

การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความสูญเสียจากการเชื่อมต่อเชิงกล

ของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF-28 และ MP980

Analysis of Parameters Related to Mechanical Splicing

Loss of SMF-28 and MP980 Optical Fibers

วริรัตน์ อินทร์อาจ และวีรชัย อัสวเมธาพันธ์*

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Wareerat Inart and Weerachai Asawamethapant*

Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering,

Thammasat University, Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความสูญเสียจากการเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยวชนิด SMF-28 และ MP980 โดยการใช้ matching mode field model และทฤษฎีของเฟรสเนล ในการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ระยะห่างที่เกิดจากการเอียงศูนย์กลางแบบ lateral misalignment (หรือ x) ระยะห่างที่เกิดจากการเอียงศูนย์กลางแบบ axial misalignment (หรือ d) มุมที่เกิดจากการเอียงศูนย์กลางแบบ angular misalignment (หรือ θ) และค่าดัชนีหักเหของ index matching gel (หรือ n) ซึ่งพบว่าค่าดัชนีหักเหของ index matching gel ที่เหมาะสมที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.458 และค่าความสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนแบบเฟรสเนล ระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิดนี้กับ index matching gel จะมีค่าต่ำมากและใกล้เคียงกับ 0 dB นอกจากนี้ค่าความสูญเสียโดยรวมมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าของ x , d และ θ มีค่าเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อ x มีค่าน้อยกว่า 5 μm อิทธิพลของ x ที่มีต่อค่าความสูญเสียโดยรวมจะมีค่าน้อยมาก และอิทธิพลของ d จะส่งผลต่อการเพิ่มค่าของความสูญเสียโดยรวมมากกว่า x นอกจากนี้สำหรับการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วทั้งสองชนิดโดยไม่เกิดการเอียงศูนย์กลาง lateral misalignment, axial misalignment และ angular misalignment ค่าความสูญเสียโดยรวมมีค่าเท่ากับ 1.5399 dB ซึ่งความสูญเสียจากการเชื่อมต่อเชิงกลดังกล่าวเกิดจากความแตกต่างของขนาดรัศมี mode field ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิด

คำสำคัญ : ความสูญเสียจากการเชื่อมต่อเชิงกล; เส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว; matching mode field model; ทฤษฎีของเฟรสเนล

*ผู้รับผิดชอบบทความ : aweerach@engr.tu.ac.th

Abstract

This paper presents the analysis of parameters related to mechanical splicing loss of SMF-28 and MP980 single mode optical fibers by using matching mode field model and Fresnel theory. Here, the analysis of the effect of various conditions such as separation due to lateral misalignment (or x), offset due to axial misalignment (or d), angle due to angular misalignment (or θ) and refractive index of index matching gel (or n) are obtained. It is found that, the appropriate refractive index value of index matching gel is equal to 1.458. And the Fresnel reflection loss between both types of these optical fibers and index matching gel is very low and is close to 0 dB. Moreover, the value of total loss is increased when the values of x , d , and θ are increased. However, if x is less than $5 \mu\text{m}$, the effect of x to the total loss is negligible. Moreover, d has more effect to the increased total loss than x . And it is also found that, for the mechanical splicing without any lateral misalignment, axial misalignment and angular misalignment, the total loss is equal to 1.5399 dB. Here, this mechanical splicing loss is caused by the difference between the mode field radius of both optical fibers.

Keywords: mechanical splicing loss; single mode optical fiber; matching mode field model; Fresnel theory

1. บทนำ

ปัจจุบันระบบการสื่อสารมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ปริมาณการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ดังนั้นระบบที่ใช้ในการสื่อสารจึงต้องสามารถรองรับและตอบสนองความต้องการที่เพิ่มมากขึ้น และต้องรองรับความเร็วในการส่งข้อมูลสูง ๆ รวมทั้งต้องรองรับความถูกต้องแม่นยำและความปลอดภัยของข้อมูลได้เป็นอย่างดี โดยระบบที่สามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้แก่ระบบการสื่อสารทางแสง ซึ่งในระบบการสื่อสารทางแสงจะมีการส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง (optical fiber) อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานของเส้นใยแก้วนำแสงบางประการ เช่น การวางเส้นใยแก้วนำแสงเชื่อมต่อในระยะทางไกล ๆ จำเป็นต้องใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่มีความยาวมาก ๆ ทำให้ต้องมีการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การเชื่อมต่อเชิงกล (mechani-

cal splicing) การเชื่อมต่อด้วยการหลอม (fusion splicing) และการเชื่อมต่อด้วยหัวเชื่อมต่อ (connector) โดยการเชื่อมต่อเชิงกลนั้นเป็นการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงด้วยต้นทุนที่ประหยัด เนื่องจากการเชื่อมต่อที่ใช้เพียงเจลเชื่อมต่อ (index matching gel) ก็สามารถที่เชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงสองเส้นเข้าด้วยกันได้ อย่างไรก็ตาม ในการเชื่อมต่อเชิงกลนั้นหากเราเลือกใช้เจลเชื่อมต่อที่มีสมบัติที่ไม่เหมาะสมแล้ว จะทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลของสัญญาณแสงที่บริเวณเชื่อมต่อได้ ซึ่งถ้าค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าสูงมากกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ก็จะทำให้ไม่สามารถนำเส้นใยแก้วนำแสงที่ผ่านการเชื่อมต่อไปใช้งานได้ และยังทำให้ต้นทุนในการผลิตเส้นใยแก้วนำแสงที่ผ่านการเชื่อมต่อเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ซึ่งในช่วงที่ผ่านมาได้มีกลุ่มผู้วิจัยพยายามที่จะลดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อเชิงกลด้วยการหาวัสดุที่เหมาะสม (index

matching material) ในการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิด [1-3]

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว ชนิด SMF-28 และ MP980 ซึ่งเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดได้รับความนิยมในการใช้งานในระบบการสื่อสารทางแสง โดยใช้ในส่วนของขยายสัญญาณด้วยเทคนิค EDFA (erbium-doped fiber amplifier) ของสถานีทวนสัญญาณ (repeater station) โดยผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้ matching mode field model และทฤษฎีการสะท้อนแบบเฟรสเนลมาใช้ในการคำนวณค่าความสูญเสียดังกล่าว [4-8] ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อเชิงกล ได้แก่ ระยะห่างที่เกิดจากการเยื้องศูนย์แบบ lateral misalignment ระยะห่างที่เกิดจากการเยื้องศูนย์แบบ axial misalignment มุมที่เกิดจากการเยื้องศูนย์แบบ angular misalignment และค่าดัชนีหักเหของ index matching gel เพื่อนำผลการวิเคราะห์ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในการลดค่าความสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดในภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องต่อไปในอนาคต

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

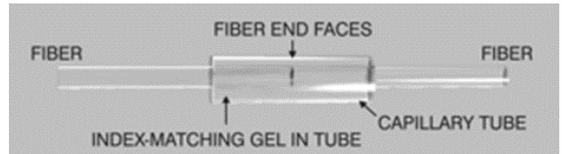
2.1 การเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสง

