



การศึกษาการตรวจวัดอุณหภูมิผ่านเส้นใยนำแสงด้วยโอทีดีอาร์

Study of the Temperature Optical Fiber Sensor using OTDR

ศุภเศรษฐ์ จันทร์อ่อน* และ อธิคม ฤกษ์บุตร

สถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

Supaset Junon* and Athikom Roeksabutr

School of Electrical and Electronic Engineering, Mahanakorn University of Technology

140 Cheum-Sampan Rd., Nong Chok, Bangkok, Thailand, 10530

*ผู้รับผิดชอบบทความ: 6419220002@mut.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 09-8284-8176

Received: 22 March 2023, Revised: 11 June 2023, Accepted: 11 June 2023

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตรวจวัดอุณหภูมิผ่านเส้นใยนำแสงด้วยโอทีดีอาร์ (OTDR) โดยใช้เส้นใยนำแสงที่ใช้ในระบบสื่อสารโทรคมนาคมมาประยุกต์เป็นเซ็นเซอร์ แล้วใช้เครื่องมือวัดทางแสงโอทีดีอาร์ทำการวิเคราะห์สัญญาณการสูญเสียของการกระเจิงย้อนกลับแบบเรย์ลี ของสัญญาณแสง ณ ตำแหน่งของเซ็นเซอร์เส้นใยนำแสง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียสัญญาณแสงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซ็นเซอร์เส้นใยนำแสง รวมทั้งวิเคราะห์ผลกระทบของเส้นใยนำแสงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การสร้างเซ็นเซอร์จะทำการพันเส้นใยนำแสงบนแผ่นทองแดงทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 เซนติเมตร ในการตรวจวัดอุณหภูมิจะป้อนความร้อนด้วยเครื่องเป่าลมร้อนผ่านเข้าไปในเซ็นเซอร์ สัญญาณที่วัดได้จากโอทีดีอาร์มาจากการที่โอทีดีอาร์ส่งพัลส์แสงที่มีความกว้างพัลส์ 30 นาโนวินาที ที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ระยะทางการทดสอบประมาณ 5 กิโลเมตร รอบเวลาในการทดสอบแต่ละพัลส์คือ 60 วินาที ทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ถึง 130 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบพบว่าค่าการสูญเสียสัญญาณแสง ณ ตำแหน่งของเซ็นเซอร์เส้นใยนำแสงมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิ ระบบที่นำเสนอสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นระบบเซ็นเซอร์ในการตรวจวัดอุณหภูมิได้

คำสำคัญ เส้นใยนำแสง, การกระเจิงย้อนกลับแบบเรย์ลี, โอทีดีอาร์

Abstract

This paper demonstrates the optical fiber sensor for temperature sensing using OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) with the application of telecommunication optical fiber. OTDR measures the Rayleigh back scattering optical power signal at the part of fiber sensing for the analysis of the relationship between optical signal attenuation and the variation of temperature change. Sensor device composes of the optical fiber wrapped around the thin copper-plated cylindrical shape with diameter about 10 cm. To observe the temperature effect, hot air will be blown by the hot air blower through the cylindrical fiber sensor. OTDR signature results from the sending of the optical signal with pulse width 30 ns at wavelength 1550 nm. The experiment was carried out for a duration of 60s for each optical pulse in the temperature range of 25-130 °C. The experimental results show that the attenuation of the optical signal at the part of fiber sensor varies as the temperature changes. The proposed system expresses potential applications for a temperature sensor.

Keywords: Optical Fiber, Rayleigh Scattering, OTD



1. บทนำ

ที่ผ่านมาเส้นใยนำแสง (Optic Fiber) ถูกนำมาใช้งาน ในด้านการสื่อสารโทรคมนาคมที่มีประสิทธิภาพสูงในการ รับส่งข้อมูลอย่างแพร่หลาย ในขณะที่เดียวกันในปัจจุบันได้มีการ นำเส้นใยนำแสงมาประยุกต์ใช้ในทางด้านของระบบ ตรวจวัด หรือเซนเซอร์เส้นใยนำแสง (Fiber Optic Sensor) ด้วยเช่นกัน แม้จะยังไม่แพร่หลายเมื่อเทียบกับการใช้งาน ด้านระบบสื่อสารโทรคมนาคม การประยุกต์ใช้เส้นใยนำแสง สามารถใช้ในการตรวจวัดค่าต่าง ๆ ได้หลากหลาย เช่น อุณหภูมิ ความชื้น แรงดันการสั่นสะเทือน พีเอช ปริมาณ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เป็นต้น [1-2] เนื่องจากมีความน่าเชื่อถือ มีความยืดหยุ่นในการตรวจวัด มีต้นทุนต่ำ อีกทั้งยังสามารถตรวจวัดได้หลายตำแหน่งและหลาย พารามิเตอร์ภายในระบบเดียว ข้อดีของเส้นใยนำแสงที่มี ขนาดเล็กน้ำหนักเบา ปราศจากการรบกวนสัญญาณจาก คลื่นวิทยุและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เหมาะสำหรับการ ตรวจวัดในระยะไกลได้ [3-5] ที่ผ่านมามีการนำเสนอ เซนเซอร์เส้นใยนำแสงแบบกระจาย (Distributed Sensor Fiber) ที่ใช้หลักการของรามาน (Raman) โดยนำเสนอระบบ ที่ใช้วิธีการเปรียบเทียบอัตราส่วนของ Stoke Raman และ Anti- Stoke Raman [4] และยังมีนำเสนอระบบ ตรวจจับแบบกระจายในตรวจจับการสั่นสะเทือนและ อุณหภูมิพร้อมกันโดยใช้หลักการของ Rayleigh Scattering ในการตรวจจับการสั่นสะเทือนและหลักการของ Raman Scattering ในการตรวจวัดอุณหภูมิ [5] แม้ว่าเซนเซอร์ เส้นใยนำแสงแบบกระจายที่ใช้เทคนิคในการตรวจจับ อุณหภูมิแบบรามานจะมีประสิทธิภาพสูงและเป็นที่ยอมรับ ในปัจจุบัน [1] แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องอัตราส่วนสัญญาณ ต่อสัญญาณการรบกวน (SNR - Signal-to-Noise Ratio) ที่ ต่ำที่เป็นผลมาจากกำลังของสัญญาณย้อนกลับของ Anti- Stoke Backscattering Signal ที่ต่ำมาก [6] ทำให้ต้องมีการเพิ่มอุปกรณ์ในการขยายสัญญาณในระบบ ซึ่งเป็นการ เพิ่มต้นทุนและทำให้ระบบมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ได้มีการนำเสนอการศึกษาการกำหนด ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องมือวัดทางแสงที่เรียกว่า โอปติคัล รีเฟลกโตมิเตอร์ (OTDR - Optical Time Domain Reflectometer) ต่อการ ทดสอบของเส้นใยนำแสงเมื่อนำมาใช้เป็นเซนเซอร์ร่วมกับ

อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง (Erbium Doped Fiber Amplifier) และฟิลเตอร์แสง (Optical Filter) เพื่อกรอง เฉพาะสัญญาณย้อนกลับของ Anti- Stoke Backscattering Signal ที่มีความไวต่ออุณหภูมิ [7] เพื่อศึกษาความละเอียด ความแม่นยำ และการเสื่อมสภาพของเส้นใยนำแสงในส่วนที่เป็น เซนเซอร์ภายใต้อุณหภูมิสูงหรือต่ำสุดในการตรวจวัด รวมถึงการใช้เซนเซอร์เส้นใยนำแสงชนิดที่เคลือบด้วย อะลูมิเนียมในการทดสอบที่อุณหภูมิสูง [8] โดยใช้เครื่องมือ วัดโอทีดีอาร์ มาตรวจสอบผลกระทบของเส้นใยนำแสงใน ระบบเซนเซอร์แบบหลายจุด [9] และนอกจากนี้ได้มีการ นำเสนอระบบเซนเซอร์ตรวจวัดแรงดันโดยใช้หลักการโค้งงอ (Macro Bending) ในการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียของ เส้นใยนำแสง [10]

จากที่มาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น งานวิจัยส่วนใหญ่ นำเสนอระบบที่มีความซับซ้อน ต้นทุนสูง และต้องใช้ เส้นใยนำแสงชนิดพิเศษ หรือการดัดแปลงโครงสร้างของ เส้นใยนำแสงให้เหมาะกับการตรวจวัด ซึ่งจากการศึกษา ข้อมูลพบว่าเครื่องมือวัดทางแสงโอทีดีอาร์เป็นเครื่องมือที่จะ ช่วยลดความซับซ้อนของระบบตลอดทั้งสามารถใช้ร่วมกับ เส้นใยนำแสงที่ใช้ในการสื่อสารโดยทั่วไปได้

บทความนี้ นำเสนอการตรวจวัดอุณหภูมิ ผ่าน เส้นใยนำแสงด้วยโอทีดีอาร์ ร่วมกับเส้นใยนำแสงมาตรฐาน ในระบบสื่อสารโทรคมนาคม โดยการนำเครื่องมือวัด โอทีดีอาร์ในเชิงพาณิชย์มาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อลดความ ซับซ้อนของระบบ ซึ่งสามารถใช้ในการตรวจวัดเส้นใยนำแสง ที่ใช้ในการสื่อสารและใช้เป็นเซนเซอร์ในการตรวจวัดได้ โดย ในการตรวจวัดจะวิเคราะห์คุณสมบัติการลดทอนกำลังแสง เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซนเซอร์เส้นใยนำแสง ที่พันอยู่รอบแผ่นทองแดงทรงกระบอก ที่ได้รับความร้อน จากเครื่องเป่าลมร้อน โดยใช้โอทีดีอาร์ในการตรวจวัด สัญญาณการกระเจิงย้อนกลับเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระหว่างค่าการสูญเสียกำลังแสงกับอุณหภูมิ รวมทั้งพิจารณา ผลกระทบของเส้นใยนำแสงในส่วนที่เป็นเซนเซอร์หลังการ ทดสอบในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 25 องศาเซลเซียส ถึง 130 องศาเซลเซียส



2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 การกระเจิงที่เกิดขึ้นในเส้นใยนำแสง

