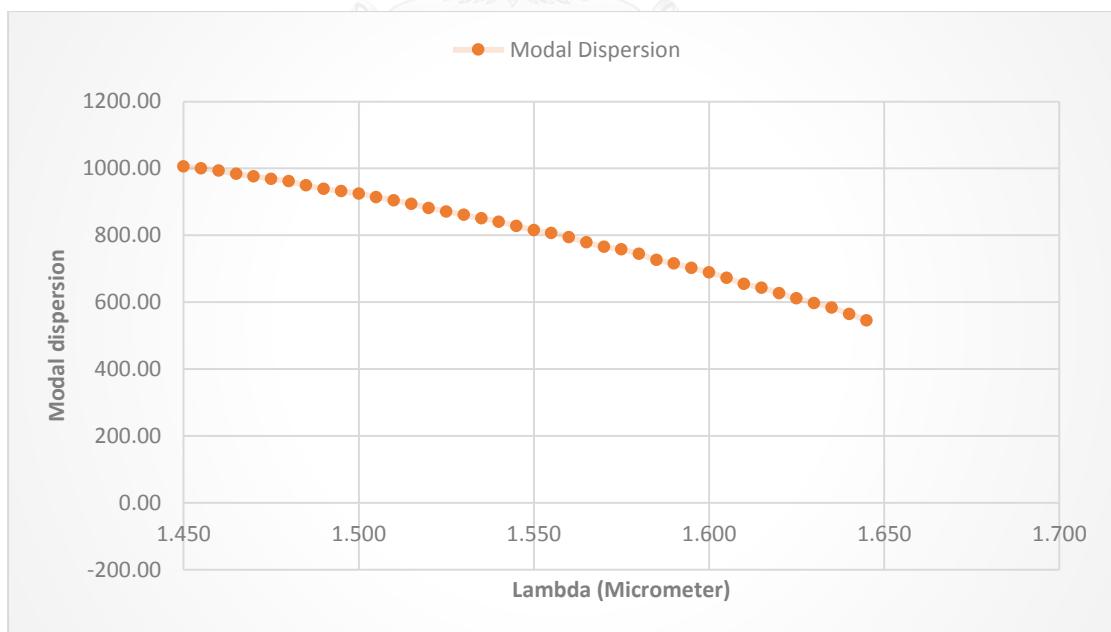
ทดลองโดยขั้นตอนเดิมในหัวข้อ 4.1.1 ผลการทดลองแสดงดังภาพกราฟที่ 4.6, 4.7 และ 4.8



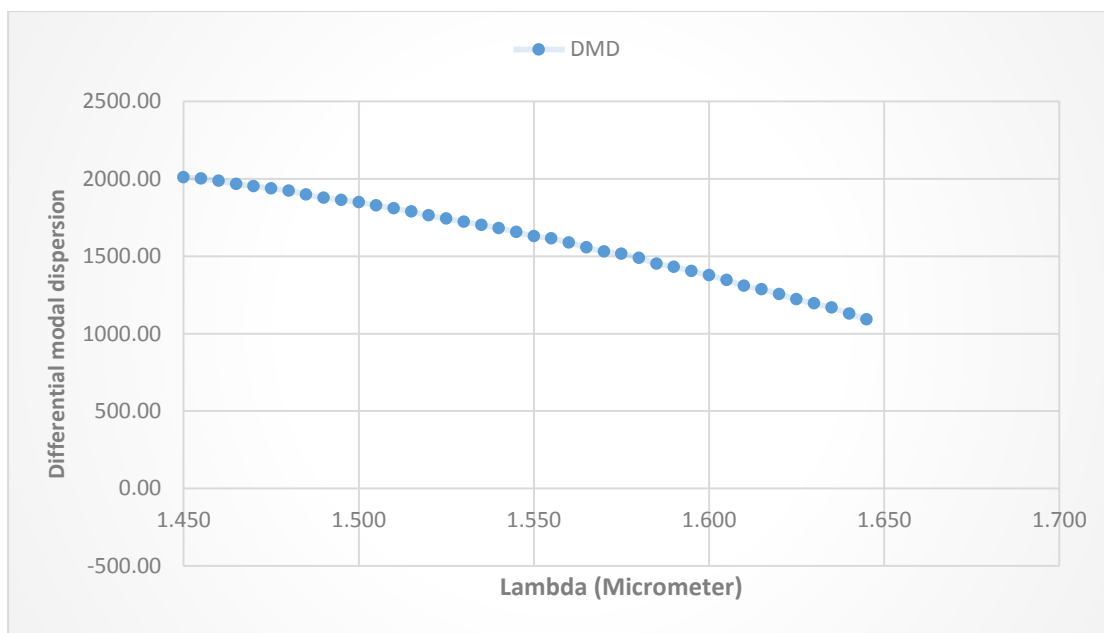
ภาพที่ 4.7 ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น
ขนาดรัศมี 7 ไมครอน



ภาพที่ 4.8 ค่าความต่างประวิงเวลาในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบ
น้อยแบนคลื่นขนาดรัศมี 7 ไมครอน



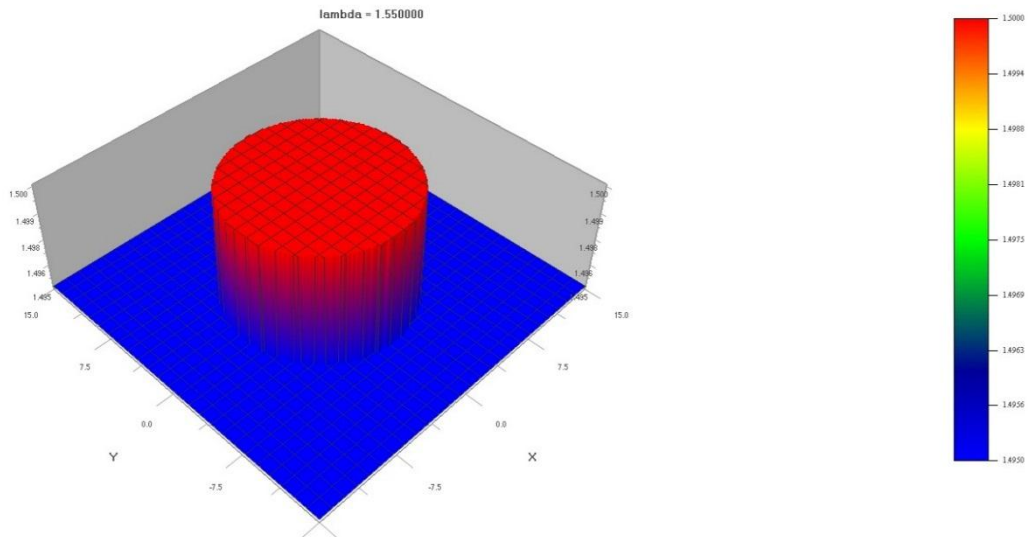
ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของ
เส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมีแกน 7 ไมครอน



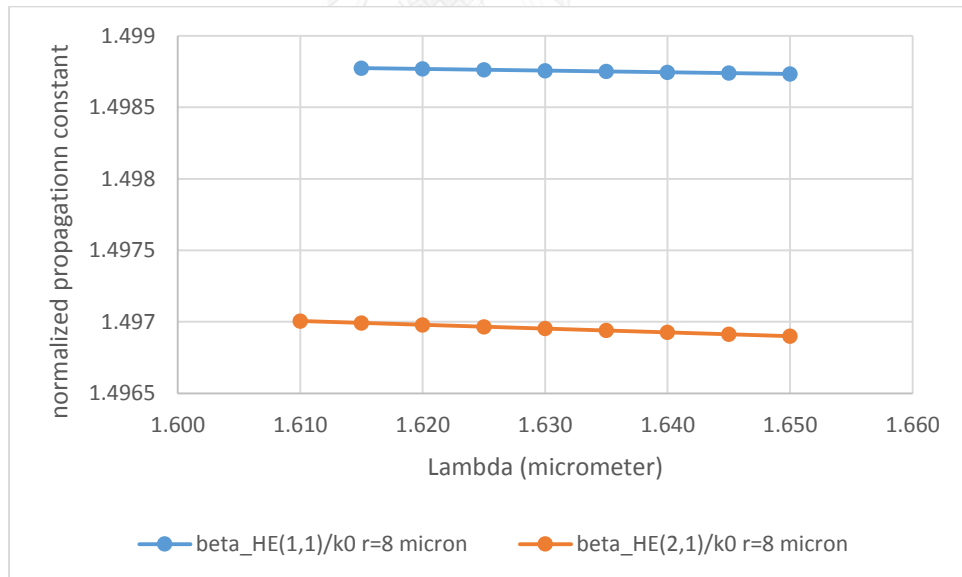
ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความต่างดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมีแกน 7 ไมครอน

จากกราฟ 4.6 จะเห็นว่าโหมดเกิดขึ้นในเส้นใยแสงสองโหมดคือ HE11 และ HE21 ในช่วงความยาวคลื่น 1450 นาโนเมตรและจากภาพ 4.7 และ 4.8 จะเห็นได้ว่า ค่าความต่างประวิงเวลาและค่าดิสเพอร์ชันมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่ความยาวคลื่น 1650 นาโนเมตร แต่ค่าดิสเพอร์ชันที่แสงในภาพที่ 4.8 ยังคงมีค่าเยอะ นั่นหมายความว่าที่ความยาวคลื่น 1650 นาโนเมตร ยังคงมีดิสเพอร์ชันที่สูง ไม่เหมาะกับการใช้งาน ดังนั้นเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นนี้จึงไม่เหมาะที่ใช้งานได้ในความยาวคลื่นที่ 1530-1630 นาโนเมตร

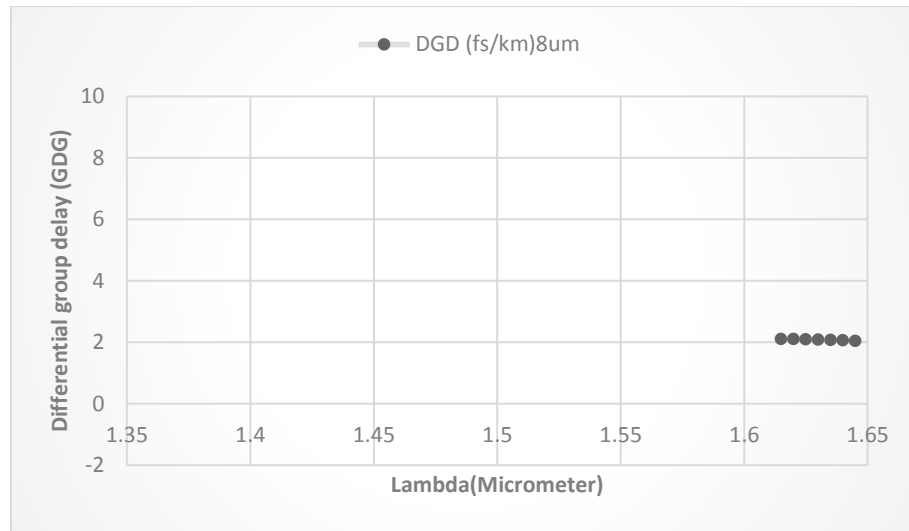
4.1.3 ขนาดรัศมีของแกน 8 ไมครอน ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.495$)



