

อุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำเข้ายังหัวต่อของโครงข่าย เส้นใยแก้วโดยใช้การตรวจจับสัญญาณที่สูง

Monitoring of Water Diffusion into the Enclosures Optical Fiber Network by High Loss Detection

กิจพัฒน์ ศรีอรทัยวรรณ* นฤฤทธิ์สมเจริญ สำภาพล** สุวิพล สิริพิชิวภาค*

* สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
** ส่วนนวัตกรรมระบบคอนน็อกและระบบป้องกันสถาบันนวัตกรรม ทีโอที บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน)

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนออุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำเข้ายังหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วโดยใช้การตรวจจับการสูญเสียสัญญาณที่สูง เพื่อที่จะป้องกันผลเสียที่จะเกิดขึ้นกับเส้นใยแก้ว หลักการทำงานของอุปกรณ์ เมื่อมีน้ำซึมผ่านเข้ามายังอุปกรณ์เฝ้าระวังน้ำจะทำให้เกิดการโค้งงอของเส้นใยแก้ว ทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณภายในเส้นใยแก้ว และจะต้องมีค่าสูงพอที่จะสามารถตรวจวัดได้อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการสูญเสียสัญญาณภายในเส้นใยแก้วที่เกิดขึ้นจากในกรณีอื่น โดยที่การตรวจสอบน้ำเข้าหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วนั้นต้องใช้ควบคู่กับ optical Time Domain Reflectometer (OTDR) จะทำให้สามารถตรวจสอบตำแหน่งที่มีการแทรกซึมของน้ำที่เข้ามายังหัวต่อได้อย่างชัดเจน
คำสำคัญ: ความโค้งงอความใหญ่, OTDR, หัวต่อ

Abstract

In this paper, we present the monitoring of water diffusion into the enclosures optical fiber network by high loss detection. The principle of system considers the matter that the optical fiber will be bended when the water diffuses into enclosures. For this reason, the power loss will generate in the system and it must be high enough for the precision measurement to compare with the other loss. Then, the optical time domain reflectometer (OTDR) must be used together. Finally, the position of the water diffusion in the system will be detected.

Key Words : Macrobending, OTDR, Closure

1. บทนำ

ปัจจุบันนี้ความต้องการในการใช้งานอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง(Hi-Speed internet) นั้นมีมากขึ้น จึงทำให้มีการขยายปริมาณโครงข่ายเส้นใยแก้วมากขึ้น เพราะว่าเส้นใยแก้ว นั้นมีข้อดีคือ มีอัตราการส่งข้อมูลสูงมีการลดทอน

สัญญาณต่ำ และไม่ถูกรบกวนโดยสัญญาณทางไฟฟ้า และมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา เป็นต้น เส้นใยแก้วจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างชุมสายย่อยๆกับชุมสายใหญ่ หรือระหว่างชุมสายย่อยด้วยกันเอง หรือระหว่างชุมสายย่อยไปยังบ้านผู้ใช้งานโดยตรงที่เรียกว่า Fiber To The Home (FTTH) จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เห็นว่าถ้าเกิดการเสียหายขึ้นกับเส้นใยแก้วจะทำให้ระบบการสื่อสารนั้นได้รับผลกระทบอย่างรุนแรง เพราะฉะนั้นการที่จะทำให้ระบบการสื่อสารสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องจำเป็นต้องมีการป้องกันดูแลเส้นใยแก้วเป็นอย่างดี

ภายในหัวต่อของเส้นใยแก้วจะเป็นจุดเชื่อมต่อกันของเส้นใยแก้ว ถ้าเกิดมีน้ำสามารถแทรกซึมผ่านเข้ามาภายในตัวต่อได้นั้น จะทำให้เกิดความเสียหายกับเส้นใยแก้วโดยตรงและจะส่งผลกระทบต่อโครงข่ายการสื่อสาร เพราะว่าบริเวณภายในหัวต่อของเส้นใยแก้วจะไม่มีสารที่ใช้ในการป้องกันการแทรกซึมของน้ำ น้ำที่แทรกซึมเข้ามายังหัวต่อของเส้นใยแก้วจะทำให้เกิดสิ่งสกปรกที่หุ้มเส้นใยแก้วเสื่อมสภาพเร็วขึ้น และจะทำให้เส้นใยแก้วแตกหักได้ [4]