เมื่อแสงเดินทางในเส้นใยนำแสง สัญญาณแสงส่วนใหญ่จะเดินทางไปปลายทางข้างหน้า ในขณะที่เดียวกันจะมีแสงส่วนหนึ่งที่เดินทางย้อนกลับในทุก ๆ ตำแหน่งของเส้นใยนำแสงอันเนื่องมาจากการกระเจิงของแสงเรียกว่า การกระเจิงย้อนกลับแบบเรย์ลี (Rayleigh Back Scattering) ซึ่งกลไกส่วนหนึ่งเกิดจากการที่แสงกระทบโมเลกุลของตัวกลางและการไม่เป็นเนื้อเดียวกันของเส้นใยนำแสง ทำให้เกิดการแปรผันของค่าดัชนีหักเหของแสง ส่งผลให้ค่าดัชนีการหักเหของแสงเปลี่ยนไปตามเส้นใยนำแสง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียสัญญาณของเส้นใยนำแสงเนื่องจากการกระเจิงของเรย์ลี [11] แสดงดังสมการที่ (1)

$$\alpha_R = \frac{A}{\lambda^4} \quad (1)$$

เมื่อ

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียสัญญาณของแสงในเส้นใยนำแสงเนื่องจากการกระเจิงของเรย์ลี (dB/km)

A คือ ความเข้มข้นของสารเจือปนในแก้วบริสุทธิ์ (ppm)

λ คือ ความยาวคลื่นแสง (m)

การสูญเสียสัญญาณทำให้กำลังแสงลดลงตามฟังก์ชันของระยะทางดังสมการที่ (2)

$$P(z) = P_0 e^{-2\alpha z} \quad (2)$$

เมื่อ

P_0 คือ กำลังแสงที่จุดเริ่มต้น (W)

$P(z)$ คือ กำลังงานแสงที่ห่างจากจุดเริ่มต้น ณ ตำแหน่งที่มีระยะทาง z (W)

การกระเจิงย้อนกลับแบบเรย์ลี เป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่น ความถี่ของแสงที่กระเจิงเท่ากับความถี่แสงที่ตกกระทบ การสังเกตเห็นการกระเจิงที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีความผันผวนของอุณหภูมิหรือความเครียด (Strain) ในเส้นใยนำแสง ทำให้สามารถใช้ในการตรวจจับการสั่นสะเทือน อุณหภูมิ หรือความเครียดได้

2.1.2 เซนเซอร์แบบกระจายตามการกระเจิงของเรย์ลี

เส้นใยนำแสงสามารถประยุกต์ใช้งานเป็นเซนเซอร์แบบกระจายตามการกระเจิงของเรย์ลี (Distributed Fiber Sensors Based on Rayleigh Scattering) ได้เมื่อมีการเคลื่อนตัวของคลื่นแสงไปตามเส้นใยนำแสง กำลังแสงจะลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดความยาวของเส้นใยนำแสงดังสมการที่ (3) เนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของดรรชนีการหักเหในระหว่างกระบวนการผลิต [12] โดยอัตราส่วนของการกระเจิงแบบเรย์ลีแสดงดังสมการที่ (4)

$$\frac{dP_R}{dz} = C_b \alpha_R P_0 e^{-2\alpha z} \quad (3)$$

$$C_b = \left(\frac{NA}{n_1}\right)^2 \times \frac{1}{m} = \left(\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1}\right) \times \frac{1}{m} \quad (4)$$

เมื่อ

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณของแสงในเส้นใยนำแสง (dB/km)

z คือ ระยะทางตามแนวความยาวเส้นใยนำแสง (m)

C_b คือ อัตราส่วนของการกระเจิงแบบเรย์ลี

NA คือ ช่องรับแสง (Numerical Aperture)

n_1, n_2 คือ ดรรชนีหักเหของแสงของของคอร์และแคลดดิ้งตามลำดับ

m คือ จำนวนโหมดทั้งหมดของแสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสง

2.1.3 ผลกระทบทางความร้อนในเส้นใยนำแสง

กระบวนการทางความร้อนในเส้นใยนำแสงเป็นผลทำให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากทำให้กำลังแสงบางส่วนที่ตกกระทบภายในเส้นใยนำแสงถูกดูดซับ ซึ่งเป็นการนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของเส้นใยนำแสง โดยส่วนใหญ่ค่าดัชนีหักเหของแสงจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิซึ่งจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายในของเส้นใยนำแสง [13] ผลกระทบทางความร้อนสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (5)

$$n = n_0 + (dn/dT)T_1 \quad (5)$$

เมื่อ

(dn/dT) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิของดรรชนีหักเหของแสงสำหรับวัสดุที่กำหนด

T_1 คือ การกำหนดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

โดยสมการดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดผลกระทบทางแสงที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ขึ้นกับเวลาและทำให้ค่าดรรชนีหักเหของเส้นใยนำแสงในส่วนของคอร์ (Core) และแคลดดิ้ง (Cladding) มีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิต่างสมการที่ (6)

$$n(r) = n_{o1} - \Delta n(r/r_c)^{\alpha_o} \quad (6)$$

เมื่อ

n_{o1} คือ ดรรชนีหักเหของคอร์

α_o คือ พารามิเตอร์หน้าตัดของเส้นใยนำแสง

Δn คือ ค่าความแตกต่างของดรรชนีหักเหระหว่างคอร์และแคลดดิ้ง

r คือ ระยะรัศมีห่างจากจุดศูนย์กลางของเส้นใยนำแสง (m)

r_c คือ รัศมีของคอร์ (m)

2.1.4 โอทีดีอาร์ (Optical Time Domain Reflectometer)