กระบวนการการเชื่อมต่อเชิงกลสามารถแสดงได้ในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นกราวงเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองเส้นให้อยู่ในแนวแกนเดียวกัน โดยใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมและพยายามทำให้ปลายของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองอยู่ชิดกันมากที่สุด โดยในการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงในกรณีนี้ จะต้องพยายามวางเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองเส้นโดยไม่ให้เกิดการเยื้องศูนย์ในแนว

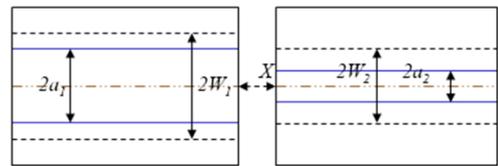
ต่าง ๆ เพื่อให้การสูญเสียของสัญญาณแสงที่เกิดขึ้นตรงบริเวณที่มีการเชื่อมต่อมีค่าน้อยที่สุด นอกจากนี้บริเวณรอยต่อระหว่างเส้นใยแก้วทั้งสองจะมีการใช้ index matching gel ด้วย ซึ่งเจลดังกล่าวเป็นของเหลวใสที่มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วนำแสง [5]

การเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสง จะเกิดการเยื้องศูนย์ออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ [4]

2.1.1 การเยื้องศูนย์แบบ lateral misalignment ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อปลายของเส้นใยแก้วนำแสงเคลื่อนในแนวนอนเป็นระยะ x ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 การเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสง [5]

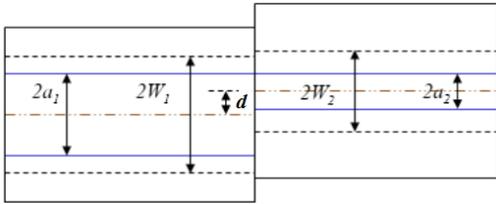


รูปที่ 2 การเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงเมื่อเกิด lateral misalignment

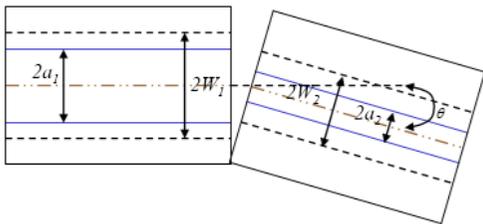
2.1.2 การเยื้องศูนย์แบบ axial misalignment ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อแนวแกนของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองในแนวตั้ง มีระยะห่าง (offset) ระหว่างแกนเป็นระยะทาง d ดังรูปที่ 3

2.1.3 การเยื้องศูนย์แบบ angular misalignment ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อแนวแกนของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองไม่ขนานกัน แต่ทำมุมซึ่งกันและกันและเกิดจุดตัดบริเวณที่มีการเชื่อมต่อเป็นมุม θ ดังแสดงในรูปที่

4



รูปที่ 3 การเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงเมื่อเกิด axial misalignment



รูปที่ 4 การเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงเมื่อเกิด axial misalignment

ซึ่งตัวเลข 1 และ 2 ในรูปแทนค่าพารามิเตอร์สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงทางด้านซ้ายมือและขวามือตามลำดับ

2.2 ค่าความสูญเสียโดยรวมจากการเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว

งานวิจัยนี้ ค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองเส้น สามารถพิจารณาได้จากการคำนวณผลรวมของค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในกรณีต่าง ๆ [4-8] ดังต่อไปนี้

2.2.1 ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นตาม matching mode field model

Matching mode field model เป็นการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายค่าความสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว โดยพิจารณาจากค่าความแตกต่างระหว่างขนาดรัศมี mode field ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อ ดังแสดงในรูปที่ 5 ในการ

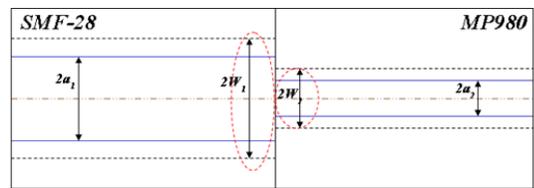
คำนวณโดยใช้โมเดลนี้ จะกำหนดให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวเป็นแบบ fundamental mode สำหรับค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงตามโมเดลนี้ สามารถคำนวณจากสมการ

$$A_M = -10 \log \left[\frac{(2W_1W_2)^2}{W_1^2 + W_2^2} \right] \quad (1)$$

เมื่อ A_M คือ ค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงตาม matching mode field model (dB); W_1, W_2 คือ ขนาดรัศมี mode field (μm) ของเส้นใยแก้วนำแสงทางด้านซ้ายมือและขวามือตามลำดับ โดย W ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองฝั่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$W = a / \sqrt{\ln V} \quad (2)$$

เมื่อ a คือขนาดรัศมีของ core ของเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละชนิด; V คือ ค่า normalized frequency ของเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละชนิด

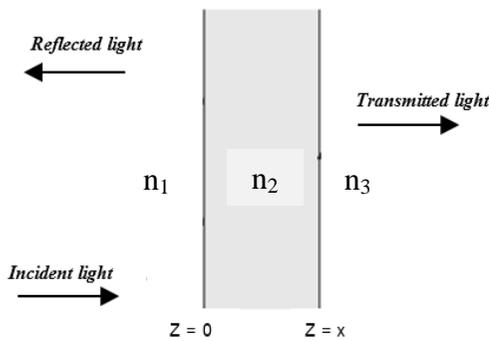


รูปที่ 5 ขนาดของ mode field radius ของเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยวทั้งสองชนิดบริเวณที่มีการเชื่อมต่อเชิงกล

2.2.2 ค่าความสูญเสียโดยการใช้ทฤษฎีการสะท้อนแบบเฟรสเนล

ปรากฏการณ์สะท้อนกลับของแสงที่เกิดจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงเกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางผ่านบริเวณรอยต่อที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงที่แตกต่างกัน เรียกว่าการสะท้อนแบบเฟรสเนล (Fresnel reflection) ซึ่งเกิดในกรณีที่แสงตกกระทบบริเวณรอยต่อในแนวตั้งฉากกับรอยต่อ (normal

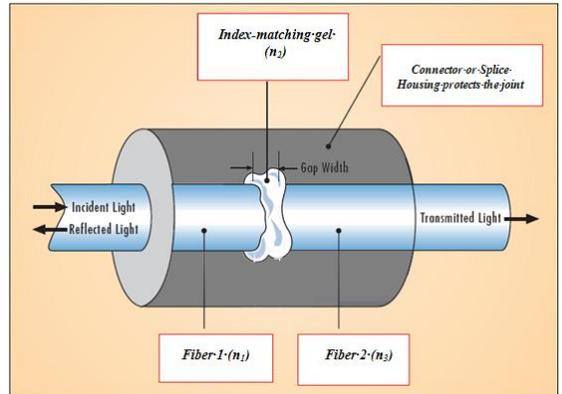
incidence) [8] แสดงดังรูปที่ 6 จากรูปพบว่าแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห n_1 ไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห n_3 โดยมีตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห n_2 อยู่คั่นกลาง โดยแสงที่ตกกระทบ (incident light) เดินทางผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห n_1 เมื่อเดินทางมาถึงบริเวณรอยต่อของตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกันระหว่าง n_1 และ n_2 จะมีแสงบางส่วนสะท้อนกลับ (reflected light) และแสงที่เดินทางผ่านไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห n_2 หลังจากนั้นเมื่อแสงเดินทางมาถึงบริเวณรอยต่อของตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกันระหว่าง n_2 และ n_3 จะมีแสงบางส่วนสะท้อนกลับ และแสงบางส่วนที่เดินทางผ่านไปยังตัวกลางที่ n_3 (transmitted ray)



