

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 2 เส้นใยนำแสงและกระบวนการผลิต

หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. กระบวนการผลิตเส้นใยนำแสง
2. วัสดุที่ใช้ทำเส้นใยนำแสง
3. โครงสร้างและชนิดของเส้นใยนำแสง
4. เคเบิลเส้นใยนำแสง

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. เพื่อให้ผู้เรียนสามารถอธิบายกระบวนการผลิตเส้นใยนำแสงได้
2. เพื่อให้ผู้เรียนสามารถบอกชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยนำแสงได้
3. เพื่อให้ผู้เรียนสามารถอธิบายโครงสร้างและชนิดของเส้นใยนำแสงได้
4. เพื่อให้ผู้เรียนสามารถอธิบายชนิดของเคเบิลเส้นใยนำแสงและการนำไปใช้งานได้

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนรู้การสอนประจำบท

1. วิธีสอน

- 1.1 วิธีสอนแบบบรรยาย
- 1.2 วิธีสอนแบบอภิปราย
- 1.3 วิธีสอนแบบค้นหาความรู้ด้วยตนเอง

2. กิจกรรมการเรียนรู้การสอน

- 2.1 ผู้สอนบรรยายเนื้อหาที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตเส้นใยนำแสง วัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิตเส้นใยนำแสง ชนิดของเส้นใยนำแสง และเคเบิลเส้นใยนำแสง
- 2.2 ผู้สอนมีการตั้งคำถามระหว่างการสอน
- 2.3 มีการมอบหมายแบบฝึกหัดให้ผู้เรียนได้ทำเป็นการบ้าน
- 2.4 มีการมอบหมายหัวข้อให้ผู้เรียนได้ไปอ่านล่วงหน้า

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอน รายวิชา การสื่อสารทางแสง
2. เว็บไซต์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
3. แบบฝึกหัดท้ายบทเรียน
4. เครื่องคำนวณ

การวัดผลและการประเมินผล

1. การเข้าชั้นเรียน ความตรงต่อเวลา และความตั้งใจในระหว่างเรียน
2. การส่งแบบฝึกหัด การบ้านและการนำเสนอรายงาน
3. การสอบกลางภาค
4. การสอบปลายภาค
5. การค้นคว้าเพิ่มเติมตามหัวข้อที่ได้รับมอบหมาย

บทที่ 2

เส้นใยนำแสงและกระบวนการผลิต

เส้นใยนำแสงที่ดีควรมีค่าการลดทอนต่อระยะทางที่ต่ำ ราคาไม่แพงและสามารถทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนี้จะต้องติดตั้งง่ายและสะดวกในการบำรุงรักษาระบบ และขนาดของเส้นใยนำแสงจะต้องเป็นมาตรฐานเดียวกันทั่วโลก เพื่อความสะดวกในการเชื่อมต่อโครงข่ายเส้นใยนำแสงระหว่างประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก

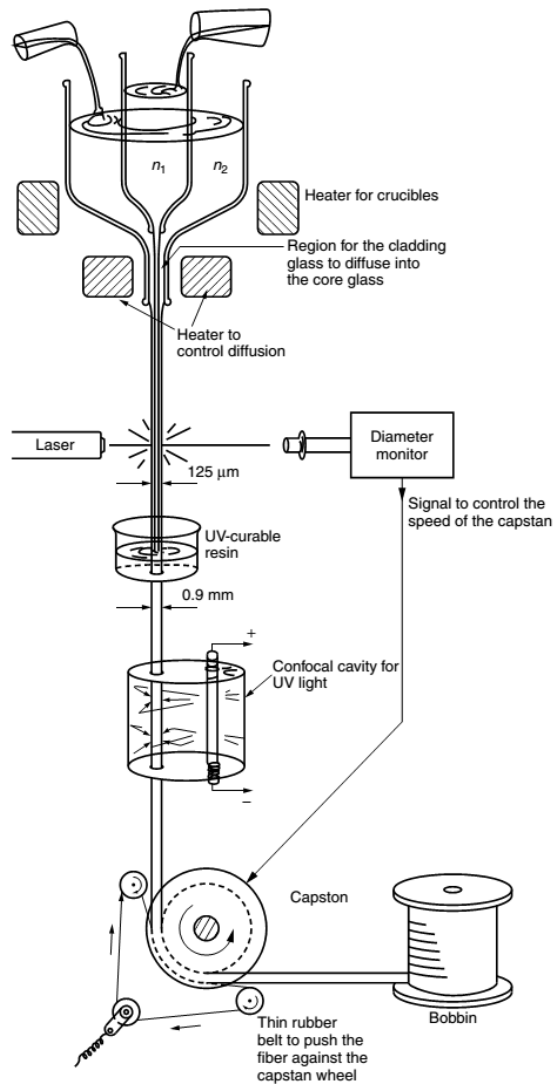
2.1 กระบวนการผลิตเส้นใยนำแสง

ปัจจุบันกระบวนการผลิตเส้นใยนำแสงและเคเบิล จะมีหลายรูปแบบด้วยกันเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน เส้นใยนำแสงในที่ผลิตในปัจจุบันจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 800 nm จนถึง 1,700 nm วัสดุที่ใช้ทำเส้นใยนำแสงควรมีค่าการดูดกลืนแสงจากภายใน (intrinsic) และการแตกกระเจิงของแสงที่ต่ำ ค่าดรรชนีการหักเหของแสงภายในคอร์และแคลดดิ้งมีความสม่ำเสมอตลอดความยาวสาย กระบวนการผลิตเส้นใยนำแสงในปัจจุบันจะมี 2 รูปแบบใหญ่ ๆ ด้วยกันคือ

1. กระบวนการผลิตแบบหนึ่งสแตจ (one-stage process)
2. กระบวนการผลิตแบบสองสแตจ (two-stage process)

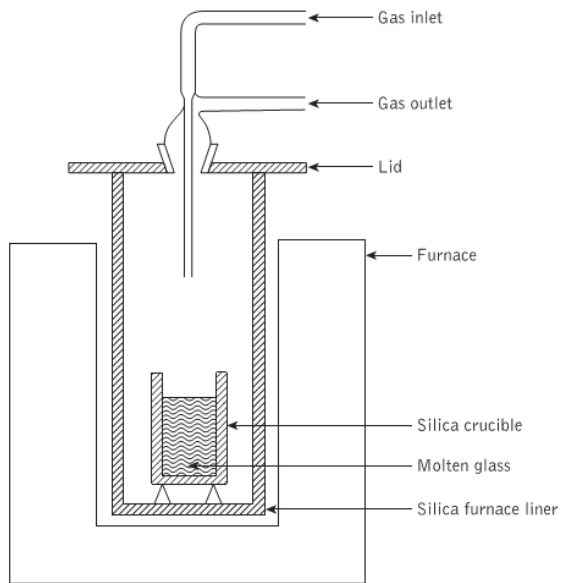
กระบวนการผลิตเส้นใยนำแสงแบบหนึ่งสแตจจะรวมกระบวนการเตรียมแท่งแก้วหรือแท่งพรีฟอร์ม (preform rod) กับการดึงเป็นเส้นใยนำแสงแบบต่อเนื่องกัน ข้อดีของกระบวนการผลิตเส้นใยนำแสงแบบหนึ่งสแตจสามารถผลิตได้แบบต่อเนื่อง มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ แต่ข้อด้อยคือวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยนำแสงต้องมีจุดหลอมเหลวต่ำ การควบคุมให้เส้นใยนำแสงมีค่าอัตราการลดทอนต่ำได้ยาก เหมาะสำหรับการผลิตเส้นใยนำแสงประเภท PCS (plastic-clad silica) เหมาะสำหรับสายส่งสัญญาณในระยะสั้น ๆ ลำดับกระบวนการผลิตเส้นใยนำแสงแบบหนึ่งสแตจสามารถแสดงดังภาพที่ 2.1 เรียกว่ากระบวนการผลิตแบบ double-crucible

จากภาพที่ 2.1 ในกระบวนการผลิตเบ้าหลอมชั้นในสุดจะใส่วัสดุที่มีค่าดรรชนีการหักเหแสงสูง (higher index material) เพื่อเป็นแก้วชั้นคอร์ ส่วนเบ้าหลอมชั้นนอกจะเติมวัสดุที่มีค่าดรรชนีการหักเหแสงที่ต่ำกว่า เพื่อเป็นแก้วชั้นแคลดดิ้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์กับแคลดดิ้งจะถูกควบคุมด้วยเลเซอร์ที่สัมพันธ์กับการหมุนของก๊ว (caps ton) เพื่อม้วนเก็บเส้นใยนำแสง (bobbin) เส้นใยนำแสงเมื่อผ่านการดึงเป็นเส้นแล้วจะต้องถูกเคลือบด้วยเรซินทันที (UV-curable resin) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดรอยร้าวหรือรอยขีดข่วนที่ผิวเส้นใยนำแสงเมื่ออุณหภูมิเย็นตัวลง

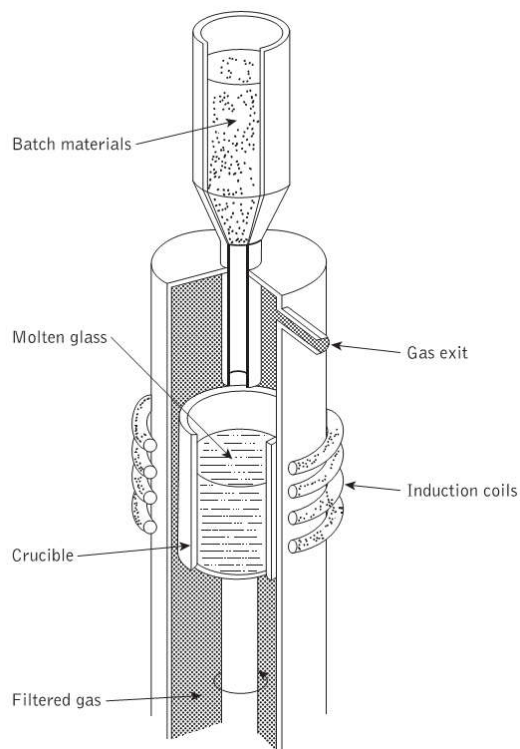


ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตเส้นใยนำแสงแบบหนึ่งสเตจ
ที่มา (Lizuka, 2002, p.776)

กระบวนการผลิตเส้นใยนำแสงแบบ double-crucible มักนิยมผลิตจากบนลงล่างโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกช่วยในการผลิตเพราะแรงโน้มถ่วงของโลกต่ออัตราการไหลของแก้วเหลวจะคงที่ ส่วนกระบวนการผลิตแบบสองสเตจ (two-stage process) เป็นกระบวนการผลิตที่แยกกันระหว่างการเตรียมแท่งพรีฟอร์มกับกระบวนการหลอมและดึงให้เป็นเส้นใยนำแสงเล็ก ๆ เป็นเทคนิคที่สามารถผลิตเส้นใยนำแสงที่มีค่าอัตราการลดทอนต่ำได้ดี กระบวนการเตรียมแท่งพรีฟอร์ม (perform) สามารถจะแบ่งออกเป็น 2 เทคนิคคือ 1.) เทคนิคการหลอมละลายโดยตรงแสดง และ 2.) เทคนิคการเคลือบด้วยไอระเหยของอนุภาคโลหะผสมที่อุณหภูมิสูง



ภาพที่ 2.2 เตาผลิตแก้วที่มีความบริสุทธิ์สูงแบบหลอมละลาย
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 172)

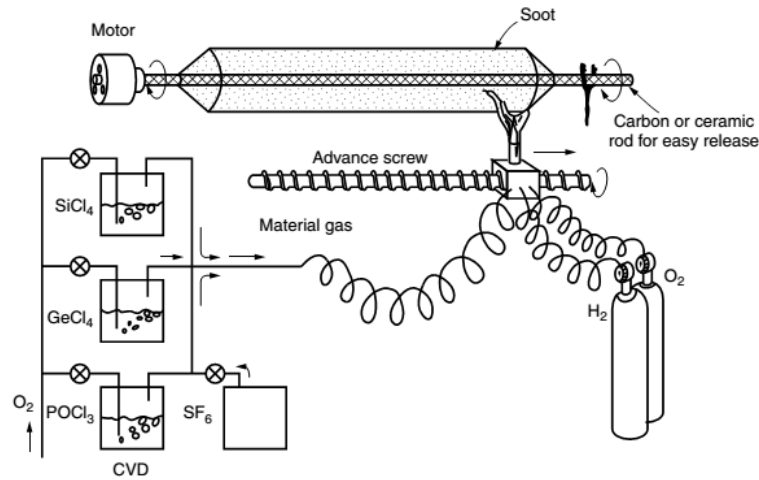


ภาพที่ 2.3 เตาผลิตแก้วที่มีความบริสุทธิ์สูงแบบเหนียว
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 173)

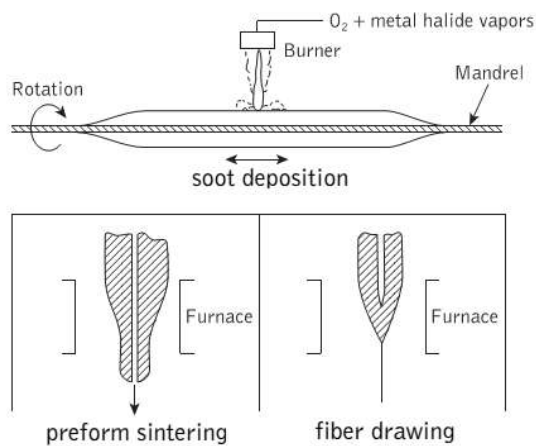
ในการเตรียมแท่งแก้วบริสุทธิ์สำหรับเทคนิคการหลอมละลายโดยตรงจะนำเอาสารประกอบประเภทอ็อกไซด์ SiO_2 , GeO_2 , B_2O_3 และ A_2O_3 หรือคาร์บอเนต Na_2CO_3 , K_2CO_3 , CaCO_3 และ BaCO_3 ที่มีความบริสุทธิ์สูง ที่มีสารเจือปนอยู่ในระดับต่ำกว่า 20 ต่อ 10^9 ส่วน หรือ 1 ต่อ 10^9 ส่วนทำการหลอมที่อุณหภูมิประมาณ 900 ถึง 1,300 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 2.2 จากรูปผงแก้วจะถูกบรรจุอยู่ในเตาหลอมซิลิกาและกระบวนการหลอมละลายจะอยู่ในเตาหลอม (furnace)

ในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนค่าดัชนีการหักเหแสงของแก้วสามารถทำได้โดยการเติมสารเจือปนเข้าไปขณะหลอมละลาย สำหรับการผลิตแท่งพรีฟอร์มดังแสดงในภาพที่ 2.2 จะต้องใช้เวลาเพิ่มความร้อนนานกว่าจะถึงจุดอุณหภูมิที่ผงแก้วหลอมละลาย และสิ่งสำคัญจะต้องระวังไม่ให้มีสิ่งเจือปนจากภายนอกเข้าไปในเตาหลอม เพื่อเป็นการใช้เวลาให้สั้นลงจึงมีการพัฒนาเตาหลอมที่เป็นแบบเหนี่ยวนำ (induction furnace) ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาหลอมจะกำเนิดมาจากขดลวดเหนี่ยวนำ (induction coils) ซึ่งใช้ความถี่ประมาณ 500 MHz และข้อดีของการใช้เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำคือในสถานะที่แก้วหลอมละลายสิ่งเจือปนต่างๆ จะถูกขับปลิงระหว่างแก้วเหลวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผลให้เกิดการวางตัวเป็นชั้น (layer) สารเหลวบริสุทธิ์จะอยู่ด้านล่างและชั้นสิ่งเจือปนจะลอยตัวด้านบน แก้วเหลวบริสุทธิ์จะถูกแยกออกมาแล้วทำให้เย็นลงโดยใช้น้ำหรือก๊าซเย็นตัว เพื่อให้แก้วเหลวกลับมาอยู่ในสถานะของแข็งเพื่อนำไปทำเป็นแท่งพรีฟอร์มต่อไป วิธีการนี้แท่งแก้วพรีฟอร์มส่วนที่เป็นคอร์และแคลดดิงจะแยกส่วนกัน แล้วถูกป้อนเข้าเตาหลอม แท่งแก้วคอร์และแคลดดิงจะถูกหลอมพร้อมกัน เมื่อแท่งแก้วคอร์และแคลดดิงเริ่มหลอมละลายเป็นแก้วชนิดกระบวนการดึงจะเริ่มขึ้นด้วย winding machine

ความเร็วของการดึงจะสัมพันธ์กับขนาดของเส้นใยนำแสงจะถูกควบคุมโดย diameter monitor เมื่อเส้นใยนำแสงที่ผ่านการดึงจะถูกเคลือบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและป้องกันสิ่งปลอมปนทันทีด้วย coating bath ซึ่งเส้นใยนำแสงที่ยังไม่ผ่านการหุ้มฉนวนเรียกว่าแบร์ไฟเบอร์ (bare fiber) เทคนิคการหลอมและดึงเส้นใยนำแสงดังแสดงในภาพที่ 2.3 และ 2.4 เหมาะสำหรับการผลิตเส้นใยนำแสงแบบสเต็ปอินเด็กซ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่มากกว่า 200 μm จะมีอัตราการดทอน 3.4 dB/km และสำหรับเส้นใยนำแสงแบบแกลดเด็ตอินเด็กซ์จะมีอัตราการดทอน 1.1 dB/km แต่ข้อดีของเทคนิคการหลอมและดึงเส้นใยนำแสงแบบนี้คือสามารถผลิตแบบต่อเนื่องได้ เทคนิคการหลอมและดึงเส้นใยนำแสงแบบ Double-Crucible ที่ความยาวคลื่น 850 nm จะมีอัตราการดทอนที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากการดูดกลืนคือประมาณ 5-10 dB/km การเปลี่ยนของค่าดัชนีการหักเหของแสงจะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์การได้สำหรับการผลิตเส้นใยนำแสงที่มีค่าการทดทอนต่ำและมีค่าการขยายออกของพัลส์แสงที่น้อย (dispersion) ปัจจุบันจะใช้เทคนิคการผลิตแบบเคลือบไอระเหยโลหะผสม VAD (vapor-phase deposition) การผลิตแท่งพรีฟอร์มโดยใช้เทคนิค VAD สามารถลดอัตราการดทอนอยู่ที่ระดับ 0.18 dB/km



ภาพที่ 2.4 กระบวนการผลิตแท่งพรีฟอร์มแบบ OVPO
ที่มา (Lizuka, 2002, p.780)



ภาพที่ 2.5 กระบวนการผลิตแบบ OVPO ขั้นตอนการขึ้นรูปและดึงเส้นเป็นเส้นใยนำแสง
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 178)

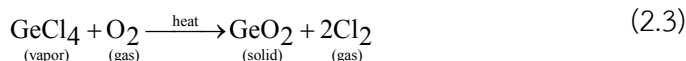
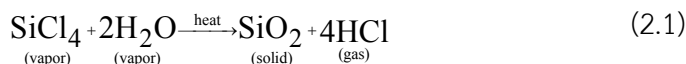
ที่มีความยาวคลื่น 1,550 nm และค่าการขยายออกของพัลส์แสงน้อยกว่า $3.5 \text{ ps nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$ ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 1,285 nm ถึง 1,330 nm กระบวนการผลิตเส้นใยนำแสงแบบเคลือบไอระเหยโลหะที่มีความสูญเสียต่ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 เทคนิคด้วยกันคือ เทคนิคแรกเป็นแบบ flame hydrolysis และเทคนิคที่สองเป็นแบบ CVD (chemical vapor deposition) และเทคนิคแบบ flame hydrolysis สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีการย่อย ๆ คือวิธีคือ

1. VAD (vapor axial deposition)
2. OVPO (outside vapor-phase oxidation process)

ส่วนเทคนิคเคลือบไอระเหยโลหะผสมแบบ CVD (chemical vapor deposition) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีการย่อย ๆ

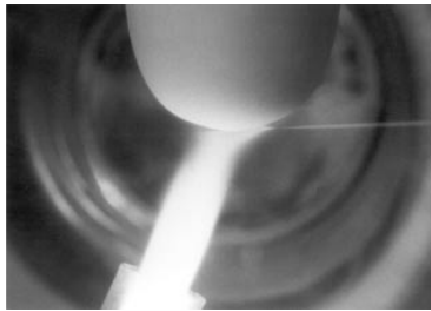
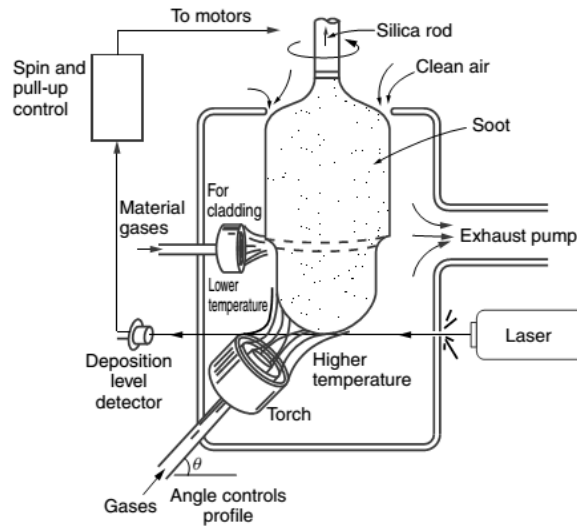
1. วิธีแรกคือ MCVD (modified chemical vapor deposition)
2. วิธีที่สองคือ PCVD (plasma-activated chemical vapor deposition)
3. วิธีที่สามคือ PMCVD (plasma modified activated chemical vapor deposition)

การผลิตแท่งพรีฟอร์มโดยใช้เทคนิคเคลือบไอระเหยโลหะผสมแต่ละแบบจะมีข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างๆ กันไป สำหรับเทคนิค OVPO (outside vapor-phase oxidation) แสดงดังภาพที่ 2.4 และ 2.5 และมีปฏิกิริยาทางเคมีในกระบวนการผลิตดังสมการ (2.1) ถึง (2.4)



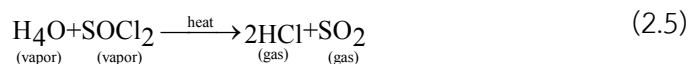
จากภาพที่ 2.4 แท่งพรีฟอร์มจะถูกสร้างขึ้นจากการพ่นแก๊สออกซิเจนบวกกับไอระเหยเมทัลฮาไลด์ ($\text{O}_2 + \text{metal halide vapors}$) ที่มีความร้อนสูงลงบนแกนคาร์บอน (carbon) หรือเซรามิก (ceramic) ในขณะที่แกน mandrel หมุนเข้ามาแก้วจะจับตัวเป็นผลึกแก้วบริสุทธิ์ ในขั้นแรกจะทำการสร้างชั้นแก้วคอร์ก่อนและถัดมาก็จะเป็นชั้นแคลดดิ้ง และเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการเคลือบแล้ว แกนกลางจะถูกดึงออกคล้ายรูปโดนัท และรูตรงกลางคล้ายรูปโดนัทนี้จะถูกยุบลง (collapsed hole) เมื่อแท่งพรีฟอร์มถูกหลอม และดึงเป็นเส้นใยนำแสงดังแสดงในภาพที่ 2.5

คุณภาพของแท่งพรีฟอร์มที่ได้จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของโลหะผสมแฮไลด์ (OH) โดยทั่วไปจะอยู่ที่ 50 และ 200 ต่อ 1 ล้านส่วน แท่งพรีฟอร์มที่ผลิตจากกรรมวิธีแบบ OVPO หนึ่งแท่งสามารถนำมาหลอมและดึงเป็นเส้นใยนำแสงได้ยาวประมาณ 250 km ที่มีอัตราการลดทอนน้อยกว่า 20 dB/Km สามารถผลิตได้ทั้งเส้นใยนำแสงทั้งแบบสเต็ปอินเด็กส์และเกรดเด็คอินเด็กส์ กระบวนการผลิตแท่งพรีฟอร์มแบบ OVPO ได้ถูกพัฒนาให้เส้นใยนำแสงมีค่าอัตราการลดทอนที่ต่ำ เหมาะสำหรับทำเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว (single mode fiber)

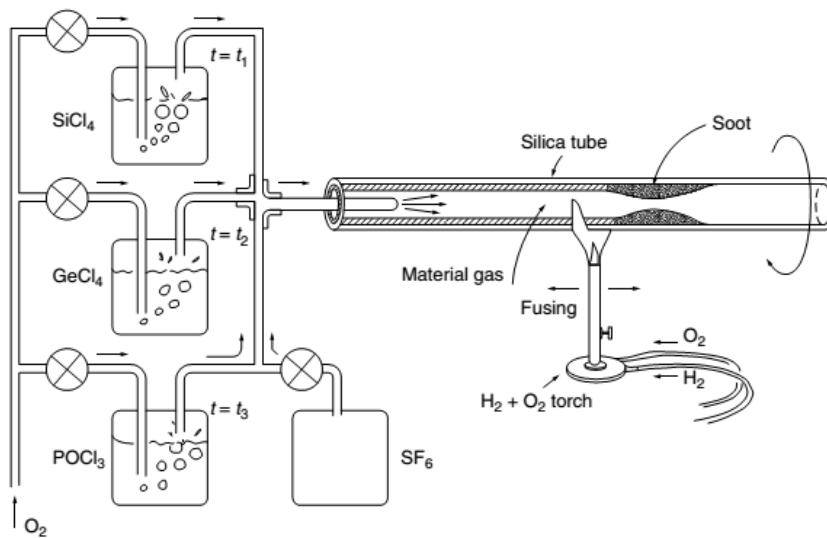


ภาพที่ 2.6 กระบวนการผลิตแท่งพรีฟอร์มแบบ VAD
ที่มา (Lizuka, 2002, p.781)

เรียกเทคนิคนี้ว่า vapor axial deposition (VAD) ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ปฏิกริยาทางเคมีสำหรับผลิตแท่งพรีฟอร์มแบบ VAD เป็นดังสมการ (2.5)



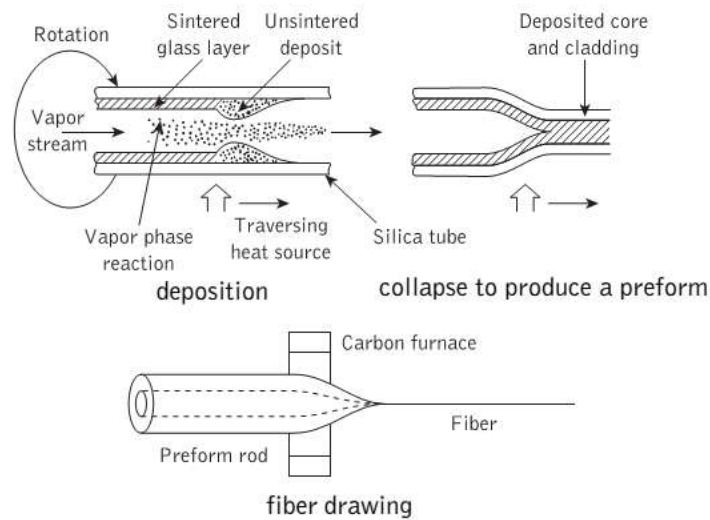
ข้อดีของการผลิตแท่งพรีฟอร์มแบบ VAD คือมีค่าการลดทอนต่ำ และสามารถผลิตแท่งพรีฟอร์มแบบต่อเนื่องได้ สามารถผลิตได้ทั้งเส้นใยนำแสงทั้งแบบสเต็ปอินเด็คซ์และแกลด์เด็คอินเด็คซ์ แท่งพรีฟอร์มไม่มีรูตรงกลาง โอกาสที่จะเกิดฟองอากาศขณะดึงเป็นเส้นใยนำแสงจึงน้อย สามารถป้องกันสิ่งปลอมปนได้ง่ายเพราะผลิตในห้องปฏิบัติการแสดงดังภาพที่ 2.6 ขณะที่ทำการเคลือบเขม่าโลหะ (material gases) แท่งซิลิกา (silica rod) จะหมุนอย่างช้า ๆ ซึ่งสารตั้งต้นอาจจะเป็น GeO_2 หรือ



