การลดค่าความสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว SMF-28 และ MP980

Fusion Splicing Loss Reduction of SMF-28 and MP980 Single Mode Optical Fibers

วรีรัตน์ อินทร์อาจ และวีรชัย อัศวเมธาพันธ์*

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

บทความนี้นำเสนอวิธีการลดค่าความสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว SMF-28 และ MP980 จากการใช้ matching mode field model และ phase-front transformer model โดยได้วิเคราะห์ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในกรณีต่าง ๆ ซึ่งพบว่าการเชื่อมต่อด้วยการหลอมของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด โดยไม่เกิดการเยื้องศูนย์แบบ axial misalignment กับ angular misalignment จะทำให้ค่าความสูญเสียโดยรวมมีค่าต่ำที่สุด หลังจากนั้นโครงสร้างใหม่ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด ได้ถูกนำเสนอ โดยการลดขนาดของรัศมีของ core ของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด MP980 จากค่ามาตรฐาน 1.46 μm เป็น 1.16 μm และเพิ่มขนาดของรัศมีของ core ของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF-28 จากค่ามาตรฐาน 4.1 μm เป็น 4.15 μm นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อด้วยการหลอมจะถูกลดจาก 10 วินาที เป็น 2 วินาที โดยอุณหภูมิในการเชื่อมต่อด้วยการหลอมมีค่า 2000 °C จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด และลดเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อด้วยการหลอมดังกล่าว ทำให้สามารถลดค่าความสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมได้โดยการใช้เทคนิคการเชื่อมต่อด้วยการหลอมมาตรฐาน โดยค่าความสูญเสียโดยรวมมีค่าลดลงจาก 0.9322 dB เป็น 0.0201 dB ซึ่งค่าความสูญเสียดังกล่าวเป็นค่าที่ยอมรับได้ในระบบการสื่อสารทางแสง

คำสำคัญ : ค่าความสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอม; เส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว; matching mode field model; phase-front transformer model

Abstract

This paper presents the fusion splicing loss reduction of SMF-28 and MP980 single mode optical fibers by using matching mode field model and phase-front transformer model. Here, the

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

DOI 10.14456/tstj.2017.28

analysis of the fusion splicing loss under various conditions are obtained. It is found that, the lowest total fusion splicing loss can be achieved under the splicing condition without axial misalignment and angular misalignment. Then, the new structure of both single mode optical fibers are proposed by decreasing the core radius of MP 980 optical fiber from the standard value of 1.46 μm to 1.16 μm, and increasing the core radius of SMF-28 optical fiber from the standard value of 4.1 μm to 4.15 μm, respectively. Furthermore, a fusion splicing time is decreased from 10 second to 2 second, a fusion splicing temperature is equal to 2000 ℃. By the structure adjustment of both single mode optical fibers and the fusion splicing time reduction, the total fusion splicing loss reduction using standard fusion splicing technique can be obtained. Here, the total fusion splicing loss is decreased from 0.9322 dB to 0.0201 dB. And the value of this total fusion splicing loss is acceptable for an optical communication system.

Keywords: fusion splicing loss; single mode optical fiber; matching mode field model; phase-front transformer model

1. บทนำ

ปัจจุบันนี้ในระบบการสื่อสารทางแสงจะมีการส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแก้วนำแสง (optical fiber) โดยข้อดีของการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงมีหลายประการ เช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่สามารถรบกวนสัญญาณแสงได้เนื่องจากโฟตอนไม่มีประจุไฟฟ้า นอกจากนี้สัญญาณแสงมีการสูญเสียสัญญาณที่ต่ำกว่าสัญญาณไฟฟ้าทำให้ใช้ตัวทวนสัญญาณน้อยกว่า ทำให้สามารถส่งสัญญาณแสงได้ในระยะทางที่ไกลกว่าอีกด้วย อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานของเส้นใยแก้วนำแสงบางประการ จำเป็นจะต้องใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่มีความยาวมาก ๆ ดังนั้นการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงจึงมีความจำเป็นในกรณีดังกล่าว ซึ่งการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงด้วยการหลอมเป็นที่นิยมมากในการส่งสัญญาณแสงในระยะไกล เนื่องจากเป็นวิธีเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงแบบถาวร อย่างไรก็ตามการเชื่อมต่อดังกล่าวนั้นทำให้เกิดค่าความสูญเสียขึ้น โดยการสูญเสียจะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองที่ถูกเชื่อมต่อด้วยการหลอม นอกจากนี้หากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมของเส้นใยแก้วนำแสงที่มีโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงและเงื่อนไขในการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงที่ไม่เหมาะสมนั้น ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ยอมรับได้ในในระบบการสื่อสารทางแสง เส้นใยแก้วนำแสงที่ผ่านกระบวนการหลอมนั้นก็ไม่สามารถนำใช้งานได้ ทำให้เกิดความสูญเสียของต้นทุนการผลิตเส้นใยแก้วนำแสงได้

โดยทั่วไปค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อนั้นจะเกิดจากการที่ขนาดของ mode field ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด มีค่าไม่เท่ากัน รวมทั้งระหว่างการเชื่อมต่อด้วยการหลอมนั้นเกิดการเยื้องศูนย์แบบ angular misalignment หรือเกิดระยะของ core offset (หรือเกิดการเยื้องศูนย์แบบ axial misalignment) [1] ดังนั้นที่ผ่านมางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดค่าความสูญเสียที่เกิดการจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมนั้น จะทำภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เกิดการเยื้องศูนย์แบบใด ๆ [1] และผู้วิจัยส่วนใหญ่พยายามที่จะลดค่าความแตกต่างของขนาดของ mode field

ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด โดยใช้วิธีการเชื่อมต่อด้วยการหลอมที่ซับซ้อนต่าง ๆ เช่น Martínez-Rios และคณะ [2] ได้วิจัยเกี่ยวกับการลดค่าความสูญเสียที่เกิดจากเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงสองชนิดที่มีขนาดของ core และ mode field diameter ที่แตกต่างกัน โดยก่อนการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงเข้าด้วยกัน จะมีการให้ความร้อนที่ปลายของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด แล้วบีบ core ของเส้นใยแก้วนำแสงฝั่งที่มีขนาดใหญ่กว่าให้แคบลง และยืด core ของเส้นใยแก้วนำแสงฝั่งที่มีขนาดเล็กกว่าให้ใหญ่ขึ้น แล้วจึงเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด เข้าด้วยกัน จากการใช้วิธีการเชื่อมต่อดังกล่าวทำให้สามารถลดค่าความสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงชนิด DS/SMF และ SMF28 ให้มีค่าเท่ากับ 0.13 dB และยังสามารถลดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงชนิด 980HP และ SMF28 ให้มีค่าเท่ากับ 0.09 dB ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังมีการวิจัยเกี่ยวกับการลดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงชนิดใหม่ที่เรียกว่า photonic-crystal fibers (PCFs) กับเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (single mode optical fiber) พื้นฐานชนิดต่าง ๆ เช่น Zhu และคณะ [3] ได้ปล่อยก๊าซ N_2 ที่มีค่าความดันที่เหมาะสมเข้าไปยังในส่วนของ air holes ของ photonic-crystal fibers ระหว่างการเชื่อมต่อ เพื่อป้องกันการยุบตัวลงของ air holes ซึ่งจะส่งผลให้ขนาด mode field ระหว่าง photonic-crystal fibers และเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น ซึ่งจากการใช้วิธีดังกล่าวทำให้ค่าความสูญเสียมีค่าลดลงเท่ากับ 0.4 dB นอกจากนี้ Zhou และคณะ [4] ได้ใช้เทคนิคในการสร้าง taper rig จากการให้ความร้อนในส่วนต่าง ๆ ของ photonic-crystal fibers ด้วยเวลาที่ต่างกันก่อนที่จะนำไปเชื่อมต่อ เพื่อควบคุมขนาดของ air holes ของ photonic-crystal fibers ให้มีขนาดที่เล็กลงเรื่อย ๆ จนที่ตำแหน่งปลายของ photonic-crystal fibers นั้น air holes มีการยุบตัวลง 75 % ทำให้ขนาดของ mode field มีค่าใกล้เคียงกับเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ค่าความสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อมีค่าลดลงจาก 3.57 dB เป็น 0.64 dB ซึ่งเทคนิคในการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วที่ได้นำเสนอในงานวิจัยเหล่านี้ ล้วนแต่มีความยุ่งยากและซับซ้อนมากกว่าเทคนิคมาตรฐานที่ใช้ในการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงเป็นอย่างมาก