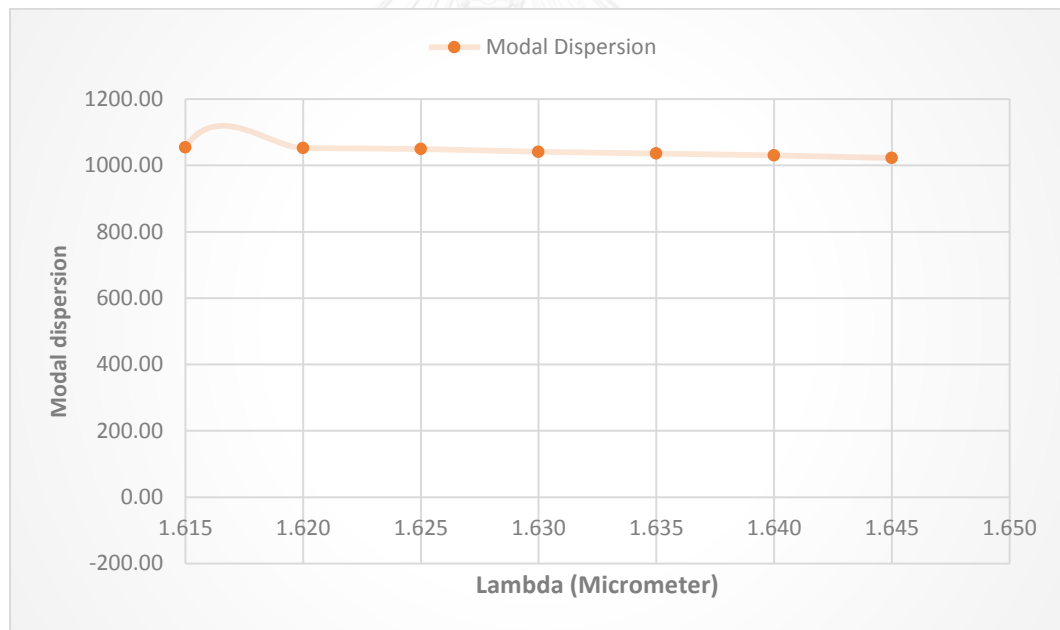
ภาพที่ 4.11 ขนาดแกนของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น รัศมี 8 ไมครอน



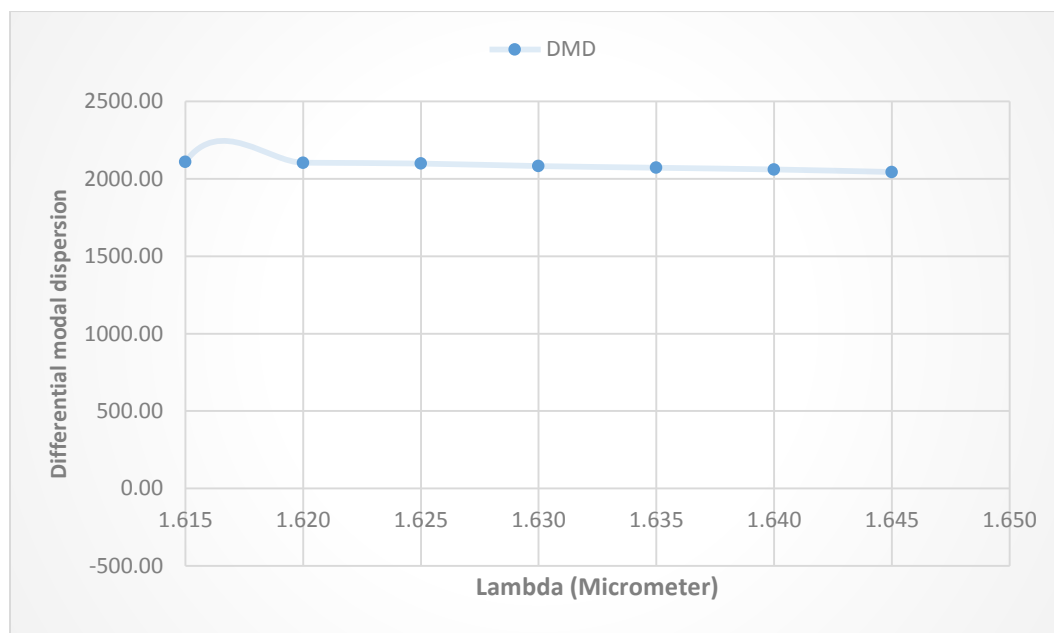
ภาพที่ 4.12 ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมี 8 ไมครอน ในช่วงความยาวคลื่น 1610-1650 นาโนเมตร



ภาพที่ 4.13 ค่าความต่างประวิงเวลาในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแกนคลื่นขนาดรัศมี 8 ไมครอน



ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแกนคลื่นขนาดรัศมีแกน 8 ไมครอน

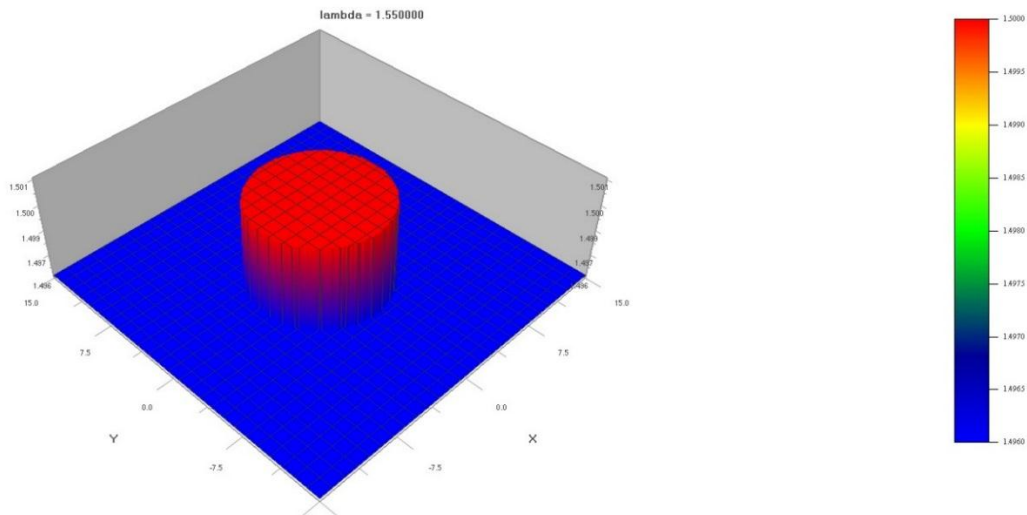


ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงความต่างดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมีแกน 8 ไมครอน

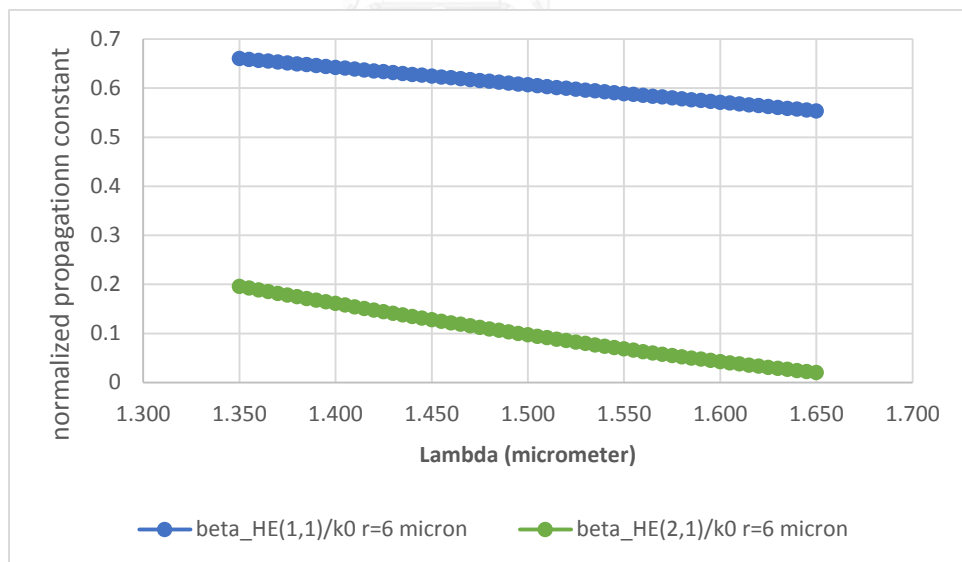
จากกราฟ 4.10 จะเห็นว่าโหมดเกิดขึ้นในเส้นใยแสงสองโหมดคือ HE₁₁ และ HE₂₁ ในช่วงความยาวคลื่น 1610 นาโนเมตร และจากภาพ 4.11 และ 4.12 จะเห็นได้ว่า ค่าความต่างประวิงเวลา และค่าดิสเพอร์ชันมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่ความยาวคลื่น 1650 นาโนเมตร แต่ค่าดิสเพอร์ชันที่แสงในภาพที่ 4.8 ยังคงมีค่าเยอะ นั่นหมายความว่าที่ความยาวคลื่น 1650 นาโนเมตร ยังคงมีดิสเพอร์ชันที่สูง ดังนั้นเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นนี้จึงไม่เหมาะเป็นเส้นใยแสงที่ใช้งานในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตร

4.2 การทดสอบค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น, ค่าความแตกต่างประวิงเวลาและดิสเพอร์ชันระหว่างโหมด ในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 2

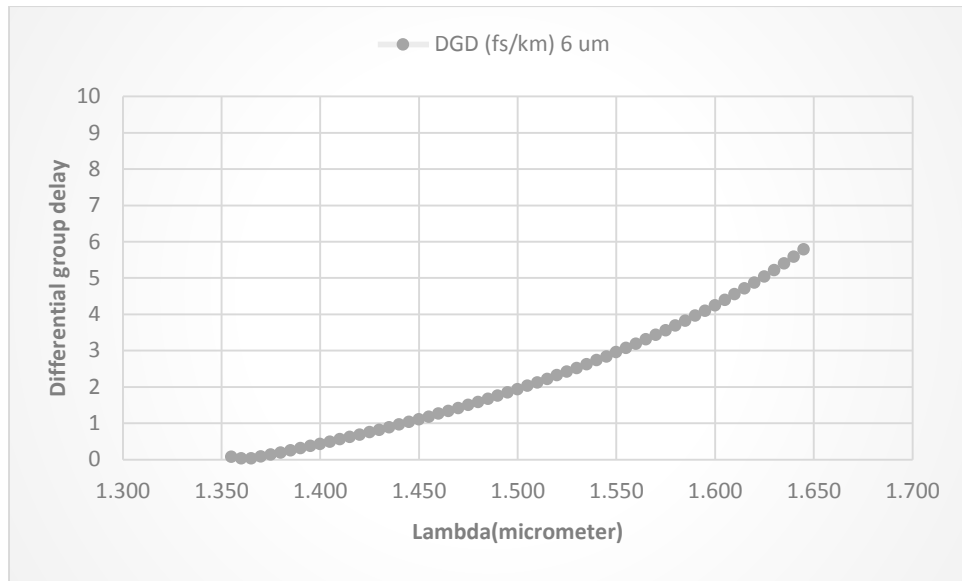
4.2.1 ขนาดรัศมีของแกน 6 ไมครอน ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.496$)