รูปที่ 6 ปรากฏการณ์สะท้อนแบบเฟรสเนลในกรณีที่มีแสงตกกระทบบริเวณรอยต่อในแนวตั้งฉากกับรอยต่อ [8]

การเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงดังแสดงในรูปที่ 7 นั้น [9] เมื่อแสงเดินทางมาถึงบริเวณ index matching gel ระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสอง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหระหว่างบริเวณต่าง ๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดการสะท้อนแบบเฟรสเนลที่บริเวณ (1) รอยต่อของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดแรกกับ index matching gel และ (2) รอยต่อของ index matching gel กับเส้นใยแก้วนำแสง

ชนิดที่สอง



รูปที่ 7 การเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสง [9]

กรณีนี้ค่าความสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับแบบเฟรสเนล (หรือ Fresnel loss) ในกรณีที่แสงที่ตกกระทบบริเวณรอยต่อในแนวตั้งฉากกับรอยต่อ โดยที่ปลายของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งมีระยะห่างกัน x นั้น สามารถคำนวณได้จาก

$$Loss_{Fresnel}(dB) = -10 \log(1 - R) \quad (3)$$

เมื่อ R คือ ค่า intensity reflectance โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$R = \frac{(r_{12}^2 + r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos \beta)}{(1 + r_{12}^2 + r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos \beta)} \quad (4)$$

เมื่อ r_{12} คือ ค่า reflection coefficient ระหว่างตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห n_1 (Fiber 1) และตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห n_2 (index matching gel) โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$r_{12} = \frac{(n_1 - n_2)}{(n_1 + n_2)} \quad (5)$$

จากสมการที่ 5 หาก r_{12} มีค่าติดลบ แสดงว่าสัญญาณแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหน้อยกว่าไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหมากกว่า โดยเครื่องหมายลบหมายถึงจะมีการเปลี่ยน phase ของสัญญาณแสงบริเวณที่มีการเชื่อมต่อระหว่างตัวกลางทั้งสอง โดย phase ของสัญญาณแสงที่เปลี่ยนจะมีค่าเท่ากับ π

และหาก r_{12} มีค่าเป็นบวก แสดงว่าสัญญาณเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหมากกว่าไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหน้อยกว่า และจะไม่เกิดการเปลี่ยน phase ของสัญญาณแสงบริเวณที่มีการเชื่อมต่อระหว่างตัวกลางทั้งสอง [10]

การพิจารณาในลักษณะเดียวกัน r_{23} สามารถคำนวณได้จาก

$$r_{23} = \frac{(n_2 - n_3)}{(n_2 + n_3)} \quad (6)$$

เมื่อ r_{23} คือ ค่า reflection coefficient ระหว่างตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห n_2 (index matching gel) และตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห n_3 (Fiber 2) โดยในกรณีที่มี r_{23} มีค่าเป็นลบหรือมีค่าเป็นบวก จะมีความหมายเช่นเดียวกับ r_{12}

นอกจากนี้จากสมการที่ 4 ตัวแปร β คือ ค่า phase difference ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\beta = 2xn_2 \frac{2\pi}{\lambda} \quad (7)$$

เมื่อ x คือ ระยะห่างระหว่างปลายเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสอง (μm) ซึ่งเป็นบริเวณที่มี index matching gel

2.2.3 ค่าความสูญเสียในกรณีเกิด lateral misalignment

สำหรับค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อเชิงกลจากกรณีที่เกิดการเยื้องศูนย์แบบ lateral misalignment (หรือ lateral misalignment loss) ดังแสดงในรูปที่ 2 นั้น ประกอบด้วยค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นตาม matching mode filed model และค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากตัวแปร x โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$Loss(dB) = -10 \log \frac{4 \left[4Z^2 + \frac{W_1^2}{W_2^2} \right]}{\left[4Z^2 + \frac{W_1^2 + W_2^2}{W_2^2} \right] + 4Z^2 \frac{W_2^2}{W_1^2}} \quad (8)$$

โดย $Z = \frac{x}{nkW_1W_2}$ เมื่อ W_1, W_2 คือ ขนาดรัศมีของ mode field (μm) ของเส้นใยแก้วนำแสงทางด้านซ้ายมือและขวามือตามลำดับ; x คือ ระยะห่างระหว่าง

ปลายของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองที่เกิดจาก lateral misalignment (μm) ซึ่งเป็นบริเวณที่มี index matching gel; n คือ ค่าดัชนีหักเหของ index matching gel; k คือ ค่า wave number โดยคำนวณได้จาก $\frac{2\pi}{\lambda}$ (μm^{-1})

ซึ่งกรณีที่มี ระยะ $x = 0 \mu\text{m}$ นั้น ค่าความสูญเสียที่ได้จากสมการที่ (8) จะมีค่าเท่ากับค่าความสูญเสียที่คำนวณได้จากสมการที่ (1) ซึ่งหมายถึงเป็นค่าความสูญเสียที่เกิดจากค่าความแตกต่างระหว่างขนาดรัศมีของ mode field ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อเท่านั้น

2.2.4 ค่าความสูญเสียในกรณีที่เกิด axial misalignment

การคำนวณค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวในกรณีที่เกิด axial misalignment (หรือ axial misalignment loss) ดังแสดงในรูปที่ 3 นั้น ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จาก

$$Loss(dB) = 4.343 \left(\frac{2d^2}{W_1^2 + W_2^2} \right) \quad (9)$$

เมื่อ d คือ ค่าระยะเยื้องศูนย์แนวแกนที่เกิดจาก axial misalignment (μm)

2.2.5 ค่าความสูญเสียในกรณีที่เกิด angular misalignment

สำหรับกรณีสุดท้าย ในการคำนวณค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวในกรณีที่เกิด angular misalignment (หรือ angular misalignment loss) ดังแสดงในรูปที่ 4 นั้น ค่าความสูญเสียเชิงแสงที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการ (10) ดังนี้

$$Loss(dB) = 4.343k^2n^2 \left(\frac{W_1^2W_2^2}{2(W_1^2 + W_2^2)} \right) \sin^2 \left(\frac{\pi\theta}{180^\circ} \right)$$

