โครงการวิจัย
ศึกษาผลการประยุกต์นำเส้นใยแก้วนำแสงหลายเส้น
ห่อหุ้มร่วมใน Protective Sleeves เดียวกัน

สถาบันนวัตกรรม ทีโอที (นฐ.) บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน)

กุมภาพันธ์ 2563

1. ความเป็นมาและสภาพปัญหา

ระบบสื่อสารโทรคมนาคมมีการปรับเปลี่ยนจากโครงข่ายดั้งเดิม (Legacy Network) เป็นโครงข่ายไอพี (IP-Network) เทคโนโลยีในการส่งข้อมูล ส่งผลให้การส่งผ่านข้อมูลต้องพัฒนาตามโครงข่ายสื่อสารโทรคมนาคม การส่งผ่านข้อมูลจากต้นทาง (ผู้ให้บริการ) ถึงปลายทาง (ผู้รับบริการ) แบ่งหลัก ๆ ได้ 2 กลุ่ม

กลุ่มแรกส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ (Radio Frequency) เช่น โทรศัพท์มือถือ ดาวเทียม วิทยุรับ-ส่ง เป็นต้น กลุ่มนี้มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูงสามารถขยายโครงข่ายฯ ได้รวดเร็ว ปริมาณการรับส่งข้อมูลสูงขึ้นตามเทคโนโลยี แต่มีข้อจำกัดเรื่องระยะทางเมื่อมีจำนวนผู้ใช้งานพร้อมกันจำนวนมากต้องออกแบบระบบรองรับที่เหมาะสมและย่านความถี่ของคลื่นวิทยุมีจำกัดต้องแบ่งเฉลี่ยใช้งาน

กลุ่มที่สองส่งข้อมูลผ่านตัวกลาง (Fix Line) เช่น สายเคเบิลทองแดง สายเคเบิลเส้นใยแก้วนำแสง หรือผ่านสายส่งไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยี Power Line เป็นต้น จุดเด่นของกลุ่มนี้ไม่มีข้อจำกัดเรื่องระยะทาง รองรับความจุของข้อมูลและจำนวนผู้ใช้งานพร้อมกันจำนวนมากได้ (ขึ้นกับเทคโนโลยี) สนับสนุนโครงข่ายหลัก (Backbone Network) ของการใช้งานกลุ่มแรกที่ให้บริการผ่านคลื่นวิทยุ แต่มีจุดด้อยเมื่อต้องการขยายโครงข่ายฯ ต้นทุนในวางระบบโครงข่ายสูง ต้องวางสายส่งสัญญาณระหว่างจุดต่อจุดเพื่อเชื่อมต่อสัญญาณถึงกัน

ระบบสื่อสารโทรคมนาคมทั้ง 2 กลุ่ม จำเป็นต้องมีโครงข่ายหลักรองรับเทคโนโลยีที่สนับสนุนที่เหมาะสมรองรับความจุในการส่งผ่านข้อมูล โครงข่ายสื่อสารผ่านตัวกลางที่มีต้นทุนต่ำแต่มีความจุปริมาณมาก ๆ สายเคเบิลเส้นใยแก้วนำแสง (OFC: Optic Fiber Cable) เป็นทางเลือกต้น ๆ

สายเคเบิล OFC มีหลากหลายชนิด ในประเทศไทยโครงข่ายหลักปกติทั่วไป เลือกใช้สายเคเบิล OFC ชนิด ADSS OFC (All-Dielectric Self-Supporting Single Mode Optical Fiber Cable) [1] โครงข่ายใดที่มีปัญหาสัตว์กัดแทะจะติดตั้งด้วยสายเคเบิล OFC ชนิด ARSS OFC (Anti-Rodent Self Supporting Fiber Optic Cable) [2] จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของสายเคเบิล ตั้งแต่ 6 F จนถึง 312 F (Fiber) ขึ้นกับการใช้งาน

สายเคเบิล OFC แต่ละระวิงสำหรับแขวนอากาศและสำหรับร้อยท่อหรือฝังใต้ผิวดินความยาวมาตรฐาน 4000 เมตร/ระวิง การใช้งานต้องนำสายเคเบิล OFC แต่ละระวิงมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยหัวต่อเคเบิล OFC (Closure for Optical Fiber Cable) รุ่นและขนาดของหัวต่อเคเบิล OFC ขึ้นกับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber)

การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงจะนำเส้นใยแก้ว 2 เส้นมาเชื่อมต่อด้วยเครื่อง Fusion Splice หลอมเนื้อแก้ว 2 เส้นเป็นเนื้อเดียวกันด้วยความร้อน จากนั้นห่อหุ้มด้วย “Protective Sleeves” มาตรฐานการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง กำหนด 1 F (Fiber) / 1 P (Protective Sleeves)

พนักงานบางท่านที่เชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงจำนวนมาก ๆ มีข้อจำกัดเรื่องเวลาในการแก้ไขคืนดี จากข้อตกลงบริการ SLA (Service Level Agreement) ที่รับประกันกับลูกค้าไว้ ในทางปฏิบัติหน้างานเครื่อง Fusion Splice บางรุ่นมีข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาในการอบ Protective Sleeves เพื่อร่นระยะเวลาให้เร็วขึ้น จึงมีการประยุกต์นำเส้นใยแก้วนำแสงหลาย Fiber มาห่อหุ้มร่วมใน Protective Sleeves เดียวกัน

ผลการประยุกต์ใช้งานข้างต้นมีการบอกต่อกันว่าสามารถใช้งานได้ ผ่านไประยะเวลาหนึ่งมีคำถามว่าการประยุกต์นำเส้นใยแก้วนำแสงหลาย Fiber มาห่อหุ้มร่วมใน Protective Sleeves เดียวกันจะส่งผลกระทบอะไรตามมาหรือไม่

จากปัญหาข้างต้น บมจ.ทีโอที ได้มอบหมายให้ สถาบันนวัตกรรม ทีโอที (นฐ.) สังกัดสำนักสนับสนุนโครงสร้างพื้นฐาน หน่วยธุรกิจโครงสร้างพื้นฐาน (BU1) ร่วมมือกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องศึกษาผลการประยุกต์นำเส้นใยแก้วนำแสงหลาย Fiber ห่อหุ้มร่วมใน Heat-Shrinkable Splice Protector (Protective Sleeves) เดียวกัน ว่ามีผลกระทบทั้งระยะสั้นและระยะยาวอย่างไรบ้าง

2. วัตถุประสงค์โครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยนี้ เพื่อศึกษาผลการประยุกต์นำเส้นใยแก้วนำแสงหลาย Fiber ห่อหุ้มรวมใน Protective Sleeves เดียวกันว่ามีผลกระทบอะไรตามมา ทั้งการใช้งานในระยะสั้นและระยะยาว กรณีส่งผลกระทบต่อการใช้งานจะได้ให้คำแนะนำว่าไม่ควรปฏิบัติ กรณีสามารถใช้งานได้จะได้เผยแพร่ข้อมูลที่ถูกต้อง แต่การศึกษาครั้งนี้จะไม่กำหนดเป็นมาตรฐานแต่เน้นเสนอคำแนะนำแนวทางที่เหมาะสม นำเสนอผลการศึกษาทางวิชาการให้ผู้เกี่ยวข้องพิจารณาประกอบการปฏิบัติงาน

3. วิธีการดำเนินการศึกษาวิจัย

1) สำรวจและเก็บข้อมูลปัญหาเชื่อมต่อ Fiber ใยแก้วนำแสงด้วยเครื่อง Fusion Splice ที่ห่อหุ้มด้วย Protective Sleeves ตามมาตรฐาน 1 F / 1 P และที่ประยุกต์นำเส้นใยแก้วนำแสงหลาย Fiber ห่อหุ้มรวมใน Protective Sleeves (2-12 F / 1 P) เดียวกัน
2) สรุปผลการเก็บข้อมูลภาคสนาม นำมาวิเคราะห์เพื่อจำลองรูปแบบฯ ต่าง ๆ ทดลองในห้องปฏิบัติการ

3) ทดลองรูปแบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ
4) สรุปผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ วิเคราะห์คัดเลือกรูปแบบฯ เพื่อทดลองภาคสนาม
5) สรุปและนำเสนอผลงานวิจัยต่อผู้บริหารเพื่อเผยแพร่

4. ปัญหาภาคสนามและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของสายเคเบิล OFC

ความต้องการส่งผ่านข้อมูลผ่านสายสื่อมีความต้องการความจุมากขึ้น ความเร็วและความเสถียรในการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้น เทคโนโลยีสายสื่อสารพัฒนาเปลี่ยนตัวกลางจากสายเคเบิลทองแดงเป็นสายสื่อสารเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งจุดเด่นและจุดด้อยของเส้นใยแก้วนำแสงมีดังนี้

จุดเด่น

1) การส่งผ่านสัญญาณมีการสูญเสียน้อย (Low Attenuation)
2) ปริมาณข้อมูลในการส่งผ่านสูง (High Bandwidth)
3) ระยะทางในการส่งข้อมูลได้ระยะทางไกล (Long Distance)
4) ความจุเท่ากันเมื่อเทียบกับสายเคเบิลทองแดง ขนาดเล็ก น้ำหนักเบากว่า
5) คุณสมบัติของเส้นใยแก้วเป็นฉนวน ไม่นำไฟฟ้า มีภูมิคุ้มกันจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ข้อด้อย

1) การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงต้องใช้เครื่องมือพิเศษ
2) เส้นใยแก้วนำแสงเปราะบาง แตกหักง่าย ไม่สามารถโค้งงอได้เหมือนสายเคเบิลทองแดง

เปรียบเทียบจุดเด่นและข้อด้อย ผู้ให้บริการโทรคมนาคมทั่วโลกมีการปรับเปลี่ยนโครงข่ายสายสื่อสารจากเคเบิลทองแดงมาเป็นโครงข่ายสายเคเบิลเส้นใยแก้วนำแสง ด้วยเหตุผลแนวโน้มต้นทุนการดำเนินการด้านต่าง ๆ เครื่องมือและราคาสายเคเบิล OFC ราคาต่ำลงอย่างเป็นนัยสำคัญ

ภาพประกอบที่ 1. แสดงการพัฒนาการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงและแสดงย่านความถี่สื่อสาร

การสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงเริ่มต้นปี คศ.1970 ส่งผ่านย่านความยาวคลื่น 800 nm ด้วยเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Multi-Mode ย่านแบนด์ (Band) “First window” ต่อมาปี คศ.1980 เทคโนโลยีการผลิตเส้นใยแก้วนำแสงมีการพัฒนาเนื้อแก้วเป็นชนิด Single-Mode ที่มีอัตราการสูญเสียต่ำ ส่งผ่านความยาวคลื่น 1300 nm เรียกแบนด์นี้ว่า “Second Window” ต่อมาปี คศ. 1990 ส่งผ่านสัญญาณผ่านความยาวคลื่น 1550 nm เรียกแบนด์นี้ว่า “Third window” ตามลำดับ

วัสดุที่ Silica Glass นำมาผลิตเส้นใยแก้วนำแสง คุณสมบัติในการส่งผ่านสัญญาณแสงความยาวคลื่นสั้นจะมีอัตราการสูญเสียมากกว่าความยาวคลื่นที่ยาวกว่า ความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการส่งผ่านสัญญาณแสงคือย่าน 1550 nm

แบนด์ 1300 nm และ 1550 nm มีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ประมาณ 100 nm ความเกี่ยวข้องระหว่างแบนด์วิดท์กับความยาวคลื่นเป็นไปตามสมการที่ 1.

$$\Delta f = \frac{c}{n\lambda^2}\Delta f \qquad \text{สมการที่ 1.}$$

เมื่อ c = ความเร็วแสงในสูญญากาศ

n = เป็นดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วนำแสง

λ = ความยาวคลื่นแสง

พื้นฐานการสื่อสารทางแสงผ่านเส้นใยแก้วนำแสงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1. ตัวอย่างเช่น ความยาวคลื่น λ =1550 nm มีแบนด์วิดท์ $\Delta\lambda$ =100 nm ดัชนีหักเหเส้นใยแก้ว n =1.5 แทนค่าในสมการที่ 1.

$$\Delta f = \frac{3x10^{8}}{1.5x(1550x10^{-9})^{2}} x100x10^{-9} \qquad \text{สมการที่ 2.}$$

$$= 8.3x10^{12} \quad Hz.$$

- ความยาวคลื่น $\lambda = 1550\,nm$ ความกว้างสเปกตรัมประมาณ 80 GHz
- ความยาวคลื่น $\lambda = 1330\,nm$ ความกว้างสเปกตรัมประมาณ 120 GHz

คุณสมบัติเส้นใยแก้วนำแสงความยาวคลื่น (λ) 1 nm มีความกว้างสเปกตรัม (Spectral Width) ประมาณ 100 GHz จากข้อจำกัดของเทคโนโลยีแต่ละคลื่นความถี่ส่งข้อมูลได้สูงสุด 10 $Gbps$ (STM-64)[5] ถ้าต้องการส่งข้อมูลมากกว่านี้สามารถประยุกต์นำแพลฟอร์ม DWDM (Dense Wavelength-division Multiplexing) มาใช้งานเพื่อเพิ่มความจุของช่องสัญญาณ

สเปกตรัมสำหรับการส่งสัญญาณเส้นใยแก้วนำแสงมาตรฐาน ITU กำหนดสเปกตรัม (Spectral) เริ่มจาก O-band จนถึง L-band สายเคเบิล OFC มาตรฐานเส้นใยแก้วนำแสงระยะทางไกล บมจ.ทีโอที ใช้มาตรฐาน ITU-T G.652D ระยะใกล้ เช่น โครงข่าย FTTx ใช้มาตรฐาน ITU-T G.652A2/ ITU-T G.657B2 และ ITU-T G.657B3

ภาพประกอบที่ 2. แสดงสเปกตรัมแถบย่านคลื่นความถี่แต่ละแถบ

เดิมมาตรฐานเส้ยใยแก้วนำแสงอ้างอิง ITU-T G. 652B แต่มีปัญหา Water Peak ตามภาพประกอบที่ 2. การใช้งานจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงสเปกตรัมแถบ E-band เนื่องจากมีการสูญเสียย่านนี้สูง (Water Peak $\lambda = 1383\,nm$) เมื่อเทคโนโลยีมีการพัฒนา มาตรฐาน ITU-T G. 652D สามารถขจัดปัญหา Water Peak เปลี่ยนเป็น LWP (Low Water Peak) สามารถส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงได้ทุกย่านความยาวคลื่นใช้งาน

4.1 เส้นใยแก้วนำแสง (Optical Fiber)

4.1.1 โครงสร้างเส้นใยแก้วนำแสง

โครงสร้างเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละ Fiber ประกอบด้วย ส่วนที่เป็นแกน (Core) อยู่ตรงกลาง ห่อหุ้มด้วยส่วนห่อหุ้ม (Cladding) ชั้นนอกสุดหุ้มด้วยส่วนป้องกัน (Coating) แต่ละชั้นมีค่าดัชนีหักเห ของแสงต่างกันคอยควบคุมการเดินทางของแสงในเส้นใยแก้วนำแสง

- **แกน (Core)** อยู่ตรงกลางของเส้นใยแก้วนำแสง เป็นส่วนหลักที่แสงเดินทางผ่าน โดยใช้หลักการสะท้อนกลับหมดภายใน มีค่าดัชนีหักเหของแสงมากสุด
- **ส่วนห่อหุ้ม (Cladding)** จะห่อหุ้มแกนโดยรอบ ส่วนห่อหุ้มมีดัชนีหักเหน้อยกว่า ส่วนของแกน เพื่อให้แสงสะท้อนกลับหมดตามกฎสะท้อนกลับหมดของหลักมุมวิกฤติ
- **ส่วนป้องกันหรือฉนวนห่อหุ้ม (Coating/Buffer)** ชั้นถัดมาจาก Cladding ป้องกันแสงรบกวนจากภายนอกและเสริมความแข็งแรง โครงสร้างประกอบด้วย ชั้นพลาสติกเคลือบสี
- **Tight Buffer** ฉนวนหุ้มชั้นเพิ่มความแข็งแรงในการใช้งาน นิยมหุ้มสายชนิด Patch Cord (มี Connector 2 ด้าน) สาย Pigtail (มี Connector ด้านเดียว)

ภาพประกอบที่ 3. โครงสร้างเส้นใยแก้วนำแสง

ชนิดเส้นใยแก้วนำแสงมาตรฐานกำหนดโดย ITU (International Telecommunication Union) ชนิดเส้นใยแก้ว ITU กำหนดไว้มาตรฐานแบ่งตามลักษณะการใช้งานหลายมาตรฐาน แต่ที่สำคัญ มีประมาณ 3 มาตรฐาน คือ

1) ITU-T G.652 [3] เป็นเส้นใยแก้วนำแสง Single Mode Fiber เหมาะกับการใช้ที่ $\lambda = 1310\ mm$ และ $\lambda = 1550\ mm$ ที่ในช่วง $\lambda = 1550\ mm$ จะมี Dispersion สูง

2) ITU-T G.655 [4] มีคุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสง NZDSF (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber) ออกแบบมาเพื่อแก้ปัญหา Four-Wave Mixing จาก Dispersion Coefficient ไม่เท่ากับศูนย์ใช้งานย่าน C-Band ที่ λ =1530 ถึง 1565 mm ใช้งานย่าน L-Band ที่ λ =1565 ถึง 1625 mm เพื่อรองรับการที่จะใช้งาน WDM (Wavelength Division Multiplexing) ส่งคลื่นความถี่หลายความยาวคลื่นผ่านสายไฟใยแก้วนำแสงดังแสดงภาพประกอบที่ 4.