บทความนี้จึงนำเสนอการลดค่าความสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวสองชนิด โดยยังคงใช้เทคนิคการเชื่อมต่อด้วยการหลอมแบบมาตรฐานที่ไม่ซับซ้อนเพียงขั้นตอนเดียว กล่าวคือ เพียงแค่ให้ความร้อนที่ปลายของเส้นใยแก้วนำแสงให้หลอมแล้วเชื่อมต่อกันโดยตรงด้วยการใช้เครื่องเชื่อมสายเส้นใยแก้วนำแสง (fusion splicer) ทั่วไปที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาการลดค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF-28 และ MP980 ซึ่งเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด เป็นเส้นใยแก้วนำแสงที่นิยมใช้ในเทคโนโลยีการสื่อสารทางแสงโดยใช้ในส่วนของการขยายสัญญาณด้วยเทคนิค EDFA (erbium-doped fiber amplifier) ของสถานีทวนสัญญาณ (repeater station) โดยบทความนี้จะเป็นการนำแนวคิดเบื้องต้นที่เคยได้นำเสนอในงานประชุมวิชาการ [5-7] มาศึกษาและวิเคราะห์เพิ่มเติมในประเด็นที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ เพื่อลดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อเพิ่มเติมจากที่เคยได้นำเสนอจากการนำ matching mode field model และ phase-front transformer model มาใช้ในการคำนวณค่าความสูญเสียดังกล่าว [8-11] และวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าความสูญเสีย หลังจาก

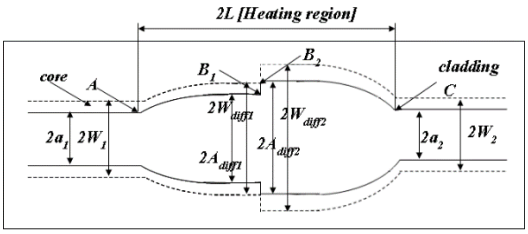
นั้นได้นำเสนอโครงสร้างใหม่ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด ด้วยการเปลี่ยนแปลงเพียงแค่ขนาดของ core ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด เพื่อลดค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อ และนำเสนอเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด เพื่อนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวด้วยการหลอมต่อไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ค่าความสูญเสียที่เหมาะสมจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01-0.3 dB

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

2.1 การเชื่อมต่อด้วยการหลอมแบบมาตรฐานของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว

การเชื่อมต่อด้วยวิธีการหลอมแบบมาตรฐานเป็นวิธีการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงสองเส้นด้วยการให้ความร้อนที่บริเวณปลายของเส้นใยแก้วนำแสง โดยความร้อนดังกล่าวมาจากประกายไฟที่เกิดจากการอาร์กระหว่างขั้วอิเล็กโทรดภายในเครื่องเชื่อมสายเส้นใยแก้วนำแสง (fusion splicer) หลังจากนั้นในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อด้วยการหลอมของเส้นใยแก้วนำแสง (หรือ heating region) เส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองฝั่งจะมีการขยายตัวและอ่อนตัวจากการได้รับพลังงานความร้อน จากนั้นปลายเส้นใยแก้วก็จะถูกดันมาเชื่อมต่อกันจนเย็นตัวลงในที่สุด ซึ่งการเชื่อมต่อในลักษณะนี้เป็นการเชื่อมต่อแบบถาวร เส้นใยแก้วนำแสงที่เชื่อมต่อกันแล้วดูเสมอว่าเป็นเส้นเดียวกัน โดยรูปที่ 1 แสดงถึงโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวทั้งสองฝั่งในกรณีที่ heating region มีระยะเท่ากับ 2L จากรูปพบว่าเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองเส้นมีคุณลักษณะสมมาตรตามแนวยาว โดยตัวห้อยของตัวแปรต่าง ๆ ที่แสดงในรูปนั้น หมายเลข 1 หมายถึง ตัวแปรดังกล่าวเป็นของเส้นใยแก้วนำแสงทางด้านซ้ายมือ และหมายเลข 2 หมายถึง ตัวแปรดังกล่าวเป็นของเส้นใยแก้วนำแสงทางด้านขวามือ [9,10]

จากรูปที่ 1 พบว่า a_1 และ a_2 คือ ค่าของรัศมีของ core ของเส้นใยแก้วนำแสง W_1 และ W_2 คือ ค่ารัศมีของ mode field ของเส้นใยแก้วนำแสงทางด้านซ้ายมือและขวามือตามลำดับ ซึ่งค่ารัศมีทั้ง 2 ชนิด เป็นค่ารัศมีของเส้นใยแก้วนำแสงที่อยู่นอก heating region ซึ่งเป็นค่ารัศมีที่เส้นใยแก้วนำแสงยังไม่มีการขยายตัวจากการได้รับความร้อน นอกจากนี้สำหรับการเชื่อมต่อด้วยวิธีการหลอมนั้น heating region เป็นบริเวณที่เส้นใยแก้วนำแสงมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเฉพาะจากการได้รับความร้อน โดย W_{diff1} และ W_{diff2} คือ ค่ารัศมีของ mode field ของเส้นใยแก้วนำแสงที่ขยายตัวภายใน heating region หลังจากการเชื่อมต่อ และ A_{diff1} และ A_{diff2} คือ ขนาดรัศมีของ core ของเส้นใยแก้วนำแสงที่ขยายตัวภายใน heating region หลังจากการเชื่อมต่อ ทางด้านซ้ายมือและขวามือตามลำดับ



รูปที่ 1 โครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวในกรณีที่ heating region มีระยะเท่ากับ 2L [9,10]

2.2 ค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว

2.2.1 ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นตาม matching mode field model

matching mode filed model [8-10]

เป็นการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายค่าความสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว โดยพิจารณาจากค่าความแตกต่างระหว่างขนาดรัศมีของ mode field ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด ในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อ ทั้งนี้ในการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีนี้ จะกำหนดให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวเป็นแบบ fundamental mode สำหรับค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงด้วยการหลอมดังแสดงในรูปที่ 1 โดยเกิดขึ้นตาม matching mode field model สามารถคำนวณจากสมการ

$$A_M = -10log\left[\left(\frac{2W_{diff1}W_{diff2}}{W_{diff1}^2+W_{diff2}^2}\right)^2\right] \quad (1)$$

เมื่อ A_M คือ ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อของเส้นใยแก้วนำแสงตาม matching mode field model (dB); W_{diff1}, W_{diff2} คือ ขนาดรัศมีของ mode field หลังจากการเชื่อมต่อของเส้นใยแก้วนำแสงที่ขยายตัวจากความร้อนภายในบริเวณที่ถูกเชื่อมต่อด้วยการหลอม (μm) ของเส้นใยแก้วนำแสงทางด้านซ้ายมือและขวามือตามลำดับ โดย W_{diff} ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองฝั่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$W_{diff} = A_{diff}/\sqrt{lnV} \quad (2)$$

เมื่อ A_{diff} คือ ขนาดของรัศมีเส้นใยแก้วนำแสงในบริเวณที่ถูกเชื่อมต่อด้วยการหลอม (μm) ซึ่งจะมีการขยายตัวด้วยความร้อนจากค่ารัศมี a โดย A_{diff} คำนวณได้จากสมการ

$$A_{diff} = \sqrt{a^2 + 4Dt} \quad (3)$$

โดย a คือ รัศมีของเส้นใยแก้วนำแสง (μm) ในบริเวณที่ไม่ได้เชื่อมต่อหรือไม่ได้รับความร้อน; t คือเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง (sec); D คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเจือปนภายในแท่งแก้ว (m^2/s); V คือ ค่า normalized frequency

ดังนั้นจากสมการที่ (1) พบว่าถ้าเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด มีค่ารัศมีของ mode field ของเส้นใยแก้วนำแสงที่ขยายตัวจากความร้อนภายในบริเวณที่ถูกเชื่อมต่อด้วยการหลอมเท่ากัน จะทำให้ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 0 dB

2.2.2 ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นตาม phase-front transformer model

phase-front transformer model [8-10] เป็นการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาค่าความสูญเสียเชิงแสงที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงสองเส้นที่มีความสม่ำเสมอของสารเจือปนของเส้นใยแก้วนำแสงที่ต่างกัน โดยเฉพาะบริเวณที่การเชื่อมต่อของเส้นใยแก้วนำแสงดังแสดงในตำแหน่ง A, B1, B2, และ C ในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นบริเวณที่หน้าคลื่นของแสงมีการเปลี่ยนแปลงจากการขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 เส้น อันเนื่องมาจากความร้อนที่ใช้ในการหลอม สำหรับค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากทฤษฎีนี้ สามารถคำนวณจากสมการ

$$A_f = -10\log T_f \quad (4)$$

โดย T_f คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่าน (transmission coefficient) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$T_f = T_A T_{B1} T_{B2} T_C \quad (5)$$

และ

$$T_A = \left\{1 + \left[\frac{1}{2}(\gamma_{max1} - 1)\frac{\pi n_{r1} W_1^2}{\lambda L}\right]^2\right\}^{-1} \quad (6)$$

$$T_C = \left\{1 + \left[\frac{1}{2}(\gamma_{max2} - 1)\frac{\pi n_{r2} W_2^2}{\lambda L}\right]^2\right\}^{-1} \quad (7)$$