เมื่อ n คือ ค่าดัชนีหักเหของ index matching gel; k คือ ค่า wave number โดยคำนวณได้จาก $\frac{2\pi}{\lambda}$

(μm^{-1}); θ คือ ค่าเอียงศูนย์เชิงมุมที่เกิดจาก angular misalignment ($^{\circ}$)

2.3 ค่าสมบัติเฉพาะของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF-28 และ MP 980

ตารางที่ 1 ค่าสมบัติเฉพาะของ SMF-28 และ MP980 [11]

a (μm)		NA		n_{core}		n_{cladding}	
SMF-28	MP980	SMF-28	MP980	SMF-28	MP980	SMF-28	MP980
4.1	1.46	0.1228	0.23	1.452	1.465	1.447	1.458

ค่าสมบัติต่าง ๆ ของเส้นใยแก้วนำแสงที่แสดงในตารางที่ 1 ผู้วิจัยได้กำหนดให้ค่าความยาวคลื่น (λ) ที่ใช้ในงานวิจัยมีค่าเท่ากับ $1.55 \mu\text{m}$ และคำนวณหาค่า V และค่า W ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่า V และ W จากการคำนวณของเส้นใยแก้วนำแสง SMF-28 และ MP980 ที่ความยาวคลื่น $1.55 \mu\text{m}$

λ (μm)	V		W (μm)	
	SMF-28	MP980	SMF-28	MP980
1.55	2.0409	1.3612	4.8542	2.6291

และโดยทั่วไปสำหรับการเชื่อมต่อเชิงกลนั้น ค่าดัชนีหักเหของ index matching gel ที่ใช้ในการเชื่อมต่อจะมีค่าเท่ากับ $n_{\text{gel}} = \sqrt{n_1 n_2}$ โดย n_1 คือ ค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วชนิดที่ 1 และ n_2 คือ ค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วชนิดที่ 2 ดังนั้นงานวิจัยนี้ ค่าดัชนีหักเหของ index matching gel ที่เหมาะสมในกรณีทั่วไปจึงมีค่า $n_{\text{gel}} = \sqrt{1.452 \times 1.465} = 1.458$

ส่วนของการศึกษาการเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF-28 กับ MP980 สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้ค่าสมบัติต่าง ๆ เฉพาะของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 1

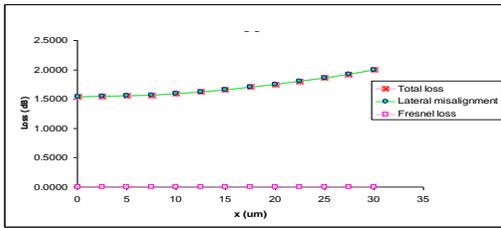
3. การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF-28 และ MP980 ในกรณีต่าง ๆ

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการใช้ซอฟต์แวร์สำหรับกระบวนการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาขึ้น เพื่อใช้งานเป็นเครื่องมือในการคำนวณค่าความสูญเสียและเพื่อวิเคราะห์ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการสูญเสียจากการเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF-28 และ MP980 โดยซอฟต์แวร์ดังกล่าวจะคำนวณค่าความสูญเสียชนิดต่าง ๆ จากทฤษฎีต่าง ๆ ที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 2

3.1 การวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปร x ที่มีต่อค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อเชิงกล

โดยทั่วไปการเชื่อมต่อเชิงกลจำเป็นต้องมีการเว้นระยะห่างเพื่อบรรจุ index matching gel ระหว่างปลายของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสอง ดังนั้นการเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงจะเกิดการเอียงศูนย์แบบ lateral misalignment หรือเกิดระยะ x ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งในหัวข้อนี้ผู้วิจัยกำหนดให้ตัวแปร x มีค่าระหว่าง $0-30 \mu\text{m}$ ดัชนีหักเหของ index

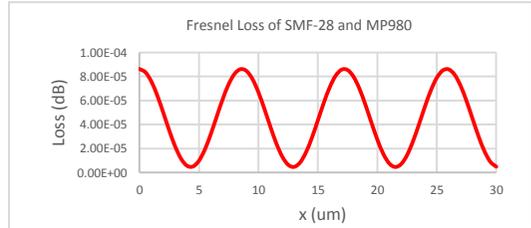
matching gel นั้นมีค่าเท่ากับ 1.458 และการเชื่อมต่อเชิงกลในหัวข้อนี้เป็นกรณีที่ไม่เกิดการเยื้องศูนย์แบบ axial misalignment และ angular misalignment ซึ่งค่าความสูญเสียต่าง ๆ จากการเชื่อมต่อเชิงกลที่คำนวณได้ในกรณีนี้แสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ค่าความสูญเสียโดยรวมในกรณีที่ตัวแปร x มีค่า 0-30 μm โดยความยาวคลื่นเท่ากับ 1.55 μm

รูปที่ 8 ค่าความสูญเสียโดยรวม (total loss) คำนวณจากผลรวมระหว่าง lateral misalignment loss และ Fresnel loss ซึ่งจากรูปพบว่า lateral misalignment loss มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าของ x เพิ่มขึ้น โดยเมื่อ x มีค่า 0 μm ค่า lateral misalignment loss มีค่าเท่ากับ 1.5399 dB และเมื่อ x มีค่า 30 μm ค่า lateral misalignment loss มีค่าเท่ากับ 1.9957 dB ทั้งนี้เป็นผลมาจากความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณแสงที่เดินทางผ่านบริเวณจุดเชื่อมต่อที่มีระยะห่างระหว่างปลายของเส้นใยแก้วนำแสงที่มากขึ้น สำหรับค่าความสูญเสียของแสงที่เกิดจากการสะท้อนแบบเฟรสเนล พบว่าค่าความสูญเสียดังกล่าวมีค่าน้อยมากใกล้เคียงกับ 0 dB ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้ ค่าความสูญเสียของแสงที่เกิดจากการสะท้อนแบบเฟรสเนลแทบจะไม่มีอิทธิพลต่อค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อเชิงกลระหว่าง SMF-28 และ MP980 ในกรณีที่ค่าดัชนีหักเหของเจลเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 1.458 นอกจากนี้ค่าของ Fresnel loss เมื่อ

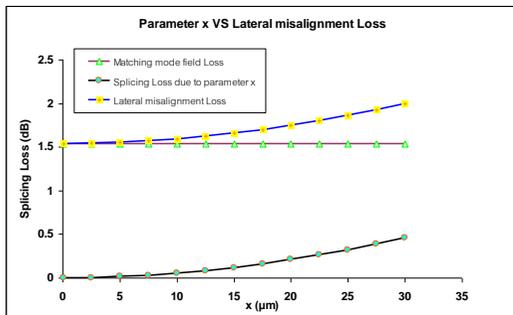
พิจารณาที่ตัวแปร x มีค่า 0-30 μm สำหรับกรณีนี้แสดงดังรูปที่ 9 จากรูปพบว่าค่าความสูญเสียดังกล่าวมีค่าต่ำมาก และมีการเปลี่ยนแปลงตามฟังก์ชันของ cosine ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่า phase difference (ตัวแปร β) ที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.2.2



