Principle of Communication
หลักการสื่อสาร

แนะนำระบบสื่อสารสายใยนำแสง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา กอเจริญ

อาคาร 5 ห้อง 1204

email: preecha.ko@spu.ac.th

blog: http://mrpreecha.blogspot.com

Ref : Palais, 1992, เกียรติศักดิ์, 2552

ประวัติการสื่อสารด้วยสายใยนำแสง

- ในปี พ.ศ. 2423 อะเล็กซานเดอร์ เกรแฮม เบลล์ (Alexander Graham Bell) และผู้ช่วย สร้างต้นแบบการสื่อสารทางแสงคือโทรศัพท์ผ่านแสง (Photophone) ที่ห้องปฏิบัติการเบลล์ (Bell's laboratory) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นการส่งผ่านเสียงด้วยลำแสงระหว่างสองอาคาร มีระยะห่างระหว่างอาคาร 213 เมตร
- ต่อมาในปี พ.ศ. 2509 ชาร์ลส์ เค เกา (Charles K. Kao) และจอร์จ ฮอกแฮม (George Hockham) คิดค้นและนำเสนอเส้นใยนำแสงที่ห้องปฏิบัติการเอสทีซี (STC Laboratories) ประเทศอังกฤษ มีการสูญเสียที่ 1000 dB/km มีสาเหตุจากสิ่งเจือปนในเส้นใยนำแสง และสิ่งเจือปนดังกล่าวสามารถกำจัดออกไปได้
- ในอีกสี่ปีถัดจากนั้น โดยบริษัทคอร์นนิง กลาส เวิกส์ (Corning Glass Works) สามารถพัฒนาเส้นใยแก้นนำแสงที่มีค่าการลดทอนต่ำในระดับ 20 dB/km สำเร็จ ซึ่งเป็นระดับที่เพียงพอสำหรับใช้ในการสื่อสาร
- และในช่วงเวลาเดียวกันนี้เองการพัฒนาเลเซอร์ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำชนิด GaAs (GaAs semiconductor lasers) ก็ประสบความสำเร็จขึ้นที่ห้องปฏิบัติการเบลล์ โดยเลเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีขนาดกะทัดรัดจึงเหมาะสำหรับการส่งแสงผ่านสายเคเบิลใยแก้วนำแสงเพื่อการสื่อสารโทรคมนาคม

ประวัติการสื่อสารด้วยสายใยนำแสง

- ในปี พ.ศ. 2518 การใช้งานสายใยแก้วนำแสงเชิงพาณิชย์แห่งแรกได้ดำเนินการขึ้น โดยใช้แสงความยาวคลื่นประมาณ 0.8 ไมโครเมตร และเลเซอร์ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำชนิด GaAs โดยมีอัตราความเร็วในการสื่อสารที่ 45 Mbps ด้วยระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณ 10 กิโลเมตร
- ในช่วงต้นปี พ.ศ. 2523 มีการใช้แสงความยาวคลื่นประมาณ 1.3 ไมโครเมตร และใช้เลเซอร์ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำชนิด Indium gallium arsenide (InGaAs) ซึ่งสามารถลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากระบบเดิมที่ถูกจำกัดความเร็วในการสื่อสารจากการลดทอนสัญญาณแสงที่เกิดมัลติโหมดดิสเปอร์ชั่น (multi-mode dispersion)
- จากนั้นในปี พ.ศ. 2524 สายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวได้รับการพัฒนาขึ้น
- ในปี พ.ศ. 2530 สามารถดำเนินการส่งผ่านข้อมูลที่อัตราความเร็วมากถึง 1.7 Gbps ด้วยระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณ 50 กิโลเมตร
- ในปี พ.ศ. 2531 ได้มีการดำเนินโครงการเชื่อมข่ายสายโทรศัพท์ข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกโดยใช้สายใยแก้วนำแสงเป็นครั้งแรก ชื่อโครงการทีเอที-ลำดับที่แปด (TAT-8) เชื่อมโยงระหว่างเมืองเพนมาร์ช ประเทศฝรั่งเศส อ่าวไวด์เมาท์ ประเทศอังกฤษ และเมืองนิวเจอร์ซี ประเทศสหรัฐอเมริกา

ประวัติการสื่อสารด้วยสายใยนำแสง

- มีการพัฒนาให้เลเซอร์ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำชนิด InGaAs ใช้แสงความยาวคลื่นประมาณ 1.55 ไมโครเมตร มีค่าการลดทอนต่ำในระดับ 0.2 dB/km สำเร็จ โดยลดปัญหาการลดทอนที่เกิดขึ้นจากการกระจายตัวของพัลส์ (pulse-spreading) ที่มีสาเหตุมาจากมัลติโหมด โดยทำการสร้างสเปกตรัมของคลื่นแสงให้มีโหมดเดียว (single mode) ซึ่งทำให้สามารถส่งผ่านข้อมูลที่อัตราความเร็วในการสื่อสาร 2.5 Gbps ด้วยระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณมากกว่า 100 กิโลเมตร
- การพัฒนาการสื่อสารใยแก้วนำแสงเพื่อเพิ่มระยะทางในการเชื่อมต่อสามารถเพิ่มได้ด้วยการใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (optical amplification) ซึ่งจะสามารถลดการใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (repeater) และมีการพัฒนาอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่น (wavelength-division multiplexing) เพื่อเพิ่มปริมาณการส่งผ่านข้อมูลให้มากขึ้น โดยสามารถเพิ่มอัตราความเร็วในการสื่อสารได้ถึง 14 Tbps ด้วยระยะห่างระหว่างสถานีสื่อสารมากกว่า 160 กิโลเมตร ในปี พ.ศ. 2549

ประวัติการสื่อสารด้วยสายใยนำแสง

- สายใยนำแสงชนิดพลาสติก (Plastic optical fiber: POF) เป็นสายใยนำแสงที่แกนกลางนำแสง (core) ทำจากวัสดุอะคริลิค (acrylic) และแคล้ดดิ้งทำจากวัสดุโพลีเมอร์ (Polymer)
- ในปี พ.ศ. 2533 ได้มีการพัฒนาสายใยนำแสงชนิดพลาสติกให้มีคุณภาพสูงขึ้นโดยใช้วัสดุ perfluorinated polymer ทำแกนกลางนำแสงและเริ่มนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์
- สายใยนำแสงชนิดพลาสติกจะมีขนาดใหญ่ พื้นที่หน้าตัดของสายส่วนใหญ่ ~96 % เป็นแกนกลางนำแสง มีขนาดใหญ่กว่าแกนกลางสายใยแก้วนำแสงประมาณ 100 เท่า
- สายใยนำแสงชนิดพลาสติกที่ทำจากวัสดุอะคริลิคมีราคาไม่แพงและมักใช้สำหรับการสื่อสารที่มีความเร็วไม่สูง และมีระยะทางไม่มากนัก เช่นใช้ในการเชื่อมสัญญาณระหว่างเครื่องเสียงในบ้าน การเชื่อมสัญญาณในรถยนต์ เป็นต้น
- สายใยนำแสงชนิดพลาสติกคุณภาพสูงจะมีความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลสูงกว่าและสามารถใช้ในการเชื่อมต่อเครือข่ายการสื่อสารภายในอาคารได้ แต่สำหรับการเชื่อมต่อสื่อสารโทรคมนาคมระยะไกลนั้น การใช้งานสายใยนำแสงชนิดพลาสติกยังมีข้อจำกัดเนื่องจากมีค่าการลดทอนต่อระยะทางสูง ในระดับ 1 dB/m ที่ความยาวคลื่นแสง 650 นาโนเมตร

ข้อดีของสายใยนำแสง

- สายใยนำแสงเป็นตัวกลางส่งผ่านสัญญาณชนิดหนึ่งที่ใช้แสงเป็นตัวนำพาข้อมูล
- ข้อดีของสายใยนำแสงที่มีเหนือกว่าสายนำสัญญาณคือ ปริมาณข้อมูลที่สามารถส่งผ่านได้สูงมากที่สุด เนื่องจากมีแบนด์วิทของช่องทางนำสัญญาณสูง
- มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการลดทอนสัญญาณในสายต่ำจึงสามารถส่งสัญญาณข่าวสารไปได้ในระยะทางไกลโดยที่ใช้จำนวนสถานีทวนสัญญาณน้อยกว่า
- มีความคงทนต่อสัญญาณรบกวนที่เกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสภาพแวดล้อม หรือสัญญาณรบกวนที่เกิดจากตัวนำที่อยู่ใกล้เคียงที่เรียกว่าสัญญาณครอสทอร์ก (crosstalk)
- เนื่องจากสายใยนำแสงทำจากแก้วหรือพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ใช่ตัวนำไฟฟ้า
- ผลิตจากแก้วหรือพลาสติกจึงทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ดี เช่นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความชื้น หรือการกัดกร่อนจากสนิม
- ยากต่อการดักฟังหรือขโมยสัญญาณกลางทาง การส่งผ่านข้อมูลด้วยสายใยนำแสงจึงมีความปลอดภัยต่อข้อมูล และมีความน่าเชื่อถือ รวมถึงความคงทนต่อการส่งสัญญาณสอดแทรกเพื่อรบกวน มากกว่าตัวนำสัญญาณชนิดอื่นๆ

ข้อด้อยของสายใยนำแสง

- การเชื่อมต่อการสื่อสารระหว่างสายใยนำแสงและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ส่งผ่านสัญญาณไฟฟ้า จำเป็นจะต้องแปลงสัญญาณไฟฟ้าให้อยู่ในรูปสัญญาณแสง ซึ่งอุปกรณ์แปลงสัญญาณดังกล่าวมีราคาสูง
- การติดตั้ง ซ่อมแซม หรือทำการเชื่อมต่อจำเป็นจะต้องใช้เครื่องมือพิเศษที่จำเป็นต้องมีการฝึกฝนทักษะในการใช้งาน
- ข้อด้อยอีกประการหนึ่งคือความแข็งแรง เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำสายใยนำแสงคือแก้ว หรือพลาสติกที่มีขนาดเล็กมากจึงมีโอกาสแตกหักง่าย
- สายใยนำแสงยังไม่สามารถส่งผ่านพลังงานจากต้นทางไปยังอุปกรณ์ปลายทางได้เช่นเดียวกันกับสายตัวนำโลหะ เช่นระบบโทรศัพท์ที่สามารถส่งผ่านพลังงานจากชุมสายโทรศัพท์ไปยังเครื่องโทรศัพท์ปลายทาง โดยสามารถใช้โทรศัพท์ในการสื่อสารได้โดยไม่ต้องป้อนกระแสไฟฟ้า ดังนั้นการสื่อสารด้วยสายใยนำแสง จึงจำเป็นจะต้องมีแหล่งกำเนิดพลังงานป้อนให้กับอุปกรณ์ปลายทาง

พื้นฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

- การนิยามแสงถูกนิยามในสองลักษณะคือ
  - อนุภาค (light as a particle) - แต่ละอนุภาคที่เคลื่อนที่จะหมายถึงโฟตอน (photon) โดยโฟตอนจะมีเพียงแค่พลังงานไม่มีมวล ดังนั้นลำแสงจะประกอบด้วยการเคลื่อนที่ของโฟตอนที่ไม่มีมวล ส่วนความเข้มของแสงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนการเคลื่อนที่ของโฟตอนนั่นคือหากมีความเข้มแสงที่สูงจะมีจำนวนโฟตอนที่เคลื่อนที่มาก
  - คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (light as an electromagnetic wave) - ในระบบการสื่อสารโทรคมนาคมการนิยามแสงเป็นคลื่นจะมีความเหมาะสมกว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นการแกว่ง (oscillating) ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่ความเร็วคงที่ประมาณ 300,000,000 เมตรต่อวินาที โดยได้มีการอธิบายกระบวนการส่งผ่านข้อมูลข่าวสารด้วยการกล้ำสัญญาณข้อมูลข่าวสารเข้ากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้สามารถส่งผ่านข้อมูลข่าวสารผ่านช่องทางการสื่อสารได้อย่างเหมาะสม