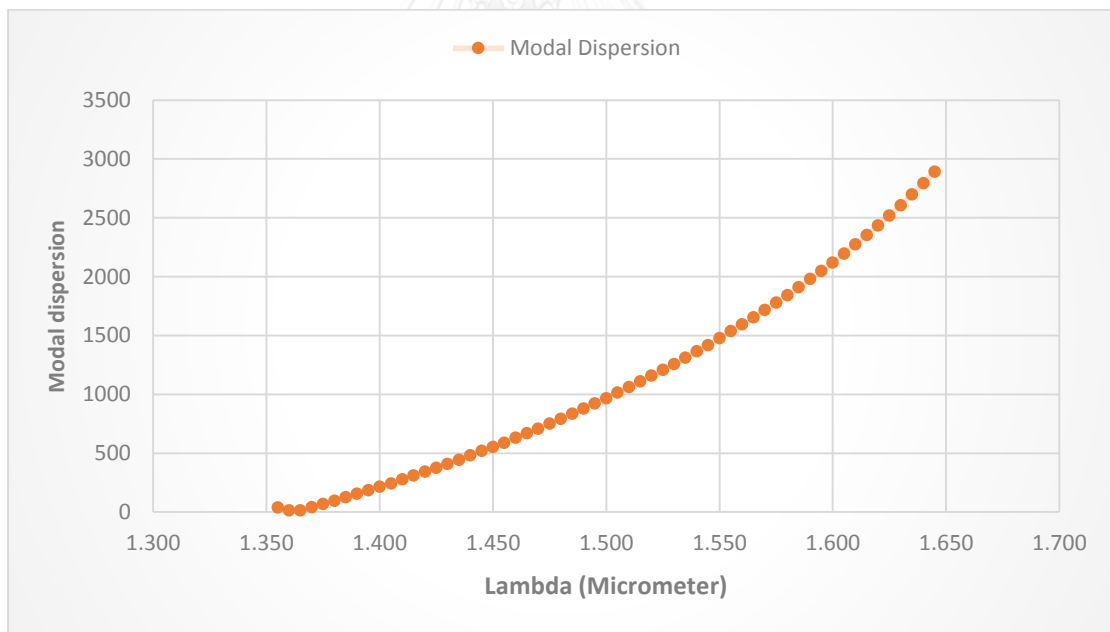
ภาพที่ 4.16 ขนาดแกนของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น รัศมี 6 ไมครอน



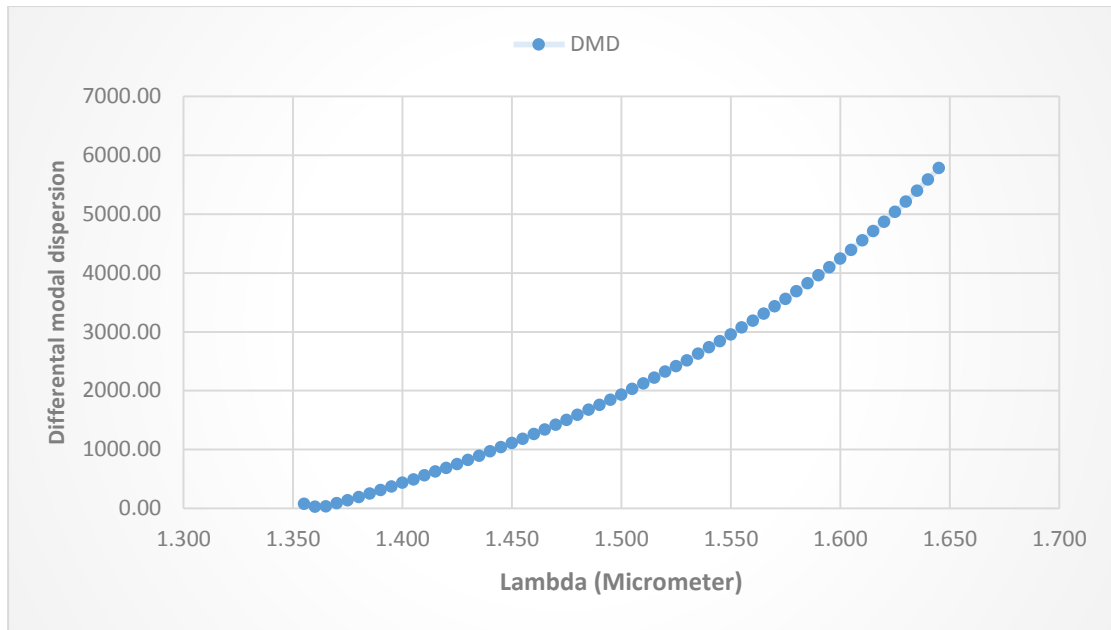
ภาพที่ 4.17 ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงในในช่วงความยาวคลื่นของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมี 6 ไมครอน



ภาพที่ 4.18 ค่าความต่างประวิงเวลาในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแกนคลื่นขนาดรัศมี 6 ไมครอน



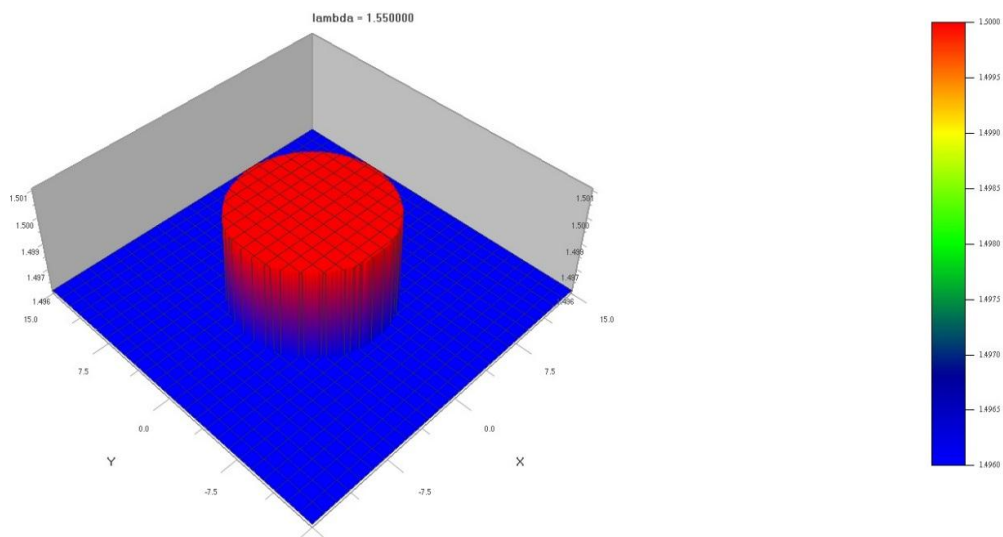
ภาพที่ 4.19 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแกนคลื่นขนาดรัศมีแกน 6 ไมครอน



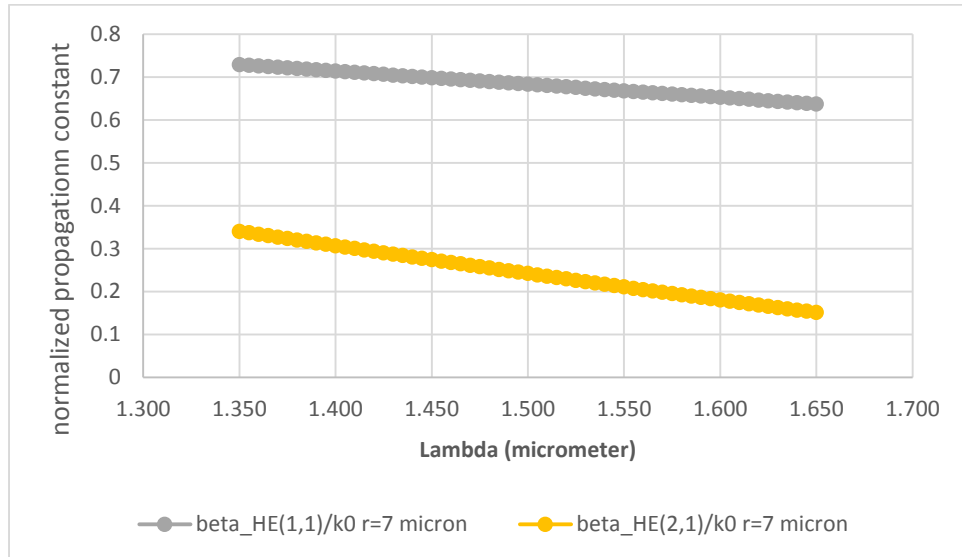
ภาพที่ 4.20 กราฟแสดงความต่างดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแกนคลื่นขนาดรัศมีแกน 6 ไมครอน

จากกราฟ 4.14 จะเห็นว่าโหมดเกิดขึ้นในเส้นใยแสงสองโหมดคือ HE₁₁ และ HE₂₁ ในช่วงความถี่นอร์มอลไลส์ $v=2.5$ และจากภาพ 4.15 และ 4.16 จะเห็นได้ว่า ค่าความต่างประวิงเวลาและค่าดิสเพอร์ชันมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่ความยาวคลื่น 1360 นาโนเมตร ดังนั้นเส้นใยแสงแบบน้อยแกนคลื่นนี้จึงเหมาะสมเป็นเส้นใยแสงที่ใช้งานที่ความยาวคลื่น 1360 นาโนเมตร

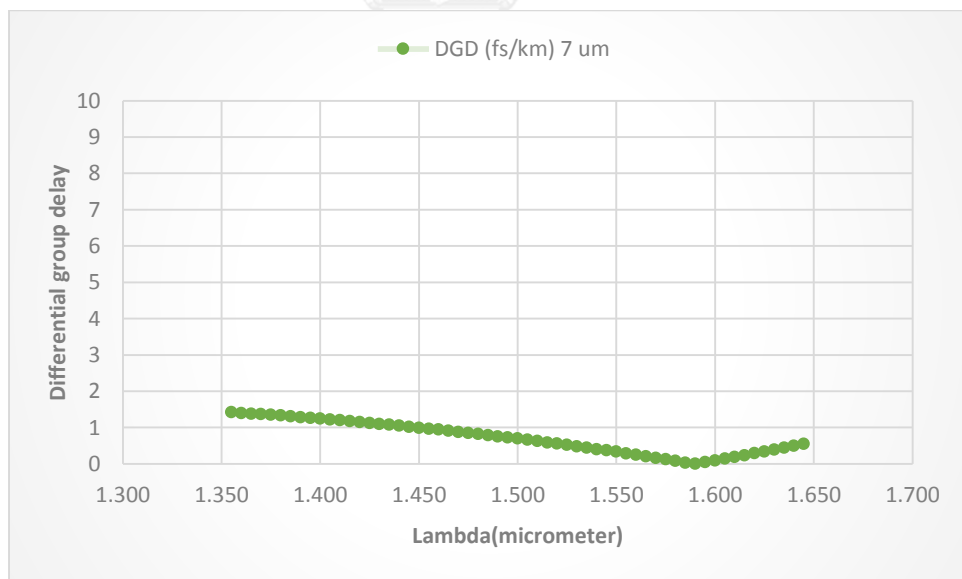
4.2.2 ขนาดรัศมีของแกน 7 ไมครอน ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.496$)