3) ITU-T G.657 เส้นใยแก้วนำแสงแบบ Single Mode สำหรับ FTTx Network มาตรฐาน ITU-T G.657 แบ่ง Category ออกได้ 2 Category คือ

- Category A เชื่อมโยงระหว่างตู้ SDP (Splitter Distribution Point) ไปยังอาคารผู้ใช้บริการ FTTx แบ่งย่อยออกเป็น ITU-T G.657A1 รัศมีโค้งงอต่ำสุด 10.0 mm ITU-T G.657A2 รัศมีโค้งงอต่ำสุด 7.5 mm
- Category B ใช้งานช่วงสั้น ๆ ตอนปลายของโครงข่ายในสภาพแวดล้อมที่มีการโค้งงอ เช่น ภายในอาคาร แบ่งย่อยออกเป็น ITU-T G.657B2 รัศมีโค้งงอต่ำสุด 7.5 mm ITU-T G.657B3 รัศมีโค้งงอต่ำสุด 5.0 mm

ภาพประกอบที่ 4. แสดงคุณสมบัติเส้นใยแก้วนำแสงมาตรฐาน ITU-T G.655

4.1.2 การสูญสียของสัญญาณแสงในเส้นใยแก้วนำแสง

ปัจจัยที่ก่อให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณแสง (Loss) ในเส้นใยแก้วนำแสงมีหลายปัจจัย สามารถสรุปได้ดังนี้

1) **Bending Loss** เกิดจากการโค้งงอของสายเคเบิล OFC เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด ความโค้งงอของสายเคเบิล OFC ปกติ (Minimum Bend Radius)

2) **Splice Loss** เกิด ณ จุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงเข้าด้วยกัน วิธี Splice มี 2 วิธี คือ Mechanical Loss และ Fusion Splicing Loss ทั้งนี้ Mechanical Loss จะมีค่า Loss สูงกว่าวิธี Fusion Splicing
3) **Connector Loss** ปัจจัยเกิดจาก Fiber Optic Connector ที่มีสาเหตุจากชนิดของ Connector ที่ใช้งาน ความสะอาดหน้าสัมผัส (Contamination) การติดตั้ง Connector ที่ไม่ถูกต้อง และพื้นผิวของ Connector ชำรุดเสียหาย เป็นต้น
4) **Loss Inherent to Fiber** ปัจจัยการสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสงเองที่ไม่สามารถขจัดออกได้ในกระบวนการผลิต เกิดสิ่งสกปรก (Impurities) ปนเปื้อนในเส้นใยแก้วนำแสง การดูดซึมของแสงในระดับของโมเลกุล ความหนาแน่นเชิงแสง (Rayleigh Scattering)
5) **ค่า Loss จากการติดตั้ง** ปัจจัยเกิดจากการติดตั้งไม่ถูกต้องทำให้เกิดความเสียหายกับสายเคเบิล OFC เช่น “แรงกด-แรงดึง” จากอุปกรณ์จับยึด “แรงกระแทก-แรงเหวี่ยง-แรงบิด” จากแรงลมหรือแรงกระทำจากภายนอก ทำให้เกิดค่า Loss แบบคงที่ตลอดเวลากับเปลี่ยนแปลงตามแรงกระทำ

ภาพประกอบที่ 5. ปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดค่า Loss บนเส้นใยแก้วนำแสง

ทดสอบปัจจัยค่า Loss ที่เกิดบนเส้นใยแก้วนำแสงด้วยเครื่อง OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) เราจะได้กราฟที่แสดงผลค่า Loss ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ตามภาพประกอบที่ 5.

4.2 ประเภทสายเคเบิลใยแก้วนำแสง (Optical Fiber Cable)

สายเคเบิล OFC แบ่งกลุ่มตามลักษณะการติดตั้งใช้งานแบ่งได้ 3 กลุ่มคือ สายเคเบิล OFC แบบแขวนในอากาศ (Aerial Cable) สายเคเบิล OFC ติดตั้งใต้พื้นดิน (Underground Cable) และสายเคเบิล OFC ติดตั้งใต้น้ำ (Submarine Cable)

สายเคเบิล OFC ถ้าแบ่งตามโครงสร้างสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่มเหมือนกัน คือ

1) สายเคเบิล OFC แบบ Loose Tube Single Core เส้นใยแก้วนำแสงจัดวางใน Loose Tube Cable หรือ Buffer Tube ผลิตจากวัสดุ PBT (Polybutylene Terephthalate) PP (Polypropylene) หรือวัสดุที่เหมาะสม เส้นผ่านศูนย์กลาง Loose Tube (Outer Diameter) มาตรฐานมี 2 ขนาดคือขนาด 2.5 mm รองรับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง 6 F และขนาด 3.0 mm รองรับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง 12 F ภายใน Loose Tube มีทั้งแบบบรรจุ Filling Compound ที่เรียกว่า Thixotropic Jelly Compound และแบบแห้ง (Dry)

ภาพประกอบที่ 6. สายเคเบิล OFC Loose Tube Single Core

2) สายเคเบิล OFC ชนิด Air Blown มีจุดเด่นเรื่องความจุของเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสายเคเบิล OFC เท่ากัน เหมาะสำหรับติดตั้งใต้พื้นดินมากกว่าแขวนอากาศ ขนาด Loose Tube จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าการติดตั้งสายเคเบิล OFC ชนิด Air Blown ต้องใช้เครื่องมือและวิธีการเฉพาะ แต่วิธีการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงใช้เครื่องมือเหมือนสายเคเบิล OFC แบบ Loose Tube Single Core

ภาพประกอบที่ 7. สายเคเบิล OFC ชนิด Air Blown และท่อ Micro duct

3) สายเคเบิล OFC ชนิด Ribbon หรือ High Fiber Count Ribbon Slotted Cable สำหรับใช้งานร้อยท่อฝังดินจัดอยู่ประเภทสาย Duct ในมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 2165-2548 โครงสร้างออกแบบให้เป็นช่อง (Slotted) มีวัสดุรองรับแรงดึงอยู่ตรงแกนกลาง (Strength Member: FRP or Steel) จะมีเส้นใยแก้วนำแสงต่อเป็นแพ (Freeform Ribbon) บรรจุอยู่ในช่อง (Slotted) หุ้มด้วยวัสดุเทปกันน้ำ (Water Blocking tape) เปลือกนอก PE อีกชั้นเพื่อ

ความแข็งแรง ขนาดความจุสูงสุด 3 456 F ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34.0 mm การติดตั้งสายเคเบิล OFC ชนิด Ribbon เหมือนสายเคเบิล OFC แบบ Loose Tube Single Core และการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงต้องใช้เครื่องมือเฉพาะหรือแยกเส้นใยแก้วนำแสงเดี่ยวออกจากแพต่อแบบสาย OFC แบบ Loose Tube Single Core ก็ได้

ภาพประกอบที่ 8. โครงสร้างสายเคเบิล OFC ชนิด High Fiber Count Ribbon Slotted Cable

สายเคเบิล OFC มีการกำหนดสีของเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละ Fiber ตามมาตรฐาน EIA/TIA-598-A เพื่อสะดวกในการใช้งาน รายละเอียดตามตารางที่ 1.

ตารางที่ 1. คู่สีเส้นใยแก้วนำแสงของสายเคเบิล OFC ตามมาตรฐาน EIA/TIA-598-A

Number	คู่สีเส้นใยแก้วนำแสง 6 Core	คู่สีเส้นใยแก้วนำแสง 12 Core
1	น้ำเงิน	น้ำเงิน
2	ส้ม	ส้ม
3	เขียว	เขียว
4	น้ำตาล	น้ำตาล
5	เทา	เทา
6	ขาว	ขาว
7	-	แดง
8	-	ดำ
9	-	เหลือง
10	-	ม่วง
11	-	ชมพู
12	-	ฟ้า

หมายเหตุ

1	Blue
2	Orange
3	Green
4	Brown
5	Slate
6	White
7	Red
8	Black
9	Yellow
10	Violet
11	Rose
12	Aqua

เส้นใยแก้วนำแสงแต่ละ Fiber จะมีคู่สีกำกับเพื่อความสะดวกในการใช้งานสูงสุด 12 สี ตามมาตรฐาน EIA/TIA-598-A (Optical Fiber Cable Color Coding) รายละเอียดตามตารางที่ 1. กรณีจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของสายเคเบิล OFC มากกว่า 12 สี จะใช้แถบสี Loose Tube และเทปสีกำกับ

4.3 โครงข่ายสายเคเบิลใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Cable Network)

โครงข่ายสายเคเบิลใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Cable Network) แบ่งออกเป็นโครงข่ายหลัก (Backbone Network) เชื่อมต่อระหว่าง “ชุมหลัก” กับ “ชุมสายหลัก” และโครงข่ายรอง (Last Mile) เชื่อมต่อระหว่าง “ชุมหลัก”ไปยัง “ผู้ใช้บริการ” เช่น บริการระบบ FTTx (Fiber to the X) กรณีโครงข่ายหลักที่เชื่อมต่อด้วยสายเคเบิล OFC ชำรุดเสียหาย จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพบริการ Broadband Internet เป็นวงกว้าง

สายเคเบิล OFC โครงข่ายหลักส่วนมากจะเชื่อมต่อระหว่างเมืองหรือระหว่างจังหวัดขึ้นกับการออกแบบโครงข่ายนั้น ๆ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสูงสุด 312 F (มาตรฐาน บมจ.ทีโอที พ.ศ.2562) ระยะห่างระหว่างชุมสายหลักขึ้นกับการออกแบบที่ต้องสอดคล้องกับอุปกรณ์รับส่งข้อมูล SFP (Small Form Factor Pluggable)

พฤติกรรมผู้บริโภคผูกติดกับ Internet ตลอดเวลา ผู้ให้บริการ Broadband Internet แต่ละรายต้องสร้างความเชื่อมั่นต่อผู้บริโภค นอกเหนือจากราคาค่าบริการ ความเร็วในการส่งข้อมูลแล้ว การให้บริการที่ต่อเนื่องเมื่อสัญญาณ Internet ขาดหายต้องรีบแก้ไขกลับมาให้บริการเร็วที่สุด นับว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่จะรักษาฐานลูกค้าไว้ได้

ภาพประกอบที่ 9. แสดงจำนวนหัวต่อ OFC ที่เพิ่มขึ้นเมื่อซ่อมบำรุง

โครงข่ายสายเคเบิล OFC ระยะห่างหัวต่อเคเบิล OFC แบ่งเป็นโครงข่ายสายเคเบิล OFC ที่ร้อยท่อหรือฝังใต้ผิวดินและโครงข่ายสายเคเบิล OFC แขวนอากาศระยะห่างหัวต่อเคเบิล OFC ทุก ๆ 4000 เมตร ตามมาตรฐานความยาวสายเคเบิล OFC เมื่อโครงข่ายสายเคเบิล OFC ชำรุดจากสิ่งแวดล้อม สัตว์กัดแทะ ไฟไหม้ หรือสาเหตุอื่นใดไม่สามารถส่งผ่านสัญญาณได้ ส่งผลกระทบต่อการให้บริการ

หัวต่อเคเบิลปกติห่างกัน 4000 เมตร หมายเลข 1, 2 และ 3 ตามภาพประกอบที่ 9. เมื่อเกิดเหตุสายเคเบิล OFC ระหว่างหัวต่อเคเบิลหมายเลข 2-3 ชำรุด จำเป็นต้องซ่อมบำรุงนำสายเคเบิล OFC ชนิดและขนาดเดียวกันความยาว 300–500 เมตรมาต่อคร่อมช่วงนี้ มีหัวต่อเคเบิล OFC เพิ่มขึ้น 2 หัวต่อ คือตำแหน่ง A และ B

โครงข่าย ODN (Optical Distribution Network) จำนวนเส้นใยแก้วนำแสง 6-24 F การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง 2 หัวต่อ ระยะเวลาในการเชื่อมต่อใช้เวลาไม่นานมากแต่ถ้าเป็นโครงข่ายสายเคเบิล OFC หลัก จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสูงสุดถึง 312 F จากความกดดันของระยะเวลา มาตรฐานการให้บริการ SLA ปัญหาเครื่อง Fusion Splice บางรุ่นใช้เวลาอบ Protective Sleeves พนักงานบางท่านเริ่มประยุกต์นำเส้นใยแก้วนำแสงหลาย Fiber ห่อหุ้มร่วมใน Protective Sleeves เดียวกัน เพื่อซ่อมบำรุงให้บริการ Broadband Internet กลับมาใช้งานได้เร็วที่สุด

4.4 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง

การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงเป็นขบวนการนำเส้นใยแก้วนำแสง 2 เส้นเข้าด้วยกันเพื่อส่งผ่านลำแสงระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงไปอีกฝั่ง ณ ตำแหน่งนี้ต้องมีการสูญเสียสัญญาณ (Loss) น้อยที่สุด เทคนิคการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงมี 3 วิธี

1) เชื่อมต่อหัว Connector Fiber optic เข้าด้วยกันผ่าน Adapter นิยมเชื่อมต่อตำแหน่งที่ต้องมีการตรวจสอบค่าเพื่อบำรุงรักษา เช่น ตำแหน่งอุปกรณ์ฯ ภายในตู้ SDP จุดเด่นเมื่อต้องการตรวจวัดค่าสะดวก จุดอ่อน มีการสูญเสียสัญญาณจุดเชื่อมต่อสูง
2) เชื่อมต่อด้วยวิธีแมคคานิคสไปรท์ (Mechanical Splice) ด้วยการนำปลายเส้นใยแก้วมาชนกันด้วยอุปกรณ์ต่อตรงสายไฟเบอร์ออฟติก คล้ายกับการเข้าหัวไฟเบอร์ออฟติกแบบ Fast Connector ภายในอุปกรณ์มีร่องบังคับตำแหน่งของเส้นใยแก้วนำแสง จากนั้นมีอุปกรณ์ล็อค เหมาะสำหรับการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงชั่วคราว จุดเด่นคือไม่ต้องมีเครื่อง Fusion Splicer ที่มีราคาสูง จุดอ่อนคือการสูญเสียสัญญาณขึ้นกับประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่อตรงสายไฟเบอร์ออฟติก ระยะยาวจุดเชื่อมต่ออาจมีการสูญเสียสัญญาณสูงขึ้น

ภาพประกอบที่ 10. การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงด้วยเครื่อง Fusion Splicer หลักการอาร์คไฟฟ้า

3) เชื่อมต่อด้วยวิธีหลอมละลายเส้นใยแก้วนำแสงเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง Fusion Splicer ใช้หลักการอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc) ตามภาพประกอบที่ 10. เป็นวิธีการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากวิธีการนี้จุดเชื่อมต่อมีการสูญเสียสัญญาณน้อยสุด จุดเชื่อมต่อมีความแข็งแรงน่าเชื่อถือมากที่สุด

4.4.1 ค่าสูญเสีย ณ จุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง

การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงสามารถเชื่อมต่อด้วยวิธีหลอมละลายเส้นใยแก้วนำแสงเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง Fusion Splicer และการนำปลายเส้นใยแก้วนำแสงสอง Fiber มาชนกันด้วยหัวต่อเคเบิลไฟเบอร์ออฟติก (Fiber Optic Connector) รอยต่อของหัวต่อเคเบิลจะมีอากาศคั่นกลาง คุณภาพจุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงขึ้นกับปัจจัยหลายประการ รอยต่อจะมีค่าพารามิเตอร์สำคัญเกิดขึ้น 2 ค่าที่สำคัญมากคือ Insertion Loss (IL) และ Optical Return Loss (ORL)

4.4.1.1 Insertion Loss

Insertion Loss (IL) คือค่าการลดทอนของสัญญาณที่ผ่านจุดต่อโดยคำนวณได้จากการวัดสัญญาณแสงก่อนผ่านรอยต่อและหลังจากผ่านรอยต่อนำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งจะได้ค่าสัญญาณลดทอนลงเล็กน้อย โดยปกติค่า Loss จะอยู่ที่ประมาณ 0.10 dB ถึง 0.50 dB แต่ต้องไม่เกิน 0.75 dB ตามมาตรฐาน

ตำแหน่งที่ปลายเส้นใยแก้วนำแสง 2 Fiber มาเชื่อมต่อถึงกันเกิดค่า Loss ณ ตำแหน่งนี้ (Insertion Loss) เกิดปรากฏการณ์การส่งผ่านทางแสงขึ้น 4 เหตุการณ์

1) แสงตกกระทบจุดเชื่อมต่อ P_i (Incident Power)
2) แสงส่งผ่านออกจากจุดเชื่อมต่อ P_t (Transmitted Power)
3) แสงสะท้อนกลับจากจุดเชื่อมต่อ P_r (Reflected Power)
4) นำเส้นใยแก้วนำแสงที่ขนาด Core ไม่เท่ากันมาเชื่อมต่อกันจะเกิดได้ 2 กรณี
    - ขนาด Core ใหญ่ ไปหา Core เล็กกว่าแสงบางส่วนกระเจิงเข้าสู่ Cladding เกิดการสูญเสียสัญญาณ สามารถยิงแสงสีแดงเพื่อดูแสงที่กระเจิงออกมาได้ ภาพประกอบที่ 11. (B)
    - ขนาด Core เล็ก ไปหา Core ใหญ่กว่าไม่มีแสงกระเจิงออกจาก Core เข้าสู่ Cladding ภาพประกอบที่ 11. (C)

ภาพประกอบที่ 11. การส่งผ่านสัญญาณแสงผ่านจุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง

สามารถคำนวณหาค่าการสูญเสียสัญญาณแสงจุดเชื่อมต่อ L_i (Insertion Loss) ด้วยการเปรียบเทียบระหว่างแสงตกกระทบจุดเชื่อมต่อ P_i (กำลังงานด้าน Input) กับแสงส่งผ่านออกจากจุดเชื่อมต่อ P_t (กำลังงานด้าน Output) ด้วยสมการที่ 3.

$$L_i = -10\log\left(\frac{P_t}{P_i}\right) \quad dB \qquad \text{สมการที่ 3.}$$

ทั้งนี้ค่า IL ยิ่งน้อยยิ่งดีแสดงว่าค่าสูญเสียสัญญาณแสงจุดเชื่อมต่อมีน้อย สัญญาณแสงสามารถส่งผ่านจุดเชื่อมต่อได้มีประสิทธิภาพ

4.4.1.2 Optical Return Loss

Optical Return Loss (ORL) คือค่าของสัญญาณแสงในส่วนที่สะท้อนกลับบริเวณจุดเชื่อมต่อ ถ้าค่า ORL มีมากแสดงว่าสัญญาณแสงมีการสะท้อนกลับน้อย ในระบบการสื่อสารอนาล็อกต้องการค่า ORL สูง ๆ เพื่อความแม่ยำของสัญญาณ สัญญาณแสงที่สะท้อนกลับส่งผลถึงการลดทอนของสัญญาณด้วย เนื่องจากเมื่อมันสะท้อนกลับไปหักล้างกับสัญญาณที่ส่งมาสัญญาณก็จะลดทอนลงไป