พื้นฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

- ความถี่
  - ความถี่ของคลื่น - จำนวนครั้งของการแกว่งที่ซ้ำรายคาบต่อหนึ่งหน่วยเวลา
  - คลื่นซายน์ที่มีการแกว่งหนึ่งรอบในหนึ่งวินาทีเรียกว่า 1 เฮิร์ซ (Hertz, Hz)
  - แกว่งมากขึ้นเป็นสองเท่าคือสองรอบในหนึ่งวินาทีจะเรียกว่ามีความถี่ 2 Hz
  - เวลาที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณคลื่นความถี่ที่มีระยะทางเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น เรียกว่าคาบของสัญญาณ (period, T)
  - คาบของสัญญาณจะเป็นสัดส่วนกับความถี่ $T = 1/f$
- ความยาวคลื่น
  - คาบของการแกว่งของสัญญาณแสดงได้ด้วยความยาวคลื่น (wave length, l)
  - คำนวณหาได้ด้วยการหารค่าความเร็วของแสง (ประมาณ 3×10^8 m/s)

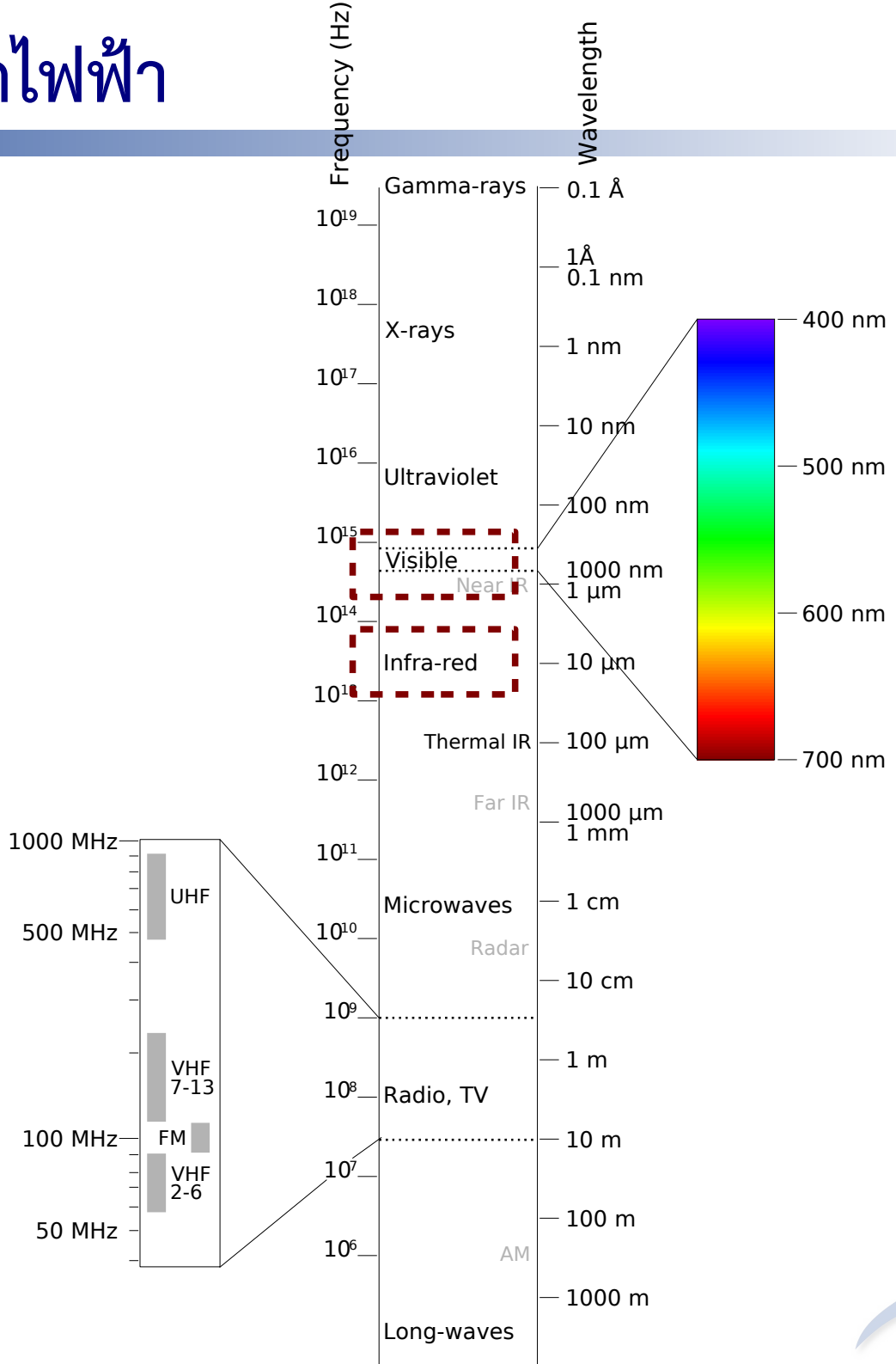
$$\lambda = \frac{c}{f}$$

พื้นฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

- สเปกตรัมความถี่
  - ชาร์ตการกระจายสเปกตรัมความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยคลื่น 7 ชนิดคือ คลื่นความถี่วิทยุ ไมโครเวฟ อินฟราเรด แสงที่มองเห็นได้ อัลตราไวโอเลต คลื่นรังสีเอ็กซ์ และคลื่นแกมมา
  - แกนด้านซ้ายมือแสดงในค่าความถี่มีหน่วยเป็น Hz
  - แกนด้านขวามือแสดงในค่าความยาวคลื่นมีหน่วยเป็นเมตร
  - สเปกตรัมของแสงย่านสีที่มองเห็นได้จะมีความยาวคลื่นในหน่วยไมโครเมตร (mm) ในช่วงระหว่าง 0.40 mm ถึง 0.70 mm เช่นแสงสีแดงมีความยาวคลื่น 0.68 mm หรือเท่ากับ 680 นาโนเมตร (nm) เป็นต้น
  - คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำและสูงกว่านั้น จะไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า
  - ความยาวคลื่นในช่วง 10^{-3}m ถึง 10^{-8}m เป็นแถบความถี่ย่านไฟฟ้า-แสง (electro-optical frequency, EOF) สามารถสร้างได้จากไดโอดเปล่งแสง (light-emitting diodes, LEDs) และเลเซอร์ไดโอด (laser diodes)

พื้นฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

- สเปกตรัมความถี่



พื้นฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

- พลังงานและแสง
  - หน่วยการวัดค่าพลังงานของแสงหาได้จากอัตราการขยายของพลังงานเมื่ออิเล็กตรอนผ่านแรงดันบวกที่มีค่าหนึ่งโวลต์
  - เรียกหน่วยการวัดนี้ว่า อิเล็กตรอนโวลต์ (electronvolt: eV)
  - สัญญาณแสงที่มองเห็นได้เมื่อพิจารณาในรูปของอนุภาคโฟตอน มีค่าพลังงานอยู่ในช่วง 1.8 – 3.1 eV ซึ่งค่าพลังงานในช่วงนี้เป็นช่วงพลังงานที่การรับรู้แสงของสายตามนุษย์สามารถมองเห็นได้
  - อยู่ในหน่วยความถี่ ~440 THz สำหรับแสงสีแดง และ ~730 THz สำหรับสีม่วง
  - ในส่วนของแสงที่มีค่าพลังงานต่ำกว่าหรือสูงกว่าย่านนี้จะไม่สามารถมองเห็นแสงได้ด้วยตาเปล่า แต่สามารถตรวจจับได้ด้วยอุปกรณ์ทรานซ์ดิวเซอร์ที่สร้างขึ้นมาเฉพาะ

พื้นฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

- พลังงานและความยาวคลื่น
  - เมื่อพลังงานของอนุภาคโฟตอน (E) เพิ่มขึ้น ความยาวคลื่นของโฟตอนจะลดลง
  - พลังงานของแสงเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวคลื่น เช่นอนุภาคโฟตอนแสงสีแดงมีพลังงานประมาณ 1.8 eV มีความยาวคลื่นประมาณ 700 nm ขณะที่อนุภาคโฟตอนแสงสีม่วงมีพลังงานประมาณ 3.1 eV มีความยาวคลื่นประมาณ 400 nm

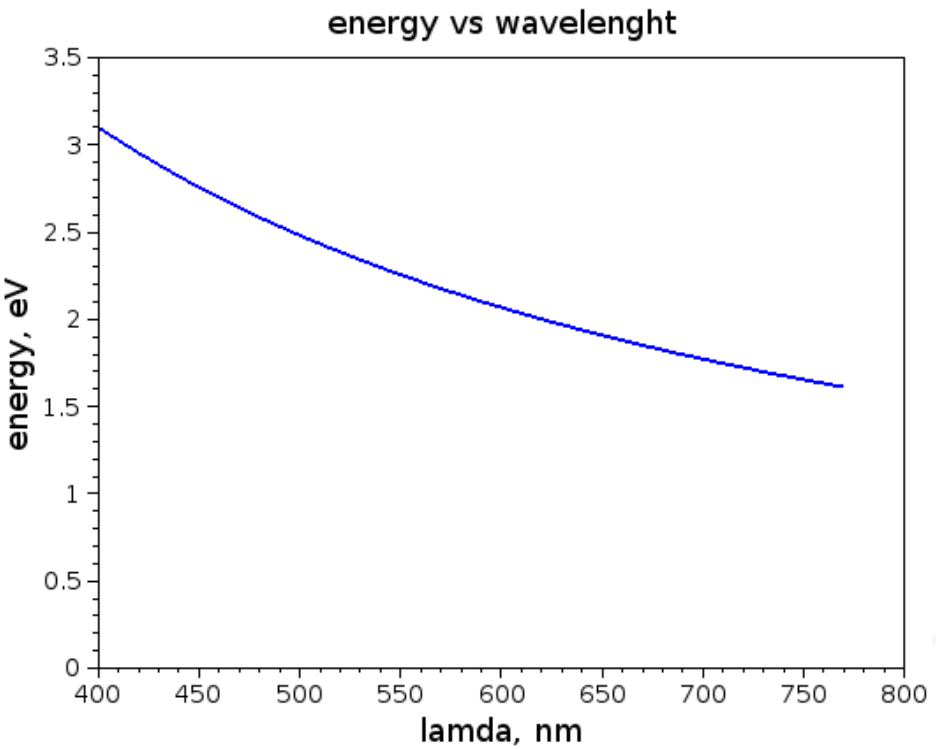
$$E = hf$$

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

โดย h คือค่าคงที่พลังค์ (Planck constant) มีค่าเท่ากับ 4.136×10^{-15} eV/s.

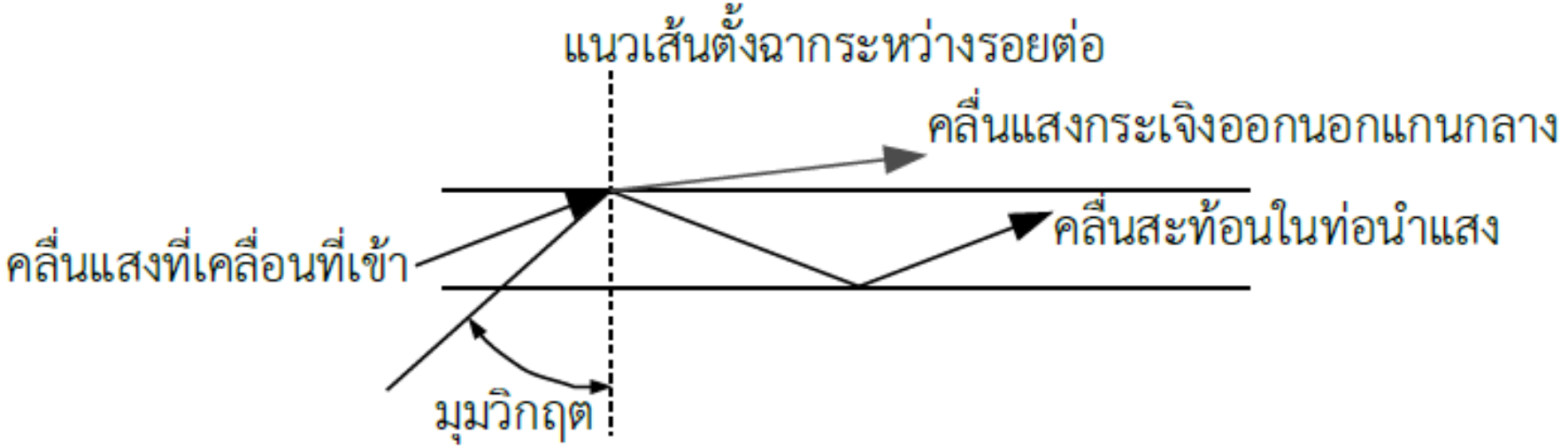
- ผลคูณของค่าคงที่พลังค์และความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 1240 eV/nm