อุปกรณ์การตรวจสอบน้ำเข้าสู่หัวต่อที่มีอยู่ในปัจจุบันนั้นมีการสูญเสียสัญญาณในเส้นใยแก้วที่ไม่สูงพอที่จะทำให้ระบบตรวจจับจะทำการแจ้งเตือน เนื่องจากว่าในพื้นที่แต่ละพื้นที่นั้นมีการตั้งค่าการแจ้งเตือนนั้นไม่เท่ากัน ในบางพื้นที่มีการตั้งค่าไว้ไม่สูงระบบการแจ้งเตือนก็จะสามารถทำงานได้ แต่ในบางพื้นที่นั้นอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำเข้ายังหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วได้ทำงานแล้ว แต่ว่าค่าการสูญเสียสัญญาณยังไม่ถึงจุดที่แจ้งเตือนไว้ จึงทำให้ต้องมีการออกแบบอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำเข้ายังหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วแบบ high loss ขึ้น

2. การสูญเสียพลังงานแสงในเส้นใยแก้ว

การสูญเสียพลังงานแสงที่เกิดจากการโค้งงอของเส้นใยแก้วมี 2 ลักษณะคือ

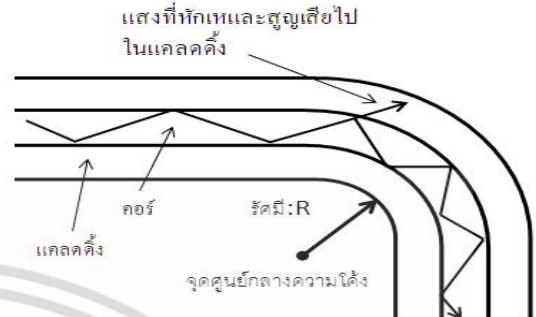
2.1 ความโค้งขนาดเล็ก (Microbending)

ลักษณะความโค้งของเส้นใยแก้วแบบนี้เกิดขึ้นในขบวนการผลิตเส้นใยแก้ว ความโค้งขนาดเล็กไม่สามารถสังเกตได้จากภายนอกของเส้นใยแก้ว

2.2 ความโค้งขนาดใหญ่ (Macro bending)

ความโค้งขนาดใหญ่เกิดจากการจัดวางเส้นใยแก้วไม่ได้อยู่ในแนวเส้นตรง อาจจำเป็นต้องจัดเส้นใยแก้วให้

โค้งงอไปมา เช่น การม้วนเคเบิลภายในบ่อพักสาย ซึ่งถือเป็นสิ่งจำเป็นที่ยากจะหลีกเลี่ยงในทางปฏิบัติ ความโค้งขนาดใหญ่สามารถสังเกตได้จากภายนอกของเส้นใยแก้ว



รูปที่ 1 การกระจายพลังงานแสงออกจากความโค้งขนาดใหญ่ของเส้นใยแก้ว

ในบทความนี้จะพิจารณา ความโค้งขนาดใหญ่ที่มีรัศมีความโค้งมีค่าน้อย

จากรูปที่ 1 เมื่อแสงเดินทางไปถึงจุดที่เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ แสงจะเดินทางไปถึงรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลดดิ้ง ในลักษณะของมุมตกกระทบที่ทำให้เกิดการสะท้อนและหักเหตามกฎของสเนลล์ (Snell's Law) หากเส้นใยแก้วมีลักษณะความโค้งมีค่าน้อย หรือมีรัศมีความโค้งมากๆ แสงหักเหที่จุดนี้อาจไม่เกิดขึ้นและปรากฏการสะท้อนกลับหมด (Total Internal Reflection : TIR) ยังคงมีอยู่ ทำให้ไม่มีการสูญเสียความเข้มของแสง แต่ถ้าเส้นใยแก้วมีรัศมีความโค้งมีค่าน้อย จนทำให้เกิดการหักเหของแสงเข้าไปในแคลดดิ้ง แสงที่สะท้อนและเดินทางต่อภายในคอร์ของเส้นใยแก้ว จะมีค่าลดลงตามสัดส่วนที่เสียไปกับแสงหักเห