ภาพที่ 2.7 กระบวนการผลิตแท่งพรีฟอร์มแบบ MCVD
ที่มา (Lizuka, 2002, p.778)

SiO₂ การเคลือบเขม่าโลหะจะเป็นชั้น ๆ (layer) ควบคุมความหนาแต่ละชั้นโดยการปรับมุมมองศาที่หัวจ่ายแก๊สอุณหภูมิสูง torch (higher temperature gases) ผงเขม่าโลหะตั้งต้น SiCl₄BBr₃+H₂ และ SiCl₄ GeCl₄ POCl₃ O₂ จะถูกพ่นเข้าไปในท้องปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 1500 °C ผงสารตั้งต้นจะเกาะตัวเป็นแท่งพรีฟอร์มรูพรุน (porous perform) และจะถูกหมุนและดึงขึ้นด้านบนแบบต่อเนื่องอย่างช้า ๆ และทำให้เป็นแท่งพรีฟอร์มบริสุทธิ์ในเตาหลอมคาร์บอน (carbon furnace) กลายเป็นแท่งพรีฟอร์มโปร่งแสง

กระบวนการผลิตแท่งพรีฟอร์มแบบ VAD สามารถผลิตเส้นใยนำแสงได้ต่อเนื่องถึง 2,000 km มี อัตราการลดทอนอยู่ที่ระดับ 0.35 dB/km ที่ความยาวคลื่น 1,300 nm และที่ความยาวคลื่น 1,550 nm จะมีอัตราการลดทอนอยู่ที่ 0.21 dB/km และปัจจุบันสามารถปรับปรุงให้มีอัตราการลดทอนอยู่ที่ระดับ 0.154 dB/km ที่ความยาวคลื่น 1,550 nm ถึง 1,560 nm ถัดมาเป็นเทคนิคการผลิตแท่งพรีฟอร์มแบบ MCVD (modified chemical vapor deposition) ดังแสดงในภาพที่ 2.7 เทคนิคการผลิตแท่งพรีฟอร์มแบบ MCVD ถูกพัฒนามาจากการผลิตฟิล์มบางของสาร SiO₂ ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เป็นเทคนิคที่มีอัตราการสะสมของผลึกแก้วที่ช้าเมื่อเทียบกับวิธีที่ผ่านมา ขั้นตอนการดึงเส้นใยนำแสงแบบ MCVD หลอดแก้ว SiO₂ จะถูกสร้างขึ้นมาก่อน จากนั้นหลอดแก้ว SiO₂ จะถูกหมุนในเตาหลอมที่อุณหภูมิ 1,200 ถึง 1,500 องศาเซลเซียส และเขม่าแก้วในรูปของไอระเหยโลหะผสมฮาโลด์ O₂+GeCl₄+SiCl₄ จะถูกพ่นเข้ามาในหลอดแก้วเพื่อให้เกิดกระบวนการ vapor phase reaction เพื่อเป็นการเคลือบสร้างชั้นแก้วคอร์

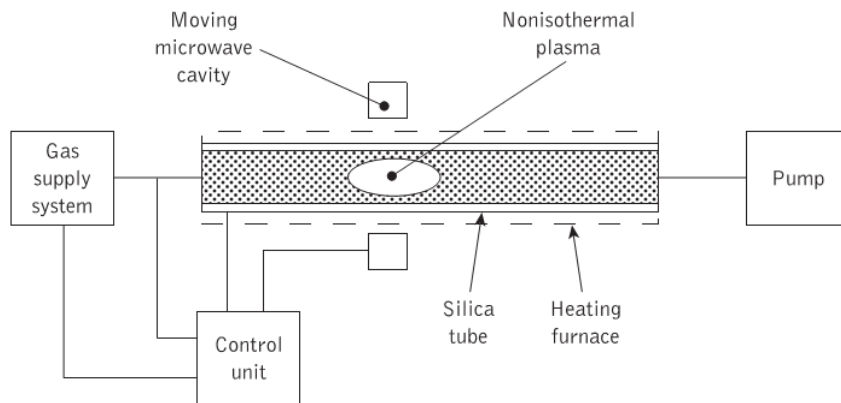


ภาพที่ 2.8 ขั้นตอนการดึงเส้นใยนำแสงแบบ MCVD

ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 181)

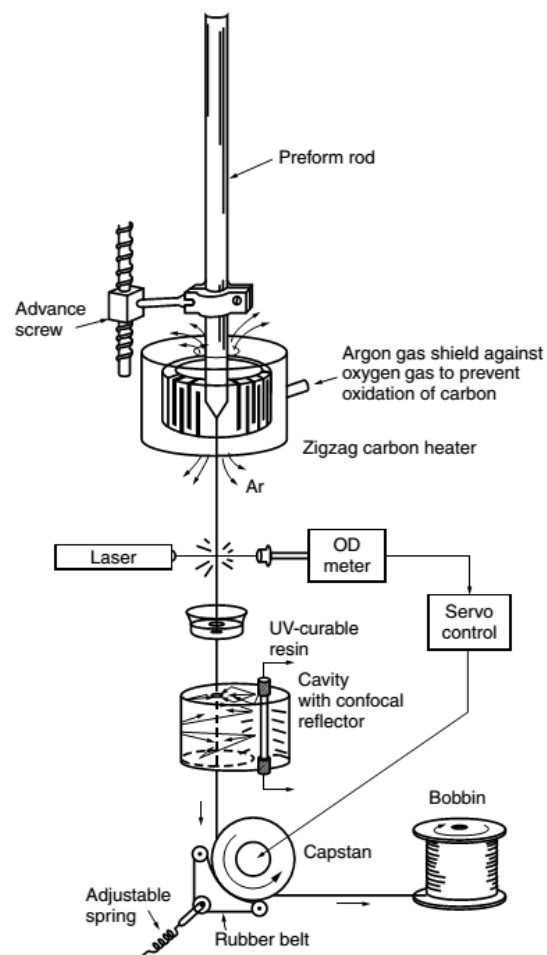
ลำดับถัดมาไฮดรอกไซด์ของโลหะผสม O_2+SiCl_4 จะถูกพ่นเข้ามาในหลอดแก้วเพื่อสร้างแคลด์ดิง ในกระบวนการนี้มีข้อได้เปรียบที่การสะสมเกิดขึ้นภายในห้องปฏิกิริยาที่ปิดสนิท ซึ่งช่วยให้สภาพแวดล้อมสะอาด ดังนั้นจึงอาจหลีกเลี่ยงสิ่งเจือปนของก๊าซและอนุภาคในระหว่างการสะสมของชั้นและขั้นตอนการยุบตัวของพรีฟอร์ม สุดท้ายจะถูกยุบให้เป็นแท่งพรีฟอร์มที่อุณหภูมิ 2,200 องศาเซลเซียส และดึงเป็นเส้นใยนำแสงดังแสดงในภาพที่ 2.8

เทคนิคแบบ MCVD เหมาะสมกับการผลิตเส้นใยนำแสงที่มีประสิทธิภาพสูง และต่อมากกระบวนการผลิตแท่งพรีฟอร์มแบบ MCVD ถูกปรับปรุงโดยใช้เทคนิค plasma-activated chemical vapor deposition (PCVD) ดังแสดงในภาพที่ 2.9 วิธีการแบบ PCVD จะคล้ายกับเทคนิคแบบ MCVD เพียงแต่พลังงานที่ใช้ในกระบวนการเคลือบสารประกอบฮาโลด์โลหะที่ผนังของหลอดแก้วซิลิกาจะมาจากพลาสมาที่ใช้งานในช่วงความถี่ 2.45 MHz จากภาพที่ 2.9 แท่งแก้วซิลิกาจะถูกวางอยู่กับที่ภายใน microwave cavity ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ เขม่าสารประกอบ $O_2+SiCl_4+dopants$ จะถูกพ่นเข้ามาในหลอดแก้วเรโซเนเตอร์ย่านความถี่ 2.45 MHz จะสร้างพลาสมาแบบ non-isothermal plasma ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 500 องศาเซลเซียสกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้เกิดการเคลือบผนังแก้วด้านในช่องพลาสมา (plasma zone) จะถูกเคลื่อนที่ไปตามตลอดความยาวของแท่งแก้ว เพื่อความสม่ำเสมอของการสะสมตัวของ $O_2+SiCl_4+dopants$ ที่ถูกพ่นเข้ามาในหลอดแก้วเพื่อสร้างชั้นคอร์



ภาพที่ 2.9 กระบวนการ PCVD

ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 182)



ภาพที่ 2.10 การดึงเป็นเส้นใยนำแสงจากแท่งพรีฟอร์ม

ที่มา (Lizuka, 2002, p.782)

สุดท้ายหลอดแก้วจะถูกให้ความร้อนที่ 1,000 C° เพื่อลดความเค้นภายในแท่งพรีฟอร์มวิธีการแบบ PCVD จะมีอัตราการลดทอนของเส้นใยนำแสงอยู่ที่ระดับ 3-4 dB/km ที่ความยาวคลื่น 850 nm และมีค่าการขยายออกของพัลส์แสงค่อนข้างต่ำคือ 0.8 ns/km แต่ละแท่งพรีฟอร์มสามารถผลิตเส้นใยนำแสงได้ประมาณ 200 km

จากแท่งแก้วที่มีค่าครรชนีการหักเหตามที่ต้องการ ขั้นตอนต่อไปแท่งพรีฟอร์มจะถูกนำไปหลอมอีกครั้งเพื่อตั้งเป็นเส้นใยนำแสงขนาดต่าง ๆ เพื่อให้ง่ายขึ้นจะนิยมตั้งเส้นใยนำแสงในแนวตั้งจากบนลงล่าง ดังแสดงในภาพที่ 2.10 แท่งพรีฟอร์มจะถูกวางแนวตั้งในเตาหลอม (muffle furnace) เมื่อแท่งพรีฟอร์มเริ่มหลอมละลายกระบวนการตั้งเป็นเส้นใยนำแสงก็จะเริ่มขึ้น ความเร็วของการตั้งกับขนาดของเส้นใยนำแสงจะต้องถูกควบคุมเพื่อให้ขนาดเท่ากันตลอดความยาวสาย

2.2 วัสดุที่ใช้ทำเส้นใยนำแสง

วัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตเส้นใยนำแสงมีหลายชนิดด้วยกัน ส่วนมากจะเป็นโลหะผสม คุณสมบัติของวัสดุที่เหมาะสม จะต้องมีความยืดหยุ่น แสงผ่านได้ดี น้ำหนักเบา ทนทานการกัดกร่อน วัสดุที่นิยมนำมาผลิตเป็นเส้นใยนำแสงสรุปดังในตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิตเส้นใยนำแสงแบบเกรดเต็ดอินเด็กซ์

วัสดุที่ใช้ผลิตคอร์	วัสดุที่ใช้ผลิตแคลดดิ้ง
$\text{Na}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$
$\text{Na}_2\text{-LiO-CaO-SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O-Li}_2\text{O-CaO-SiO}_2$
$\text{Na}_2\text{-CaO-GeO}_2$	$\text{Na}_2\text{O-CaO-SiO}_2$
$\text{Ti}_2\text{O-Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2\text{-BaO-CaO-SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$
$\text{Na}_2\text{O-BaO-GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$
$\text{P}_2\text{O}_5\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 175)

วัสดุที่ใช้ทำเส้นใยนำแสงออกได้เป็น 5 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

1. เส้นใยนำแสงประเภท Glass fibers เป็นเส้นใยนำแสงที่ทำมาจากซิลิกา (SiO_2) ส่วนใหญ่ใช้ทราายเป็นวัสดุตั้งต้น ทนการแตกร้าวได้ดี ความร้อนสะสมในสายน้อย ทนการกัดกร่อนทางเคมี วิธีการเปลี่ยนค่าครรชนีการหักเหของแสงสามารถทำได้โดยการเติมสารเจือปน ดังนี้

ตารางที่ 2.2 วัสดุที่ใช้ในการผลิตเส้นใยนำแสงแบบสเต็ปอินเด็กส์

วัสดุที่ใช้ผลิตคอร์	วัสดุที่ใช้ผลิตแคลดดิง
Base glass	Diffusion mechanism
$R_2O-GeO_2-CaO-SiO_2$	$Na^+ \rightleftharpoons K^+$
$R_2O-B_2O_3-SiO_2$	$Tl^+ \rightleftharpoons Na^+$
$Na_2O-B_2O_3-SiO_2$	Na_2O diffusion
$Na_2O-B_2O_3-SiO_2$	CaO, Ba_2O diffusion

ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 175)

1.1	GeO_2+SiO_2	สำหรับคอร์	SiO_2	สำหรับแคลดดิง
1.2	$P_2O_5+SiO_2$	สำหรับคอร์	SiO_2	สำหรับแคลดดิง
1.3	SiO_2	สำหรับคอร์	$B_2O_3-SiO_2$	สำหรับแคลดดิง
1.4	$GeO_2-B_2O_3-SiO_2$	สำหรับคอร์	$B_2O_3-SiO_2$	สำหรับแคลดดิง

2. เส้นใยนำแสงประเภท Halide fiber เป็นเส้นใยนำแสงที่ทำมาจากฟลูออไรด์ ข้อดีของเส้นใยนำแสงที่ทำมาจากฟลูออไรด์คือมีค่าการลดทอนที่ต่ำ อยู่ที่ประมาณ 0.01-0.001 dB/km ที่ความยาวคลื่น 200-800 nm ในการผลิตคอร์จะใช้ ZrF_4 เป็นสารหลักและมี BaF_2 , LaF , AlF_3 และ NaF เป็นสารประกอบ และในการผลิตแคลดดิงจะใช้ HaF_4 เป็นสารหลักและมี BaF_2 , LaF_3 , AlF_3 และ NaF เป็นสารประกอบ แต่ข้อเสียของเส้นใยนำแสงที่ผลิตจากสารฟลูออไรด์คือไม่สามารถผลิตให้มีความยาวต่อเนื่องมากได้