$$E = \frac{1240}{\lambda(nm)}$$



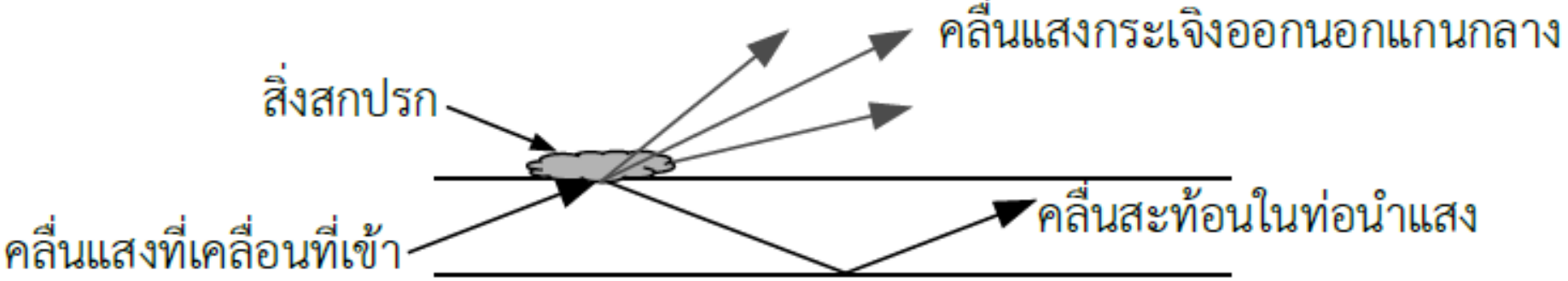
การเคลื่อนที่ของแสงในสายใยแก้วนำแสง

- เมื่อมุมกระทบของแสงกับขอบตัวนำแสงไม่เกินกว่าค่ามุมวิกฤต (critical angle) ลำแสงนั้นก็จะสะท้อนกลับไปกลับมาภายในสายใยแก้วนำแสงได้ และสามารถนำพาแสงให้เดินทางจากแหล่งกำเนิดแสงต้นทางไปยังอุปกรณ์ปลายทางได้

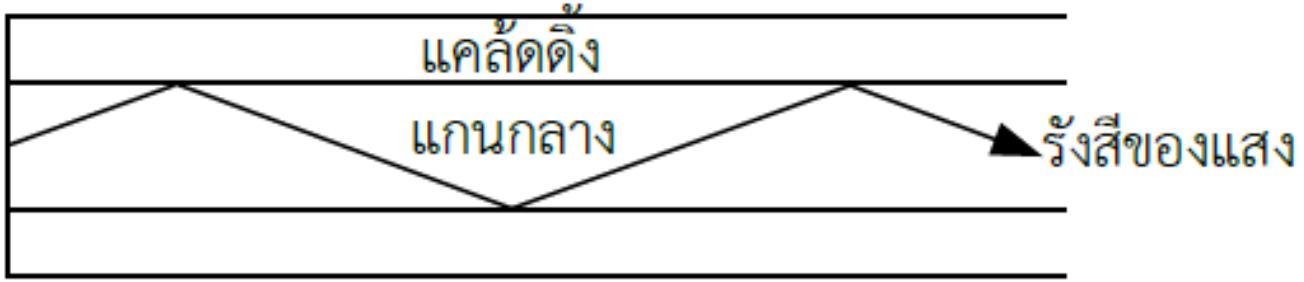


การเคลื่อนที่ของแสงในสายใยแก้วนำแสง

- หากพื้นผิวของสายใยแก้วนำแสงไม่สะอาดเช่นมีคราบไขมัน จะทำให้ดัชนีการหักเหของแสงที่รอยต่อระหว่างพื้นผิวสายใยแก้วนำแสงและอากาศมีการเปลี่ยนแปลง
- ส่งผลให้ค่ามุมวิกฤตเดิมมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อรังสีของแสงเคลื่อนที่มาตกกระทบยังจุดดังกล่าวอาจส่งผลในแสงกระเจิงออกนอกแกนกลางของสายใยแก้วนำแสงได้

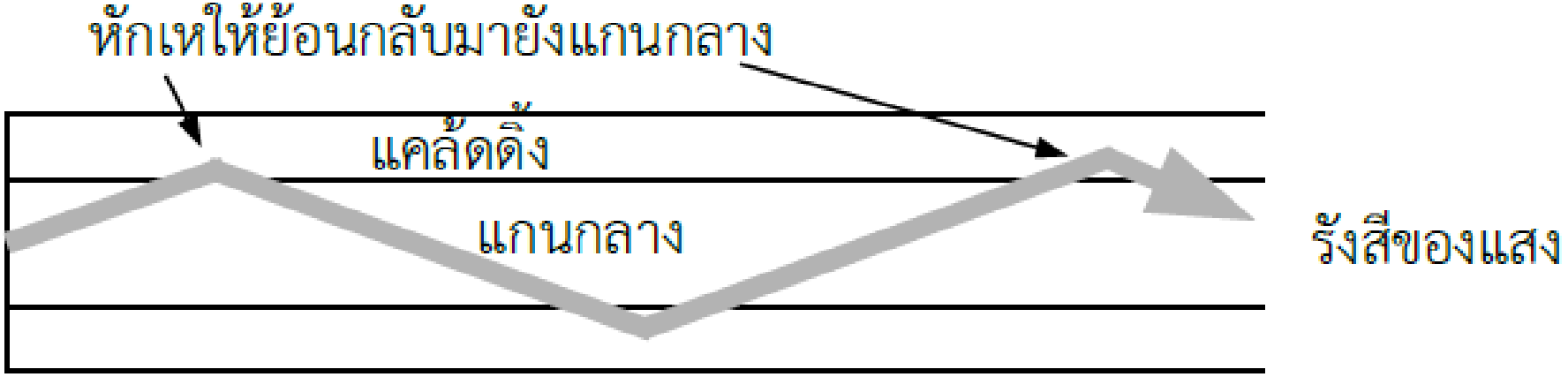


- วิธีการแก้ไขปัญหานี้ทำได้โดยการห่อหุ้มแกนกลางของสายใยแก้วนำแสงด้วยชั้นของแก้วอีกหนึ่งชั้นที่มีค่าอัตราการหักของแสงแตกต่างจากค่าดัชนีการหักแหของแกนกลาง ซึ่งชั้นของการห่อหุ้มนี้เรียกว่า แคล้ดดิ้ง (cladding)



การเคลื่อนที่ของแสงในสายใยแก้วนำแสง

- เมื่อแกนกลางของสายใยแก้วนำแสงถูกห่อหุ้มด้วยแคล้ดดิ้งจะสามารถป้องกันผลที่เกิดจากสิ่งสกปรกมาสัมผัสกับพื้นผิวของแกนกลาง อีกทั้งเมื่อรังสีของแสงที่กระทบกับผิวของแกนกลางมีค่ามากกว่ามุมวิกฤตเล็กน้อย แสงจะถูกหักเหให้ย้อนกลับมายังแกนกลางของสายใยแก้วนำแสงอีกด้วย ส่งผลให้แสงทั้งหมดเดินทางอยู่ภายในสายใยแก้วนำแสงด้วยการสะท้อนไปมา

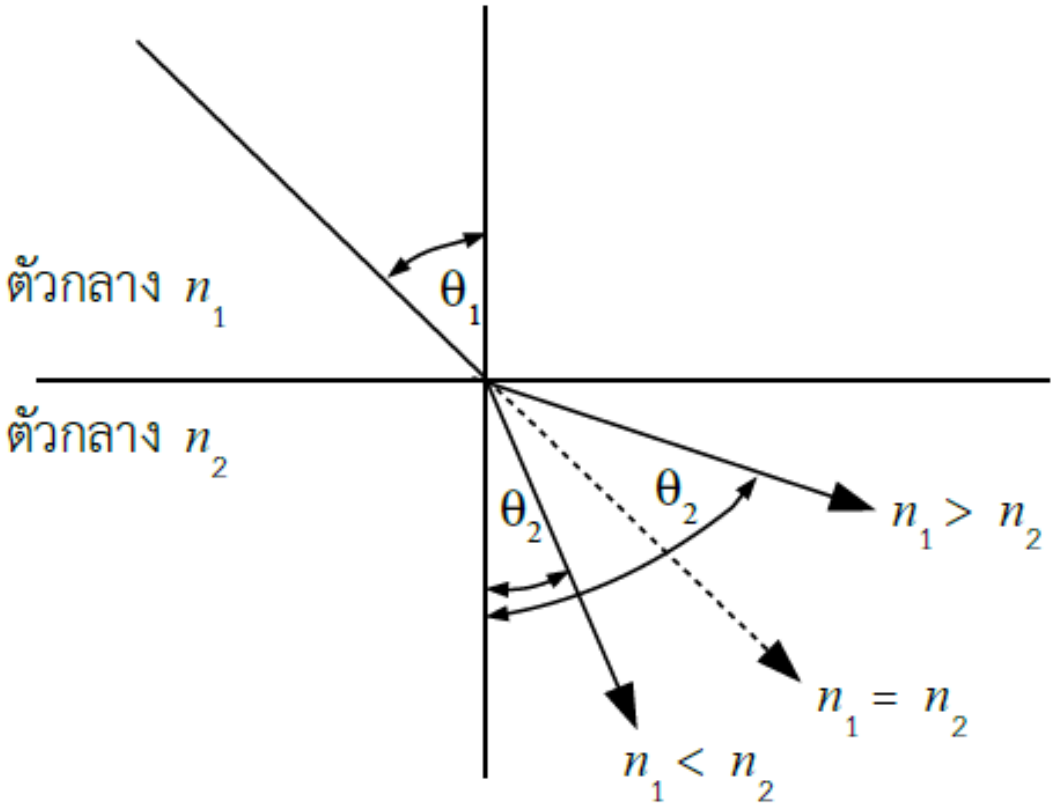


การหักเหและกฎของสเนล (Refraction and Snell's Law)

- เมื่อคลื่นแสงเดินทางไปพบรอยต่อระหว่างตัวกลางสองชนิดซึ่งมีค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง (refractive index, n) ไม่เท่ากัน
- คลื่นแสงที่เคลื่อนที่เข้าไปตัวกลางใหม่เรียกว่าคลื่นหักเห - การหักเหเกิดจากการที่คลื่นแสงมีอัตราเร็วในตัวกลางไม่เท่ากัน
- คลื่นแสงเมื่อเดินทางไปพบรอยต่ออาจเกิดการสะท้อนขึ้นได้อีกด้วย โดยการสะท้อนของคลื่นและการหักเหอาจเกิดขึ้นพร้อมกันได้
- หากรังสีของแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหน้อย ไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหมากกว่า รังสีของแสงจะหักเหเข้าสู่แนวเส้นตั้งฉากระหว่างรอยต่อของตัวกลาง
- หากรังสีของแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหมาก ไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหน้อยกว่า รังสีของแสงจะหักเหออกจากแนวเส้นตั้งฉากระหว่างรอยต่อ
- หากดัชนีการหักเหของแสงของตัวกลางทั้งสองมีค่าเท่ากัน รังสีของแสงจะเดินทางเป็นเส้นตรงไม่มีการหักเหของแสงเกิดขึ้น

การหักเหและกฎของสเนล (Refraction and Snell's Law)

- กฎของสเนล



$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

โดย n_1 คือ ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่แสงเดินทางเข้ามายังรอยต่อ

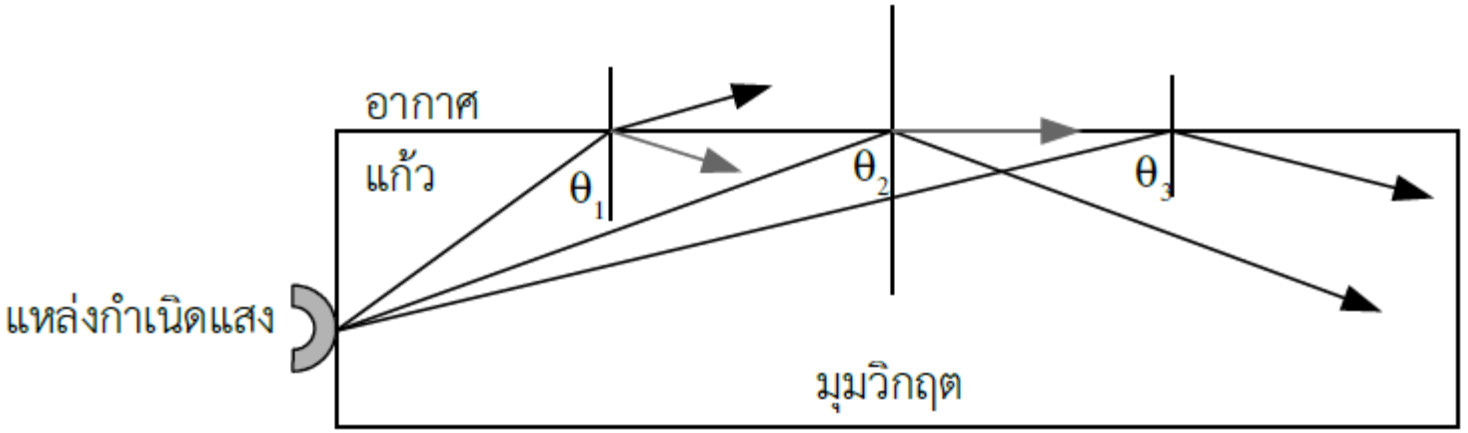
n_2 คือ ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่แสงเดินทางออกจากรอยต่อ

