



ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทมิเตอร์สำหรับการตรวจวัดก๊าซชีวภาพ

โดย

นายภัทรชนน เศรษฐ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทมิเตอร์สำหรับการตรวจวัดค่าดัชนีหักเห



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

A FIBER OPTIC-BASED REFRACTOMETER FOR BIOGAS DETECTION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering ENERGY ENGINEERING
Department of MECHANICAL ENGINEERING
Academic Year 2024
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทมิเตอร์สำหรับการตรวจวัด ก๊าซชีวภาพ
โดย	นายภัทรชนน เศรษฐธิ
สาขาวิชา	วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. สาโรช พูลเทพ

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติ
ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุณศรี ลีจรรย์เนียร)	
พิจารณาเห็นชอบโดย	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีระศักดิ์ หุดากร)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. สาโรช พูลเทพ)	
.....	ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขาวลิต หามนตรี)	

630920048 : วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2

คำสำคัญ : ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์, ก๊าซชีวภาพ, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ภาษาไพทอน, สารประกอบทางเคมี

นาย ภัทรชนน เศรษฐฤทธิ์: ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์สำหรับการตรวจวัดก๊าซชีวภาพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. สาโรช พูลเทพ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบและพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์สำหรับการตรวจจับก๊าซชีวภาพโดยมุ่งเน้นที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งขั้นตอนพัฒนาต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ กระบวนการกัดสายใยแก้วนำแสงด้วยสารกัดแก้ว (Hydrofluoric acid: HF) และกระบวนการพอกสารประกอบทางเคมี อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้สายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด (Multimode fiber optic) และกำหนดระยะการกัดสายใยแก้วนำแสงเท่ากับ 10, 20 และ 25 มิลลิเมตร ตามลำดับ นอกจากนั้น สายใยแก้วนำแสงที่ผ่านกระบวนการกัดสายใยแก้วนำแสงแล้วจะถูกนำมาพอกด้วยซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide: ZnO) ร่วมกับโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate: SiO_2) ภายใต้อุณหภูมิ 24 และ 40 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาคุณลักษณะ (Characteristic) ด้วยกระบวนการวิเคราะห์ภาพ (Image processing) อีกทั้งต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่พัฒนาขึ้นถูกนำมาทดสอบกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นเท่ากับ 0 – 50% ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ อาทิเช่น ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (Mean error) และค่าความแม่นยำ (Accuracy) เทียบกับเครื่องมือวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพมาตรฐาน (Biogas analyzer) ซึ่งถูกใช้เป็นเครื่องมือวัดอ้างอิง (Reference instrument) โดยผลการทดลองพบว่า การพอกสายใยแก้วนำแสงที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีการกระจายตัวของสารประกอบทางเคมีที่สม่ำเสมอกว่าการพอกภายใต้อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส และใช้เวลาการพอกสายใยแก้วนำแสงน้อยกว่า 8 เท่า ในส่วนของการทดสอบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง พบว่าตัวตรวจจับที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในช่วงความเข้มข้น 5.39 – 38.25% นอกจากนั้นการศึกษาคุณสมบัติของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและค่าความแม่นยำมีค่าเท่ากับ 0.83% และ $\pm 3.73\%$ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับและแปลค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้และสามารถพัฒนาเป็นเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับก๊าซชีวภาพได้ในอนาคต

630920048 : Major ENERGY ENGINEERING

Keyword : Fiber optic-based refractometer, biogas, carbon dioxide, python, chemical compound

MR. Patchanon SEKHARARIDHI : A fiber optic-based refractometer for biogas detection Thesis advisor : Associate Professor Saroj Pullteap

This thesis is a design and development of a fiber optic-based refractometer for biogas detection focusing on carbon dioxide. The development process of the fiber optic sensor prototype can be divided into 2 steps: the chemical etching process using hydrofluoric acid (HF), and the chemical compounds coating process. Consequently, multimode fiber optic cables have been utilized with etching lengths of 10, 20, and 25 millimeters, respectively. The etched fiber optic cable was then coated with zinc oxide (ZnO) and sodium silicate (SiO₂) under temperatures of 24 and 40 °C to study its characteristics by image processing. Subsequently, the developed sensor was tested with carbon dioxide in the concentration range of 0 – 50%. The data was then analyzed using the developed engineering application to determine the properties of the fiber optic sensor, including the mean error and accuracy compared with a standard biogas analyzer that used as a reference. The experimental results showed that the coating process at 40 °C had a more uniform distribution of chemical compounds than the deposition at 24 °C, and the deposition time was 8 times shorter. Meanwhile, it was found that the fiber optic sensor can detect carbon dioxide gas in the concentration range of 5.39 – 38.25%. In addition, the study of the properties of the optical fiber detector found that the average error and accuracy can be calculated as 0.83% and ±3.73%, respectively. Therefore, it can be concluded that the developed fiber optic-based refractometer can detect and interpret the concentration of carbon dioxide and can be developed into an industrial measurement instrument related to biogas in the future.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สาโรช พูลเทพ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาชี้แนะแนวทาง คอยตักเตือน และสั่งสอนความรู้เพื่อนำไปใช้ในวิทยานิพนธ์จนถึงการใช้ชีวิต ขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระศักดิ์ หุตากร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาวลิต หามนตรี ที่กรุณาตอบรับเป็น ประธานและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ทุกคำสอนและคำชี้แนะต่าง ๆ จากอาจารย์ทั้งสามท่าน กระผม ขอน้อมรับและนำไปประยุกต์ใช้ในอนาคตเพื่อพัฒนาตนเองต่อไป

นอกจากนี้กระผมขอขอบคุณครอบครัว และเพื่อนร่วมงาน สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือต่าง ๆ หากไม่ได้รับการสนับสนุนจากบุคคลเหล่านี้ วิทยานิพนธ์นี้จะไม่สำเร็จได้อย่างแน่นอน รวมทั้งขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนในด้านของงานเอกสารต่าง ๆ รวมไปถึงการอำนวยความสะดวกในด้านของอุปกรณ์วิจัย และห้องปฏิบัติการระบบฝังตัวทางกล (Mechanical Embedded System Laboratory: MESL) ทำயที่สุดขอขอบพระคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้องจุลทรรศน์ วิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย นวัตกรรมและการสร้างสรรค์จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภัทรชนน เศรษฐฤทธิ์



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 สถานที่ในการดำเนินงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย	3
1.7 งบประมาณที่ใช้.....	3
1.8 ระยะเวลาในการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2	5
2.1 ก๊าซชีวภาพ (Biogas).....	5
2.1.1 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	5
2.1.2 ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ.....	7
2.2 เครื่องมือตรวจจับก๊าซชีวภาพ (Biogas sensing instruments).....	7
2.3 เครื่องมือตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide sensing instrument).....	8

2.4 ตัวตรวจจับชนิดใยแก้วนำแสง (Fiber optic sensor: FOS).....	11
2.4.1 แอบบีแฟร็กโตมิเตอร์ (Abbé refractometer)	13
2.4.2 ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์ (FOR).....	14
2.5 ไพทอน (Python language).....	15
2.6 วรรณกรรมวิจารณ์ที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3	23
3.1 การรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	23
3.2 การพัฒนาต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง.....	24
3.2.1 กระบวนการกัดสายใยแก้วนำแสง	24
3.2.2 กระบวนการพอกสายใยแก้วนำแสง	26
3.3 ทดสอบระบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง.....	27
3.3.1 ทดสอบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงกับก๊าซตัวอย่าง.....	27
3.3.2 กระบวนการกรองและประมวลผลข้อมูล.....	28
3.4 การวิเคราะห์และสรุปผล	32
บทที่ 4	33
4.1 ผลการพัฒนาต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง	33
4.1.1 ผลลัพธ์จากกระบวนการกัดสายใยแก้วนำแสง.....	33
4.1.2 ผลลัพธ์จากกระบวนการพอกสายใยแก้วนำแสง	36
4.2 ทดสอบระบบตรวจจับใยแก้วนำแสง.....	41
4.2.1 ผลลัพธ์จากการทดสอบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงกับก๊าซตัวอย่าง.....	42
4.2.2 ผลลัพธ์จากการกรองและประมวลผลข้อมูล	43
บทที่ 5	48
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	48
5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน	48

5.3 ข้อเสนอแนะ	49
5.4 แนวทางในการศึกษาต่อ	49
รายการอ้างอิง	50
ภาคผนวก ก	56
ภาคผนวก ข	92
ประวัติผู้เขียน	108



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาในการดำเนินงาน	4
ตารางที่ 2.1 ข้อดี-ข้อด้อยของตัวตรวจวัดชนิดต่าง ๆ	10
ตารางที่ 2.2 สรุปวรรณกรรมวิจารณ์.....	19
ตารางที่ 4.1 ขนาดแกนกลางของสายใยแก้วนำแสง ณ เวลา 45 นาที่หลังจากการแช่สารกัดแก้ว....	36
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิและความเร็วลมภายในห้องควบคุมอุณหภูมิ	37
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองวัดอุณหภูมิและความเร็วลมภายใต้หลอดไฟฮาโลเจน.....	39
ตารางที่ ก.1 สัดส่วนการผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	59
ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ	65
ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสำหรับการทำกราฟสอบเทียบค่า (Data for calibrating process)	89



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการย่อยสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ	6
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างเครื่องมือตรวจจับก๊าซชีวภาพ.....	8
รูปที่ 2.3 ขนาดของสายใยแก้วนำแสงชนิดต่าง ๆ	12
รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของแสงภายในสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดและพลาสติก.....	12
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างโครงสร้างของแอปเบรีแฟกต์มิเตอร์	13
รูปที่ 2.6 โครงสร้างระบบตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟกต์มิเตอร์	14
รูปที่ 2.7 ลักษณะการเกิดคลื่นอิวาเนสเซนส์.....	14
รูปที่ 2.8 กระบวนการแปลภาษาของตัวแปลภาษา	15
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	23
รูปที่ 3.2 โครงสร้างระบบการกักสายใยแก้วนำแสงด้วยสารเคมี.....	25
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการกักสายใยแก้วนำแสงด้วยสารเคมี	26
รูปที่ 3.4 กระบวนการเตรียมสารประกอบทางเคมีในการพอกสายใยแก้วนำแสง.....	27
รูปที่ 3.5 ระบบตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	28
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการกรองและประมวลผลข้อมูล.....	29
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างโปรแกรม DAQExpress.....	31
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างโปรแกรม JupyterLab	32
รูปที่ 4.1 การเตรียมสายใยแก้วนำแสงสำหรับกระบวนการกักสายใยแก้วนำแสงที่ระยะต่าง ๆ.....	33
รูปที่ 4.2 ระบบการกักสายใยแก้วนำแสง.....	34
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของกำลังทางแสงระหว่างกระบวนการกักสายใยแก้วนำแสง	35
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างสายใยแก้วนำแสงหลังผ่านกระบวนการกักสายใยแก้วนำแสงด้วยสารกักแก้ว	36
รูปที่ 4.5 ลักษณะการกระจายตัวของสารประกอบทางเคมีที่ผสมภายใต้อุณหภูมิ 24 °C.....	38

รูปที่ 4.6 ลักษณะการกระจายตัวของสารประกอบทางเคมีที่ผสมภายใต้อุณหภูมิ 40 °C.....	39
รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของเม็ดสีบนสายใยแก้วนำแสง	40
รูปที่ 4.8 ภาพเปรียบเทียบสายใยแก้วนำแสงที่ผ่านกระบวนการพอกสารประกอบทางเคมี	41
รูปที่ 4.9 ระบบตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับการตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	41
รูปที่ 4.10 สัญญาณจากต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง.....	42
รูปที่ 4.11 ค่าความแตกต่างทางกำลังไฟฟ้าระยะ; (ก) 10 มม. (ข) 20 มม. (ค) 25 มม.....	43
รูปที่ 4.12 ผลลัพธ์จากกระบวนการกรองสัญญาณที่ระยะต่าง ๆ	44
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างทางกำลังไฟฟ้าและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	45
รูปที่ 4.14 ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากสมการปรับเทียบ	46
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของเครื่องมือวัด	46
รูปที่ ก.1 สารเคมีในกระบวนการพอกสายใยแก้วนำแสง; (ก) ซิงค์ออกไซด์ (ข) โซเดียมซิลิเกต.....	56
รูปที่ ก.2 การชั่งตวงสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการพอกสายใยแก้วนำแสง	57
รูปที่ ก.3 การผสมสารเคมีภายใต้อุณหภูมิควบคุม	57
รูปที่ ก.4 ตัวอย่างผลลัพธ์การพอกสายใยแก้วนำแสงเพิ่มเติม	58
รูปที่ ก.5 ระบบส่งถ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	58
รูปที่ ก.6 สัดส่วนการผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	60
รูปที่ ก.7 ตัวอย่างข้อมูล CSV file	61
รูปที่ ก.8 คำสั่งการเรียบเรียงข้อมูลใหม่.....	62
รูปที่ ก.9 ตัวอย่างข้อมูลที่ผ่านกระบวนการเรียบเรียงแล้ว	62
รูปที่ ก.10 คำสั่งการกรองสัญญาณ	63
รูปที่ ก.11 ตัวอย่างการกรองสัญญาณด้วยวิธีเฉลี่ยค่าเคลื่อนที่	63
รูปที่ ก.12 คำสั่งแก้ไขการบันทึกเวลา.....	64
รูปที่ ก.13 ตัวอย่างข้อมูลหลังจากแก้ไขค่าเวลา	64

รูปที่ ก.14 คำสั่งการนำเข้าข้อมูลและสร้างตัวแปร.....	88
รูปที่ ก.15 คำสั่งการบอกตำแหน่งข้อมูลด้วยกราฟเส้นประ	89
รูปที่ ก.16 ผลลัพธ์กราฟข้อมูลพร้อมการบอกตำแหน่ง.....	89
รูปที่ ก.17 คำสั่งกระบวนการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น.....	90



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change) เป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น มนุษย์ สัตว์ และ ต้นไม้ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวโลก หรือเรียกอีกอย่างว่า ภาวะโลกร้อน (Global warming) ซึ่งส่งผลกระทบมากมายไม่ว่าจะเป็น การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล คลื่นความร้อน ทั้งในด้านของความถี่และความรุนแรง ลักษณะการกระจายตัวของฝน (Precipitation patterns) และการหยุดชะงักของระบบนิเวศ [1, 2] ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effects) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่ช่วยในการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกให้สิ่งมีชีวิตต่าง ๆ สามารถดำรงอยู่ได้ แต่เนื่องจากพฤติกรรมและกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ส่งผลให้เกิดก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases) มากขึ้น เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่น ๆ [3] จึงทำให้ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นและส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้นถึง 1.2 องศาเซลเซียส [4-6] ดังนั้นในภาคการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยจึงมีการใช้พลังงานทดแทน (Renewable energy) เพื่อลดการผลิตก๊าซดังกล่าว เช่น การใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) ทดแทนก๊าซธรรมชาติ (Natural gas) รวมไปถึงเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ซึ่งผลิตได้จาก มูลสัตว์ น้ำเสีย รวมไปถึงของเสียอื่น ๆ [5] เนื่องจากประเทศไทยมีอุตสาหกรรมการเกษตรมากมายที่มีของเสียเหล่านี้เป็นของเหลือทิ้ง กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) จึงมีการผลักดันแผนพัฒนาพลังงานทดแทน และพลังงานทางเลือกในช่วง พ.ศ. 2561 – 2580 หรือเรียกว่าแผน AEDP 2018 ที่มีการผลักดันให้ใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตไฟฟ้าเป็นปริมาณทั้งสิ้น 1,565 เมกะวัตต์ [7] ซึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตก๊าซชีวภาพ รวมไปถึงอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง การผลิตก๊าซเรือนกระจกจำเป็นต้องมีการตรวจจับความเข้มข้นขององค์ประกอบก๊าซดังกล่าวอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากการเก็บข้อมูลดังกล่าวช่วยในด้านของการควบคุมปริมาณและการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสภาพแวดล้อม นำไปสู่การวางแผนการรับมือ เรื่องของการจัดการก๊าซดังกล่าว ปัจจุบันเครื่องมือตรวจจับก๊าซชีวภาพที่ใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตรมีทั้งแบบพกพา (Portable instrument) และแบบติดตั้งอยู่กับที่ (Fixed biogas analyzer) ซึ่งมีราคาแพงและจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เนื่องจากภายในประเทศยังไม่มีการพัฒนาเครื่องมือวัดเหล่านี้อย่างจริงจัง แต่มีความต้องการใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม

วิทยานิพนธ์นี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์ (Fiber optic based-refractometer: FOR) สำหรับการตรวจจับความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ (Concentration) โดยใช้หลักการจากทฤษฎีของคลื่นอีวานเนสเซนส์ (Evanescent wave) ซึ่งเกิดจากการดูดซับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic field) ที่อยู่บริเวณชั้นเคลือบของสายใยแก้วนำแสง โดยคาดว่าตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับหนึ่งในองค์ประกอบสำคัญของก๊าซชีวภาพได้ โดยการใช้สารประกอบทางเคมีที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับก๊าซดังกล่าว และสามารถแปรค่าดังกล่าวออกมาเป็นความเข้มข้นของก๊าซได้ด้วยโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมที่พัฒนาขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อออกแบบและพัฒนาต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์สำหรับตรวจจับความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ โดยมุ่งเน้นไปที่การตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น (Carbon dioxide: CO₂)

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในช่วง 0 – 50%
- ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในภาชนะทดลองเท่านั้น
- ใช้เครื่องมือวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพแบบพกพา (Biogas analyzer) เพื่อเป็นเครื่องมืออ้างอิงสำหรับการหาค่าประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบและพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์ (Fiber optic-based refractometer) สำหรับการตรวจจับก๊าซชีวภาพ โดยมุ่งเน้นไปที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งในการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่

1.4.1 รวบรวมข้อมูล

ขั้นตอนนี้เป็นการค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น บทความวิชาการ เว็บไซต์ที่มีความน่าเชื่อถือ หนังสือที่เกี่ยวข้อง ฯลฯ ซึ่งจะนำมาคัดกรองเพื่อเป็นข้อมูลที่ใช้ในการอ้างอิงในวิทยานิพนธ์นี้

1.4.2 พัฒนารูปแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง

หลังจากรวบรวมข้อมูลวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวข้องและออกแบบการทดลอง ได้มีการพัฒนาโครงสร้างต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง แยกออกเป็นกระบวนการกัดสายใยแก้วนำแสงด้วยสารกัดแก้ว และการพอกสารประกอบทางเคมี เพื่อให้ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับก๊าซตัวอย่างได้

1.4.3 ทดสอบระบบตรวจจับใยแก้วนำแสง

ภายในขั้นตอนทดสอบระบบตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพ ได้มีการออกแบบการทดลองสำหรับการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซตัวอย่างและค่ากำลังทางแสงจากต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาทำการประมวลผลและกรองสัญญาณด้วยโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อนำไปหาความไวในการตอบสนองและระยะเวลาในการคืนสภาพของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่พัฒนาขึ้น ตามลำดับ

1.4.4 อภิปรายและสรุปผล

เมื่อมีการรวบรวมข้อมูลและผลลัพธ์จากการทดลองเสร็จสิ้นแล้วจะเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลและนำมาสรุปผลและอภิปรายผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง

1.5 สถานที่ในการดำเนินงาน

ห้องปฏิบัติการระบบฝังตัวทางกล (Mechanical Embedded System Laboratory: MESL) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1.6.1 ประโยชน์ต่อการพัฒนาเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม

1.6.2 องค์ความรู้ใหม่ที่ได้รับจากการดำเนินการ

1.7 งบประมาณที่ใช้

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย นวัตกรรมและการสร้างสรรค์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ทั้งสิ้น 30,000 บาท (สามหมื่นบาทถ้วน)

1.8 ระยะเวลาในการดำเนินงาน

สามารถแสดงแผนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์ได้ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาในการดำเนินงาน

การปฏิบัติงาน	ระยะเวลาดำเนินงาน
1. ศึกษาตำราและวรรณกรรมวิจารณ์ที่เกี่ยวข้อง	พฤศจิกายน 63 - กุมภาพันธ์ 64
2. ศึกษาหลักการทำงานของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง	มีนาคม 64 - กรกฎาคม 64
3. ศึกษาวิธีการกัดสายใยแก้วนำแสง และออกแบบวิธีการพอกสายใยแก้วนำแสง	สิงหาคม 64 - พฤศจิกายน 64
4. ออกแบบและพัฒนาต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์สำหรับการตรวจจับก๊าซชีวภาพ	ธันวาคม 64 - มีนาคม 65
5. ศึกษาคุณลักษณะของการกัดสายใยแก้วนำแสงด้วยสารกัดแก้ว	เมษายน 65 - กรกฎาคม 65
6. ศึกษาคุณลักษณะของสายประกอบทางเคมีสำหรับใช้ในการพอกสายใยแก้วนำแสง	สิงหาคม 65 - กุมภาพันธ์ 66
7. ทดสอบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงกับก๊าซตัวอย่าง	มีนาคม 66 - สิงหาคม 66
8. วิเคราะห์และกรองสัญญาณที่ได้จากการทดลอง	กันยายน 66 - ธันวาคม 66
9. อภิปรายและสรุปผลการดำเนินงาน	มกราคม 67 - พฤษภาคม 67
10. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์	กรกฎาคม 67 - กันยายน 67

บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมวิจารณ์ที่เกี่ยวข้อง

บทนี้เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและวรรณกรรมวิจารณ์ที่เกี่ยวข้องของเครื่องมือและวิธีการตรวจจับความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ โดยมุ่งเน้นที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น รวมไปถึงการประยุกต์ใช้สายใยแก้วนำแสงในการตรวจจับก๊าซต่าง ๆ ซึ่งมีการรวบรวมข้อมูลจากบทความวิชาการ เว็บไซต์ที่มีความน่าเชื่อถือ และหนังสือที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถแบ่งหัวข้อได้ดังนี้

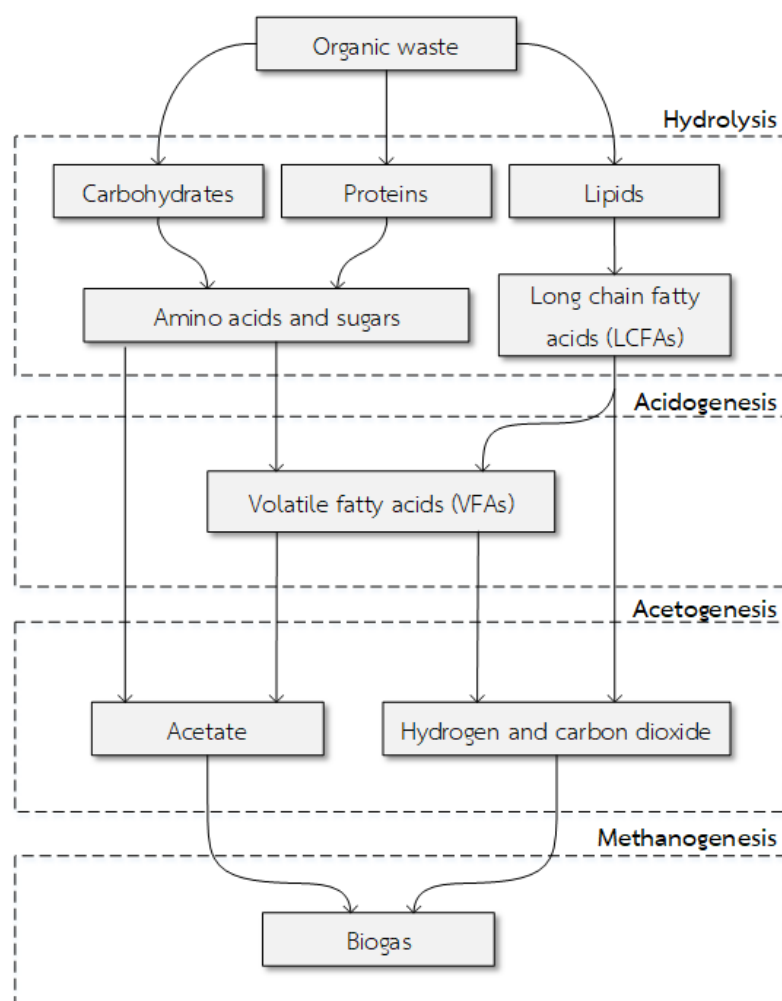
- 2.1 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)
- 2.2 เครื่องมือตรวจจับก๊าซชีวภาพ (Biogas sensing instruments)
- 2.3 เครื่องมือตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide sensing instrument)
- 2.4 ตัวตรวจจับชนิดใยแก้วนำแสง (Fiber optic sensor: FOS)
- 2.5 ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์ (FOR)
- 2.6 ไพทอน (Python language)
- 2.7 วรรณกรรมวิจารณ์ที่เกี่ยวข้อง

2.1 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

ก๊าซที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติภายใต้กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic digestion) ด้วยแบคทีเรียหลากหลายชนิด โดยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในระดับครัวเรือนจนถึงระดับโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ มีเทน (CH_4), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), และส่วนประกอบอื่น ๆ อาทิเช่น ไฮโดรเจน (H_2), ไนโตรเจน (N_2), ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S), และออกซิเจน (O_2) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.1.1 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ

ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ เป็นกระบวนการที่ให้ผลลัพธ์เป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ตั้งแต่ในระดับครัวเรือนจนถึงในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า โดยสามารถแบ่งกระบวนการได้เป็น 4 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการย่อยสลายอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ

- ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ในกระบวนการไฮโดรไลซิสได้มีการย่อยสลายโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น แป้ง โปรตีน ลิพิด ฯลฯ ด้วยแบคทีเรีย (Hydrolytic bacteria) มีหน้าที่ในการสร้างเอ็นไซม์ที่ทำหน้าที่ลดขนาดสารโมเลกุลให้มีขนาดเล็กลง เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และ กรดไขมัน (Long chain fatty acids: LCFAs) [8]

- เอซิโอเจนิซิส (Acidogenesis)

เมื่อสารโมเลกุลขนาดใหญ่ถูกย่อยสลายให้เป็นขนาดเล็กในกระบวนการไฮโดรไลซิส สารดังกล่าวจะถูกดูดซับโดยแบคทีเรีย (Acidogenic bacteria) และย่อยสลายออกมาเป็นกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids: VFAs) ฯลฯ โดยในขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเร็วที่สุดในกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ ซึ่งเกิดขึ้นภายในระยะเวลา 36 ชั่วโมง [9]

- อะซิโดเจเนซิส (Acetogenesis)

เป็นขั้นตอนที่เปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายให้กลายเป็นอะซิเตท (Acetate) ไฮโดรเจน (Hydrogen) และคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) ด้วยแบคทีเรีย (Acetogenic bacteria) ซึ่งในกระบวนการนี้จำเป็นต้องใช้ไฮโดรเจนที่มีความดันต่ำในการเกิดอะซิเตท หากความดันมากเกินไปจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาดังกล่าวน้อยลง [9]

- เมทาโนเจเนซิส (Methanogenesis)

ในขั้นตอนสุดท้ายสารที่เหลืออยู่จะถูกแบคทีเรียชนิดเมทาโนเจน (Methanogens) ย่อยสลายจนกลายเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งในกระบวนการนี้มีความอ่อนไหวต่อออกซิเจนและใช้เวลามาก ส่งผลให้แบคทีเรียบางชนิดสลายไปและไม่สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ [9]

2.1.2 ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพเป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่ถูกนำมาใช้แทนที่เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuels) เช่น ก๊าซธรรมชาติ เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศเป็นกระบวนการที่กักเก็บและนำก๊าซมีเทน (Methane) ไปใช้ประโยชน์ ดังนั้นการนำก๊าซชีวภาพซึ่งมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักไปใช้ จึงช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศและช่วยยับยั้งการเกิดภาวะโลกร้อนได้ อีกทั้งยังช่วยลดปัญหาข้อเสียอีกมากมาย เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวใช้ของเสียชนิดต่าง ๆ เช่น มูลสัตว์ เศษอาหารเหลือทิ้ง ฯลฯ เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ [2]

2.2 เครื่องมือตรวจจับก๊าซชีวภาพ (Biogas sensing instruments)

เครื่องมือตรวจจับก๊าซชีวภาพสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท เครื่องมือตรวจจับก๊าซชีวภาพแบบพกพา (Portable biogas analyzer) และเครื่องมือตรวจจับก๊าซชีวภาพแบบติดตั้งอยู่กับที่ (Fixed biogas analyzer) [10] โดยเครื่องมือตรวจจับทั้งสองประเภทประกอบไปด้วยตัวตรวจจับก๊าซหลายชนิดซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น ซึ่งภาพตัวอย่างของเครื่องมือวัดทั้งสองประเภทสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างเครื่องมือตรวจก๊าซชีวภาพ; (ก) แบบพกพา (ข) แบบติดตั้งอยู่กับที่ [11]

เครื่องมือตรวจก๊าซทั้งสองมีข้อดี-ข้อด้อยที่แตกต่างกัน คือ มีขนาดเล็กพกพาง่าย และราคาถูกลงกว่าแบบตรวจแบบติดตั้งอยู่กับที่ ในทางตรงกันข้าม เนื่องจากเป็นเครื่องมือตรวจแบบพกพา ผู้ใช้งาน (User) จำเป็นต้องลงพื้นที่ตรวจด้วยตนเอง ซึ่งผู้ใช้งานต้องอยู่ในพื้นที่ที่มีก๊าซอันตรายโดยไม่จำเป็น นอกจากนั้นเครื่องมือวัดดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในเรื่องของช่วงการวัดค่า [12, 13] ในขณะที่เครื่องมือตรวจแบบติดตั้งอยู่กับที่มีข้อดี คือ สามารถตรวจและเก็บข้อมูลได้แบบต่อเนื่องเป็นเวลานานโดยไม่ต้องหยุดพัก มีความแม่นยำที่สูงกว่า และไม่มีความจำเป็นที่จะต้องลงไปในพื้นที่ตรวจ จึงสามารถลดความเสี่ยงต่อผู้ใช้งานได้ แต่เนื่องจากเป็นเครื่องมือตรวจแบบติดตั้งอยู่กับที่ เครื่องมือวัดจึงมีขนาดใหญ่และไม่สะดวกต่อการพกพา รวมไปถึงการเก็บข้อมูลที่ใช้ระยะเวลานานขึ้นเช่นกัน โดยเครื่องมือตรวจทั้งสองชนิดถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า การผลิตก๊าซชีวภาพ ฯลฯ เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมปริมาณก๊าซชีวภาพให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อมนุษย์

2.3 เครื่องมือตรวจก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide sensing instrument)

เครื่องมือตรวจก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแบ่งประเภทตามชนิดของตัวตรวจได้ทั้งสิ้น 4 ชนิด ได้แก่ ตัวตรวจอินฟราเรดแบบไม่แทรกแซง (Non-dispersive infrared sensor), ตัวตรวจเสียงจากการสั่นสะเทือนของแสง (Photoacoustic sensor), ตัวตรวจดูดซับทางเคมี (Chemical absorption sensor), และตัวตรวจสารกึ่งตัวนำจากโลหะออกไซด์ (Metal oxide semiconductor sensor) ตามลำดับ [14-16] โดยตัวตรวจ 4 ประเภทใช้หลักการตรวจ

ที่แตกต่างกันจึงมีข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกัน เช่น ความไวในการตรวจจับ (Sensitivity), ระยะเวลาการตอบสนอง (Response time) และกระบวนการตรวจจับ (Measuring procedure) เป็นต้น โดยตัวตรวจจับอินฟราเรดแบบไม่แทรกแซง มีการตรวจจับการดูดซับของแสงภายในช่วงอินฟราเรดโดยตรง ซึ่งภายในมีภาชนะกักเก็บก๊าซ (Gas sample chamber) ให้ก๊าซตัวอย่างไหลผ่าน เมื่อแสงภายในภาชนะกักเก็บก๊าซถูกดูดกลืน (Absorb) โดยก๊าซตัวอย่าง ปริมาณแสงภายในภาชนะจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งมีค่าแปรผันกับค่าความเข้มข้นของก๊าซตัวอย่าง (Sample) ตัวตรวจจับชนิดดังกล่าวสามารถตรวจจับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่น้อย และสามารถตรวจจับก๊าซตัวอย่างแบบต่อเนื่องได้ และมีอัตราการซ่อมบำรุงต่ำเมื่อเทียบกับตัวตรวจจับชนิดอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ตัวตรวจจับชนิดดังกล่าวมีอัตราการใช้พลังงานที่สูง มีราคาที่สูง และมีขนาดที่ใหญ่ จึงไม่เหมาะต่อการเคลื่อนย้าย ในขณะที่ตัวตรวจจับเสียงจากการสั่นสะเทือนของอนุภาคมีการใช้แสงที่มีความยาวคลื่นจำเพาะ (Specific wavelength) กระตุ้นโมเลกุลของก๊าซตัวอย่างเพื่อให้เกิดการสั่นสะเทือน เสียงที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนของโมเลกุลของก๊าซตัวอย่างถูกนำมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของก๊าซตัวอย่าง [17] นอกจากนี้ ตัวตรวจจับการดูดซับทางเคมีใช้หลักการดูดซับของสารเคมีภายในตัวกลางที่สามารถตรวจจับได้ เพื่อหาค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีความไวในการตรวจจับสูงและสามารถตรวจจับก๊าซได้ในปริมาณน้อย แต่เนื่องจากการดูดซับของสารเคมีเข้าสู่หัววัด (Probe) จึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนหัววัดตามกำหนดการซ่อมบำรุง นอกจากนี้ตัวตรวจจับชนิดการดูดซับทางเคมีใช้ประโยชน์จากสารประกอบทางเคมี (Chemical compound) ที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับก๊าซตัวอย่าง เมื่อสารประกอบทางเคมีสัมผัสกับก๊าซตัวอย่างส่งผลให้ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนไป ค่าการเปลี่ยนแปลงจึงถูกนำมาคำนวณเพื่อหาความเข้มข้นของก๊าซตัวอย่าง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยจึงส่งผลให้ตัวตรวจจับสามารถตรวจจับก๊าซปริมาณน้อยเช่นกัน สุดท้าย คือ ตัวตรวจจับชนิดสารกึ่งตัวนำจากโลหะออกไซด์ ซึ่งมีการประยุกต์ใช้สารกึ่งตัวนำไฟฟ้าที่สามารถทำปฏิกิริยากับก๊าซตัวอย่างได้ โดยตัวตรวจจับชนิดนี้มีการวัดค่ากระแสไฟที่ส่งผ่านสารกึ่งตัวนำเมื่อสัมผัสกับก๊าซตัวอย่าง ส่งผลให้ตัวตรวจจับประเภทดังกล่าวมีความไวในการตรวจจับสูง (High sensitivity) แต่เนื่องจากเป็นตัวตรวจจับแบบทางอ้อมจึงจำเป็นต้องมีการปรับเทียบค่า (Calibration) อยู่เสมอ โดยข้อดี-ข้อด้อยของตัวตรวจจับสามารถแสดงได้ในตารางที่ 2.1

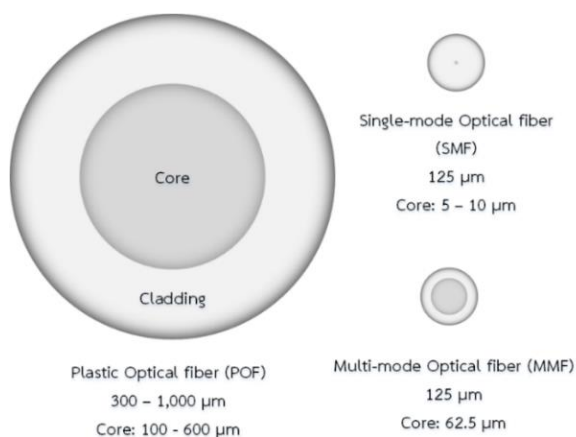
ตารางที่ 2.1 ข้อดี-ข้อด้อยของตัวตรวจวัดชนิดต่าง ๆ

ชนิดของตัวตรวจจับ	ข้อดี	ข้อด้อย
ตัวตรวจจับอินฟราเรดแบบไม่แพร่กระจาย (Non-dispersive infrared sensor)	- ความไวในการตรวจจับสูง - สามารถตรวจจับแบบต่อเนื่องได้ - ความจำเป็นในการซ่อมบำรุงต่ำ - สามารถตรวจจับก๊าซในปริมาณที่น้อยได้	- ใช้พลังงานสูง - ขนาดและน้ำหนัก - ราคาสูง
ตัวตรวจจับเสียงจากการสั่นสะเทือนของอนุภาค (Photoacoustic sensor)	- ความไวในการตรวจจับสูง - ตอบสนองไว - ใช้พลังงานต่ำ	- ช่วงความเข้มข้นในการตรวจจับต่ำ - มีความจำเป็นในการปรับเทียบค่า
ตัวตรวจจับชนิดการดูดซับทางเคมี (Chemical absorption sensor)	- สามารถตรวจจับก๊าซในปริมาณที่น้อยได้	- จำเป็นต้องเปลี่ยนหัววัดตามกำหนดการซ่อมบำรุง
ตัวตรวจจับชนิดสารกึ่งตัวนำจากโลหะออกไซด์ (Metal oxide semiconductor sensor)	- ความไวในการตรวจจับสูง - ราคาถูก	- ประสิทธิภาพต่ำตามการใช้งาน - มีความจำเป็นในการปรับเทียบค่า (Calibration)

ดังนั้นจากการสรุปข้อดี-ข้อด้อยของเครื่องมือตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามชนิดของตัวตรวจจับจึงพบว่าในปัจจุบันภายในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับก๊าซชีวภาพและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีความจำเป็นในการตรวจจับค่าความเข้มข้น แต่เนื่องจากเครื่องมือที่มีราคาแพงและมีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ในวิทยานิพนธ์นี้จึงมีความสนใจนำสายใยแก้วนำแสงมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือตรวจจับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อถัดไป

2.4 ตัวตรวจจับชนิดใยแก้วนำแสง (Fiber optic sensor: FOS)

ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง คือ สายใยแก้วนำแสงที่ถูกดัดแปลงโครงสร้างภายในและโครงสร้างของระบบ เพื่อใช้ในการตรวจจับหรือตรวจวัดค่าทางกายภาพต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ การสั่นสะเทือน แรง ความดันเลือด และ ระดับความเข้มข้นของก๊าซ [18] โดยสายใยแก้วนำแสงซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของตัวตรวจจับทำหน้าที่ในการตรวจจับคุณสมบัติทางแสงต่าง ๆ ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากโครงสร้างหรือระบบที่ถูกดัดแปลงเพื่อใช้ในการตรวจจับค่าทางกายภาพต่าง ๆ โดยทั่วไปสายใยแก้วนำแสง มีโครงสร้างหลักทั้งหมด 4 ชั้น ประกอบด้วย แกนกลาง (Core), แคลดดิ้ง (Cladding), ส่วนป้องกันชั้นใน (Buffer), และส่วนป้องกันชั้นนอก (Jacket) ตามลำดับ โดยแกนกลางใช้วัสดุที่มีดัชนีการหักเห (Refractive index: RI) ที่สูงกว่าของแคลดดิ้ง จึงทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมด (Total internal reflection: TIR) ส่วนมากใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide: SiO_2) หรือเรียกว่า ซิลิกา (Silica) เป็นวัสดุหลักในการผลิต [19] โดยทั่วไปสายใยแก้วนำแสงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามขนาดของหน้าตัดสายใยแก้วนำแสงและลักษณะการเคลื่อนที่ของแสงภายในสายใยแก้วนำแสง ได้แก่ สายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว (Single-mode optical fiber: SMF) มีขนาดแกนกลางเท่ากับ 5 – 10 ไมครอน (Micron: μm), สายใยแก้วนำแสงแบบหลายโหมด (Multi-mode optical fiber: MMF) มีขนาดแกนกลางเท่ากับ 62.5 ไมครอน และสายใยแก้วนำแสงวัสดุประเภทพลาสติก (Plastic optical fiber: POF) ซึ่งวัสดุแกนกลาง และแคลดดิ้งผลิตจากพลาสติก [20] ดังนั้นสายชนิดนี้จึงมีความยืดหยุ่นมากกว่าแบบซิลิกาแต่เนื่องจากมีแกนกลางที่ใหญ่กว่าสายใยแก้วนำแสงทั้งสองชนิดข้างต้น จึงทำให้มีการสูญเสีย (Loss) ระหว่างสายส่งที่มากกว่า [20] ขนาดของสายใยแก้วนำแสงชนิดต่าง ๆ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.3 โดยทั่วไปการสูญเสียหรือการลดคุณภาพของสัญญาณภายในสายใยแก้วนำแสงนั้นเกิดขึ้นได้ 3 วิธี การสูญเสียเนื่องจากระยะทาง (Fiber Attenuation), การกระเจิงของสัญญาณ (Signal dispersion) และการรบกวนของสัญญาณภายในสาย (Crosstalk) [21] ตามลำดับ

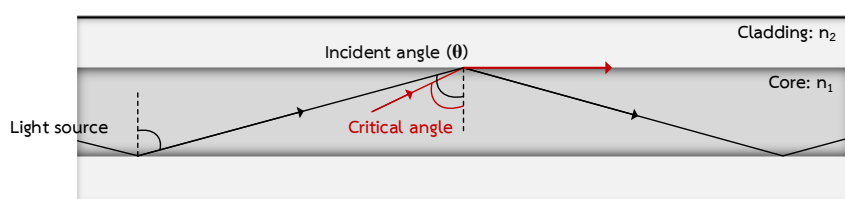


รูปที่ 2.3 ขนาดของสายใยแก้วนำแสงชนิดต่าง ๆ; (ก) สายใยแก้วนำแสงวัสดุประเภทพลาสติก (ข) สายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว (ค) สายใยแก้วนำแสงแบบหลายโหมด [20]