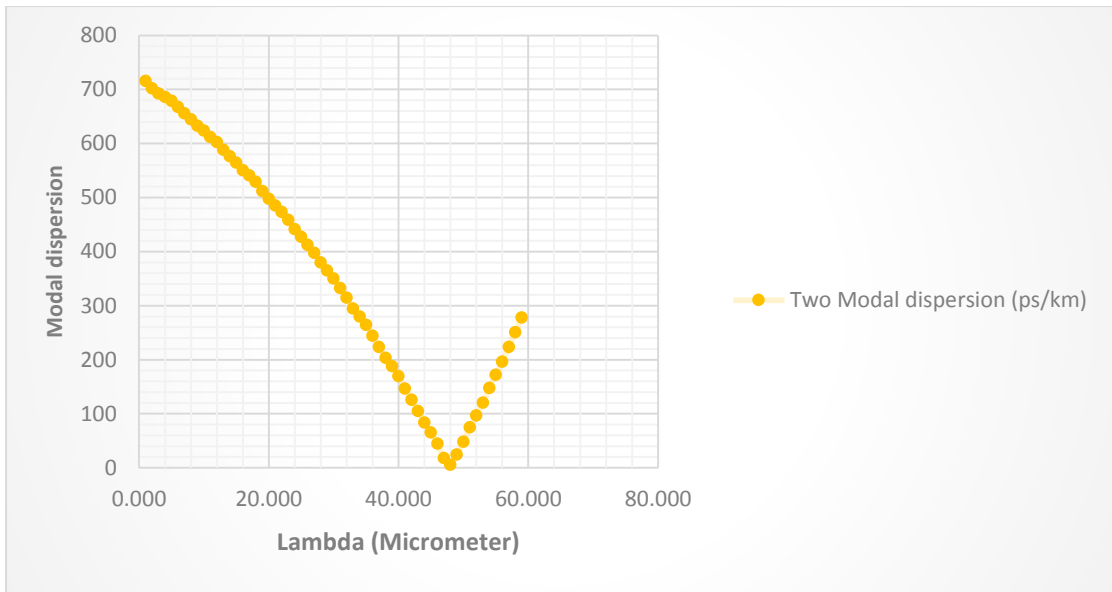
ภาพที่ 4.21 ขนาดแกนของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น รัศมี 7 ไมครอน



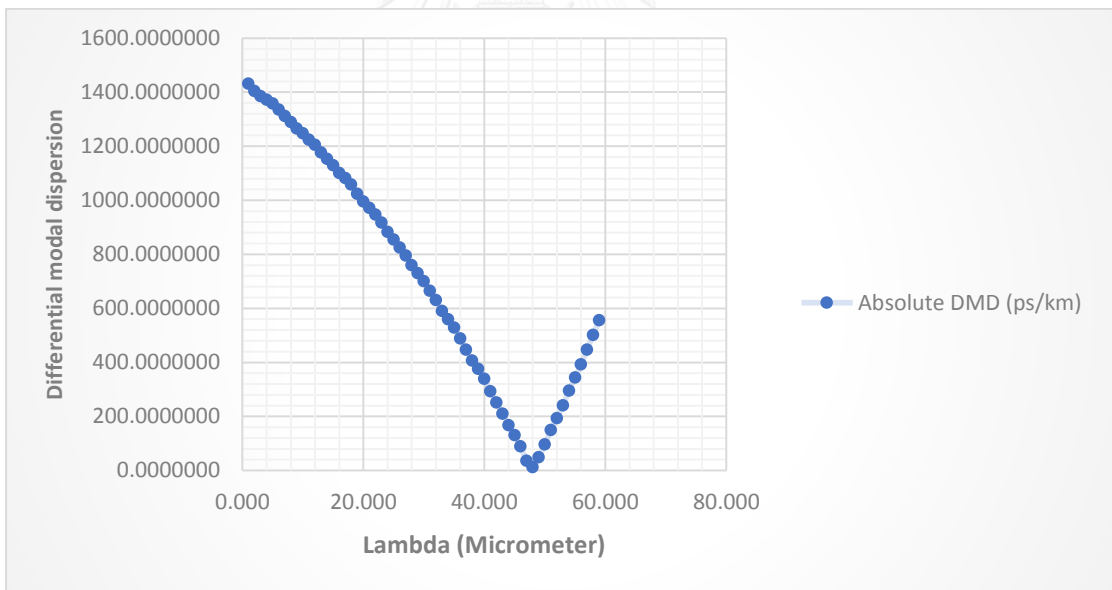
ภาพที่ 4.22 ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น ขนาดรัศมี 7 ไมครอน



ภาพที่ 4.23 ค่าความต่างประวิงเวลาในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสง แบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมี 7 ไมครอน



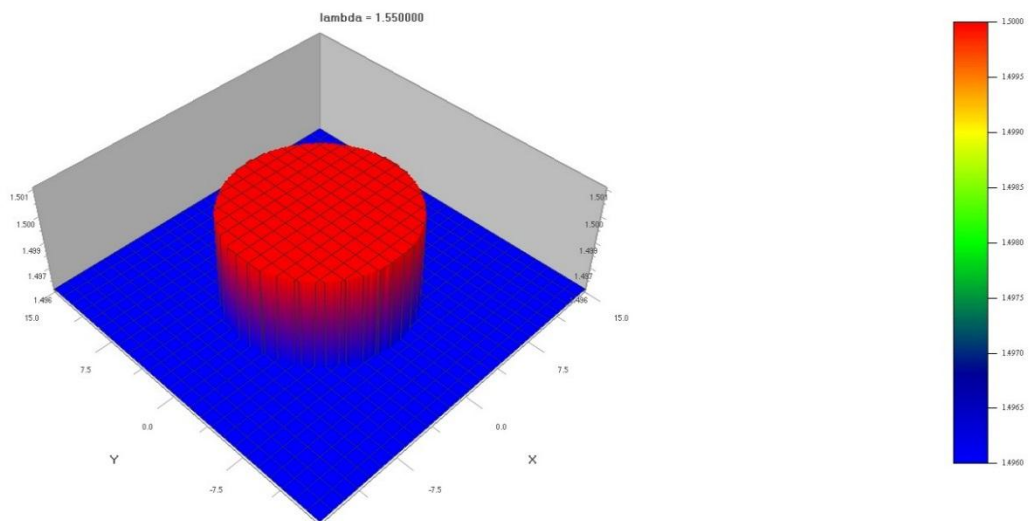
ภาพที่ 4.24 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตร ของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมีแกน 7 ไมครอน



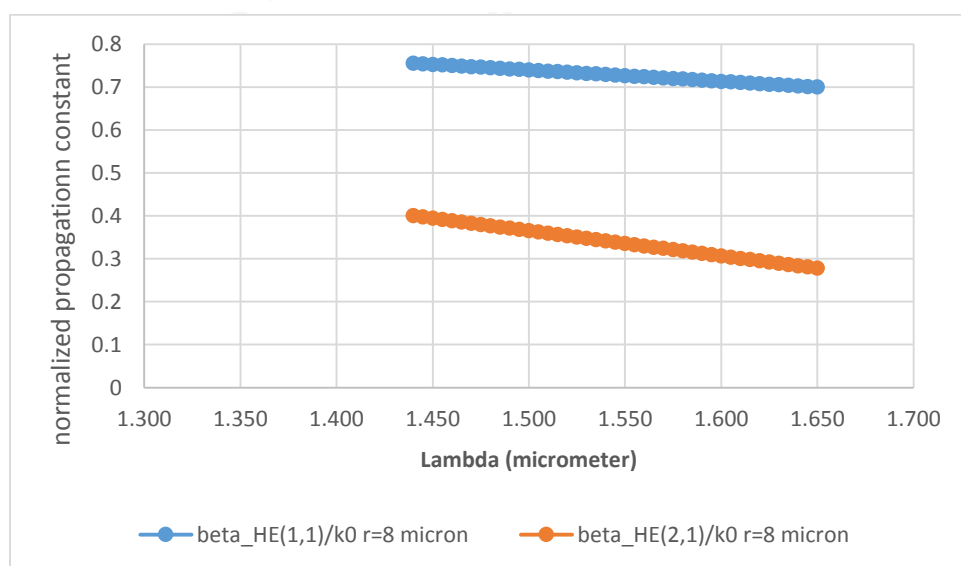
ภาพที่ 4.25 กราฟแสดงความต่างดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมีแกน 7 ไมครอน

จากกราฟ 4.18 จะเห็นว่าโหมดเกิดขึ้นในเส้นใยแสงสองโหมดคือ HE11 และ HE21 ในช่วงความถี่ นอร์มอลไลส์ $v=2.5$ และจากภาพ 4.19 และ 4.20 จะเห็นได้ว่า ค่าความต่างประวิงเวลาและค่าดิสเพอร์ชันมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่ความยาวคลื่น 1590 นาโนเมตร ดังนั้นเส้นใยแสงแบบนี้จึงเหมาะเป็นเส้นใยแสงที่ใช้งานที่ความยาวคลื่น 1590 นาโนเมตร

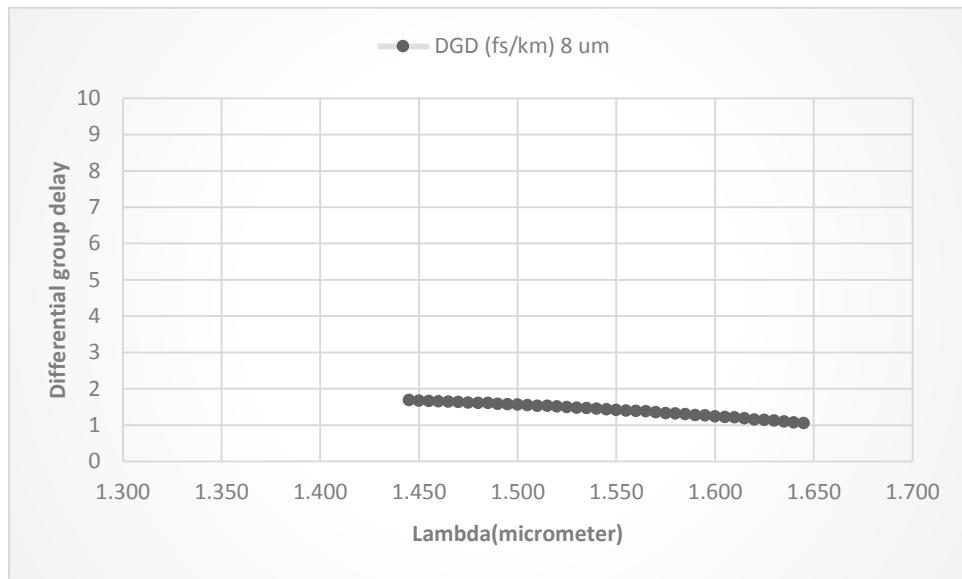
4.2.3 ขนาดรัศมีของแกน 8 ไมครอน ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.496$)



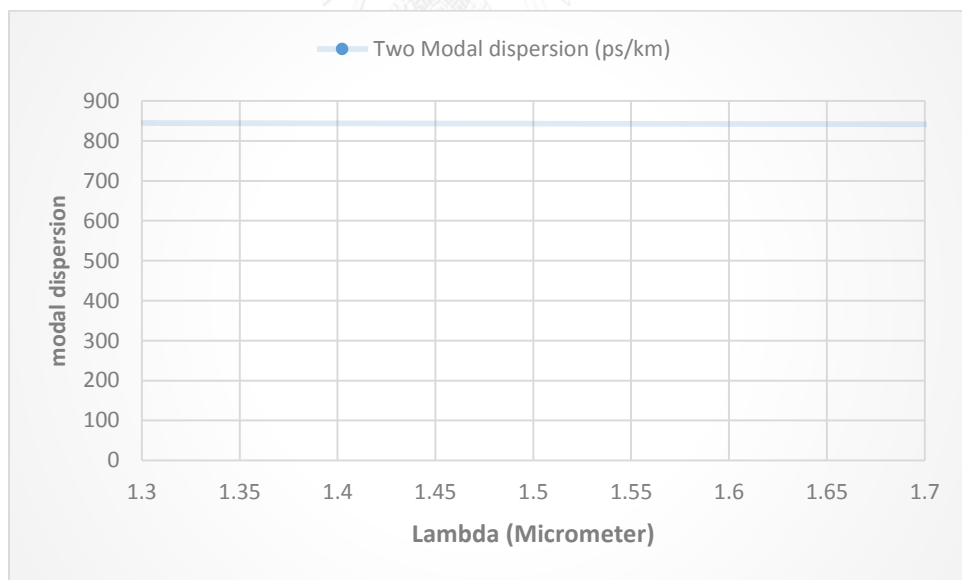
ภาพที่ 4.26 ขนาดแกนของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น รัศมี 8 ไมครอน