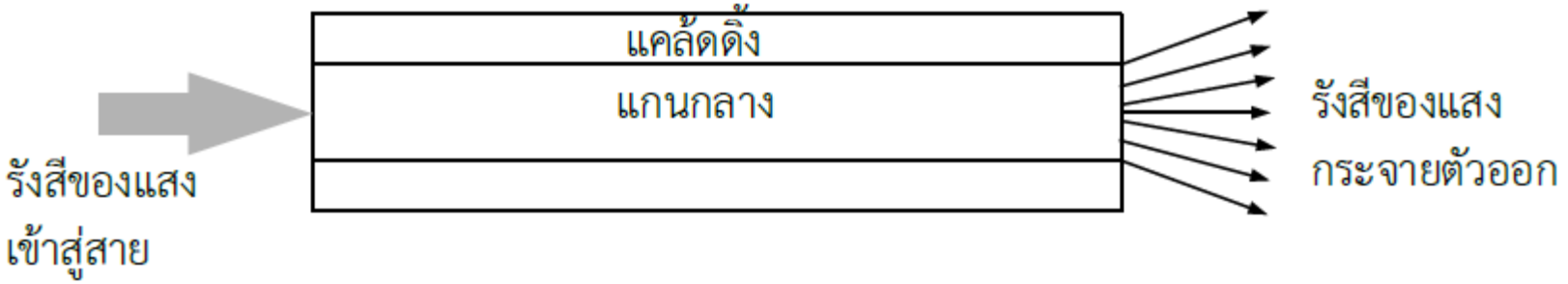
θ_1 คือ มุมของรังสีแสงที่เดินทางเข้าสู่รอยต่อของตัวกลางทั้งสองเทียบจากแนวเส้นตั้งฉากระหว่างรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง

θ_2 คือ มุมของรังสีแสงที่เดินทางออกจากรอยต่อของตัวกลางทั้งสองเทียบจากแนวเส้นตั้งฉากระหว่างรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง

มุมวิกฤต (Critical Angle)

$$\theta_c = \sin^{-1}\frac{n_2}{n_1}$$





มุมวิกฤต (Critical Angle)

ตัวอย่าง 10.1

หากสายใยแก้วนำแสงเส้นหนึ่งมีค่าดัชนีการหักเหของแกนกลางเท่ากับ 1.50 และดัชนีการหักเหของแคล้ดดิ้งเท่ากับ 1.48 คำนวณหามุมมากที่สุดของรังสีของแสงเมื่อเดินทางออกจากตัวกลางที่เป็นแก้วมายังตัวกลางที่เป็นอากาศ

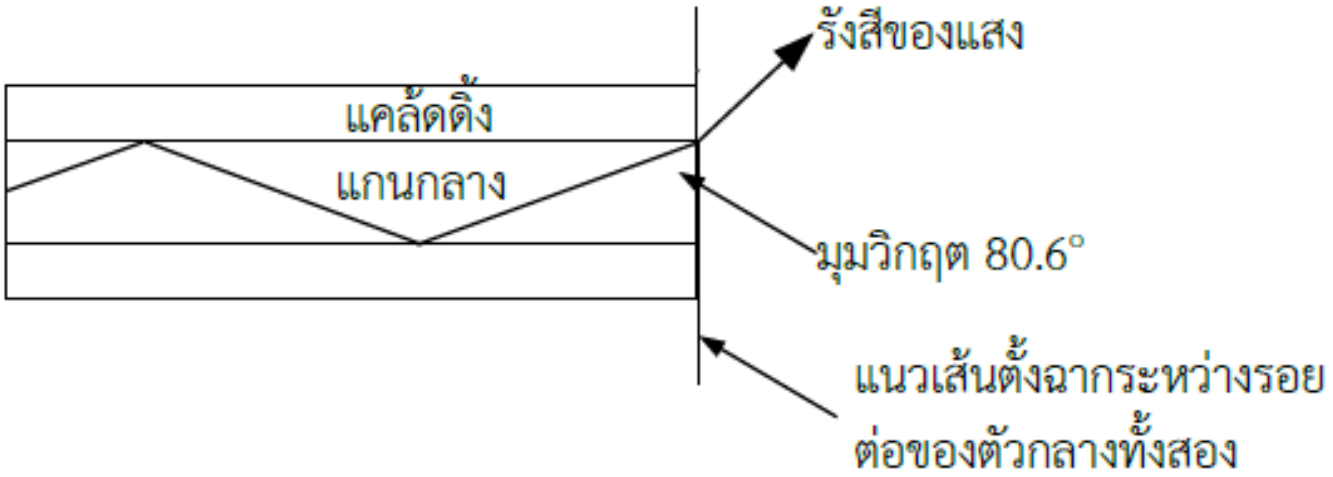
วิธีทำ

คำนวณหามุมวิกฤตที่เกิดจากแกนกลางของสายใยแก้วนำแสงและแคล้ดดิ้ง ดังภาพ

$$\theta_c = \sin^{-1}\frac{n_2}{n_1}$$

$$= \sin^{-1}\left\{\frac{1.48}{1.50}\right\}$$

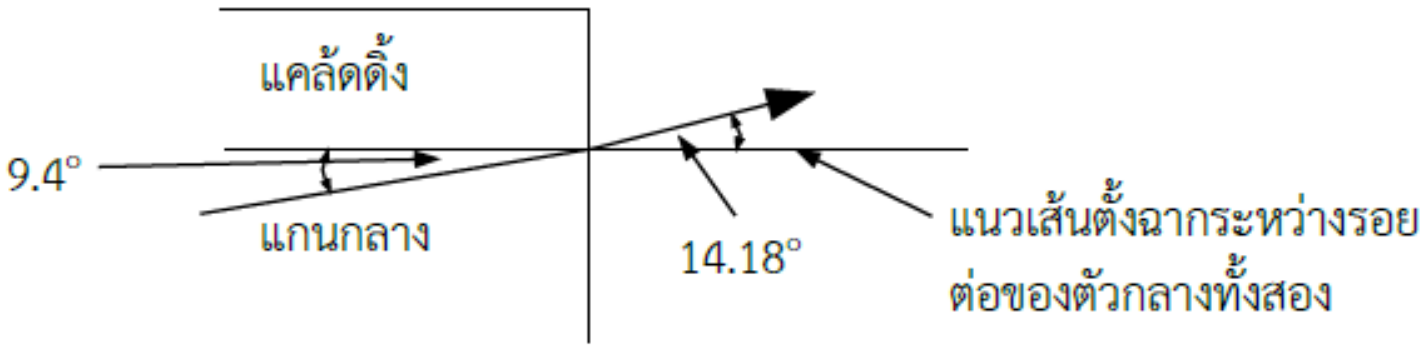
$$= 80.60^\circ$$



มุมวิกฤต (Critical Angle)

คำนวณหามุมใหม่ที่เกิดขึ้นเมื่อรังสีของแสงเดินทางจากแกนกลางของสายใยแก้วนำแสงมายังรอยต่อของตัวกลางใหม่คืออากาศ โดยจะพิจารณามุมที่เกิดขึ้นเทียบกับแนวเส้นตั้งฉากระหว่างรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง หาได้จาก $90° - 80.6° = 9.4°$ ดังแสดงในภาพที่ 10.11 และจากมุมของรังสีของแสงที่เดินทางจากแกนกลางผ่านรอยต่อสู่ตัวกลางอากาศที่มีค่าดัชนีการหักเหเท่ากับ 1.0 สามารถนำไปคำนวณหาค่ามุมหักเหของแสงเมื่อรังสีเดินทางออกสู่อากาศได้โดยใช้กฎของสเนล

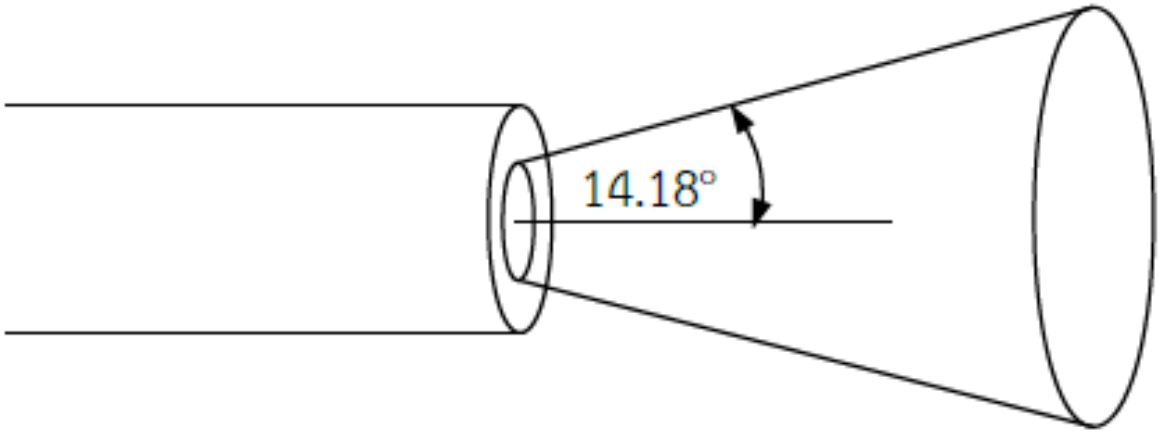
$$
\begin{aligned}
n_1 \sin\theta_1 &= n_2 \sin\theta_2 \\
1.5 \sin(9.4°) &= 1.0 \sin\theta_2 \\
1.5 \times 0.1637 &= \sin\theta_2 \\
\theta_2 &= 14.18°
\end{aligned}
$$



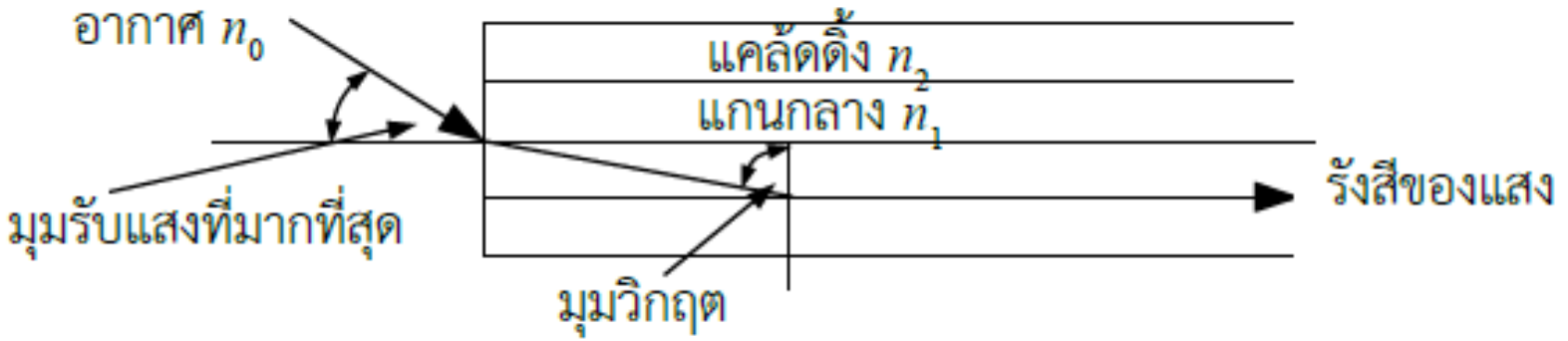
ภาพที่ 10.11: ผลการคำนวณมุมวิกฤตเมื่อรังสีของแสงเดินทางผ่านรอยต่อของตัวกลาง

มุมรับแสง (Acceptance angle)