โดยทั่วไปแสงสามารถพิจารณาได้สองรูปแบบ คือ อนุภาค (Particle) และคลื่น (Wave) [22, 23] แต่ในการเคลื่อนที่ของแสงภายในสายใยแก้วนำแสงจะนิยมพิจารณาในรูปของอนุภาค เนื่องจากเมื่อแสงเคลื่อนที่ภายในสายใยแก้วนำแสง จะมีการพิจารณาเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค แสงเป็นเส้นตรงแบบสะท้อนไปมาดังแสดงในรูปที่ 2.4 แสงเคลื่อนที่อยู่แค่ภายในชั้นแกนกลาง (Core) เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของแกนกลาง (n_{core}) มีค่าสูงกว่าชั้นแคลดดิ้ง (n_{cladding}) จึงทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดภายในแกนกลาง [21] สามารถอธิบายได้จากกฎของสเนลล์แสดงใน (2.1) โดยแสงจะเกิดการสะท้อนกลับหมดเมื่อมุมตกกระทบ (θ) มีค่ามากกว่ามุมวิกฤต (θ_{crit}) สามารถคำนวณได้จาก (2.2) [20]

$$\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 = \sin \theta_2 \quad (2.1)$$

$$\theta_{\text{crit}} = \arcsin\left(\frac{n_{\text{cladding}}}{n_{\text{core}}}\right) \quad (2.2)$$

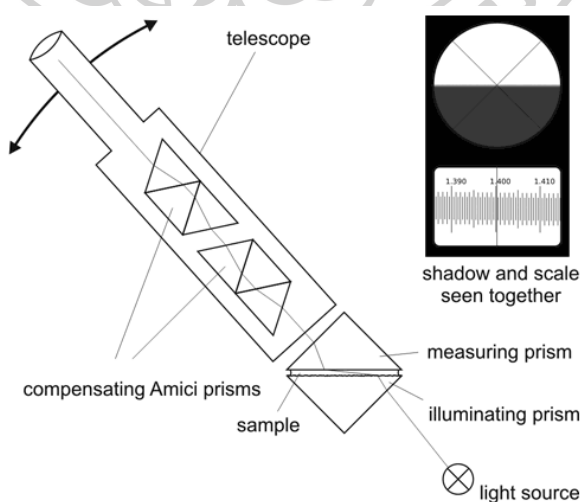


รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของแสงภายในสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดและพลาสติก

ในขณะที่มุมตกกระทบมีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤตจะส่งผลให้แสงภายในบางส่วนเกิดการกระเจิงออกบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแกนกลางและแคลดดิง ส่งผลให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น (Electromagnetic wave) ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างี้มีการสูญเสียพลังงานแบบทวีคูณ (Exponential decay) ในทิศทางตั้งฉากกับผิวของสายใยแก้วนำแสง เรียกว่า “คลื่นอีวานเนสเซนส์ (Evanescent wave)” ต่อมาคลื่นดังกล่าวได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจวัดค่าดัชนีการหักเหของแสงบริเวณตัวกลางภายนอก โดยเครื่องมือวัดชนิดดังกล่าว เรียกว่า รีแฟรกโตมิเตอร์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ แอบเบรีแฟรกโตมิเตอร์ (Abbé refractometer) และ ตัวตรวจวัดใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์ (Fiber optic based refractometer: FOR) ตามลำดับ

2.4.1 แอบเบรีแฟรกโตมิเตอร์ (Abbé refractometer)

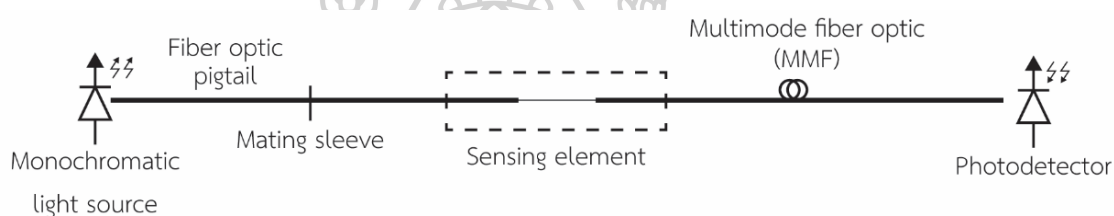
แอบเบรีแฟรกโตมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดค่าดัชนีการหักเหของแสงที่สามารถวัดได้ทั้งของแข็งและของเหลว เครื่องแรกทีพัฒนาให้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ [24] โดยสามารถแบ่งโครงสร้างออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ปริซึมแก้ว (Glass prism) แหล่งกำเนิดแสง (Light source) และกล้องส่องปริซึม (Telescope) เมื่อแสงเดินทางจากแหล่งกำเนิดแสงผ่านปริซึมที่มีของแข็งหรือของเหลวที่ต้องการวัดค่าอยู่ จะส่งผลให้เกิดแถบเงามืดขึ้นบริเวณกล้องส่องปริซึม ซึ่งภายในจะมีมาตรวัดสำหรับวัดค่าดัชนีหักเหของแสงอยู่เพื่อใช้ในการวัดค่าดัชนีการหักเหของแสง โดยภายในโครงสร้างของแอบเบรีแฟรกโตมิเตอร์สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างโครงสร้างของแอบเบรีแฟรกโตมิเตอร์ [24]

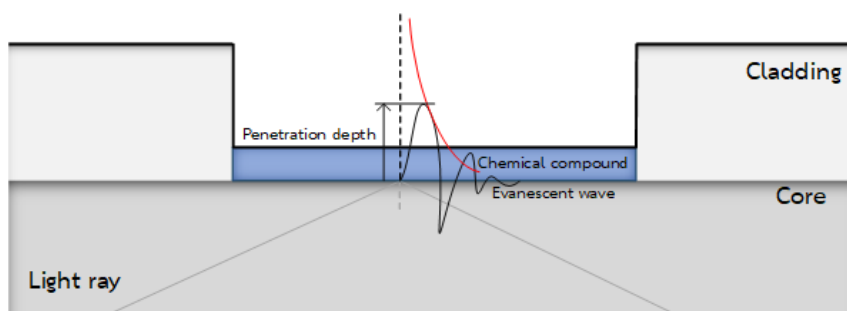
2.4.2 ตัวตรวจจับสนำแสงชนิดรีแฟรคโตมิเตอร์ (FOR)

ตัวตรวจจับสนำแสงชนิดรีแฟรคโตมิเตอร์ เป็นหนึ่งในชนิดของตัวตรวจจับสนำแสง โดยใช้หลักการตรวจจับสนำแสงที่หักเหของแสงที่เปลี่ยนไปในบริเวณภายนอก ปัจจุบันตัวตรวจจับสนำแสงชนิดรีแฟรคโตมิเตอร์ถูกประยุกต์ใช้ในการตรวจจับสนำแสงต่าง ๆ เช่น การตรวจจับสนำแสงที่มีความเข้มข้นของก๊าซ [25-27] การตรวจจับสนำแสงความถี่สูง [28-36] การตรวจจับสนำแสงอุณหภูมิ ฯลฯ [25, 37] โดยตัวตรวจจับสนำแสงชนิดรีแฟรคโตมิเตอร์ สามารถแบ่งองค์ประกอบได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง (Light source) ตัวตรวจจับสนำแสง (Sensing element) และตัวตรวจจับสนำแสง (Photodetector) สามารถแสดงโครงสร้างตัวอย่างได้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างระบบตรวจจับสนำแสงชนิดรีแฟรคโตมิเตอร์

ความยาวคลื่นของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับแสงของสารประกอบทางเคมีที่นำมาพอกบริเวณตัวตรวจจับสนำแสง โดยปกติบริเวณตัวตรวจจับสนำแสงนั้นได้ถูกดัดแปลงด้วยการลดขนาดของหน้าตัดสายใยแก้วนำแสงด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การยืดสายใยแก้วนำแสงด้วยความร้อน (Tapering method), การกัดสายใยแก้วนำแสงด้วยความร้อน (Heat etching method) และการกัดสายใยแก้วนำแสงด้วยสารเคมี (Chemical etching method) [38, 39] กระบวนการเหล่านี้มีจุดประสงค์เพื่อนำชั้นของเคลือบออกเพื่อให้คลื่นอีวาเนสเซนส์สามารถระเหิดออกสู่บรรยากาศภายนอกโดยแสดงได้ในรูปที่ 2.7

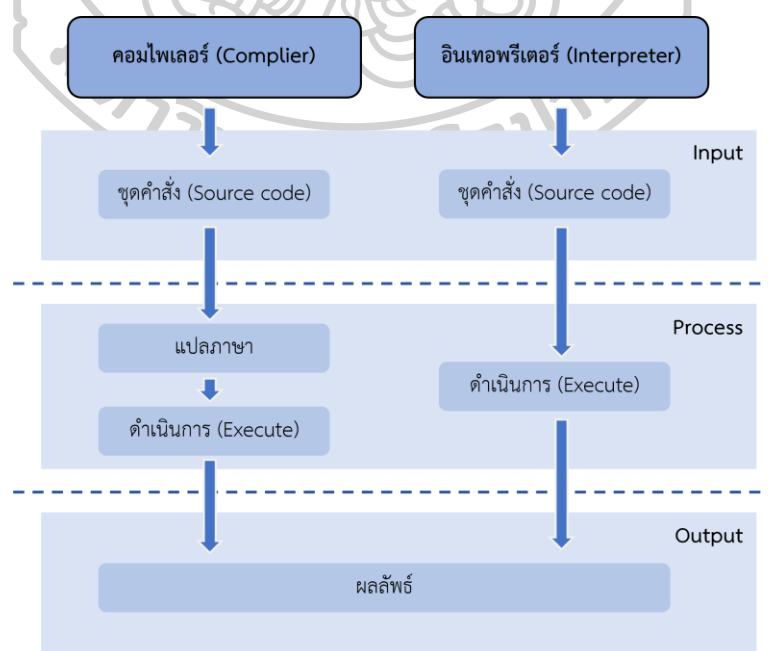


รูปที่ 2.7 ลักษณะการเกิดคลื่นอีวาเนสเซนส์

เมื่อสายใยแก้วนำแสงไม่ถูกตัดแปลง แสงภายในสายใยแก้วนำแสงจะไม่สามารถหักเหออกมาสู่สภาพแวดล้อมภายนอกได้ ทำให้ระบบตรวจจับความเข้มแสงสามารถตรวจจับความเข้มแสงได้ 100% หรือเรียกว่า ไม่เกิดการสูญเสียสู่สภาพแวดล้อมภายนอก แต่เนื่องจากการตัดแปลงโครงสร้างสายใยแก้วนำแสงดังวิธีการข้างต้น จะเกิดการสูญเสียทางแสงจากสภาพแวดล้อมภายนอก

2.5 ไพทอน (Python language)

ไพทอน คือ ภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมทั่วไป ซึ่งจัดอยู่ในภาษาคอมพิวเตอร์ระดับสูง (High programming language) ถูกพัฒนาขึ้นโดย *Guido van Rossum* เป็นนักเขียนโปรแกรมชาวดัตช์ และนำมาเผยแพร่ผ่านทางมูลนิธิซอฟต์แวร์ไพทอน (Python Software Foundation : PSF) ซึ่งถูกนำมาใช้ในด้านวิเคราะห์ข้อมูลและอีกมากมายโดยการใช้ส่วนขยายของไพทอน (Python's extension) เช่น Numpy, Opencv, Pandas และ Matplotlib ที่ช่วยให้การวิเคราะห์ข้อมูลง่ายมากยิ่งขึ้น [40] โดยทั่วไปคอมพิวเตอร์สามารถรับคำสั่งได้ในรูปแบบของเลขฐานสอง (Binary number) เท่านั้น ดังนั้นการเขียนชุดคำสั่งต่าง ๆ ในภาษาโปรแกรม (Programming language) จำเป็นต้องมีตัวกลางในการแปลภาษาให้อยู่ในรูปของเลขฐานสอง แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ คอมไพเลอร์ (Compiler) ใช้โดยภาษา C, C++, C# และ Java เป็นต้น ต่อมาตัวแปลภาษา (Interpreter) ซึ่งใช้โดยภาษา Python, JavaScript และ PHP เป็นต้น โดยขั้นตอนการแปลภาษาสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.8 [41]



รูปที่ 2.8 กระบวนการแปลภาษาของตัวแปลภาษา

ดังแสดงในรูปที่ 2.8 คอมไพเลอร์จะรับชุดคำสั่งเข้ามาทั้งหมด จึงแปลภาษาเป็นเลขฐานสอง (Binary) แล้วดำเนินการขั้นตอนสุดท้ายและแสดงผลลัพธ์ ในขณะที่ตัวแปลภาษา (Interpreter) ดำเนินการประมวลผลในแต่ละบรรทัดด้วยชุดคำสั่งที่คล้ายกับภาษาที่มนุษย์เข้าใจแล้วจึงแสดงผลลัพธ์ เนื่องจากมีการประมวลผลแต่ละคำสั่งแยกออกจากกัน การเขียนชุดคำสั่งในภาษาดังกล่าวจึงง่ายต่อการแก้ไขเนื่องจากสามารถแสดงจุดผิดพลาดในชุดคำสั่งได้ทันที [42] ดังนั้นภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้ตัวแปลภาษา มีข้อดีเช่น เป็นภาษาที่ง่ายต่อการเข้าใจ สามารถเขียนชุดคำสั่งได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และสามารถแก้ไขคำสั่งได้ง่าย ในขณะที่ภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้คอมไพเลอร์ มีข้อดีดังนี้ สามารถประมวลผลได้เร็ว ใช้พื้นที่ในหน่วยความจำน้อย และสามารถเขียนชุดคำสั่งขนาดใหญ่ได้

2.6 วรรณกรรมวิจารณ์ที่เกี่ยวข้อง

M. E. Álvarez-Ramos *et al.* ได้ทำการวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์และเปรียบเทียบกับสายใยแก้วนำแสงชนิดโหนดเดี่ยวที่มีการปรับปรุงชั้นเคลือบด้วยการพอกสารประกอบทางเคมีทั้งสิ้น 2 แบบ โดยสายใยแก้วนำแสงแบบแรกได้ทำการพอกซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide: ZnO) ที่มีการจับตัวของทองคำขนาดนาโน (Gold nanoparticles: AuNPs) บริเวณผิวและแบบต่อมาได้ทำการพอกซิงค์ออกไซด์แทนที่ชั้นเคลือบดังอย่างเดียว ซึ่งสารดังกล่าวมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ส่งผลให้ค่าความเข้มของแสงเปลี่ยนไป และมีการเลือกใช้แหล่งแสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 532 และ 633 นาโนเมตร โดยพบว่าสายใยแก้วนำแสงทั้งสองแบบมีความสามารถในการตรวจจับความเข้มข้นของก๊าซอยู่ในช่วงความเข้มข้น 0 – 20 sccm และสายใยแก้วนำแสงแบบแรกมีความละเอียดในการตรวจจับที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับสายแบบที่สองแต่มีอัตราการตอบสนองที่ไวกว่า [28]

Q. Wang และ B. T. Wang ได้พัฒนาตัวตรวจจับระดับของภูมิคุ้มกันภายในร่างกาย โดยใช้หลักการของเซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ที่นำมาประยุกต์ใช้กับสายใยแก้วนำแสง ซึ่งจำเป็นต้องมีการดัดแปลงชั้นของเคลือบด้วยการพอกเงิน (Silver: Ag) และแกรฟีนออกไซด์ (Graphene oxide: GO) โดยพบว่าตัวตรวจจับที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับหาระดับของภูมิคุ้มกันภายในร่างกายได้อย่างละเอียดเท่ากับ $0.4985 \text{ nm}/(\mu\text{g/mL})$ และสามารถตรวจจับได้ตั้งแต่ความเข้มข้นเท่ากับ $0.04 \mu\text{g/mL}$ [43]

Z. Samavati *et al.* ได้ทำการตรวจจับความเข้มข้นของน้ำมันดิบตั้งแต่ 0 – 100% โดยใช้ทฤษฎีของคลื่นอิวาเนสเซนซ์ และได้ทำการพอกซิงค์ออกไซด์เข้าไปแทนที่แคลคูลัสด้วยการสังเคราะห์สารดังกล่าวขึ้นมา และใช้วิธีนำสายใยแก้วนำแสงลงไปแช่ในสารเคมีเพื่อให้ซิงค์ออกไซด์ขึ้นมาเกาะบริเวณของผิวสายใยแก้วนำแสง ซึ่งเมื่อนำสายใยแก้วนำแสงดังกล่าวมาจับภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าชั้นของซิงค์ออกไซด์ที่นำมาพอกมีลักษณะไม่เรียบ ซึ่งเป็นผลมาจากวิธีการพอกสารประกอบทางเคมีและส่งผลค่าดัชนีหักเหของแสงที่วัดได้มีความละเอียดมากขึ้น [44]

Z. J. Ke *et al.* ได้ทำการวัดความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide: H_2S) ด้วยทฤษฎีของคลื่นอิวาเนสเซนซ์ โดยใช้สายใยแก้วนำแสงที่นำขึ้นแคลคูลัสออกเพียงอย่างเดียว ซึ่งกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid: HF) ถูกนำมาใช้ในการกัดสายใยแก้วนำแสงชั้นนอกออก เมื่อทำการตรวจจับความเข้มข้น 0 – 225 ppm พบว่าจะเห็นความเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงตั้งแต่ 5.1 ppm เป็นต้นไปและมีค่าความไวเท่ากับ 0.169 $\mu W/ppm$ [31]

S. Cao *et al.* ได้ทำการพัฒนาเครื่องมือตรวจจับค่าดัชนีการหักเหของแสงที่มีความละเอียดสูง โดยใช้หลักการของเซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ ซึ่งมีการนำสายใยแก้วนำแสงชนิดโพลิเมอร์ (Polymer optical fiber: POF) มาทำการขัดผิวส่วนด้านนอกออกเพียงด้านเดียวและนำทองคำมาพอกที่ผิวแทนเพื่อที่จะนำมาวัดของเหลว (Standard RI liquids) ที่มีการวัดค่าดัชนีการหักเหของแสงเท่ากับ 1.3000 – 1.3350 โดยหลังจากทำการทดลองวัดค่าความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไป พบว่าเครื่องมือวัดดังกล่าวมีค่าความไวเท่ากับ 44,567 nm/RIU [45]

A. R. Prado *et al.* ได้ทำการพัฒนาห้ววัดความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยนำทองคำมาผสมด้วยโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol: PVA) แล้วนำมาพอกที่ปลายสายใยแก้วนำแสงที่สัดส่วนของทองคำที่ต่างกันตั้งแต่ 50, 100 และ 200 μL โดยจากการทดลองพบว่าเมื่อทำการแปลค่าสายใยแก้วนำแสงที่มีการพอกทองคำที่สัดส่วน 50 μL มีการแปลค่าออกมาเป็นชุดข้อมูลแบบเส้นตรงและมีค่า R^2 เท่ากับ 0.995 ในช่วงความเข้มข้นของก๊าซเท่ากับ 0.4 – 2.0 ppm [29]

A. L. Khalaf *et al.* ได้ทำการพัฒนาตัวตรวจจับความเข้มข้นของแอมโมเนีย (Ammonia: NH_3) ตั้งแต่ช่วง 0 – 1% โดยทำการขัดผิวด้านข้างของสายใยแก้วนำแสงชนิดโพลิเมอร์แล้วทำการพอกสารแกรฟีน (Graphene) และพอลิอะนิลีน (Polyaniline) ที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับก๊าซแอมโมเนียได้ จากผลลัพธ์ของการทดลองพบว่าตัวตรวจจับดังกล่าวมีความไวในการตรวจจับเท่ากับ 132.8 AU/% และมีระยะเวลาในการตอบสนองเท่ากับ 112 วินาที [46]

W. B. W. A. Rahman *et al.* ได้พัฒนาตัวตรวจจับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสายใยแก้วนำแสง โดยใช้วิธีการดึงและให้ความร้อนเข้าไปในสายใยแก้วนำแสงเพื่อให้อ่อนตัวแล้วทำการพอกด้วยซิงค์ออกไซด์เพื่อใช้ในการตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่ความเข้มข้น 0 – 60 ppm จากการทดลองพบว่าเมื่อแปลค่ากำลังทางแสงให้อยู่ในรูปของความเข้มข้นจะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.972 มีความไวในการตรวจจับเท่ากับ 0.008 mW/ppm และระยะเวลาการตอบสนองเท่ากับ 28 นาที [47]

H. J. Khashi ได้ทำต้นแบบสายใยแก้วนำแสงเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กด้วยกระบวนการกัดสายใยแก้วนำแสงด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกที่ความเข้มข้น 30% และ 24% ด้วยวิธีการแช่ (Immersive method) และใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 1300 นาโนเมตร โดยพบว่าการใช้กรดดังกล่าวในกระบวนการกัดสายใยแก้วนำแสงจะมีอัตราการกัดที่เร็วกว่า 1.2 และ 0.1 ไมโครเมตรต่อนาที หลังจากกัดสายใยแก้วนำแสงด้วยสารเคมีส่งผลให้แสงภายในสายใยแก้วนำแสงสามารถเดินทางออกมาจากสายได้ถึง 70% [48]

A. Prasanth *et al.* พัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงเพื่อใช้ในการตรวจจับสารระเหย (Volatile organic compound: VOC) ได้แก่ อะซิโตน (Acetone) อะซิโตนฟีโนน (acetophenone) เอทานอล (Ethanol) และ ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 – 250 ppm โดยใช้วิธีการดัดแปลงชั้นเคลือบของสายใยแก้วนำแสง ด้วยการพอกสารประกอบ เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ซิงค์ออกไซด์ผสมอะลูมิเนียม (AZO) และ ทินออกไซด์ (SnO_2) พบว่าสายใยแก้วนำแสงที่พอกด้วยทिनออกไซด์มีการตอบสนองมากที่สุดที่ 21.2% ที่ความเข้มข้น 250 ppm และมีระยะเวลาการตอบสนอง (Response time) และระยะเวลาการฟื้นฟู (Recovery time) เท่ากับ 17 และ 21 วินาทีตามลำดับ [49]