รูปที่ 9 ค่า Fresnel loss เมื่อพิจารณาที่ตัวแปร x มีค่าระหว่าง 0-30 μm

และจากสมการที่ (8) ในกรณีที่ระยะ x มีค่าเท่ากับ 0 μm ที่ความยาวคลื่น 1.55 μm พบว่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 1.5399 dB ซึ่งค่าความสูญเสียดังกล่าวเป็นค่าความสูญเสียที่เกิดจากความไม่ต่อเนื่องของขนาด mode field ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดที่คำนวณจาก matching mode field model เท่านั้น ดังนั้นในส่วนของค่า lateral misalignment loss กรณีที่ $x > 0 \mu\text{m}$ นั้นจะเป็นผลรวมระหว่างค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นตาม matching mode field model และค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากตัวแปร x โดยจากรูปที่ 10 พบว่าตัวแปร x ไม่มีผลต่อค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นตาม matching mode field model ซึ่งจะมีค่าคงที่เท่ากับ 1.5399 dB ในขณะที่ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากตัวแปร x จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเราเพิ่มค่า x อย่างไรก็ตามเมื่อ $x = 5 \mu\text{m}$ ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากตัวแปร x มีค่าเท่าเพียง 0.0133 dB ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่า ในกรณีที่ $0 < x < 5 \mu\text{m}$ อิทธิพลของตัวแปร x ที่มีต่อค่า lateral misalignment loss ยังมีน้อยมาก และเมื่อ

$x > 5 \mu\text{m}$ อิทธิพลของตัวแปร x ที่มีต่อค่า lateral misalignment loss จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังนั้นในการเว้นระยะห่างระหว่างปลายของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดเพื่อบรรจุ index matching gel นั้น ควรจะมีค่าน้อยกว่า $5 \mu\text{m}$ นอกจากนี้ในขอบเขตของระยะ x ที่กำหนดในงานวิจัยนี้ ค่าความสูญเสียที่เกิดจากความไม่ต่อเนื่องของขนาด mode field ที่คำนวณจาก matching mode field model จะมีค่าสูงกว่าค่าความสูญเสียที่เกิดจากอิทธิพลของตัวแปร x

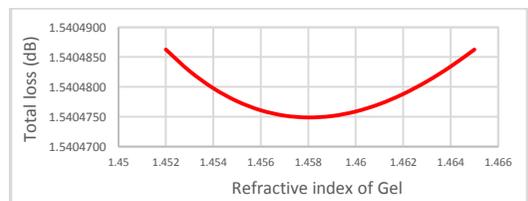


รูปที่ 10 ค่า lateral misalignment loss ในกรณีที่มีตัวแปร x มีค่า 0-30 μm โดยคำนวณที่ความยาวคลื่น 1.55 μm

3.2 การวิเคราะห์อิทธิพลของค่าดัชนีหักเหของ index matching gel ที่มีต่อค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อเชิงกล

หัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของค่าดัชนีหักเหของ index matching gel โดยกำหนดให้ตัวแปร x มีค่าเท่ากับ $1 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นระยะที่ตัวแปร x มีอิทธิพลต่อค่าความสูญเสียโดยรวมน้อยมาก และทำการปรับเปลี่ยนค่าของดัชนีหักเหของ index matching gel อยู่ระหว่างค่าดัชนีหักเหของ core ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิด โดยในกรณีนี้ค่าดัชนีหักเหของ index matching gel จะอยู่ระหว่าง 1.452-1.465 และการเชื่อมต่อเชิงกลในหัวข้อนี้เป็น

กรณีที่ไม่เกิดการเยื้องศูนย์แบบ axial misalignment และ angular misalignment โดยตารางที่ 3 และรูปที่ 11 แสดงค่าความสูญเสียในกรณีต่างๆโดยการเปลี่ยนค่าของดัชนีหักเหของ index matching gel ผู้วิจัยพบว่าค่าของ lateral misalignment loss จะมีค่าคงที่ ดังนั้นค่าของดัชนีหักเหของ index matching gel จึงไม่ส่งผลกับ lateral misalignment loss อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหของ index matching gel กับ Fresnel loss พบว่าถ้าเราเพิ่มค่าดัชนีหักเหจาก 1.452-1.458 ค่าของ Fresnel loss จะมีค่าลดลง แต่เมื่อเราเพิ่มค่าดัชนีหักเหจาก 1.458-1.465 พบว่าค่าของ Fresnel loss จะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง และในส่วนของค่าความสูญเสียโดยรวม (total loss) ของการเชื่อมต่อเชิงกลสำหรับกรณีนี้ จะคำนวณจากผลรวมของ Fresnel loss กับ lateral misalignment loss ดังนั้นแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของค่าความสูญเสียโดยรวมจะสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่า Fresnel loss ด้วยเหตุผลดังกล่าวเราสามารถสรุปได้ว่า ค่าดัชนีหักเหของ index matching gel ที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขของการเชื่อมต่อเชิงกลในกรณีนี้ มีค่าเท่ากับ 1.458 ซึ่งจะมีเท่ากับค่าของดัชนีหักเหที่คำนวณจากการสมการ $n_{gel} = \sqrt{1.452 \times 1.465} = 1.458$



รูปที่ 11 ค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อเชิงกล ในกรณีที่มีค่าดัชนีหักเหของ index matching gel มีค่า 1.452 ถึง 1.465 โดยคำนวณที่ความยาวคลื่น 1.55 μm และ $x = 1 \mu\text{m}$

ตารางที่ 3 ตารางค่าความสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดจากการเชื่อมต่อเชิงกลในกรณีที่มีค่าดัชนีหักเหของ index matching gel มีค่า 1.452-1.465 โดยคำนวณที่ความยาวคลื่น 1.55 μm และ $x = 1 \mu\text{m}$

ดัชนีหักเหของเจล	Fresnel loss (dB)	Lateral misalignment loss (dB)	Total loss (dB)
1.452	0.0000863	1.5404000	1.5404863
1.453	0.0000826	1.5404000	1.5404826
1.454	0.0000798	1.5404000	1.5404798
1.455	0.0000776	1.5404000	1.5404776
1.456	0.0000761	1.5404000	1.5404761
1.457	0.0000752	1.5404000	1.5404752
1.458	0.0000749	1.5404000	1.5404749
1.459	0.0000751	1.5404000	1.5404751
1.46	0.0000759	1.5404000	1.5404759
1.461	0.0000771	1.5404000	1.5404771
1.462	0.0000788	1.5404000	1.5404788
1.463	0.0000809	1.5404000	1.5404809
1.464	0.0000834	1.5404000	1.5404834
1.465	0.0000863	1.5404000	1.5404863