ค่าการสูญเสียพลังงานแสง (Power Loss) ในเส้นใยแก้วที่เกิดจากความโค้งขนาดใหญ่ สามารถคำนวณหาค่าโดยประมาณได้จากสมการ (1) [1] และเมื่อแสงเดินทางผ่านเส้นใยแก้วที่มีลักษณะความโค้งเช่นเดียวกัน แสงที่มีความยาวคลื่นมากจะมีค่าการสูญเสียสัญญาณมากกว่าแสงที่มีความยาวคลื่นน้อย [2]

$$\frac{P_2}{P_1} = 1 - \left(\frac{\alpha + 2}{2\alpha\Delta} \right) \left[\frac{d}{R} + \left(\frac{3\lambda}{4\pi n_2 R} \right)^2 \right] \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{NA^2}{2n_1^2} \quad (2)$$

เมื่อ P_2 คือค่าพลังงานแสงด้านรับ (mW)

P_1 คือค่าพลังงานแสงด้านส่ง (mW)

α คือค่าเฟกเตอร์ความลาดเอียงของกราฟที่

เกี่ยวข้องกับค่าดัชนีหักเหของแสง

Δ คือค่าความแตกต่างของดัชนีหักเห (Refractive index difference) ระหว่าง คอร์และแคลดดิ้งของเส้นใยแก้ว

d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์

R คือรัศมีความโค้งของเส้นใยแก้ว

λ คือความยาวคลื่นของแสง

n_1 คือค่าดัชนีหักเหของแสงในคอร์

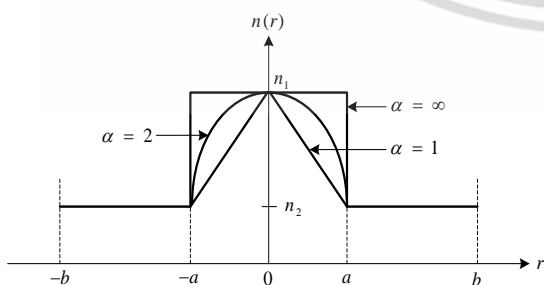
n_2 คือค่าดัชนีหักเหของแสงในแคลดดิ้ง

NA คือนิวมอริคอล อะเพอเจอร์ (Numerical Aperture)

และสามารถหาค่าการสูญเสียพลังงานแสง (Power loss) ในหน่วยของ dB ได้จากสมการ (3)

$$P_{lost} = -10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (3)$$

การสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์เนื่องจากการทำให้เส้นใยแก้วโค้งสามารถหาค่าได้จากสมการ(1)และสมการ(3)



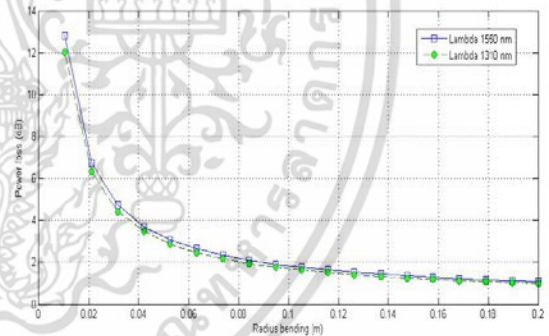
รูปที่ 2 รูปร่างของกราฟที่แสดงค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วที่มีค่าของ α ต่างๆ