3. เส้นใยนำแสงประเภท Active glass fibers เป็นเส้นใยนำแสงที่ใช้สารตั้งต้นทั่วไป เช่นซิลิกา ผสมกับธาตุหายากที่เลขอะตอม 57-71 เมื่อผสมแล้วจะเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติทางแสงเปลี่ยนไปคือสามารถที่จะดูดกลืนและสะสมพลังงานแสงในเส้นใยนำแสงได้ ถ้าอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานที่สูงขึ้น (higher energy levels) และในทางกลับกันสามารถที่จะปล่อยพลังงานแสงได้ ถ้าอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานที่ต่ำลง (lower energy levels) มักนิยมนำเส้นใยนำแสงแบบ Active glass fibers ใช้ขยายพัลส์แสงในระบบ (erbium-doped fibers)

4. เส้นใยนำแสงประเภท chalcogenide glass fiber เป็นเส้นใยนำแสงที่ถูกผลิตมาให้ทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear properties of glass fiber) สารที่ใช้ทำคือ As_2S_3 เส้นใยนำแสงประเภทนี้นิยมนำมาใช้เป็นสวิตช์ทางแสง (optical switch) และอุปกรณ์ขยายทางแสง (optical amplifier)

5. เส้นใยนำแสงประเภท POF (plastic optical fibers) เป็นเส้นใยนำแสงที่ผลิตจากพลาสติกทั้งหมดทั้งในส่วนที่คอร์และแคลดดิง ซึ่งเส้นใยนำแสงแบบพลาสติกจะมีความการลดทอนที่สูง และสามารถผลิตได้เฉพาะเส้นใยนำแสงแบบเกรดดีดอินเด็กซ์ มีค่าแบนด์วิดท์ที่สูง เหมาะสำหรับใช้งานที่ระยะทางสั้น ๆ ไม่เกิน 100 เมตร และถ้าแบ่งวัสดุที่ใช้ผลิตตามชนิดของสายสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ 1.) เส้นใยนำแสงแบบเกรดดีดอินเด็กซ์ และ 2.) เส้นใยนำแสงแบบสเต็ปอินเด็กซ์ สรุปได้ดังตารางที่ 2.1 และ 2.2 ส่วนเส้นใยนำแสงแบบพลาสติกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ เช่นกันคือ

1. เส้นใยนำแสงแบบพลาสติกแบบ PMMA POF ขนาดของคอร์ 0.4 mm ขนาดของแคลดดิง 1.0 mm ช่องรับแสงเชิงตัวเลข (numerical aperture) เท่ากับ 0.25 และมีอัตราการลดทอน 150 dB/km ที่ความยาวคลื่น 650 nm ค่าแบนด์วิดท์ 2.5 Gb/s มากกว่า 100 เมตร

2. เส้นใยนำแสงแบบพลาสติกแบบ PFP POF ขนาดของคอร์ 0.125-0.30 mm ขนาดของแคลดดิง 0.25-0.60 mm ช่องรับแสงเชิงตัวเลขเท่ากับ 0.20 และมีอัตราการลดทอน 60-80 dB/km ที่ความยาวคลื่น 650-1300 nm ค่าแบนด์วิดท์ 2.5 Gb/s มากกว่า 300 เมตร ในการเลือกวัสดุตั้งต้นที่โปร่งแสงปัจจุบันมี 2 ชนิดหลัก ๆ คือแก้วกับซิลิกา

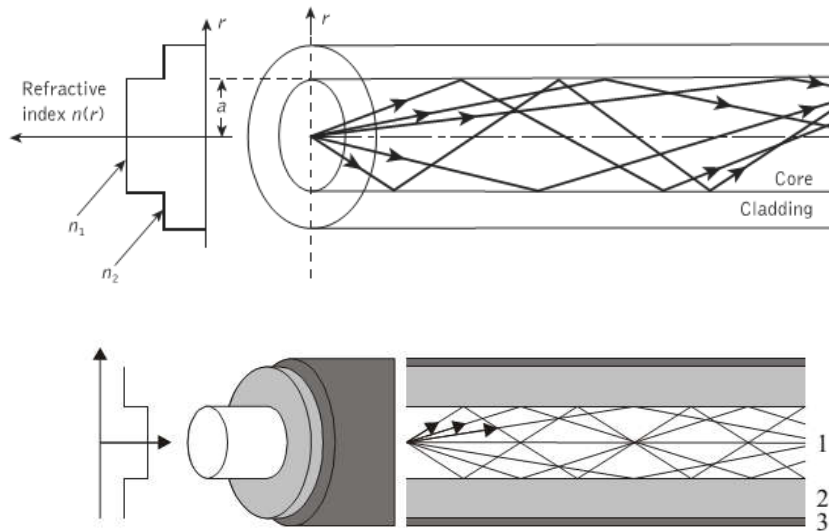
2.3 โครงสร้างและชนิดของเส้นใยนำแสง

เส้นใยนำแสงจะมีโครงสร้างที่ทำจากวัสดุโปร่งแสง มีลักษณะเป็นท่อกลมตันขนาดเล็ก 2 ชั้น แก้วชั้นในสุดจะเรียกว่าชั้นคอร์ (core) และแก้วชั้นนอกที่ห่อหุ้มคอร์อีกชั้นหนึ่งเรียกว่าแคลดดิง (cladding) ค่าดัชนีการหักเหของคอร์จะมากกว่าดัชนีการหักเหของแคลดดิงเล็กน้อย เป็นการกำหนดคุณสมบัติของเส้นใยนำแสงเพื่อให้พัลส์แสงเกิดการสะท้อนและเคลื่อนที่อยู่ภายในแก้วชั้นคอร์เท่านั้น การจำแนกชนิดของเส้นใยนำแสงที่ใช้งานในปัจจุบันจะแบ่งโดยใช้โหมดการเดินทางของคลื่นแสงที่เดินทางผ่านเส้นใยนำแสง สามารถแบ่งได้ดังนี้

1. เส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว (single mode fiber)
 2. เส้นใยนำแสงแบบโหมดร่วมหรือแบบโหมดร่วม (multi-mode fiber) และเส้นใยนำแสงนำแสงแบบโหมดร่วมสามารถที่จะจำแนกได้อีก 2 แบบย่อย ๆ คือ

2.1 เส้นใยนำแสงแบบโหมดร่วมแบบเกรดดีดอินเด็กซ์ (multi-mode graded index fiber)

2.2 เส้นใยนำแสงแบบโหมดร่วมแบบสเต็ปอินเด็กซ์ (multi-mode step index fiber)
 เส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว (SM-fiber) จะมีแบบเดียวคือแบบสเต็ปอินเด็กซ์ ชั้นคอร์จะถูกออกแบบมาให้มีขนาดเล็กมากและจำนวนโหมดของคลื่นแสงที่สามารถแพร่กระจายผ่านได้เพียงแค่มอเดเดียว



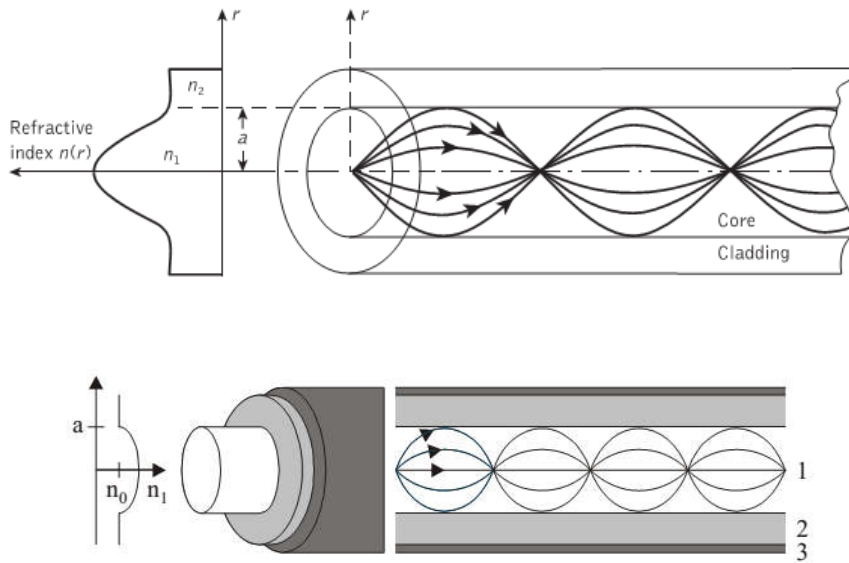
ภาพที่ 2.11 โครงสร้างเส้นใยนำแสงโหมตร่วมแบบสเต็ปอินเด็กซ์
ทีมา (Senior & Jamro, 2009, p. 44)

การลดทอนมีค่าน้อยเหมาะสำหรับระบบสื่อสารที่ระยะทางไกล ๆ ส่วนเส้นใยนำแสงแบบโหมตร่วม (MM-fiber) จำนวนโหมดของคลื่นแสงที่สามารถแพร่กระจายผ่านเส้นใยนำแสงได้มากกว่าหนึ่งโหมด ถ้ากำหนดให้ n_1 คือค่าดัชนีการหักเหของคอร์ n_2 คือค่าดัชนีการหักเหของแคลดดิ้งและ a คือค่ารัศมีของคอร์ โครงสร้างของเส้นใยนำแสงแบบโหมตร่วมแบบสเต็ปอินเด็กซ์แสดงดังภาพที่ 2.11 ค่าความแตกต่างดัชนีการหักเหระหว่างคอร์กับแคลดดิ้ง (core-cladding index difference: Δ) จะเป็นแบบขั้นบันได (step) ค่าดัชนีการหักเหตามระยะทางรัศมี r ของเส้นใยนำแสงจะเป็นดังสมการ

$$n(r) = \begin{cases} n_1 & r < a \quad (\text{core}) \\ n_2 & r \geq a \quad (\text{cladding}) \end{cases} \quad (2.6)$$

ฉะนั้นมุมตกกระทบของคลื่นแสงบริเวณรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลดดิ้ง จะเป็นแบบทันทีทันใด โดยทั่วไปขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์ประมาณ 50-200 μm และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแคลดดิ้งประมาณ 125-400 μm ลำคลื่นแสงสามารถเดินทางผ่านสายได้มากกว่าหนึ่งโหมด เหมาะสำหรับการสื่อสารทั้งในระยะใกล้และปานกลาง จำนวนโหมด (M_s) ที่สามารถเดินทางผ่านเส้นใยนำแสงโหมตร่วมแบบสเต็ปอินเด็กซ์จะเป็นดังสมการ

$$M_s \approx \frac{V^2}{2} \quad (2.7)$$



ภาพที่ 2.12 โครงสร้างเส้นใยนำแสงโหมตรงร่วมแบบเกรดเด็ดอินเด็กซ์
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 47)

โดยที่ V คือค่าวีโนมเบอร์ จำนวนโหมดที่สามารถเดินทางผ่านเส้นใยนำแสงจะขึ้นอยู่กับขนาดของคอร์เป็นหลัก เพราะคลื่นแสงแต่ละโหมดจะเดินทางอยู่ภายในคอร์เท่านั้นไม่เกี่ยวกับแคลดดิ้ง โครงสร้างของเส้นใยนำแสงแบบโหมตรงร่วมแบบสเต็ปอินเด็กซ์แสดงดังภาพที่ 2.12 ค่าความแตกต่างดรรชนีการหักเหภายในแก้วชั้นคอร์ (core-cladding index difference: Δ) จะเป็นแบบความชัน

ถ้ากำหนดให้ตัวแปรอัลฟา (α) คือค่าโพไรต์ดรรชนีการหักเหภายในคอร์ กรณีที่ $\alpha = 1$ ค่าความชันจะเป็นแบบสามเหลี่ยม และ $\alpha = 2$ ค่าความชันจะเป็นแบบพาราโบลา และถ้า $\alpha = \infty$ ค่าความชันจะเป็นแบบขั้นบันได ค่าดรรชนีการหักเหตามระยะทางรัศมี r ของเส้นใยนำแสงแบบเกรดเดดอินเด็กซ์จะเป็นดังสมการ

$$n(r) = \begin{cases} n_1(1 - 2\Delta(r/a)^\alpha)^{\frac{1}{2}} & r < a \quad (\text{core}) \\ n_2(1 - 2\Delta)^{\frac{1}{2}} = n_2 & r \geq a \quad (\text{cladding}) \end{cases} \quad (2.8)$$

เส้นใยนำแสงโหมตรงร่วมแบบเกรดเด็ดอินเด็กซ์ จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์ประมาณ 50-100 ไมโครเมตรและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแคลดดิ้งประมาณ 125-140 ไมโครเมตร เหมาะสำหรับการสื่อสารระยะใกล้จนถึงระยะไกล คลื่นแสงที่เดินทางบริเวณใจกลางของคอร์ที่มีค่าดรรชนีการหักเหมากสุด จะเดินทางได้ช้ากว่าคลื่นแสงที่เดินทางบริเวณนอกสุดของคอร์ที่มีค่าดรรชนีการหักเหน้อยสุด ส่งผล

ให้คลื่นแสงเดินทางถึงจุดปลายสายไม่เท่ากัน ทำให้เกิดปรากฏการณ์ inter-modal dispersion ที่ส่งผลให้พัลส์แสงผิดเพี้ยนไป เส้นใยนำแสงโหมดรวมแบบเกรดเด็ต์ดอินเด็กส์จึงถูกออกแบบมาให้มีค่าดรรชนีการหักเหเป็นแบบความชัน เพื่อให้คลื่นแสงที่เดินทางบริเวณแกนกลางของคอร์และบริเวณรอบนอกเดินทางถึงปลายสายพร้อมกัน เพื่อลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณเนื่องจาก inter-modal dispersion

การอธิบายปรากฏการณ์คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางภายในคอร์แบบเกรดเด็ต์ดอินเด็กส์สามารถประมาณค่าได้โดยใช้เรขาคณิต (geometric optics) หลังจากที่เวนต์เซล คราเมอส์ และบริลลูอิน (Wentzel, Kramers, Brillouin: WKB) ใช้วิธีการศาสตร์ควอนตัมอธิบายการแพร่กระจายคลื่นผ่านท่อนำคลื่นทรงกลมใช้เทคนิค WKB เป็นดังสมการ (2.9)

$$E_x = \frac{1}{2} \{G_1(r) \exp[jS(r)] + G_2(r) \exp[-jS(r)]\} \left(\frac{\cos l\phi}{\sin l\phi} \right) \exp(j\beta z) \quad (2.9)$$