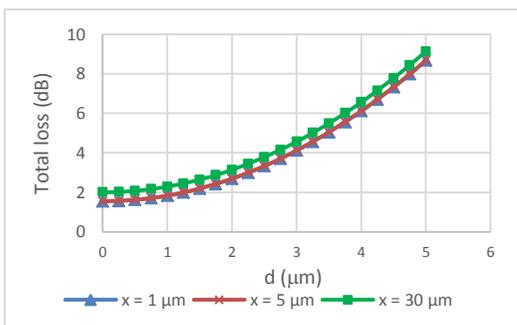
3.3 การวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปร d จากกรณีที่เกิด axial misalignment ที่มีต่อค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อเชิงกล

สำหรับการศึกษาในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดให้ระยะ x นี้มีค่าเท่ากับ 1, 5 และ 30 μm และเป็นการเชื่อมต่อเชิงกลที่ไม่เกิดการเอียงศูนย์แบบ angular misalignment โดยดัชนีหักเหของ index matching gel มีค่าเท่ากับ 1.458 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 3.2 โดยในส่วนของค่าความสูญเสียโดยรวมของการเชื่อมต่อเชิงกลในกรณีนี้จะคำนวณจากผลรวมของ Fresnel loss และ lateral misalignment loss และ axial misalignment loss โดยพิจารณาตัวแปร d มีค่า 0-5 μm ซึ่งจากรูปที่ 12 พบว่าสำหรับทุก ๆ เงื่อนไขของระยะ x ค่าความ

สูญเสียโดยรวมที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า d เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เมื่อ $x = 1$ และ 5 μm ค่าความสูญเสียโดยรวมสำหรับทุกค่าของ d จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากเป็นช่วงที่อิทธิพลของระยะ x ที่มีต่อค่าความสูญเสียโดยรวมน้อยมาก โดยเมื่อ d มีค่า 0 μm ค่าความสูญเสียโดยรวมมีค่าเท่ากับ 1.5404 dB สำหรับ $x = 1 \mu\text{m}$ และ 1.5532 dB สำหรับ $x = 5 \mu\text{m}$ และเมื่อ d มีค่า 5 μm ค่าความสูญเสียโดยรวมมีค่าเท่ากับ 8.6659 dB สำหรับ $x = 1 \mu\text{m}$ และ 8.6787 dB สำหรับ $x = 5 \mu\text{m}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อ $x = 30 \mu\text{m}$ อิทธิพลของระยะ x ที่มีต่อค่าความสูญเสียโดยรวมเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อ d มีค่า 0 μm ค่าความสูญเสียโดยรวมมีค่าเท่ากับ 1.9969 dB และเมื่อ d มีค่า 5 μm ค่าความสูญเสียโดยรวมมีค่าเท่ากับ 9.1224

dB ตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 8 จะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าของระยะ x จาก 0 เป็น 5 μm (ในกรณีที่ d มีค่าเท่ากับ 0 μm) ค่าความสูญเสียโดยรวม (total loss) จะเพิ่มค่าจาก 1.5399 dB เป็น 1.5532 dB ซึ่งค่าความสูญเสียโดยรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียง 0.0133 dB ในขณะที่เมื่อทำการเพิ่มค่าของระยะ d จาก 0 เป็น 5 μm (ในกรณีที่ x มีค่าเท่ากับ 1 μm) ค่าความสูญเสียโดยรวมจะมีค่าเพิ่มถึง 7.1255 dB ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่าการเกิดการเอียงศูนย์แบบ axial misalignment จะส่งผลต่อการเพิ่มค่าความสูญเสียโดยรวมมากกว่าการเอียงศูนย์แบบ lateral misalignment ด้วยระยะห่างที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดการเอียงศูนย์แบบ axial misalignment จะส่งผลให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของ mode field ระหว่างปลายเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดที่บริเวณที่เราทำการเชื่อมต่อมากกว่า และทำให้ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณแสงลดต่ำลง ส่งผลให้การเพิ่มค่าของความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อเชิงกลมีค่ามากกว่าตามลำดับ

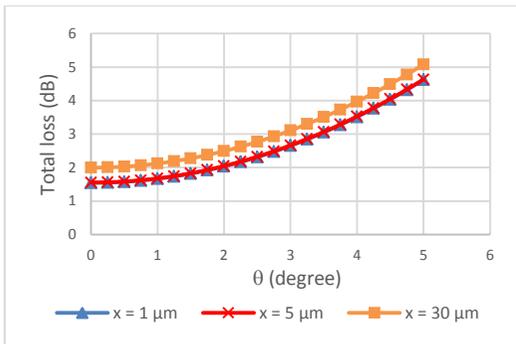


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร d และค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อเชิงกลจากกรณี axial misalignment โดย d มีค่า 0-5 μm

3.4 การวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปร θ ในกรณี angular misalignment ที่มีต่อค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อเชิงกล

หัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปร θ ที่เกิดขึ้นในกรณีของการเอียงศูนย์แบบ angular misalignment ที่มีต่อค่าความสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิด โดยผู้วิจัยได้กำหนดให้ระยะ x นี้มีค่าเท่ากับ 1, 5 และ 30 μm และเป็นการเชื่อมต่อเชิงกลที่ไม่เกิดการเอียงศูนย์แบบ axial misalignment โดยมีค่าดัชนีหักเหของเจลเท่ากับ 1.458 และในส่วนของค่าความสูญเสียโดยรวมของการเชื่อมต่อเชิงกลสำหรับกรณีนี้จะคำนวณจากผลรวมของ Fresnel loss และ lateral misalignment loss และ angular misalignment loss โดยกำหนดให้ตัวแปร θ มีค่า 0-5 ° ดังแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งจากรูปพบว่าค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า θ เพิ่มขึ้น และเมื่อ $x = 1$ และ 5 μm ค่าความสูญเสียโดยรวมสำหรับทุกค่าของ θ จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากเป็นช่วงที่อิทธิพลของระยะ x ที่มีต่อค่าความสูญเสียโดยรวมน้อยมาก โดยเมื่อ θ มีค่าเท่ากับ 0 ° ค่าความสูญเสียโดยรวมมีค่าเท่ากับ 1.5404 dB สำหรับ $x = 1 \mu\text{m}$ และ 1.5532 dB สำหรับ $x = 5 \mu\text{m}$ และเมื่อ θ มีค่า 5 ° ค่าความสูญเสียโดยรวมมีค่าเท่ากับ 4.6198 dB สำหรับ $x = 1 \mu\text{m}$ และ 4.6326 dB สำหรับ $x = 5 \mu\text{m}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อ $x = 30 \mu\text{m}$ อิทธิพลของระยะ x ที่มีต่อค่าความสูญเสียโดยรวมเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อ θ มีค่า 0 ° ค่าความสูญเสียโดยรวมมีค่าเท่ากับ 1.9969 dB และเมื่อ θ มีค่า 5 ° ค่าความสูญเสียโดยรวมมีค่าเท่ากับ 5.0762 dB ตามลำดับ ดังนั้นเราจึงสามารถสรุปได้ว่าการเอียงศูนย์แบบ angular misalignment ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณแสงสำหรับการเชื่อมต่อ

เชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิด



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร θ และค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อเชิงกลจากกรณี angular misalignment โดย θ มีค่า 0-5 °