กรณีเส้นใยแก้วเป็นชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์ (Stepped-Index Fiber) ค่าของ $\alpha = \infty$ (จากรูปที่ 2) ทำให้ $(\alpha+2)/\alpha = 1$ ดังนั้น ในเทอมของ $(\alpha+2)/(2\alpha\Delta) = 1/2\Delta$ [3] เพราะฉะนั้นสามารถหาค่าการสูญเสียสัญญาณ (P_{loss}) ที่เกิดจากการโค้งงอของเส้นใยแก้วได้จากสมการ (4)

$$P_{loss} = -10 \log \left\{ 1 - \left(\frac{1}{2\Delta} \right) \left[\frac{d}{R} + \left(\frac{3\lambda}{4\pi n_2 R} \right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ มีดังนี้
- กรณีเป็นเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยว (Single-mode Fiber)

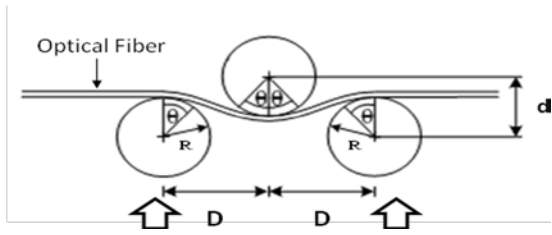
- $d = 9.5 \mu m$
- $n_1 = 1.467$
- $n_2 = 1.462$



รูปที่ 3 การสูญเสียสัญญาณที่ความยาวคลื่นต่างๆของ Step-Index Fiber-SM ที่ได้จากการคำนวณ

3. การออกแบบส่วนโค้งของอุปกรณ์

การออกแบบส่วนโค้งของอุปกรณ์ที่จะทำให้ได้ค่าการสูญเสียสัญญาณที่สูงนั้น จะต้องให้รัศมีความโค้งของอุปกรณ์ที่มีค่าน้อย แต่จะต้องไม่สร้างความเสียหายให้กับเส้นใยแก้ว



รูปที่ 4 ลักษณะการโค้งงอของเส้นใยแก้วที่เกิดจากอุปกรณ์

จากรูปที่ 4 แสดงลักษณะการโค้งงอของเส้นใยแก้ว ซึ่งมี ส่วนที่ทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอ 3 ส่วน คือส่วนที่อยู่ด้านข้าง 2 ส่วน ซึ่งทั้ง 2 ส่วนนี้จะเป็นส่วนที่เคลื่อนที่โดยที่จะเคลื่อนที่ขึ้นไปหาส่วนที่อยู่ตรงกลาง ซึ่งส่วนที่อยู่ตรงกลางจะเป็นส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ จะทำให้เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอตามความโค้งงอของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบไว้

จากรูปที่ 4 สามารถหาค่าผลรวมของมุม ($\sum \theta$) ที่เกิดจากการโค้งงอของเส้นใยแก้ว ได้ดังสมการ (5)

$$\sum \theta = 4\theta = 4 * \left\{ \left(\frac{\pi}{2} \right) - \cos^{-1} \left[\frac{R}{\sqrt{(D^2 + d^2)/2}} \right] - \tan^{-1} \left(\frac{d}{D} \right) \right\} \quad (5)$$

- เมื่อ $\sum \theta$ คือผลรวมของมุม
- R คือรัศมีการโค้งงอของเส้นใยแก้ว
- D คือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางความโค้งงอ ด้านแนวนอน
- d คือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางความโค้งงอ ด้านแนวตั้ง