ตำแหน่งที่ปลายเส้นใยแก้วนำแสงชนกันตามอุดมคติแสงต้องส่งผ่านได้หมด แต่ในทางปฏิบัติจุดที่เนื้อแก้วหลอมรวมกันเกิดฟองอากาศหรือค่าดัชนีที่ผิดเพี้ยนขึ้น เมื่อสัญญาณแสงมากระทบจะเกิดสัญญาณแสงสะท้อนกลับ L_r (Return Loss) การเชื่อมต่อที่ดีต้องต่ำสุดหรือเข้าใกล้ 0 dB สามารถคำนวณหาค่าสะท้อนกลับได้ตามสมการที่ 4.

$$L_r = -10\log\left(\frac{P_r}{P_i}\right) \quad dB \qquad \text{สมการที่ 4.}$$

บางท่านอาจสับสนว่าทำไม ORL ยิ่งมากยิ่งดี จากสมการที่ 3. แสดงให้เห็นว่าค่า P_r (กำลังงานสะท้อนกลับ) น้อยกว่าค่า P_i (กำลังงานด้าน Input) มากๆ มันก็จะทำให้ ORL มากไปด้วย

ส่งผลดีเพราะระบบใหน ๆที่ออกแบบมาเขาก็ต้องพยายามทำให้ P_r ซึ่งเป็นสัญญาณแสงสะท้อนกลับน้อย ๆ

4.4.1.3 เส้นใยแก้วนำแสงที่ขนาด Core ไม่เท่ากันมาเชื่อมต่อกัน

เส้นใยแก้วนำแสงที่ขนาด Core ไม่เท่ากันมาเชื่อมต่อกันตำแหน่งที่ปลายเส้นใยแก้วนำแสงชนกันขนาด Core ไม่เท่ากันมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน กรณีส่งสัญญาณแสงจากขนาด Core ใหญ่ ไปหา Core เล็กว่าแสงบางส่วนกระเจิงเข้าสู่ Cladding เกิดการสูญเสียสัญญาณ อีกกรณีส่งสัญญาณแสงจาก Core เล็กไปหา Core ใหญ่กว่าไม่มีแสงกระเจิงออกไม่มีการสูญเสียสัญญาณเกิดขึ้น สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 5.

$$Loss = -10\log\left(\frac{OD_{Rx}}{OD_{Tx}}\right)^2 \quad dB \quad \text{เมื่อ} \quad OD_{Tx} \succ OD_{Rx} \quad \text{สมการที่ 5.}$$

เมื่อ OD_{Tx} = ค่ารัศมีของ Core เส้นใยแก้วนำแสงที่ส่งสัญญาณแสงไปยังจุดเชื่อมต่อ

OD_{TR} = ค่ารัศมีของ Core เส้นใยแก้วนำแสงที่รับสัญญาณแสงจากจุดเชื่อมต่อ

4.4.2 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Single Mode ข้ามมาตรฐาน ITU

การบำรุงรักษาโครงข่าย OFC บางกรณีต้องใช้สาย Patch Cord & Pigtail ที่มีอยู่เพื่อแก้ปัญหาเฉพาะหน้าหรือด้วยเหตุผลอื่นใด จำเป็นต้องเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงข้ามมาตรฐาน ITU เช่น เชื่อมต่อระหว่างมาตรฐาน ITU-T G.652D กับมาตรฐาน ITU-T G.657A2 หรือระหว่างมาตรฐาน ITU-T G.655 กับมาตรฐาน ITU-T G.652 จะได้หรือไม่

การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Single Mode ข้ามมาตรฐาน มีเหตุปัจจัยเกี่ยวข้องหลายปัจจัย เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโหมด MFD (Mode Field Diameter) ค่า Margin Loss ย่านความยาวคลื่น (Wavelength) ที่ใช้งาน ความเร็วในส่งข้อมูล (Bit Rate) เป็นต้น

MFD คือเส้นผ่านศูนย์กลางของสนามโหมดทางแสง เนื่องจากเราไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดทางกลวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Core ได้ จำเป็นต้องวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง Core ทางอ้อมด้วยวิธีวัดค่ารูรับแสง (NA) และความยาวคลื่นตัดของเส้นใยแก้วนำแสง มาคำนวณความสัมพันธ์เพื่อหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ Core โดยทั่วไป MFD มีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางทางกายภาพของ Core แต่จะถูกกำหนดตำแหน่งแนวรัศมีที่ความเข้มของแสงตกกระทบถึง e^{-2} ตามภาพประกอบที่ 12.

ภาพประกอบที่ 12. แสดงค่า MFD ที่กำหนดด้วยแนวความเข้มของแสง

สามารถคำนวณหาค่า MFD ที่ตำแหน่งแนวรัศมีที่ความเข้มตกถึง e^{-2} ของความเข้มสูงสุด MFD จากค่า NA (Numerical Aperture) ค่า V (Normalized Frequency) ตามสมการที่ 6. และ 7.

$$MFD = 2a\left(0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^{6}}\right) \qquad \text{สมการที่ 6.}$$

$$V = \frac{2\pi aNA}{\lambda} \qquad \text{สมการที่ 7.}$$

เมื่อ V = V-Value of Fiber or Normalized Frequency

a = Core Radius

NA = Numerical Aperture

λ = Operation Wavelength

คุณสมบัติเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Characteristics) มาตรฐาน ITU กำหนดค่า MFD ของแต่ละหมายเลขต่างกันดังนี้

- ITU-T G.652D Mode Field Diameter at 1310 nm 9.2 $\mu m \pm 0.4\ \mu m$
- ITU-T G.655 Mode Field Diameter at 1550 nm 8-11 $\mu m \pm 0.7\ \mu m$
- ITU-T G.657A/A1 Mode Field Diameter at 1310 nm 8.6 $\mu m \pm 0.4\ \mu m$
- ITU-T G.657B3 Mode Field Diameter at 1310 nm 8.6-9.2 $\mu m \pm 0.4\ \mu m$

การนำสาย Patch Cord & Pigtail ชนิด Single Mode คนละมาตรฐาน ITU มาเชื่อมต่อใช้งานจะมีปัญหาในการใช้งานหรือไม่ พอจะสรุปเป็นแนวทางได้ดังนี้ (เป็นข้อมูลเบื้องต้นกรณีซ่อมบำรุง

เฉพาะหน้าควรตรวจสอบผลการใช้งานจริงประกอบการตัดสินใจ การติดตั้งใช้งานจริงควรใช้สาย Patch Cord & Pigtail มาตราฐานเดียวกัน)

1) ITU-T G.652 นำสาย Patch Cord & Pigtail มาตรฐาน ITU-T G.657 สามารถงานได้ทุกย่านความยาวคลื่อน เนื่องจากค่า MFD รองรับ
2) ITU-T G.657 นำสาย Patch Cord & Pigtail มาตรฐาน ITU-T G.652 สามารถงานได้ทุกย่านความยาวคลื่อน เนื่องจากค่า MFD รองรับ
3) ITU-T G.655 นำสาย Patch Cord & Pigtail มาตรฐาน ITU-T G.652 ใช้งานย่านความยาวคลื่น 1300 nm สามารถใช้งานได้ เนื่องจาก ITU-T G.655 ให้ค่า Dispersion สูงกว่าและค่า MFD รองรับ
4) ITU-T G.655 นำสาย Patch Cord & Pigtail มาตรฐาน ITU-T G.652 ใช้งานย่านความยาวคลื่น 1550 nm สามารถงานได้ ถ้าส่งข้อมูลที่ Bit rate น้อยกว่า 10 Gb/s แต่ถ้าส่งข้อมูลสูงกว่านี้ต้องใช้สาย Patch Cord & Pigtail มาตรฐาน ITU-T G.655 เหมือนกัน
5) ITU-T G.655 ส่งข้อมูลด้วย $DWDM$ ใช้งานย่านความยาวคลื่น 1550 nm ต้องใช้สาย Patch Cord & Pigtail มาตรฐาน ITU-T G.655 เหมือนกัน

4.4.3 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงด้วยเครื่อง Fusion Splicer

การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงสายเคเบิล OFC ด้วยเครื่อง Fusion Splicer ใช้หลักการอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc) เป็นวิธีการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากวิธีการนี้จุดเชื่อมต่อมีค่าสูญเสียทางแสง (Loss) น้อยสุด จุดเชื่อมต่อมีความแข็งแรงน่าเชื่อถือ อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงที่จำเป็นประกอบด้วยแอลกอฮอล์ ความบริสุทธิ์ในท้องตลาดมีหลากหลาย เช่น 95.0 99.5 99.8 และ 99.9 % แนะนำให้เลือกใช้ความบริสุทธิ์ 99.5 % ขึ้นไป กระดาษทำความสะอาดที่ไม่มีขุย คีมสำหรับปอกฉนวน (Fiber Cable Stripper) มีดตัดเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Cleaver) และเครื่อง Fusion Splicer ตามภาพประกอบที่ 13.

ภาพประกอบที่ 13. อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง

ขั้นตอนการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงด้วยวิธี Fusion Splicer มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: เตรียมเส้นใยแก้วนำแสงที่จะเชื่อมต่อ โดยปอกฉนวนหุ้ม Loose Tube และวัสดุห่อหุ้มอื่น ๆ

ขั้นตอนที่ 2: ปอกฉนวนป้องกันเส้นใยแก้วนำแสง (Coating/Buffer) ด้วยคีมสำหรับปอกฉนวน (Fiber Stripper) มีขนาดของร่องคีมเหมาะสมกับเส้นใยแก้วนำแสง

ขั้นตอนที่ 3: ทำความสะอาดเส้นใยแก้วนำแสงด้วยกระดาษเช็ดทำความสะดวกชุบแอลกอฮอล์ความบริสุทธิ์

ขั้นตอนที่ 4: ตัดเส้นใยแก้วนำแสงด้วยมีดตัดเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Cleaver) ขั้นตอนนี้มีความสำคัญมาก ปลายเส้นใยแก้วนำแสงหลังตัดไม่มีรอยแตกร้าวหรือมุมเอียง ปลายเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ปลายควรเรียบและตั้งฉากกับแกนเพื่อให้ประกบกันอย่างเหมาะสม

ขั้นตอนที่ 5: หลอมรวมปลายของเส้นใยแก้วนำแสงเข้าด้วยกันด้วยเครื่อง Fusion Splicer จัดวางปลายบน Holder ตำแหน่งปลายของเส้นใยแก้วนำแสงจัดวางในตำแหน่งที่เหมาะสม จากนั้นควบคุมเครื่อง Fusion Splicer ให้กระแสไฟฟ้าอาร์คเพื่อหลอมละลายเส้นใยแก้วนำแสงเข้าด้วยกัน

ขั้นตอนที่ 6: ปกป้องเส้นใยแก้วนำแสงบริเวณจุดเชื่อมต่อมาตรฐานทั่วไปจุดเชื่อมต่อรับแรงดึง 0.5 ถึง 1.5 ปอนด์ หลังเชื่อมต่อเนื้อแก้วที่ไม่มีฉนวนห่อหุ้มไม่สามารถรับการโค้งงอได้ ต้องป้องกันด้วย Protective Sleeves หรือท่อหดแบบความร้อนเจลซิลิโคนห่อหุ้มป้องกัน

4.4.4 การห่อหุ้มจุดเชื่อมต่อด้วย Protective Sleeves

โครงสร้างเส้นใยแก้วนำแสงเนื้อแก้วประกอบด้วย Core สำหรับให้ลำแสงส่งผ่านและ Cladding ควบคุมให้ลำแสงเดินทางผ่าน Core ด้วยค่าดัชนีหักเหทางแสงที่แตกต่างกัน เนื้อแก้วที่มี Core เป็นแกนกลางห่อหุ้มด้วย Cladding โครงสร้างเปราะบางแตกหักง่าย ไม่สามารถโค้งงอได้ต้องห่อหุ้มด้วย Coating หรือฉนวนห่อหุ้มอีกชั้นด้วยวัสดุ UV Acrylic เสริมให้เส้นใยแก้วนำแสงแข็งแรงสามารถโค้งงอได้

ภาพประกอบที่ 14. เส้นใยแก้วนำแสงที่ห่อหุ้มด้วย Protective Sleeves

การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงต้องปอก Coating ออกจากเนื้อแก้ว ทำความสะอาด ตัดเส้นใยแก้วและเชื่อมต่อ (Splicer) เครื่อง Fusion Splicer ตามลำดับ ตำแหน่งที่เส้นใยแก้วนำแสงเชื่อมต่อกันไม่มีฉนวนห่อหุ้ม ไม่สามารถโค้งงอหรือรับแรงดึงได้ (จุดเชื่อมต่อรับแรงดึง 0.5 - 1.5 ปอนด์) ต้องป้องกันจุดเชื่อมต่อด้วย Protective Sleeves หรือท่อหดแบบความร้อนเจลซิลิโคนห่อหุ้มป้องกัน

สายเคเบิล OFC แบ่งตามโครงสร้างได้ 2 โครงสร้าง คือ 1) โครงสร้าง Loose Tube Single Core และชนิด Air Blown OFC เส้นใยแก้วนำแสงจะแยกออกเป็นเส้นเดี่ยว 2) โครงสร้างเส้นใยแก้วนำแสงจัดเรียงคล้ายสายริบบิ้น สูงสุดแถบละ 12 F จากโครงสร้างสายเคเบิลที่แตกต่างกัน Protective Sleeves ที่นำมาใช้งานแต่ละโครงสร้างก็แตกต่างกันด้วย

ภาพประกอบที่ 15. Protective Sleeves สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงมาตรฐาน 1 F

โครงสร้าง Protective Sleeves สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงมาตรฐาน 1 F ทั่วไป ตามภาพประกอบที่ 15. ชั้นในสุด (Inner or Fiber Tube) มี Ethylene Vinyl มีคุณสมบัติเมื่ออบด้วยความ

ร้อนจะหลอมละลายห่อหุ้มเส้นใยแก้วนำแสงไว้ทั้งหมด ตัว Ethylene Vinyl ทนต่อความชื้น ชั้นถัดมาระหว่างชั้นในกับชั้นนอกมีแท่งสแตนเลส (Steel Rod) เพิ่มความแข็งแรงและช่วยรับแรงดึง ชั้นนอกสุดผลิตจาก Polyolefin Heat Shrink เมื่ออบด้วยความร้อนจะหดตัวที่อุณหภูมิประมาณ 125 ^{O}C Protective Sleeves สำหรับเส้นใยแก้วนำแสง 1 F อุณหภูมิใช้งาน -45 ^{O}C ℃ ถึง 100 ^{O}C

ภาพประกอบที่ 16. Protective Sleeves สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Ribbon

โครงสร้าง Protective Sleeves เส้นใยแก้วนำแสงสาย OFC ชนิด Ribbon ตามภาพประกอบที่ 16. จะแตกต่างจาก Protective Sleeves สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงมาตรฐาน 1 F ทั่วไปจากวัตถุประสงค์การใช้งานต่างกัน กล่าวคือ Protective Sleeves สำหรับเส้นใยแก้วนำแสง 1 F ใช้ห่อหุ้มจุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงเพียง Fiber เดียว แต่ Protective Sleeves สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงชนิด Ribbon ห่อหุ้มเส้นใยแก้วนำแสงเป็นกลุ่มที่รวมตัวคล้ายสาย Ribbon ต่ำสุด 2 F สูงสุด 12 F ต่อ Protective Sleeves 1 หลอด

โครงสร้าง Protective Sleeves เส้นใยแก้วนำแสงสาย OFC ชนิด Ribbon วัสดุอุปกรณ์ที่ในผลิตใกล้เคียงกันชั้นในสุด (Inner or Fiber Tube) ใช้ Ethylene Vinyl ชั้นถัดมาระหว่างชั้นในกับชั้นนอก Strength Member ผลิตจากแท่งสแตนเลสและแท่งเซรามิค (Ceramic) มี 2 รูปแบบคือมีแท่ง Strength Member แท่งเดียวหรือสองแท่งตามการออกแบบที่รับน้ำหนักและแรงดึง ชั้นนอกสุดผลิตจาก Polyolefin Heat Shrink คล้าย Protective Sleeves เส้นใยแก้วนำแสง 1 F อุณหภูมิการใช้งานคล้ายกัน

4.4.5 การเชื่อมต่อและติดตั้ง Protective Sleeves ในหัวต่อเคเบิล OFC

สายเคเบิล OFC ความยาวมาตรฐานผลิตจากโรงงานระวิงละ 4000 เมตร (เพื่อความสะดวกในการขนย้าย) ดังนั้นทุก ๆ 4000 เมตร โดยประมาณต้องเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงของสายเคเบิล OFC เข้าด้วยกันด้วยเครื่อง Fusion Splicer ก่อนห่อหุ้มด้วย Protective Sleeves เส้นใยแก้วนำแสง 1 F (Fiber)/1 P (Protective Sleeves) จัดวางจุดเชื่อมต่อทั้งหมดภายในหัวต่อเคเบิล OFC ตามภาพประกอบที่ 17. และ18.

ภาพประกอบที่ 17. ผังการเชื่อมต่อ Protective Sleeves 1 F /1 P

ภาพประกอบที่ 18. ถาดรองรับและการจัดวางเส้นใยแก้วนำแสง 1 F /1 P ภายหัวต่อเคเบิล

สายเคเบิล OFC โครงข่ายหลักจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมีความจุตั้งแต่ 24 F ถึง 312 F เมื่อเกิดความเสียหายกรณีสายเคเบิล OFC ขาด (เส้นใยแก้วชำรุดในหัวต่อเคเบิล OFC เกิดน้อย) เมื่อซ่อมบำรุงจำเป็นต้องหาสายเคเบิล OFC ชนิดและขนาดเดียวกันมาต่อเสริมตรงกลาง พร้อมมีหัวต่อเคเบิล OFC เพิ่มขึ้นมา 2 จุด มาตรฐานการให้บริการ SLA ที่ต้องซ่อมบำรุงให้โครงข่ายกลับมาใช้งานได้ตามปกติตามระยะเวลาที่กำหนดกดดันการปฏิบัติงานของพนักงานให้รีบแก้ไขคืนดี

ภาพประกอบที่ 19. ผังการเชื่อมต่อ Protective Sleeves $6F/1P$

เมื่อต้องเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงจำนวนมาก ๆ จากข้อจำกัดของเครื่อง Fusion Splice บางรุ่นใช้เวลาอบ Protective Sleeves พนักงานบางท่านจึงประยุกต์นำเส้นใยแก้วนำแสงหลาย Fiber ห่อหุ้มร่วมใน Protective Sleeves เดียวกัน เช่น Protective Sleeves 1 หลอด ห่อหุ้มเส้นใยแก้วนำแสง $2F$ ถึง $8F$

ภาพประกอบที่ 20. Protective Sleeves 1 หลอด ห่อหุ้มเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่า $1F$

ข้อมูลจากการสอบถามพนักงานที่มีประสบการณ์ประยุกต์ใช้วิธีนี้ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสง $6F$ เป็นจำนวนที่เหมาะสมกับ Protective Sleeves 1 หลอด ด้วยเหตุผลการจัดเก็บเส้นใยแก้วนำแสงกับถาดรองรับในหัวต่อเคเบิล OFC สะดวก บางกรณีใช้เส้นใยแก้วนำแสง $8F$ สามารถปฏิบัติงานได้ แต่การจัดเก็บไม่สวยงาม **ดังนั้นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่นิยมมักจะห่อหุ้ม Protective Sleeves 1 หลอด ต่อเส้นใยแก้วนำแสง $6F$** ตามภาพประกอบที่ 19. และ 20.