3.5 การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อเชิงกลภายใต้เงื่อนไขการเกิดการเอียงศูนย์ต่าง ๆ

หัวข้อนี้ผู้วิจัยจะยกตัวอย่างการคำนวณค่าความสูญเสียภายใต้เงื่อนไขการเอียงศูนย์ต่าง ๆ ในเวลาเดียวกัน 9 กรณี และแสดงค่าความสูญเสียโดยรวมในตารางที่ 4 จากตารางพบว่าถ้าการเกิด misalignment แต่ละชนิดเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าความสูญเสียโดยรวมเพิ่มมากขึ้นด้วย นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบอิทธิพลระหว่าง lateral misalignment กับ axial misalignment จากการเพิ่มค่าของระยะ x (μm) และ ตัวแปร d (μm) ที่เท่ากัน พบว่า lateral misalignment จะส่งผลต่อค่าความสูญเสียโดยรวมน้อยกว่า axial misalignment เช่น เมื่อเราเปรียบเทียบค่าจากเงื่อนไขที่ 1 และเงื่อนไขที่ 5 การเพิ่มค่า x จาก 1 เป็น 5 μm โดยคงค่าของตัวแปร d และตัวแปร θ ให้มีค่าเท่ากัน จะทำให้ค่าของความสูญเสียโดยรวมเพิ่มจาก 1.9489 เป็น 1.9617 dB ซึ่งค่าความแตกต่างของความสูญเสียโดยรวมมีเพียง 0.0128 dB ในขณะที่

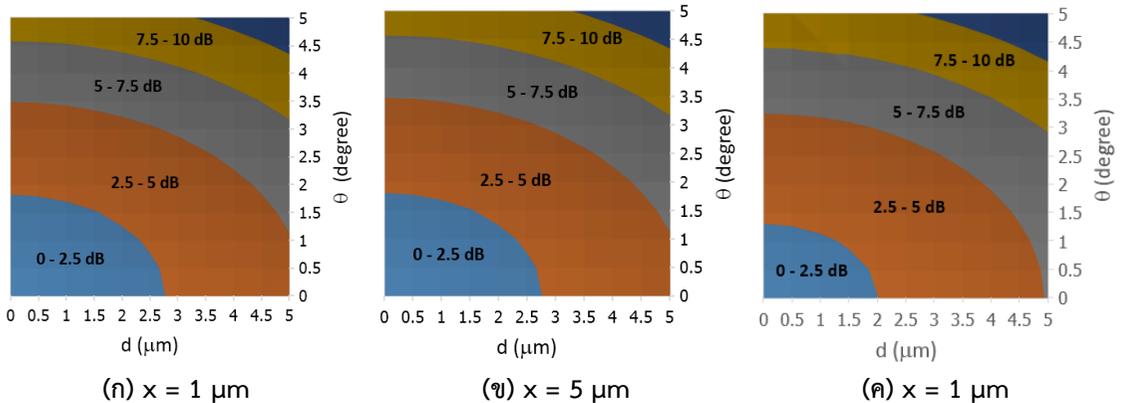
ถ้าเราเปรียบเทียบเงื่อนไขที่ 1 กับเงื่อนไขที่ 3 การเพิ่มค่า d จาก 1 เป็น 5 μm โดยคงค่าของตัวแปร x และตัวแปร θ ให้มีค่าเท่ากัน จะทำให้ค่าของความสูญเสียโดยรวมเพิ่มจาก 1.9489 เป็น 8.7894 dB ซึ่งค่าความแตกต่างของความสูญเสียโดยรวมมีมากถึง 6.8405 dB นอกจากนี้อิทธิพลของ angular misalignment ที่มีต่อค่าความสูญเสียโดยรวมก็มีมากเช่นกัน ดังนั้นในการเชื่อมต่อด้วยการหลอมนั้น เราจึงต้องระวังไม่ให้เกิดการเอียงศูนย์แบบ axial misalignment และ angular misalignment แต่ในส่วนของ lateral misalignment นั้น ถ้าระยะ x มีค่าน้อยกว่า 5 μm และมีการใช้เจลที่มีค่าดัชนีหักเหที่เหมาะสมแล้ว อิทธิพลของระยะ x ที่มีต่อความสูญเสียโดยรวมก็จะมีน้อยมากเมื่อเทียบกับ axial misalignment และ angular misalignment

รูปที่ 14 เป็นรูปที่แสดงภาพ contour plot ของค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากภายใต้เงื่อนไขการเอียงศูนย์แบบ angular misalignment และ axial misalignment พร้อมกัน ในกรณีที่ตัวแปร x มีค่าเท่ากับ 1, 5, และ 30 μm จากรูปทำให้เรารู้ถึงขอบเขตของการเกิดการเอียงศูนย์แต่ละชนิดที่ทำให้ค่าความสูญเสียโดยรวมอยู่ในช่วง 0-2.5, 2.5-5, 5-7.5, 7.5-10 และมากกว่า 10 dB และจากรูป 14ก และ 14ข พบว่าอิทธิพลของตัวแปร x ยังส่งผลต่อค่าความสูญเสียโดยรวมมีค่าน้อยมาก เงื่อนไขของการเอียงศูนย์แบบ angular misalignment และ axial misalignment เดียวกัน ทำให้ได้ช่วงของค่าความสูญเสียโดยรวมใกล้เคียงกัน เช่น

กรณีที่ค่าความสูญเสียโดยรวมอยู่ในช่วง 0-2.5 dB จากทั้งสองรูปนั้น (1) ค่า d จะมีค่าใกล้เคียงกันคือต้องไม่เกิน 2.75 μm ในกรณีที่ไม่มีเกิด angular misalignment (หรือ $\theta = 0^\circ$) และ (2) ค่า θ จะมีค่าใกล้เคียงกันคือต้องไม่เกิน 1.8 ° ในกรณีที่ไม่มีเกิด axial

ตารางที่ 4 ค่าความสูญเสียโดยรวมภายใต้เงื่อนไขการเกิดการเอียงศูนย์ต่าง ๆ

Lateral misalignment x (µm)	Axial misalignment d (µm)	Angular misalignment θ (degree)	ค่าความสูญเสียโดยรวม (dB)
1	1	1	1.9489
1	1	5	4.9048
1	5	1	8.7894
1	5	5	11.7453
5	1	1	1.9617
5	1	5	4.9617
5	5	1	8.8022
5	5	5	11.7581



รูปที่ 14 ภาพ contour plot ของค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจาก angular misalignment และ axial misalignment พร้อมกัน ในกรณีที่ตัวแปร x มีค่าเท่ากับ 1, 5 และ 30 µm

misalignment (หรือ $d = 0 \mu\text{m}$) และ (3) ค่า d จะมีค่าใกล้เคียงกันคือต้องไม่เกิน $1.5 \mu\text{m}$ และค่า θ จะมีค่าใกล้เคียงกันคือต้องไม่เกิน 1.5° ในกรณีที่เกิด angular misalignment และ axial misalignment พร้อมกัน