N. F. Idris *et al.* ได้พัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับการตรวจจับก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen) โดยทำการพอกซิงค์ออกไซด์ที่ผสมด้วยสารพาราเดียม (Palladium) โดยใช้สายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวที่ผ่านกระบวนการกัดสายใยแก้วนำแสงด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกจนเหลือความหนาเท่ากับ 11 ไมโครเมตร โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส มีค่าการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างเท่ากับ 6.36 dBm มีระยะเวลาการตอบสนอง และระยะเวลาการฟื้นฟูเท่ากับ 6 และ 5 นาที ตามลำดับ [50]

ตารางที่ 2.2 สรุปวรรณกรรมวิจารณ์

งานวิจัย	ผู้วิจัย	ตัวแปรในการวิจัย	สรุปผลวิจัย
1. การตรวจจับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในอุณหภูมิห้อง ด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงพอกด้วยสารประกอบซิงค์ออกไซด์และทอง	M. E. Álvarez-Ramos <i>et al.</i>	<u>ตัวแปรต้น</u> : ชนิดของสารเคมีสำหรับการพอกบนสายใยแก้วนำแสง <u>ตัวแปรตาม</u> : ค่ากำลังทางแสง <u>ตัวแปรควบคุม</u> : ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง	การใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 532 และ 633 นาโนเมตร ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนของค่ากำลังทางแสง ต่อมาเมื่อสายใยแก้วนำแสงที่พัฒนาขึ้นสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
2. การพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดเซอเพสพราสมอนพอกด้วยแกรฟีนออกไซด์และเงิน	Q. Wang และ B. T. Wang	<u>ตัวแปรต้น</u> : ชนิดของสารเคมีที่นำมาพอก <u>ตัวแปรตาม</u> : ระดับของภูมิคุ้มกันภายในมนุษย์ <u>ตัวแปรควบคุม</u> : ความเข้มข้นของสารเคมี	ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับระดับภูมิคุ้มกันภายในมนุษย์ด้วยความไว 0.4985 nm/(μg/mL) ในช่วงความเข้มข้น 0 – 0.04 mg/mL
3. การศึกษาการเกิดคลื่นอีวานเนสเซนส์บนสายใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์สำหรับการตรวจจับค่าดัชนีการหักเหของแสง	Z. Samavati <i>et al.</i>	<u>ตัวแปรต้น</u> : ชนิดของสารเคมีที่นำมาพอกบนสายใยแก้วนำแสง <u>ตัวแปรตาม</u> : การเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังทางแสง <u>ตัวแปรควบคุม</u> : ระดับความหนาของสารเคมี	จากการพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับการตรวจจับความเข้มข้นของน้ำมันดิบ ซิงค์ออกไซด์มีการตอบสนองต่อน้ำมันดิบได้ และสามารถตรวจจับได้ในช่วง 0 – 100%
4. เทคโนโลยีการพัฒนาสายใยแก้วนำแสงสำหรับการตรวจจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	Z. J. Ke <i>et al.</i>	<u>ตัวแปรต้น</u> : การเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังทางแสง <u>ตัวแปรตาม</u> : ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ <u>ตัวแปรควบคุม</u> : ชนิดของสายใยแก้วนำแสงและชนิดของสารเคมี	การพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงโดยการลดขนาดแกนกลาง พบว่าสายใยแก้วนำแสงที่พัฒนาขึ้นมีความไวเท่ากับ 0.169 μW/ppm

5.การพัฒนาต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดซอฟต์แวร์สมอนโดยการใช้ร่วมกับสายใยแก้วนำแสงชนิดพลาสติก	S. Cao <i>et al.</i>	<u>ตัวแปรต้น</u>: ปริมาณการกระเจิงของแสงในสายใยแก้วนำแสง <u>ตัวแปรตาม</u>: การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีการหักเหของแสง <u>ตัวแปรควบคุม</u>: ชนิดของสายใยแก้วนำแสง	หลังจากการทดสอบต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงแบบหน้าตัดครึ่งวงกลม (D-shape) สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีการหักเหของแสงได้ และสามารถตรวจวัดได้ในช่วง 1.300 – 1.335 และมีความไวเท่ากับ 44,567 nm/RIU
6.การพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดเซอเฟสพลาสมอนสำหรับการตรวจจับไฮโดรเจนซัลไฟด์	A. R. Prado <i>et al.</i>	<u>ตัวแปรต้น</u>: สัดส่วนของสารประกอบทางเคมีที่นำมาพอกบนสายใยแก้วนำแสง <u>ตัวแปรตาม</u>: ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ <u>ตัวแปรควบคุม</u>: ชนิดของสารเคมีและสารยึดเกาะที่ใช้กับสายใยแก้วนำแสง	ในงานวิจัยนี้ได้มีการเปรียบเทียบสัดส่วนของสารเคมีที่นำมาพอกบนสายใยแก้วนำแสงพบว่าที่สัดส่วน 50 μL สามารถตรวจจับความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในช่วงการตรวจจับ 0.4 – 2.0 ppm
7.การพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดตัวดี (D-type) สำหรับการตรวจจับแอมโมเนีย	A. L. Khalaf <i>et al.</i>	<u>ตัวแปรต้น</u>: ชนิดของสารเคมีที่นำมาพอกบนสายใยแก้วนำแสง <u>ตัวแปรตาม</u>: การเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังทางแสง <u>ตัวแปรควบคุม</u>: ความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนียที่ช่วง 0 – 1%	ในกระบวนการพอกสารเคมีสารแกรฟีนและพอลิอะนิลีนได้ถูกนำมาพอกบนสายใยแก้วนำแสงหน้าตัดครึ่งวงกลม (D-shape) สำหรับการตรวจจับความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนีย พบว่าเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นมีความไวเท่ากับ 132.8 AU/% และมีระยะเวลาในการตอบสนองเท่ากับ 112 วินาที

8.การพัฒนาตัวตรวจจับ ใยแก้วนำแสงชนิด รีแฟร็กโตมิเตอร์สำหรับ การตรวจจับก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์	W. B. W. A. Rahman <i>et al.</i>	<u>ตัวแปรต้น</u> : ค่าการเปลี่ยนแปลง ของกำลังทางแสง <u>ตัวแปรตาม</u> : ความเข้มข้นของ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ <u>ตัวแปรควบคุม</u> : ความร้อนที่ ใช้สำหรับการยืดสายใยแก้ว นำแสง	การพอกซิงค์ออกไซด์ บนสายใยแก้วนำแสง ที่ผ่านกระบวนการลดขนาด แกนกลาง สามารถนำมา ประยุกต์เป็นตรวจจับก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่ช่วง ความเข้มข้น 0 – 60 ppm และมีความไวในการตรวจจับ เท่ากับ 0.008 mW/ppm
9.การพัฒนาต้นแบบตัว ตรวจจับใยแก้วนำแสง ประเภทแกนกลางขนาดเล็ก ด้วยวิธีการกัดด้วยสารเคมี	H. J. Kbashi	<u>ตัวแปรต้น</u> : ระยะเวลาการ กัดสายใยแก้วนำแสง และ ความเข้มข้นของสารเคมี <u>ตัวแปรตาม</u> : ขนาดของ สายใยแก้วนำแสง <u>ตัวแปรควบคุม</u> : ชนิดของ สารใยแก้วนำแสงและ ความยาวของสายใยแก้ว นำแสง	การใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) ที่ความเข้มข้น 30% และ 24% กัดสายใยแก้วนำแสง ชนิดหลายโหมด โดยมีการ บันทึกค่ากำลังทางแสงที่ ความยาวคลื่น 1300 nm พบว่าสารเคมีมีอัตราการกัด สายใยแก้วนำแสงเท่ากับ 1.2 และ 0.1 $\mu\text{m}/\text{min}$
10.ตัวตรวจจับใยแก้ว นำแสงสำหรับการ ตรวจจับก๊าซระเหยง่าย (VOC) ด้วยสารเคมีโลหะ ออกไซด์	A. Prasanth <i>et al.</i>	<u>ตัวแปรต้น</u> : การเปลี่ยนแปลง ของค่ากำลังทางแสง <u>ตัวแปรตาม</u> : ความเข้มข้น ของก๊าซระเหยง่าย <u>ตัวแปรควบคุม</u> : ชนิดของ สายใยแก้วนำแสงและ สารเคมีที่นำมาพอกบน สายใยแก้วนำแสง	ในการพัฒนาตัวตรวจจับ ใยแก้วนำแสงสำหรับการ ตรวจจับก๊าซระเหยง่าย ซิงค์ออกไซด์ถูกนำมาพอกบน สายใยแก้วนำแสงเพื่อใช้ใน การตรวจจับก๊าซชนิดต่าง ๆ พบว่าตัวตรวจจับใยแก้ว นำแสงที่พัฒนาขึ้นสามารถ ตรวจจับก๊าซได้ในช่วง 0 – 250 ppm โดยใช้เวลา 17 วินาที ในการตอบสนอง

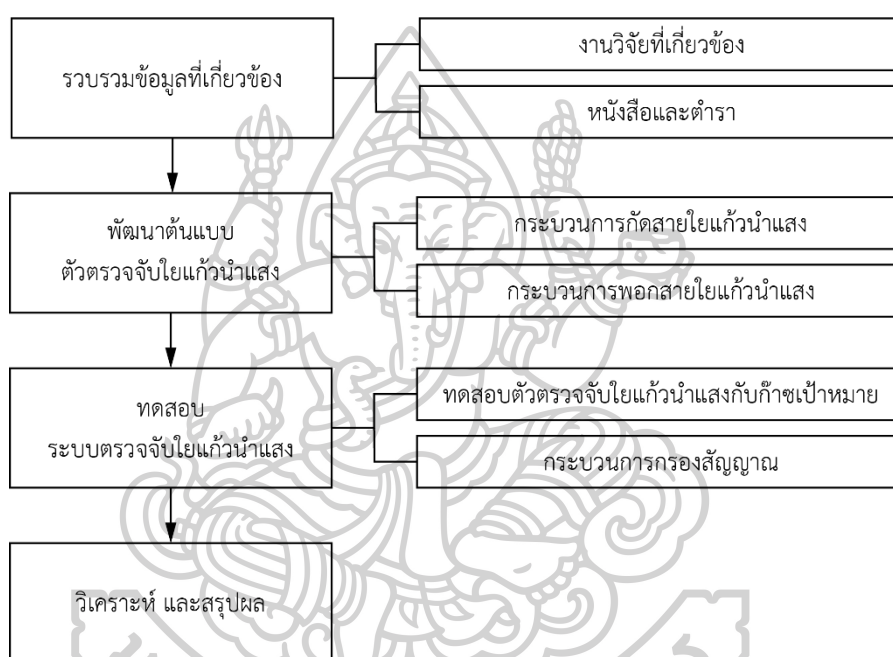
11.ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโตมิเตอร์พอกด้วยซิงค์ออกไซด์และพาราเดียมสำหรับการตรวจจับไฮโดรเจน	N. F. Idris <i>et al.</i>	<u>ตัวแปรต้น</u>: การเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังทางแสง <u>ตัวแปรตาม</u>: ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจน <u>ตัวแปรควบคุม</u>: อุณหภูมิระหว่างการทดลอง	ในการพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงด้วยการพอกสารประกอบทางเคมี (ซิงค์ออกไซด์) สำหรับการวัดก๊าซไฮโดรเจนด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่พัฒนาขึ้น พบว่าเครื่องมือตรวจจับที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับก๊าซได้ ภายใต้ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส โดยสามารถตอบสนองและคืนสภาพได้ภายในเวลา 6 และ 5 นาที ตามลำดับ
--	--------------------------------------	--	--



บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานตั้งแต่การพัฒนาต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง จนถึงขั้นตอนการทดลองของตัวตรวจจับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยสามารถแสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 การรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ในการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องได้มีการศึกษาโครงสร้างและวิธีการดัดแปลงสายใยแก้วนำแสง วิธีการติดตั้งระบบตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์ และโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมที่จำเป็นในการวิเคราะห์และประมวลผล

- 3.1.1 การศึกษาพื้นฐานทางเคมีและกาทำปฏิกิริยาของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อหาความสามารถในการดูดซับและการคืนสภาพของสารประกอบทางเคมีชนิดต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้ในกระบวนการพอกสายใยแก้วนำแสง และศึกษาสารประกอบทางเคมีที่มีความสามารถในการยึดเกาะบนสายใยแก้วนำแสง

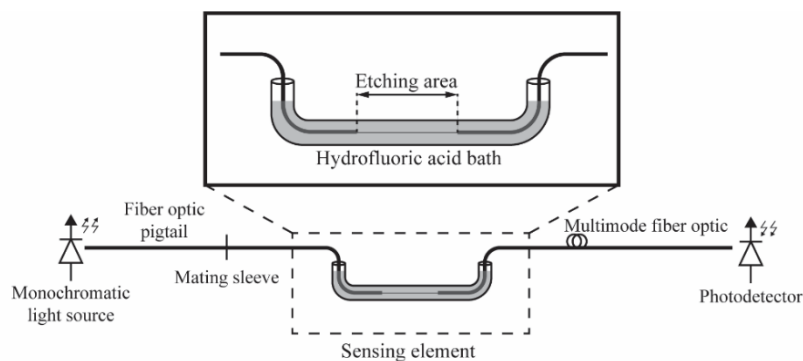
- 3.1.2 การศึกษาประเภทของสายใยแก้วนำแสงรวมไปถึงโครงสร้างพื้นฐานของสายใยแก้วนำแสง เพื่อออกแบบกระบวนการการดัดแปลงโครงสร้างและการเลือกใช้สารกักแก้วที่เหมาะสมในกระบวนการกักสายใยแก้วนำแสงและกระบวนการพอกสายใยแก้วนำแสงในวิทยานิพนธ์
- 3.1.3 การศึกษาวิธีการติดตั้งระบบตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์รวมไปถึงอุปกรณ์จำเป็นที่เกี่ยวข้องเพื่อหาข้อได้เปรียบและเสียเปรียบสำหรับการออกแบบการทดลอง เพื่อไม่ให้ส่งผลต่อตัวแปรที่ต้องการศึกษาในการทดลองต่าง ๆ
- 3.1.4 การศึกษาโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรม เพื่อออกแบบระบบการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล รวมไปถึงการกรองสัญญาณและการแสดงผลในรูปแบบของรูปภาพ

3.2 การพัฒนาต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง

หลังจากได้มีการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องขั้นตอนต่อไปจึงเป็นการพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์ด้วยการใช้หลักการของคลื่นอิวานสเซนส์ จากที่กล่าวถึงองค์ประกอบของระบบตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์ในบทก่อนหน้า ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินการในส่วนของการพัฒนาตัวตรวจจับดังกล่าวซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ กระบวนการกักสายใยแก้วนำแสง และกระบวนการพอกสายใยแก้วนำแสงสามารถแสดงได้ดังนี้

3.2.1 กระบวนการกักสายใยแก้วนำแสง

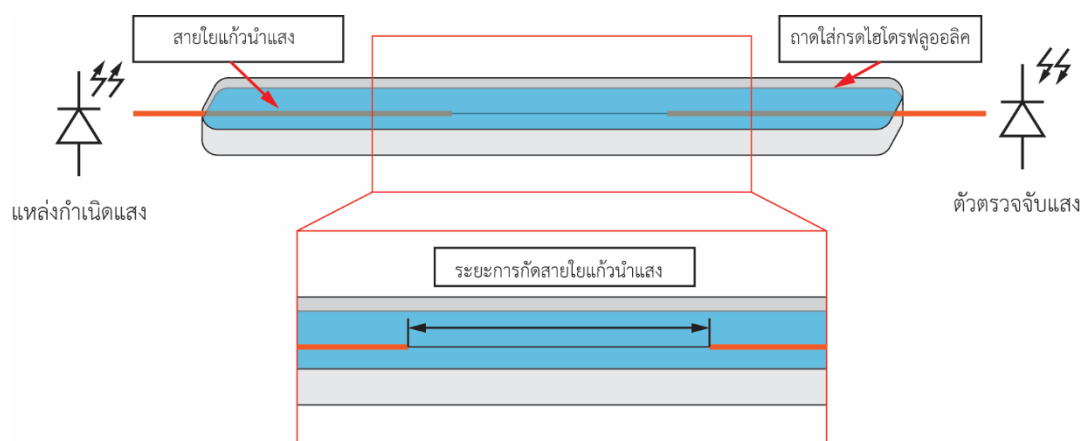
โครงสร้างทั่วไปของสายใยแก้วนำแสงมีชั้นแคลดดิงทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้แสงภายในชั้นแกนกลางเกิดการกระเจิงออกและถูกดูดซับจากสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่เนื่องจากตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์ได้มีการใช้ประโยชน์จากคลื่นอิวานสเซนส์ซึ่งอยู่ภายในชั้นแคลดดิง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการนำชั้นแคลดดิงออก (Fiber de-cladding) โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid: HF) เนื่องจากความสามารถในการกัดกร่อนแก้วแต่ชั้นแกนกลางทำจากแก้ว จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกักสายใยแก้วนำแสงเพื่อให้ชั้นแคลดดิงถูกนำออกเพียงอย่างเดียว ซึ่งตัวอย่างระบบการกักสายใยแก้วนำแสงสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างระบบการกัดสายใยแก้วนำแสงด้วยสารเคมี

โดยส่วนป้องกันชั้นในและชั้นนอกของสายใยแก้วนำแสงจะถูกปอกออกด้วยเครื่องปอกสายใยแก้วนำแสง (Optical fiber stripper) ระยะทั้งสี่นี้ 10, 20 และ 25 มิลลิเมตร ส่วนป้องกันชั้นในและนอกที่ไม่ถูกนำออกจะทำหน้าที่ป้องกันสายใยแก้วส่วนอื่นจากกรดไฮโดรฟลูออริก ต่อมาจึงได้มีการนำสายใยแก้วนำแสงที่ถูกตัดแปลงโครงสร้างต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดแสงเดี่ยวและตัวตรวจจับแสง โดยบริเวณที่มีการตัดแปลงโครงสร้างจะถูกนำไปใส่ในภาตสำหรับใส่สารเคมี ในขั้นตอนการแช่สายใยแก้วนำแสงไว้ในสารเคมีจะมีการบันทึกค่ากำลังทางแสงจากตัวตรวจจับแสงแล้วจึงนำข้อมูลที่บันทึกไปวิเคราะห์และสรุปหาเวลาที่เหมาะสมในการกัดสายใยแก้วนำแสงให้เหลือเพียงชั้นแกนกลาง

วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้สายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด เนื่องจากลักษณะการเคลื่อนที่ของแสงที่สะท้อนอยู่ภายในสายใยแก้วนำแสงมีการสะท้อนของแสงอยู่ในแกนกลาง ซึ่งแตกต่างจากแบบโหมดเดียวที่มีการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง โดยในขั้นตอนแรกเป็นการนำส่วนป้องกันภายนอก (Jacket) และส่วนป้องกันภายใน (Buffer) ออกด้วยเครื่องมือปอกสายใยแก้วนำแสง (Optical fiber stripper) ที่ระยะแตกต่างกันออกไปเพื่อศึกษาคุณลักษณะ (Characteristic) ต่าง ๆ เช่น การสูญเสียกำลังทางแสง (Optical power loss) อันเนื่องมาจากการลดขนาดลงของแกนกลางสายใยแก้วนำแสง และการตอบสนองของกำลังทางแสง (Optical power response) ที่ระยะการกัดสายใยแก้วนำแสงที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ระยะ 10, 20 และ 25 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยในการทดลองดังกล่าวได้มีการออกแบบโครงสร้างของระบบกัดสายใยแก้วนำแสงซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง ส่วนกัดกร่อนสายใยแก้วนำแสงด้วยสารเคมี (Hydrofluoric acid bath) และตัวตรวจจับความเข้มแสง ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.3

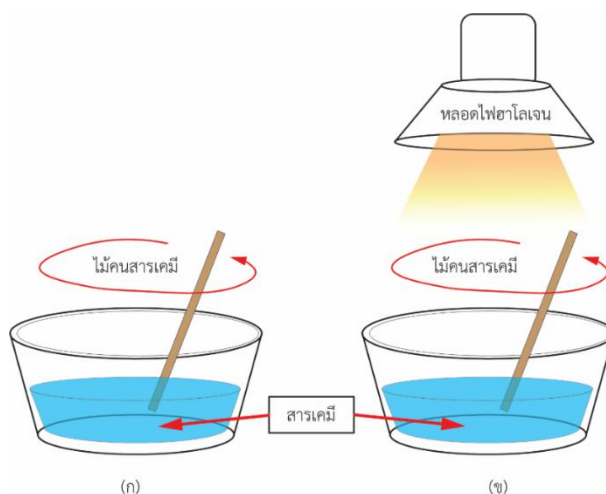


รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการกัตสายใยแก้วนำแสงด้วยสารเคมี

หลังจากที่ทราบถึงระยะเวลาที่เหมาะสมในการกัตสายใยแก้วนำแสงแล้ว สายใยแก้วนำแสงจึงได้ถูกเตรียมอีกครั้งที่ระยะที่กล่าวมาข้างต้น และเข้าสู่กระบวนการกัตสายใยแก้วนำแสง โดยใช้ระยะเวลาการกัตสายใยแก้วนำแสงที่เหมาะสมในการนำขึ้นแคลดตั้งออก