มาตรฐานการติดตั้งกำหนด Protective Sleeves 1 หลอด ห่อหุ้มเส้นใยแก้วนำแสง $1F$ แต่เมื่อมีการประยุกต์นำ Protective Sleeves 1 หลอด ห่อหุ้มเส้นใยแก้วนำแสง 2-$8F$ แต่ที่นิยมมักจะห่อหุ้ม $6F/1P$ (6 Fiber/ Protective Sleeves) เมื่อผ่านการใช้งานไประยะเวลาหนึ่งมีการบอกต่อว่าสามารถใช้งานได้ โดยไม่มีหน่วยงานใดศึกษาว่าจะผลกระทบอะไรตามมาหรือไม่

5. ทดลอง Protective Sleeves 1 หลอด ห่อหุ้มเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่า 1 F

5.1 ห่อหุ้มเส้นใยแก้วใน Protective Sleeves อย่างเป็นระเบียบ

ข้อมูลภาคสนามจากที่มีพนักงานประยุกต์นำเส้นใยแก้วนำแสงหลาย Fiber ห่อหุ้มร่วมใน Protective Sleeves เดียวกัน ดังนั้นจึงกำหนดศึกษาทดลองที่การประยุกต์นำ Protective Sleeves 1 หลอด ห่อหุ้มเส้นใยแก้วนำแสง 6 F เพื่อให้ตรงกับการประยุกต์ใช้งานจริง

ทีมงานเตรียมตัวอย่างเพื่อทดลองถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกรณีนำเส้นใยแก้วนำแสงที่เชื่อมต่อด้วยเครื่อง Fusion Splicer ตามขั้นตอนปกติจำนวน 6 F มาห่อหุ้มรวมใน Protective Sleeves เดียวกันจำนวน 10 ตัวอย่าง จากนั้นวัดค่า Loss จุดเชื่อมต่อทุกตัวอย่าง ก่อนติดตั้งชุด Protective Sleeves กับถาดรองรับเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Splice Tray) คล้ายกับติดตั้งใช้งานจริงตามภาพประกอบที่ 22.

ภาพประกอบที่ 21. Protective Sleeves 1 หลอด ห่อหุ้มเส้นใยแก้วนำแสง 6 F

ภาพประกอบที่ 22. ติดตั้งชุด Protective Sleeves กับถาดรองรับเส้นใยแก้วนำแสง

แบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกเร่งอายุ (Ageing) ทดสอบตามมาตรฐาน บมจ. ทีโอที หมายเลข OES-001-076-03 ของอุปกรณ์ Fiber Optic Splitter หัวข้อ 4.4.1 Damp heat ด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น อุณหภูมิ 85 ^{o}C ความชื้น 85 $\%RH$ ต่อเนื่อง 14 วัน[6] จำนวน 5

ตัวอย่าง ด้วยเหตุผลจุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงใช้งานในตำแหน่งเดียวกับอุปกรณ์ Fiber Optic Splitter

ภาพประกอบที่ 23. ทีมงานทดสอบตัวอย่างทดสอบด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

กลุ่มสองเร่งอายุทดสอบตามมาตรฐาน บมจ.ทีโอที หมายเลข OES-001-073-04 หัวข้อ 3.4 Temperature Cycling ด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น อุณหภูมิ 4.4^{o}C ถึง 60°C ควบคุมความชื้น 95$\%RH$ ขึ้นลงเป็น Cycle ต่อเนื่อง 30 วัน [7] จำนวน 5 ตัวอย่าง เหตุผลที่ทดสอบตามมาตรฐานนี้เพราะจุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงใช้งานในตำแหน่งเดียวกับอุปกรณ์ IN-LINE Closure for Optical Fiber Cable ตามภาพประกอบที่ 22. และ 23.

ตัวอย่างทดสอบเชื่อมต่อเครื่อง Fusion Splicer แบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น

1) เส้นใยแก้วนำแสง 1F/1P จำนวน 10 ตัวอย่าง ทดสอบหัวข้อ Damp Heat และ Temperature Cycling อย่างละ 5 ตัวอย่าง
2) เส้นใยแก้วนำแสง 6F/1P จำนวน 10 ตัวอย่าง ทดสอบหัวข้อ Damp Heat และ Temperature Cycling อย่างละ 5 ตัวอย่าง

เนื่องจากการประยุกต์นำเส้นใยแก้วนำแสง 6 Fiber ใช้ต่อด้วยงานร่วมใน Protective Sleeves เดียวกัน เป็นแนวทางที่ไม่มีสถาบันใด ๆ แนะนำให้ปฏิบัติ เป็นการแก้ปัญหาของพนักงานกรณีจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องเชื่อมต่อมีจำนวนมากขณะที่มีระยะเวลาในการซ่อมน้อย ขั้นตอนอบความร้อนใช้ระยะเวลาสั้น จึงมีการประยุกต์ใช้ Protective Sleeves ร่วมกัน และอีกปัญหาจำนวนร่องบนถาดสำหรับจับยึด Protective Sleeves มีไม่เพียงพอ

การประยุกต์นำเส้นใยแก้วนำแสง 6 Fiber ใน Protective Sleeves เดียวกัน ไม่มีมาตรฐานค่า Loss จุดเชื่อมต่อมาอ้างอิง ดังนั้นโครงการศึกษานี้อ้างอิงค่า Loss การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงรูปแบบ 1F/1P ที่ใช้งานปกติทั่วไปมาอ้างอิง

ผลการทดสอบวัดค่า Loss จุดเชื่อมต่อก่อนและหลังเข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น หัวข้อ Damp Heat และ Temperature Cycling ตามตารางที่ 2. ถึง 5. ดังนี้

ตารางที่ 2. เปรียบเทียบค่า Loss จุดเชื่อม 1 F /1 P ก่อนและหลังทดสอบ Damp Heat

No.	Wave Length (nm)	IL/ORL ก่อนเข้าตู้อบ (dB)				IL/ORL ออกจากตู้อบ (dB)				Δ A-B	Δ B-A	Δ A-B	Δ B-A
		A-B		B-A		A-B		B-A					
		IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL
1	1310	0.158	61.202	0.161	61.778	0.209	61.019	0.212	61.652	0.051	0.051	0.183	0.126
	1490	0.126	61.127	0.132	62.084	0.168	61.388	0.170	62.232	0.042	0.038	0.261	0.148
	1550	0.113	61.362	0.125	62.560	0.162	61.812	0.162	62.707	0.049	0.037	0.450	0.147
	1625	0.120	60.397	0.127	61.590	0.152	61.104	0.154	61.769	0.032	0.027	0.707	0.179
2	1310	0.073	60.472	0.079	60.464	0.104	60.395	0.105	60.472	0.031	0.026	0.077	0.008
	1490	0.078	60.004	0.084	60.277	0.098	60.247	0.100	60.949	0.020	0.016	0.243	0.672
	1550	0.081	60.229	0.087	60.665	0.102	60.684	0.103	61.573	0.021	0.016	0.455	0.908
	1625	0.079	59.084	0.087	59.422	0.098	59.993	0.099	60.769	0.019	0.012	0.909	1.347
3	1310	0.361	59.747	0.362	61.062	0.320	60.512	0.327	61.473	0.041	0.035	0.765	0.411
	1490	0.328	59.821	0.328	61.711	0.295	60.449	0.303	61.766	0.033	0.025	0.628	0.055
	1550	0.329	60.193	0.329	62.217	0.294	60.801	0.302	62.285	0.035	0.027	0.608	0.068
	1625	0.294	59.597	0.295	61.388	0.262	59.924	0.269	61.214	0.032	0.026	0.327	0.174
4	1310	0.100	61.043	0.103	61.786	0.123	60.914	0.131	61.367	0.023	0.028	0.129	0.419
	1490	0.100	61.535	0.102	62.432	0.114	60.800	0.121	61.011	0.014	0.019	0.735	1.421
	1550	0.109	61.727	0.110	63.007	0.115	60.947	0.122	61.518	0.006	0.012	0.780	1.489
	1625	0.106	61.348	0.107	62.487	0.116	60.139	0.124	60.624	0.010	0.017	1.209	1.863
5	1310	0.313	62.306	0.329	64.228	0.367	60.06	0.371	63.897	0.054	0.042	2.250	0.331
	1490	0.247	61.651	0.254	63.544	0.315	59.81	0.317	62.353	0.068	0.063	1.838	1.191
	1550	0.239	62.335	0.255	63.175	0.305	60.13	0.307	62.291	0.066	0.052	2.205	0.884
	1625	0.216	60.268	0.223	61.332	0.266	59.22	0.268	60.624	0.050	0.045	1.046	0.708
Δ Max.		0.361	62.335	0.362	64.228	0.367	61.812	0.371	63.897	0.068	0.063	2.250	1.863
AVE.		0.179	60.772	0.184	61.860	0.199	60.517	0.203	61.627	0.035	0.031	0.790	0.627
STD.		0.101	0.918	0.101	1.169	0.093	0.605	0.094	0.837	0.018	0.014	0.645	0.572

ตารางที่ 3. เปรียบเทียบค่า Lossจุดเชื่อม 1 F /1 P ก่อนและหลังทดสอบ Temperature Cycling

No.	Wave Length (nm)	IL/ORL ก่อนเข้าตู้อบ (dB)				IL/ORL ออกจากตู้อบ (dB)				Δ A-B	Δ B-A	Δ A-B	Δ B-A
		A-B		B-A		A-B		B-A					
		IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL
6	1310	0.250	60.794	0.253	62.004	0.189	60.142	0.196	60.852	0.061	0.057	0.652	1.152
	1490	0.210	61.070	0.211	61.152	0.154	59.982	0.161	61.643	0.056	0.050	1.088	0.491
	1550	0.217	61.423	0.218	62.832	0.165	60.259	0.170	62.116	0.052	0.048	1.164	0.716
	1625	0.199	61.094	0.210	62.334	0.153	59.098	0.163	60.909	0.046	0.047	1.996	1.425
7	1310	0.267	60.911	0.269	62.799	0.208	60.482	0.210	62.311	0.059	0.059	0.429	0.488
	1490	0.251	61.323	0.253	63.071	0.201	61.054	0.202	62.867	0.050	0.051	0.269	0.204
	1550	0.242	61.494	0.244	63.449	0.196	61.274	0.198	63.051	0.046	0.046	0.220	0.398
	1625	0.220	61.125	0.222	62.438	0.177	61.002	0.179	62.182	0.043	0.043	0.123	0.256

ตารางที่ 3. เปรียบเทียบค่า Lossจุดเชื่อม 1 F /1 P ก่อนและหลังทดสอบ Temperature Cycling (ต่อ)

No.	Wave Length (nm)	IL/ORL ก่อนเข้าตู้อบ (dB)				IL/ORL ออกจากตู้อบ (dB)				Δ	Δ	Δ	Δ
		A-B	B-A	A-B	B-A	A-B		A-B	B-A	A-B	B-A	A-B	B-A
		IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL
8	1310	0.213	60.362	0.221	61.287	0.277	60.228	0.280	60.891	0.064	0.059	0.134	0.396
	1490	0.182	60.154	0.189	60.805	0.229	60.282	0.232	60.566	0.047	0.043	0.128	0.239
	1550	0.190	60.320	0.197	61.235	0.237	60.642	0.239	60.975	0.047	0.042	0.322	0.260
	1625	0.178	59.253	0.187	60.142	0.240	59.893	0.226	60.003	0.062	0.039	0.640	0.139
9	1310	0.227	59.959	0.229	61.638	0.259	60.789	0.265	62.742	0.032	0.036	0.830	1.104
	1490	0.199	59.852	0.201	61.577	0.230	60.328	0.237	61.970	0.031	0.036	0.476	0.393
	1550	0.183	60.213	0.185	61.704	0.211	60.509	0.218	61.714	0.028	0.033	0.296	0.010
	1625	0.164	59.535	0.164	59.535	0.193	59.305	0.202	60.195	0.029	0.038	0.230	0.660
10	1310	0.114	59.350	0.118	59.206	0.094	60.127	0.097	59.943	0.020	0.021	0.777	0.737
	1490	0.094	59.572	0.097	59.540	0.084	60.464	0.088	60.495	0.010	0.009	0.892	0.955
	1550	0.099	59.883	0.101	60.244	0.089	61.033	0.092	61.593	0.010	0.009	1.150	1.349
	1625	0.098	59.699	0.099	60.476	0.089	60.667	0.093	61.347	0.009	0.006	0.968	0.871
Δ Max.		0.267	61.494	0.269	63.449	0.277	61.274	0.280	63.051	0.064	0.059	1.996	1.425
AVE.		0.190	60.369	0.193	61.373	0.184	60.378	0.187	61.418	0.040	0.039	0.639	0.612
STD.		0.053	0.731	0.053	1.245	0.058	0.552	0.058	0.951	0.018	0.016	0.479	0.414

ตารางที่ 4. เปรียบเทียบค่า Loss จุดเชื่อม 6 F /1 P ก่อนและหลังทดสอบ Damp Heat

Example No	Core No	Wave Length (nm)	IL/ORL ก่อนเข้าตู้อบ (dB)				IL/ORL ออกจากตู้อบ (dB)				Δ	Δ	Δ	Δ
			A-B		B-A		A-B		B-A		A-B	B-A	A-B	B-A
			IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL
1	1	1310	0.159	62.923	0.165	62.102	0.172	62.806	0.181	61.602	0.013	0.016	0.117	0.500
		1490	0.131	63.751	0.141	63.991	0.140	63.678	0.149	63.738	0.009	0.008	0.073	0.253
		1550	0.130	64.028	0.140	64.809	0.142	63.973	0.150	64.755	0.012	0.010	0.055	0.054
		1625	0.124	63.715	0.137	64.651	0.138	63.362	0.149	64.452	0.014	0.012	0.353	0.199
	2	1310	0.186	62.195	0.221	61.941	0.249	60.789	0.285	61.053	0.063	0.064	1.406	0.888
		1490	0.171	61.757	0.194	64.221	0.223	60.295	0.256	63.891	0.052	0.062	1.462	0.330
		1550	0.176	61.593	0.198	64.133	0.224	60.117	0.257	63.954	0.048	0.059	1.476	0.179
		1625	0.151	60.221	0.174	61.112	0.203	59.194	0.238	60.825	0.052	0.064	1.027	0.287
	3	1310	0.195	61.359	0.204	62.128	0.227	61.206	0.234	61.816	0.032	0.030	0.153	0.312
		1490	0.151	61.217	0.159	63.806	0.168	61.099	0.175	63.551	0.017	0.016	0.118	0.255
		1550	0.152	61.302	0.160	63.132	0.167	61.437	0.173	63.034	0.015	0.013	0.135	0.098
		1625	0.137	59.040	0.145	61.663	0.152	58.662	0.159	61.365	0.015	0.014	0.378	0.298
	4	1310	0.231	60.017	0.256	62.417	0.276	59.255	0.298	61.779	0.045	0.042	0.762	0.638
		1490	0.207	61.449	0.230	60.569	0.241	60.407	0.264	59.050	0.034	0.034	1.042	1.519
		1550	0.203	61.645	0.226	60.453	0.237	60.817	0.259	59.072	0.034	0.033	0.828	1.381
		1625	0.197	60.210	0.219	58.246	0.229	59.625	0.252	57.462	0.032	0.033	0.585	0.784
	5	1310	0.213	61.776	0.228	62.991	0.415	60.878	0.422	61.964	0.202	0.194	0.898	1.027
		1490	0.184	61.691	0.191	63.513	0.376	60.869	0.352	62.265	0.192	0.161	0.822	1.248
		1550	0.185	61.137	0.192	63.958	0.364	61.189	0.347	62.700	0.179	0.155	0.052	1.258
		1625	0.171	60.121	0.170	62.430	0.348	60.138	0.315	61.304	0.177	0.145	0.017	1.126

ตารางที่ 4. เปรียบเทียบค่า Loss จุดเชื่อม 6 F /1 P ก่อนและหลังทดสอบ Damp Heat (ต่อ)