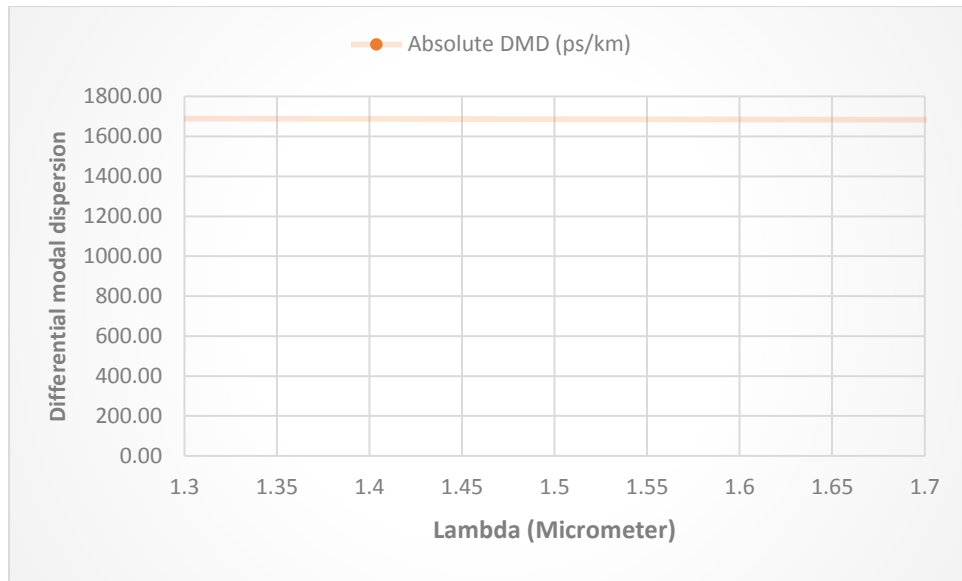
ภาพที่ 4.27 ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น ขนาดรัศมี 8 ไมครอน



ภาพที่ 4.28 ค่าความต่างประวิงเวลาในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแกนคลื่นขนาดรัศมี 8 ไมครอน



ภาพที่ 4.29 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแกนคลื่นขนาดรัศมีแกน 8 ไมครอน

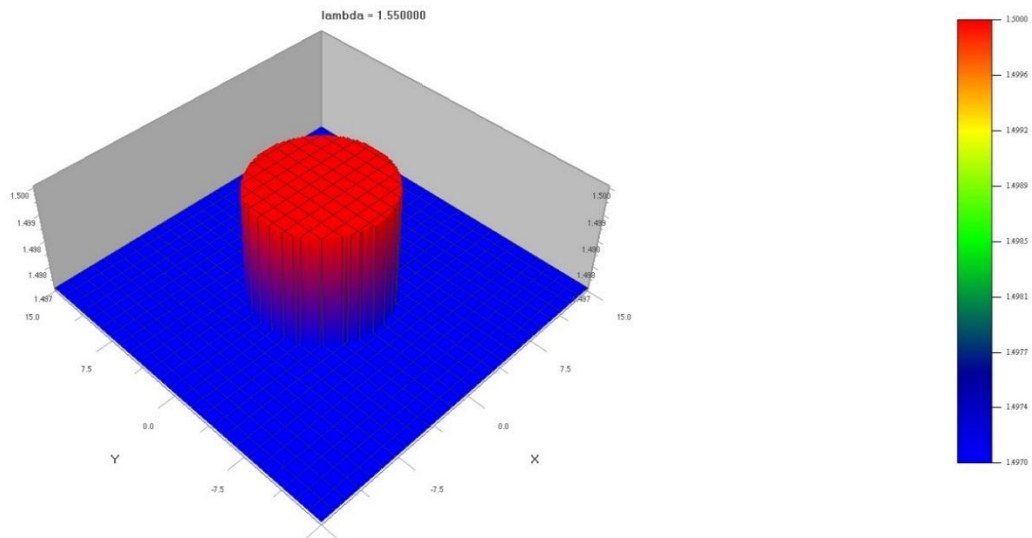


ภาพที่ 4.30 กราฟแสดงความต่างดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดใน ช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมีแกน 8 ไมครอน

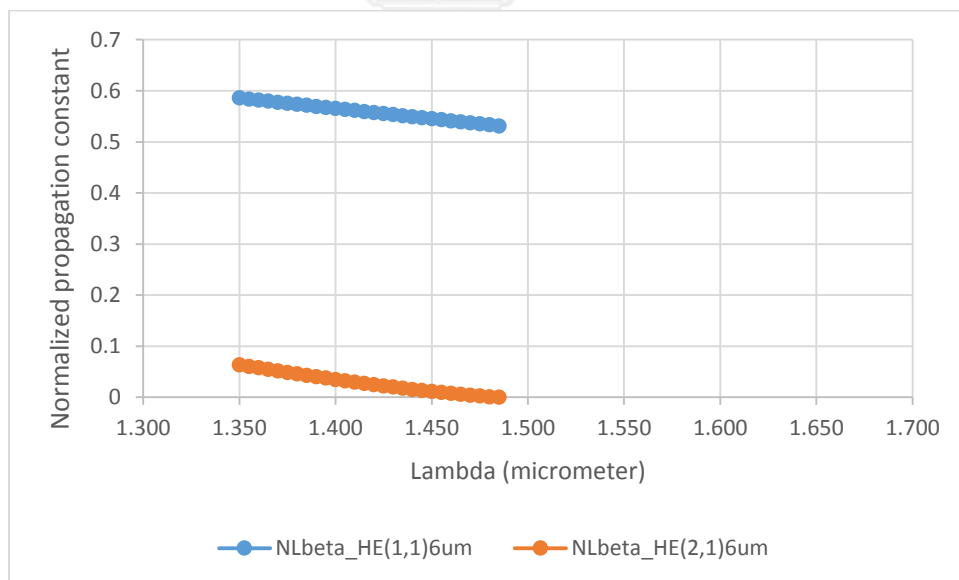
จากกราฟ 4.22 จะเห็นว่าโหมดเกิดขึ้นในเส้นใยแสงสองโหมดคือ HE₁₁ และ HE₂₁ ในช่วงความถี่ นอร์มอลไลส์ $v=2.5$ และจากภาพ 4.23 และ 4.24 จะเห็นได้ว่า ค่าความต่างประวิงเวลาและค่าดิสเพอร์ชันมีค่าสูงในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตร ดังนั้นเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นนี้จึงไม่เหมาะเป็นเส้นใยแสงที่ใช้งานที่ความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตร

4.3 การทดสอบหาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น, ค่าความแตกต่างประวิงเวลาและดิสเพอร์ชันระหว่างโหมด ในเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 3

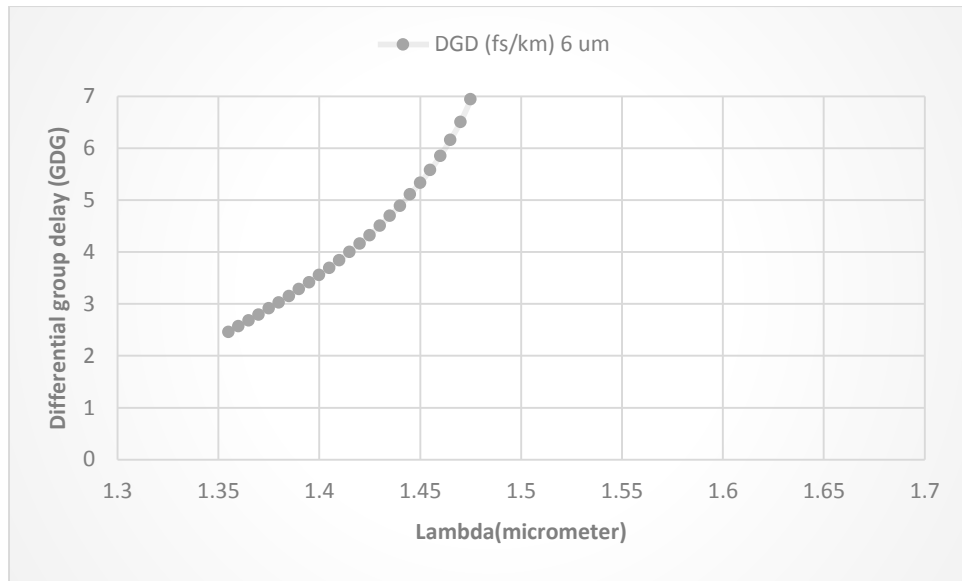
4.3.1 ขนาดรัศมีของแกน 6 ไมครอน ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.497$)



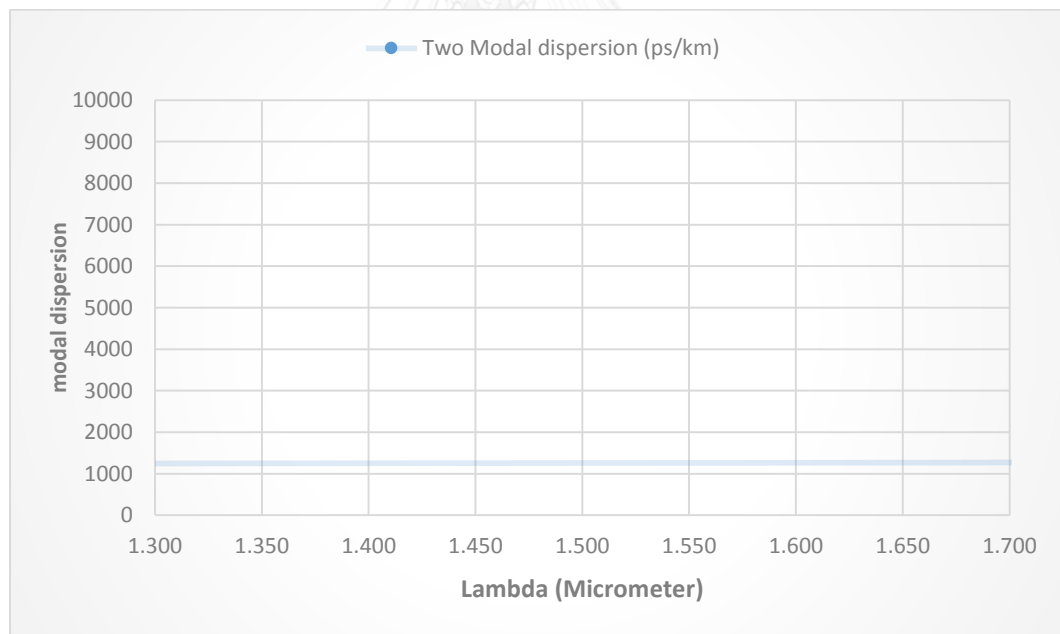
ภาพที่ 4.31 ขนาดแกนของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น รัศมี 6 ไมครอน