3.2.2 กระบวนการพอกสายใยแก้วนำแสง

ในกระบวนการพอกสายใยแก้วนำแสงได้มีการเตรียมสารประกอบทางเคมีที่จำเป็นทั้งสิ้น 2 ชนิดได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide: ZnO) เป็นสารประกอบทางเคมีที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้มีการเลือกสารประกอบทางเคมีดังกล่าวนำมาพอกบนสายใยแก้วนำแสงเพื่อใช้ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีการหักเหของแสงเมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไหลผ่านบริเวณที่มีการพอกสารประกอบดังกล่าว ต่อมาคือ โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate: NaSi) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “แก้วเหลว” ซึ่งเป็นสารยึดเกาะที่มีความโปร่งแสงจึงทำให้แสงภายในสายใยแก้วนำแสงสามารถไหลผ่านสารประกอบดังกล่าว ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้สารประกอบดังกล่าวเป็นสารยึดเกาะระหว่างสายใยแก้วนำแสงและซิงค์ออกไซด์ โดยในการทดลองดังกล่าวมีจุดประสงค์เพื่อหาระยะเวลาการผสมสารประกอบทางเคมีที่เหมาะสม เพื่อให้สารประกอบดังกล่าวมีความหนืดที่เหมาะสมทำให้ง่ายต่อการยึดเกาะบนสายใยแก้วนำแสง ในการทดลองนี้จะแบ่งวิธีการผสมสารเคมีออกมาเป็น 2 วิธีเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับได้แก่ การผสมสารเคมีในห้องควบคุมอุณหภูมิ และการผสมสารประกอบทางเคมีด้วยหลอดไฟฟ้าโลเจน ภาพตัวอย่างการเตรียมสารเคมีสามารถแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กระบวนการเตรียมสารประกอบทางเคมีในการพอกสายใยแก้วนำแสงที่อุณหภูมิ;

(ก) 24 องศาเซลเซียส (ข) 40 องศาเซลเซียส

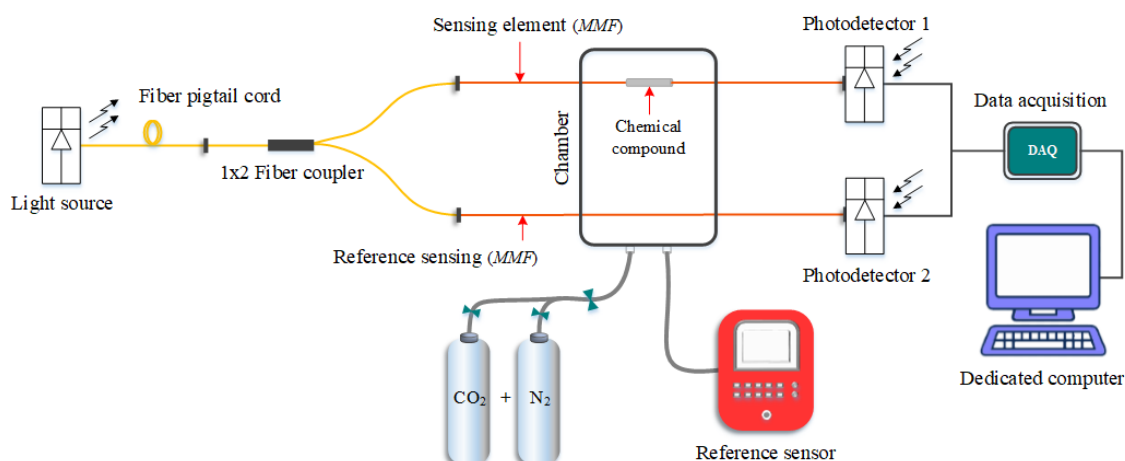
จากรูปที่ 3.4(ก) – (ข) กระบวนการผสมสารประกอบทางเคมีสำหรับการพอกสายใยแก้วนำแสงได้แบ่งออกเป็นสองวิธี ในรูปที่ 3.4(ก) สารประกอบทางเคมีระหว่างโซเดียมซิลิเกตและซิงค์ออกไซด์ถูกนำมาผสมด้วยสัดส่วน 40 mg/ml ภายใต้อุณหภูมิควบคุมที่ 24 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาต่างกัน ในขณะที่รูปที่ 3.4(ข) ได้มีการผสมสารประกอบทางเคมีที่สัดส่วนเท่ากันแต่มีการควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส ในระหว่างการผสมสารประกอบทางเคมีได้มีการคนสารประกอบทางเคมีเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดสารประกอบทางเคมีจับตัวกันเป็นก้อนเนื่องจากอุณหภูมิที่ต่างกัน

3.3 ทดสอบระบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง

ในขั้นตอนการทดสอบระบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงได้ถูกแบ่งออกเป็นสองกระบวนการได้แก่ การทดสอบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงกับก๊าซตัวอย่าง และกระบวนการกรองสัญญาณสามารถแสดงได้ดังนี้

3.3.1 ทดสอบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงกับก๊าซตัวอย่าง

เมื่อได้ทำการเตรียมสายใยแก้วนำแสงที่ผ่านการพอกด้วยสารประกอบที่ได้กล่าวมาที่ระยะต่างกัน ได้แก่ 10, 20 และ 25 มิลลิเมตร สายดังกล่าวจะถูกนำไปติดตั้งในหลอดแก้วที่ต่อเข้ากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเครื่องตรวจจับองค์ประกอบก๊าซ พร้อมทั้งสายใยแก้วนำแสงที่ผ่านกระบวนการกักด้วยสารเคมีเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบค่า (Reference probe) สามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.5

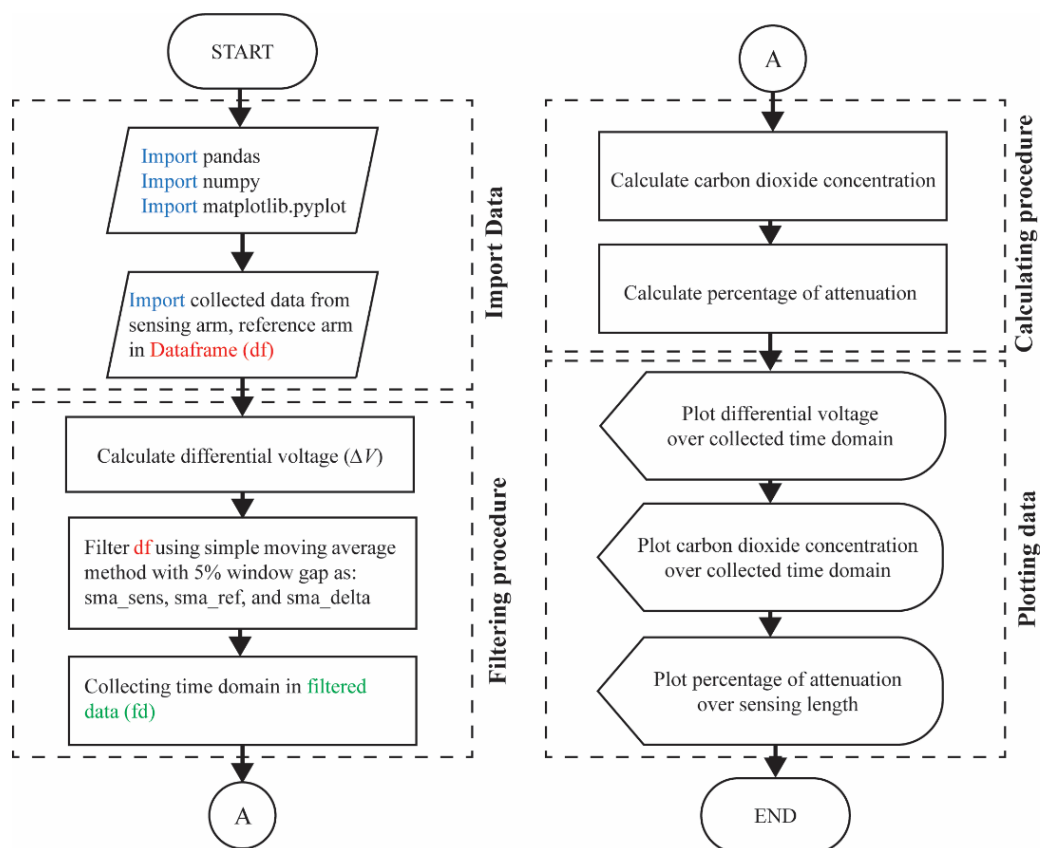


รูปที่ 3.5 ระบบตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

โดยในการทดลองได้มีการบันทึกข้อมูลด้วยระบบจัดเก็บข้อมูล (Data acquisition unit: DAQ) ซึ่งจะมีการจ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นคงที่เข้าไปในหลอดแก้ว เมื่อจ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ครบเวลา 1 นาที จึงหยุดจ่ายก๊าซและทิ้งไว้เป็นเวลา 8 นาที ต่อมาค่อย ๆ ผสมก๊าซออกซิเจนเข้าไปแล้วจึงทิ้งไว้เป็นเวลา 8 นาที ทำกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นซ้ำอีก 2 ครั้ง ต่อมานำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลและกรองสัญญาณในขั้นถัดไป

3.3.2 กระบวนการกรองและประมวลผลข้อมูล

เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงกับก๊าซตัวอย่างประกอบไปด้วย ข้อมูลดิบจากตัวตรวจจับก๊าซ (Sensing probe) และตัวตรวจจับอ้างอิง (Reference probe) ซึ่งข้อมูลทั้งสองยังไม่สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อสรุปผลได้รวมไปถึงสัญญาณรบกวนต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องผ่านการประมวลผลและการกรองสัญญาณ (Signal processing) ซึ่งขั้นตอนการประมวลผลและการกรองสัญญาณสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการกรองและประมวลผลข้อมูล

ในกระบวนการกรองและประมวลผลข้อมูลสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ การนำเข้าข้อมูล การกรองข้อมูล การประมวลผลข้อมูล และการแสดงค่าข้อมูล โดยรายละเอียดสามารถแสดงได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: การนำเข้าข้อมูล หลังจากบันทึกสัญญาณที่ได้จากต้นแบบตัวตรวจจับใบแก้ว นำแสงทั้งสองแล้ว (ตัวตรวจจับ และตัววัดอ้างอิง) ข้อมูลจะถูกนำเข้าผ่านโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมที่พัฒนาขึ้นร่วมกับภาษาไพทอน และได้มีการใช้โมดูลสำเร็จ เช่น numpy, pandas, matplotlib.pyplot ฯลฯ เพื่อให้การวิเคราะห์ข้อมูลและแสดงผลได้ง่ายขึ้น

ขั้นตอนที่ 2: การกรองข้อมูล เนื่องจากสัญญาณที่นำเข้มานั้นมีสัญญาณรบกวน (Noise) เนื่องจากสิ่งแวดล้อมภายนอกมากเกินไป เช่น แร่งคลื่นสะเทือน จึงจำเป็นต้องมีการกรองสัญญาณรบกวนก่อนจะนำไปวิเคราะห์ต่อ โดยได้การนำสัญญาณทั้งสองมาคำนวณหาความแตกต่างทางกำลังไฟฟ้า (Differential voltage: ΔV) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก (3.1)

$$\Delta V = \text{abs}(V_{\text{sens}} - V_{\text{ref}}) \quad (3.1)$$

โดย V_{sens} คือ ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากตัวตรวจจับ

V_{ref} คือ ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากตัววัดอ้างอิง

เมื่อได้ค่าความแตกต่างทางกำลังไฟฟ้า จึงเข้าสู่กระบวนการกรองสัญญาณ โดยวิธีการกรองสัญญาณนั้นมีหลากหลายวิธีการ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วิธีเฉลี่ยค่าเคลื่อนที่ (Simple moving average : SMA) เนื่องจากใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ง่ายและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการตรวจจับแบบต่อเนื่องได้ ทำให้สามารถนำไปพัฒนาต่อและใช้เวลาในการประมวลผลที่เร็วขึ้น [51] สามารถแสดงได้ใน (3.2)

$$SMA = \frac{P_M + P_{M-1} + P_{M-2} + \dots + P_{M-(n-1)}}{n} \quad (3.2)$$

โดย P_M คือ ข้อมูล ณ ตำแหน่ง M

n คือ จำนวนข้อมูลในการกรองสัญญาณ

โดยใน (3.2) สามารถเลือกจำนวนข้อมูลในการกรองสัญญาณได้ โดยในวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้จำนวนข้อมูลในการกรองสัญญาณที่ 5% ของข้อมูลที่นำเข้า เพื่อไม่ให้ข้อมูลเสียหายและสามารถลดสัญญาณแทรกสอดในสัญญาณได้

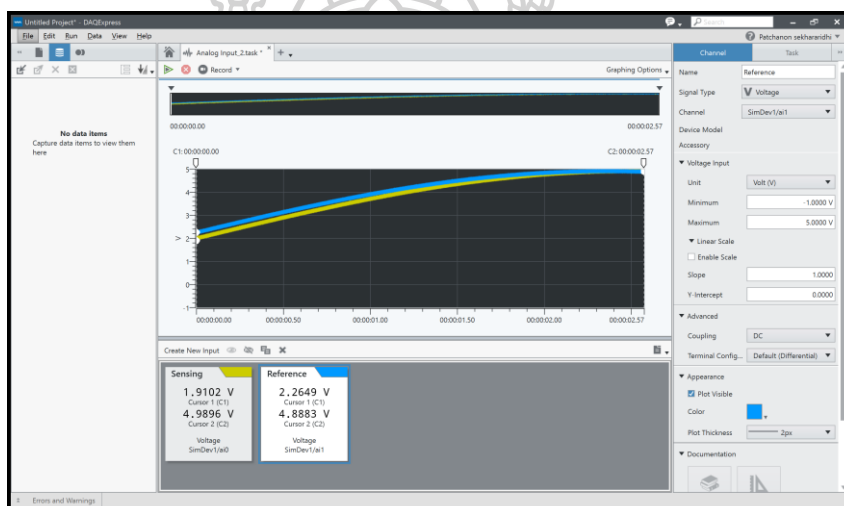
ขั้นตอนที่ 3: การประมวลผลข้อมูล เมื่อสัญญาณที่ได้บันทึกไว้ผ่านกระบวนการกรองสัญญาณแล้วจึงเข้าสู่กระบวนการประมวลผลข้อมูล โดยจะมีการนำข้อมูลที่ได้นี้มาเทียบกับค่าความเข้มข้นของก๊าซที่ได้จากเครื่องมือวัดอ้างอิง (Reference sensor) เพื่อนำไปสร้างเป็นสมการปรับเทียบ (Calibration equation) สำหรับแปลงค่ากำลังทางแสงเป็นความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้วจึงนำสมการดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นของก๊าซต่อไป

ขั้นตอนที่ 4: การแสดงค่าข้อมูล เมื่อได้ข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซเป็นที่เรียบร้อยแล้ว โปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมจะนำข้อมูลดังกล่าวแสดงค่าออกมาเป็นกราฟระหว่างความเข้มข้นของก๊าซเทียบกับเวลา ซึ่งจะสามารถบันทึกข้อมูลออกมาในรูปแบบของรูปภาพในหลากหลายสกุลไฟล์ (TIFF, PNG และ PDF)

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้โปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมได้แก่ DAQExpress และ JupyterLab สำหรับการบันทึกข้อมูลและออกแบบโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรม สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

- โปรแกรม DAQExpress

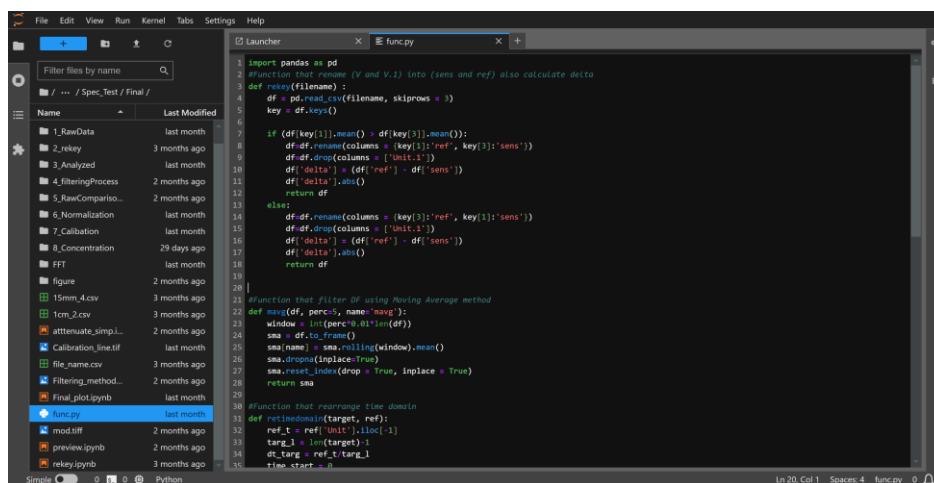
เป็นโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมที่ใช้บันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่องร่วมกับอุปกรณ์บันทึกสัญญาณ (Data acquisition unit: DAQ) ที่มีจุดประสงค์เพื่อบันทึกและแสดงสัญญาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการตรวจวัดความเข้มแสงด้วยตัวตรวจจับแสง (Photodetector) ซึ่งมีความถี่ในการตรวจวัดสัญญาณเท่ากับ 25 KHz โดยภาพตัวอย่างของโปรแกรมสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างโปรแกรม DAQExpress

- โปรแกรม JupyterLab

เป็นโปรแกรม Text Editor ซึ่งใช้ภาษาไพทอนในการเขียนและออกแบบโปรแกรม โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ภาษาไพทอนเป็นภาษาหลักในการออกแบบกระบวนการวิเคราะห์และกรองสัญญาณ เนื่องจากภาษาไพทอนเป็นภาษาระดับสูงที่มีเครื่องมือในการวิเคราะห์และแสดงผลมากมายเช่น Matplotlib.pyplot, Numpy และ Pandas ซึ่งเป็นชุดคำสั่งพิเศษที่ช่วยให้การเขียนง่ายขึ้น โดยภาพตัวอย่างของโปรแกรมสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างโปรแกรม JupyterLab

3.4 การวิเคราะห์และสรุปผล

ในการวิเคราะห์ข้อมูลได้มีการเปรียบเทียบช่วงความสามารถในการตรวจจับของสายใยแก้วนำแสงที่ระยะตัวตรวจจับต่างกันไป เพื่อหาระยะของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาพัฒนารวมไปถึงการหาความไวและระยะเวลาในการตอบสนองของตัวตรวจจับ

ในบทนี้ได้มีการกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานและการวางแผนและออกแบบการทดลองต่าง ๆ ประกอบไปด้วย การรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ การพัฒนาต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงพร้อมทั้งขั้นตอนการพัฒนาต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง และการออกแบบการทดสอบระบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงพร้อมทั้งกล่าวถึงการออกแบบโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรม

บทที่ 4

ผลการดำเนินการและอภิปรายผล

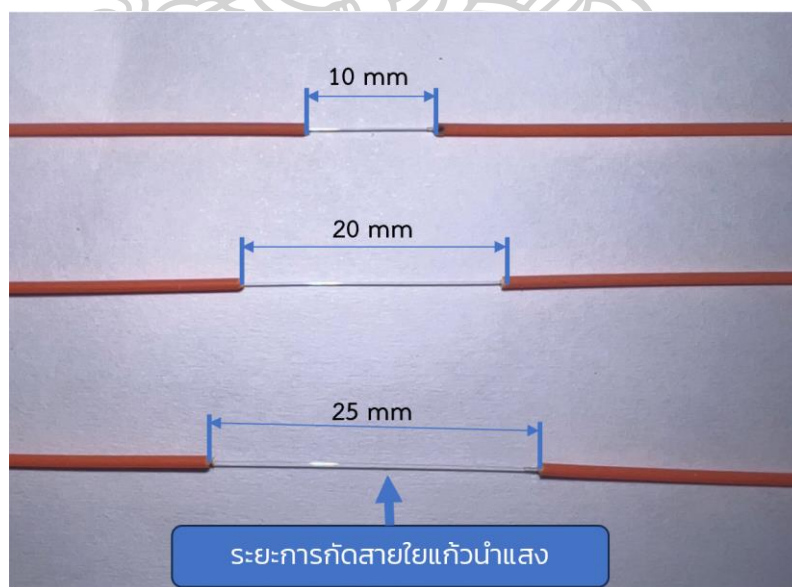
ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการดำเนินการของวิทยานิพนธ์นี้ จากการพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง ชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์ (Fiber optic-based refractometer) เก็บข้อมูลและทดสอบระบบตรวจจับ ก๊าซชีวภาพ โดยเริ่มจากการเตรียมอุปกรณ์ การจัดทำต้นแบบตัวตรวจจับ และการทดสอบ ตัวตรวจจับด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการพัฒนาต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง

ในหัวข้อนี้ได้มีการกล่าวถึงผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนการพัฒนาต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง และแสดงภาพกระบวนการพอกและกัดยาใยแก้วนำแสงรวมไปถึงภาพต้นแบบของตัวตรวจจับ ใยแก้วนำแสง