Example No	Core No	Wave Length (nm)	IL/ORL ก่อนเข้าตู้อบ (dB)				IL/ORL ออกจากตู้อบ (dB)				Δ	Δ	Δ	Δ
			A-B		B-A		A-B		B-A		A-B	B-A	A-B	B-A
			IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL
1	6	1310	0.153	62.355	0.172	63.862	0.379	60.016	0.397	61.166	0.226	0.225	2.339	2.696
		1490	0.129	62.033	0.147	62.973	0.344	59.747	0.372	60.536	0.215	0.225	2.286	2.437
		1550	0.133	61.983	0.151	63.457	0.328	59.549	0.357	60.891	0.195	0.206	2.434	2.566
		1625	0.124	60.174	0.137	60.392	0.343	58.553	0.362	59.490	0.219	0.225	1.621	0.902
2	1	1310	0.115	60.352	0.121	60.235	0.331	59.837	0.348	59.630	0.216	0.227	0.515	0.605
		1490	0.105	60.149	0.114	60.759	0.312	59.661	0.326	60.059	0.207	0.212	0.488	0.700
		1550	0.103	60.457	0.110	60.991	0.319	59.890	0.319	60.317	0.216	0.209	0.567	0.674
		1625	0.121	59.883	0.129	60.414	0.336	58.884	0.293	59.556	0.215	0.164	0.999	0.858
	2	1310	0.138	61.523	0.146	62.996	0.271	60.842	0.246	62.313	0.133	0.100	0.681	0.683
		1490	0.110	61.359	0.118	62.741	0.253	60.545	0.227	62.281	0.143	0.109	0.814	0.460
		1550	0.112	61.496	0.119	62.233	0.244	60.793	0.226	61.932	0.132	0.107	0.703	0.301
		1625	0.103	60.218	0.112	60.815	0.230	59.628	0.208	60.360	0.127	0.096	0.590	0.455
	3	1310	0.115	60.256	0.119	61.119	0.135	59.718	0.144	60.749	0.020	0.025	0.538	0.370
		1490	0.102	59.675	0.108	60.322	0.126	59.294	0.136	59.990	0.024	0.028	0.381	0.332
		1550	0.101	59.988	0.108	60.561	0.124	59.546	0.133	60.033	0.023	0.025	0.442	0.528
		1625	0.089	59.021	0.097	59.782	0.111	58.428	0.118	59.147	0.022	0.021	0.593	0.635
	4	1310	0.150	57.361	0.155	57.542	0.193	57.201	0.203	57.346	0.043	0.048	0.160	0.196
		1490	0.114	58.029	0.121	58.553	0.168	57.870	0.165	58.246	0.054	0.044	0.159	0.307
		1550	0.125	58.635	0.130	59.212	0.178	58.487	0.175	59.053	0.053	0.045	0.148	0.159
		1625	0.116	57.554	0.124	58.641	0.161	57.450	0.169	58.682	0.045	0.045	0.104	0.041
	5	1310	0.170	60.051	0.178	61.230	0.181	59.487	0.188	60.896	0.011	0.010	0.564	0.334
		1490	0.158	59.863	0.166	60.773	0.168	59.238	0.175	60.384	0.010	0.009	0.625	0.389
		1550	0.148	60.023	0.152	60.612	0.159	59.550	0.165	60.202	0.011	0.013	0.473	0.410
		1625	0.135	59.115	0.139	59.482	0.151	58.738	0.157	59.121	0.016	0.018	0.377	0.361
	6	1310	0.289	59.263	0.302	61.110	0.279	59.990	0.287	61.783	0.010	0.015	0.727	0.673
		1490	0.265	59.108	0.271	60.958	0.253	59.809	0.258	61.290	0.012	0.013	0.701	0.332
		1550	0.256	59.855	0.263	61.025	0.242	60.122	0.250	61.462	0.014	0.013	0.267	0.437
		1625	0.235	58.463	0.245	59.443	0.218	59.059	0.227	59.918	0.017	0.018	0.596	0.475
3	1	1310	0.120	62.322	0.127	62.457	0.358	60.062	0.346	61.257	0.238	0.219	2.260	1.200
		1490	0.118	62.596	0.113	63.131	0.325	60.475	0.312	61.915	0.207	0.199	2.121	1.216
		1550	0.112	63.022	0.108	63.549	0.312	60.886	0.326	62.291	0.200	0.218	2.136	1.258
		1625	0.119	62.413	0.115	62.595	0.326	59.804	0.334	59.715	0.207	0.219	2.609	2.880
	2	1310	0.116	61.153	0.132	62.410	0.263	60.231	0.265	62.612	0.147	0.133	0.922	0.202
		1490	0.098	60.634	0.116	60.759	0.226	59.959	0.243	60.948	0.128	0.127	0.675	0.189
		1550	0.095	60.163	0.111	60.638	0.202	59.215	0.217	60.965	0.107	0.106	0.948	0.327
		1625	0.082	59.861	0.103	59.584	0.195	58.916	0.208	59.675	0.113	0.105	0.945	0.091

ตารางที่ 4. เปรียบเทียบค่า Loss จุดเชื่อม 6 F /1 P ก่อนและหลังทดสอบ Damp Heat (ต่อ)

Example No	Core No	Wave Length (nm)	IL/ORL ก่อนเข้าตู้อบ (dB)				IL/ORL ออกจากตู้อบ (dB)				Δ	Δ	Δ	Δ
			A-B		B-A		A-B		B-A		A-B	B-A	A-B	B-A
			IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL
3	3	1310	0.231	61.459	0.220	62.314	0.345	60.915	0.332	61.822	0.114	0.112	0.544	0.492
		1490	0.215	61.857	0.196	62.019	0.328	61.202	0.290	61.415	0.113	0.094	0.655	0.604
		1550	0.188	61.891	0.187	62.102	0.302	61.510	0.283	61.698	0.114	0.096	0.381	0.404
		1625	0.181	60.912	0.171	60.874	0.370	60.797	0.263	60.780	0.189	0.092	0.115	0.094
	4	1310	0.308	62.315	0.340	62.627	0.215	62.147	0.237	62.356	0.093	0.103	0.168	0.271
		1490	0.273	62.531	0.307	62.314	0.189	61.322	0.213	61.995	0.084	0.094	1.209	0.319
		1550	0.267	62.492	0.300	62.431	0.174	61.105	0.206	62.048	0.093	0.094	1.387	0.383
		1625	0.258	60.522	0.284	61.284	0.164	60.451	0.185	60.876	0.094	0.099	0.071	0.408
	5	1310	0.091	61.254	0.099	61.561	0.104	60.719	0.111	61.126	0.013	0.012	0.535	0.435
		1490	0.083	60.458	0.091	61.152	0.095	59.887	0.102	60.654	0.012	0.011	0.571	0.498
		1550	0.085	60.273	0.093	60.997	0.098	59.616	0.106	59.415	0.013	0.013	0.657	1.582
		1625	0.076	59.329	0.085	60.328	0.087	58.172	0.095	58.945	0.011	0.010	1.157	1.383
	6	1310	0.237	61.869	0.215	62.787	0.459	59.632	0.435	61.530	0.222	0.220	2.237	1.257
		1490	0.200	61.732	0.206	63.812	0.413	59.513	0.389	62.627	0.213	0.183	2.219	1.185
		1550	0.194	62.244	0.201	63.739	0.408	59.956	0.378	62.685	0.214	0.177	2.288	1.054
		1625	0.171	61.459	0.180	62.614	0.389	58.034	0.366	61.451	0.218	0.186	3.425	1.163
4	1	1310	0.187	60.523	0.192	62.099	0.156	61.192	0.163	62.512	0.031	0.029	0.669	0.413
		1490	0.154	60.455	0.161	61.995	0.133	61.147	0.141	62.404	0.021	0.020	0.692	0.409
		1550	0.158	60.876	0.167	62.218	0.138	61.534	0.146	62.639	0.020	0.021	0.658	0.421
		1625	0.139	59.869	0.147	60.786	0.120	60.526	0.127	61.161	0.019	0.020	0.657	0.375
	2	1310	0.201	61.022	0.206	62.592	0.343	60.668	0.330	62.295	0.142	0.124	0.354	0.297
		1490	0.170	60.531	0.174	62.814	0.278	60.174	0.284	62.434	0.108	0.110	0.357	0.380
		1550	0.158	60.899	0.164	63.021	0.276	60.501	0.273	62.702	0.118	0.109	0.398	0.319
		1625	0.150	59.815	0.162	61.853	0.263	59.539	0.265	61.149	0.113	0.103	0.276	0.704
	3	1310	0.165	60.856	0.158	62.122	0.373	60.232	0.369	61.729	0.208	0.211	0.624	0.393
		1490	0.139	60.457	0.132	61.371	0.332	60.016	0.339	60.967	0.193	0.207	0.441	0.404
		1550	0.131	60.661	0.126	61.193	0.305	60.227	0.311	60.758	0.174	0.185	0.434	0.435
		1625	0.128	59.783	0.132	59.742	0.303	59.597	0.312	59.483	0.175	0.180	0.186	0.259
	4	1310	0.271	61.785	0.260	61.846	0.299	61.676	0.288	61.701	0.028	0.028	0.109	0.145
		1490	0.243	62.701	0.231	62.872	0.260	62.648	0.248	62.660	0.017	0.017	0.053	0.212
		1550	0.244	62.458	0.231	62.431	0.262	62.356	0.249	62.234	0.018	0.018	0.102	0.197
		1625	0.227	61.709	0.215	60.863	0.249	61.558	0.236	59.996	0.022	0.021	0.151	0.867
	5	1310	0.172	61.023	0.172	62.589	0.287	61.362	0.301	62.315	0.115	0.129	0.339	0.274
		1490	0.155	60.845	0.163	62.228	0.248	61.017	0.265	61.993	0.093	0.102	0.172	0.235
		1550	0.154	60.113	0.165	61.895	0.256	60.435	0.271	61.562	0.102	0.106	0.322	0.333
		1625	0.145	58.969	0.152	60.591	0.249	59.478	0.263	60.213	0.104	0.111	0.509	0.378
	6	1310	0.251	61.025	0.231	62.249	0.408	63.369	0.416	63.748	0.157	0.185	2.344	1.499
		1490	0.232	61.216	0.218	62.784	0.359	63.526	0.365	63.258	0.127	0.147	2.310	0.474
		1550	0.226	60.869	0.221	62.896	0.337	62.016	0.343	63.392	0.111	0.122	1.147	0.496
		1625	0.212	59.266	0.204	60.548	0.309	61.956	0.315	63.176	0.097	0.111	2.690	2.628

ตารางที่ 4. เปรียบเทียบค่า Loss จุดเชื่อม 6 F /1 P ก่อนและหลังทดสอบ Damp Heat (ต่อ)

Example No	Core No	Wave Length (nm)	IL/ORL ก่อนเข้าตู้อบ (dB)				IL/ORL ออกจากตู้อบ (dB)				Δ	Δ	Δ	Δ
			A-B		B-A		A-B		B-A		A-B	B-A	A-B	B-A
			IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL
5	1	1310	0.095	63.203	0.102	64.124	0.082	63.671	0.089	63.816	0.013	0.013	0.468	0.308
		1490	0.103	63.207	0.111	64.763	0.091	63.607	0.097	64.572	0.012	0.014	0.400	0.191
		1550	0.105	63.816	0.112	64.628	0.092	64.201	0.098	64.436	0.013	0.014	0.385	0.192
		1625	0.114	63.821	0.120	64.551	0.098	64.209	0.106	64.382	0.016	0.014	0.388	0.169
	2	1310	0.105	62.548	0.116	63.289	0.148	61.723	0.155	62.746	0.043	0.039	0.825	0.543
		1490	0.104	63.639	0.112	64.617	0.144	62.986	0.150	64.171	0.040	0.038	0.653	0.446
		1550	0.107	64.089	0.114	64.446	0.146	63.451	0.152	63.899	0.039	0.038	0.638	0.547
		1625	0.098	63.094	0.107	64.815	0.137	62.556	0.145	64.263	0.039	0.038	0.538	0.552
	3	1310	0.172	61.354	0.187	62.581	0.315	59.397	0.321	60.859	0.143	0.134	1.957	1.722
		1490	0.142	61.581	0.155	63.073	0.276	59.863	0.260	61.481	0.134	0.105	1.718	1.592
		1550	0.139	61.749	0.152	62.347	0.275	60.015	0.259	60.225	0.136	0.107	1.734	2.122
		1625	0.126	60.562	0.139	61.369	0.252	58.271	0.250	59.648	0.126	0.111	2.291	1.721
	4	1310	0.247	62.652	0.251	62.314	0.473	64.375	0.479	63.956	0.226	0.228	1.723	1.642
		1490	0.206	62.416	0.213	62.569	0.362	64.154	0.369	62.118	0.156	0.156	1.738	0.451
		1550	0.227	62.688	0.231	62.748	0.400	64.348	0.406	62.349	0.173	0.175	1.660	0.399
		1625	0.182	61.523	0.185	61.455	0.369	63.284	0.375	63.053	0.187	0.190	1.761	1.598
	5	1310	0.164	64.538	0.174	62.322	0.192	63.856	0.201	61.905	0.028	0.027	0.682	0.417
		1490	0.141	64.357	0.158	63.856	0.178	63.645	0.185	63.415	0.037	0.027	0.712	0.441
		1550	0.139	65.277	0.157	63.984	0.177	64.774	0.184	63.524	0.038	0.027	0.503	0.460
		1625	0.133	65.765	0.152	64.233	0.172	64.986	0.180	63.900	0.039	0.028	0.779	0.333
	6	1310	0.135	64.264	0.142	63.843	0.170	63.442	0.177	63.120	0.035	0.035	0.822	0.723
		1490	0.108	64.833	0.117	63.991	0.139	64.021	0.146	63.235	0.031	0.029	0.812	0.756
		1550	0.115	65.796	0.122	64.928	0.146	64.892	0.152	62.261	0.031	0.030	0.904	2.667
		1625	0.154	66.358	0.161	65.126	0.187	65.348	0.194	64.359	0.033	0.033	1.010	0.767
Δ Max.			0.308	66.358	0.340	65.126	0.473	65.348	0.479	64.755	0.238	0.228	3.425	2.880
AVE.			0.160	61.375	0.167	62.118	0.243	60.901	0.246	61.629	0.093	0.089	0.867	0.701
STD.			0.053	1.703	0.053	1.575	0.094	1.830	0.089	1.615	0.075	0.072	0.730	0.625

ตารางที่ 5. เปรียบเทียบค่า Loss จุดเชื่อม 6 F /1 P ก่อนและหลังทดสอบ Temperature Cycling

Example No	Core No	Wave Length (nm)	IL/ORL ก่อนเข้าตู้อบ (dB)				IL/ORL ออกจากตู้อบ (dB)				Δ	Δ	Δ	Δ
			A-B		B-A		A-B		B-A		A-B	B-A	A-B	B-A
			IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL
6	1	1310	0.119	62.865	0.126	62.001	0.143	62.819	0.148	61.834	0.024	0.022	0.046	0.167
		1490	0.108	62.532	0.115	63.219	0.127	62.248	0.134	62.956	0.019	0.019	0.284	0.263
		1550	0.108	62.613	0.116	62.867	0.126	62.349	0.136	62.573	0.018	0.020	0.264	0.294
		1625	0.102	61.320	0.110	61.624	0.119	61.152	0.131	61.439	0.017	0.021	0.168	0.185
	2	1310	0.258	61.423	0.264	62.847	0.261	61.367	0.268	62.729	0.003	0.004	0.056	0.118
		1490	0.210	61.154	0.117	62.216	0.214	61.010	0.221	62.145	0.004	0.104	0.144	0.071
		1550	0.198	61.205	0.207	62.356	0.202	61.186	0.210	62.311	0.004	0.003	0.019	0.045
		1625	0.188	60.418	0.196	61.152	0.191	60.250	0.199	61.076	0.003	0.003	0.168	0.076

ตารางที่ 5. เปรียบเทียบค่า Loss จุดเชื่อม 6 F /1 P ก่อนและหลังทดสอบ Temperature Cycling (ต่อ)

Example No	Core No	Wave Length (nm)	IL/ORL ก่อนเข้าตู้อบ (dB)				IL/ORL ออกจากตู้อบ (dB)				Δ	Δ	Δ	Δ
			A-B		B-A		A-B		B-A		A-B	B-A	A-B	B-A
			IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL
6	3	1310	0.274	61.774	0.258	62.987	0.442	61.522	0.451	63.907	0.168	0.193	0.252	0.920
		1490	0.262	61.229	0.247	61.869	0.383	60.926	0.391	62.054	0.121	0.144	0.303	0.185
		1550	0.255	61.341	0.242	62.328	0.397	61.133	0.404	62.114	0.142	0.162	0.208	0.214
		1625	0.240	59.899	0.230	60.874	0.355	59.973	0.361	60.604	0.115	0.131	0.074	0.270
	4	1310	0.218	61.285	0.222	63.320	0.241	60.013	0.248	62.899	0.023	0.026	1.272	0.421
		1490	0.191	60.899	0.197	61.246	0.214	59.026	0.221	60.759	0.023	0.024	1.873	0.487
		1550	0.184	59.631	0.189	60.993	0.208	58.985	0.215	60.295	0.024	0.026	0.646	0.698
		1625	0.170	58.877	0.178	59.007	0.193	57.627	0.202	58.175	0.023	0.024	1.250	0.832
	5	1310	0.158	61.256	0.166	62.541	0.189	61.057	0.187	62.401	0.031	0.021	0.199	0.140
		1490	0.157	61.342	0.166	62.236	0.179	61.018	0.186	62.142	0.022	0.020	0.324	0.094
		1550	0.175	61.392	0.182	62.563	0.196	61.252	0.203	62.313	0.021	0.021	0.140	0.250
		1625	0.184	60.685	0.193	61.746	0.204	60.503	0.212	61.524	0.020	0.019	0.182	0.222
	6	1310	0.282	61.756	0.277	61.162	0.450	61.516	0.453	61.023	0.168	0.176	0.240	0.139
		1490	0.263	62.533	0.256	61.234	0.402	62.431	0.411	61.175	0.139	0.155	0.102	0.059
		1550	0.257	62.639	0.249	61.259	0.400	62.513	0.406	61.004	0.143	0.157	0.126	0.255
		1625	0.242	60.951	0.248	60.438	0.388	60.824	0.373	60.312	0.146	0.125	0.127	0.126
7	1	1310	0.227	62.316	0.213	61.734	0.345	62.125	0.320	61.394	0.118	0.107	0.191	0.340
		1490	0.201	62.455	0.178	62.438	0.321	62.532	0.299	62.185	0.120	0.121	0.077	0.253
		1550	0.200	62.956	0.176	62.593	0.319	62.748	0.296	62.249	0.119	0.120	0.208	0.344
		1625	0.179	61.963	0.163	61.849	0.294	61.856	0.272	61.746	0.115	0.109	0.107	0.103
	2	1310	0.254	60.121	0.261	61.786	0.272	60.155	0.280	61.908	0.018	0.019	0.034	0.122
		1490	0.209	59.518	0.216	60.519	0.228	59.597	0.235	60.678	0.019	0.019	0.079	0.159
		1550	0.213	59.724	0.219	60.689	0.231	59.804	0.238	60.833	0.018	0.019	0.080	0.144
		1625	0.200	58.563	0.206	59.231	0.219	58.608	0.226	59.371	0.019	0.020	0.045	0.140
	3	1310	0.296	61.963	0.304	63.002	0.385	60.986	0.393	62.292	0.089	0.089	0.977	0.710
		1490	0.259	61.756	0.269	62.916	0.349	60.843	0.357	62.211	0.090	0.088	0.913	0.705
		1550	0.263	60.562	0.271	62.998	0.352	61.194	0.360	63.358	0.089	0.089	0.632	0.360
		1625	0.244	60.471	0.252	60.495	0.332	60.083	0.340	61.049	0.088	0.088	0.388	0.554
	4	1310	0.225	61.066	0.231	60.741	0.258	61.085	0.265	62.668	0.033	0.034	0.019	1.927
		1490	0.193	60.837	0.201	61.412	0.232	61.030	0.240	61.118	0.039	0.039	0.193	0.294
		1550	0.186	61.223	0.194	61.984	0.223	61.239	0.231	61.406	0.037	0.037	0.016	0.578
		1625	0.174	59.521	0.181	61.506	0.216	60.292	0.225	59.845	0.042	0.044	0.771	1.661
	5	1310	0.136	60.827	0.150	61.211	0.142	60.917	0.148	62.058	0.006	0.002	0.090	0.847
		1490	0.149	61.263	0.150	61.613	0.122	60.676	0.129	61.334	0.027	0.021	0.587	0.279
		1550	0.150	61.687	0.151	61.904	0.117	60.940	0.124	61.541	0.033	0.027	0.747	0.363
		1625	0.136	61.116	0.139	61.355	0.112	59.899	0.119	60.286	0.024	0.020	1.217	1.069
	6	1310	0.152	62.167	0.159	61.914	0.349	61.432	0.346	62.892	0.197	0.187	0.735	0.978
		1490	0.125	62.626	0.136	61.695	0.301	61.406	0.309	62.647	0.176	0.173	1.220	0.952
		1550	0.117	63.191	0.128	62.016	0.288	61.694	0.295	62.461	0.171	0.167	1.497	0.445
		1625	0.102	61.369	0.115	60.188	0.262	60.708	0.271	61.966	0.160	0.156	0.661	1.778