โดยที่ G และ S เป็นฟังก์ชันค่าจริงตามรัศมีคอร์ r เมื่อแทนสมการ (2.9) ลงในสมการคลื่น (2.10)

$$\frac{d^2\psi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2\psi}{d\phi^2} + (n_1^2 k^2 - \beta^2)\psi = 0 \quad (2.10)$$

ค่าของ ψ คือฟังก์ชันของสนามไฟฟ้า (E) และค่าดรรชนีการหักเหของแสง n_1 จะถูกแทนที่ด้วย n_r เพราะในคอร์ค่าดรรชนีการหักเหของแสงจะไม่เท่ากันดังภาพที่ 2.19 คลื่นแสงส่วนใหญ่จะแพร่กระจายอยู่ภายในคอร์ ที่บริเวณรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลดดิ้งจะมีคลื่นแสงแพร่กระจายอยู่น้อยมาก การประมาณค่าคำตอบของสมการ (2.10) ในพจน์อนุพันธ์อันดับสองสามารถละทิ้งได้

กำหนดให้พจน์ $G_i(r)$ คือฟังก์ชันเชิงแอมพลิจูดตามแนวรัศมีคอร์ r ส่วนพจน์ $S(r)$ คือฟังก์ชันเชิงเฟสตามแนวรัศมีคอร์ r จุดการสะท้อนกลับ (turning point) จะเกิดขึ้นตรงบริเวณรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลดดิ้ง สามารถกำหนดค่ารัศมี $r = r_1$ และ $r = r_2$ การประมาณค่าคำตอบสมการ (2.10) โดยใช้วิธี WKB ตรงจุดรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลดดิ้ง จะเป็นดังสมการ

$$G_1(r) = G_2(r) = D / [(n^2(r)k^2 - \beta^2)r^2 - l^2]^{\frac{1}{4}} \quad (2.11)$$

โดยที่ D คือค่าสัมประสิทธิ์เชิงแอมพลิจูด

$$S(r) = \int_{r_1}^{r_2} [(n^2(r)k^2 - \beta^2)r^2 - l^2]^{\frac{1}{2}} \frac{dr}{r} - \frac{\pi}{4} \quad (2.12)$$

ขอบเขตการคลื่นที่ของคลื่นแสงจะถือว่าคลื่นแสงส่วนใหญ่จะแพร่กระจายอยู่ภายในคอร์ $G_1(r)$ ส่วนคลื่นแสงในแคลดดิ้ง $G_2(r)$ ในกรณีที่ค่ารัศมี $r > r_2$ และ $r_1 < r < r_2$ จะมีน้อยมาก ดังสมการ

$$G_1(r) = D \exp(jmx) / [l^2 - (n^2(r)k^2 - \beta^2)r^2]^{\frac{1}{4}} \quad (2.13)$$

$$G_2(r) = 0 \quad (2.14)$$

ตัวแปร m คือค่าจำนวนโหมดของคลื่นแสงที่สามารถผ่านแก้วชั้นคอร์ได้ สมการ (2.13) และ (2.14) พิจารณากรณีที่ $0 < r < r_1$ ไม่รวมกรณีใจกลางของคอร์ $r = 0$ และค่าเฟสตามแนวรัศมีจะเป็นดังสมการ

$$S(r) = j \int_r^{r_2} [l^2 - (n^2(r)k^2 - \beta^2)r^2]^{\frac{1}{2}} \frac{dr}{r} \quad (2.15)$$

ในกรณีที่ $r > r_2$ กำลังงานคลื่นแสงจะจางหายอย่างรวดเร็วดังสมการ

$$G_1(r) = D \exp(jmx) / [l^2 - (n^2(r)k^2 - \beta^2)r^2]^{\frac{1}{4}} \quad (2.16)$$

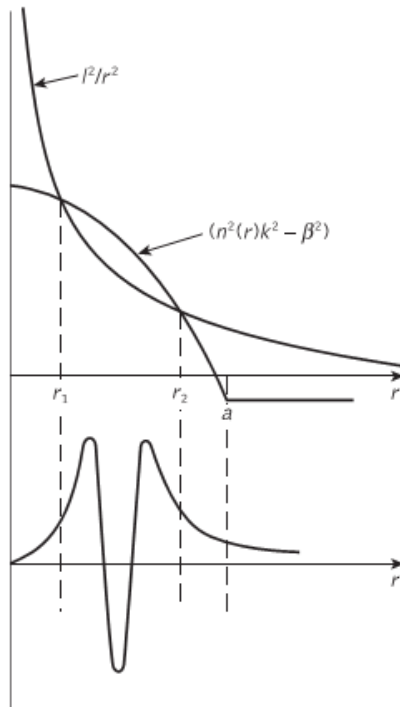
$$G_2(r) = 0 \quad (2.17)$$

$$S(r) = j \int_{r_2}^r [l^2 - (n^2(r)k^2 - \beta^2)r^2]^{\frac{1}{2}} \frac{dr}{r} \quad (2.18)$$

วิธีหาค่าตอบโดยใช้เทคนิค WKB ไม่ได้กำหนดค่าเริ่มต้นในสมการคลื่นแสงตรงจุดรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลดดิ้ง แต่เทคนิค WKB เหมาะสมที่ใช้กรณีพิเศษในการประมาณหาค่าไอเกน (eigenvalue) ของค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น (β) ดังสมการ

$$\int_{r_1}^{r_2} [(n^2(r)k^2 - \beta^2)r^2 - l^2]^{\frac{1}{2}} \frac{dr}{r} = (2m - 1) \frac{\pi}{2} \quad (2.19)$$

โดยที่ m คือจำนวนโหมดของคลื่นตามแนวรัศมี การแก้สมการ (2.19) สามารถแก้ได้โดยใช้หลักการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical method)



ภาพที่ 2.13 กราฟแสดงฟังก์ชันระหว่างพจน์ $[n^2(r)k^2 - \beta^2]$ กับ (I^2/r^2) ณ จุดสะท้อนกลับที่ r_1 และ r_2 (Senior & Jamro, 2009, p. 47)

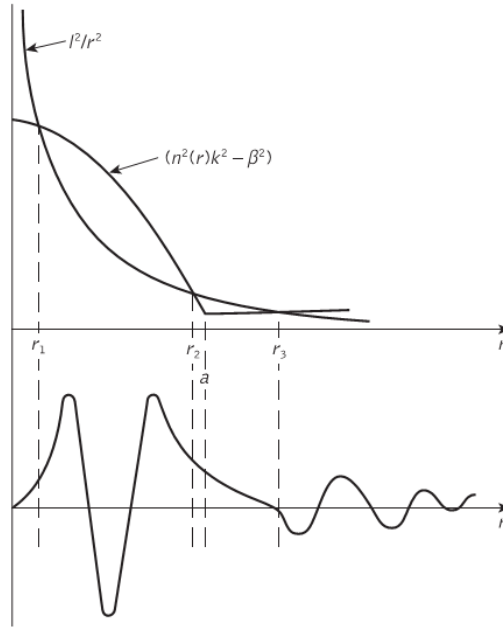
ค่าสัมประสิทธิ์เชิงแอมพลิจูด (D) ณ จุดสะท้อนกลับของคลื่นตรงบริเวณรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลดดิ้งในทอมค่ากำลังงานจะเป็นดังสมการ

$$D = \frac{4(\mu_0 / \epsilon_0)^{\frac{1}{2}} P_G^{\frac{1}{2}}}{n_1 \pi a^2 I} \tag{2.20}$$

โดยที่

$$I = \int_{r_1/a}^{r_2/a} \frac{xdx}{[(n^2(ax)k^2 - \beta^2)a^2 x^2 - I^2]^{\frac{1}{2}}} \tag{2.21}$$

กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชัน $[n^2(r)k^2 - \beta^2]$ และ (I^2/r^2) ณ จุดสะท้อนกลับของคลื่นตรงรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลดดิ้งที่ใช้วิธี WKB แสดงดังในภาพที่ 2.13 จากภาพจะแบ่งการพิจารณาตรงจุดที่เกิดการตัดกันของกราฟคือ $r = r_1$ และ $r = r_2$ การพิจารณากราฟแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ



ภาพที่ 2.14 กราฟแสดงจุดสะท้อนกลับที่รัศมี $r = a$ และโหมดรั่วไหลที่รัศมี $r > r_3$ ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 47)

1. กรณีแรกค่าของพจน์ $[n^2(r)k^2 - \beta^2] > (I^2/r^2)$ การลดลงค่ากำลังงานคลื่นแสงเป็นแบบการแกว่งตามธรรมชาติ

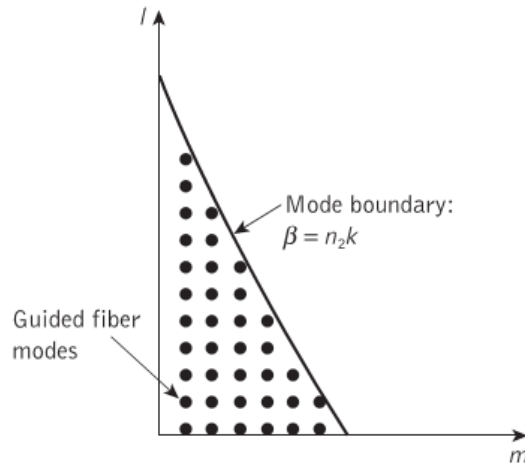
2. กรณีที่สองค่าของพจน์ $[n^2(r)k^2 - \beta^2] < (I^2/r^2)$ การลดลงค่ากำลังงานคลื่นแสงเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

โหมดคัตออฟจะเกิดขึ้นในกรณีที่ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น (β) มากกว่า n_2k จำนวนโหมดที่สามารถแพร่กระจายจากแกว่งชั้นคอร์เข้าไปสู่แคลดดิ้งได้ จะถือว่าเป็นโหมดรั่วไหล (leakage modes) แสดงดังในภาพที่ 2.14 จากรูปโหมดรั่วไหลคือระยะ $r > r_3$ กรณีที่ค่าดัชนีการหักเหภายในคอร์แบบเกรดเด็อินเด็กส์เป็นแบบพาราโบลา ($\alpha = 2$) วิธีการของ WKB สามารถนำมาประยุกต์ใช้หาค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นดังสมการ

$$n^2(r) = n_1^2 \left[1 - 2 \left(\frac{r}{a} \right)^2 \Delta \right] \text{ for } r < a \tag{2.22}$$

แทนสมการ (2.22) ลงในสมการ (2.19) จะได้

$$\int_{r_1}^{r_2} [n_1^2 k^2 - \beta^2 - 2n_1^2 k^2 (r/a)^2 \Delta - (I^2/r^2)]^{1/2} dr = (m + \frac{1}{2})\pi \tag{2.23}$$



ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง I กับจำนวนโหมด m

ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 47)

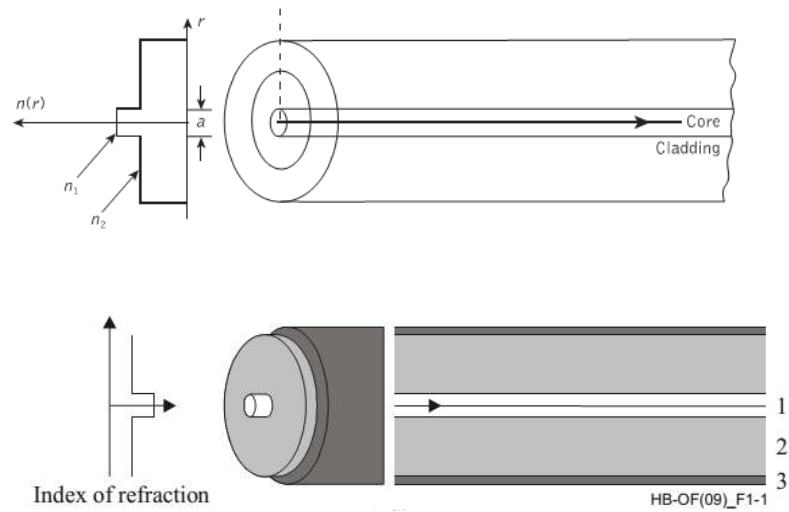
การหาปริพันธ์ในสมการ (2.23) จะต้องใช้วิธีเปิดตาราง และเปลี่ยนตัวแปร $u = r^2$ และกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (ค่าลิมิต) สำหรับพจน์รากที่สองเข้าสู่ศูนย์เมื่อ ณ จุดที่คลื่นแสงสะท้อนกลับที่รัศมี $r = r_1$ และ $r = r_2$ ค่าตอบการหาปริพันธ์จะเป็นดังสมการ

$$\left[\frac{a(n_1 k^2 - \beta^2)}{4n_1 k \sqrt{(2\Delta)}} - \frac{I}{2} \right] \pi = (m + \frac{1}{2})\pi \quad (2.24)$$

ย้ายข้างสมการ (2.24) เพื่อหาค่า β^2 จะได้

$$\beta^2 = n_1^2 k^2 \left[\frac{1 - 2\sqrt{2\Delta}}{n_1 k a} (2m + I + 1) \right] \quad (2.25)$$

จากสมการ (2.25) จำนวนโหมดที่สามารถผ่านเส้นใยนำแสงแบบเกรดเด็ดอินเด็กซ์ กำหนดโดยเงื่อนไข $\beta = n_2 k$ เมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีคอร์ (I) กับจำนวนโหมดที่สามารถผ่านได้ (m) แสดงดังในภาพที่ 2.15 โหมดของคลื่นแสงที่มีองค์ประกอบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นอิสระจากกันแสดงในพจน์ $\cos I\phi$ และ $\sin I\phi$ กรณีนี้จะทำให้เกิดคลื่นความถี่ใหม่อันดับที่ 4 จำนวนโหมดที่เป็นฟังก์ชันของ I จะเป็นดังสมการ