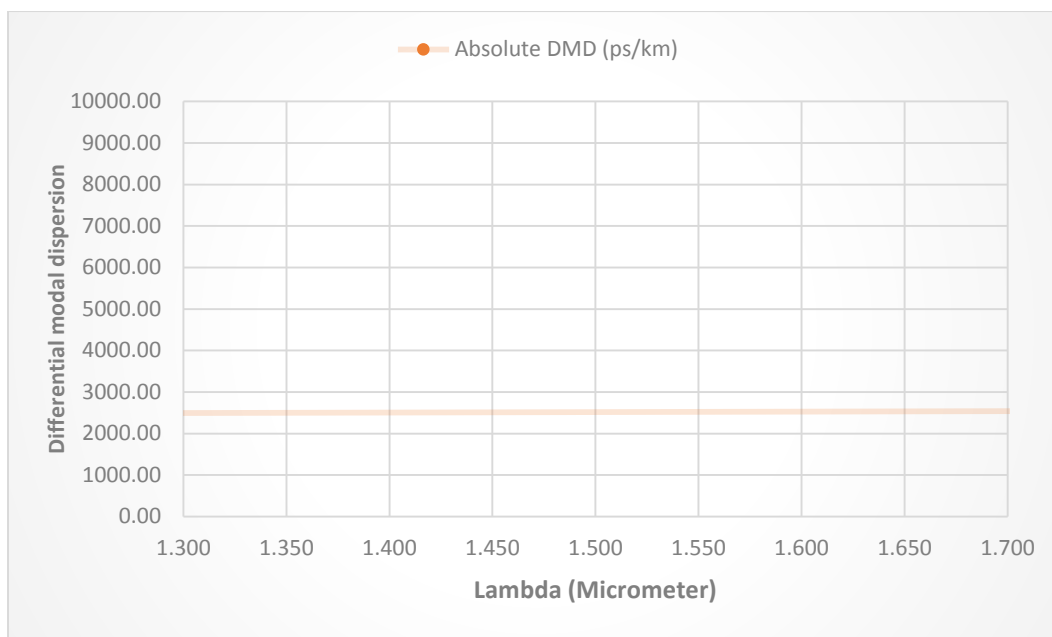
ภาพที่ 4.32 ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น ขนาดรัศมี 6 ไมครอน



ภาพที่ 4.33 ค่าความต่างประวิงเวลาในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแกนคลื่นขนาดรัศมี 6 ไมครอน



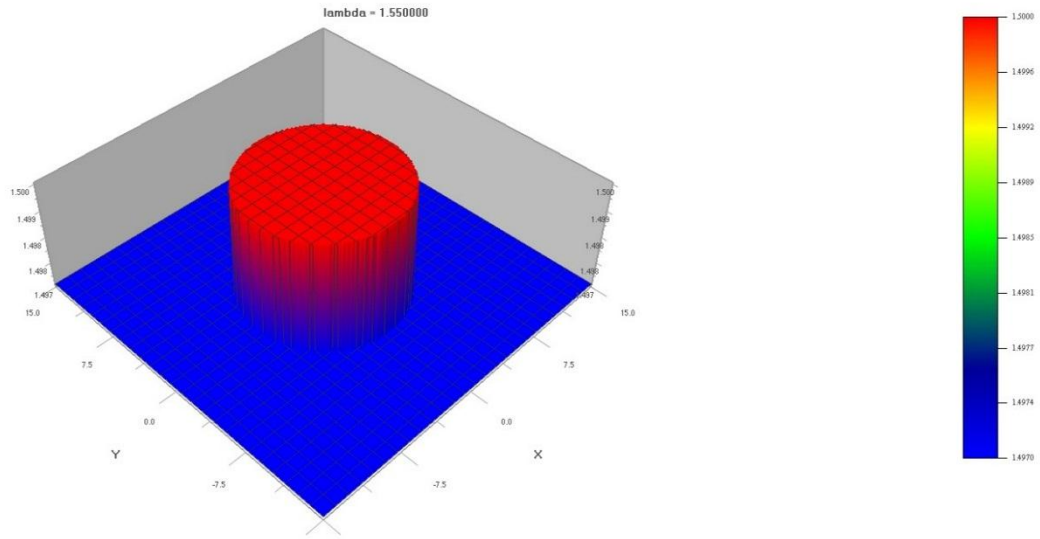
ภาพที่ 4.34 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดใน ช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแกนคลื่นขนาดรัศมีแกน 6 ไมครอน



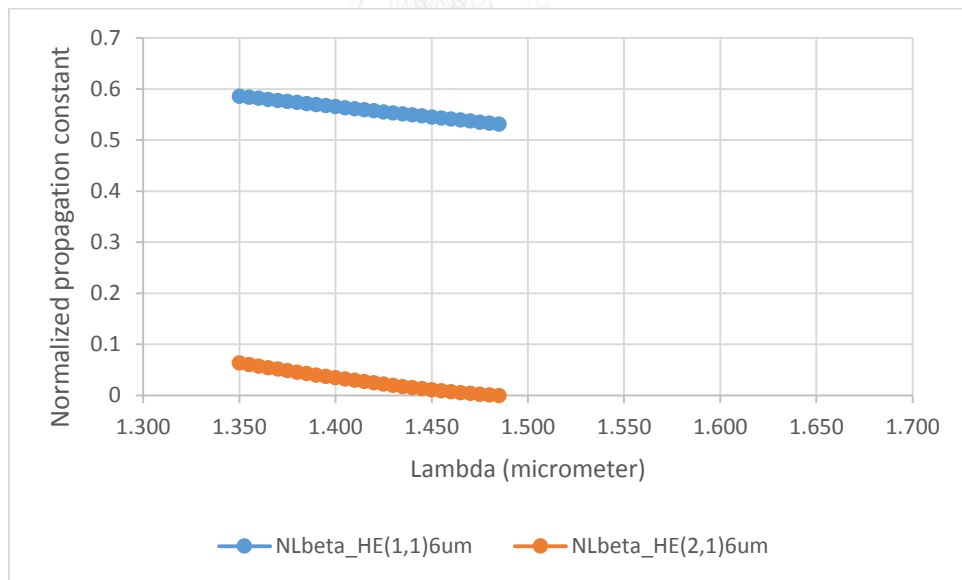
ภาพที่ 4.35 กราฟแสดงความต่างดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดใน ช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมีแกน 6 ไมครอน

จากกราฟ 4.26 จะเห็นว่าโหมดเกิดขึ้นในเส้นใยแสงสองโหมดคือ HE₁₁ และ HE₂₁ ในช่วงความถี่ นอร์มอลไลส์ $v=3.1$ และจากภาพ 4.27 และ 4.28 จะเห็นได้ว่า ค่าความต่างประวิงเวลาและค่าดิสเพอร์ชันมีค่าสูงในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตร ดังนั้นเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นนี้จึงไม่เหมาะเป็นเส้นใยแสงที่ใช้งานที่ความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตร

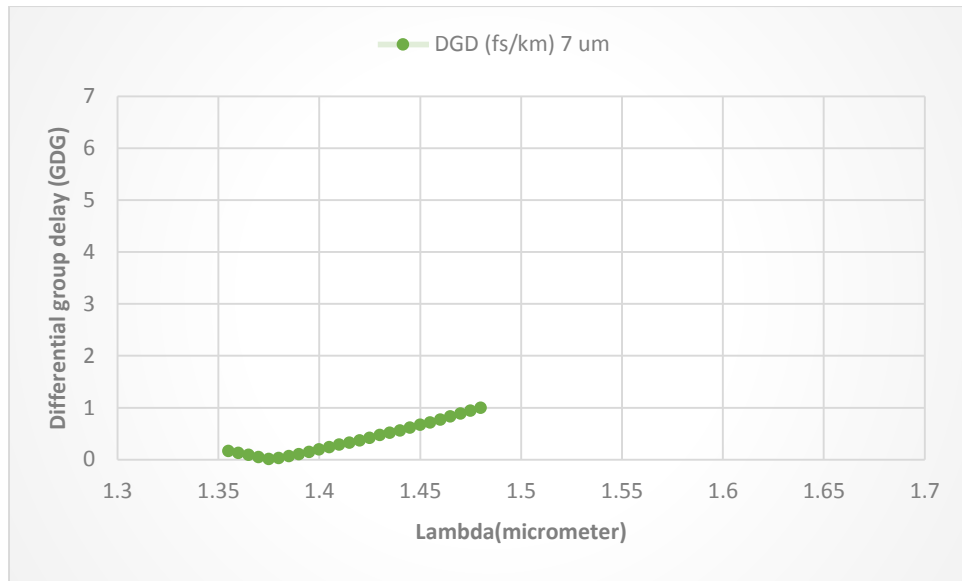
4.3.2 ขนาดรัศมีของแกน 7 ไมครอน ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.497$)



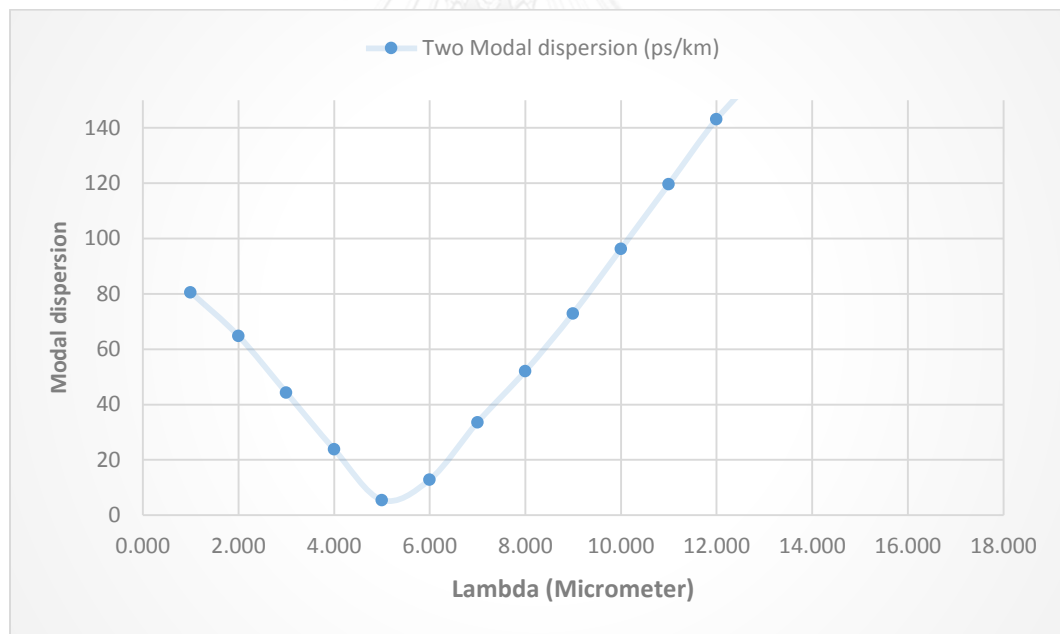
ภาพที่ 4.36 ขนาดแกนของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น รัศมี 7 ไมครอน