โอทีดีอาร์ เป็นเครื่องมือวัดที่ใช้หลักการวัดสัญญาณการกระเจิงย้อนกลับ (Back Scattering) ที่เกิดขึ้นในเส้นใยนำแสง โดยจะพิจารณาจากค่าดรรชนีหักเหของเส้นใยนำแสงและความแตกต่างของเวลาระหว่างพัลส์ที่ส่งเข้าไปรวมถึงพัลส์ที่สะท้อนกลับมามาดังสมการที่ (7)

$$L = \frac{ct}{2n} \quad (7)$$

เมื่อ

L คือ ความยาวของเส้นใยนำแสง (km)

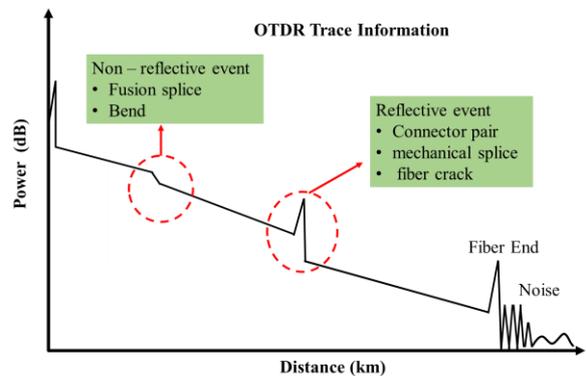
c คือ ความเร็วแสงในอากาศ (m/s)

t คือ ช่วงเวลาที่พัลส์แสงเดินทางไปและกลับมายังโอทีดีอาร์

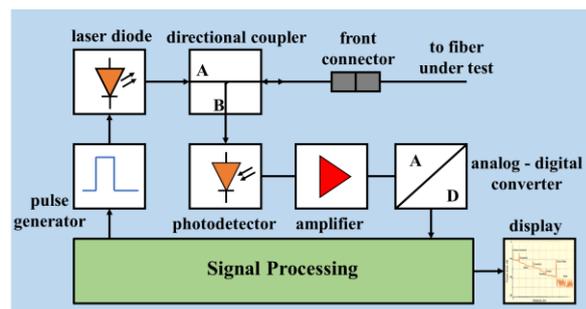
n คือ ดรรชนีหักเหของแสงในเส้นใยนำแสง

โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเส้นใยนำแสง ได้แก่ ค่าการสูญเสียสัญญาณแสง ระยะทาง ตำแหน่งของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในเส้นใยนำแสง ซึ่งจะแสดงด้วยกราฟ

ความสัมพันธ์ในรูปแบบ Non-Reflective Events ที่แสดงถึงความหมายของเหตุการณ์ที่ตำแหน่งนั้น เช่น การเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงด้วยวิธี Fusion Splice หรือ การโค้งงอของเส้นใยนำแสง (Bend) และรูปแบบ Reflective Events สำหรับเหตุการณ์ที่ตำแหน่งนั้นเป็นการเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงด้วยคอนเน็กเตอร์ (Connector Pair) การเชื่อมต่อแบบเชิงกล (Mechanical Splice) สัญญาณตอนปลายของเส้นใยนำแสง (Fiber End) และการเกิดรอยแตกร้าวของเส้นใยนำแสง (Fiber Crack) ดังแสดงในรูปที่ 1 ส่วนของบล็อกไดอะแกรมของเครื่องมือวัดโอทีดีอาร์ประกอบด้วย ส่วนกำเนิดสัญญาณพัลส์แสง ส่วนตรวจจับสัญญาณแสง และส่วนประมวลผลดังแสดงในรูปที่ 2 [14]



รูปที่ 1 รูปแบบการแสดงผลของโอทีดีอาร์

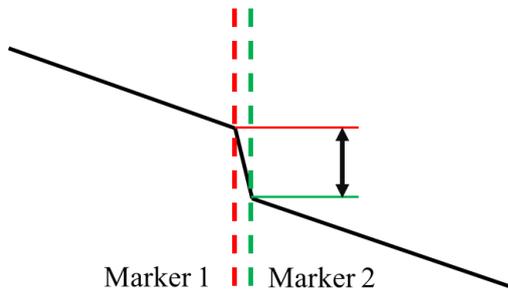


รูปที่ 2 ไดอะแกรมของเครื่องมือวัดโอทีดีอาร์

โดยระบบเซนเซอร์ในบทความนี้จะใช้การหาค่าการสูญเสียกำลังงานแบบ Non-Reflective Events ที่อาศัยหลักการการสูญเสียกำลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเส้นใยนำแสง โดยทำการหาค่าการสูญเสียกำลังงานแบบ Non-Reflective Events ที่ตำแหน่งของเซนเซอร์เส้นใยนำแสง โดยใช้วิธีการประมาณสองจุด (2-Point Loss)

ที่ใช้ความแตกต่างระหว่างระดับของจุดสองจุดที่ระบุ เพื่อมาทำการคำนวณค่าการสูญเสียกำลังงาน [15] แสดงดังรูปที่ 3