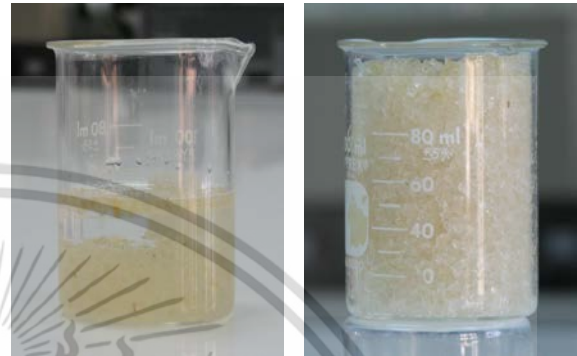
4. สารโพลีเมอร์

โพลีเมอร์เป็นสารที่เกิดจากการสังเคราะห์ มีลักษณะโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) สำหรับโพลีเมอร์ที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ใฝ่ระงังการแทรกซึมของน้ำ เรียกว่า ครอส-ลิงค์ โพลีเอคริลาไมด์ โคลโพลีเมอร์ (Cross-linked Polyacrylamide Copolymer)

ถ้ามีปริมาณของน้ำมากพอมาสัมผัสกับโพลีเมอร์จะทำให้โพลีเมอร์สามารถขยายตัวหรืออูมน้ำได้ประมาณ 300-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

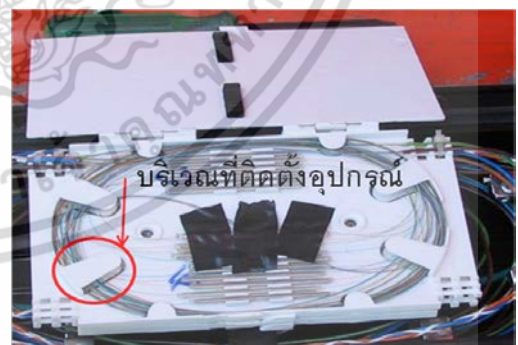
500 เท่าของน้ำหนักโพลีเมอร์แห้ง [5] โพลีเมอร์ที่มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอนจะดูดซึมน้ำได้อย่างรวดเร็วในระยะเวลา 5 นาทีแรก หลังจากนั้นการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และจะหยุดดูดซึมน้ำเมื่อถึงจุดอิ่มตัวใช้เวลาประมาณ 2-3 วัน



(1) เมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที (2) เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง
รูปที่ 5 การขยายตัวของโพลีเมอร์เมื่อสัมผัสกับน้ำ

5. อุปกรณ์การแทรกซึมน้ำเข้าหัวต่อ

จากรูปที่ 6 จะแสดงให้เห็นบริเวณพื้นที่ในถาดของเส้นใยแก้ว [6] ที่จะใช้ในการติดตั้ง อุปกรณ์การแทรกซึมน้ำเข้าหัว โดยพื้นที่มีขนาดจำกัดดังนี้ มีความกว้าง 26 mm ความยาว 43.5 mm ความหนา 6mm [8]



รูปที่ 6 บริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์ในถาดของเส้นใยแก้ว

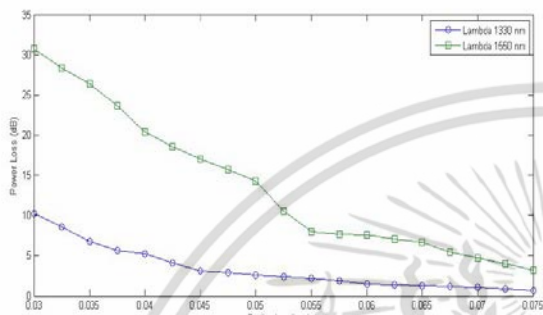
5.1 การออกแบบส่วนโค้ง

จะทำการพิจารณาในกรณีที่เป็น เส้นใยแก้ว ชนิด single mode เนื่องจาก เป็นสายที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

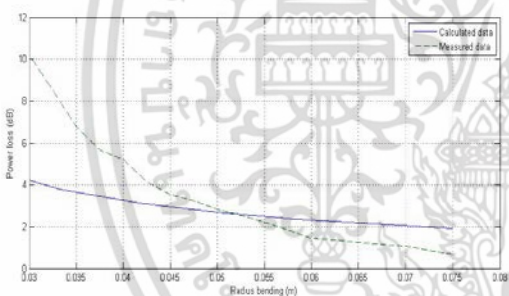
เพื่อที่จะหาค่าการสูญเสียสัญญาณภายในสายเส้นใยแก้วที่มีค่ามากที่สุดนั้น จึงได้ทำการทดลองวัดหาค่ารัศมีที่ไม่ส่งผลกระทบต่อเส้นใยแก้วจนเกิดความเสียหายหรือแตกหัก โดยที่สเปคของเส้นใยแก้วที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่ารัศมีต่ำสุดประมาณ 2.5 mm[7] แต่เพื่อความปลอดภัยจึงได้ทำการทดลอง ที่ค่ารัศมีต่ำสุดที่ 3 mm