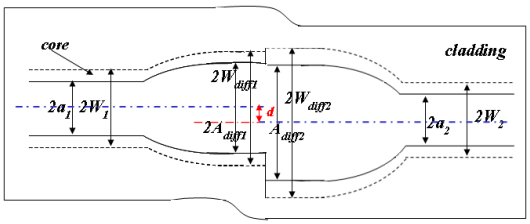
$$T_{B1} = \left\{1 + \left[\gamma_{max1}(\gamma_{max1} - 1)\frac{\pi n_{r1} W_1^2}{\lambda L}\right]^2\right\}^{-1} \quad (8)$$

$$T_{B2} = \left\{1 + \left[\gamma_{max2}(\gamma_{max2} - 1)\frac{\pi n_{r2} W_2^2}{\lambda L}\right]^2\right\}^{-1} \quad (9)$$

โดย T_A, T_{B1}, T_{B2} และ T_C คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านบริเวณจุด A, B_1, B_2 และ C ดังแสดงในรูปที่ 1 ตามลำดับ; n_r คือค่าดัชนีหักเหของแสงบริเวณ

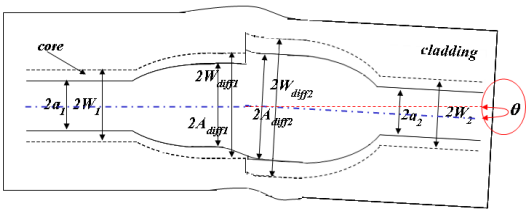
core ของเส้นใยแก้วนำแสง; γ_{max} คือค่าอัตราส่วนระหว่าง A_{diff} และ a ของเส้นใยแก้วนำแสง; W_1 และ W_2 คือ ขนาดรัศมีของ mode field ของเส้นใยแก้วนำแสง (μm) ทางด้านซ้ายมือและขวามือตามลำดับ; L คือ ระยะ1/2 ของบริเวณที่มีการเชื่อมต่อด้วยการหลอม (μm)

2.2.3 สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมของงานวิจัยนี้



รูปที่ 2 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงด้วยการหลอมเมื่อเกิดการเยื้องศูนย์แบบ axial misalignment

งานวิจัยนี้นอกเหนือจากความสูญเสียที่ได้อธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ 2.2.1-2.2.2 ยังมีความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมจากกรณีที่เกิดการเยื้องศูนย์แนวแกน (axial misalign-ment) ดังแสดงในรูปที่ 2 และกรณีที่เกิดการเยื้องศูนย์เชิงมุม (angular misalignment) ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยการคำนวณค่าความสูญเสียจากการเยื้องศูนย์ทั้ง 2 ชนิด เป็นการประยุกต์มาจากการใช้ matching mode filed model นั่นเอง



รูปที่ 3 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงด้วยการหลอมเมื่อเกิดการเยื้องศูนย์แบบ angular misalignment

ซึ่งเมื่อพิจารณารวมถึงผลกระทบที่เกิดจากการเยื้องศูนย์ทั้ง 2 ชนิด แล้ว สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความสูญเสียโดยรวม $(Loss_{Total})$ ที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมในงานวิจัยนี้ สามารถแสดงได้ในสมการที่ (10)

$$Loss_{Total} = A_M + A_f + 4.343\frac{2d^2}{W_{diff1}^2+W_{diff2}^2} + 4.343\left(\frac{2\pi n}{\lambda}\right)^2 \frac{\left(W_{diff1}W_{diff2}\right)^2}{2\left(W_{diff1}^2+W_{diff2}^2\right)} sin^2\left(\frac{\pi\theta}{180}\right) \quad (10)$$

โดย d คือ ค่าระยะเยื้องศูนย์แนวแกนที่เกิดจาก axial misalignment (μm); n คือ ดัชนีหักเหของแสงบริเวณ cladding ของเส้นใยแก้วนำแสงด้านที่เกิด angular Misalignment; θ คือ ค่าเยื้องศูนย์เชิงมุมที่เกิดจาก angular misalignment (degree); λ คือ ค่าความยาวคลื่นที่ใช้ส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด

ดังนั้นจากสมการที่ (10) เทอมที่ 1 (A_M) คือ ความสูญเสียที่เกิดขึ้นจาก matching mode field model ส่วนเทอมที่ 2 (A_f) คือ ความสูญเสียที่เกิดขึ้นจาก phase front transformer model ส่วนเทอมที่ 3 คือ ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อจากกรณี axial misalignment (หรือ axial misalignment loss) และเทอมที่ 4 คือ ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากกรณี angular misalign-ment (หรือ angular misalignment loss)

3. การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมในกรณีต่าง ๆ

3.1 การคำนวณค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจาก

Matching mode field model และ phase-front transformer model ในกรณีที่ไม่เกิดการเยื้องศูนย์ชนิดใด

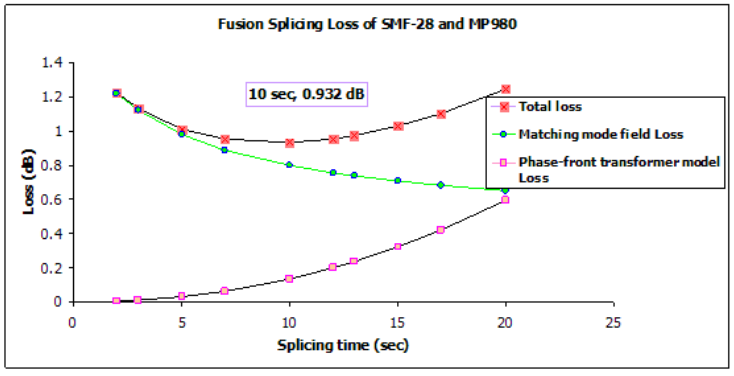
งานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาการเชื่อมต่อด้วยการหลอมของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวชนิด SMF-28 และ MP980 โดยเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด มีค่าสมบัติต่าง ๆ ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งจากตารางที่ 1 พบว่าค่าดัชนีหักเหของ core ของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF-28 และ MP980 มีค่าเท่ากับ 1.452 และ 1.465 ตามลำดับ ผู้วิจัยได้นำค่าสมบัติเฉพาะของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด จากตารางที่ 1 และเงื่อนไขที่ใช้ในการเชื่อมต่อด้วยการหลอมดังแสดงในตารางที่ 2 มาคำนวณค่าความสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมของเส้นใยแก้วนำแสง โดยกำหนดให้เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 20 วินาที รวมทั้งเป็นการเชื่อมต่อด้วยการหลอมในกรณีที่ไม่เกิดการเยื้องศูนย์ทั้งแบบ axial misalignment (หรือ d = 0 μm) และ angular misalignment (หรือ $\theta = 0^{\circ}$) ดังนั้นค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในหัวข้อนี้จะคำนวณจากเทอมที่ 1 และ 2 ของสมการที่ (10) นอกจากนี้ผู้วิจัยได้กำหนดให้ตัวแปร 2L มีค่าเท่ากับ 675 μm ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวเป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวโดยเครื่อง splicer FSU 925TC และกำหนดให้อุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 2000 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต้องใช้ในการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงที่ผลิตมาจาก SiO_2 [9] นอกจากนี้ความยาวคลื่นแสงที่ใช้มีค่าเท่ากับ 1.55 μm

ตารางที่ 1 ค่าสมบัติเฉพาะของ SMF-28 และ MP980 [11,12]

	a (μm)	λ (μm)	NA	n (core)	n (cladding)	D_0 (m^2/s)	Q (J/mol)
SMF-28	4.1	1.55	0.1228	1.452	1.447	6.7082×10^{-6}	3.1×10^{5}
MP980	1.46	1.55	0.23	1.465	1.458	0.5×10^{-6}	2.89×10^{5}

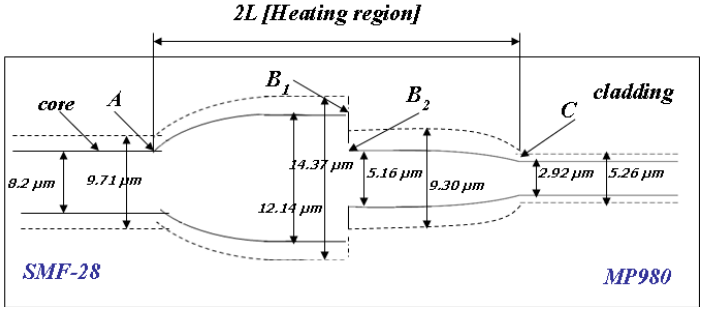
ตารางที่ 2 เงื่อนไขการเชื่อมต่อด้วยการหลอมของเส้นใยแก้วนำแสง SMF-28 และ MP980 ในกรณีที่ไม่เกิดการเยื้องศูนย์ชนิดใด