Fiber Attenuation by Two Point Method



รูปที่ 3 การหาค่าสูญเสียแบบการประมาณสองจุด

2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

2.2.1 การออกแบบระบบการตรวจวัดอุณหภูมิด้วยเส้นใยนำแสงและโอทีดีอาร์

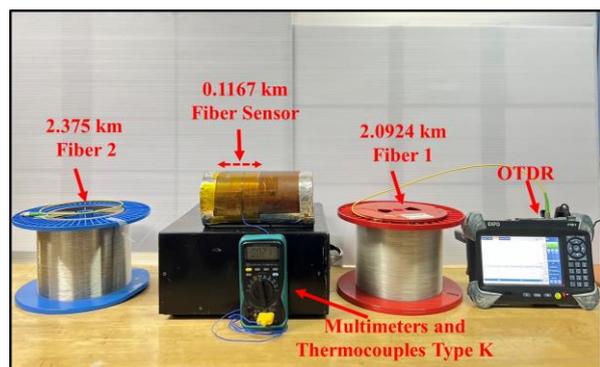
ระบบตรวจจับอุณหภูมิบนเส้นใยนำแสงอาศัยหลักการกระเจิงแบบย้อนกลับแบบเรย์ลี ด้วยเทคนิคโอทีดีอาร์ ซึ่งประกอบไปด้วยโอทีดีอาร์รุ่น EXFO FTB – 730 ซึ่งเป็นเครื่องวัดมาตรฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรมโทรคมนาคม เครื่องโอทีดีอาร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผ่านการสอบเทียบเป็นระยะอย่างสม่ำเสมอ เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวแบบเปลือย (Single Mode Fiber) ขนาด 9/125 ไมครอน มาตรฐาน ITU – T G.653 มีค่าการลดทอน 0.192 dB/km ที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ในส่วนของการเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงส่วนที่เป็นเซนเซอร์กับเส้นใยนำแสงในระบบจะใช้วิธีการหลอมด้วยความร้อนหรือฟิวชั่นสปไลซ์ (Fusion Splice) เพื่อให้ค่าการสูญเสียสัญญาณน้อยที่สุด โดยความยาวของเส้นใยนำแสงระยะแรกและระยะที่สอง มีความยาว 2.0924 กิโลเมตร และ 2.375 กิโลเมตร ตามลำดับ สำหรับเส้นใยนำแสงตำแหน่งที่เป็นเซนเซอร์มีความยาว 0.1167 กิโลเมตร ซึ่งเส้นใยนำแสงส่วนที่เป็นเซนเซอร์นี้ตลอดช่วงความยาวของมันจะพันอยู่รอบแผ่นทองแดงทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.5 เซนติเมตร ความยาว 20.5 เซนติเมตร โดยได้ปิดภาคตัดขวางเข้าแผ่นทองแดงทรงกระบอกแล้วสร้างรูตรงกลางสำหรับใช้เป็นช่องเป่าลมร้อนเพื่อทำให้อุณหภูมิของแผ่นทองแดงเปลี่ยนแปลงแล้วส่งผ่านไปยังเส้นใยนำแสงส่วนที่เป็นเซนเซอร์ ในการตรวจสอบอุณหภูมิของแผ่นทองแดง (เซนเซอร์) ใช้ มัลติมิเตอร์ที่มี Thermocouples Type K ใน

การตรวจสอบอุณหภูมิของแผ่นทองแดง โดยไดอะแกรมของระบบเซนเซอร์และการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

การทำงานของระบบนั้นโอทีดีอาร์จะส่งสัญญาณพัลส์แสงเข้าไปในระบบผ่านเส้นใยนำแสง และเมื่อสัญญาณพัลส์แสงผ่านระยะทางตลอดทั้งระบบเข้าสู่เซนเซอร์เส้นใยนำแสงไปจนถึงปลายทางของระบบ จะเกิดการกระเจิงย้อนกลับมาผ่านเข้าสู่เครื่องมือวัดโอทีดีอาร์ จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลที่ได้จากโอทีดีอาร์บันทึกเป็นไฟล์ .sor และนำข้อมูลที่ได้มาทำการแสดงในโปรแกรม OTDR Viewer เพื่อนำข้อมูลในการวัดแต่ละครั้งมาวิเคราะห์เพื่อทำการเปรียบเทียบการสูญเสียของสัญญาณแสง ณ ตำแหน่งของเซนเซอร์กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเส้นใยนำแสง



รูปที่ 4 ไดอะแกรมระบบเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

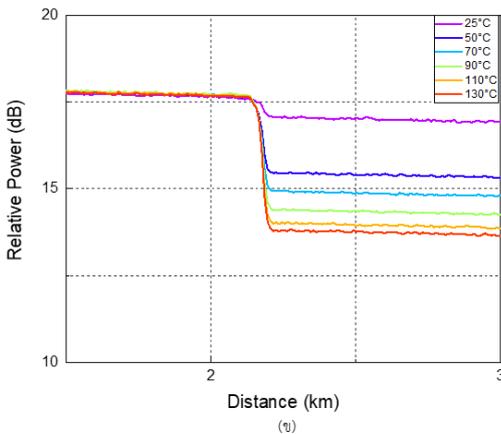
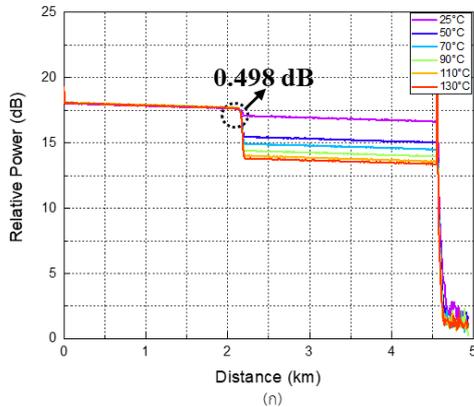
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 การทดสอบผลกระทบของเซนเซอร์เส้นใยนำแสง