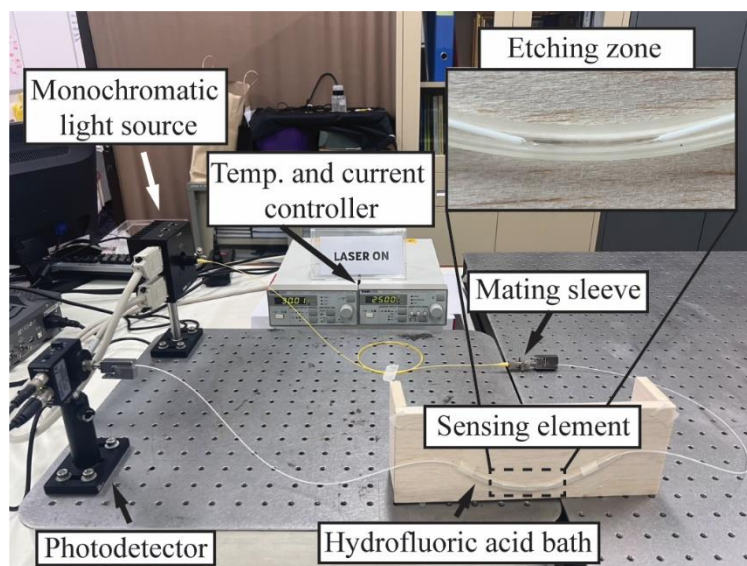
4.1.1 ผลลัพธ์จากกระบวนการกัดยาใยแก้วนำแสง

ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 สายใยแก้วนำแสงได้ถูกจัดเตรียมด้วยการนำชิ้นท่อหุ้มภายนอก ออกทั้งสิ้น 3 ระยะได้แก่ 10, 20 และ 25 มิลลิเมตร สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.1



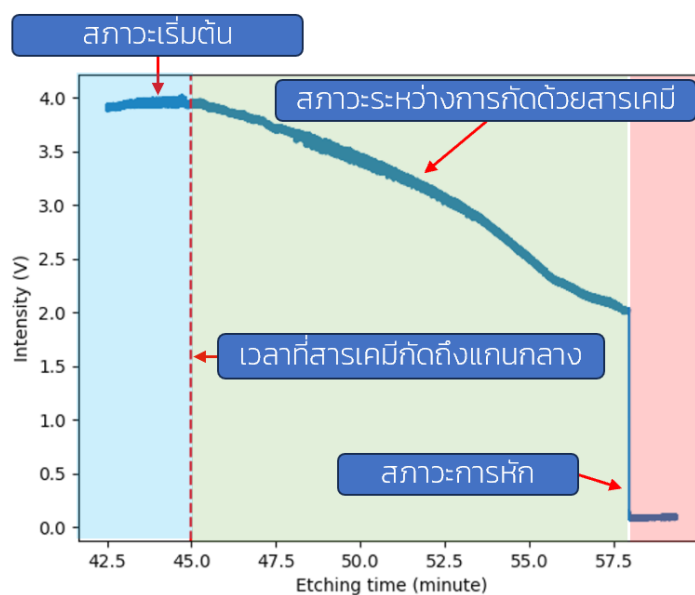
รูปที่ 4.1 การเตรียมสายใยแก้วนำแสงสำหรับกระบวนการกัดยาใยแก้วนำแสงที่ระยะต่าง ๆ

ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ชั้นห่อหุ้มภายนอกถูกปกปิดออกเป็นระยะเท่ากับ 10, 20 และ 25 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนจากการนำสายใยแก้วนำแสงแช่ในกรดกัดแก้ว ต่อมาจึงนำสายใยแก้วนำแสงดังกล่าวติดตั้งเข้าระบบการกัดสายใยแก้วนำแสง ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ภาพระบบจริงของการกัดสายใยแก้วนำแสงสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.2



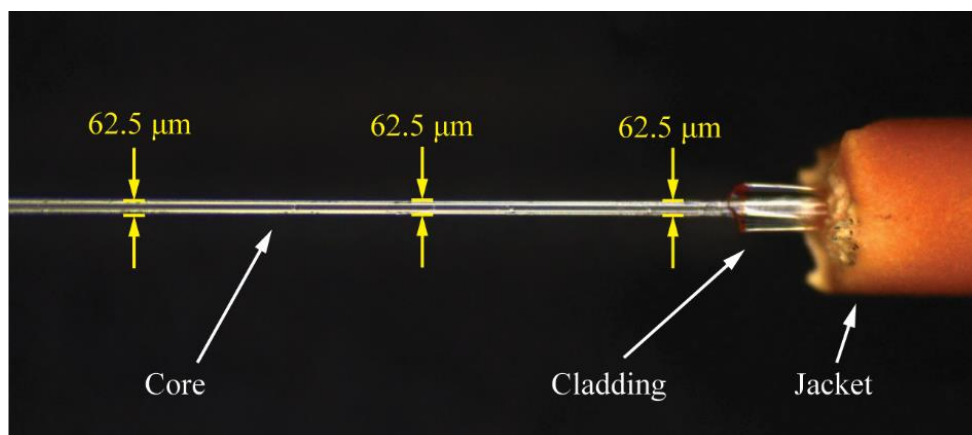
รูปที่ 4.2 ระบบการกัดสายใยแก้วนำแสง

โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการใช้แหล่งกำเนิดแสงเดี่ยว (Monochromatic light source) ที่ความยาวคลื่น 1310 นาโนเมตร ยี่ห้อ Thorlabs model: LPS-1310-FC ซึ่งถูกควบคุมการทำงานด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิและกระแส (Temperature and current controller) สำหรับควบคุมความเสถียร (Stable) ของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง อย่างไรก็ตาม เมื่อแสงเดินทางผ่านบริเวณที่เกิดการกัดสายใยแก้วนำแสง ค่ากำลังทางแสงที่ออกมาจะถูกตรวจจับโดยตัวตรวจจับแสง (Photodetector: PD) ยี่ห้อ Thorlabs model: PDA10CS2 แบบเวลาจริง (Realtime) โดยดำเนินการบันทึกค่ากำลังทางแสงระหว่างการกัดสายใยแก้วนำแสงจนกระทั่งสายใยแก้วนำแสงหัก ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังทางแสงและเวลาการกัดสายใยแก้วนำแสงสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของกำลังทางแสงระหว่างกระบวนการกัดสายใยแก้วนำแสง

ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ค่ากำลังทางแสงที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 สภาวะ (Condition) โดยเมื่อเริ่มนำสายใยแก้วนำแสงที่เตรียมเอาไว้แช่ในกรดไฮโดรฟลูอออริกและดำเนินการบันทึกข้อมูล พบว่าค่ากำลังทางแสงที่บันทึกได้มีค่าคงที่ (Initial condition) สามารถวัดค่าเฉลี่ยได้เท่ากับ 3.89 โวลต์ เมื่อเวลาผ่านไป 45 นาที ค่ากำลังทางแสงมีแนวโน้มลดลงอย่างคงที่ (Active condition) แสดงให้เห็นว่ากรดไฮโดรฟลูอออริกกัดเข้าไปถึงชั้นแกนกลาง ส่งผลให้แสงที่เดินทางอยู่ภายในเกิดการกระเจิงออก ซึ่งเรียกสภาวะนี้ว่า สภาวะการกัดกร่อนชั้นแกนกลาง และที่เวลา 57 นาที พบว่าค่ากำลังทางแสงลดลงอย่างทันทีทันใด (Cut-off condition) แสดงให้เห็นว่าสายใยแก้วนำแสงเกิดการหักเนื่องจากการกัดกร่อน เรียกว่าสภาวะการหักของสายใยแก้วนำแสง โดยเมื่อทำการทดลองซ้ำและนำสายใยแก้วนำแสงที่กัดด้วยกรดเป็นเวลา 45 นาที มาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าสายใยแก้วนำแสงมีขนาดลดลงเหลือ 62.5 ไมโครเมตร เท่ากับขนาดแกนกลางของสายใยแก้วนำแสง ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างได้ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างสายใยแก้วนำแสงหลังผ่านกระบวนการกัดสายใยแก้วนำแสงด้วยสารกัดแก้ว

นอกจากนั้น ข้อมูลการวัดขนาดแกนกลางของสายใยแก้วนำแสงด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ระยะต่างกันสามารถแสดงได้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดแกนกลางของสายใยแก้วนำแสง ณ เวลา 45 นาทีหลังจากการแช่สารกัดแก้ว

ลำดับ	ระยะ 10 มิลลิเมตร	ระยะ 20 มิลลิเมตร	ระยะ 25 มิลลิเมตร
1	62.25	61.99	62.49
2	62.49	62.61	62.62
3	62.50	62.54	62.25
4	62.66	62.50	62.51
5	62.59	62.44	62.52
<u>เฉลี่ย</u>	<u>62.5</u>	<u>62.42</u>	<u>62.48</u>

4.1.2 ผลลัพธ์จากกระบวนการพอกสายใยแก้วนำแสง

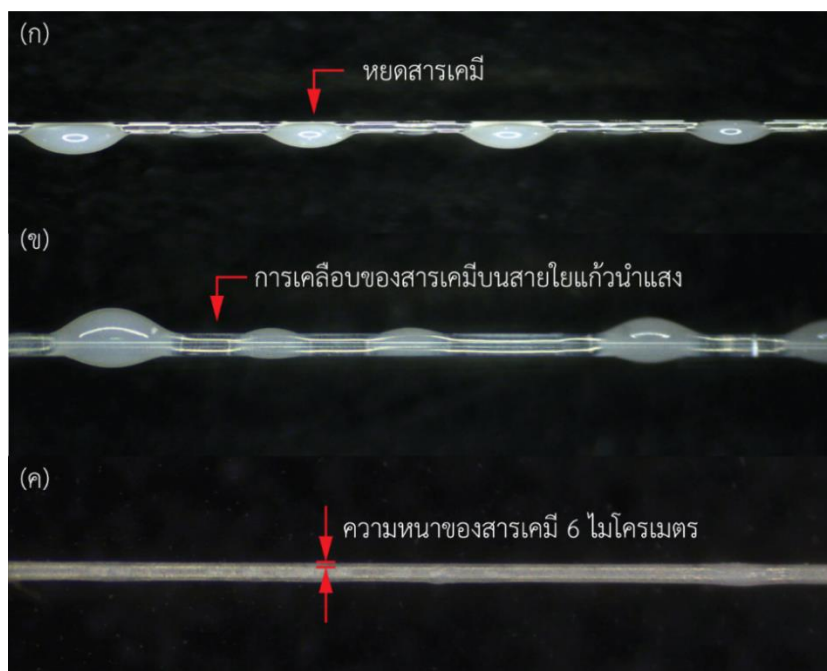
เมื่อผ่านกระบวนการกัดสายใยแก้วนำแสงเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงเข้าสู่กระบวนการพอกสายใยแก้วนำแสง โดยซิงค์ออกไซด์และโซเดียมซิลิเกตถูกใช้เป็นส่วนประกอบทางเคมีที่นำมาพอกบนสายใยแก้วนำแสง แต่เนื่องจากสารประกอบทางเคมีทั้งสองเมื่อผสมกันแล้วยังไม่มีความหนืดพอที่จะนำมาใช้พอกสายใยแก้วนำแสง จึงได้มีการทดลองผสมสารประกอบทางเคมีทั้งสิ้น 2 วิธี ได้แก่ การผสมสารประกอบทางเคมีด้วยอุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส และการผสมสารประกอบทางเคมีด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

- การผสมสารประกอบทางเคมีด้วยอุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส ในวิธีการนี้ได้มีการผสมสารประกอบทางเคมีทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะและเพิ่มความแข็งแรงให้แก่สายใยแก้วนำแสง โดยได้มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 24 องศาเซลเซียส โดยผลลัพธ์การทดลองสามารถแสดงได้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิและความเร็วลมภายในห้องควบคุมอุณหภูมิ

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)
12:15	24.90	0.18
12:20	24.40	0.13
12:25	24.00	0.13
12:30	23.90	0.05
12:35	23.80	0.11
12:40	23.60	0.15
12:45	23.50	0.27
<u>ค่าเฉลี่ย</u>	<u>24.01</u>	<u>0.15</u>

ในขั้นตอนแรกได้มีการผสมซิงค์ออกไซด์ และโซเดียมซิลิเกตที่สัดส่วน 40 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลที่ความละเอียด 0.01 กรัม เมื่อทำการผสมสารเคมีแล้วจึงเริ่มจับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปจึงนำสายใยแก้วนำแสงที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารกัดแก้วมาจุ่ม (Dip) ลงไปในสารประกอบทางเคมี (Chemical compound) เพื่อศึกษาลักษณะการจับตัวของสารเคมี ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างได้ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ลักษณะการกระจายตัวของสารประกอบทางเคมีที่ผสมภายใต้อุณหภูมิ 24 °C
เวลาการผสม; (ก) 30 นาที (ข) 120 นาที (ค) 260 นาที ตามลำดับ

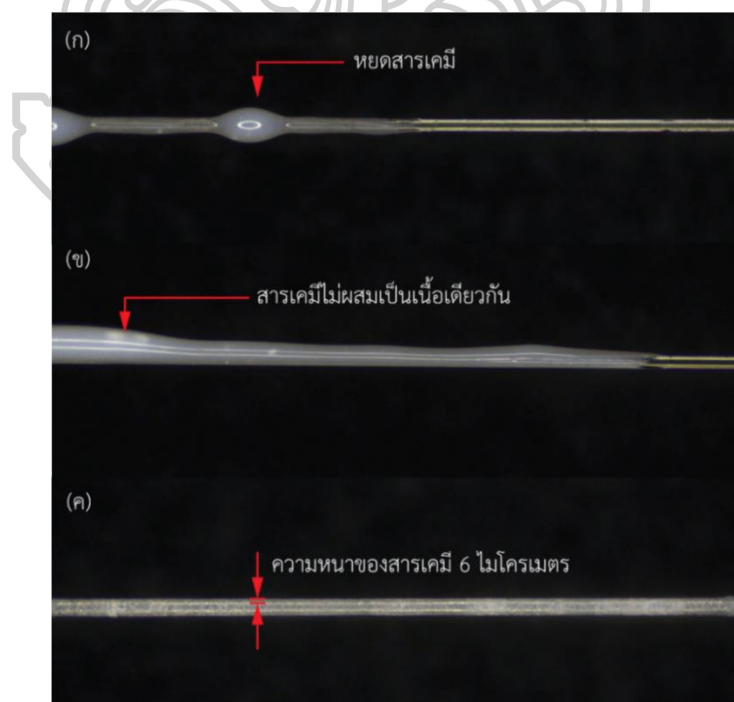
เมื่อมีการผสมสารประกอบทางเคมีที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที พบว่าความหนืดของสารเคมียังไม่เพียงพอ เมื่อนำสายใยแก้วนำแสงที่ผ่านกระบวนการกัดสายลงไปพอส่งผลให้สารประกอบทางเคมีจับตัวกันเป็นหยดสารเคมีดังแสดงได้ในรูปที่ 4.5(ก) ต่อมาเมื่อเพิ่มเวลาการผสมสารเคมีเป็น 120 นาที ความหนืดของสารเคมีเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้สารเคมีสามารถจับตัวกันเป็นชั้นบางแต่ยังไม่มากพอที่จะทำให้สารเคมีกระจายตัวบนสายใยแก้วนำแสงได้อย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.5(ข) เมื่อเพิ่มระยะเวลาการผสมสารเคมีเป็น 260 นาที พบว่าความหนืดของสารเคมีมากเพียงพอให้สามารถกระจายตัวบนสายใยแก้วนำแสงได้อย่างสม่ำเสมอและเมื่อนำสายใยแก้วนำแสงดังกล่าวมาวัดความหนาของสารเคมีด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าสารประกอบทางเคมีมีความหนา 6 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.5(ค)

- การผสมสารประกอบทางเคมีด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ในวิธีการนี้ได้มีการผสมสารประกอบทางเคมีทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะและเพิ่มความแข็งแรงให้แก่สายใยแก้วนำแสง โดยได้มีการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 40 องศาเซลเซียสด้วยหลอดไฟฟ้าโลเจนขนาด 50 วัตต์ โดยในการทดลองดังกล่าวได้มีการบันทึกข้อมูลความเร็วลม และอุณหภูมิบริเวณสารเคมีใช้ในการเปรียบเทียบกันระหว่างสองวิธีการ โดยข้อมูลได้มีการบันทึกทั้งสิ้น 7 ครั้ง แต่แต่ละครั้งได้มีการบันทึกข้อมูลห่างกัน 5 นาที และนำมาคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยสามารถแสดงได้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองวัดอุณหภูมิและความเร็วลมภายใต้หลอดไฟฮาโลเจน

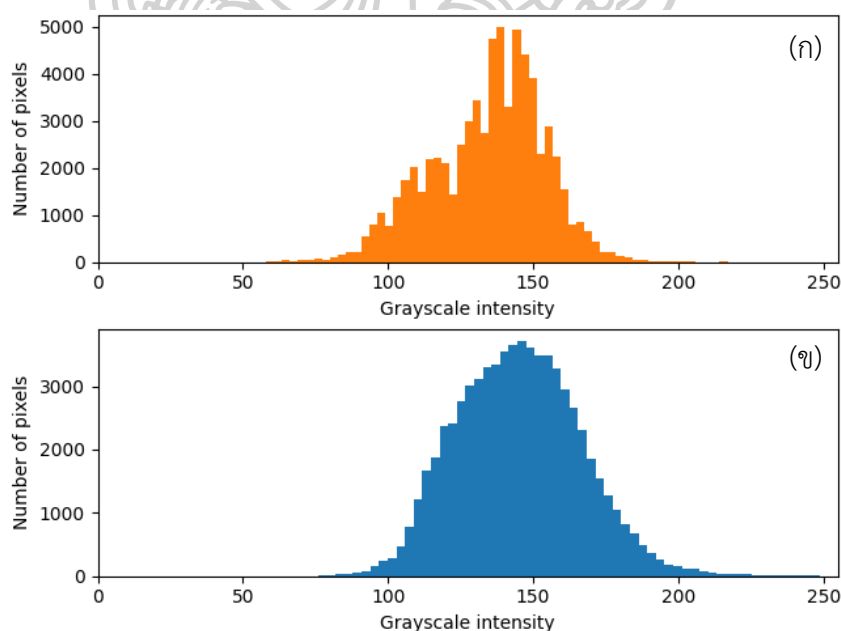
เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)
12:15	40.90	0.15
12:20	39.40	0.13
12:25	41.00	0.13
12:30	38.90	0.04
12:35	40.80	0.12
12:40	41.60	0.16
12:45	38.90	0.11
<u>ค่าเฉลี่ย</u>	<u>40.21</u>	<u>0.84</u>

ในขั้นตอนแรกได้มีการผสมซิงค์ออกไซด์ และโซเดียมซิติเลตที่สัดส่วน 40 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลที่ความละเอียด 0.01 กรัม เมื่อทำการผสมสารประกอบทางเคมีแล้วจึงเริ่มจับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปจึงนำสายใยแก้วนำแสงที่ผ่านกระบวนกักด้วยสารเคมีมาจุ่มลงไปในสารประกอบทางเคมี เพื่อศึกษาลักษณะการจับตัว โดยภาพการทดสอบสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ลักษณะการกระจายตัวของสารประกอบทางเคมีที่ผสมภายใต้อุณหภูมิ 40 °C
เวลาการผสม; (ก) 8 นาที (ข) 20 นาที (ค) 30 นาที ตามลำดับ

จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการผสมสารประกอบทางเคมีที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สามารถลดระยะเวลาการพอกของสารเคมีได้อย่างเห็นได้ชัด โดยในระยะเวลาการผสมสารประกอบทางเคมีเท่ากับ 8 นาที ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.6(ก) สารประกอบทางเคมีมีความหนืดมากพอที่สามารถจับตัวกันบนสายใยแก้วนำแสงแต่ยังไม่สามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ เมื่อเพิ่มเวลาการผสมเป็น 20 นาที สารประกอบทางเคมีสามารถกระจายตัวได้มากขึ้นเนื่องจากความหนืดที่เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.6(ข) แต่เนื่องจากระยะเวลาการผสมสารประกอบทางเคมีน้อยเกินไปส่งผลให้สารเคมียังไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันจึงจำเป็นต้องเพิ่มระยะเวลาการผสมสารประกอบทางเคมีที่ระยะเวลาการผสมสารประกอบทางเคมี 30 นาที พบว่าเป็นระยะเวลาที่มีความหนืดเพียงพอที่จะสามารถกระจายตัวบนสายใยแก้วนำแสงได้อย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 4.6(ค) และสามารถวัดความหนาของสารเคมีเท่ากับ 6 ไมโครเมตร ซึ่งมีความหนาเท่ากับผสมสารประกอบทางเคมีที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการพอกสายใยแก้วนำแสงทั้งสองวิธีใช้เวลา 260 และ 30 นาที ตามลำดับ ต่อมาจึงได้มีการนำสายใยแก้วนำแสงที่ผ่านกระบวนการพอกทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกับด้วยการวิเคราะห์ภาพ (Image processing) ด้วยภาษาไพทอน เพื่อศึกษาการกระจายตัวของเม็ดสี (Grayscale) บนสายใยแก้วทั้งสอง โดยผลการกระจายตัวของเม็ดสีสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของเม็ดสีบนสายใยแก้วนำแสง