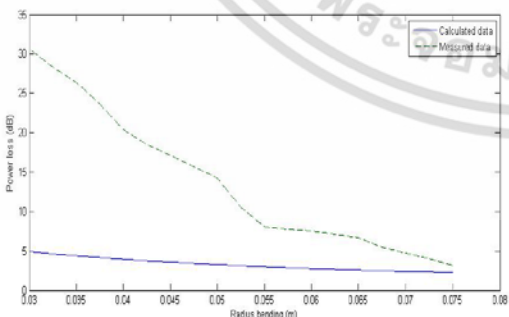
รูปที่ 10 กราฟที่ได้จาก OTDR ที่ใส่อุปกรณ์รัศมี 5 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับ อุปกรณ์รัศมี 5 มิลลิเมตร ที่มีส่วน 2 โค้ง



รูปที่ 7 การสูญเสียสัญญาณที่ได้จากการวัด ที่ความยาวคลื่นต่างๆ



รูปที่ 8 การสูญเสียสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1,310 นาโนเมตร



รูปที่ 9 การสูญเสียสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1,550 นาโนเมตร

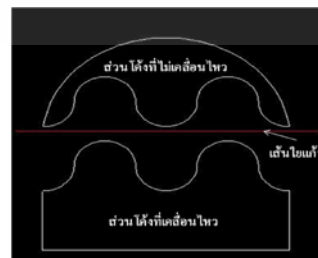
เพื่อที่จะหาค่าการสูญเสียสัญญาณที่สูงที่สุด จึงได้ทำการทดลองโดยการที่เพิ่มจำนวนของการโค้งงอเข้าไป

กราฟที่ได้จาก OTDR นั้นมีความสูงที่มากขึ้นและยังเป็น เส้นความชันเดียว เพราะฉะนั้น แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนของการ โค้งงอเข้าจะมีผลทำให้มีค่าการสูญเสียสัญญาณที่สูงขึ้น โดยที่ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นจะมีค่าเท่ากับการรวมกันของ 2 ส่วน โค้ง

5.2 ลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์

เนื่องจากพื้นที่ในถาดของเส้นใยแก้ว(Fiber Tray)นั้น มีอยู่จำกัด จึงสามารถที่จะออกแบบอุปกรณ์ที่มีค่าการสูญเสียสัญญาณที่มากที่สุด คือให้มีรัศมีของการ โค้งงอ 3 มิลลิเมตร เป็นจำนวน 4 ครั้ง

หลักการทำงานของอุปกรณ์นั้นคือจะมีส่วนโค้งที่ไม่เคลื่อนที่ กับ ส่วนโค้งที่เคลื่อนที่แยกเป็น 2 ส่วน ดังนั้นการที่จะออกแบบลักษณะของ โครงสร้างส่วน โค้งงอของอุปกรณ์ จะต้องคำนึงถึงระดับจุดสูงสุดของส่วน โค้งงอให้มีระดับเดียวกับทางเข้าและทางออกเส้น ใยแก้ว เพื่อที่จะทำ ให้เส้นใยแก้วไม่มีการ โค้งงอ ก่อนที่อุปกรณ์จะทำงาน