ในการทดสอบระบบเซนเซอร์เส้นใยนำแสงนี้โอทีดีอาร์จะส่งแสงที่มีความยาวคลื่น (Wavelength) 1550 นาโนเมตร ในลักษณะของพัลส์แสงที่มีความกว้างพัลส์ (Pulse Width) 30 นาโนวินาที เข้าสู่เส้นใยนำแสง ช่วงเวลาในการเดินทาง

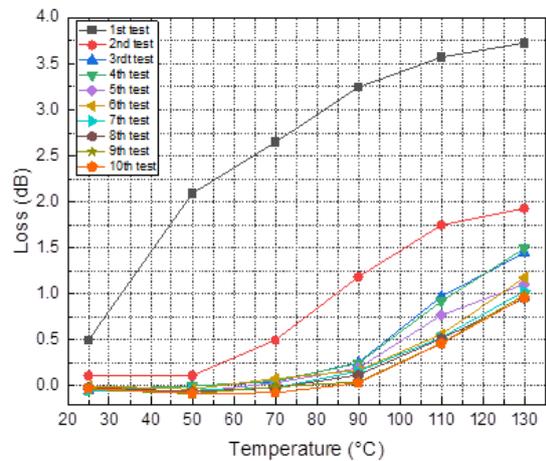


ของพัลส์แสงกำหนดรอบละ 60 วินาที ระยะทางในการทดสอบ (Distance) ตลอดความยาวเส้นใยนำแสงประมาณ 5 กิโลเมตร อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบมีความแตกต่างกันเริ่มตั้งแต่ 25 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 130 องศาเซลเซียส โดยการให้ความร้อนด้วยเครื่องเป่าลมร้อนเข้าไปยังแผ่นทองแดงทรงกระบอกที่พันด้วยเส้นใยนำแสง ซึ่งจะทำให้เส้นใยนำแสงได้รับการถ่ายเทความร้อนมาจากแผ่นทองแดง อุณหภูมิเริ่มต้นในการทดสอบเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) เหตุการณ์ (Event) ที่โอทีดีอาร์แสดงเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของเซนเซอร์ที่เกิดการโค้งงอของเส้นใยนำแสงเนื่องจากการนำเส้นใยนำแสงพันเข้ากับแผ่นทองแดง ทรงกระบอกแสดงดังรูปที่ 6(ก) ซึ่งตำแหน่งของเซนเซอร์เส้นใยนำแสงเริ่มต้นที่ระยะ 2.0924 กิโลเมตร ถึง 2.2091 กิโลเมตร ความยาวเท่ากับ 0.1167 กิโลเมตร ผลการทดสอบพบว่าที่อุณหภูมิเริ่มต้นนั้นมีการสูญเสียกำลังแสงเนื่องจากการโค้งงออยู่ที่ 0.498 dB



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบการสูญเสียกำลังงานแสงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเส้นใยนำแสง ณ ตำแหน่งของเซนเซอร์ (ก) แสดงความยาวทั้งหมด (ข) กราฟขยายตำแหน่งของเซนเซอร์ที่เกิดการสูญเสียกำลังงานแสง

ต่อมาทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 องศาเซลเซียสเป็น 50 องศาเซลเซียสและเพิ่มครั้งละ 20 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 130 องศาเซลเซียส เพื่อวิเคราะห์ค่าการสูญเสียกำลังแสงที่ได้จากเครื่องมือโอทีดีอาร์ ณ ตำแหน่งเซนเซอร์ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียกำลังแสงเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ถึง 130 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียกำลังแสง 0.498 dB 2.091 dB 2.648 dB 3.247 dB 3.572 dB และ 3.728 dB ตามลำดับจากรูปที่ 6(ข) ซึ่งจะเห็นว่าการสูญเสียกำลังแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของเส้นใยนำแสง



รูปที่ 7 การสูญเสียของเซนเซอร์เส้นใยนำแสง

รูปที่ 7 แสดงการสูญเสียสัญญาณแสงของเซนเซอร์เส้นใยนำแสงจากการทดสอบซ้ำทั้งหมด 10 ครั้งเพื่อทำการทดสอบระบบเซนเซอร์เส้นใยนำแสงและการเปลี่ยนแปลงของเส้นใยนำแสงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จากการทดสอบพบว่าสัญญาณการกระเจิงย้อนกลับที่ตรวจวัดได้จากโอทีดีอาร์ในตำแหน่งของเซนเซอร์เส้นใยนำแสงที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ มีค่าการสูญเสียของกำลังแสงลดลงเมื่อเทียบกับการทดสอบในครั้งแรก โดยเมื่อทำการทดสอบซ้ำหลาย ๆ ครั้ง โอทีดีอาร์จะแสดงเหตุการณ์เป็น Positive Event ในระยะของเซนเซอร์ในช่วงอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสถึง 70 องศาเซลเซียสแสดงดังรูปที่ 8 อนึ่งค่าการสูญเสียสัญญาณ (Loss) ที่วัดได้จากโอทีดีอาร์มีทั้งกรณีที่เป็น Positive Event และ Non - Reflective Event โดยโอทีดีอาร์จะแสดงค่าเป็นลบสำหรับ Positive Event และค่าเป็นบวกสำหรับ Non - Reflective Event