ดังแสดงในรูปที่ 4.7(ก) การกระจายตัวของข้อมูลจากตัวอย่างตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่พอกสารประกอบทางเคมีด้วยวิธีการผสมภายใต้อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส ซึ่งมีการกระจายตัวที่ไม่สมมาตร (Asymmetry) เท่ากับรูปที่ 4.7(ข) คือ การกระจายตัวของข้อมูลจากตัวอย่างตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงด้วยวิธีการผสมภายใต้อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยภาพตัวอย่างสายใยแก้วนำแสงที่ผ่านกระบวนการพอกด้วยสารประกอบทางเคมีสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.8

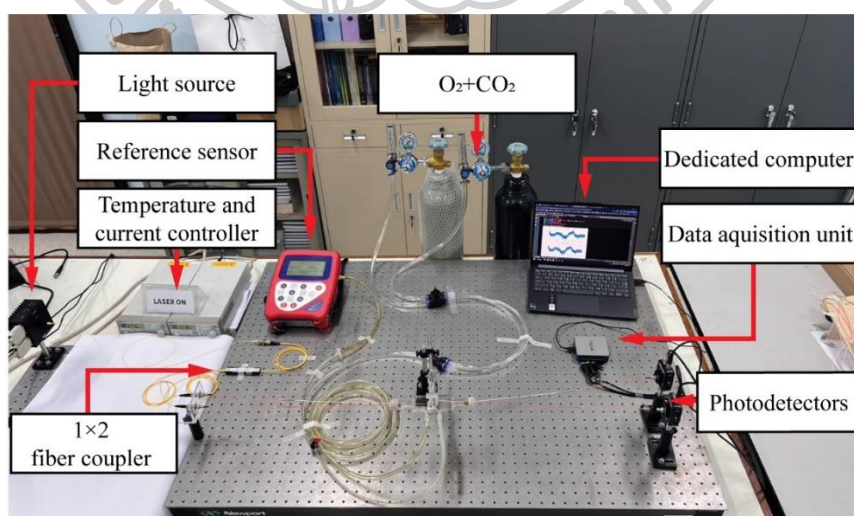


รูปที่ 4.8 ภาพเปรียบเทียบสายใยแก้วนำแสงที่ผ่านกระบวนการพอกสารประกอบทางเคมี;

(ก) ตัวตรวจจับอ้างอิง (ข) ตัวตรวจจับก๊าซตัวอย่าง

4.2 ทดสอบระบบตรวจจับใยแก้วนำแสง

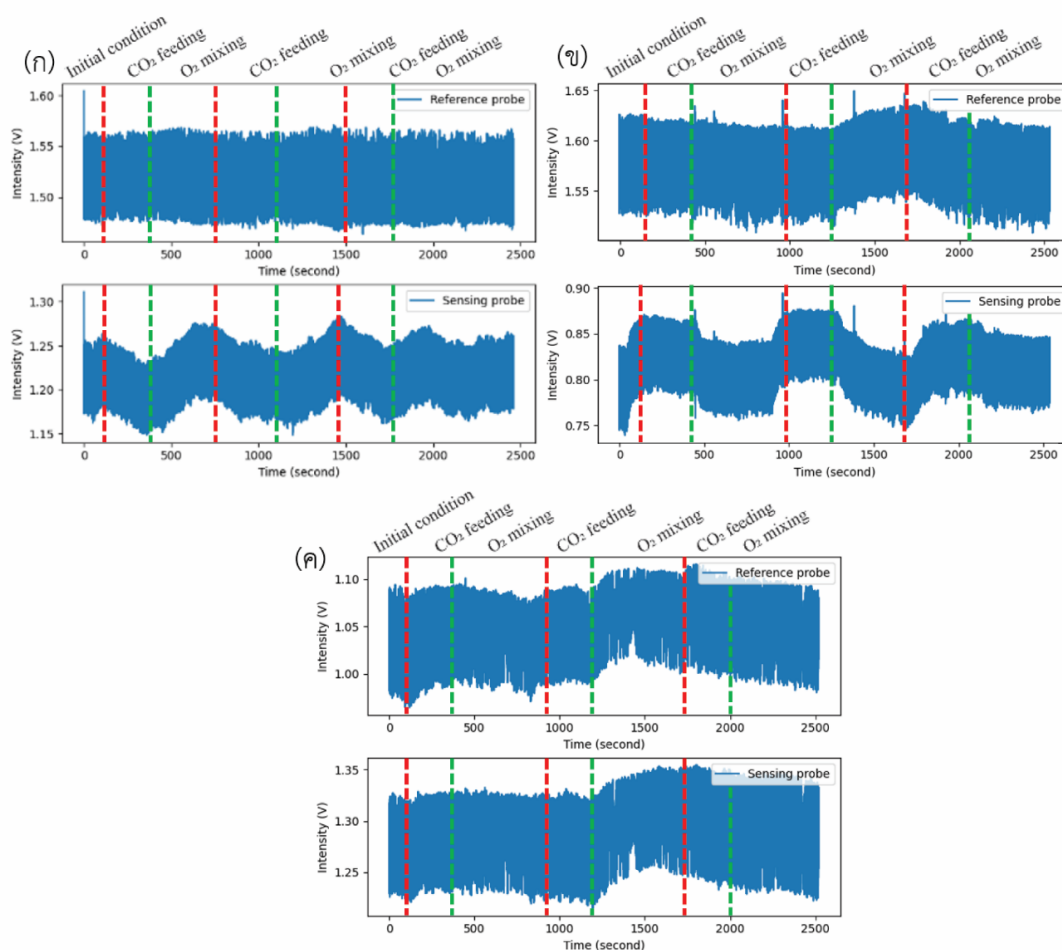
ในหัวข้อนี้ได้มีการรวบรวมผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงกับก๊าซตัวอย่าง และการนำสัญญาณที่ไปเข้ากระบวนการประมวลผลและกรองสัญญาณเพื่อให้สามารถนำมาวิเคราะห์และสรุปผล โดยภาพการทดลองจริงสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ระบบตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับการตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

4.2.1 ผลลัพธ์จากการทดสอบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงกับก๊าซตัวอย่าง

ดังที่กล่าวมาในขั้นตอนการดำเนินงานเมื่อนำต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่ได้พัฒนาขึ้นทดสอบกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0 - 40% โดยได้มีขั้นตอนการจ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สลับกับผสมออกซิเจนทั้งสิ้น 3 ครั้ง โดยสัญญาณที่ได้จากการทดลองระบบตรวจจับใยแก้วนำแสงสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 สัญญาณจากต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงระยะ;

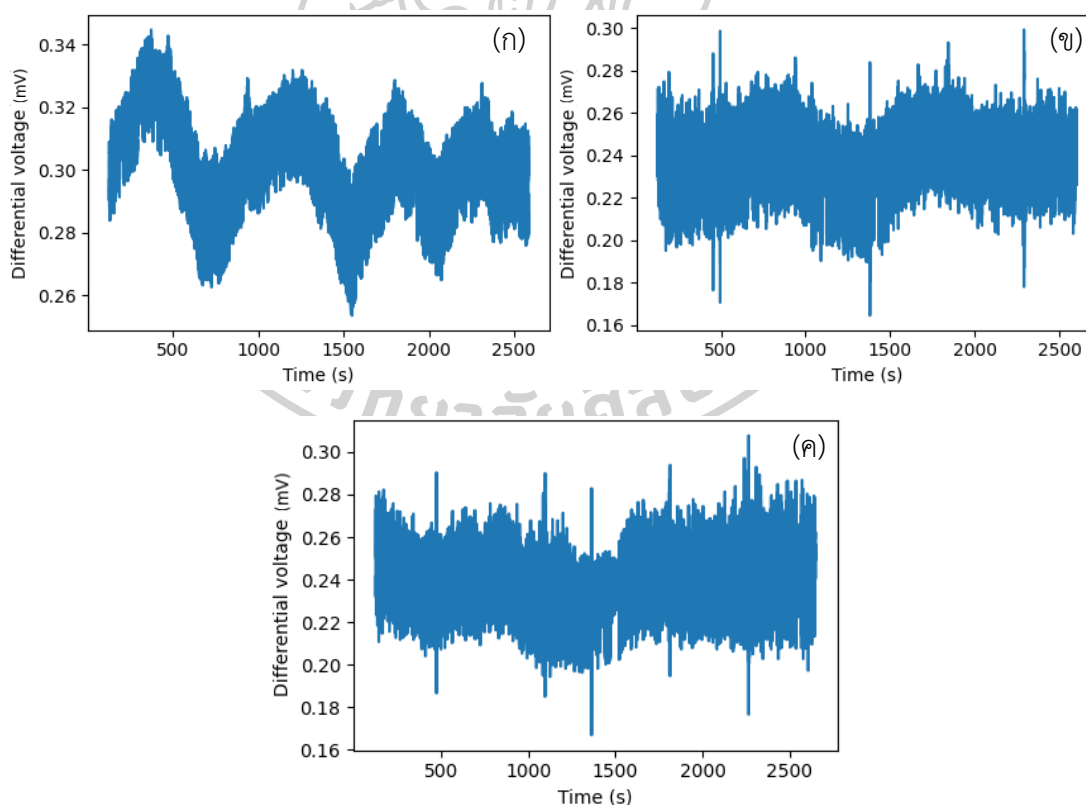
(ก) 10 มม. (ข) 20 มม. (ค) 25 มม.

โดยในรูปที่ 4.10(ก) – (ค) แสดงให้เห็นสัญญาณที่ถูกบันทึกในระหว่างการทดสอบของต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่ระยะ 10, 20 และ 25 มม. ตามลำดับ เส้นประแนวตั้งสีแดงและเขียว คือ เวลาที่ได้มีการจ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเวลาที่ผสมออกซิเจน ตามลำดับ โดยพบว่าที่ระยะ 10 มิลลิเมตรสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับอ้างอิง (Reference probe) มีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาของการทดลองแสดงให้เห็นว่าสายใยแก้วนำแสงที่ผ่านกระบวนการกัด

ด้วยสารเคมีสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ในขณะที่ตัวตรวจจับ (Sensing probe) มีการตอบสนองต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงการจ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 feeding) และการผสมออกซิเจน (O_2 mixing) ดังแสดงในรูปที่ 4.10(ก) ในขณะที่ต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงระยะ 20 และ 25 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.10(ข) และ (ค) สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าของตัวตรวจจับอ้างอิงเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของความดันภายในหลอดแก้วทดลอง (Chamber) แต่เนื่องจากตัวตรวจจับและตัวตรวจจับอ้างอิงนั้นอยู่ภายในหลอดแก้วทดลองเดียวกันและมีความดันอากาศที่เท่ากัน จึงไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ข้อมูลใด ๆ

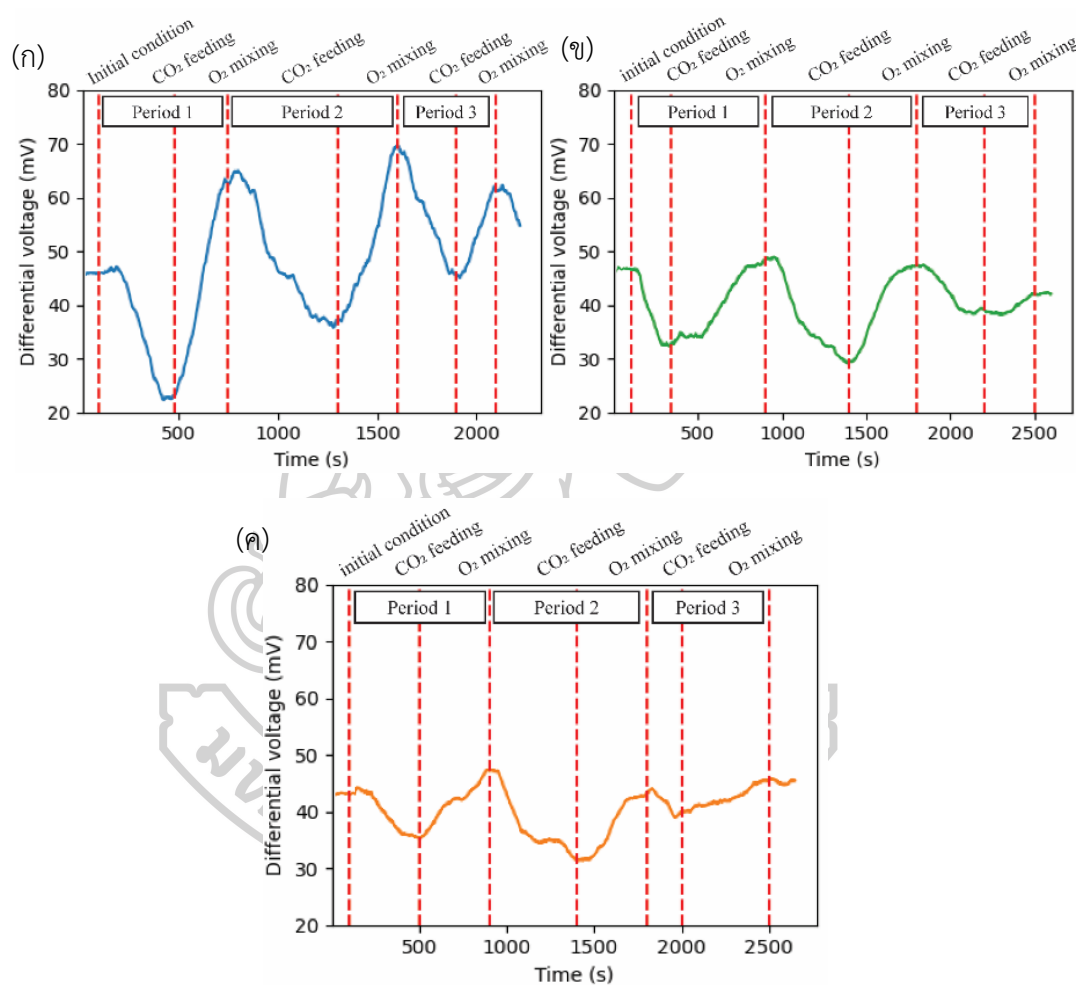
4.2.2 ผลลัพธ์จากการกรองและประมวลผลข้อมูล

หลังจากนำเข้าข้อมูลจากต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสู่โปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมเรียบร้อยแล้วจึงนำข้อมูลจากตัวตรวจจับและตัวตรวจจับอ้างอิงมาประมวลผลหาค่าความแตกต่างทางกำลังไฟฟ้า (ΔV) สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ค่าความแตกต่างทางกำลังไฟฟ้าระยะ; (ก) 10 มม. (ข) 20 มม. (ค) 25 มม.

เห็นได้ว่าสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับต้นแบบมีสัญญาณรบกวน (Noise) ส่งผลให้การนำสัญญาณการวัดที่ได้จากการวิเคราะห์หามีสัญญาณไม่พึงประสงค์รวมเข้าไปด้วย ดังนั้นจึงได้มีการนำสัญญาณดังกล่าวเข้ากระบวนการกรองสัญญาณด้วยวิธีเฉลี่ยค่าเคลื่อนที่ (Simple moving average) โดยกำหนดให้ช่วงข้อมูลในการเฉลี่ยค่าเท่ากับ 5% ของข้อมูลทั้งหมดที่บันทึก ซึ่งข้อมูลที่ผ่านมากระบวนการกรองสัญญาณสามารถแสดงตัวอย่างได้ในรูปที่ 4.12

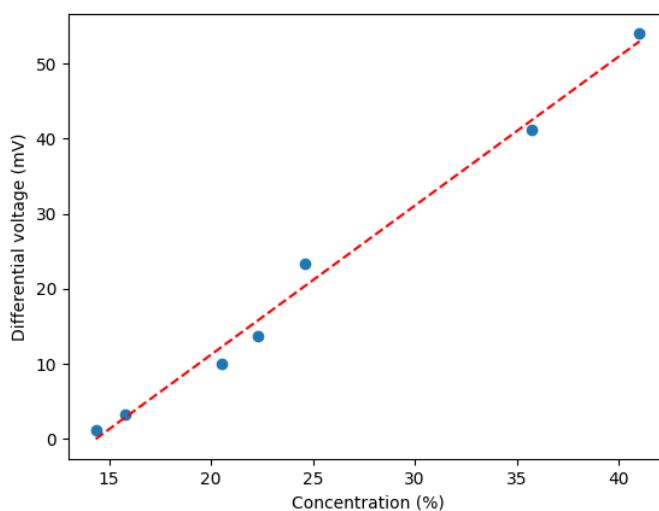


รูปที่ 4.12 ผลลัพธ์จากกระบวนการกรองสัญญาณที่ระยะต่าง ๆ;

(ก) 10 มม. (ข) 20 มม. (ค) 25 มม.

จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการจ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปจะส่งผลให้ค่าความแตกต่างทางกำลังไฟฟ้าลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีการหักเหของแสง ต่อมาเมื่อมีการผสมอากาศเข้าไปพบว่าค่าความแตกต่างทางกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นกับต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงทั้งสามระยะ เมื่อได้ข้อมูลที่ผ่านมากระบวนการกรองสัญญาณ

เรียบร้อยแล้วจะสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาเข้ากระบวนการแปรค่าความแตกต่างทางไฟฟ้าเป็นความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างทางกำลังไฟฟ้าและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างทางกำลังไฟฟ้าและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

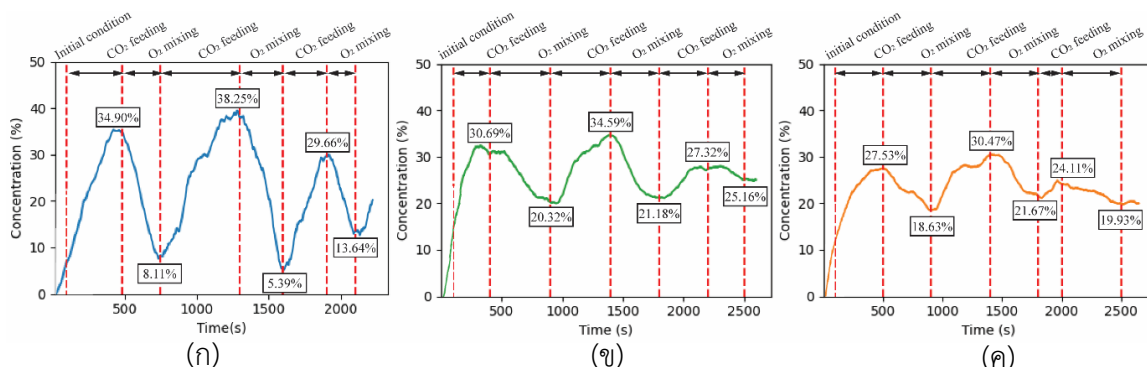
หลังจากนำค่าความแตกต่างทางกำลังไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นของก๊าซจะสามารถสร้างกราฟเส้นตรง (เส้นประ) จากวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) โดยสามารถแสดงได้ดัง (4.1)

$$Y = 1.996X - 28.855 \quad (4.1)$$

โดย X คือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Y คือ ค่าความแตกต่างทางกำลังไฟฟ้า

โดยจากสมการที่ได้จึงสามารถหาค่าความไวของเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นได้เท่ากับ $1.996\text{mV}/\%$ เมื่อนำข้อมูลความแตกต่างทางกำลังไฟฟ้าแทนค่าใน (4.1) จึงได้ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.14

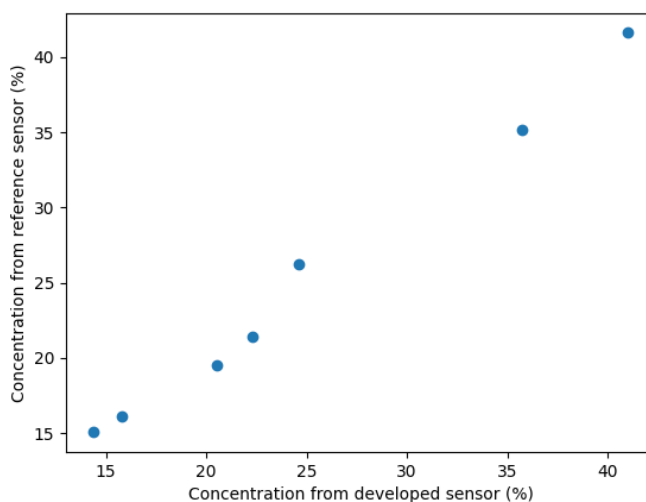


รูปที่ 4.14 ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากสมการปรับเทียบระยะ;

(ก) 10 มม. (ข) 20 มม. (ค) 25 มม.