ตารางที่ 5. เปรียบเทียบค่า Loss จุดเชื่อม 6 F /1 P ก่อนและหลังทดสอบ Temperature Cycling (ต่อ)

Example No	Core No	Wave Length (nm)	IL/ORL ก่อนเข้าตู้อบ (dB)				IL/ORL ออกจากตู้อบ (dB)				Δ	Δ	Δ	Δ
			A-B		B-A		A-B		B-A		A-B	B-A	A-B	B-A
			IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL
8	1	1310	0.194	61.321	0.196	60.495	0.255	60.909	0.262	60.049	0.061	0.066	0.412	0.446
		1490	0.169	61.014	0.170	62.149	0.209	60.602	0.216	61.806	0.040	0.046	0.412	0.343
		1550	0.156	61.187	0.155	62.367	0.201	60.752	0.208	61.992	0.045	0.053	0.435	0.375
		1625	0.153	59.963	0.154	61.316	0.203	59.580	0.210	60.808	0.050	0.056	0.383	0.508
	2	1310	0.122	61.592	0.131	62.581	0.371	60.967	0.376	62.040	0.249	0.245	0.625	0.541
		1490	0.116	61.458	0.122	61.154	0.343	60.628	0.348	60.566	0.227	0.226	0.830	0.588
		1550	0.114	61.532	0.118	61.234	0.336	60.873	0.341	60.678	0.222	0.223	0.659	0.556
		1625	0.106	60.429	0.110	59.996	0.317	59.909	0.336	59.469	0.211	0.226	0.520	0.527
	3	1310	0.120	60.139	0.128	60.271	0.118	60.121	0.125	60.356	0.002	0.003	0.018	0.085
		1490	0.129	59.784	0.137	60.538	0.128	59.974	0.135	60.678	0.001	0.002	0.190	0.140
		1550	0.124	59.749	0.131	60.602	0.122	59.996	0.129	60.790	0.002	0.002	0.247	0.188
		1625	0.117	58.961	0.126	59.699	0.115	58.918	0.124	59.780	0.002	0.002	0.043	0.081
	4	1310	0.104	60.852	0.113	61.653	0.136	59.942	0.144	60.674	0.032	0.031	0.910	0.979
		1490	0.086	61.228	0.095	61.158	0.125	59.628	0.132	60.251	0.039	0.037	1.600	0.907
		1550	0.082	61.462	0.091	61.320	0.119	59.813	0.126	60.413	0.037	0.035	1.649	0.907
		1625	0.091	60.571	0.097	60.421	0.128	58.656	0.135	59.547	0.037	0.038	1.915	0.874
	5	1310	0.187	62.859	0.195	63.424	0.206	62.287	0.213	63.187	0.019	0.018	0.572	0.237
		1490	0.178	62.997	0.186	62.762	0.194	62.319	0.201	62.565	0.016	0.015	0.678	0.197
		1550	0.175	63.105	0.185	63.008	0.192	62.447	0.199	62.836	0.017	0.014	0.658	0.172
		1625	0.161	61.741	0.168	61.846	0.175	61.459	0.182	61.664	0.014	0.014	0.282	0.182
	6	1310	0.136	60.299	0.096	60.591	0.114	60.307	0.121	60.626	0.022	0.025	0.008	0.035
		1490	0.140	60.756	0.115	60.795	0.116	60.615	0.128	60.905	0.024	0.013	0.141	0.110
		1550	0.139	61.124	0.114	60.933	0.120	61.034	0.131	61.134	0.019	0.017	0.090	0.201
		1625	0.145	60.251	0.131	60.428	0.131	60.268	0.147	60.533	0.014	0.016	0.017	0.105
9	1	1310	0.254	62.359	0.262	62.774	0.280	61.723	0.287	62.185	0.026	0.025	0.636	0.589
		1490	0.228	62.458	0.234	61.967	0.247	62.080	0.254	61.553	0.019	0.020	0.378	0.414
		1550	0.231	62.815	0.237	62.583	0.251	62.331	0.258	62.042	0.020	0.021	0.484	0.541
		1625	0.206	61.725	0.214	61.452	0.227	61.228	0.235	60.746	0.021	0.021	0.497	0.706
	2	1310	0.189	61.035	0.198	61.352	0.277	59.766	0.284	60.243	0.088	0.086	1.269	1.109
		1490	0.164	60.719	0.173	61.208	0.238	59.191	0.246	60.027	0.074	0.073	1.528	1.181
		1550	0.158	60.851	0.167	61.410	0.234	59.289	0.241	60.318	0.076	0.074	1.562	1.092
		1625	0.142	59.214	0.151	60.591	0.216	58.104	0.223	59.429	0.074	0.072	1.110	1.162
	3	1310	0.192	61.759	0.197	61.451	0.285	60.709	0.292	60.929	0.093	0.095	1.050	0.522
		1490	0.174	61.451	0.179	61.057	0.266	60.005	0.273	60.273	0.092	0.094	1.446	0.784
		1550	0.173	62.173	0.177	61.846	0.264	60.382	0.272	60.631	0.091	0.095	1.791	1.215
		1625	0.146	60.284	0.149	60.881	0.229	59.670	0.237	59.984	0.083	0.088	0.614	0.897
	4	1310	0.184	60.463	0.195	59.863	0.151	61.503	0.163	60.941	0.033	0.032	1.040	1.078
		1490	0.159	60.301	0.172	59.461	0.136	61.271	0.147	60.455	0.023	0.025	0.970	0.994
		1550	0.162	60.422	0.173	59.269	0.140	61.422	0.152	60.221	0.022	0.021	1.000	0.952
		1625	0.152	59.641	0.163	58.320	0.129	60.018	0.140	58.996	0.023	0.023	0.377	0.676

ตารางที่ 5. เปรียบเทียบค่า Loss จุดเชื่อม 6 F /1 P ก่อนและหลังทดสอบ Temperature Cycling (ต่อ)

Example No	Core No	Wave Length (nm)	IL/ORL ก่อนเข้าตู้อบ (dB)				IL/ORL ออกจากตู้อบ (dB)				Δ	Δ	Δ	Δ
			A-B		B-A		A-B		B-A		A-B	B-A	A-B	B-A
			IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL
9	5	1310	0.206	61.592	0.189	63.410	0.371	60.577	0.356	62.084	0.165	0.167	1.015	1.326
		1490	0.184	61.381	0.169	62.872	0.334	60.255	0.320	61.718	0.150	0.151	1.126	1.154
		1550	0.183	61.428	0.167	62.416	0.332	60.476	0.319	61.176	0.149	0.152	0.952	1.240
		1625	0.168	60.543	0.152	60.962	0.319	59.533	0.304	59.861	0.151	0.152	1.010	1.101
	6	1310	0.125	60.987	0.129	60.782	0.090	61.282	0.097	61.297	0.035	0.032	0.295	0.515
		1490	0.134	60.856	0.141	60.943	0.104	61.260	0.112	61.632	0.030	0.029	0.404	0.689
		1550	0.146	61.047	0.153	61.455	0.116	61.530	0.124	62.106	0.030	0.029	0.483	0.651
		1625	0.135	59.761	0.145	60.774	0.106	60.601	0.114	61.521	0.029	0.031	0.840	0.747
10	1	1310	0.095	62.809	0.108	63.681	0.149	61.279	0.157	62.693	0.054	0.049	1.530	0.988
		1490	0.085	61.861	0.092	62.862	0.127	60.570	0.134	61.552	0.042	0.042	1.291	1.310
		1550	0.084	62.179	0.089	62.782	0.123	60.743	0.130	61.519	0.039	0.041	1.436	1.263
		1625	0.085	60.586	0.093	60.963	0.125	59.358	0.132	59.912	0.040	0.039	1.228	1.051
	2	1310	0.116	61.878	0.088	62.646	0.090	61.457	0.097	62.413	0.026	0.009	0.421	0.233
		1490	0.103	61.764	0.087	63.474	0.085	61.400	0.091	63.159	0.018	0.004	0.364	0.315
		1550	0.109	61.846	0.090	63.491	0.089	61.575	0.095	63.246	0.020	0.005	0.271	0.245
		1625	0.108	60.862	0.093	62.467	0.092	60.434	0.100	62.143	0.016	0.007	0.428	0.324
	3	1310	0.081	60.269	0.089	60.775	0.195	60.143	0.201	60.574	0.114	0.112	0.126	0.201
		1490	0.075	60.143	0.082	59.977	0.187	59.939	0.193	59.794	0.112	0.111	0.204	0.183
		1550	0.071	60.743	0.079	60.361	0.185	60.548	0.191	60.169	0.114	0.112	0.195	0.192
		1625	0.074	59.562	0.081	59.680	0.187	59.386	0.194	59.469	0.113	0.113	0.176	0.211
	4	1310	0.153	62.818	0.175	61.902	0.316	64.066	0.324	62.929	0.163	0.149	1.248	1.027
		1490	0.156	63.375	0.160	63.097	0.288	64.680	0.294	64.425	0.132	0.134	1.305	1.328
		1550	0.136	63.669	0.149	62.558	0.272	65.161	0.278	64.027	0.136	0.129	1.492	1.469
		1625	0.105	62.495	0.127	62.170	0.252	64.609	0.261	64.316	0.147	0.134	2.114	2.146
	5	1310	0.133	61.109	0.141	61.498	0.101	60.083	0.107	60.729	0.032	0.034	1.026	0.769
		1490	0.131	60.788	0.135	60.822	0.088	59.824	0.095	60.241	0.043	0.040	0.964	0.581
		1550	0.132	60.925	0.142	61.126	0.093	60.142	0.100	60.381	0.039	0.042	0.783	0.745
		1625	0.131	60.277	0.139	60.531	0.104	59.134	0.109	59.639	0.027	0.030	1.143	0.892
	6	1310	0.123	62.127	0.140	63.674	0.245	61.143	0.256	62.879	0.122	0.116	0.984	0.795
		1490	0.107	63.940	0.115	64.290	0.216	62.695	0.227	63.447	0.109	0.112	1.245	0.843
		1550	0.091	63.323	0.105	64.367	0.204	62.176	0.214	63.420	0.113	0.109	1.147	0.947
		1625	0.088	62.316	0.094	63.056	0.195	62.227	0.205	62.045	0.107	0.111	0.089	1.011
Δ Max.			0.206	63.940	0.189	64.367	0.371	65.161	0.356	64.425	0.165	0.167	2.114	2.146
AVE.			0.120	61.539	0.123	62.058	0.181	61.196	0.185	61.766	0.082	0.079	0.854	0.828
STD.			0.035	1.138	0.032	1.309	0.089	1.573	0.085	1.431	0.053	0.054	0.509	0.462

การวัดค่า Loss จุดเชื่อมต่อ ป้อนสัญญาณแสงต้นทางด้วยเครื่อง laser source และวัดค่า Loss ปลายทางอีกด้านด้วยเครื่อง Fiber Optical Power Meter จากคุณสมบัติของเนื้อแก้วค่าดัชนีหักเหทางแสง (Index) ที่เกิดจากการหลอมเหลวของเนื้อแก้ว แต่ละทิศทางไม่เท่ากัน ดังนั้นการวัดค่า Loss

ต้องวัดทั้งสองทิศทาง จาก A ไป B และวัดกลับจาก B ไป A ตามภาพประกอบที่ 17. เพื่อนำมาเปรียบเทียบ

ผลการวัดค่า Insertion Loss (IL) และ Optical Return Loss (ORL) จุดเชื่อมต่อทั้งก่อนและหลังเข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นหัวข้อ Damp Heat และ Temperature Cycling ทั้ง 2 ทิศทาง (A to B, B to A) ตามตารางที่ 2. และ 3. ตัวอย่างทดสอบเส้นใยแก้วนำแสง 6 F และ 1 F ต่อด้วย Protective Sleeves 1 หลอด เปรียบเทียบค่าก่อนหลังตามตารางที่ 6.

ตารางที่ 6. สรุปค่า Loss จุดเชื่อม 6 F และ 1 F /1 P ก่อนและหลังเข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

Condition	Fiber	IL/ORL ก่อนเข้าตู้อบ (dB)				IL/ORL ออกจากตู้อบ (dB)				Δ	Δ	Δ	Δ
		A-B		B-A		A-B		B-A		A-B	B-A	A-B	B-A
		IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL
Damp heat 85 ^{o}C 85 $\%RH$ 14 Days.	Max. 1F/1	0.361	62.335	0.362	64.228	0.367	61.812	0.371	63.897	0.068	0.063	2.250	1.863
	AVE. 1F/1P	0.179	60.772	0.184	61.860	0.199	60.517	0.203	61.627	0.035	0.031	0.790	0.627
	STD. 1F/1P	0.101	0.918	0.101	1.169	0.093	0.605	0.094	0.837	0.018	0.014	0.645	0.572
	MAX. 6F/1P	0.308	66.358	0.340	65.126	0.473	65.348	0.479	64.755	0.238	0.228	3.425	2.880
	AVE. 6F/1P	0.160	61.375	0.167	62.118	0.243	60.901	0.246	61.629	0.093	0.089	0.867	0.701
	STD. 6F/1P	0.053	1.703	0.053	1.575	0.094	1.830	0.089	1.615	0.075	0.072	0.730	0.625
Temperature Cycling 4.4 - 60 ^{o}C 95 $\%RH$ 30 Days.	Max. 1F/1P	0.267	61.494	0.269	63.449	0.277	61.274	0.280	63.051	0.064	0.059	1.996	1.425
	AVE. 1F/1P	0.190	60.369	0.193	61.373	0.184	60.378	0.187	61.418	0.040	0.039	0.639	0.612
	STD. 1F/1P	0.053	0.731	0.053	1.245	0.058	0.552	0.058	0.951	0.018	0.016	0.479	0.414
	MAX. 6F/1P	0.308	66.358	0.340	65.126	0.473	65.348	0.479	64.755	0.238	0.228	3.425	2.880
	AVE. 6F/1P	0.160	61.375	0.167	62.118	0.243	60.901	0.246	61.629	0.093	0.089	0.867	0.701
	STD. 6F/1P	0.053	1.703	0.053	1.575	0.094	1.830	0.089	1.615	0.075	0.072	0.730	0.625

สรุปผลการทดลองข้างต้นตามตารางที่ 6. ระหว่างตัวอย่างทดสอบเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ Protective Sleeves ร่วมกับแบ่งเป็น 1 F /1 P และ 6 F /1 P ค่า Loss ที่สำคัญคือค่า IL ทั้งนี้มาตรฐานจุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำสอง (Splice) $\leq 0.05\,dB$ แต่ค่าตามตารางเป็นค่า Loss ที่รวม Connector และเส้นใยแก้วนำแสงที่นำมาเชื่อมต่อเพิ่ม ดังนั้นผลการทดลองนี้จะยึดค่าที่เปลี่ยนแปลงมาอ้างอิง ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1) ค่า Loss จุดเชื่อมต่อ 1 F /1 P ก่อนเข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นหัวข้อ Damp Heat และ Temperature Cycling สูงสุด 0.36 dB หลังออกจากตู้ฯ สูงสุด 0.37 dB เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 0.01 dB
2) ค่า Loss จุดเชื่อมต่อ 6 F /1 P ก่อนเข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นหัวข้อ Damp Heat และ Temperature Cycling สูงสุด 0.34 dB หลังออกจากตู้ฯ สูงสุด 0.48 dB เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 0.14 dB

สรุปผลการทดลอง การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงจุดเชื่อมต่อ $1F/1P$ และ $6F/1P$ ค่า Loss จุดเชื่อมต่อไม่แตกต่างกันคือ 0.36 dB และ 0.34 dB ตามลำดับ แต่เมื่อเข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นหัวข้อ Damp Heat และ Temperature Cycling เปรียบเทียบจุดเชื่อมต่อ $1F/1P$ ค่า Loss จุดเชื่อมต่อเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยแทบไม่เป็นนัยสำคัญเปลี่ยนแปลง กล่าวคือเพิ่มขึ้นเพียง 0.01 dB แต่จุดเชื่อมต่อ $6F/1P$ ค่า Loss จุดเชื่อมต่อเปลี่ยนแปลงจาก 0.34 dB และ 0.48 dB เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 0.14 dB ผลอาจมาจาก Protective Sleeves เปลี่ยนสภาพตามสภาพแวดล้อมมีการ “ยืด-หด” ตัวส่งผลกระทบต่อเส้นใยแก้วนำแสงตามมา

5.2 ห่อหุ้มเส้นใยแก้วใน Protective Sleeves แบบสุ่มโดยไม่จัดระเบียบ

ผลการทดลองที่ผ่านมาการเตรียมตัวอย่างมีการจัดเรียงเส้นใยแก้วนำแสงอย่างเป็นระเบียบ จึงมีคำถามว่ากรณีการเตรียมตัวอย่างจัดเรียงเส้นใยแก้วนำแสงไขว้ไปมาใน Protective Sleeves จะส่งส่งต่อจุดเชื่อมต่อหรือไม่

ทดลองเตรียมตัวอย่างเรียงเส้นใยแก้วนำแสง $6F$ และ $12F$ ไขว้ไปมาใน Protective Sleeves 1 หลอด เพื่อศึกษาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น โดยวัดค่า Loss ก่อนและหลังอบความร้อน Protective Sleeves ผลการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 7. และ 8.