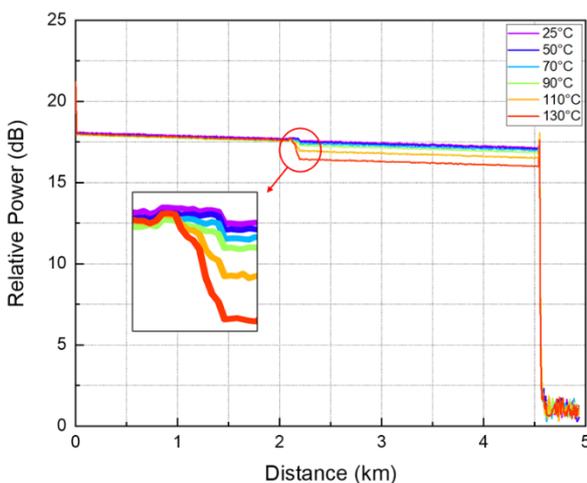


No.	Pos./Length (km)	Loss (dB)
1	0.0000	---
2	2.0936	-0.068
3	2.1936	0.175
4	4.5492	---

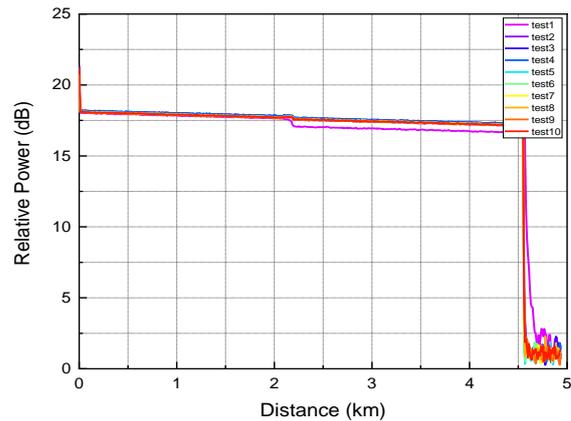
รูปที่ 8 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นกับเซนเซอร์เส้นใยนำแสง

และเมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จนถึง 130 องศาเซลเซียส โอทีดีอาร์จะแสดงเหตุการณ์ในระยะของเซนเซอร์เป็น Non - Reflective Event ซึ่งหมายความว่าขนาดคอร์ของเส้นใยนำแสงส่วนที่เป็นเซนเซอร์เกิดการหดตัวลงทำให้ขนาดคอร์ของเส้นใยนำแสงในระยะแรกนั้นมีขนาดที่ใหญ่กว่า ซึ่งเป็นผลจากหดตัวของเส้นใยนำแสงเมื่ออุณหภูมิของเส้นใยนำแสงเย็นตัวลงและมีการขยายตัวของเส้นใยนำแสงเมื่ออุณหภูมิของเส้นใยนำแสงสูงขึ้น [16] แสดงดังรูปที่ 9

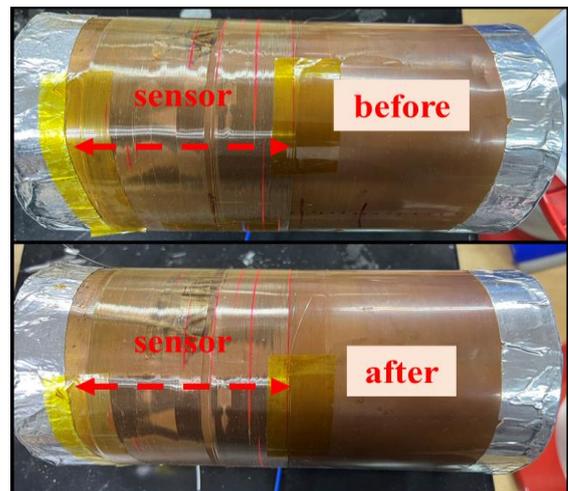
รูปที่ 10 แสดงถึงการเปรียบเทียบสัญญาณการกระเจิงย้อนกลับของเส้นใยนำแสงที่ทำการทดสอบที่อุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส ของการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง ซึ่งปรากฏว่าค่าสัญญาณการกระเจิงย้อนกลับของเส้นใยนำแสงที่ผ่านการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีความชันของสัญญาณลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการทดสอบที่อุณหภูมิสูงและปล่อยให้เส้นใยนำแสงเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 9 สัญญาณเหตุการณ์การขยายและหดตัวของเส้นใยนำแสงจากโอทีดีอาร์



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบสัญญาณการสะท้อนกลับที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสของการทดสอบในแต่ละครั้ง



รูปที่ 11 ภาพเส้นใยนำแสงก่อนและหลังการทดสอบ

รูปที่ 11 แสดงถึงเส้นใยนำแสงส่วนที่เป็นเซนเซอร์ ก่อนและหลังการทดสอบ โดยเส้นใยนำแสงในบริเวณที่ได้รับความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพหรือการละลายของโค้ตติ้ง (Coating) ซึ่งจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเส้นใยนำแสงมาตรฐานที่ใช้ในการสื่อสารโทรคมนาคมสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ในช่วงอุณหภูมิที่นำเสนอในบทความนี้ได้