ภาพที่ 2.16 เส้นใยนำแสงแบบโหมดเดียว (single-mode fibers)
 ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 44)

$$M = 4 \int_0^{I_{\max}} f(I) dI \tag{2.26}$$

กรณีที่ความชัน α ที่ค่าต่าง ๆ จำนวนโหมดที่สามารถผ่านเส้นใยนำแสงแบบเกรดเด็คตินเด็คท์ คำนวณได้จากสมการ

$$M_g = \left(\frac{\alpha}{\alpha + 2} \right) (n_1 k a)^2 \Delta \tag{2.27}$$

จากสมการพื้นฐานค่าตัวเลขวี (V-number)

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 (2\Delta)^{\frac{1}{2}} \tag{2.28}$$

กรณีที่ค่า $\Delta \ll 1$ สมการ (2.29) สามารถประมาณค่าได้เป็น

$$V = n_1 k a (2\Delta)^{\frac{1}{2}} \tag{2.29}$$

แทนสมการ (2.30) ลงในสมการ (2.29) จะได้

$$M_g = \left(\frac{\alpha}{\alpha + 2} \right) \left(\frac{V^2}{2} \right) \quad (2.30)$$

ในกรณีที่ความชันเป็นแบบพาราโบลา $\alpha = 2$ จากสมการ (2.30) จำนวนโหมดที่สามารถผ่านเส้นใยนำแสงแบบเกรดเด็คติอินเด็กซ์คือ $M_g \approx V^2 / 4$ เพื่อเป็นการลดปัญหาจากปรากฏการณ์ inter-modal dispersion ที่ส่งผลให้พัลส์แสงผิดเพี้ยนไป จึงได้มีการพัฒนาเส้นใยนำแสงที่มีเพียงโหมดเดียวที่สามารถผ่านเส้นใยนำแสงได้เรียกว่าเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดียว (single-mode fibers) โดยทั่วไปเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดียวจะมีค่าตัวเลขวีจะอยู่ในช่วง

$$0 \leq V \leq 2.405 \quad (2.31)$$

ซึ่งค่าความถี่แสงหรือความยาวคลื่นคัตออฟ จะเกิดขึ้นกรณีที่ $V = 2.405$ โหมดแสงพื้นฐาน LP_{01} เท่านั้นที่สามารถผ่านเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดียวได้ โครงสร้างเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดียวแสดงดังในภาพที่ 2.16 จากภาพจะเห็นว่าคุณลักษณะที่สำคัญของเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดียวจะมีค่ารัศมีคอร์ที่ขนาดเล็กมาก จึงเป็นการยากที่จะส่งลำคลื่นแสงเข้าไปสู่ภายในคอร์

ในทางปฏิบัติเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดียวถูกออกแบบให้ทำงานที่ความยาวคลื่น 1,300 nm ค่าความแตกต่างดรรชนีการหักเหระหว่างคอร์กับแคลดดิ้งที่ 3 เปอร์เซ็นต์ ($\Delta = 3\%$) และเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 8.5 μm กรณีเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดียวแบบเกรดเด็คติอินเด็กซ์ เงื่อนไขการออกแบบจะเป็นดังสมการ (2.32)

$$V_C = 2.405(1 + 2 / \alpha)^{\frac{1}{2}} \quad (2.32)$$

จากสมการ (2.32) ถ้าค่าความชันดรรชนีการหักเหภายในคอร์เป็นแบบพาราโบลา ($\alpha = 2$) ขนาดรัศมีคอร์ที่ยังคงทำให้เส้นใยนำแสงเป็นแบบโหมดเดียวได้ จะมีค่ารัศมีไม่เกิน 3.3 μm หรือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 6.6 μm ตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดคุณลักษณะแบบโหมดเดียวคือค่าตัวเลขวีซึ่งค่าตัวเลขวี 2.405 คือค่าขอบเขตในการกำหนดคุณลักษณะแบบโหมดเดียวหรือโหมดร่วม จากสมการค่าตัวเลขวี

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 (2\Delta)^{\frac{1}{2}} \quad (2.33)$$

เงื่อนไขในการหาค่าความยาวคลื่นคutoff (cutoff wavelength) ที่สัมพันธ์กับค่าตัวเลขวีสำหรับเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว โดยทั่วไปเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยวจะมีค่าตัวเลขวีจะอยู่ในช่วง $0 \leq V \leq 2.405$ ซึ่งค่าความถี่แสงคutoffจะเกิดขึ้นกรณีที่ $V_c = 2.405$ จากสมการ (2.32) จะได้ว่าค่าความยาวคลื่นคutoffดังสมการ

$$\lambda_c = \frac{2\pi a n_1}{V_c} (2\Delta)^{\frac{1}{2}} \quad (2.34)$$

หารสมการ (2.34) ด้วยสมการ (2.33) จะได้

$$\frac{\lambda_c}{\lambda} = \frac{V}{V_c} \quad (2.35)$$

แทนค่าตัวเลขวี V_c จะได้

$$\lambda_c = \frac{V\lambda}{2.405} \quad (2.36)$$

คุณสมบัติเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยวและโหมดร่วมสรุปดังตารางที่ 2.3 และ 2.4 พารามิเตอร์สำคัญที่ใช้พิจารณาคุณภาพพัลส์แสงในโหมดพื้นฐานที่ถูกส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยวคือค่า Mode-field diameter (MFD) ค่า MFD คือค่าความสามารถในการรับแสงตามแนวรัศมีของคอร์ของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวแบบสเต็ปอินเด็กซ์และเกรดเด็คอินเด็กซ์แบบพาราโบลา

การแจกแจงค่ากำลังงานสนามไฟฟ้าของพัลส์แสงที่เหมาะสมตามแนวรัศมีของคอร์คือการแจกแจงแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) โดยปกติระยะช่องหน้าต่าง (spot size) ตามแนวรัศมีที่แสงสามารถผ่านเส้นใยนำแสงได้มีค่าประมาณ $1/e$ เท่ากับ 0.37 ของค่าแอมพลิจูด หรือ $1/e^2$ เท่ากับ 0.135 ของค่ากำลังงาน ค่า MFD ที่เหมาะสมจะอยู่ที่ $2\omega_0$ โดยที่ ω_0 คือค่า half width of the input excitation อัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสต่อความยาวคลื่นแสงที่ส่งผ่านเส้นใยนำแสงตลอดความยาว สามารถหาได้โดยใช้ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในโหมดพื้นฐาน LP_{01} ถ้ากำหนดให้ λ_{01} คือค่าความยาวคลื่นของโหมด LP_{01} ค่าตรรกษณการหักเหสัมบูรณ์ของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยว สามารถหาได้จากสมการ (2.37)

$$\beta\lambda_{01} = 2\pi \text{ or } \lambda_{01} = \frac{2\pi}{\beta} \quad (2.37)$$

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว

Attribute	Detail	Unit	Specification			
			SM G.652D	SM G.657A1	SM G.657A2&B2	SM G.657B3
Attenuation	1310 nm	dB/km	≤ 0.40	≤ 0.40	≤ 0.40	≤ 0.40
Coefficient	1550 nm	dB/km	≤ 0.30	≤ 0.30	≤ 0.30	≤ 0.30
Chromatic Dispersion	1290-1330 nm	ps/nm.km	≤ 2.8	≤ 2.8	≤ 2.8	≤ 2.8
	1550 nm	ps/nm.km	≤ 18	≤ 18	≤ 18	≤ 18
Zero Dispersion wavelength	-	nm	1300 to 1324	1300 to 1324	1300 to 1324	1300 to 1324
Zero Dispersion slope	-	ps/nm ² .km	≤ 0.095	≤ 0.095	≤ 0.095	≤ 0.095
PMD Coefficient	-	ps/km	≤ 0.4	≤ 0.4	≤ 0.4	≤ 0.4
Cut-off wavelength	-	nm	≤ 1260	≤ 1260	≤ 1260	≤ 1260
Mode Field Diameter	1310 nm	μm	9.2 ± 0.5	8.6 ± 0.5	8.6 ± 0.5	8.6 ± 0.5
Cladding Diameter	-	μm	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1
Core/Cladding concentricity error	-	μm	≤ 0.8	≤ 0.8	≤ 0.8	≤ 0.8
Cladding Non-circularity	-	%	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Coating Diameter	-	μm	245 ± 15	245 ± 15	245 ± 15	245 ± 15

ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 208)

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติเส้นใยนำแสงแบบโหมตร่วม

Attribute	Detail	Unit	Specification			
			SM G.652D	SM G.657A1	SM G.657A2&B2	SM G.657B3
Attenuation Coefficient	at 850 nm	dB/km	≤ 0.35	≤ 0.30	≤ 0.30	≤ 0.30
	at 1300 nm	dB/km	≤ 1.5	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0
Bandwidth	at 850 nm	MHz.km	≥ 200	≥ 500	≥ 1500	≥ 3500
	at 1300 nm	MHz.km	≥ 500	≥ 500	≥ 500	≥ 500
Numerical Aperture	-	-	0.275 ± 0.015	0.20 ± 0.015	0.20 ± 0.015	0.20 ± 0.015
Core Diameter	-	μm	62.5 ± 3.0	50 ± 3.0	50 ± 3.0	50 ± 3.0
Cladding Diameter	-	μm	125 ± 2.0	125 ± 2.0	125 ± 2.0	125 ± 2.0
Cladding Non- circularity	-	%	≤ 2.0	≤ 2.0	≤ 2.0	≤ 1.0
Core/Cladding concentricity error	-	μm	≤ 3.0	≤ 3.0	≤ 3.0	≤ 3.0
Coating Diameter	-	μm	245 ± 15	245 ± 15	245 ± 15	245 ± 15

ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 208)

ส่วนค่าดัชนีการหักเหสัมบูรณ์ภายในคอร์ จะเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในโหมดพื้นฐานต่อค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในสุญญากาศตั้งสมการ (2.38)

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k} \quad (2.38)$$

และค่าความยาวคลื่นของโหมด LP_{01} คือ

$$\lambda_{01} = \frac{\lambda}{n_{eff}} \quad (2.39)$$

ปัจจุบันนอกจากเส้นใยนำแสงแบบโหมตรวมและโหมตเดี่ยวแล้ว ยังมีเส้นใยนำแสงที่ถูกรออกแบบเพื่อใช้ในงานเฉพาะทาง ด้วยเทคโนโลยีการผลิตเส้นใยนำแสงที่ดีขึ้น

ตัวอย่างที่ 2.1 เส้นใยนำแสงแบบเกรดดีดอินเด็กซ์มีค่าดัชนีการหักเหคอร์เท่ากับ 1.5 และโพรไฟล์ดรรชนีการหักเหภายในคอร์เป็นแบบพาราโบลา และมีค่าความแตกต่างดรรชนีการหักเหระหว่างคอร์กับแคลดดิ้งเท่ากับ 1 % ทำงานที่ความยาวคลื่น 1.3 μm จงหาค่ารัศมีคอร์สูงสุดถ้าเส้นใยนำแสงแบบเกรดดีดอินเด็กซ์ทำงานแบบโหมตเดี่ยว

วิธีคำนวณ การคำนวณหาค่ารัศมีคอร์สำหรับเส้นใยนำแสงเป็นแบบโหมตเดี่ยวและมีโพรไฟล์ดรรชนีการหักเหภายในคอร์เป็นแบบพาราโบลา จากสมการ 2.32 และ 2.33 จะได้

$$V = 2.4\sqrt{(1 + 2/\alpha)}$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ลงในสมการจะได้ค่า V เท่ากับ

$$V = 2.4 \times \sqrt{(1 + 2/2)} = 2.4\sqrt{2}$$

เมื่อทราบค่า V สามารถหารรัศมีคอร์ได้จากสมการ

$$a = \frac{V\lambda}{2\pi n_1 (2\Delta)^{\frac{1}{2}}}$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ลงในสมการจะได้ค่ารัศมีคอร์เท่ากับ

$$a = \frac{2.4\sqrt{2} \times 1.3 \times 10^{-6}}{2\pi \times 1.5 \times (0.02)^{\frac{1}{2}}} = 3.3 \mu\text{m}$$

ฉะนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางคอร์สำหรับเส้นใยนำแสงเป็นแบบโหมตเดี่ยวเท่ากับ 6.6 μm

ตัวอย่างที่ 2.2 เส้นใยนำแสงแบบสเต็ปอินเด็กซ์มีค่าดัชนีการหักเหคอร์เท่ากับ 1.46 และค่ารัศมีคอร์เท่ากับ 4.5 μm ความแตกต่างดรรชนีการหักเหระหว่างคอร์กับแคลดดิ้งเท่ากับ 0.25 % จงหาความยาวคลื่นตัดหรือความยาวคลื่นคัตออฟ

วิธีคำนวณ การคำนวณหาความยาวคลื่นคัตออฟสำหรับ จากสมการ 2.32 และ 2.33 จะได้

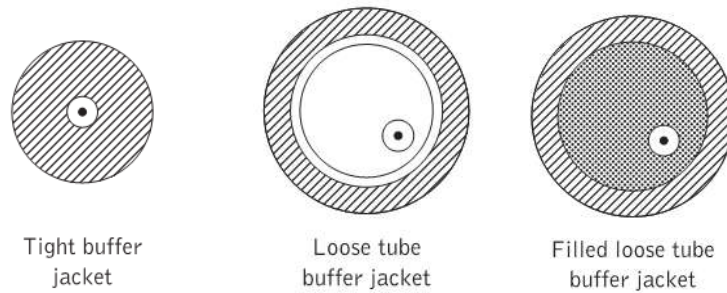
$$\lambda_c = \frac{2\pi a n_1 (2\Delta)^{\frac{1}{2}}}{2.405}$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ลงในสมการจะได้ค่า V เท่ากับ