อย่างไรก็ตาม เมื่อค่าของ x เท่ากับ $30 \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 14ค ค่าความสูญเสียที่เกิดจากอิทธิพลของ lateral misalignment จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นขอบเขตของการเกิดการเอียงศูนย์แต่ละชนิดที่

ทำให้ค่าความสูญเสียโดยรวมอยู่ในช่วง 0-2.5, 2.5-5, 5-7.5, 7.5-10 และมากกว่า 10 dB จะเปลี่ยนไป โดยค่าของ d และ θ จะมีค่าลดลง เช่น

กรณีที่ค่าความสูญเสียโดยรวมอยู่ในช่วง 0-2.5 dB นั้น (1) ค่า d จะมีค่าไม่เกิน $2 \mu\text{m}$ ในกรณีที่ไม่เกิด angular misalignment (หรือ $\theta = 0^\circ$) และ (2) ค่า θ จะมีค่าไม่เกิน 1.3° ในกรณีที่ไม่เกิด axial misalignment (หรือ $d = 0 \mu\text{m}$) และ (3) ค่า d จะมีค่าไม่เกิน $1 \mu\text{m}$ และค่า θ จะมีค่าไม่เกิน 1.11° ใน

กรณีที่เกิด angular misalignment และ axial misalignment พร้อมกัน

4. สรุป

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF-28 และ MP980 โดยผู้วิจัยพบว่าในการเชื่อมต่อเชิงกลนั้น การเกิดการเอียงศูนย์แบบ lateral misalignment เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้เนื่องจากเราจำเป็นต้องมีการวางระยะห่างระหว่างปลายของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดในแนวนอน (หรือระยะ x) เพื่อบรรจุ index matching gel ซึ่งค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากกรณี lateral misalignment มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าของ x เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม หากระยะ x มีค่าน้อยกว่า $5 \mu\text{m}$ อิทธิพลของตัวแปร x ยังส่งผลต่อค่าความสูญเสียโดยรวมมีค่าน้อยมาก และในกรณีที่ระยะ $x = 0 \mu\text{m}$ ที่ความยาวคลื่น $1.55 \mu\text{m}$ ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อเชิงกลมีค่าเท่ากับ 1.5399 dB ซึ่งค่าความสูญเสียดังกล่าวเป็นค่าความสูญเสียที่เกิดจากความไม่ต่อเนื่องของขนาด mode field ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดเท่านั้น และในส่วนของค่าดัชนีหักเหที่เหมาะสมของ index matching gel ที่ทำให้ค่าความสูญเสียโดยรวมมีค่าต่ำที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้นั้น จะมีค่าเท่ากับ 1.458 ซึ่งจะมีเท่ากับค่าเฉลี่ยของดัชนีหักเหของ core ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิด

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังพบว่าค่าความสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนแบบเฟรสเนลระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด กับ index matching gel จะมีค่าต่ำมากและใกล้เคียงกับ 0 dB และในกรณีที่เกิดการเอียงศูนย์แบบ axial misalignment กับ angular misalignment นั้น หากตัวแปร d และตัวแปร θ มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการ

เชื่อมต่อเชิงกลของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างมาก และการเอียงศูนย์แบบ axial misalignment จะส่งผลต่อค่าความสูญเสียโดยรวมมากกว่าการเอียงศูนย์แบบ lateral misalignment ในระยะที่เท่ากัน ดังนั้นในกรณีที่เราต้องการให้ค่าความสูญเสียโดยรวมมีค่าต่ำที่สุด เราต้องทำให้ไม่เกิดการเอียงศูนย์ทั้งสองชนิด กล่าวคือ ตัวแปร d มีค่าเท่ากับ $0 \mu\text{m}$ และตัวแปร θ มีค่าเท่ากับ 0° ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้เราจะทำการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วทั้งสองชนิดโดยไม่เกิดการเอียงศูนย์แบบ lateral misalignment, axial misalignment และ angular misalignment ผู้วิจัยพบว่าค่าความสูญเสียโดยรวมยังมีค่าสูงถึง 1.5399 dB ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าค่าที่ได้ในการคำนวณค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อเชิงกลทั่วไปซึ่งอยู่ระหว่าง $0.7-1.5 \text{ dB/connector}$ เล็กน้อย ดังนั้นผู้วิจัยจะทำการนำเสนอวิธีการลดค่าความสูญเสียโดยรวมจากการปรับโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิด เพื่อลดค่าความแตกต่างของ mode field ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดในอนาคตต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ภายใต้ “ทุนวิจัยเพื่อพัฒนาสิ่งประดิษฐ์” ตามสัญญาเลขที่ สป 9/2556

7. รายการอ้างอิง

- [1] Kihara, M., Naganob, R., Izumitab, H. and Toyonagaa, M., 2012, Unusual fault detection and loss analysis in optical fiber connections with refractive index matching material, Optical Fiber Technol.

- 18(3): 167-175.
- [2] Kihara, M., Yajima, Y. and Watanabe, H., 2013, Analyzing deterioration in optical performance of fiber connections with refractive Index matching material using incorrectly cleaved fiber ends, *IEICE Trans. Commun.* E96-B(9): 2206-2212.
- [3] Abe, Y., Hoshijima, T., Matsui, T. and Tomita, S., 2009, Optical characteristics and reliability of mechanical splice utilizing solid refractive index matching material for hole-assisted fiber connection, *IEEE Photo. Technol. Lett.* 21(4): 194-196.
- [4] Marcuse, D., 1977, Loss analysis of single-mode fiber splices, *Bell Syst. Tech. J.* 56(5): 703-718.
- [5] *Glossary of Optical Fiber Terminology and Technologies*, 2012, Mechanical Splice, *Fiber-Optics.Info*, Available source: http://www.fiberoptics.info/fiber_optic_glossary/mechanical_splice, March 25, 2012.
- [6] Wang, B.S. and Mies, E.W., 2007, Advanced topics on fusion splicing of specialty fibers and devices, *Soc. Photo Opt. Instrum. Eng.* APOC: 1-14.
- [7] Ratuszek, M., 2007, Loss analysis of single mode telecommunication fiber thermally-diffused core area, *Opt. Appl.* 37(3): 279-294.
- [8] Farsinezhad, S. and Seraji, F.E., 2012, Analysis of fresnel loss at splice joint between single-mode fiber and photonic crystal fiber, *Int. J. Opt. Appl. Sci. Acad. Publish.* 2(1): 17-21
- [9] Nye Optical Products, 2012, Optical Gels for Fiber-Optic Connectors and Splices—A Tutorial, Nye Lubricants, Inc., U.S.A., Available source: <http://www.anthone.fr/sites/www.anthone.fr/files/upload/documents/NyeApplicationsFibresOptiques.pdf>, March 25, 2012.
- [10] Rastogi, P. and Hack, E., 2012, *Optical Methods for solid Mechanics: A Full-Field Approach*, John Wiley & Sons, 446 p.
- [11] Erbium-doped fibers for C-Band, 2005, MP980 and MP980 80 Specification sheet, Furukawa Electric North America, Inc., Peachtree City, G.A.