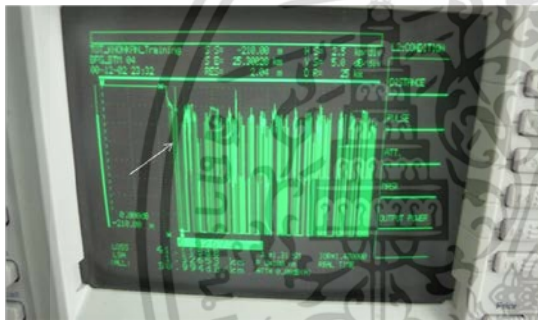
รูปที่ 11 รูปแบบของอุปกรณ์ที่มีรัศมี 3 มิลลิเมตร และมีจำนวนของการ โค้งงอ 4 ครั้ง ที่ได้ทำการปรับส่วน โค้ง



รูปที่ 12 ต้นแบบอุปกรณ์

6.ผลการทดสอบ

การทดสอบอุปกรณ์เฟื่อระวังการแทรกซึมของน้ำเข้าไปยังหัวต่อกับเส้นใยแก้ว ชนิด single mode ที่ความยาวคลื่น 1310 nm



รูปที่ 13 กราฟที่ได้จากการทดสอบ OTDR ที่ความยาวคลื่น 1310nm

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียสัญญาณ

	ค่าการสูญเสียสัญญาณ (dB)
ค่าที่ได้จากการวัดรัศมี 3mm รวมกัน 4 ครั้ง(ก่อนที่ทำการปรับส่วนโค้ง)	40.88
ค่าที่ได้จากการวัดจากอุปกรณ์	max. 42.71
	ave. 41.12
	min. 39.53

7.สรุป

จะเห็นได้ว่าเมื่อโพลิเมอร์ มีการขยายตัวดันลูกสูบจนทำให้เกิดการโค้งงอเต็มที่ จะทำให้เกิดการสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ และค่าเฉลี่ยที่วัดได้จากอุปกรณ์จะมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดรัศมี 3mm รวมกัน 4 ครั้งก่อนที่จะทำการปรับส่วนโค้งซึ่งค่าการสูญเสียสัญญาณที่ได้นั้นมีค่าสูงพอที่จะทำให้ระบบการแจ้งเตือนทำงานได้ดี และ กราฟที่ได้จาก OTDR สามารถแสดงค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์ได้อย่างชัดเจน ทำให้สามารถที่จะตรวจสอบตำแหน่งที่เกิดการแทรกซึมของน้ำได้ง่าย

8. เอกสารอ้างอิง

[1] L. D. Green, “Fiber Optic Communication”, USA : CRC Press, 1993, pp. 93 - 107.

[2] อธิคม ฤกษ์บุตร, “เส้นใยแก้วและการประยุกต์ใช้งานเบื้องต้น”, พิมพ์ครั้งที่ 2 , กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2546.

[3] D. J. H. Maclean, “Optical Line Systems”, New York : John Wiley & Sons, 1996, pp. 83 - 87.

[4] สถาบันวิชาการ ทีไอที, “Optical Fiber Overview”, กรุงเทพฯ : ม.ป.ป.

[5] ดิพร้อม ไชยวงศ์เกียรติ, “โพลิเมอร์และข้อดีของการใช้ทางการเกษตร”, กรุงเทพฯ : อักษรสยามการพิมพ์, 2538, หน้า 1 - 5.

[6] นฤทธิสมเจริญ สุภาพล, “วิเคราะห์และแก้ไขปัญหาไฟเบอร์ออฟติคเคลื่อนตัวในสายเคเบิลไฟเบอร์ออฟติคชนิดหลอดหลวมเดี่ยว”, การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ : ครั้งที่ 44 ระหว่างวันที่ 30 มกราคม – 2 กุมภาพันธ์

[7] มอก. 2052-2548 เคเบิลเส้นใยนำแสง เล่ม 3 : ข้อกำหนดคุณลักษณะเคเบิลภายนอกอาคาร

[8] ทวีศักดิ์ กริโส, “การเฟื่อระวังการแทรกซึมของน้ำที่จะผ่านเข้าไปยังหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้ว”, วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง : ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 เดือนเมษายน 2551