4. บทสรุป

บทความนี้ นำเสนอระบบการตรวจวัดอุณหภูมิบนเส้นใยนำแสงด้วยโอทีดีอาร์ โดยใช้เส้นใยนำแสงและเครื่องมือวัดทางแสงโอทีดีอาร์ที่ใช้ในระบบสื่อสารโทรคมนาคม โครงสร้างของเซนเซอร์ประกอบด้วย การพันเส้นใยนำแสงบนแผ่นทองแดงบางที่มีลักษณะทรงกระบอก เพื่อใช้ทองแดงเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนมายังเส้นใยนำแสง สัญญาณแสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสงที่วัดได้จากโอทีดีอาร์ แสดงให้เห็นถึงค่าการลดทอนสัญญาณแสง ณ ตำแหน่งที่ตรวจวัดอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากจากการโค้งงอของเส้นใยนำแสงภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเช่นกันในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 25 องศาเซลเซียส ถึง 130 องศาเซลเซียส ระบบที่นำเสนอสามารถประยุกต์ใช้เป็นระบบเซนเซอร์เส้นใยนำแสงในช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงรวมถึงการพัฒนาเป็นระบบการตรวจวัดทางด้านอุตสาหกรรมร่วมกับเส้นใยนำแสงที่ใช้ในงานสื่อสารโทรคมนาคมได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภูเบศ แสงมะฮะหมัด และ ดร.วิสิทธิ์ ล้อธรรมจักร อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่าง ๆ เพิ่มเติมสำหรับใช้ในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Bolognini G, Hartog A. Raman-based fibre sensors: Trends and applications. *Optical Fiber Technology*. 2013 Dec 1; 19(6):678-88.

[2] Park J, Bolognini G, Lee D, Kim P, Cho P, Di Pasquale F, Park N. Raman-based distributed temperature sensor with simplex coding and link optimization. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2006 Sep;18(17):1879-81.

[3] Zhang J, Zhu T, Zhou H, Huang S, Liu M, Huang W. High spatial resolution distributed fiber system for multi-parameter sensing based on modulated pulses. *Optics Express*. 2016 Nov 28;24(24):27482-93.

[4] Wang Z, Sun X, Xue Q, Wang Y, Qi Y, Wang X. An optical fiber-folded distributed temperature sensor based on Raman backscattering. *Optics & Laser Technology*. 2017 Aug 1; 93:224-7.

[5] Zhou Z, Tian L, Han Y, Yang X, Liao F, Zhang D, Sha Y, Feng X, Zhu J, Zheng X, Cui Z. Distributed vibration and temperature simultaneous sensing using one optical fiber. *Optics Communications*. 2021 May 15;4 87:126801.

[6] Baronti F, Lazzeri A, Roncella R, Saletti R, Signorini A, Soto MA, Bolognini G, Di Pasquale F. SNR enhancement of Raman-based long-range distributed temperature sensors using cyclic Simplex codes. *Electronics Letters*. 2010;46(ARTICLE):1221.

[7] Silva MS, Alves HP, Nascimento JF, Martins-Filho JF. Impact of pulse width on the sensitivity and range of a Raman-based distributed fiberoptic temperature sensor. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. 2018;17:539-51.

[8] e Silva MS, de Barros TH, Alves HP, do Nascimento JF, Martins Filho JF. Evaluation of fiber optic Raman scattering distributed temperature sensor between -196 and 400° C. *IEEE Sensors Journal*. 2020 Aug 13; 21(2):1527-33.

[9] Martins-Filho JF, Fontana E, Guimaraes J, Pizzato DF, Coelho IS. Fiber-optic-based Corrosion Sensor using OTDR. *In SENSORS, 2007 IEEE 2007 Oct 28*. pp. 1172-1174.



- [10] Ribeiro LA, Rosolem JB, Dini DC, Florida C, Hortencio CA, da Costa EF, Bezerra EW, de Oliveira RB, Loichate MD, Durelli AS. Fiber optic bending loss sensor for application on monitoring of embankment dams. In 2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2011) 2011 Oct 29. pp. 637-641.
- [11] Agrawal GP. Fiber-optic communication systems. John Wiley & Sons; 2012 Feb 23.
- [12] Bao X, Wang Y. Recent advancements in Rayleigh scattering-based distributed fiber sensors. Advanced devices & instrumentation. 2021.
- [13] Saleh MB, Aly MH. Thermal Effects in optical Fibers 11. Arab Academy for Science and Technology & Maritime Transport College of Engineering & Technology Electronics and Communications Engineering Department, 2009.
- [14] Ko SC, Lai TH. Calibration of Optical Fiber Time Domain Reflectometers in Accordance with IEC 61746-1: 2009. NCSLI Measure. 2018 Apr 3; 12(1): 54-63.
- [15] User Guide. EXFO Optical Time Domain Reflectometer Analyzing the Results Manually OTDR. Getting Section Loss and Attenuation. 2015. pp. 87-96.
- [16] Alarabi A, Wang J, WANG D, YUa QI, GAOa SH, JIAO S, ZHANG Y, TABAN J, ABDELLAH A, ZHAO X, LIUc LI. Effect of temperature on the transmission loss of large-core optical fiber. Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications. 2018 May 1; 12(5-6): 258-63.