λ (μm)	Splicing temperature (°C)	Splicing time (sec)	2L (μm)	d (μm)	θ_{SMF-28}	θ_{MP980}
1.55	2000	2-20	675	0	0°	0°



รูปที่ 4 ค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอม ในกรณีที่ไม่เกิดการเยื้องศูนย์ชนิดใดภายใต้เวลาในการเชื่อมต่อระหว่าง 2-20 วินาที

ค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมของเส้นใยแก้วนำแสง SMF-28 และ MP980 ที่เกิดขึ้นจากmatching mode field model และ phase-front transformer model ในกรณีที่ไม่เกิดการเยื้องศูนย์ทั้ง 2 ชนิด ภายใต้เวลาในการเชื่อมต่อระหว่าง 2 -20 วินาที แสดงในรูปที่ 4 จากรูปพบว่าค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมโดยรวมมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.932 dB เมื่อเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเท่ากับ 10 วินาที โดยเมื่อแบ่งค่าความสูญเสียโดยรวมออกเป็น 2 ส่วน พบว่าค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจาก matching mode field model มีค่าเท่ากับ 0.7978 dB และค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจาก phase-front transformer model นั้นมีค่าเท่ากับ 0.1342 dB นอกจากนี้พบว่าค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจาก matching mode field model นี้มีค่าลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้น โดยเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่า W_{diff} ภายในเส้นใยแก้วนำแสงบริเวณที่มีการเชื่อมต่อด้วยการหลอม ซึ่งผู้วิจัยพบว่าเมื่อเราเพิ่มค่าของเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อ ค่าของ W_{diff} ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ฝั่ง จะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น ทำให้ความไม่ต่อเนื่องของขนาดของ mode field radius ของเส้นใยแก้วทั้ง 2 ชนิด มีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจาก matching mode field model นั้นมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามในส่วนค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจาก phase-front transformer model นั้น พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้น โดยเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่า γ_{max} ที่ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องกันระหว่างค่า γ_{max} ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้มีสาเหตุจากการที่ค่า A_{diff} มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า a ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด มีค่าคงที่ภายใต้เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อต่าง ๆ นั่นเอง



รูปที่ 5 โครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสง SMF-28 และ MP980 บริเวณที่มีการเชื่อมต่อด้วยการหลอม โดย a ของ SMF-28 มีค่า 4.1 μm และ a ของ MP980 มีค่า 1.46 μm

รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF-28 และ MP980 ภายในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อด้วยการหลอมโดยเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเท่ากับ 10 วินาที ซึ่งจากรูปพบว่าปลายของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิดภายในบริเวณเชื่อมต่อที่มีระยะ 2L ที่มีค่าเท่ากับ 675 μm จะมีค่าของ W_{diff} และ A_{diff} ที่ไม่เท่ากัน โดยที่ตำแหน่ง B_1 ซึ่งเป็นปลายของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF-28 จะมีค่า $2W_{diff}$ เท่ากับ 14.37 μm และค่า $2A_{diff}$ เท่ากับ 12.14 μm ในขณะที่ตำแหน่ง B_2 ซึ่งเป็นปลายของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด MP980 จะมีค่า $2W_{diff}$ เท่ากับ 9.30 μm และค่า $2A_{diff}$ เท่ากับ 5.16 μm ส่งผลให้ค่าความต่างของค่า mode field หลังจากการเชื่อมต่อ หรือ W_{diff} ระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองมีค่าสูงถึง 2.535 μm นอกจากนี้ที่ตำแหน่งสุดท้ายของบริเวณที่ไม่เกิดการขยายตัวจากการความร้อนของเส้นใยแก้วนำ

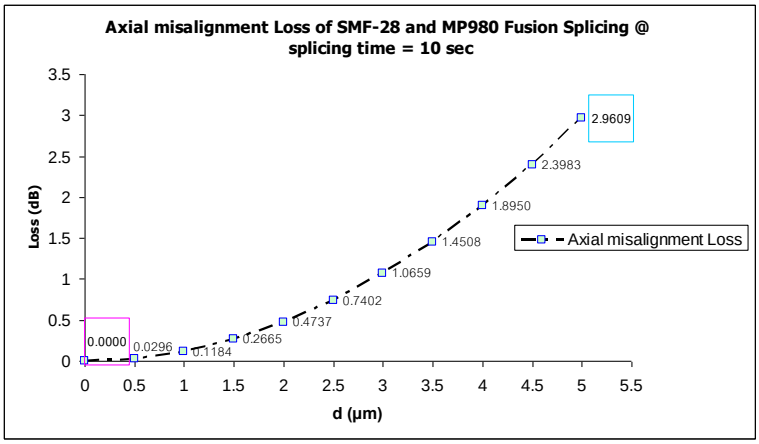
แสงชนิด SMF-28 (หรือตำแหน่ง A) พบว่าค่า $2W$ เท่ากับ 9.71 μm และค่า $2a$ เท่ากับ 8.2 μm ในขณะที่ตำแหน่งเริ่มต้นของบริเวณที่ไม่เกิดการขยายตัวจากการความร้อนของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด MP980 (หรือตำแหน่ง C) จะมีค่า $2W$ เท่ากับ 5.26 μm และค่า $2a$ เท่ากับ 2.92 μm ตามลำดับ ซึ่งการที่ตัวแปร $W_{diff}, A_{diff}, W,$ และ a ที่ตำแหน่งทั้ง 4 มีค่าไม่เท่ากัน จะส่งผลให้เกิดค่าของความสูญเสียที่เกิดขึ้นตาม matching mode field model และ phase-front transformer model ตามที่ได้คำนวณในรูปที่ 4

3.2 การคำนวณค่าความสูญเสียในกรณีที่เกิดการเยื้องศูนย์แบบ axial misalignment

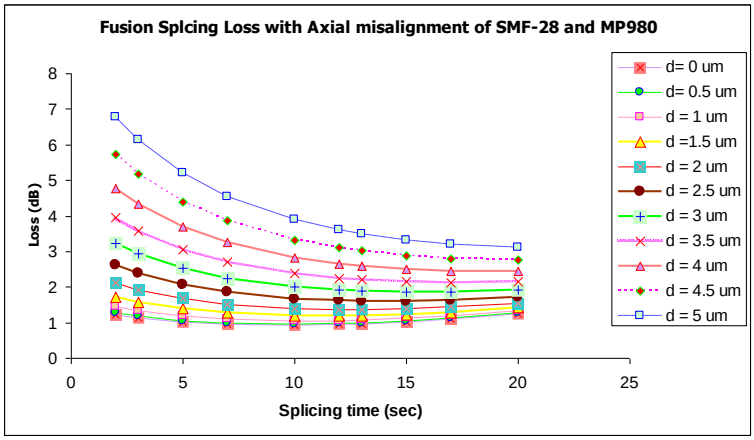
หัวข้อนี้ผู้วิจัยได้นำค่าสมบัติเฉพาะของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF-28 และ MP980 จากตารางที่ 1 มาวิเคราะห์ค่าความสูญเสียจากการเชื่อม ต่อด้วยการหลอมภายใต้เงื่อนไขการเกิดการเยื้องศูนย์แบบ axial misalignment ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยผู้วิจัยได้กำหนดให้ค่าระยะเยื้องศูนย์แนวแกนที่เกิดจาก axial misalignment (หรือตัวแปร d) มีค่าอยู่ระหว่าง 0-5 μm เนื่องจากค่าดังกล่าวเป็นค่าที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้จริงจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงด้วยการหลอมในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งผู้วิจัยได้แสดงค่าความสูญเสียที่เกิดจากอิทธิพลของตัวแปร d (หรือ axial misalignment loss) ระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิด ที่คำนวณจากเทอมที่ 3 สมการที่ (10) โดยรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร d กับ axial misalignment loss ในกรณีที่ตัวแปร d มีค่าอยู่ระหว่าง 0-5 μm และเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 10 วินาที จากรูปที่ 6 พบว่าค่า axial misalignment loss ที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า d เพิ่มขึ้น โดยเมื่อ d มีค่า 0 μm (หรือไม่เกิดการเยื้องศูนย์แบบ axial misalignment) ค่า axial misalignment loss มีค่าเท่ากับ 0 dB และเมื่อ d มีค่า 5 μm ค่า axial misalignment loss มีค่าเท่ากับ 2.9609 dB ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ตารางเงื่อนไขที่ใช้ในการเชื่อมต่อด้วยการหลอมของเส้นใยแก้วนำแสง SMF-28 และ MP980 ในกรณีที่เกิด axial misalignment

λ (μm)	Splicing temperature (°C)	Splicing time (sec)	2L (μm)	d (μm)	θ_{SMF-28}	θ_{MP980}
1.55	2000	2-20	675	0-5	0°	0°