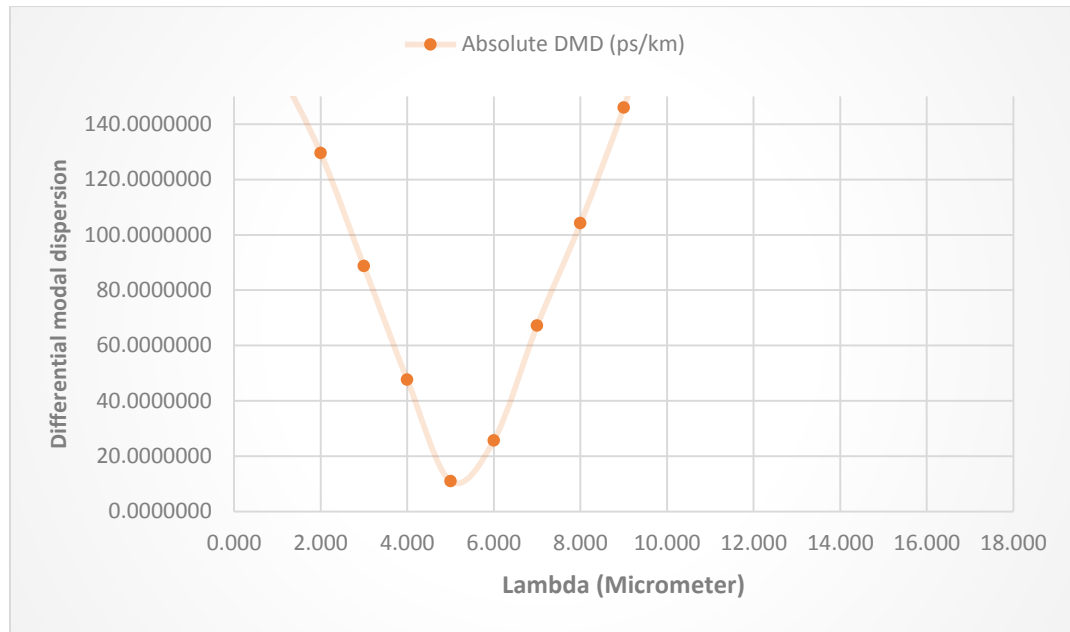
ภาพที่ 4.37 ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น ขนาดรัศมี 7 ไมครอน



ภาพที่ 4.38 ค่าความต่างประวิงเวลาในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมี 7 ไมครอน



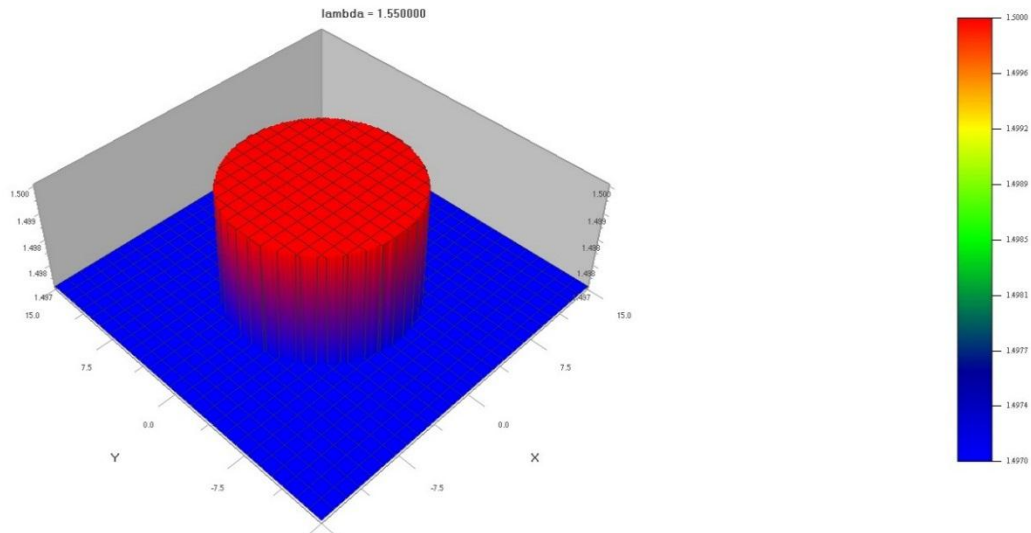
ภาพที่ 4.39 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชันและความต่างดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมีแกน 7 ไมครอน



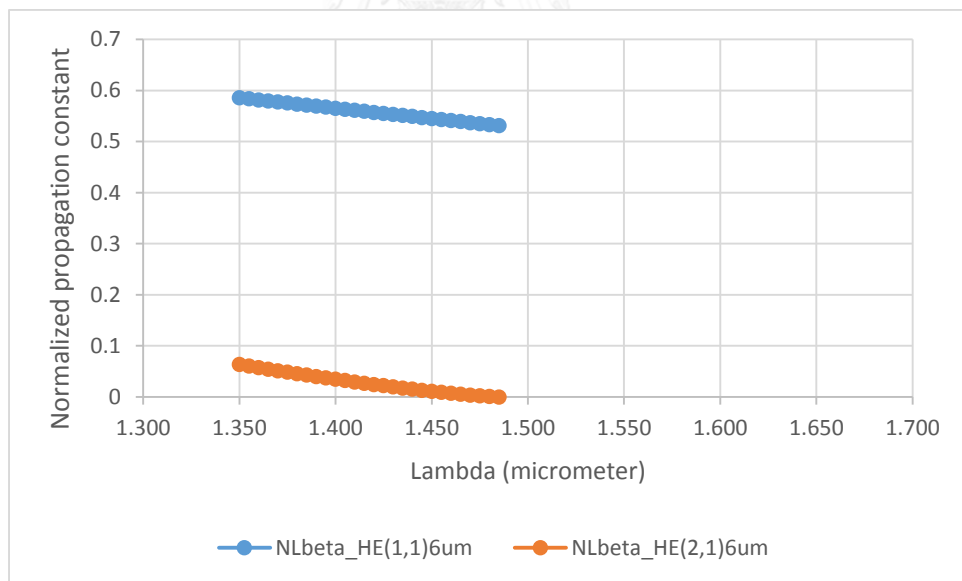
ภาพที่ 4.40 กราฟแสดงความต่างดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมีแกน 7 ไมครอน

จากกราฟ 4.30 จะเห็นว่าโหมดเกิดขึ้นในเส้นใยแสงสองโหมดคือ HE11 และ HE21 ในช่วงความถี่นอร์มอลไลส์ $v=3.1$ และจากภาพ 4.31 และ 4.32 จะเห็นได้ว่า ค่าความต่างประวิงเวลาและค่าดิสเพอร์ชันมีค่าต่ำที่ความยาวคลื่น 1330 นาโนเมตร แต่เนื่องจากค่าดิสเพอร์ชันที่ได้นั้นยังมีค่าสูง ดังนั้นเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นนี้จึงไม่เหมาะเป็นเส้นใยแสงที่ใช้งานที่ความยาวคลื่น 1330 นาโนเมตร

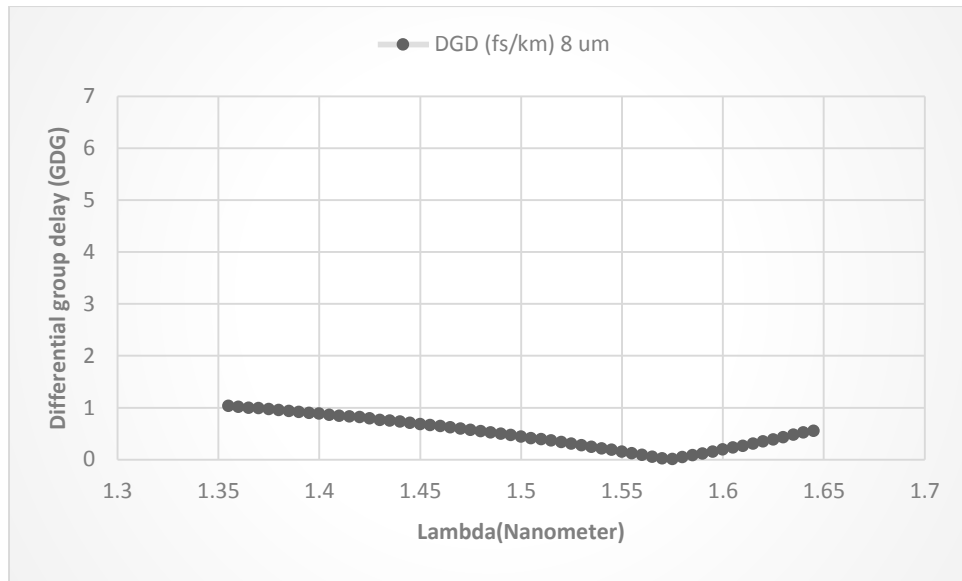
4.3.2 ขนาดรัศมีของแกน 8 ไมครอน ดัชนีหักเหแสงของแกน ($n_1=1.5$) โดย ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2=1.497$)



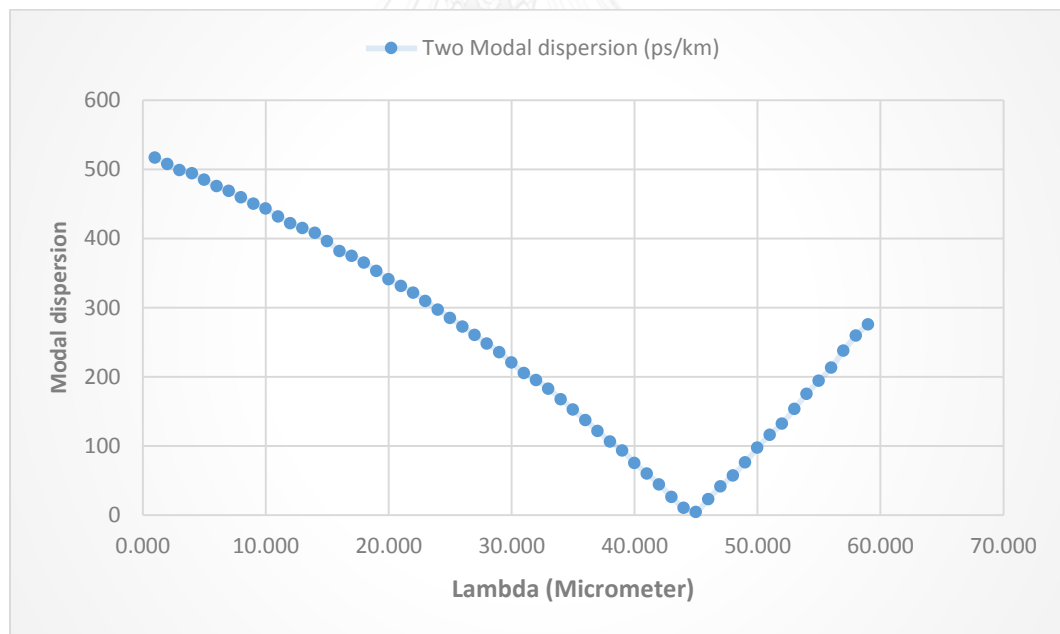
ภาพที่ 4.41 ขนาดแกนของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น รัศมี 8 ไมครอน



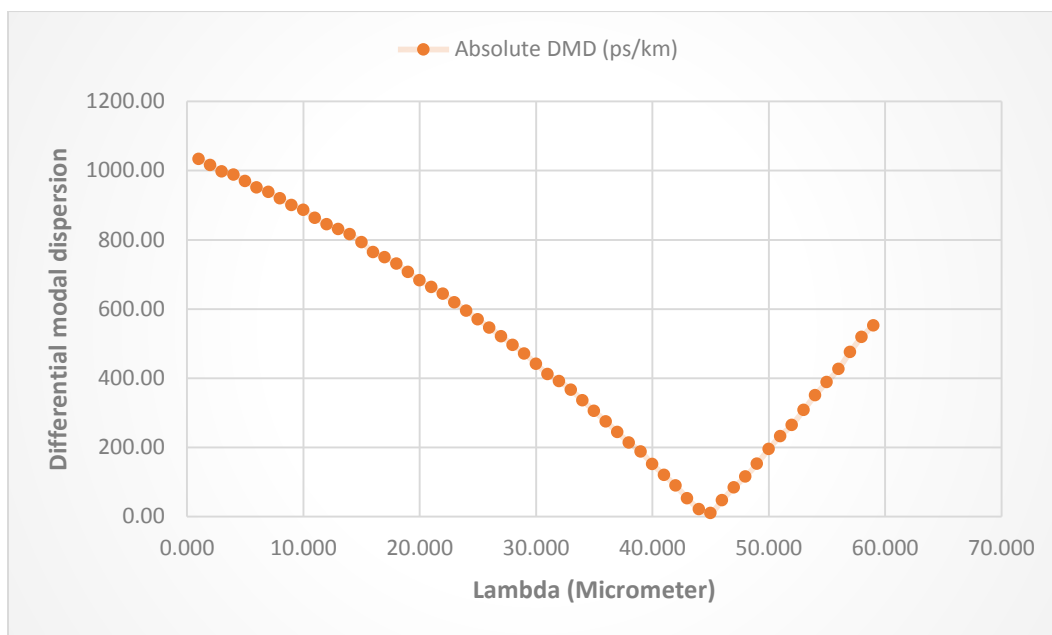
ภาพที่ 4.42 ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น ขนาดรัศมี 8 ไมครอน