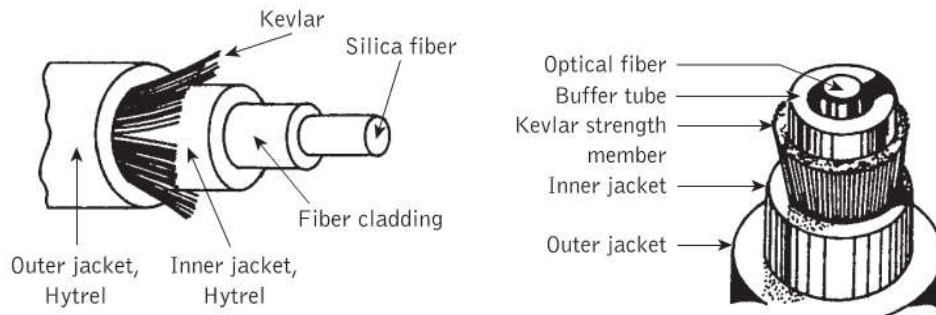
$$\lambda_c = \frac{2\pi \times 4.5 \times 1.46 \times (2 \times 0.0025)^{\frac{1}{2}}}{2.405} = 1.214 \mu\text{m}$$

$$\lambda_c = 1,214 \mu\text{m}$$

นั่นคือค่าความยาวคลื่นที่เส้นใยนำแสงยังคงเป็นแบบโหมตเดี่ยวจนถึง 1,214 μm



ภาพที่ 2.17 เทคนิคการหุ้มหรือบัฟเฟอร์เส้นใยนำแสง
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 203)



ภาพที่ 2.18 เทคนิคการหุ้มแบบ tight buffer และ loose tube buffer
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 208)

2.4 เคเบิลเส้นใยนำแสง

ในการออกแบบเคเบิลเส้นใยนำแสงมีปัจจัยหลายอย่างที่ต้องคำนึงถึง เพราะการนำเคเบิลเส้นใยนำแสงไปใช้งานจริง จะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมหน้างานเป็นหลัก แต่เคเบิลเส้นใยนำแสงทุกชนิดจะมีข้อกำหนดหลัก ๆ ดังนี้ การรับแรงกด หรือแรงกระแทก (fiber buffering) ความทนทาน (cable structural and strength members) การซิลเพื่อป้องกันการกัดกร่อน และป้องกันน้ำ (cable sheath, water barrier and cable core) หลังจากเส้นใยนำแสงถูกดึงจากแท่งพรีฟอร์มให้เป็นเส้นเล็ก ๆ ลำดับถัดมาเส้นใยนำแสงจะถูกเคลือบทันทีเพื่อป้องกันการเสียดสีที่ผิว วัสดุที่ใช้เคลือบโดยทั่วไปจะใช้เทฟลอน (Teflon) ความหนาของการเคลือบจะประมาณ 5-10 μm จะเรียกสายที่ผ่านการเคลือบแล้วว่าแบร์ไฟเบอร์

ชั้นตอนถัดไปเส้นใยนำแสงเปลือยจะต้องถูกหุ้มหรือบัฟเฟอร์ (buffer jacket) เพื่อป้องกันแรงกระแทก แรงกดทับ หรือแรงทางกลจากด้านนอก เพื่อให้เคเบิลเส้นใยนำแสงแข็งแรงขึ้น รูปแบบการหุ้มมี 3 แบบหลัก ๆ คือ

1. แบบท่อแน่น (Tight buffer)
2. แบบท่อหลวม (Loose tube buffer)
3. แบบผสม (Filled loose tube buffer)

ดังแสดงในภาพที่ 2.17 และ 2.18 วัสดุที่นิยมนำมาใช้ในการหุ้มแบบ tight buffer คือ Nylon, Hytrel และ Tefzel หลังจากหุ้มแล้วจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 900 nm การหุ้มแบบท่อแน่นใช้ต้นทุนไม่สูงแต่มีข้อด้อยคือไม่สามารถที่จะลดการสูญเสียเนื่องจากการโค้งขนาดเล็กได้ การหุ้มแบบท่อหลวมภายในจะมีช่องว่างหรือใส่เจลเหลวเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และแบบผสม ซึ่งการหุ้มแบบนี้จะมีค่าใช้จ่ายสูงแต่มีประสิทธิภาพมากกว่าแบบ tight buffer

ในการหุ้มแบบ loose tube buffer จะมีช่องว่างภายในสายเพื่อให้มีพื้นที่อิสระมากขึ้น และถ้าภายในช่องว่างบรรจุวัสดุกันน้ำ (moisture-resistant compound) จะเป็นการหุ้มแบบ filled loose tube buffer ซึ่งจะเหมาะสำหรับงานติดตั้งใต้น้ำ เมื่อเส้นใยนำแสงถูกหุ้มเรียบร้อยแล้ว ชั้นตอนต่อไปจะนำมาประกอบเป็นสายเคเบิลเพื่อรับแรงดึง โดยทั่วไปการผลิตสายเคเบิลจะขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน ซึ่งจะมี 3 แบบหลัก ๆ คือ

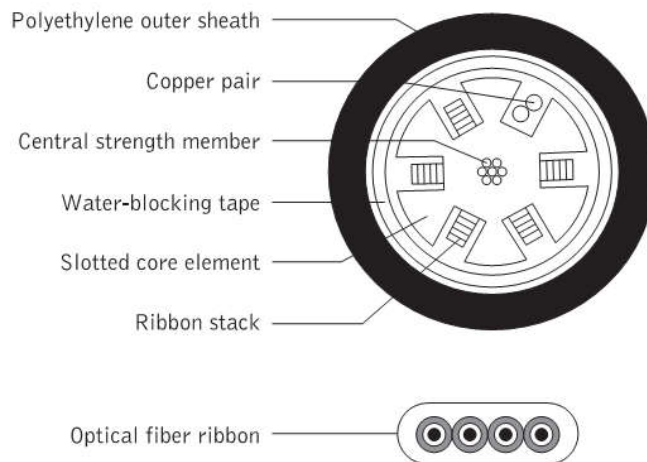
1. ติดตั้งลอยในอากาศ (aerial cables)
2. ฝังดิน (terrestrial cables)
3. ใต้น้ำ (submarine cables)

กระบวนการนำเส้นใยนำแสงถูกหุ้มเรียบร้อยแล้วมาประกอบเป็นสายเคเบิลจะจัดวางสายเป็นชั้น ๆ (layers) แต่สายที่อยู่ด้านในสุดหรือแกนกลางจะเป็นส่วนที่รับแรงดึง จำนวนสายที่บรรจุอยู่ภายในจะอยู่ระหว่าง 2-16 เส้น เส้นใยนำแสงที่บรรจุอยู่ภายในหนึ่งเคเบิลอาจจะประกอบด้วยเส้นใยนำแสงแบบโหมตเดี่ยวและแบบโหมตร่วมรวมกัน

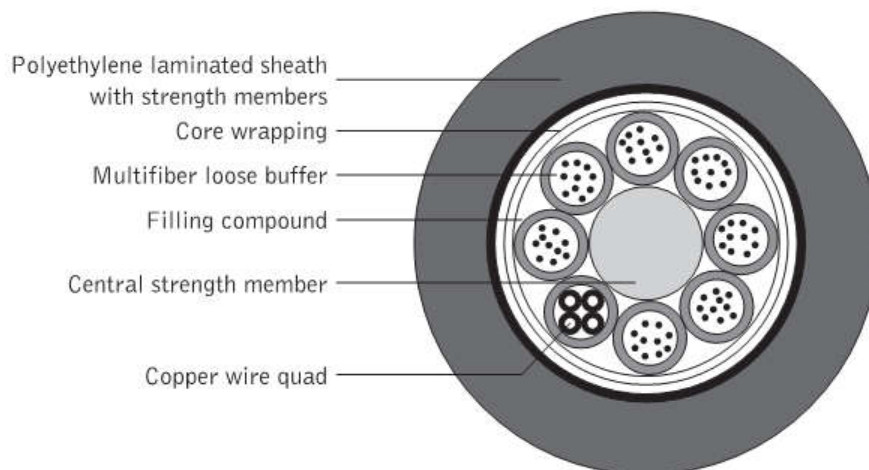
สำหรับงานติดตั้งภายนอกสายเคเบิลจะต้องถูกออกแบบให้สามารถรับแรงดึงได้มากเพียงพอ และใช้วัสดุหุ้มที่สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้ดี สำหรับเคเบิลที่ใช้งานภายนอกอาคารจะต้องเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึง และแรงกดทับได้ (dielectric strength, coated strength, central strength) โครงสร้างสายเคเบิลเส้นใยนำแสงที่ถูกออกแบบใช้งานต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 2.19 ถึง ภาพที่ 2.25 และสำหรับสายเคเบิลที่เดินในทะเลจะต้องเพิ่มการหุ้มด้วยวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนจากน้ำทะเล และป้องกันการกัดจากปลาฉลาม ดังแสดงในภาพที่ 2.26 ถึง 2.29



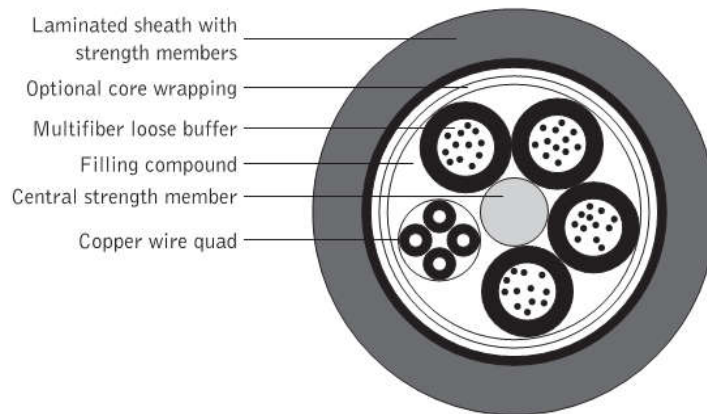
ภาพที่ 2.19 เคเบิลเส้นใยนำแสงแบบชั้นเดียว สองชั้น และแบบแกนร่วม
ที่มาก (Senior & Jamro, 2009, p. 205)



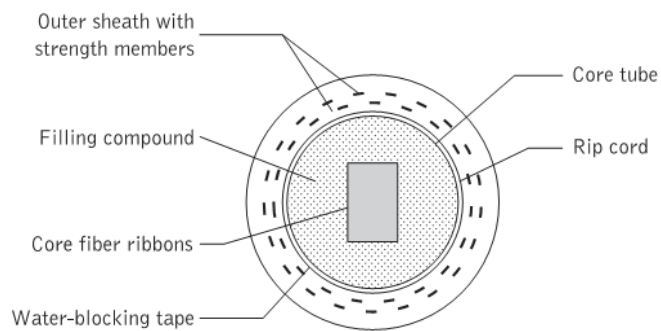
ภาพที่ 2.20 เคเบิลเส้นใยนำแสงแบบคอร์สลีตและแบบริบบิ้น
ที่มาก (Senior & Jamro, 2009, p. 206)



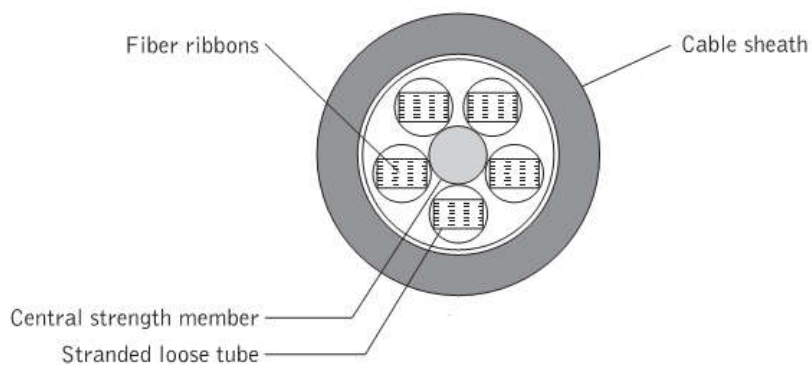
ภาพที่ 2.21 เคเบิลเส้นใยนำแสงสำหรับงานติดตั้งภายนอก
ที่มาก (Senior & Jamro, 2009, p. 209)



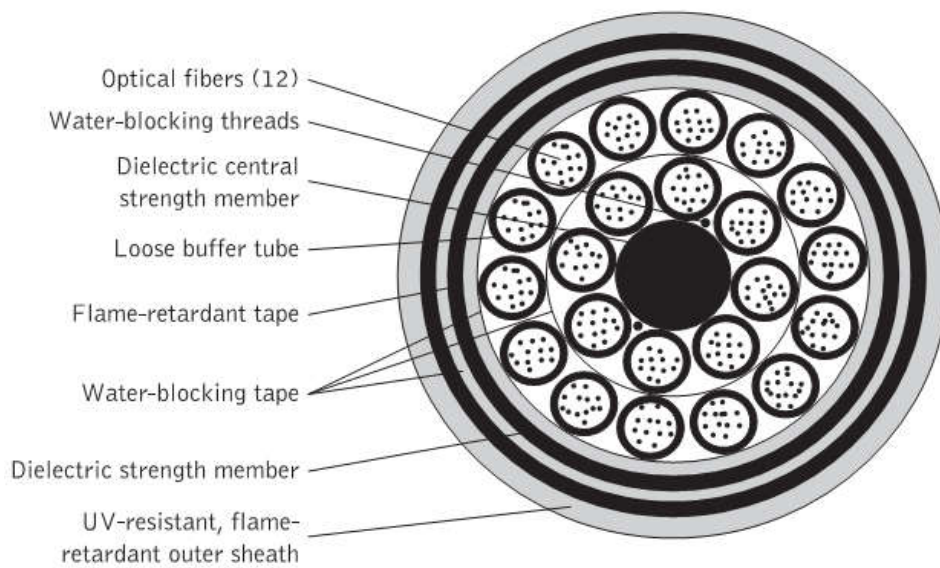
ภาพที่ 2.22 เคเบิลเส้นใยนำแสงสำหรับงานติดตั้งภายนอกแบบหลายชนิด
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 209)