- มีลักษณะเป็นรูปทรงโคน
- ผลการคำนวณหาค่ามุมวิกฤตของสายใยแก้วนำแสงมีค่าเท่ากับ 14.18◦ เมื่อค่าดัชนีการหักเหของแสงของแกนกลางเท่ากับ 1.50 ค่าดัชนีการหักเหของแสงของแคล้ดดิ้งเท่ากับ 1.48
- ค่าดัชนีการหักเหของแสงของอากาศเท่ากับ 1.00 โดยที่มุมมากที่สุดของรังสีของแสงเมื่อเดินทางออกจากตัวกลางที่เป็นแก้วมายังตัวกลางที่เป็นอากาศ จะมีค่าเท่ากันกับมุมรับแสงของรังสีเมื่อเดินทางจากตัวกลางที่เป็นอากาศเข้าสู่แกนกลางของสายใยแก้วนำแสงที่เป็นแก้ว ดังนั้นมุมรับแสงของสายใยแก้วนำแสงในตัวอย่างที่ 10.1 จึงมีมุมรับแสงเท่ากับ14.18◦ ด้วยเช่นกัน



ค่าความสามารถในการรับแสง (Numerical Aperture : NA)



$$n_0 \sin\theta_{max} = n_1 \sin(90^\circ - \theta_c)$$
$$(1.0)\sin\theta_{max} = n_1 \cos\theta_c$$
$$\sin\theta_{max} = n_1\sqrt{(1-\sin^2\theta_c)}$$

$$\sin\theta_{max} = n_1\sqrt{\left(\frac{n_1^2-n_2^2}{n_1^2}\right)}$$

$$NA = \sin\theta_{max} = n_1\sqrt{2\Delta}$$

โดย Δ คือผลต่างของดัชนีการหักเหของแสงที่มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสายใยแก้วนำแสง

สำหรับสายใยแก้วนำแสงชนิดเกรดอินเด็กซ์ (GI) $\Delta_{GI} = \frac{n_1^2-n_2^2}{2n_1^2}$

และสำหรับสายใยแก้วนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ $\Delta_{SI} = \frac{n_1-n_2}{n_1}$ (SI)

$$\text{acceptance angle} = \sin^{-1} NA$$

ค่าความสามารถในการรับแสง (Numerical Aperture : NA)

ตัวอย่าง 10.2

หากสายใยแก้วนำแสงชนิดเกรดอินเด็กซ์เส้นหนึ่งมีค่าดัชนีการหักเหของแกนกลางเท่ากับ 1.50 และดัชนีการหักเหของแคล้ดดิ้งเท่ากับ 1.48 คำนวณหามุมมากที่สุดของรังสีของแสงเมื่อเดินทางออกจากตัวกลางที่เป็นแก้วมายังตัวกลางที่เป็นอากาศ โดยใช้เทคนิคการหาจากค่าความสามารถในการรับแสง

วิธีทำ

คำนวณหาค่าความสามารถในการรับแสงจากดัชนีการหักเหของแกนกลางของสายใยแก้วนำแสงและแคล้ดดิ้ง

$$NA = n_1\sqrt{2\Delta_{GI}} \qquad \text{เมื่อ} \qquad \Delta_{GI}=\frac{n_1^2-n_2^2}{2n_1^2}$$

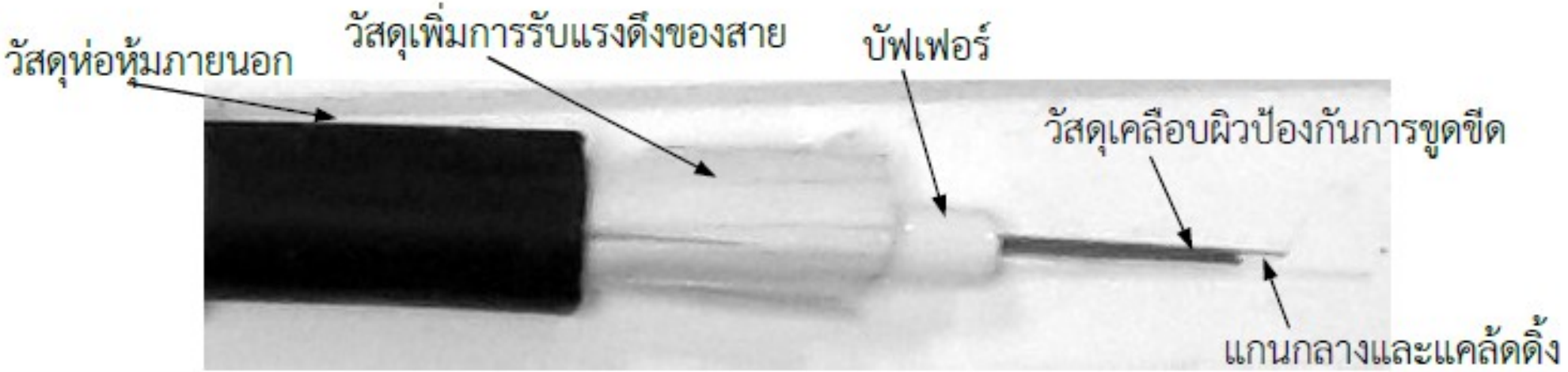
$$\begin{aligned} NA &= \sqrt{n_1^2-n_2^2} \\ &= \sqrt{1.50^2-1.48^2} \\ &= 0.244 \end{aligned}$$

คำนวณหาค่ามุมรับแสงได้

ค่ามุมรับแสงที่มากที่สุด $\theta_{max} = \sin^{-1}0.244$

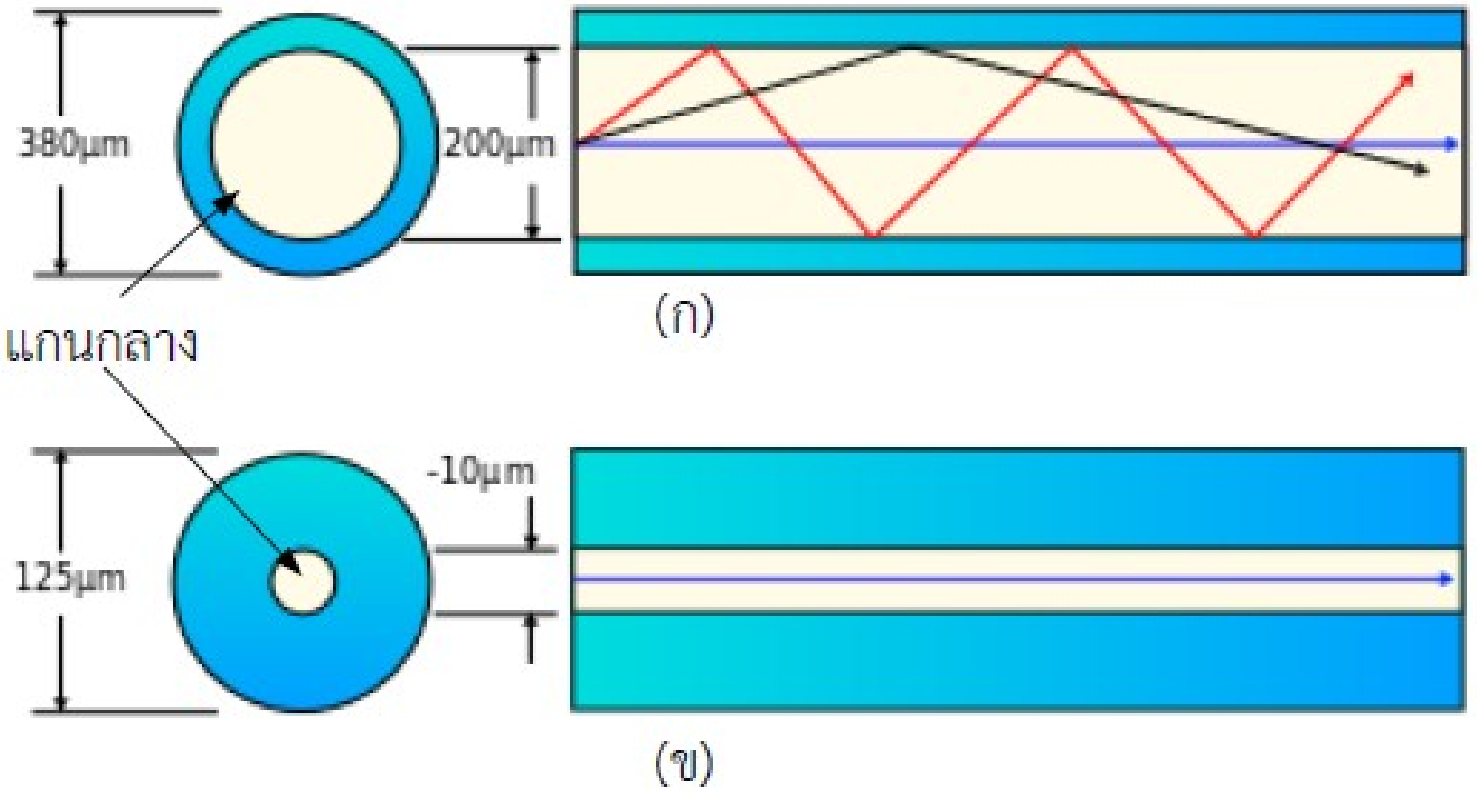
$= 14.12^\circ$

โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสง

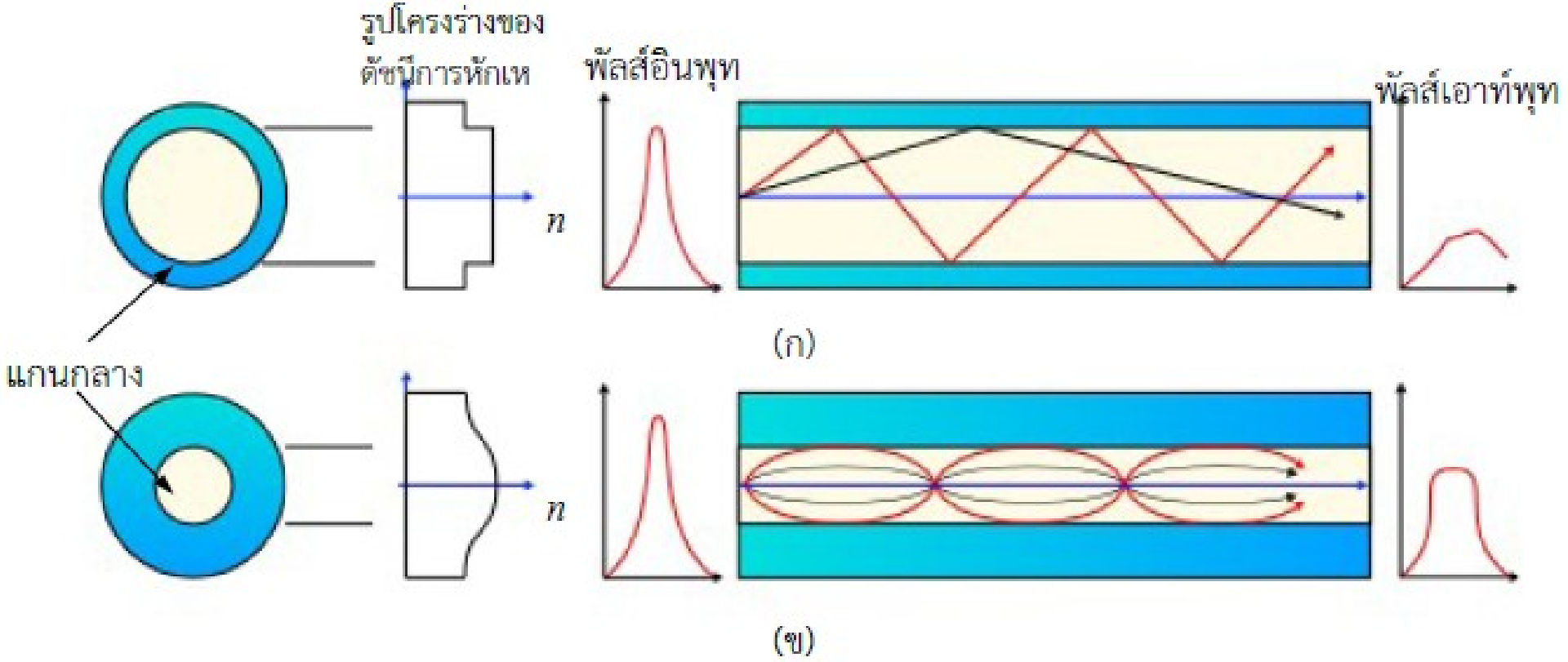


โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสง - ภายนอกอาคาร

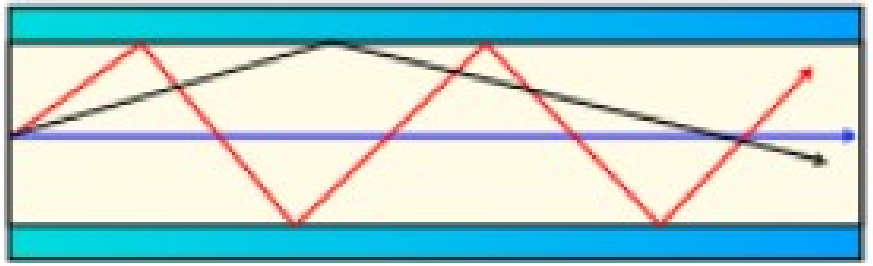
โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสง - โหมดการเดินทางของแสง