ตารางที่ 7. เปรียบเทียบค่า Loss จุดเชื่อม $6F/1P$ ก่อนและหลังอบความร้อน Protective Sleeves

Example No	Core No	Wave Length (nm)	IL/ORL ก่อนเข้าตู้อบ (dB)				IL/ORL ออกจากตู้อบ (dB)				Δ	Δ	Δ	Δ
			A-B		B-A		A-B		B-A		A-B	B-A	A-B	B-A
			IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL
1	1	1310	0.008	63.503	0.007	63.528	0.012	63.125	0.014	63.336	0.004	0.007	0.378	0.192
		1490	0.014	63.604	0.013	63.478	0.018	63.470	0.019	63.574	0.004	0.006	0.134	0.096
		1550	0.001	64.259	0.002	63.950	0.006	63.925	0.007	64.109	0.005	0.005	0.334	0.159
		1625	0.020	61.685	0.019	61.911	0.027	61.629	0.030	61.819	0.007	0.011	0.056	0.092
	2	1310	0.437	64.377	0.434	64.248	0.305	64.054	0.303	64.006	0.132	0.131	0.323	0.242
		1490	0.397	64.321	0.396	64.272	0.275	64.092	0.275	64.218	0.122	0.121	0.229	0.054
		1550	0.395	64.691	0.392	64.675	0.260	64.419	0.260	64.576	0.135	0.132	0.272	0.099
		1625	0.346	62.353	0.345	62.569	0.243	62.166	0.243	62.349	0.103	0.102	0.187	0.220
	3	1310	0.560	64.718	0.557	64.771	0.332	64.031	0.328	63.949	0.228	0.229	0.687	0.822
		1490	0.477	64.283	0.476	64.398	0.284	64.198	0.284	64.130	0.193	0.192	0.085	0.268
		1550	0.439	64.675	0.437	64.601	0.244	64.483	0.242	64.423	0.195	0.195	0.192	0.178
		1625	0.412	62.319	0.411	62.703	0.250	62.255	0.249	62.451	0.162	0.162	0.064	0.252
	4	1310	0.435	64.345	0.435	64.294	0.353	63.870	0.349	64.183	0.082	0.086	0.475	0.111
		1490	0.349	64.219	0.350	64.435	0.291	64.065	0.290	64.291	0.058	0.060	0.154	0.144
		1550	0.339	64.478	0.341	64.663	0.277	64.437	0.275	64.538	0.062	0.066	0.041	0.125
		1625	0.305	62.293	0.306	62.515	0.258	62.254	0.257	62.458	0.047	0.049	0.039	0.057

ตารางที่ 7. เปรียบเทียบค่า Loss จุดเชื่อม 6 F /1 P ก่อนและหลังอบความร้อน Protective Sleeves (ต่อ)

Example No	Core No	Wave Length (nm)	IL/ORL ก่อนเข้าตู้อบ (dB)				IL/ORL ออกจากตู้อบ (dB)				Δ	Δ	Δ	Δ
			A-B		B-A		A-B		B-A		A-B	B-A	A-B	B-A
			IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL
1	5	1310	0.512	64.376	0.511	64.293	0.441	64.165	0.430	64.406	0.071	0.081	0.211	0.113
		1490	0.397	64.440	0.397	64.536	0.354	64.141	0.353	64.200	0.043	0.044	0.299	0.336
		1550	0.396	64.698	0.396	64.562	0.358	64.756	0.349	65.081	0.038	0.047	0.058	0.519
		1625	0.358	62.415	0.356	62.574	0.336	62.416	0.335	62.609	0.022	0.021	0.001	0.035
	6	1310	0.040	63.425	0.037	63.433	0.037	63.365	0.036	63.346	0.003	0.001	0.060	0.087
		1490	0.041	63.523	0.039	63.701	0.040	63.438	0.037	63.737	0.001	0.002	0.085	0.036
		1550	0.035	64.235	0.033	64.160	0.035	64.052	0.032	64.260	0.000	0.001	0.183	0.100
		1625	0.044	61.741	0.044	61.926	0.045	61.737	0.044	61.864	0.001	0.000	0.004	0.062
2	1	1310	0.101	63.722	0.100	63.705	0.124	63.668	0.123	63.754	0.023	0.023	0.054	0.049
		1490	0.093	63.673	0.092	63.841	0.109	63.930	0.109	63.982	0.016	0.017	0.257	0.141
		1550	0.078	64.380	0.076	64.255	0.093	64.328	0.095	64.289	0.015	0.019	0.052	0.034
		1625	0.094	62.167	0.093	62.344	0.127	62.042	0.126	62.135	0.033	0.033	0.125	0.209
	2	1310	0.378	64.200	0.376	64.134	0.166	63.710	0.167	63.866	0.212	0.209	0.490	0.268
		1490	0.326	64.024	0.326	64.118	0.137	63.842	0.138	64.091	0.189	0.188	0.182	0.027
		1550	0.273	64.609	0.274	64.591	0.162	64.099	0.102	64.142	0.111	0.172	0.510	0.449
		1625	0.349	62.590	0.345	62.696	0.181	62.259	0.179	62.346	0.168	0.166	0.331	0.350
	3	1310	0.066	63.581	0.064	63.663	0.055	63.507	0.055	63.673	0.011	0.009	0.074	0.010
		1490	0.046	63.592	0.047	63.811	0.043	63.593	0.044	63.725	0.003	0.003	0.001	0.086
		1550	0.028	64.131	0.029	64.168	0.028	64.199	0.030	64.272	0.000	0.001	0.068	0.104
		1625	0.082	62.128	0.080	62.207	0.082	62.141	0.082	62.126	0.000	0.002	0.013	0.081
	4	1310	0.283	64.004	0.282	64.319	0.286	63.997	0.286	64.060	0.003	0.004	0.007	0.259
		1490	0.219	63.982	0.220	64.061	0.232	64.128	0.234	64.280	0.013	0.014	0.146	0.219
		1550	0.200	64.499	0.201	64.505	0.213	64.497	0.215	64.452	0.013	0.014	0.002	0.053
		1625	0.214	62.276	0.213	62.342	0.231	62.288	0.230	62.468	0.017	0.017	0.012	0.126
	5	1310	0.423	64.385	0.433	64.308	0.376	64.200	0.382	64.241	0.047	0.051	0.185	0.067
		1490	0.338	64.195	0.338	64.343	0.300	64.321	0.302	64.355	0.038	0.036	0.126	0.012
		1550	0.340	64.712	0.341	64.710	0.294	64.562	0.295	64.743	0.046	0.046	0.150	0.033
		1625	0.317	62.465	0.315	62.580	0.286	62.426	0.284	62.466	0.031	0.031	0.039	0.114
	6	1310	0.229	63.780	0.230	63.923	0.230	63.771	0.229	63.885	0.001	0.001	0.009	0.038
		1490	0.195	63.768	0.195	63.980	0.196	64.040	0.195	63.915	0.001	0.000	0.272	0.065
		1550	0.178	64.203	0.179	64.366	0.179	64.478	0.179	64.291	0.001	0.000	0.275	0.075
		1625	0.186	62.228	0.187	62.190	0.189	62.178	0.188	62.264	0.003	0.001	0.050	0.074
Δ Max.			0.560	64.718	0.557	64.771	0.441	64.756	0.430	65.081	0.228	0.229	0.687	0.822
AVE.			0.246	63.672	0.245	63.737	0.196	63.557	0.194	63.661	0.057	0.059	0.166	0.153
STD.			0.162	0.921	0.162	0.863	0.118	0.890	0.117	0.873	0.068	0.069	0.157	0.149

ตารางที่ 8. เปรียบเทียบค่า Loss จุดเชื่อม 12 F /1 P ก่อนและหลังอบความร้อน Protective Sleeves

Example No	Core No	Wave Length (nm)	IL/ORL ก่อนเข้าตู้อบ (dB)				IL/ORL ออกจากตู้อบ (dB)				Δ	Δ	Δ	Δ
			A-B		B-A		A-B		B-A		A-B	B-A	A-B	B-A
			IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL
1	1	1310	0.440	64.301	0.441	64.347	0.361	64.050	0.321	64.238	0.079	0.120	0.251	0.109
		1490	0.373	64.412	0.373	64.505	0.270	64.442	0.271	64.521	0.103	0.102	0.030	0.016
		1550	0.364	64.804	0.366	64.654	0.264	64.636	0.266	64.675	0.100	0.100	0.168	0.021
		1625	0.356	62.661	0.355	62.767	0.267	62.482	0.266	62.537	0.089	0.089	0.179	0.230
	2	1310	0.105	63.739	0.106	63.793	0.101	63.628	0.102	63.846	0.004	0.004	0.111	0.053
		1490	0.107	63.983	0.108	64.140	0.089	63.905	0.090	64.070	0.018	0.018	0.078	0.070
		1550	0.106	64.267	0.109	64.359	0.095	64.335	0.096	64.338	0.011	0.013	0.068	0.021
		1625	0.139	62.221	0.139	62.242	0.126	62.177	0.125	62.296	0.013	0.014	0.044	0.054
	3	1310	0.426	64.412	0.427	64.520	0.447	64.405	0.451	64.615	0.021	0.024	0.007	0.095
		1490	0.351	64.405	0.352	64.574	0.369	64.660	0.370	64.692	0.018	0.018	0.255	0.118
		1550	0.325	64.698	0.327	64.769	0.342	64.830	0.344	64.793	0.017	0.017	0.132	0.024
		1625	0.332	62.505	0.330	62.602	0.346	62.732	0.314	62.795	0.014	0.016	0.227	0.193
	4	1310	0.090	63.642	0.091	62.803	0.186	63.885	0.187	63.977	0.096	0.096	0.243	1.174
		1490	0.088	63.948	0.089	64.091	0.165	64.109	0.167	64.259	0.077	0.078	0.161	0.168
		1550	0.084	64.189	0.086	64.304	0.160	64.427	0.161	64.541	0.076	0.075	0.238	0.237
		1625	0.140	62.130	0.140	62.272	0.218	62.340	0.218	62.404	0.078	0.078	0.210	0.132
	5	1310	0.384	64.049	0.386	64.168	0.405	64.417	0.407	64.323	0.021	0.021	0.368	0.155
		1490	0.322	64.346	0.322	64.485	0.353	64.478	0.353	64.603	0.031	0.031	0.132	0.118
		1550	0.332	64.847	0.332	64.862	0.357	64.822	0.358	64.885	0.025	0.026	0.025	0.023
		1625	0.307	62.461	0.307	62.616	0.339	62.554	0.339	62.687	0.032	0.032	0.093	0.071
	6	1310	0.254	63.881	0.254	64.032	0.250	63.962	0.251	63.948	0.004	0.003	0.081	0.084
		1490	0.159	64.110	0.160	64.107	0.160	64.091	0.161	64.050	0.001	0.001	0.019	0.057
		1550	0.141	64.266	0.142	64.446	0.134	64.342	0.136	64.368	0.007	0.006	0.076	0.078
		1625	0.227	62.382	0.226	62.432	0.224	62.336	0.223	62.372	0.003	0.003	0.046	0.060
	7	1310	0.217	63.993	0.220	64.122	0.220	63.857	0.225	63.918	0.003	0.005	0.136	0.204
		1490	0.200	63.914	0.200	64.226	0.202	64.179	0.203	64.090	0.002	0.003	0.265	0.136
		1550	0.183	64.518	0.184	64.686	0.182	64.520	0.184	64.631	0.001	-	0.002	0.055
		1625	0.208	62.313	0.207	62.411	0.204	62.315	0.205	62.377	0.004	0.002	0.002	0.034
	8	1310	0.532	64.262	0.534	64.549	0.562	64.527	0.562	64.479	0.030	0.028	0.265	0.070
		1490	0.405	64.563	0.406	64.512	0.426	64.566	0.430	64.449	0.021	0.024	0.003	0.063
		1550	0.365	64.700	0.367	64.788	0.391	64.736	0.392	64.723	0.026	0.025	0.036	0.065
		1625	0.424	62.621	0.423	62.915	0.440	62.681	0.442	62.697	0.016	0.019	0.060	0.218
	9	1310	0.446	64.369	0.446	64.456	0.598	64.672	0.599	64.574	0.152	0.153	0.303	0.118
		1490	0.369	64.344	0.369	64.423	0.501	64.667	0.501	65.079	0.132	0.132	0.323	0.656
		1550	0.350	64.834	0.351	64.833	0.480	65.227	0.480	65.065	0.130	0.129	0.393	0.232
		1625	0.331	62.636	0.332	62.520	0.446	62.815	0.445	62.939	0.115	0.113	0.179	0.419
	10	1310	0.131	63.711	0.131	63.731	0.245	63.833	0.246	63.839	0.114	0.115	0.122	0.108
		1490	0.093	63.860	0.095	64.021	0.169	63.760	0.170	63.885	0.076	0.075	0.100	0.136
		1550	0.063	64.079	0.066	64.171	0.159	64.319	0.159	64.482	0.096	0.093	0.240	0.311
		1625	0.127	62.212	0.126	62.124	0.208	62.124	0.208	62.138	0.081	0.082	0.088	0.014

ตารางที่ 8. เปรียบเทียบค่า Loss จุดเชื่อม 12 F /1 P ก่อนและหลังอบความร้อน Protective Sleeves (ต่อ)

Example No	Core No	Wave Length (nm)	IL/ORL ก่อนเข้าตู้อบ (dB)				IL/ORL ออกจากตู้อบ (dB)				Δ	Δ	Δ	Δ
			A-B		B-A		A-B		B-A		A-B	B-A	A-B	B-A
			IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL
1	11	1310	0.190	63.762	0.186	64.011	0.280	63.791	0.282	63.927	0.090	0.096	0.029	0.084
		1490	0.186	64.076	0.188	64.162	0.266	64.035	0.266	64.136	0.080	0.078	0.041	0.026
		1550	0.136	64.366	0.139	64.500	0.226	64.429	0.228	64.356	0.090	0.089	0.063	0.144
		1625	0.194	62.413	0.194	62.334	0.279	62.414	0.278	62.397	0.085	0.084	0.001	0.063
	12	1310	0.409	64.182	0.412	64.103	0.338	63.993	0.339	64.133	0.071	0.073	0.189	0.030
		1490	0.353	64.207	0.355	64.378	0.292	64.063	0.292	64.190	0.061	0.063	0.144	0.188
		1550	0.324	64.735	0.327	64.776	0.288	64.518	0.289	64.610	0.036	0.038	0.217	0.166
		1625	0.317	62.433	0.318	62.465	0.338	62.617	0.336	62.452	0.021	0.018	0.184	0.013
Δ Max.			0.532	64.847	0.534	64.862	0.598	65.227	0.599	65.079	0.152	0.153	0.393	1.174
AVE.			0.261	63.787	0.261	63.856	0.287	63.848	0.286	63.904	0.051	0.053	0.138	0.144
STD.			0.124	0.854	0.124	0.879	0.123	0.873	0.122	0.874	0.043	0.044	0.104	0.191

ผลการทดลองวัดค่า Insertion Loss (IL) และ Optical Return Loss (ORL) จุดเชื่อมต่อก่อนเข้าตู้อบความร้อนของเครื่อง Fusion Splice และหลังอบความร้อน โดยการทดลองตัวอย่างเรียงเส้นใยแก้วนำแสง 6 F และ 12 F ไขว้ไปมาใน Protective Sleeves 1 หลอด ศึกษาวัดค่า Loss ก่อนและหลังอบความร้อน Protective Sleeves ด้วยตู้อบความร้อนของเครื่อง Fusion Splice ผลการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 7. และ 8. สรุปผลการทดลองตามตารางที่ 9.