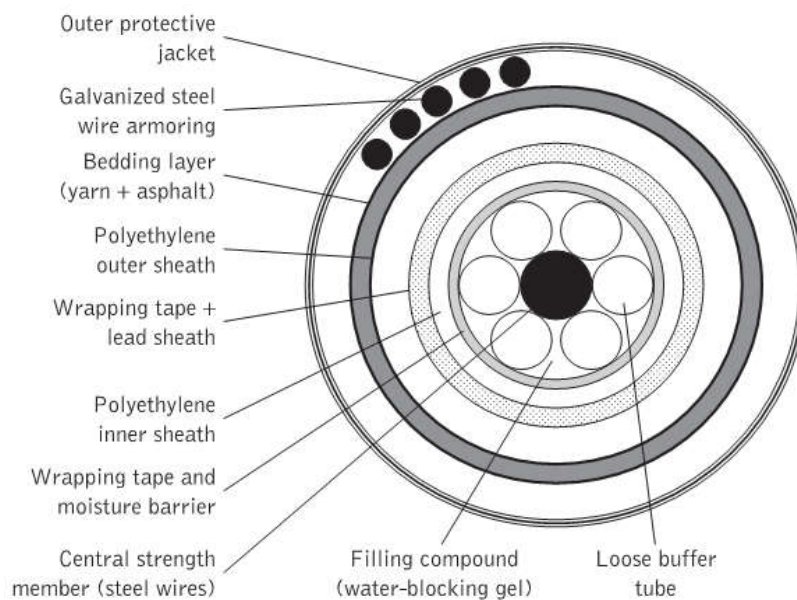
ภาพที่ 2.23 เคเบิลเส้นใยนำแสงแบบริบบิ้นชนิด central tube
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 210)



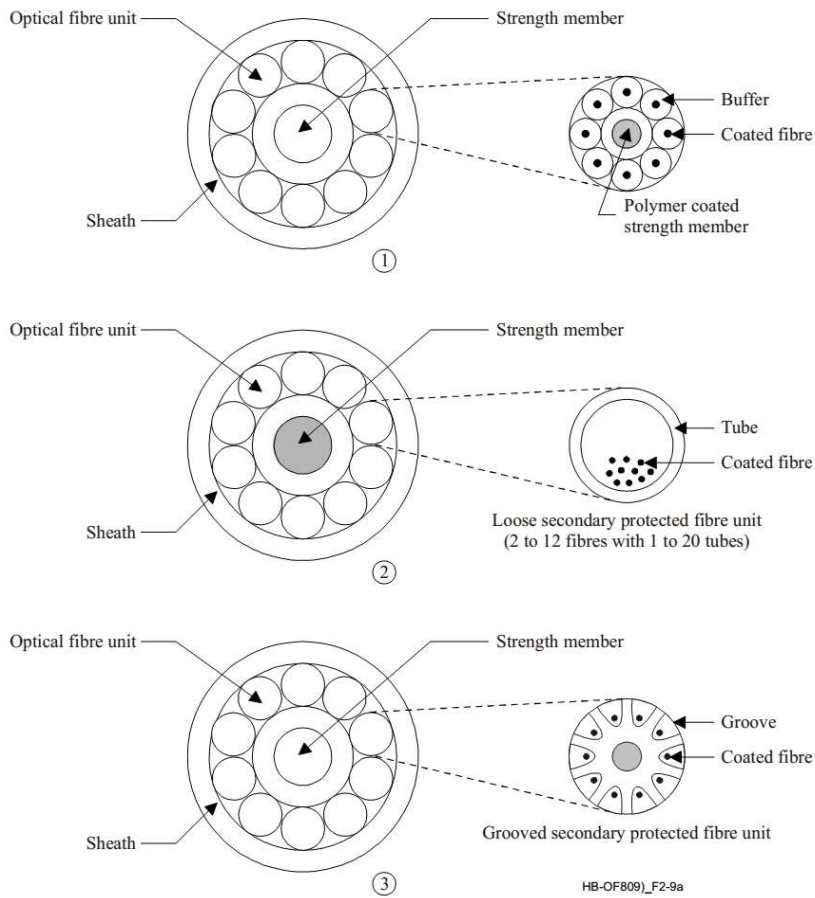
ภาพที่ 2.24 เคเบิลเส้นใยนำแสงแบบริบบิ้นชนิด multiple loose tube
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 210)



ภาพที่ 2.25 เคเบิลเส้นใยนำแสงสำหรับงานติดตั้งใต้ทั้งภายในและภายนอก
 ที่น้ำ (Senior & Jamro, 2009, p. 21)

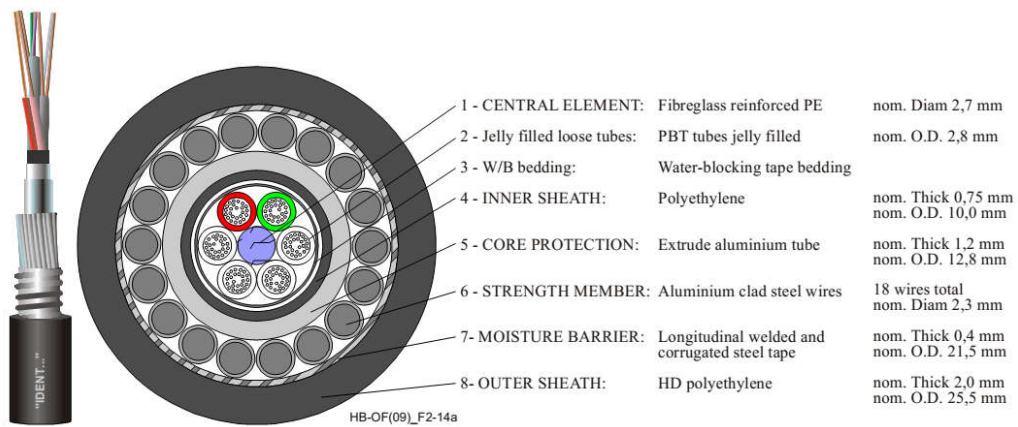


ภาพที่ 2.26 เคเบิลเส้นใยนำแสงสำหรับงานติดตั้งใต้น้ำ
 ที่น้ำ (Senior & Jamro, 2009, p. 211)

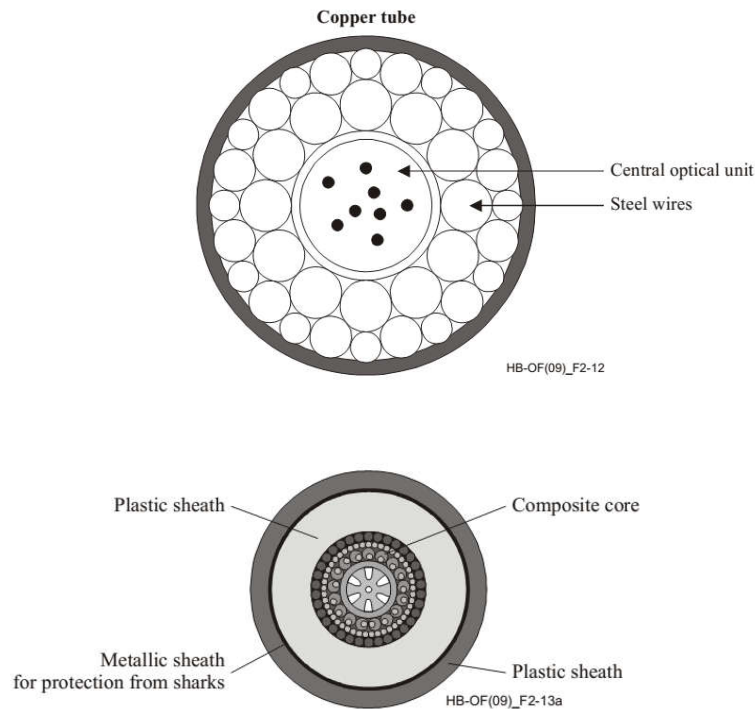


HB-OF809)_F2-9a

ภาพที่ 2.27 เคเบิลเส้นใยนำแสงแบบหลายยูนิต
ที่มา (ITU-T Manual, 2009, p. 44)



ภาพที่ 2.28 โครงสร้างเคเบิลเส้นใยนำแสงสำหรับงานติดตั้งใต้น้ำ
ที่มา (ITU-T Manual, 2009, p. 58)



ภาพที่ 2.29 เคเบิลเส้นใยนำแสงสำหรับงานติดตั้งใต้น้ำ
ที่มา (ITU-T Manual, 2009, p. 55)

การเลือกใช้เคเบิลเส้นใยนำแสง จะต้องคำนึงถึงลักษณะการติดตั้งเป็นหลัก ว่าเป็นการติดตั้งแบบลอยในอากาศ ฝังดิน หรือใต้น้ำ ลักษณะการติดตั้งภายในอาคารหรือภายนอกอาคาร การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมตลอดสายส่ง อายุการใช้งาน จนถึงงบประมาณในการติดตั้งและการบำรุงรักษา ความยากง่ายในการซ่อมแซมเคเบิลเส้นใยนำแสงเมื่อเกิดการชำรุดเสียหาย

2.5 บทสรุป

เส้นใยนำแสงเป็นท่อนำคลื่นทรงกลม 2 ชั้นขนาดเล็กที่ทำจากวัสดุโปร่งแสง เช่น แก้ว ซิลิกา หรือสารไดอิเล็กทริก วัสดุตั้งต้นที่นิยมคือซิลิกาที่ถูกได้ปด้วยสารประกอบประเภทออกไซด์ และธาตุตระกูลฮาโลด์ ท่อนำคลื่นชั้นในสุดเรียกว่า ชั้นคอร์ ส่วนท่อนำคลื่นชั้นนอกที่ห่อหุ้มชั้นคอร์เรียกว่า ชั้นแคลดดิ้ง ค่าดัชนีการหักเหแสงของชั้นคอร์จะถูกลอกแบบให้มีความมากกว่าชั้นแคลดดิ้งอยู่ 0.2-3 เปอร์เซ็นต์

กระบวนการสร้างเส้นใยนำแสงจะแบ่งออกเป็น 2 เทคนิคใหญ่ ๆ คือการหลอมละลายโดยตรงและการเคลือบโอระเหยของอนุภาคแก้วที่อุณหภูมิสูง การแบ่งชนิดเส้นใยนำแสงใช้โหมดการเดินทางของคลื่นแสงที่เดินทางผ่านเส้นใยนำแสง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ เส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยวและเส้นใยนำแสงแบบโหมดรวม ซึ่งเส้นใยนำแสงแบบโหมดรวมสามารถที่จะจำแนกย่อยได้อีก 2

แบบย่อย ๆ คือเส้นใยนำแสงโหมตร่วมแบบเกรดเต็ดอินเด็กซ์ และเส้นใยนำแสงโหมตร่วมแบบสตีปอินเด็กซ์ เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวจะมีขนาดเล็กกว่าแบบโหมตร่วม การนำเส้นใยนำแสงไปใช้งานที่เหมาะสม จะต้องคำนึงถึงลักษณะการติดตั้ง อัตราการลดทอน ความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ยอมรับได้ ระยะทางการส่งสัญญาณ การซ่อมบำรุงรักษาระบบ และงบประมาณที่ใช้ในการติดตั้ง เป็นต้น

2.6 คำถามทบทวน

1. การให้บริการโครงข่ายเส้นใยนำแสงแบบ Dark Fiber มีรูปแบบอย่างไร
2. มาตรฐานการติดตั้งเคเบิลเส้นใยนำแสงของ ITU G.652 มีอะไรบ้าง
3. เคเบิลเส้นใยนำแสงที่ใช้ภายในอาคาร มักมีโครงสร้างแบบใด
4. เคเบิลเส้นใยนำแสงชนิด ADSS (All Dielectric Self Support) ที่มีใช้ในบ้านถูกออกแบบสำหรับการใช้งานประเภทใด
5. สมัยก่อนการวางสายเคเบิลใต้น้ำมักถูกปลาฉลามกัดทำลาย จึงได้มีการแก้ไขปัญหาโดยวิธีใด
6. สารหรือส่วนผสมที่ใช้สำหรับการผลิตเส้นใยนำแสงนำแสงมีอะไรบ้าง
7. กรรมวิธีในการสร้างพรีฟอร์มมีขั้นตอนอะไรบ้าง
8. แท่งพรีฟอร์ม (Preform) หมายถึงอะไร
9. ในกระบวนการดึงเส้นใยนำแสง (Fiber Drawing) หากเส้นใยนำแสงมีขนาดใหญ่กว่าที่ต้องการต้องแก้ไขระบบอย่างไร
10. ในการดึงเส้นใยนำแสง (Fiber Drawing) หากความเร็วในการดึงเส้นใยนำแสง มีความเร็วเพิ่มขึ้นจะส่งผลอย่างไร
11. การสูญเสียจากส่วนโค้งขนาดเล็ก (micro bending) ที่รอยต่อระหว่างคอร์และแคลดดิ้ง ทำให้ผิวรอยต่อไม่เรียบ ส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากอะไร
12. การนำไอระเหยของสารเคมีที่ถูกความร้อนจับตัวบนปลายด้านหนึ่งของแกนแท่งแก้ว ที่ถูกหมุนรอบตัวเองอยู่ตลอดเวลา และการดึงขึ้นแบบช้าๆ ไอระเหยของ สารเคมีที่จับตัวกันก็จะถูกดึงขึ้นมาด้วย เป็นเทคนิคการทำแท่งพรีฟอร์มวิธีใด
13. หน่วยงานที่กำหนดมาตรฐานทดสอบเคเบิลเส้นใยนำแสงในประเทศไทยคือหน่วยงานใด
14. ในการสื่อสารข้อมูลระหว่างประเทศหรือภูมิภาคใหญ่ ๆ นิยมใช้เคเบิลเส้นใยนำแสงชนิดใด
15. เคเบิลเส้นใยนำแสงแบบแขวนลอยอากาศ (aerial Cable) ควรติดตั้งในงานลักษณะใด
16. ในระบบสื่อสารความเร็วสูงทางแสงระยะไกล ควรเลือกเส้นใยนำแสงชนิดใด

17. ส่วนประกอบของเคเบิลเส้นใยนำแสง ที่มีลักษณะคล้ายท่อกลม แต่มีลักษณะตัน และไม่มีเส้นใยนำแสงอยู่ภายในใช้สำหรับพันร่วมกับท่อกลมเพื่อให้เกิดโครงสร้างสมมาตรภายในเคเบิล เรียกว่า
18. เส้นใยแบบฝอยสีเหลืองที่มักเห็นในเคเบิลเส้นใยนำแสงมีหน้าที่ลดแรงกระแทกและแรงดึงเรียกว่าอะไร
19. การตีเกลียวท่อกลมในการผลิตเคเบิลเส้นใยนำแสงใช้วิธีการตีเกลียวแบบใด
20. อุปกรณ์ใดที่ทำหน้าที่รับแรงดึงภายในเคเบิลเส้นใยนำแสง