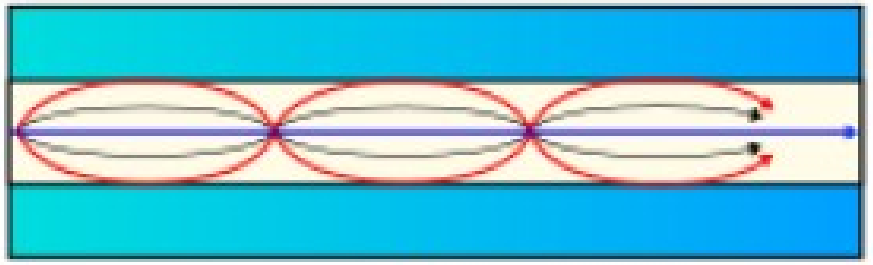


โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสง - ดัชนีการหักเห

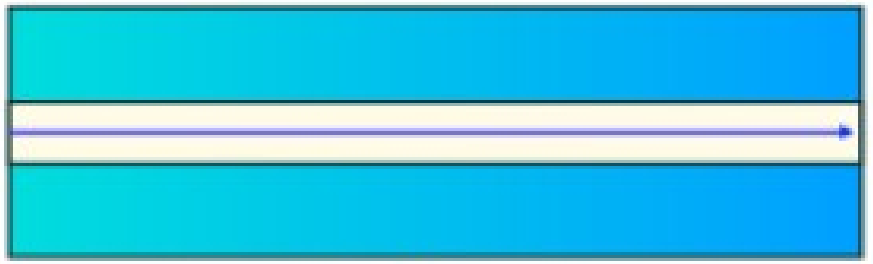


การจำแนกชนิดของสายใยแก้วนำแสง





(ข)

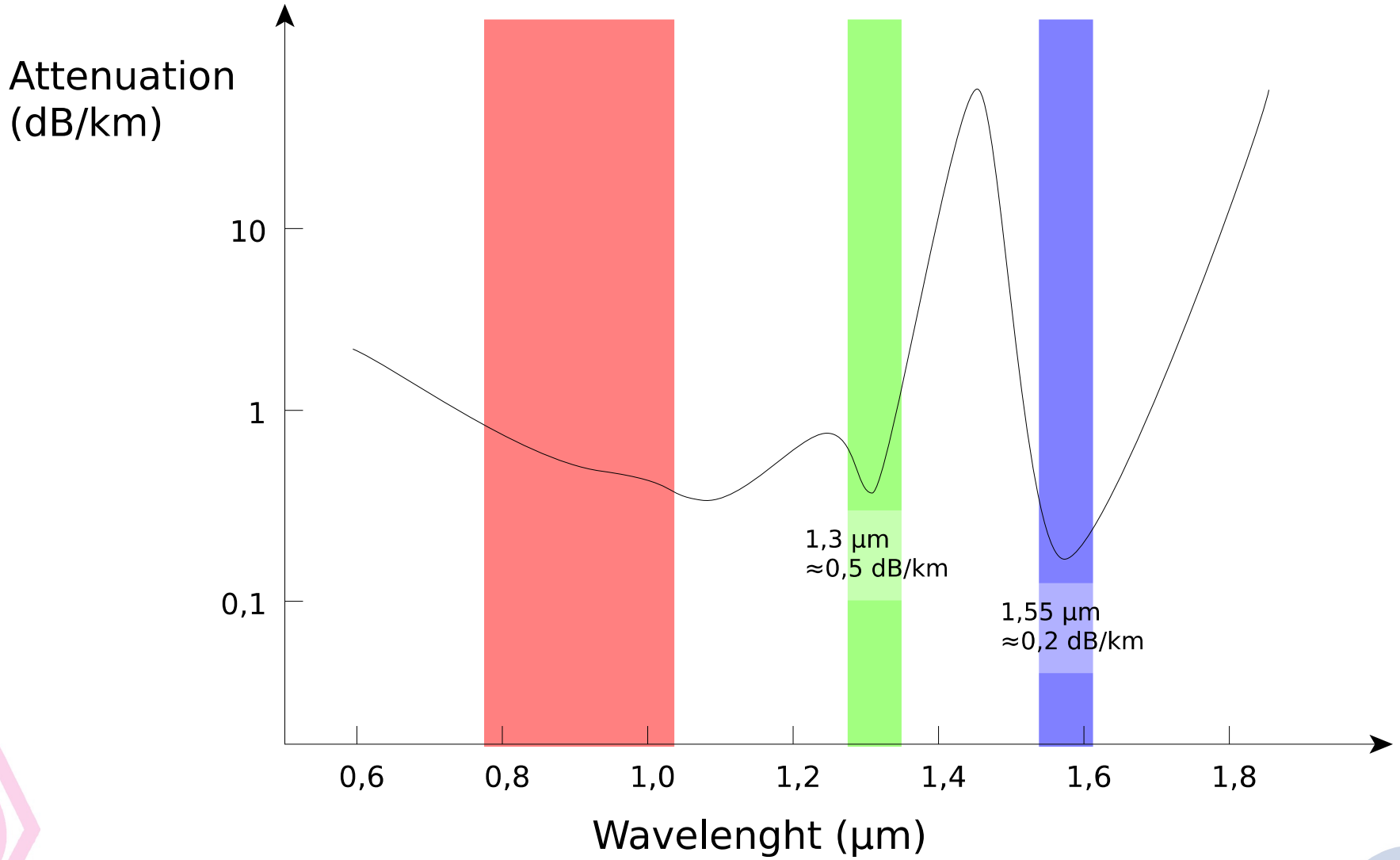


(ค)

*ภาพที่ 10.18: ชนิดของสายใยแก้วนำแสง (ก) หลายโหมดดัชนีเป็นขั้น (ข) ชนิดหลายโหมดดัชนีกระจายระดับ และ(ค) ชนิดโหมดเดียวดัชนีเป็นขั้น

การสูญเสียในสายใยแก้วนำแสง

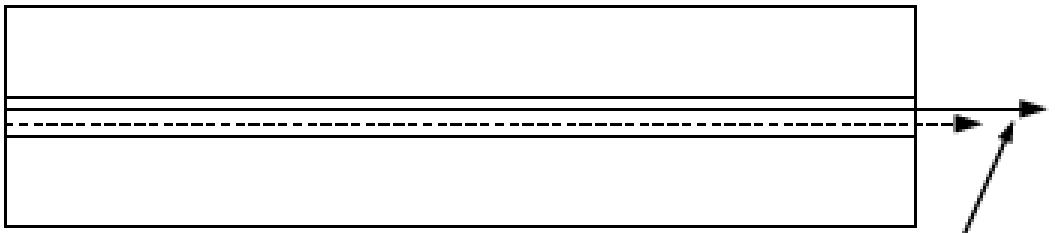
- **การลดทอนแสงในสาย** - เกิดได้จากสองสาเหตุหลักคือ การดูดซับแสง (absorption) และการกระเจิงแสง (scattering)



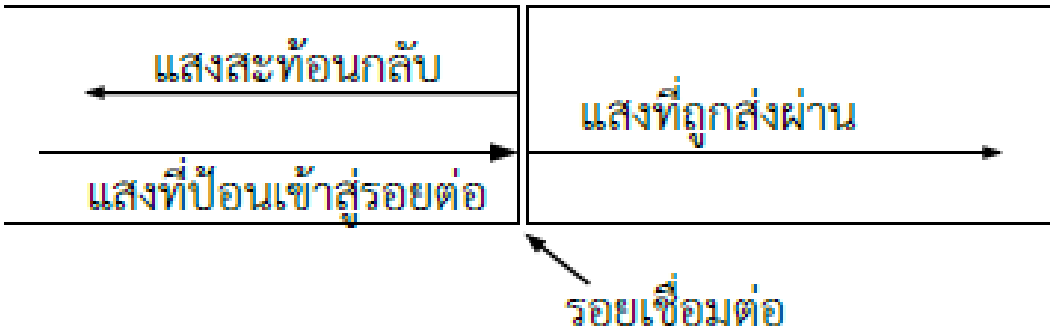
การสูญเสียในสายใยแก้วนำแสง

- **การแพร่กระจายจากแสงหลายโหมด (Modal Dispersion)** - สาเหตุมาจากในสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดดัชนีเป็นขั้น รังสีของแสงที่ป้อนเข้าสู่แกนกลางของสายใยแก้วมีหลายเส้นทางหรือหลายโหมด และแต่ละเส้นทางของแสงเดินทางไปถึงปลายทางด้วยเวลาไม่เท่ากัน

- **การแพร่กระจายแถบสีของแสง (chromatic dispersion)**
  - แสงแต่ละสีหรือแต่ละความยาวคลื่นมีความเร็วในการเดินทางไม่เท่ากัน
  - แหล่งกำเนิดแสงชนิดไดโอดเปล่งแสงมีการสร้างสเปกตรัมของแสงที่กว้างและรังสีเกิดขึ้นกระจายหลายทิศทาง แตกต่างจากแหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์ที่มีการสร้างสเปกตรัมของแสงในย่านที่แคบกว่า



การสูญเสียจากการเชื่อมต่อ



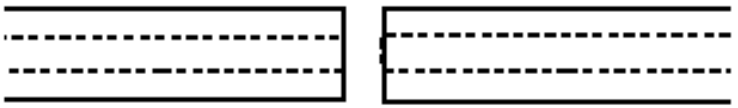
(ก) ชนิด SC

(ข) ชนิด ST

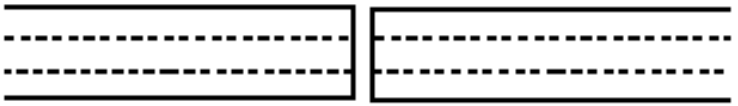
(ค) ชนิด LC

ภาพที่ 10.22: ตัวอย่างคอนเนกเตอร์สายใยแก้วนำแสง

การสูญเสียจากการเชื่อมต่อ

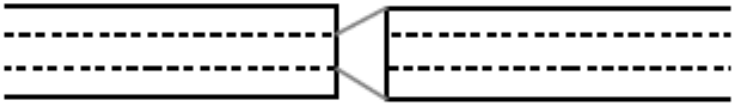


ระยะห่างระหว่างปลายสาย

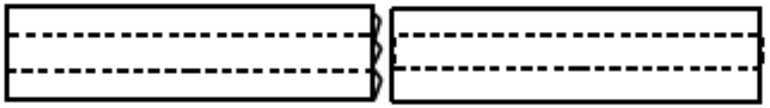


รูปร่างแกนกลางแตกต่างกัน

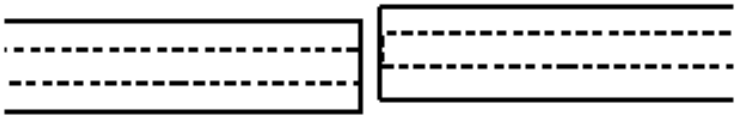
ปลายสายเกิดมุมเฉียง



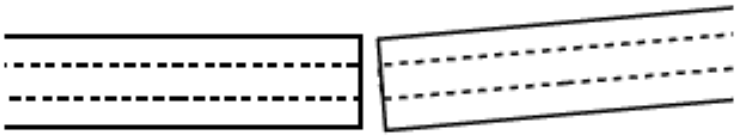
ค่า NA แตกต่างกัน



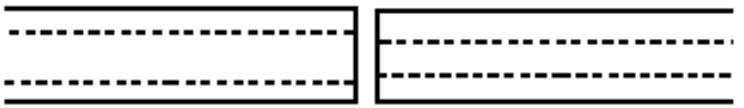
รอยขรุขระที่ผิวปลายสาย



แกนกลางเหลื่อมกัน



ปลายสายไม่อยู่ในระนาบ



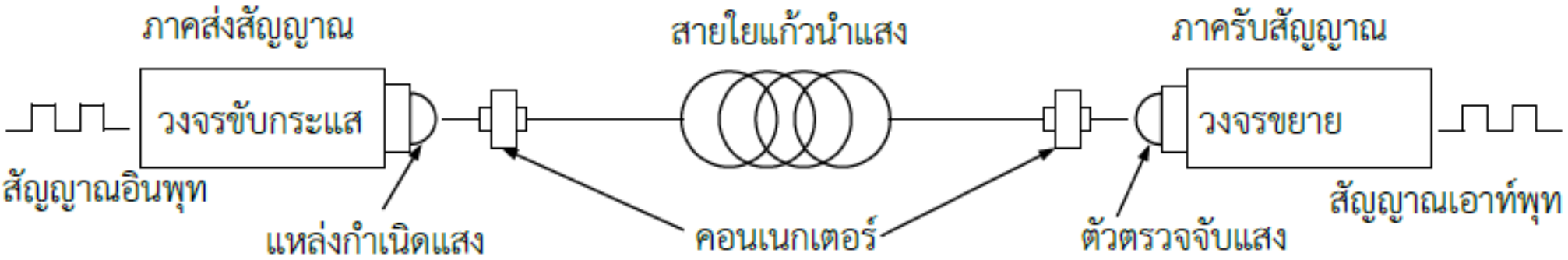
ขนาดแกนกลางแตกต่างกัน

การสูญเสียจากการเชื่อมต่อ

ภาพที่ 10.24: ตัวอย่างเครื่องเชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงด้วยการหลอมละลาย