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร d กับ axial misalignment loss โดยเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 10 วินาที



รูปที่ 7 ค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอม โดยตัวแปร d มีค่า 0 μm ถึง 5 μm และเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีค่า 2 ถึง 20 วินาที

ตารางที่ 4 เงื่อนไขที่ใช้ในการเชื่อมต่อด้วยการหลอมของเส้นใยแก้วนำแสง SMF-28 และ MP980 ในกรณีที่เกิด angular misalignment ด้าน MP980

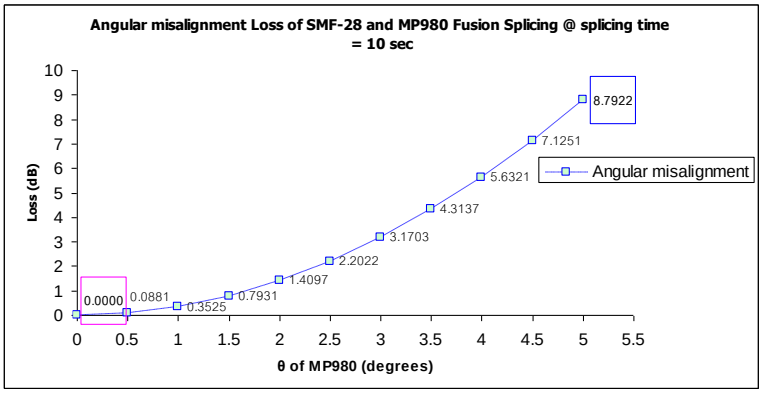
λ (μm)	Splicing temperature (°C)	Splicing time (sec)	2L (μm)	d (μm)	θ_{SMF-28}	θ_{MP980}
1.55	2000	2 - 20	675	0	0°	0-5°

หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ใช้เงื่อนไขในตารางที่ 3 มาวิเคราะห์ค่าความสูญเสียโดยรวมทั้งหมด $(Loss_{Total})$ ที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมระหว่าง SMF-28 และ MP980 ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (10) ในกรณีที่เกิด axial misalignment โดยกำหนดให้ตัวแปร d มีค่าระหว่าง 0 ถึง 5 μm และเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีค่า 2 ถึง 20 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 7 จากรูปพบว่าไม่ว่าเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อจะมีค่าเท่าไหร่ก็ตาม ค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า d มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามอิทธิพลของตัวแปร d ที่มีต่อค่าความสูญเสียโดยรวมจะลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีค่าเพิ่มขึ้น โดยในกรณีที่เวลาในการเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 20 วินาที ความแตกต่างระหว่างค่าความสูญเสียโดยรวมเมื่อ d = 0 μm และ d = 5 μm จะมีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องจากค่า W_{diff} ของปลายเส้นใยแก้วทั้งสองชนิดภายในบริเวณเชื่อมต่อมีขนาดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้เทอมที่ 3 ของสมการที่ (10) ซึ่งเป็นส่วนที่แสดงถึง axial misalignment loss มีค่าลดลงตามลำดับ ดังนั้นจากรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ในกรณีที่เราต้องการให้เกิดค่า axial misalignment loss ที่ต่ำที่สุดไม่ว่าจะใช้เวลาในการเชื่อมต่อเวลาใดก็ตาม ตัวแปร d จะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือไม่เกิดการเยื้องศูนย์แบบ axial misalignment นั่นเอง

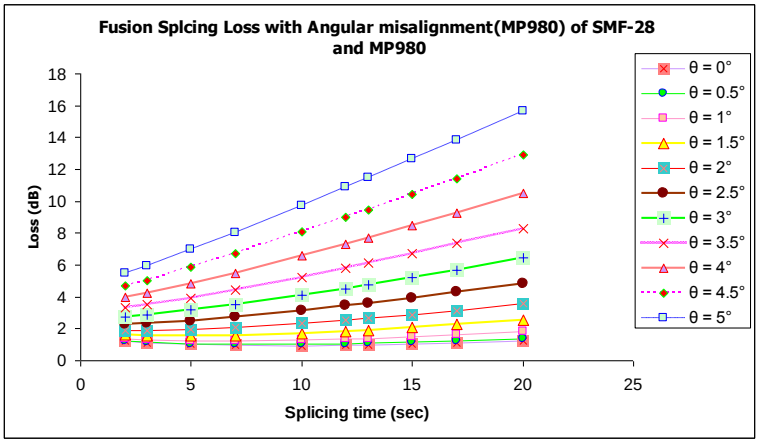
3.3 การคำนวณค่าความสูญเสียในกรณีที่เกิดการเยื้องศูนย์แบบ angular misalignment

หัวข้อนี้ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรค่าเยื้องศูนย์เชิงมุม (θ) กับค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขการเกิดการเยื้องศูนย์แบบ angular misalignment ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา [7] ผู้วิจัยพบว่าในกรณีที่ตัวแปร θ มีค่าเท่ากันนั้น การเกิดการเยื้องศูนย์แบบ angular misalignment ทางฝั่งของเส้นใยแก้วนำแสง MP980 จะส่งผลให้เกิดค่าความสูญเสียโดยรวมสูงกว่ากรณีที่เกิดการเยื้องศูนย์แบบ angular misalignment ทางฝั่งของเส้นใยแก้ว

นำแสง SMF-28 เล็กน้อย โดยแนวโน้มของความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆทั้งหมดจะเหมือนกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงเลือกวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร θ กับความสูญเสียภายใต้เงื่อนไขการเยื้องศูนย์แบบ angular misalignment ทางฝั่งของเส้นใยแก้วนำแสง MP980 เท่านั้น โดยผู้วิจัยได้นำค่าสมบัติเฉพาะของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดจากตารางที่ 1 มาวิเคราะห์ค่าความสูญเสียภายใต้เงื่อนไขการเกิดการเยื้องศูนย์แบบ angular misalignment ทางฝั่งของเส้นใยแก้วนำแสง MP980 ดังแสดงในตารางที่ 4 จากตารางพบว่าตัวแปร θ มีค่าอยู่ระหว่าง 0-5° ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้จริงจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร θ ด้าน MP980 และค่า angular misalignment loss เมื่อพิจารณาที่เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 10 วินาที



รูปที่ 9 ค่าความสูญเสียรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอม กรณีที่ตัวแปร θ ทางด้าน MP980 มีค่า 0° ถึง 5° และเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีค่า 2 ถึง 20 วินาที

รูปที่ 8 แสดงค่าความสูญเสียที่เกิดจากอิทธิพลของตัวแปร θ ทางด้าน MP980 (หรือ angular misalignment loss) ระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดที่คำนวณจากเทอมที่ 4 สมการที่ (10) ซึ่งในกรณีนี้ตัวแปร θ มีค่าอยู่ระหว่าง 0-5° และเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 10 วินาที ซึ่งจากรูปที่ 8 พบว่าค่า angular misalignment loss ที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า θ เพิ่มขึ้น โดยเมื่อ θ มีค่า 0° (หรือไม่เกิดการเยื้องศูนย์แบบ angular misalignment) ค่า angular misalignment loss มีค่าเท่ากับ 0 dB และเมื่อ θ มีค่า 5° ค่า angular misalignment loss มีค่าเท่ากับ 8.7922 dB ตามลำดับ หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ได้ใช้

เงื่อนไขในตารางที่ 4 วิเคราะห์ค่าความสูญเสียโดยรวมทั้งหมด ($Loss_{Total}$) ที่เกิดขึ้นซึ่งคำนวณจากสมการที่ (10) ในกรณีที่เกิด angular misalign-ment ทางฝั่งของ MP980 โดยกำหนดให้ตัวแปร θ มีค่าอยู่ระหว่าง 0-5° และเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีค่า 2 ถึง 20 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 9 จากรูปพบว่าไม่ว่าเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อจะมีค่าเท่าไหร่ก็ตาม ค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตัวแปร θ มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อิทธิพลของตัวแปร θ ที่มีต่อค่าความสูญเสียจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการเชื่อม ต่อมีค่าเพิ่มขึ้น โดยในกรณีที่เวลาในการเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 20 วินาที ความแตกต่างระหว่างค่าความสูญเสียโดยรวมเมื่อตัวแปร θ = 0° และ θ = 5° มีค่ามากที่สุด ทั้งนี้สาเหตุเนื่องมาจากค่า W_{diff} ของปลายเส้นใยแก้วทั้งสองชนิดภายในบริเวณเชื่อมต่อมีขนาดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้เทอมที่ 4 ของสมการที่ (10) ซึ่งเป็นส่วนที่แสดงถึง angular misalignment loss มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังนั้นจากรูปที่ 8 และ 9 ในกรณีที่ต้องการให้เกิดค่า angular misalignment loss ต่ำที่สุด เราต้องเชื่อมต่อเส้นใยเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด โดยให้ค่าตัวแปร θ มีค่าเท่ากับศูนย์ หรือไม่เกิดการเยื้องศูนย์แบบ angular misalignment นั่นเอง