ภาพที่ 4.43 ค่าความต่างประวิงเวลาในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแกนคลื่นขนาดรัศมี 8 ไมครอน



ภาพที่ 4.44 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชันและความต่างดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแกนคลื่นขนาดรัศมีแกน 8 ไมครอน



ภาพที่ 4.45 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชันและความต่างดิสเพอร์ชันระหว่างโหมดในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตรของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นขนาดรัศมีแกน 8 ไมครอน

จากกราฟ 4.34 จะเห็นว่าโหมดเกิดขึ้นในเส้นใยแสงสองโหมดคือ HE11 และ HE21 ในช่วงความถี่ นอร์มอลไลส์ $v=3.1$ และจากภาพ 4.35 และ 4.36 จะเห็นได้ว่า ค่าความต่างประวิงเวลาและค่าดิสเพอร์ชันมีค่าใกล้ศูนย์ที่ความยาวคลื่น 1570 นาโนเมตร แต่เนื่องจากค่าดิสเพอร์ชันที่ได้นั้นเป็นค่าต่ำใกล้ศูนย์ ดังนั้นเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นนี้จึงเหมาะเป็นเส้นใยแสงที่ใช้งานที่ความยาวคลื่น 1570 นาโนเมตร

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากบทที่ 4 การเกิดโหนดของเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่น ที่ออกแบบด้วยการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ค่าดัชนีหักเหของแคลดดิ้ง ค่ารัศมีของแกนเส้นใยแสง และสนใจในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตร โดยแบ่งเป็น 3 แบบ จะเห็นว่าทุกแบบมีโหนดเกิดขึ้นทั้งสามแบบโดยในแบบที่ 2 และ 3 นั้นคือชนิด ดัชนีหักเหของแคลดดิ้ง ($n_2 = 1.496$) และ ดัชนีหักเหของแคลดดิ้ง ($n_2 = 1.497$) มีโหนดเกิดขึ้นมากกว่า 2 โหนดในช่วงความถี่ออร์มอลโลสที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงไม่น่าข้อมูลในช่วงนี้มีวิเคราะห์ กรณีถัดไป การวิเคราะห์ค่าความต่างประวิงเวลาและค่าดิสเพอร์ชันในเส้นใยแสง โดย จากการทดลองทั้งสามแบบ โดยแบบที่ 1 คือชนิด ดัชนีหักเหของแคลดดิ้ง ($n_2 = 1.496$) และ ดัชนีหักเหของแคลดดิ้ง ($n_2 = 1.497$) ขนาดรัศมีแกน 6 ไมครอนมีค่าดิสเพอร์ชันใกล้ศูนย์ที่ ความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร และค่าความต่างประวิงเวลาของโหนดทั้งสองยังมีค่าต่ำอีกด้วย ดังนั้นการเส้นใยแสง แบบที่ 1 คือชนิด ดัชนีหักเหของแคลดดิ้ง ($n_2 = 1.496$) และ ดัชนีหักเหของแคลดดิ้ง ($n_2 = 1.497$) ขนาดรัศมีแกน 6 ไมครอน เป็นเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นที่รองรับระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแบนคลื่นที่ความยาวคลื่น 1525 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่พิจารณาคือ 1530-1630 นาโนเมตร ส่วนอีกสองชนิดขนาดรัศมีแกน 7 และ 8 ไมครอน ตามลำดับ นั้น มีค่าดิสเพอร์ชันและค่าความต่างประวิงเวลาของโหนดที่สูงเกิน ณ ช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตร ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งาน

จากการออกแบบเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นแบบที่ 2 ($n_1 = 1.5$) และ ดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง ($n_2 = 1.496$) โดยเส้นใยแสงขนาดรัศมี 6 และ 7 ไมครอน มีค่าความแตกต่างประวิงเวลาและดิสเพอร์ชัน ที่ต่ำ ณ ความยาวคลื่น 1360 นาโนเมตร และ 1590 นาโนเมตร ตามลำดับดังนั้นเส้นใยแสงชนิดดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง $n_2 = 1.496$ ขนาดรัศมี 6 และ 7 ไมครอน จึงเป็นเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นมีความเหมาะสมในการใช้งานใน ณ. ความยาวคลื่น 1360 และ 1590 นาโนเมตร ตามลำดับ แต่เนื่องจากผู้วิจัยพิจารณาในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตร ดังนั้น เส้นใยแสงชนิดดัชนีหักเหแสงของแคลดดิ้ง $n_2 = 1.496$ ขนาดรัศมี 7 ไมครอน จึงเป็นเส้นใยแสงที่เหมาะสมกับการใช้งานมากกว่า ชนิดขนาด 7 ไมครอน ส่วนอีกชนิดขนาดรัศมีแกน 6 ไมครอนนั้น ไม่มีค่าดิสเพอร์ชันและค่าความต่างประวิงเวลาที่ต่ำ ณ ช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตร ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งาน

และแบบสุดท้ายเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นชนิดดัชนีหักเหแสงของแกน

($n_1 = 1.5$) และ ดัชนีหักเหของแคลดดิ้ง ($n_2 = 1.497$) โดยเส้นใยแสงขนาดรัศมี 8 ไมครอนมีค่าความต่างประวิงเวลาและค่าดิสเพอร์ชันของโหมดต่ำ ณ.ความยาวคลื่น 1575 นาโนเมตร ดังนั้นการเส้นใยแสง ดัชนีหักเหของแคลดดิ้ง ($n_2 = 1.497$) ขนาดรัศมีแกน 8 ไมครอน เป็นเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นที่รองรับระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแบนคลื่นที่ความยาวคลื่น 1575 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่พิจารณา คือ 1530-1630 นาโนเมตร ส่วนอีกสองชนิดขนาดรัศมีแกน 6 และ 7 ไมครอนนั้น ไม่มีค่าดิสเพอร์ชันและค่าความต่างประวิงเวลาที่ต่ำ ณ ช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตร ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งาน

ข้อเสนอแนะ

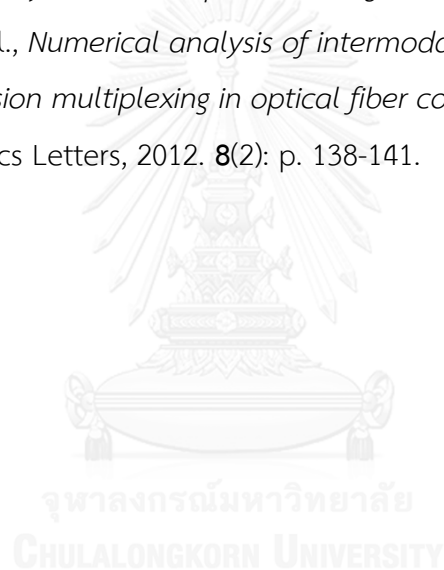
ในวิทยานิพนธ์นี้การวิเคราะห์และออกแบบจากค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแสงโดยใช้โปรแกรม OPTIMODE โดยออกแบบเส้นใยแสงแบบน้อยแบนคลื่นชนิด step index ในช่วงความยาวคลื่น 1530-1630 นาโนเมตร ซึ่งในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้ให้ความสำคัญกับการลดทอนสัญญาณอีกประเภทเช่น โครมาติกดิสเพอร์ชัน (Chromatic dispersion) ก็กับการออกแบบโครงอื่นที่ซับซ้อนขึ้น เช่น W-shape step index รวมไปถึงการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในโครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้น เช่น โครงสร้าง graded index เนื่องจากการคำนวณค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในโครงสร้างที่ซับซ้อนขึ้นโดยใช้โปรแกรม OPTIMODE ใช้เวลาในการคำนวณนานพอสมควร

ในอนาคตอาจมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางคณิตอื่นๆ และออกแบบในโครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้น เพื่อประสิทธิภาพในการใช้กับระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแบนคลื่นในอนาคตต่อไป

รายการอ้างอิง

1. Schöllmann, S. and W. Rosenkranz. *Experimental investigations of mode coupling as limiting effect using mode group diversity multiplexing on GI-MMF*. in *Proc. ECOC*. 2006.
2. Keiser, G., *Optical fiber communications*. 2003: Wiley Online Library.
3. André, P., et al., *Thermal effects in optical fibres*. 2011: INTECH Open Access Publisher.
4. Essiambre, R.-J., et al., *Capacity limits of optical fiber networks*. *Lightwave Technology, Journal of*, 2010. **28**(4): p. 662-701.
5. Kubota, H. and T. Morioka, *Few-mode optical fiber for mode-division multiplexing*. *Optical Fiber Technology*, 2011. **17**(5): p. 490-494.
6. Hanzawa, N., et al. *Demonstration of mode-division multiplexing transmission over 10 km two-mode fiber with mode coupler*. in *Optical Fiber Communication Conference*. 2011. Optical Society of America.
7. Chen, H., et al. *Wavelength and Polarization Division Multiplexing using the LP 11 mode in a two-mode fiber for Mode Division Multiplexing*. in *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition*. 2011. Optical Society of America.
8. Salsi, M., et al. *Transmission at 2x100Gb/s, over two modes of 40km-long prototype few-mode fiber, using LCOS based mode multiplexer and demultiplexer*. in *Optical Fiber Communication Conference*. 2011. Optical Society of America.
9. Ryf, R., et al., *Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6x6 MIMO processing*. *Lightwave Technology, Journal of*, 2012. **30**(4): p. 521-531.
10. Randel, S., et al. *Mode-multiplexed 6x 20-GBd QPSK transmission over 1200-km DGD-compensated few-mode fiber*. in *Optical Fiber Communication Conference*. 2012. Optical Society of America.

11. Angkaew.T, R.N.a., *Improvement of Modal Analysis of Waveguides by the Finite Element Method with Edge-Based Polygonal Element*. in Proc. 30th International Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC), 2015.
12. Inc., O.S. *Optical Communication System Design*. 2558 [2015 July 18].
13. M, J. and Y. Jamro, *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*. 2009: Financial Times/Prentice Hall.
14. Okamoto, K., *Fundamentals of Optical Waveguides*. 2006: Academic Press.
15. Li, M.-J., E. Ip, and Y. Huang. *Large effective area FMF with low DMGD*. in *IEEE Photonics Society Summer Topical Meetings*. 2013.
16. Munir, A., et al., *Numerical analysis of intermodal delay in few-mode fibers for mode division multiplexing in optical fiber communication systems*. *Optoelectronics Letters*, 2012. **8**(2): p. 138-141.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐพล รัตนเจียมรังษี เกิดวันที่ 9 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2532 จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2553

และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554 โดยศึกษากลุ่มวิจัยด้านการสื่อสารทางแสงและไมโครเวฟ