ระบบการสื่อสารด้วยสายใยแก้วนำแสง

- ส่วนประกอบ



$$P_r = P_t - P_{losses}$$

โดย P_r คือค่ากำลังงานที่รับได้จากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ

P_t คือค่ากำลังงานที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดแสง

P_{losses} คือค่าการสูญเสียกำลังงานรวมที่เกิดขึ้นจากส่วนต่างๆในระบบ

การคำนวณด้านกำลังและความสูญเสีย

ตัวอย่าง 10.3

หาค่ากำลังงานแสงที่รับได้ที่ปลายทางในหน่วย dBm และวัตต์ (watt) ของการเชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงที่มีค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้

- ระยะทางการเชื่อมต่อ 20 km
- กำลังงานเอาท์พุทจากแหล่งกำเนิดแสงเท่ากับ 30 mW
- ถูกต่อเชื่อมทุกๆ 5 km โดยมีค่าความสูญเสียในอุปกรณ์เชื่อมต่อแต่ละตัวเท่ากับ 2 dB
- ค่าความสูญเสียในสายเท่ากับ 0.5 dB/km
- ค่าความสูญเสียระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและสายเท่ากับ 1.9 dB
- ค่าความสูญเสียระหว่างสายและอุปกรณ์ตัวรับแสงเท่ากับ 2.1 dB
- ไม่มีค่าความสูญเสียเนื่องจากสายถูกโค้งงอ

วิธีทำ

กำลังงานเอาท์พุทจากแหล่งกำเนิดแสง = 10 log (30 mW / 1 mW) = 14.8 dBm

ค่าความสูญเสียในสายรวม = 20 km (0.5 dB / km) = 10 dB

ค่าความสูญเสียในอุปกรณ์เชื่อมต่อรวม = 3 (2 dB) = 6 dB

ค่าการสูญเสียกำลังงานรวมที่เกิดขึ้นจากส่วนต่างๆในระบบ = 10 + 6 + 1.9 + 2.1 dB = 20 dB

ดังนั้น ค่ากำลังงานแสงที่รับได้ที่ปลายทางในหน่วย dBm

P_r = 14.8 dBm – 20 dB = - 5.2 dBm

และค่ากำลังงานแสงที่รับได้ที่ปลายทางในหน่วยวัตต์ = $10^{(-5.2 \text{ dBm} / 10)}$ x 1 mW = 301.99 µW

การคำนวณด้านกำลังและความสูญเสีย

ตัวอย่าง 10.4

หาค่ากำลังงานแสงต่ำสุดที่อุปกรณ์กำเนิดแสงต้องสร้างขึ้นเพื่อสามารถมีกำลังงานในการส่งเพียงพอสำหรับระบบที่มีค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้

- ระยะทางการเชื่อมต่อ 3.84 km
- กำลังงานแสงต่ำสุดที่อุปกรณ์รับสัญญาณสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องมีค่าเท่ากับ -25 dBm
- ถูกต่อเชื่อมด้วยคอนเนคเตอร์สองตัวโดยมีค่าความสูญเสียในอุปกรณ์เชื่อมต่อแต่ละตัวเท่ากับ 1 dB
- ถูกต่อเชื่อมด้วยการสไปซ์โดยมีค่าความสูญเสียเท่ากับ 0.2 dB
- ค่าความสูญเสียในสายเท่ากับ 3.5 dB/km
- ไม่มีค่าความสูญเสียเนื่องจากสายถูกโค้งงอ

วิธีทำ

ค่าความสูญเสียในสายรวม = 3.84 km (3.5 dB / km) = 13.44 dB

ค่าความสูญเสียในอุปกรณ์เชื่อมต่อรวม = 2 (1 dB) + 0.2 dB = 2.2 dB

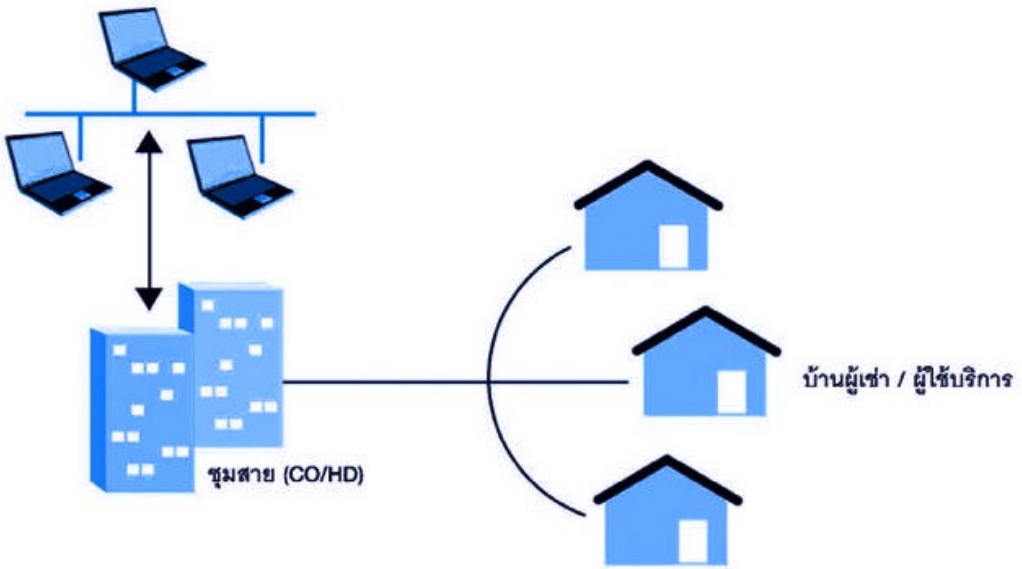
ค่าการสูญเสียกำลังงานรวมที่เกิดขึ้นจากส่วนต่างๆในระบบ = 13.44 dB + 2.2 dB = 15.64 dB

ดังนั้น ค่ากำลังงานแสงต่ำสุดที่อุปกรณ์กำเนิดแสงต้องสร้างขึ้นในหน่วย dBm

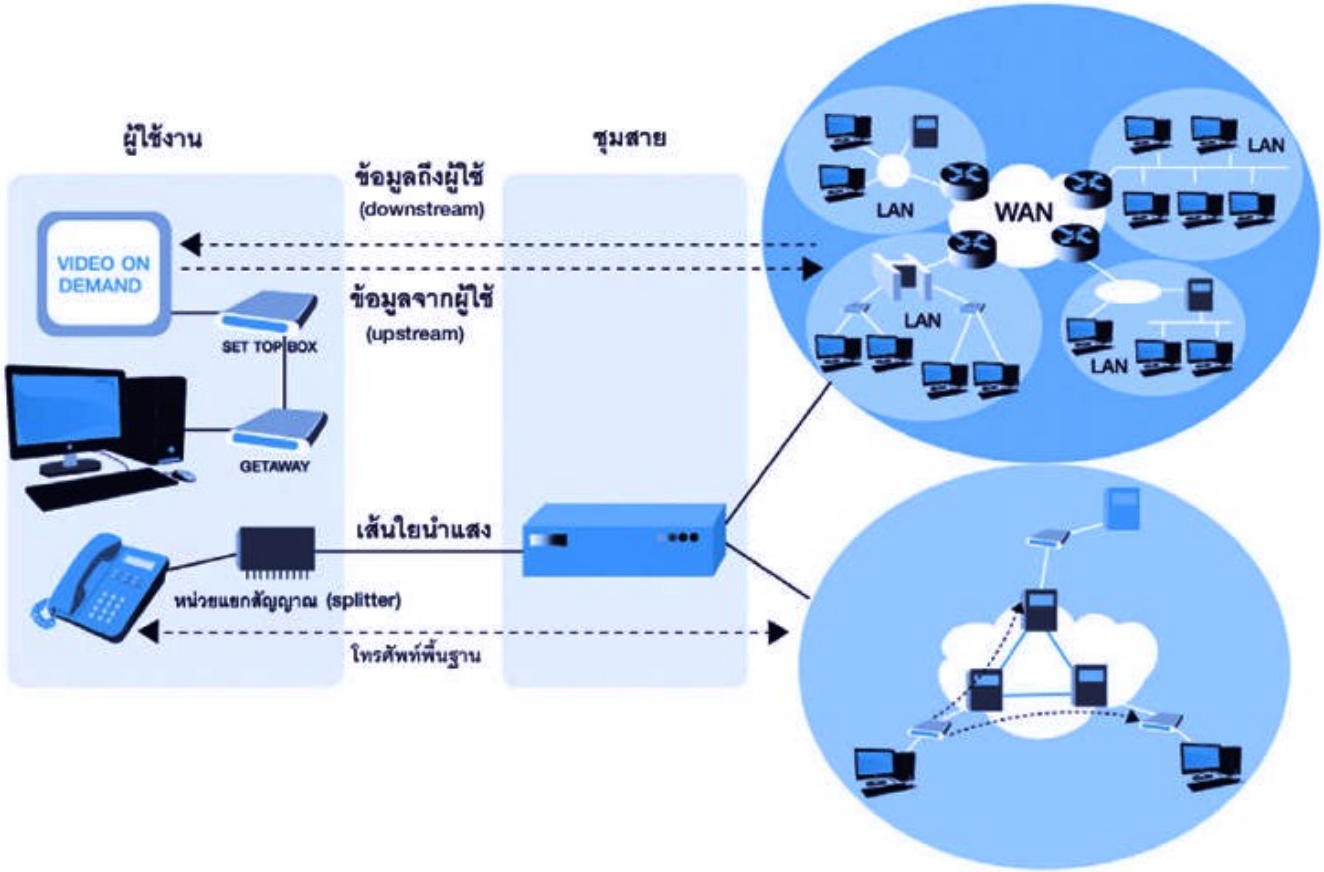
P_t= -25 dBm + 15.64 dB = - 9.36 dBm

และค่ากำลังงานแสงที่อุปกรณ์กำเนิดแสงต้องสร้างขึ้นในหน่วยวัตต์ = $10^{(-9.36 \text{ dBm} / 10)}$ x 1 mW = 115.88 µW

Fiber-to-the-Home (FTTH)