4. การลดค่าความสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมด้วยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF-28 และ MP980

หัวข้อที่ผ่านมาหากเราต้องการให้ค่าความสูญเสียในส่วนของ axial misalignment loss และ angular misalignment loss มีค่าต่ำที่สุดนั้น เราต้องเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดโดยต้องไม่ให้เกิดการเยื้องศูนย์แบบ axial misalignment และ angular misalignment อย่างไรก็ตาม ในส่วนของค่าความสูญเสียที่เกิดจาก matching mode filed model และ phase-front transformer model นั้น หากเรายังคงใช้โครงสร้างมาตรฐานของเส้นใยแก้วนำแสง SMF-28 และ MP980 ดังที่แสดงในตารางที่ 1 และเชื่อมต่อด้วยการหลอมภายใต้เงื่อนไขในตารางที่ 2 แล้วนั้น ค่าความสูญเสียโดยรวมที่ต่ำที่สุดที่เกิดขึ้นยังคงมีค่าสูงถึง 0.932 dB ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าเกณฑ์ที่เหมาะสมและยอมรับได้ของงานวิจัยนี้ ดังนั้นในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาถึงวิธีการลดค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมที่เกิดจาก matching mode filed model และ phase-front transformer model ด้วยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF-28 และ MP980 โดยเป็นการเปลี่ยนแปลงเพียงแค่ขนาดของ core ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดเท่านั้น ส่วนสมบัติอื่น ๆของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองยังคงเหมือนเดิมทุกประการ เพื่อลดความไม่ต่อเนื่องของค่า W_diff ของปลายเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดภายในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อด้วยการหลอมที่อุณหภูมิ 2000 ºC ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียที่เกิดการเชื่อมต่อด้วยการหลอม เมื่อเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีของ core ของ MP980 เพียงฝั่งเดียว ซึ่งผู้วิจัยได้เคยนำเสนอหลักการเบื้องต้นไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [5]

- การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียที่เกิดการเชื่อมต่อด้วยการหลอม เมื่อเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีของ core ของ SMF-28 เพียงฝั่งเดียว ซึ่งผู้วิจัยได้เคยนำเสนอหลักการเบื้องต้นไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [5] เช่นกัน

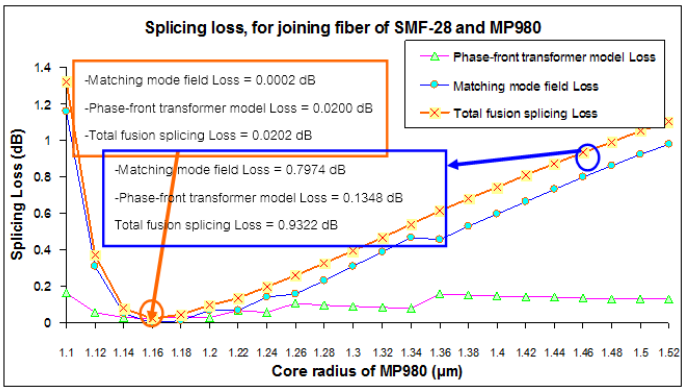
- การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียที่เกิดการเชื่อมต่อด้วยการหลอม เมื่อเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีของ core ของ SMF-28 และ MP 980 ทั้งสองฝั่ง ซึ่งการวิเคราะห์นี้จะเป็นการนำเสนอเพิ่มเติมของงานวิจัยนี้

4.1 การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียที่เกิดการเชื่อมต่อด้วยการหลอม เมื่อเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีของ core ของ MP980 เพียงฝั่งเดียว

ขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้นำเงื่อนไขที่ใช้ในการเชื่อมต่อดังแสดงในตารางที่ 5 มาคำนวณค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอม จากตารางผู้วิจัยได้เปลี่ยนแปลงค่ารัศมีของ core (หรือตัวแปร a) ของ MP980 เพียงอย่างเดียว โดยตัวแปร a ของ MP980 มีค่าระหว่าง 1.1 μm และ 1.52 μm ซึ่งในงานวิจัยนี้ตัวแปร a ของ MP980 ที่เป็นค่ามาตรฐานที่ใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรมมีค่าเท่ากับ 1.46 μm

ตารางที่ 5 ค่าสมบัติเฉพาะของเส้นใยแก้วนำแสง SMF-28 และ MP980 เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า a ของ MP980 เพียงฝั่งเดียว

	a (μm)	λ (μm)	NA	n (core)	n (cladding)	D_0 (m^2/s)	Q (J/mol)
SMF-28	4.1	1.55	0.1228	1.452	1.447	6.7082×10^{-6}	3.1×10^{5}
MP980	1.1-1.52	1.55	0.23	1.465	1.458	0.5×10^{-6}	2.89×10^{5}



รูปที่ 10 ค่าความสูญเสียโดยรวมที่ต่ำที่ สุดเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า a ของ MP980 เพียงฝั่งเดียว

รูปที่ 10 แสดงค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมจากการพิจารณาที่ค่า a ของ MP980 ต่าง ๆ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการหลอมเพื่อให้ได้ค่าความสูญเสียโดยรวมที่ต่ำที่สุดของค่า a แต่ละกรณีจะมีค่าไม่เท่ากันดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งผู้วิจัยพบว่าค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำที่สุดเมื่อ a ของ MP980 มีค่าเท่ากับ 1.16 μm และเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 2 วินาที โดยค่าความสูญเสียโดยรวมที่น้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.0202 dB และในกรณีนี้ค่าความสูญเสียดังกล่าวแบ่งเป็นค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจาก matching mode field model 0.002 dB และค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจาก phase-front transformer model 0.0200 dB ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเราเปรียบเทียบกับค่าความสูญเสียโดยรวมในกรณีที่ใช้โครงสร้างมาตรฐานของ MP980 ที่ a มีค่าเท่ากับ 1.46 μm และเวลาในการเชื่อมต่อเท่ากับ 10 วินาที พบว่าค่าความสูญเสียโดยรวมที่ต่ำที่สุดมีค่ามากถึง 0.9322 dB ดังนั้นในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยสามารถลดค่าความสูญเสียโดยรวมที่ต่ำที่สุดจาก 0.9322 dB เป็น 0.0202 dB ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมและยอมรับได้สำหรับงานวิจัยนี้

ตารางที่ 6 ค่าความสูญเสียโดยรวมที่ต่ำที่สุดเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า a ของ MP980 ระหว่าง 1.1 μm ถึง 1.52 μm

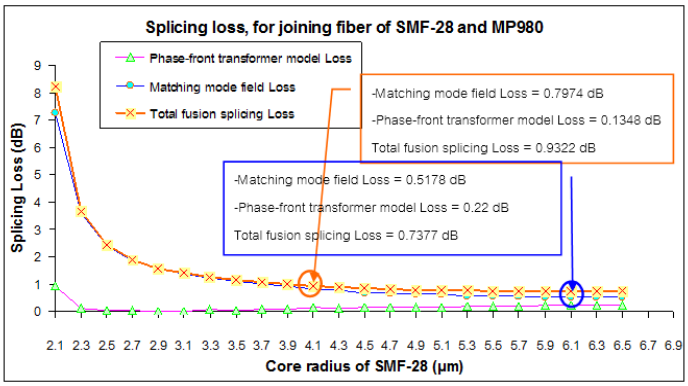
Core radius (μm)	Splicing time (sec)	Matching mode field (dB)	Phase-front transformer mode (dB)	Total loss (dB)
1.1	2	1.1581	0.1626	1.3207
1.12	2	0.3107	0.0580	0.3686
1.14	2	0.0505	0.0309	0.0814
1.16	2	0.0002	0.0200	0.0202
1.18	3	0.0115	0.0344	0.0459
1.2	3	0.0666	0.0270	0.0936
1.22	5	0.0696	0.0666	0.1362
1.24	5	0.1395	0.0573	0.1968
1.26	7	0.1549	0.1048	0.2597
1.28	7	0.2293	0.0948	0.3241
1.3	7	0.3071	0.0874	0.3944
1.32	7	0.3860	0.0816	0.4676
1.34	7	0.4644	0.0771	0.5414
1.36	10	0.4534	0.1582	0.6117
1.38	10	0.5259	0.1517	0.6776
1.4	10	0.5969	0.1464	0.7432
1.42	10	0.6659	0.1419	0.8078
1.44	10	0.7328	0.1380	0.8709
1.46	10	0.7974	0.1348	0.9322
1.48	10	0.8597	0.1320	0.9917
1.5	10	0.9196	0.1296	1.0491
1.52	10	0.9770	0.1274	1.1045