ตารางที่ 9. สรุปค่า Loss จุดเชื่อม 6 F และ 12 F /1 P ก่อนและหลังเข้าอบความร้อนของเครื่อง Fusion Splice

Fiber	IL/ORL ก่อนเข้าอบฯ (dB)				IL/ORL ออกจากตู้อบ (dB)				Δ	Δ	Δ	Δ
	A-B		B-A		A-B		B-A		A-B	B-A	A-B	B-A
	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	IL	ORL	ORL	ORL
Max. 6F/1P	0.560	64.718	0.557	64.771	0.441	64.756	0.430	65.081	0.228	0.229	0.687	0.822
AVE. 6F/1P	0.246	63.672	0.245	63.737	0.196	63.557	0.194	63.661	0.057	0.059	0.166	0.153
STD. 6F/1P	0.162	0.921	0.162	0.863	0.118	0.890	0.117	0.873	0.068	0.069	0.157	0.149
Max. 12F/1P	0.532	64.847	0.534	64.862	0.598	65.227	0.599	65.079	0.152	0.153	0.393	1.174
AVE. 12F/1P	0.261	63.787	0.261	63.856	0.287	63.848	0.286	63.904	0.051	0.053	0.138	0.144
STD. 12F/1P	0.124	0.854	0.124	0.879	0.123	0.873	0.122	0.874	0.043	0.044	0.104	0.191

ผลการทดลองห่อหุ้มเส้นใยแก้วหลาย Fiber ใน Protective Sleeves 1 หลอด แบบสุ่มโดยไม่จัดระเบียบ 6 F /1 P และ 12 F /1 P ก่อนและหลังเข้าตู้อบความร้อนของเครื่อง Fusion Splice ผลการทดลองได้ข้อสรุปดังนี้

1) ค่า Loss จุดเชื่อมต่อ 6 F /1 P ก่อนเข้าตู้อบความร้อนของเครื่อง Fusion Splice สูงสุด 0.56 dB หลังออกจากตู้ฯ สูงสุด 0.44 dB เปลี่ยนแปลง 0.12 dB

2) ค่า Loss จุดเชื่อมต่อ 12 F /1 P ก่อนเข้าตู้อบความร้อนของเครื่อง Fusion Splice สูงสุด 0.53 dB หลังออกจากตู้ฯ สูงสุด 0.59 dB เปลี่ยนแปลง 0.06 dB

จากโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสง ณ จุดเชื่อมต่อด้วยเครื่อง Fusion Splice คุณสมบัติของเนื้อแก้วที่บังคับเส้นใยแก้วให้เป็นแนวตรง การเชื่อมต่อและวางเส้นใยแก้วนำแสงแบบสุ่มโดยไม่จัดระเบียบแทบจะไม่มีผลกระทบต่อค่า Loss ณ จุดเชื่อมต่อเมื่อเปรียบเทียบการจัดวางอย่างเป็นระเบียบ

ข้อมูลจากภาคสนามเจอปัญหา Loss ในโครงข่าย เมื่อทำการตรวจวัดค่า Loss ด้วยเครื่อง OTDR ตำแหน่ง Loss แสดงที่หัวต่อเคเบิล OFC เปิดซ่อมพบค่า Loss จุดเชื่อมต่อ มีผู้ประยุกต์เชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง 12 Fiber ใน Protective Sleeves เดียวกัน เมื่อแก้ไขใหม่ค่า Loss ณ ตำแหน่งนี้หายไป

จากการสัมภาษณ์พนักงานที่ทำหน้าที่ซ่อมบำรุงโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง ข้อควรพึงระวังในการประยุกต์เชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงใน Protective Sleeves เดียวกัน

1) ก่อนให้ความร้อน Protective Sleeves เพื่อห่อหุ้มเส้นใยแก้วนำแสง ต้องให้ส่วนเนื้อแก้วที่ปอกฉนวนออกแล้วอยู่ใน Protective Sleeves ทั้งหมด (เจอปัญหาภาคสนามแก้วส่วนที่โผล่ออกนอก Protective Sleeves หัก จากปัญหาไม่มีอะไรห่อหุ้มเนื้อแก้ว)
2) การตั้งอุณหภูมิร่องอบความร้อนของเครื่อง Fusion Splice ให้สอดคล้องกัน Protective Sleeves กรณีให้ความร้อนไม่เหมาะสม ใช้งานระยะหนึ่งจะเกิดค่า Loss ณ ตำแหน่งนี้
3) การติดตั้ง Protective Sleeves กับร่องจับยึดของถาดรองรับเส้นใยแก้วนำแสงในหัวต่อเคเบิล OFC ต้องให้ Protective Sleeves เย็นตัวก่อน

โดยสรุปผลการศึกษาครั้งนี้ เพื่อตอบคำถามหน่วยงานที่เชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่า 1 Fiber ใน Protective Sleeves 1 หลอด ว่ามีผลกระทบในระยะยาวหรือไม่ ผลการศึกษามีคำแนะนำดังนี้

1) โครงข่ายที่วางเส้นใยแก้วนำแสงใหม่ให้เชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง 1 Fiber ต่อ Protective Sleeves 1 หลอด (1 F /1 P) เท่านั้น
2) กรณีซ่อมบำรุงหากไม่มีข้อจำกัดเรื่องเวลาและตำแหน่งในการจัดวาง Protective Sleeves เข้ากับถาดติดตั้งแนะนำเชื่อมต่อแบบ 1 F /1 P
3) กรณีเลี่ยงไม่ได้จากข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาตรวจแก้คืนดี การจัดวาง Protective Sleeves เข้ากับถาดติดตั้ง สามารถเชื่อมต่อเส้นใยแก้วมากกว่า 1 Fiber ต่อ Protective Sleeves 1 หลอด (สูงสุดไม่ควรเกิน 6 F /1 P)

4) ผลการทดลองจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงใน Protective Sleeves 1 หลอด ไม่ส่งผลต่อค่า Loss จุดเชื่อมต่อ แต่ขึ้นกับความสะดวกในการปฏิบัติงาน (ข้อมูลมีเพียงผลการทดลองในห้องปฏิบัติการเท่านั้น)
5) จากการสัมภาษณ์ผู้ปฏิบัติงานจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงใน Protective Sleeves 1 หลอด ที่เหมาะสมคือ 6 Fiber ($6F/1P$)
6) การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่า 1 Fiber ใน Protective Sleeves 1 หลอด ควรพิจารณาค่า Loss รวม (Loss Margin) ของโครงข่ายนั้น ๆ ประกอบการตัดสินใจ

6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยศึกษาผลการประยุกต์นำเส้นใยแก้วนำแสงหลาย Fiber ห่อหุ้มร่วมใน Protective Sleeves เดียวกัน มาจากพนักงานบางท่านประยุกต์นำเส้นใยแก้วนำแสงหลาย Fiber ห่อหุ้มร่วมใน Protective Sleeves เดียวกัน ด้วยเหตุผลจากข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาการซ่อมโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงให้คืนดีตามระยะเวลาที่ทำ SLA (Service Level Agreement) กับลูกค้า

หัวต่อเคเบิล OFC บางหัวต่อ เมื่อใช้งานไประยะเวลาหนึ่งถาดรองรับ Protective Sleeves ไม่เพียงพอหรือชำรุดเสียหาย ประกอบกับการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงด้วยเครื่อง Fusion Splice เครื่องฯ บางรุ่นใช้เวลาอบ Protective Sleeves นาน (เครื่องรุ่นใหม่ปัญหานี้น้อยลง)

เมื่อมีการบอกกล่าวปากต่อปากเรื่องการประยุกต์นำเส้นใยแก้วนำแสง 4 F ถึง 6 F (บางพื้นที่สูงถึง 8 F) ใช้ร่วมใน Protective Sleeves เดียวกัน ผลการใช้งานเริ่มมีการบอกต่อและนำไปประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ผู้บริหารหลายท่านเริ่มมีข้อกังวลว่าเมื่อผ่านการใช้งานไประยะเวลาหนึ่งจะมีผลกระทบอะไรตามมาหรือไม่ จากข้อกังวลข้างต้นส่วนบริการทดสอบและสอบเทียบ (ทนฐ.) สังกัดสถาบันนวัตกรรม ทีโอที (นฐ.) ร่วมกับพื้นที่และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องร่วมศึกษาทดลองว่าจะมีผลกระทบอะไรตามมา

ข้อมูลจากการสอบถามพนักงานที่มีประสบการณ์ประยุกต์ใช้วิธีนี้ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสง 6 F เป็นจำนวนที่เหมาะสมกับ Protective Sleeves 1 หลอด ด้วยเหตุผลการจัดเก็บเส้นใยแก้วนำแสงกับถาดรองรับในหัวต่อเคเบิล OFC สะดวก **ดังนั้นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่นิยมมักจะห่อหุ้ม Protective Sleeves 1 หลอด ต่อเส้นใยแก้วนำแสง 6 F เป็นเป้าหมายในการศึกษาครั้งนี้**

เตรียมตัวอย่างเพื่อทดลองถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกรณีนำเส้นใยแก้วนำแสงที่เชื่อมต่อด้วยเครื่อง Fusion Splicer ตามขั้นตอนปกติจำนวน 6 F มาห่อหุ้มรวมใน Protective Sleeves เดียวกันจำนวน 10 ตัวอย่าง จากนั้นวัดค่า Loss จุดเชื่อมต่อทุกตัวอย่าง ก่อนติดตั้งชุด Protective Sleeves กับถาดรองรับเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Splice Tray) คล้ายกับติดตั้งใช้งานจริง

แบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกเร่งอายุ (Ageing) ทดสอบตามมาตรฐาน บมจ. ทีโอที หมายเลข OES-001-076-03 ของอุปกรณ์ Fiber Optic Splitter หัวข้อ 4.4.1 Damp heat ด้วย

ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น อุณหภูมิ 85 ^{o}C ความชื้น 85 $\%RH$ ต่อเนื่อง 14 วัน จำนวน 5 ตัวอย่าง ด้วยเหตุผลจุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงใช้งานในตำแหน่งเดียวกับอุปกรณ์ Fiber Optic Splitter

กลุ่มที่สองเร่งอายุทดสอบตามมาตรฐาน บมจ.ทีโอที หมายเลข OES-001-073-04 หัวข้อ 3.4 Temperature Cycling ด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น อุณหภูมิ 4.4 ^{o}C ถึง 60 ^{o}C ควบคุมความชื้น 95 $\%RH$ ขึ้นลงเป็น Cycle ต่อเนื่อง 30 วัน จำนวน 5 ตัวอย่าง เหตุผลที่ทดสอบตามมาตรฐานนี้เพราะจุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงใช้งานในตำแหน่งเดียวกับอุปกรณ์ IN-LINE Closure for Optical Fiber Cable

สรุปผลการทดลอง การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงจุดเชื่อมต่อ 1 F /1 P และ 6 F /1 P ค่า Loss จุดเชื่อมต่อไม่แตกต่างกันคือ 0.36 dB และ 0.34 dB ตามลำดับ แต่เมื่อเข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นหัวข้อ Damp Heat และ Temperature Cycling เปรียบเทียบจุดเชื่อมต่อ 1 F /1 P ค่า Loss จุดเชื่อมต่อเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยแทบไม่เป็นนัยสำคัญเปลี่ยนแปลง กล่าวคือเพิ่มขึ้นเพียง 0.01 dB แต่จุดเชื่อมต่อ 6 F /1 P ค่า Loss จุดเชื่อมต่อเปลี่ยนแปลงจาก 0.34 dB และ 0.48 dB เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 0.14 dB ผลอาจมาจาก Protective Sleeves เปลี่ยนสภาพตามสภาพแวดล้อมมีการ “ยืด-หด” ตัวส่งผลกระทบต่อเส้นใยแก้วนำแสงตามมา

ผลการทดลองที่ผ่านมาการเตรียมตัวอย่างมีการจัดเรียงเส้นใยแก้วนำแสงอย่างเป็นระเบียบ จึงมีคำถามว่ากรณีการเตรียมตัวอย่างจัดเรียงเส้นใยแก้วนำแสงไขว้ไปมาใน Protective Sleeves จะส่งส่งต่อจุดเชื่อมต่อหรือไม่ ทดลองเตรียมตัวอย่างเรียงเส้นใยแก้วนำแสง 6 F และ 12 F ไขว้ไปมาใน Protective Sleeves 1 หลอด เพื่อศึกษาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น โดยวัดค่า Loss ก่อนและหลังอบความร้อน Protective Sleeves

จากโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสง ณ จุดเชื่อมต่อด้วยเครื่อง Fusion Splice คุณสมบัติของเนื้อแก้วที่บังคับเส้นใยแก้วให้เป็นแนวตรง การเชื่อมต่อและวางเส้นใยแก้วนำแสงแบบสุ่มโดยไม่จัดระเบียบแทบจะไม่มีผลกระทบต่อค่า Loss ณ จุดเชื่อมต่อเมื่อเปรียบเทียบการจัดวางอย่างเป็นระเบียบ

ปัญหาภาคสนาม ข้อควรพึงระวังในการประยุกต์เชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงใน Protective Sleeves เดียวกัน

1) ก่อนให้ความร้อน Protective Sleeves เพื่อห่อหุ้มเส้นใยแก้วนำแสง ต้องให้ส่วนเนื้อแก้วที่ปอกฉนวนออกแล้วอยู่ใน Protective Sleeves ทั้งหมด (เจอปัญหาภาคสนามแก้วส่วนที่โผล่ออกนอก Protective Sleeves หัก จากปัญหาไม่มีอะไรห่อหุ้มเนื้อแก้ว)
2) การตั้งอุณหภูมิร่องอบความร้อนของเครื่อง Fusion Splice ให้สอดคล้องกัน Protective Sleeves กรณีให้ความร้อนไม่เหมาะสม ใช้งานระยะหนึ่งจะเกิดค่า Loss ณ ตำแหน่งนี้
3) การติดตั้ง Protective Sleeves กับร่องจับยึดของถาดรองรับเส้นใยแก้วนำแสงในหัวต่อเคเบิล OFC ต้องให้ Protective Sleeves เย็นตัวก่อน

โดยสรุปผลการศึกษาครั้งนี้ เพื่อตอบคำถามหน่วยงานที่เชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่า 1 Fiber ใน Protective Sleeves 1 หลอด ว่ามีผลกระทบในระยะยาวหรือไม่ ผลการศึกษามีคำแนะนำดังนี้

1) โครงข่ายที่วางเส้นใยแก้วนำแสงใหม่ให้เชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง 1 Fiber ต่อ Protective Sleeves 1 หลอด (1 F /1 P) เท่านั้น
2) กรณีซ่อมบำรุงหากไม่มีข้อจำกัดเรื่องเวลาและตำแหน่งในการจัดวาง Protective Sleeves เข้ากับถาดติดตั้งแนะนำเชื่อมต่อแบบ 1 F /1 P
3) กรณีเลี่ยงไม่ได้จากข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาตรวจแก้คืนดี การจัดวาง Protective Sleeves เข้ากับถาดติดตั้ง สามารถเชื่อมต่อเส้นใยแก้วมากกว่า 1 Fiber ต่อ Protective Sleeves 1 หลอด (สูงสุดไม่ควรเกิน 6 F /1 P)
4) ผลการทดลองจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงใน Protective Sleeves 1 หลอด ไม่ส่งผลต่อค่า Loss จุดเชื่อมต่อ แต่ขึ้นกับความสะดวกในการปฏิบัติงาน (ข้อมูลมีเพียงผลการทดลองในห้องปฏิบัติการเท่านั้น)
5) จากการสัมภาษณ์ผู้ปฏิบัติงานจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงใน Protective Sleeves 1 หลอด ที่เหมาะสมคือ 6 Fiber (6 F /1 P)
6) การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่า 1 Fiber ใน Protective Sleeves 1 หลอด ควรพิจารณาค่า Loss รวม (Loss Margin) ของโครงข่ายนั้น ๆ ประกอบการตัดสินใจ

หมายเหตุ วิธีการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่า 1 Fiber ใน Protective Sleeves 1 หลอด เป็นคำแนะนำ (Recommend) ประกอบการแก้ปัญหาเฉพาะหน้า ไม่ใช่มาตรฐาน (Standard) การใช้งานทั่วไป

คณะทำงานโครงการวิจัยฯ

1. นาง ปัณณพร รักชีพ	ส่วนบริการทดสอบและสอบเทียบ (ทนฐ.)
2. นาย ประวิทย์ เดชโต	ส่วนบริการทดสอบและสอบเทียบ (ทนฐ.)
3. นาย ทรงพล สงวนรัตน์	ส่วนบริการทดสอบและสอบเทียบ (ทนฐ.)
4. นาย ชัยฤทธิ์ ศรีดาวงษ์	ส่วนบริการทดสอบและสอบเทียบ (ทนฐ.)
5. นาย ถนอมศักดิ์ แก้วสกุณี	ส่วนบริการทดสอบและสอบเทียบ (ทนฐ.)
6. นาย บุญเลิศ นามนิล	ส่วนบริการทดสอบและสอบเทียบ (ทนฐ.)
7. ว่าที่ร้อยตรี ชัชวาล จันทรกุล	ส่วนบริการทดสอบและสอบเทียบ (ทนฐ.)
8. นาย ไพศาล เข่งเจริญ	ส่วนบริการทดสอบและสอบเทียบ (ทนฐ.)
9. นาย เมธี สุมานะนันท์	ส่วนบริการทดสอบและสอบเทียบ (ทนฐ.)
10. นาย ประกิจ รักชีพ	ส่วนบริการทดสอบและสอบเทียบ (ทนฐ.)
11. นาย กฤศศรี วิลาศ	ส่วนบริการทดสอบและสอบเทียบ (ทนฐ.)
12. นาย สุวันชัย เจริญนนทวัฒน์	ส่วนบริการทดสอบและสอบเทียบ (ทนฐ.)

หน่วยงานภายในบมจ.ทีโอทีที่ร่วมเก็บข้อมูลและให้คำปรึกษา

1. นาย พิสันต์ พงษ์ไชยโสภณ	โทรศัพท์จังหวัดราชบุรี
2. นาย กวี จะเกร็ง	โทรศัพท์จังหวัดราชบุรี
3. นาย อนุวัตร เพ่งผุดผ่อง	โทรศัพท์จังหวัดราชบุรี
4. นาย ปรารถนา โพธารมย์	โทรศัพท์จังหวัดราชบุรี
5. นาย ธนิต ลาภเจริญวงศ์	โทรศัพท์จังหวัดนครปฐม
6. นาย สมาน ปู่เมือง	โทรศัพท์จังหวัดนครปฐม

ที่ปรึกษาโครงการวิจัยฯ

1. นาย เทพธีระ เพชรรัตน์	ผู้จัดการสถาบันนวัตกรรมทีโอที
2. นาย สมพงษ์ น้อมนำทรัพย์	ผส.บภก.1.2(รบ.)-โทรศัพท์จังหวัดราชบุรี
3. นาย สุธี ธงศิริ	ผส.บภก.1.2(นฐ.)–โทรศัพท์จังหวัดนครปฐม
4. นาย สุรัชต์ เพิ่มพูลผลิตผล	ผู้จัดการส่วนปฏิบัติการเคเบิลใยแก้วนำแสงภูมิภาคพื้นที่1
5. นาย นฤทธิ์สมเจริญ สำเภาพล	ผู้จัดการส่วนบริการทดสอบและสอบเทียบ

หน่วยงานภายนอกบมจ.ทีโอทีที่ร่วมศึกษาวิจัย

บริษัท ไฟเบอร์ออพติคคอมมิวนิเคชั่นจำกัด (FOCOM)

เอกสารอ้างอิง

[1] Telephone Organization of Thailand, Outside Plant Standard Sector Specification No. OSE-004-045-02 Issued; February 2007 “ADSS OFC (All-Dielectric Self-Supporting Single Mode Optical Fiber Cable)”

[2] Telephone Organization of Thailand, Outside Plant Standard Sector Specification No. OES-004-054-01 Issued; November 2016 “ARSS OFC (Anti-Rodent Self-Supporting Single Mode Optical Fiber Cable)”

[3] Telecommunication Standardization Sector of ITU (International Telecommunication Union) Recommendation ITU-TG.652 (11/2009)

[4] Telecommunication Standardization Sector of ITU (International Telecommunication Union) Recommendation ITU-TG.655 (11/2009)

[5] Telecommunication Standardization Sector of ITU (International Telecommunication Union) Recommendation ITU-TG.691 (03/2006)

[6] TOT Public Company Limited, Fixed Lind and Broadband Development Sector Specification No. OES-001-076-04 Issued; November 2018 “Fiber Optic Splitter (Splitter in Passive Optical Network)”

[7] TOT Public Company Limited, Outside Plant Standard Sector Specification No. OES-001-073-04 Issued; April 2010 “IN-LINE Closure for Optical Fiber Cable (In-Line Closure for Core Network”