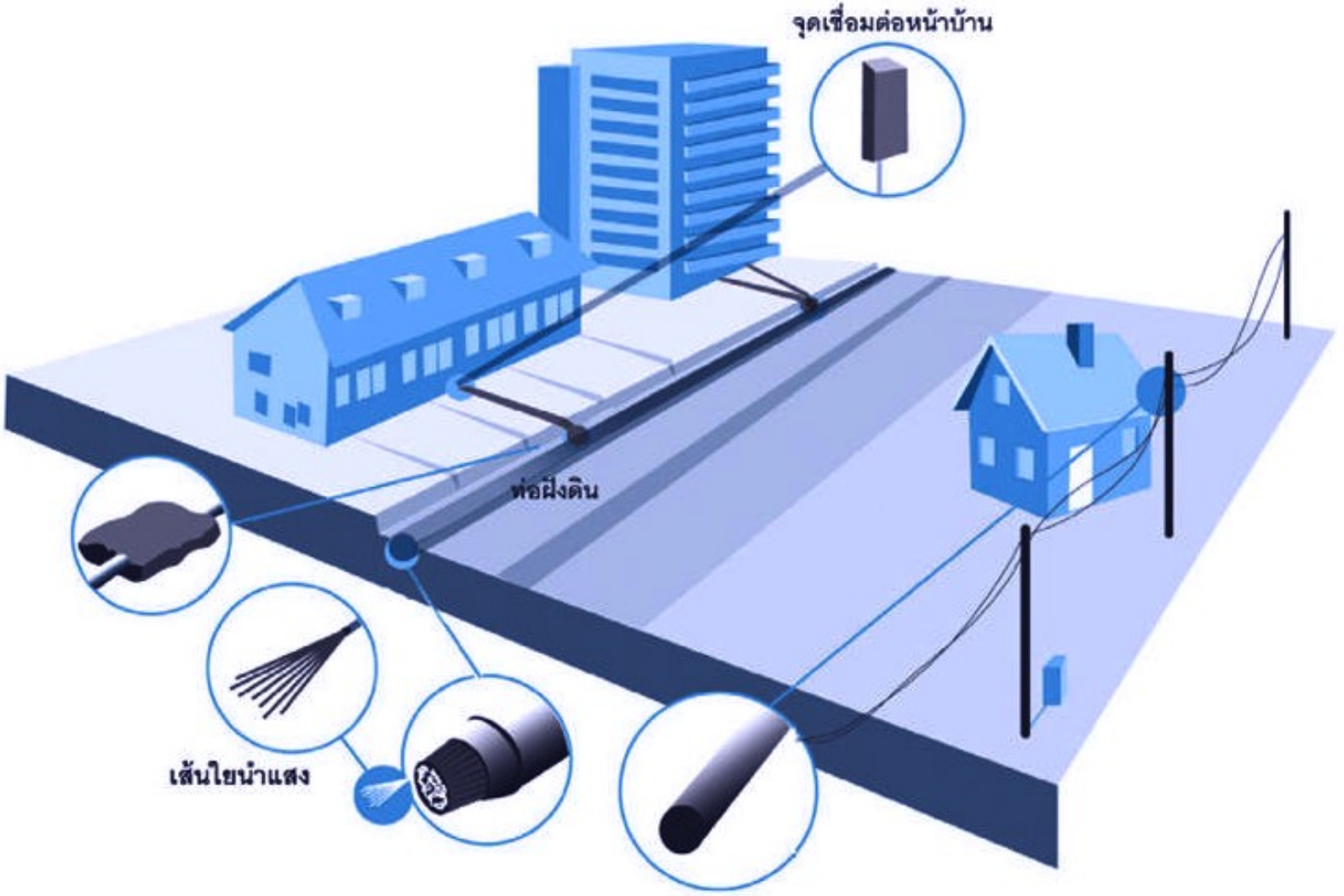


รูปที่ ๔.๑ โครงสร้างพื้นฐานของระบบ FTTH



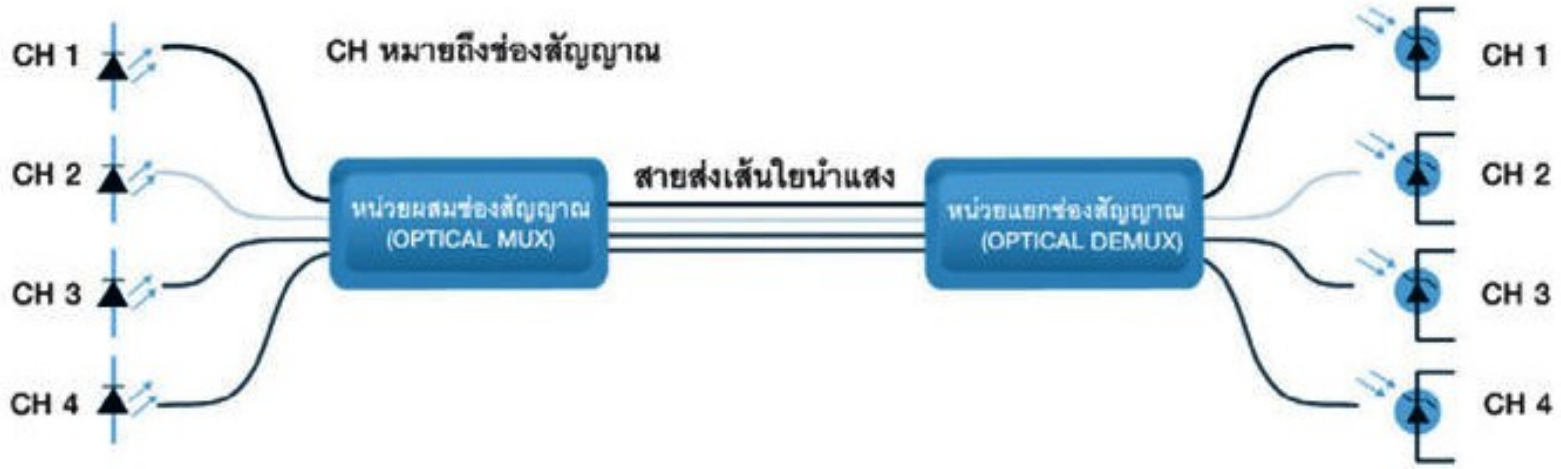
รูปที่ ๔.๒ รูปแบบการสื่อสัญญาณของ FTTH และการกระจายสัญญาณภายในบ้านผู้ใช้ (ซ้าย)

Fiber-to-the-Home (FTTH)



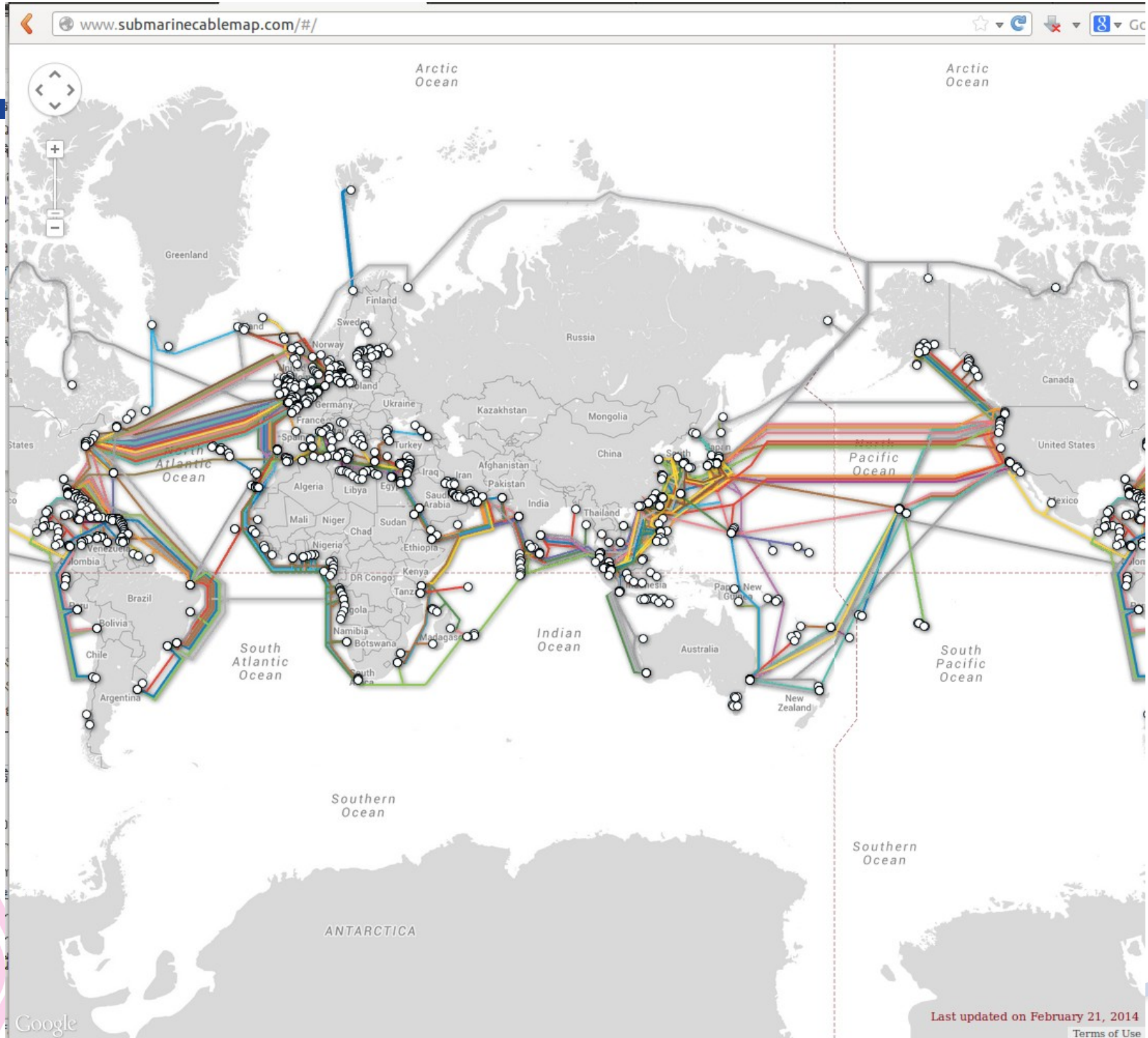
รูปที่ ๔.๓ ระบบข่ายสายเส้นใยนำแสงในระบบ FTTH ที่มีการเชื่อมโยงเส้นใยนำแสงทั้งที่เป็นแบบแขวนอากาศหรือฝังดินไปยังบ้านผู้ใช้โดยตรง

Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)



รูปที่ ๔.๑ หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสัญญาณแสงแบบหลายช่องสัญญาณ หรือ WDM

ปี พ.ศ. (ค.ศ.)	ลำดับเหตุการณ์สำคัญ
๒๕๕๐ (2007)	นำระบบ DWDM มาใช้ในเชิงพาณิชย์ สามารถส่งข้อมูลโดยมีความเร็วเทอราบิตต่อวินาทีหรือ Tbps (Terabit per sec)


www.submarinecablemap.com/#/
Arctic Ocean
Arctic Ocean
Greenland
Finland
Norway
Russia
Canada
Germany
Ukraine
Kazakhstan
Mongolia
China
United States
France
Turkey
North Atlantic Ocean
Afghanistan
Pakistan
Iraq
Iran
Algeria
Libya
Egypt
Saudi Arabia
India
Thailand
North Pacific Ocean
Mexico
Mali
Niger
Sudan
Chad
Nigeria
Ethiopia
Kenya
DR Congo
Tanzania
Angola
Namibia
Botswana
Madagascar
Brazil
Bolivia
Chile
Argentina
South Atlantic Ocean
Indian Ocean
Australia
New Zealand
South Pacific Ocean
Southern Ocean
Southern Ocean
ANTARCTICA
Google
Last updated on February 21, 2014
Terms of Use

Submarine Cable Network in Thailand

รูปที่ ๔.๑ สถานีเคเบิลใต้น้ำในประเทศไทย (พ.ศ. ๒๕๒๖)

ปี พ.ศ. (ค.ศ.)	ลำดับเหตุการณ์สำคัญ
๒๕๐๗ (1964)	ประเทศไทยเริ่มใช้คู่สายเคเบิลใต้น้ำ
๒๕๑๗ (1974)	ประเทศไทยสร้างข่ายระบบเคเบิลใต้น้ำเชื่อมโยงประเทศในกลุ่มอาเซียน ๕ ประเทศ ได้แก่ สิงคโปร์ ฟิลิปปินส์ อินโดนีเซีย มาเลเซีย ไทย
๒๕๒๓ (1980)	ประเทศไทยได้ร่วมลงทุนในระบบเคเบิลใต้น้ำช่วงอินโดนีเซีย-สิงคโปร์
๒๕๒๖ (1983)	ประเทศไทยได้ร่วมลงทุนในระบบเคเบิลใต้น้ำช่วงสิงคโปร์-มาเลเซีย-ไทย
๒๕๓๑ (1988)	การสื่อสารแห่งประเทศไทยจัดสร้างโครงการเคเบิลใต้น้ำเส้นใยนำแสงมาเลเซีย-ไทย
๒๕๔๑ (1998)	เปิดให้บริการโครงการเอเชียอาคเนย์-ตะวันออกกลาง-ยุโรปตะวันตก ๓ (SEA-ME-WE 3)
๒๕๔๒ (1999)	ก่อตั้งโครงการเคเบิลใต้น้ำแฟล็ก (FLAG) โดยบริษัท ไนเน็กซ์ ซิสเต็ม (NyNex System)

Submarine Cable Network in Thailand