4.2 การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียที่เกิดการเชื่อมต่อด้วยการหลอม เมื่อเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีของ core ของ SMF-28 เพียงฝั่งเดียว

ขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้เปลี่ยนแปลงค่า a ทางฝั่งของ SMF-28 แทนฝั่งของ MP980 โดยได้นำเงื่อนไขที่ใช้ในการเชื่อมต่อดังแสดงในตารางที่ 7 มาคำนวณค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิด จากตารางพบว่าตัวแปร a ของ SMF-28 มีค่าระหว่าง 2.1 μm และ 6.5 μm ซึ่งในงานวิจัยนี้ตัวแปร a ของ SMF-28 ที่เป็นค่ามาตรฐานที่ใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรมมีขนาดเท่ากับ 4.1 μm

ตารางที่ 7 ค่าสมบัติเฉพาะของเส้นใยแก้วนำแสง SMF-28 และ MP980 เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า a ของ SMF-28 เพียงฝั่งเดียว

	a (μm)	λ (μm)	NA	n (core)	n (cladding)	D_0 (m^2/s)	Q (J/mol)
SMF-28	2.1 – 6.5	1.55	0.1228	1.452	1.447	6.7082×10^{-6}	3.1×10^5
MP980	1.46	1.55	0.23	1.465	1.458	0.5×10^{-6}	2.89×10^5



รูปที่ 11 ค่าความสูญเสียโดยรวมที่ต่ำที่สุด เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า a ของ SMF-28 เพียงฝั่งเดียว

ผลการคำนวณค่าความสูญเสียโดยรวมที่ต่ำที่สุดเมื่อพิจารณาจากค่า a ค่าต่าง ๆ ของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF-28 ดังแสดงในรูปที่ 11 และตารางที่ 8 พบว่าค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมที่มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.7377 dB เมื่อตัวแปร a มีค่าเท่ากับ 6.1 μm และเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 17 วินาที โดยค่าความสูญเสียโดยรวมที่น้อยที่สุดดังกล่าว แบ่งเป็นค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจาก matching mode field model 0.5178 dB และค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจาก phase-front transformer model 0.22 dB นอกจากนี้ เมื่อเราพิจารณาค่าความสูญเสียโดยรวมที่ได้จากการใช้โครงสร้างมาตรฐานของ SMF-28 ที่มีค่า a เท่ากับ 4.1 μm ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 10 วินาที นั้น พบว่าค่าความสูญเสียโดยรวมที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.9322 dB ดังนั้นในหัวข้อนี้ผู้วิจัยสามารถลดค่าความสูญเสียโดยรวมที่ต่ำที่สุดจาก 0.9322 dB เป็น 0.7377 dB ได้ อย่างไรก็ตาม ค่าความสูญเสียโดยรวมดังกล่าวยังมีค่าที่สูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับงานวิจัยนี้ ดังนั้นการปรับปรุงโครงสร้างของ core ของเส้นใยแก้วนำแสงทางฝั่ง SMF-28 ฝั่งเดียว จึงไม่ใช่แนวทางที่เหมาะสมในการลดค่าความสูญเสียโดยรวมของงานวิจัยนี้

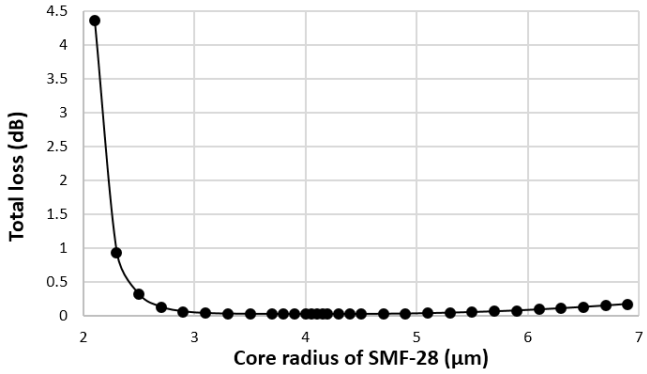
4.3 การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียที่เกิดการเชื่อมต่อด้วยการหลอม เมื่อเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีของ core ของ SMF-28 และ MP 980 ทั้งสองฝั่ง

หัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ผู้วิจัยพบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า a ของ MP980 จากค่ามาตรฐาน 1.46 μm เป็น 1.16 μm โดยที่ยังคงขนาดของค่า a ของ SMF-28 เป็นค่ามาตรฐาน 4.1 μm ทำให้ผู้วิจัยสามารถลดค่าของความสูญเสียโดยรวมจาก 0.9322 dB เป็น 0.0202 dB อย่างไรก็ตามในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้วิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าของ a จากค่ามาตรฐานของเส้นใยแก้วทั้งสองชนิด โดยสมบัติอื่น ๆ ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองยังคงเหมือน

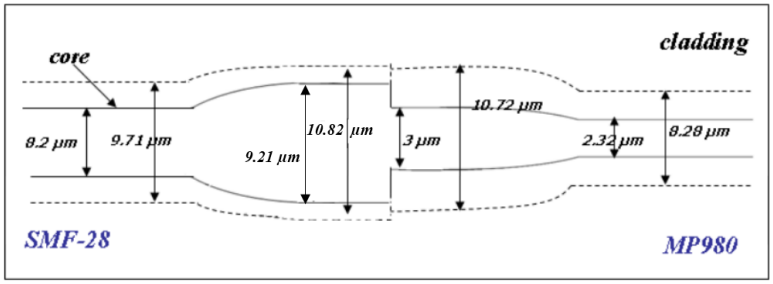
ตารางที่ 8 ค่าความสูญเสียโดยรวมที่ต่ำที่สุดเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า a ของ SMF-28 ระหว่าง 2.1 μm ถึง 6.5 μm

Core radius (μm)	Splicing Time (sec)	Matching mode field (dB)	Phase-front transformer mode (dB)	Total Loss (dB)
2.1	2	7.2650	0.9444	8.2094
2.3	2	3.5771	0.1078	3.6849
2.5	2	2.4112	0.0413	2.4525
2.7	2	1.8575	0.0227	1.8803
2.9	2	1.5558	0.0149	1.5707
3.1	2	1.3821	0.0108	1.3929
3.3	5	1.2143	0.0583	1.2726
3.5	5	1.1110	0.0474	1.1585
3.7	7	0.9822	0.0820	1.0642
3.9	7	0.9257	0.0709	0.9966
4.1	10	0.7974	0.1348	0.9322
4.3	10	0.7621	0.1211	0.8832
4.5	12	0.6837	0.1633	0.8470
4.7	12	0.6642	0.1505	0.8147
4.9	13	0.6248	0.1664	0.7912
5.1	13	0.6173	0.1561	0.7733
5.3	15	0.5601	0.2006	0.7607
5.5	15	0.5586	0.1906	0.7492
5.7	15	0.5610	0.1820	0.7430
5.9	17	0.5123	0.2285	0.7408
6.1	17	0.5178	0.2200	0.7377
6.3	17	0.5259	0.2125	0.7384
6.5	17	0.5364	0.2059	0.7423

เดิมทุกประการ เพื่อพิจารณาว่าผู้วิจัยยังสามารถลดค่าความสูญเสียโดยรวมเพิ่มเติมได้อีกหรือไม่ โดยผู้วิจัยยังคงใช้เงื่อนไขของการเชื่อมต่อด้วยการหลอมเหมือนกับเงื่อนไขในหัวข้อ 4.1 กล่าวคือ λ มีค่าเท่ากับ 1.55 μm อุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 2000 ºC ระยะของ heating region (2L) มีค่าเท่ากับ 675 μm เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีค่าเท่ากับ 2 วินาที และขนาดของ a ของ MP980 เปลี่ยนแปลงจากค่ามาตรฐาน 1.46 μm เป็น 1.16 μm (ตามผลที่ได้จากหัวข้อ 4.1) และผู้วิจัยได้เปลี่ยนแปลงค่าของ a ของ SMF-28 ระหว่าง 2.1 μm และ 6.9 μm ตามลำดับ



รูปที่ 12 ค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมของเส้นใยแก้วนำแสง SMF-28 และ MP980 เมื่อปรับปรุง ค่า a ของ MP980 เป็น 1.16 μm และเปลี่ยนค่า a ของ SMF-28 ระหว่าง 2.1 μm และ 6.9 μm



รูปที่ 13 โครงสร้างที่เหมาะสมของเส้นใยแก้วนำแสง SMF-28 และ MP980 ที่งานวิจัยนี้นำเสนอ ภายในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อด้วยการหลอม โดย a ของ SMF-28 มีค่า 4.15 μm และ a ของ MP980 มีค่า 1.16 μm

รูปที่ 12 แสดงผลการคำนวณค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิด เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า a ของ MP980 จากค่ามาตรฐาน 1.46 เป็น 1.16 μm และเปลี่ยนแปลงค่า a ของ SMF-28 ระหว่าง 2.1 ถึง 6.9 μm จากรูปพบว่าเมื่อค่า a ของ SMF-28 อยู่ระหว่าง 4 และ 4.3 μm ค่าความสูญเสียโดยรวมจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0201-0.0203 dB อย่างไรก็ตาม ค่าความสูญเสียโดยรวมจะมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.0201 dB ในกรณีที่ a ของ SMF-28 มีค่าเท่ากับ 4.15 μm ซึ่งน้อยกว่าค่าความสูญเสียโดยรวมที่ได้จากหัวข้อ 4.1 ดังนั้นในการลดค่าความสูญเสียโดยรวมให้มีค่าต่ำที่สุดของงานวิจัยนี้ เราจำเป็นต้องมีการปรับปรุงโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิด โดยการลดขนาดของรัศมีของ core ของ MP980 จาก 1.46 เป็น 1.16 μm และเพิ่มขนาดของรัศมีของ core ของ SMF จาก 4.1 เป็น 4.15 μm ภายใต้เวลาในการเชื่อมต่อเท่ากับ 2 วินาที

นอกจากนี้รูปที่ 13 แสดงผลการคำนวณค่าของตัวแปร W_{diff} และ A_{diff} โดยการใช้โครงสร้างใหม่ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดที่งานวิจัยนี้ได้นำเสนอ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้โครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า a ของ MP980 เป็น 1.16 μm และ a ของ SMF-28 เป็น 4.15 μm ทำให้ขนาด mode field หลังการเชื่อมต่อหรือ W_{diff} ของบริเวณที่มีการเชื่อมต่อของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้น โดยค่าของ $2W_{diff}$ ทางฝั่ง SMF-28 มีค่าเท่ากับ 10.82 μm และค่าของ $2W_{diff}$ ทางฝั่ง MP980 มีค่าเท่ากับ 10.72 μm

ส่งผลให้ค่าความต่างของค่า W_{diff} ระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองภายในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อมีค่าเพียง 0.05 μm ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความต่างของค่า W_{diff} ระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองที่ได้จากรูปที่ 5 ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้ค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดขึ้นจึงมีค่าลดต่ำลงเป็นอย่างมาก และมีค่าเท่ากับ 0.0201 dB และอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมที่งานวิจัยนี้ยอมรับได้

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการลดค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว SMF-28 และ MP980 จากการใช้ matching mode field model และ phase-front transformer model โดยเบื้องต้นผู้วิจัยพบว่าในกรณีที่เกิดการเยื้องศูนย์แบบ axial misalignment กับ angular misalignment นั้น หากตัวแปร d และตัวแปร θ มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความสูญเสียโดยรวมมีค่ามากขึ้น ดังนั้นในกรณีที่เราต้องการให้ค่าความสูญเสียโดยรวมมีค่าต่ำที่สุด เราต้องทำให้ไม่เกิดการเยื้องศูนย์ทั้งสองชนิด กล่าวคือ ตัวแปร d มีค่าเท่ากับ 0 μm และตัวแปร θ มีค่าเท่ากับ 0° ตามลำดับ นอกจากนี้หากเราใช้โครงสร้างมาตรฐานของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด กล่าวคือ รัศมีบริเวณ core ของ SMF-28 มีค่าเท่ากับ 4.1 μm และรัศมีของ MP980 มีค่าเท่ากับ 1.46 μm มาเชื่อมต่อกันด้วยเวลาในการหลอมเท่ากับ 10 วินาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเท่ากับ 2000 °C จะทำให้ความสูญเสียโดยรวมที่ต่ำที่สุดมีค่าสูงถึง 0.932 dB ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่เหมาะสมที่งานวิจัยนี้ยอมรับได้ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.01 dB ถึง 0.3 dB เป็นอย่างมาก

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำเสนอโครงสร้างใหม่ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด เพื่อลดค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอม ด้วยการเปลี่ยนแปลงเพียงแค่ขนาดของ core ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิด แต่ในส่วนของคุณสมบัติอื่น ๆ ของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองนั้นยังคงเหมือนเดิมทุกประการ โดยโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดของงานวิจัยนี้ คือ ขนาดรัศมีของ core ของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF-28 มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4.1 เป็น 4.15 μm และขนาดรัศมีของ core ของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด MP980 มีค่าลดลงจาก 1.46 เป็น 1.16 μm นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่อลดลงจาก 10 วินาที เป็น 2 วินาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมยังคงมีค่าเท่ากับ 2000 °C ตามลำดับ ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดและการลดเวลาในการเชื่อมต่อด้วยการหลอมดังกล่าว ทำให้ผู้วิจัยสามารถลดค่าความสูญเสียโดยรวมที่ต่ำที่สุดจาก 0.932 เป็น 0.0201 dB ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมและยอมรับได้ของงานวิจัยนี้ นอกจากนี้การเชื่อมต่อที่ผู้วิจัยได้จำลองในงานวิจัยนี้ เป็นการเชื่อมต่อด้วยการหลอมที่ใช้เทคนิคการเชื่อมต่อด้วยการหลอมแบบมาตรฐาน เพียงแค่ใช้เครื่อง fusion splicer ให้ความร้อนที่ปลายของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดที่มีโครงสร้างที่ได้ปรับปรุงแล้ว ก็จะสามารถลดค่าความสูญเสียที่เกิดจากเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดโดยไม่จำเป็นต้องใช้เทคนิคการเชื่อมต่อที่ซับซ้อนเหมือนงานวิจัยอื่น ๆ

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังเป็นแค่การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียโดยรวมที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยการหลอมโดยการใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์เท่านั้น ผู้วิจัยยังจำเป็นต้องวิจัยเพิ่มเติมในส่วนการทดลองเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันจริง เพื่อตรวจสอบผลที่ได้จากการคำนวณในงานวิจัยนี้กับผลที่ได้จากการทดลองว่ามีความใกล้เคียงหรือสอดคล้องกันหรือไม่ โดยผู้วิจัยจะได้นำเสนอในโอกาสต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ภายใต้ “ทุนวิจัยเพื่อพัฒนาสิ่งประดิษฐ์” ตามสัญญาเลขที่ สป 9/2556

7. รายการอ้างอิง

[1] Zuoming, S., Ningfang, S., Jing, J., Jingming, S. and Pan, M., 2012, Low loss fusion splicing polarization-maintaining photonic crystal fiber and conventional polarization-maintaining fiber, Optic. Fiber Technol. 18: 452-456.

[2] Mart´ınez-Rios, A., Torres-G´omez, I., Monzon-Hernandez, D. and Barbosa-Garcia, O., 2010, Reduction of splice loss between dissimilar fibers by tapering and fattening, Revista Mexicana de Física 56(1): 80-84.

[3] Zhu, T., Xiao, F., Xu, L., Liu, M., Deng, M. and Chiang, K.S., 2012, Pressure-assisted low-loss fusion splicing between photonic crystal fiber and single-mode fiber, Optic. Soc. Amer. 20: 24465-24471.

[4] Zhou, X., Chen, Z., Chen, H. and Hou, J., 2012, Fusion splicing small-core photonic crystal fibers and single-mode fibers by controlled airhole collapse, Optic. Commun. 285: 5283-5286.

[5] วรีรัตน์ อินทร์อาจ และวีรชัย อัศวเมธาพันธ์, 2554, การปรับปรุงโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงสำหรับการเชื่อมต่อด้วยการหลอมของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF-28 และ MP 980, น. 1105-1108, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34 (EECON-34), 30 พ.ย. - 2 ธ.ค. 2554.

[6] วรีรัตน์ อินทร์อาจ และวีรชัย อัศวเมธาพันธ์, 2555, การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความสูญเสียเชิงแสงสำหรับการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF-28 และ MP 980, น. 61-66, การประชุมวิชาการทางออปติกส์และการประยุกต์ใช้งานแห่งชาติ ครั้งที่ 7, 16 มีนาคม 2555.

[7] Inart, W. and Asawamethapant, W., 2012, The analysis of parameters related to fusion splicing loss of SMF-28 and MP980, pp. 193-196, Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI), May 16-18 2012.

[8] Wang, B.S. and Mies, E.W., 2007, Advanced topics on fusion splicing of specialty fibers and device s, pp. 1-14, SPIE APOC.

[9] Ratuszek, M., 2007, Loss analysis of single mode telecommunication fiber thermally-diffused core area, Optic. Appl. 37: 279-294.

[10] Ratuszek, M., Zakrzewski, Z. and Majewski, J., 2010, Reflectometric measurements of thermally expanded core area, Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci. 58: 514-517.

[11] Erbium-Doped Fibers for C-Band, 2005, MP980 and MP980 80 Specification sheet, Furukawa Electric North America Inc.

[12] Corning Single-Mode Optical Fiber, 2002, Corning SMF-28 Optical Fiber Production Information, Corning Inc.