จากรูปที่ 4.14 พบว่าในขั้นตอนการจ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในหลอดแก้วทดลอง ส่งผลให้เครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับค่าความเข้มข้นได้ โดยต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงระยะ 10 มิลลิเมตร มีช่วงในการตรวจจับคาร์บอนไดออกไซด์กว้างที่สุดเท่ากับ 5.39 – 38.25% ในขณะที่ต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่ระยะ 20 มิลลิเมตร สามารถตรวจจับได้ในช่วง 20.32 – 34.59% และที่ระยะ 25 มิลลิเมตร สามารถตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในช่วง 18.63 – 30.47% ตามลำดับ

จากข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดอ้างอิงสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของเครื่องมือวัด

เมื่อทำการคำนวณหาค่าคุณสมบัติของเครื่องมือตรวจจับใยแก้วนำแสงที่พัฒนาขึ้นจาก (4.2) และ (4.3) พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและค่าความแม่นยำมีค่าเท่ากับ 0.83% และ $\pm 3.73\%$ ตามลำดับ

$$AE = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})}{N} \quad (4.2)$$

$$Acc = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}}{N} \quad (4.3)$$

โดย AE คือ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน

y_i คือ ข้อมูล ณ ตำแหน่ง i

$\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยข้อมูลทั้งหมด

N คือ จำนวนข้อมูล

Acc คือ ค่าความแม่นยำ

$\hat{y}_i$ คือ ข้อมูลจากการพยากรณ์

ในบทนี้ได้มีการกล่าวถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองต่าง ๆ ตั้งแต่การพัฒนาต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงประกอบไปด้วยกระบวนการกัดสายใยแก้วนำแสงด้วยสารกัดแก้วและการพอกสายใยแก้วนำแสงด้วยสารประกอบทางเคมี พบว่ากรดไฮโดรฟลูออริกนั้นสามารถกัดสายใยแก้วนำแสงได้และสามารถนำขึ้นแคลดดึงออกได้ด้วยวิธีการจุ่มและแช่เป็นเวลา 45 นาที ในขณะที่ในกระบวนการพอกสายใยแก้วนำแสงด้วยซิงค์ออกไซด์และโซเดียมซิลิเกตที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สารประกอบทางเคมีทั้งสองสามารถจับตัวบนสายใยแก้วนำแสงได้และมีการกระจายตัวของของสารประกอบทางเคมีที่สม่ำเสมอว่าการพอกสารประกอบทางเคมีที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส ต่อมาในการทดสอบระบบตรวจจับใยแก้วนำแสงผลลัพธ์การทดสอบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงแสดงให้เห็นว่าตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงระยะ 10 มิลลิเมตร มีช่วงการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับระยะอื่นในช่วง 5.39 – 38.25%

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้มีการพัฒนาต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโตมิเตอร์สำหรับการตรวจจับก๊าซชีวภาพมุ่งเน้นไปที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยได้มีการแบ่งขั้นตอนการวิจัยดังนี้ การรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง การพัฒนาต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงและการทดสอบต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง โดยในขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ได้มีการหาข้อมูลจากบทความทางวิชาการและตำราที่เกี่ยวข้อง ในขั้นตอนของการพัฒนาต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง ได้มีการใช้ซิงค์ออกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ที่สัดส่วน 40 mg/ml โดยได้มีการเปรียบเทียบการผสมสารเคมีทั้งสี่วิธีได้แก่ การผสมสารเคมีภายใต้อุณหภูมิ 24 และ 40 องศาเซลเซียส โดยพบว่า การผสมสารเคมีที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการผสมเท่ากับ 30 นาที ซึ่งน้อยกว่าถึง 8 เท่า และมีการกระจายตัวของสารเคมีบนสายใยแก้วนำแสงที่มากกว่า ต่อมาจึงนำสารประกอบทางเคมีดังกล่าวมาพอกบนสายใยแก้วนำแสงที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารกัดแก้ว (Hydrofluoric acid: HF) จนเหลือขนาดแกนกลางเท่ากับ 62.5 ไมโครเมตร ที่ระยะแตกต่างกันได้แก่ 10, 20 และ 25 มิลลิเมตร ต่อมาได้นำต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงไปทดสอบกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่างกันไป พบว่าต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่ระยะ 10 มิลลิเมตร มีช่วงการตรวจจับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดเท่ากับ 5.39 – 38.25%

5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน

กระบวนการกัดสายใยแก้วนำแสง เนื่องจากสายใยแก้วนำแสงมีขนาดแกนกลางที่เล็กส่งผลให้เมื่อนำสายใยแก้วนำแสงไปแช่ในกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid: HF) จะทำให้สายใยแก้วนำแสงมีขนาดแกนกลางที่เล็กลงและหักได้ง่าย ส่งผลให้การพอกสารเคมีบนสายใยแก้วนำแสงเป็นไปได้ยากขึ้น ต่อมาในการพอกสายใยแก้วนำแสงจำเป็นต้องมีการพอกในบริเวณที่สะอาด ไม่เช่นนั้นจะส่งผลให้มีสารเจือปนอยู่บนต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงได้ เมื่อมีการบันทึกข้อมูลในระหว่างการทดลองข้อมูลที่บันทึกออกมานั้นจำเป็นต้องผ่านกระบวนการกรองสัญญาณก่อนเพื่อนำสัญญาณที่ไม่ต้องการออก โดยวิธีเฉลี่ยค่าเคลื่อนที่นั้นมียุทธวิธีที่ไม่ซับซ้อน แต่มีผลต่อข้อมูลที่ได้ออกมามีความเสียหาย จึงทำให้ต้องหาวิธีการที่เหมาะสมมาแก้ไขในส่วนดังกล่าว

5.3 ข้อเสนอแนะ

การแก้ปัญหาสัญญาณไม่คงที่ที่เกิดจากการส่งถ่ายข้อมูล สามารถแสดงได้ดังนี้

- การเลือกใช้หัวส่งสัญญาณแบบสำเร็จรูปที่มีค่าการสูญเสียกำลังทางแสงต่ำ เพื่อลดปัญหาแสงกระเจิงออกจากสายใยแก้วนำแสงในตำแหน่งที่ไม่ต้องการ
- การออกแบบหลอดแก้วทดลองสำหรับบรรจุต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงใหม่ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหลอดแก้วทดลองในขณะที่มีการจ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

5.4 แนวทางในการศึกษาต่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้มีการทำต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงขึ้น โดยได้มีการศึกษาหาวิธีที่เหมาะสมในการกัดสายใยแก้วนำแสงและพอกสายใยแก้วนำแสง ต่อมาได้มีการทดสอบกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกันไป ดังนั้นในการศึกษาต่อจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงกับก๊าซชนิดต่าง ๆ และก๊าซชีวภาพเพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซชนิดดังกล่าว รวมไปถึงการศึกษาวิธีการกรองสัญญาณด้วยวิธีการอื่น ๆ เพื่อยกระดับความแม่นยำในการรับค่าและแปลงค่าตัวแปรที่จำเป็นเพื่อให้สัญญาณที่ออกมามีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น



รายการอ้างอิง

- [1] S. Gorjian and H. Ebadi, "Chapter 1 - Introduction," in *Photovoltaic Solar Energy Conversion*, S. Gorjian and A. Shukla Eds.: Academic Press, pp. 1-26, 2020.
- [2] B. R. Singh, "*Global Warming: Causes, Impacts and Remedies.*" InTech, 2015.
- [3] Z. Wang, L. Hu, X. Huang, J. Tan, and K. Ye, "Carbon emissions of power transmission and transformation projects in the whole life cycle for smart sustainable energy systems," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 3812, 2024.
- [4] A. Mikhaylov, N. Moiseev, K. Aleshin, and T. Burkhardt, "Global climate change and greenhouse effect," *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, vol. 7, no. 4, p. 2897, 2020.
- [5] L. Jeffry, M. Y. Ong, S. Nomanbhay, M. Mofjur, M. Mubashir, and P. L. Show, "Greenhouse gases utilization: A review," *Fuel*, vol. 301, p. 121017, 2021.
- [6] I. Khan, F. Hou, and H. P. Le, "The impact of natural resources, energy consumption, and population growth on environmental quality: Fresh evidence from the United States of America," *Sci Total Environ*, vol. 754, p. 142222, 2021.
- [7] Ministry of Energy, "Alternative Energy Development Plan (AEDP)," Ministry of Energy, Thailand, 2018.
- [8] R. Banu and Y. K. R, "*Anaerobic Digestion.*" IntechOpen, 2019.
- [9] A. Wellinger, J. D. Murphy, and D. Baxter, "*The Biogas Handbook: Science, Production and Applications.*" Elsevier Science, 2013.
- [10] J. G. Webster and H. Eren, "*Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Two-Volume Set.*" CRC Press, 2018.
- [11] F. S. Ligler and C. A. R. Taitt, "*Optical Biosensors: Present & Future.*" Antony Rowe Ltd., 2002.
- [12] Gurleen Kaur Gulati, Loveleen Kaur Gulati, and S. Kumar, "*Carbon monoxide sensing technologies.*" Materials Research Forum LLC, 2021.
- [13] U. G. Gerald Gerlach, Wolfram Oelßner, "*Carbon Dioxide Sensing: Fundamentals, Principles, and Applications.*" Germany: Wiley-VCH, 2019.

- [14] G. Ramsay, "*Commercial biosensors applications to clinical, bioprocess, and environmental samples.*" John Wiley & Sons, 1998.
- [15] N. Goel, K. Kunal, A. Kushwaha, and M. Kumar, "Metal oxide semiconductors for gas sensing," *Engineering Reports*, vol. 5, no. 6, 2022.
- [16] S. Uma and M. K. Shobana, "Metal oxide semiconductor gas sensors in clinical diagnosis and environmental monitoring," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 349, 2023.
- [17] S. Palzer, "Photoacoustic-Based Gas Sensing: A Review," *Sensors*, vol. 20, no. 9, 2020.
- [18] P. Sekhararidhi, P. Thaisongkroh, and S. Pullteap, "Development of carbon dioxide sensor using fiber optic-based refractometer," *Optical Fiber Technology*, vol. 85, p. 103807, 2024.
- [19] M. Azadeh, "*Fiber Optics Engineering.*" Springer Science, 2009.
- [20] E. W. Max Born, "*Principles of Optics.*" Cambridge university press, 1999.
- [21] Ignacio R. Matias, Satoshi Ikezawa, and J. Corres, "*Fiber Optic Sensors: Current Status and Future Possibilities.*" Springer Nature, 2017.
- [22] C. S. Mario Bertolotti, Angela M. Guzman, "*Evanescent Waves in Optics.*" Springer Cham, 2017.
- [23] M. Milosevic, "*Internal refraction and ATR spectroscopy.*" John Wiley & Sons, 2012.
- [24] J. Kenkel, "*Analytical Chemistry for Technicians, Fourth Edition.*" Taylor & Francis, 2013.
- [25] P. Roriz, S. Silva, O. Frazão, and S. Novais, "Optical Fiber Temperature Sensors and Their Biomedical Applications," *Sensors*, vol. 20, no. 7, 2020.
- [26] Y. Moreno, Q. Song, Z. Xing, Y. Sun, and Z. Yan, "Hybrid tilted fiber gratings-based surface plasmon resonance sensor and its application for hemoglobin detection," *Chin. Opt. Lett.*, vol. 18, no. 10, p. 100601, 2020.
- [27] E. Dervieux, M. Théron, and W. Uhring, "Carbon Dioxide Sensing : Biomedical Applications to Human Subjects," *Sensors*, vol. 22, no. 1, 2022.
- [28] M. E. Álvarez-Ramos, J. I. Necochea-Chamorro, R. C. Carrillo-Torres, and R. Sánchez-Zeferino, "Room temperature CO₂ sensing using Au-decorated ZnO nanorods deposited on an optical fiber," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 262, p. 114720, 2020.

- [29] A. R. Prado *et al.*, "Surface Plasmon Resonance-based Optical Fiber Sensors for H₂S In Situ detection," *Plasmonics*, vol. 16, no. 3, pp. 787-797, 2021.
- [30] M. Turemis *et al.*, "ZnO/polyaniline composite based photoluminescence sensor for the determination of acetic acid vapor," *Talanta*, vol. 211, p. 120658, 2020.
- [31] Z.-J. Ke, D.-L. Tang, X. Lai, Z.-Y. Dai, and Q. Zhang, "Optical fiber evanescent-wave sensing technology of hydrogen sulfide gas concentration in oil and gas fields," *Optik*, vol. 157, pp. 1094-1100, 2018.
- [32] A. K. Sharma, J. Gupta, and I. Sharma, "Fiber optic evanescent wave absorption-based sensors: A detailed review of advancements in the last decade (2007–18)," *Optik*, vol. 183, pp. 1008-1025, 2019.
- [33] I. Vitoria, C. Ruiz Zamarréño, A. Ozcariz, and I. R. Matias, "Fiber Optic Gas Sensors Based on Lossy Mode Resonances and Sensing Materials Used Therefor: A Comprehensive Review," *Sensors*, vol. 21, no. 3, 2021.
- [34] P. Thaisongkroh and S. Pullteap, "Investigation of Fiber Optic-Based-Refractometer for Biogas Sensing," *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 16, no. 4, p. 6793, 2023.
- [35] Z. Zhou, Y. Xu, C. Qiao, L. Liu, and Y. Jia, "A novel low-cost gas sensor for CO₂ detection using polymer-coated fiber Bragg grating," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 332, p. 129482, 2021.
- [36] F. Pérez-Ocón, A. M. Pozo, J. Cortina, and O. Rabaza, "Surface Plasmon Resonance Sensor of CO₂ for Indoors and Outdoors," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 15, 2021.
- [37] F. Lu, R. Wright, P. Lu, P. C. Cvetcic, and P. R. Ohodnicki, "Distributed fiber optic pH sensors using sol-gel silica based sensitive materials," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 340, p. 129853, 2021.
- [38] N. Punjabi, J. Satija, and S. Mukherji, "Evanescent Wave Absorption Based Fiber-Optic Sensor - Cascading of Bend and Tapered Geometry for Enhanced Sensitivity," in *Sensing Technology: Current Status and Future Trends III*, A. Mason, S. C. Mukhopadhyay, and K. P. Jayasundera Eds. Cham: Springer International Publishing, pp. 25-45, 2015.

- [39] P. Sekhararidhi and S. Pullteap, "Investigation of effect from etching process in fiber refractometer for CO₂ measurement," in *2023 8th International STEM Education Conference (iSTEM-Ed)*, pp. 1-6, 2023.
- [40] Gloria Bueno Garcia *et al.*, "*Learning Image Processing with OpenCV: Exploit the Amazing Features of OpenCV to Create Powerful Image Processing Applications Through Easy-to-follow Examples.*" Packt Publishing, 2015.
- [41] R. Wilhelm, H. Seidl, and S. Hack, "*Compiler Design: Syntactic and Semantic Analysis.*" Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [42] B. Slatkin, "*Effective Python: 59 Specific Ways to Write Better Python.*" Addison-Wesley, 2020.
- [43] Q. Wang and B.-T. Wang, "Surface plasmon resonance biosensor based on graphene oxide/silver coated polymer cladding silica fiber," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 275, pp. 332-338, 2018.
- [44] Z. Samavati, A. Samavati, A. F. Ismail, M. H. D. Othman, and M. A. Rahman, "Comprehensive investigation of evanescent wave optical fiber refractive index sensor coated with ZnO nanoparticles," *Optical Fiber Technology*, vol. 52, p. 101976, 2019.
- [45] S. Cao *et al.*, "Highly sensitive surface plasmon resonance biosensor based on a low-index polymer optical fiber," *Opt. Express*, vol. 26, pp. 3988-3994, 2018.
- [46] A. L. Khalaf *et al.*, "Room temperature ammonia sensor using side-polished optical fiber coated with graphene/polyaniline nanocomposite," *Opt. Mater. Express*, vol. 7, no. 6, pp. 1858-1870, 2017.
- [47] W. B. W. A. Rahman *et al.*, "Label-Free Detection of Dissolved Carbon Dioxide Utilizing Multimode Tapered Optical Fiber Coated Zinc Oxide Nanorice," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 4538-4545, 2019.
- [48] H. J. Kbashi, "Fabrication of Submicron-Diameter and Taper Fibers Using Chemical Etching," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 28, no. 4, pp. 308-312, 2012.
- [49] A. Prasanth, S. R. Meher, and Z. C. Alex, "Metal oxide thin films coated evanescent wave based fiber optic VOC sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 338, p. 113459, 2022.

- [50] N. F. Idris, N. A. Mohd Yahya, M. H. Yaacob, A. H. Idris, S. W. Harun, and N. Saidin, "Optical fiber coated Zinc Oxide (ZnO) nanorods decorated with Palladium (Pd) for hydrogen sensing," *Optical Materials*, vol. 96, p. 109291, 2019.





ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก

รายงานผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและขั้นตอนการจัดเตรียมสายใยแก้วนำแสงและการกรองสัญญาณสำหรับการนำไปวิเคราะห์ข้อมูลในขั้นตอนสุดท้าย ประกอบไปด้วย

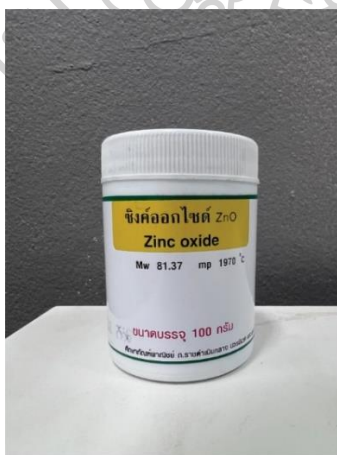
- ผลการทดลองการกัดสายใยแก้วนำแสง
- ผลการทดลองการพอกสายใยแก้วนำแสง
- ผลการทดลองการตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง
- ผลการทดลองการกรองสัญญาณที่ได้จากการทดลอง

ก.1 ผลการทดลองการกัดสายใยแก้วนำแสง

จากที่ได้กล่าวในผลลัพธ์จากกระบวนการกัดสายใยแก้วนำแสง ได้มีการศึกษาหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกัดสายใยแก้วนำแสง โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้กรดไฮโดรฟลูออริกเนื่องจากมีความสามารถในการกัดกร่อนแก้วซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของสายใยแก้วนำแสง

ก.2 ผลการทดลองการพอกสายใยแก้วนำแสง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมสารเคมีสำหรับการพอกสายใยแก้วนำแสง โดยประกอบไปด้วยซิงค์ออกไซด์และโซเดียมซิลิเกตสามารถแสดงได้ในรูปที่ ก.1(ก) และ ก.1(ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ ก.1 สารเคมีในกระบวนการพอกสายใยแก้วนำแสง; (ก) ซิงค์ออกไซด์ (ข) โซเดียมซิลิเกต

สารทั้งสองถูกนำมาผสมรวมกันด้วยสัดส่วน 40 mg/ml ซึ่งถูกชั่งตวงด้วยตราชั่งดิจิตอลและหลอดหยดสารเคมี ดังแสดงในรูปที่ ก.2



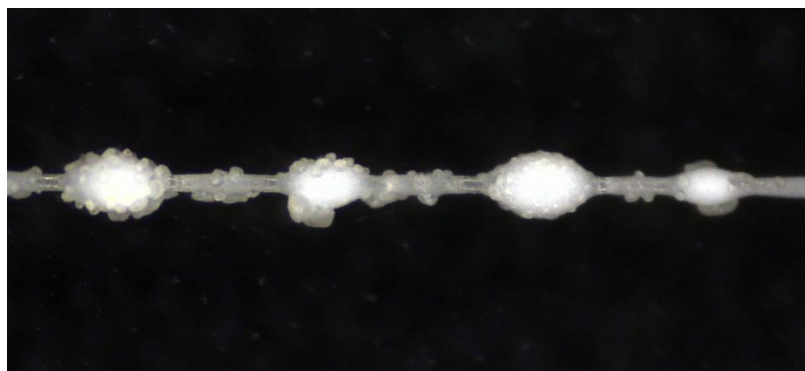
รูปที่ ก.2 การชั่งตวงสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการพอกสายใยแก้วนำแสง;
(ก) โซเดียมซิลิเกต (ข) ซิงค์ออกไซด์

หลังจากผสมสารเคมีเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว จึงเริ่มจับเวลาเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความหนืดของสารเคมีเพื่อนำไปใช้พอกบนสายใยแก้วนำแสง โดยได้แบ่งออกเป็นสองวิธีการตามที่ได้บรรยายในกระบวนการพอกสายใยแก้วนำแสง วิธีแรกได้มีการผสมสารเคมีและจับเวลาภายใต้อุณหภูมิควบคุม ในขณะที่วิธีที่สองได้มีการผสมสารเคมีภายใต้หลอดไฟฮาโลเจนขนาด 50 วัตต์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สามารถแสดงได้ในรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 การผสมสารเคมีภายใต้อุณหภูมิควบคุม

การผสมสารเคมีภายใต้อุณหภูมิควบคุมแบ่งออกเป็น 3 ระยะได้แก่ 30, 60 และ 260 นาที ในขณะที่การผสมสารเคมีภายใต้อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสแบ่งออกเป็น 8, 12 และ 30 นาที ตามลำดับ โดยตัวอย่างเพิ่มเติมในกระบวนการพอกสายใยแก้วนำแสงสามารถแสดงได้ในรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 ตัวอย่างผลลัพธ์การพอกสายใยแก้วนำแสงเพิ่มเติม

ก.3 ผลการทดลองการตรวจจับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง

ในการทดลองการตรวจจับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน ได้ถูกนำไปผสมกับก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเป็นก๊าซที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากจัดอยู่ในหมู่ของก๊าซเฉื่อย ในการผสมก๊าซดังกล่าวได้ใช้อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซในการกำหนดปริมาณของก๊าซที่จะนำมาผสม โดยภาพอุปกรณ์สามารถแสดงได้ในรูปที่ ก.5



(ก)

(ข)

รูปที่ ก.5 ระบบส่งถ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์;

(ก) ระบบผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ข) อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล

ในการผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้ได้ความเข้มข้นต่างกัน ได้มีการจับเวลาในการปล่อยก๊าซเข้าไปในภาชนะกักเก็บก๊าซ โดยค่าสัดส่วนการปล่อยก๊าซทั้งสองชนิดและความเข้มข้นสุทธิซึ่งวัดค่าจากเครื่องมือวัดอ้างอิงสามารถแสดงได้ดังตารางที่ ก.1

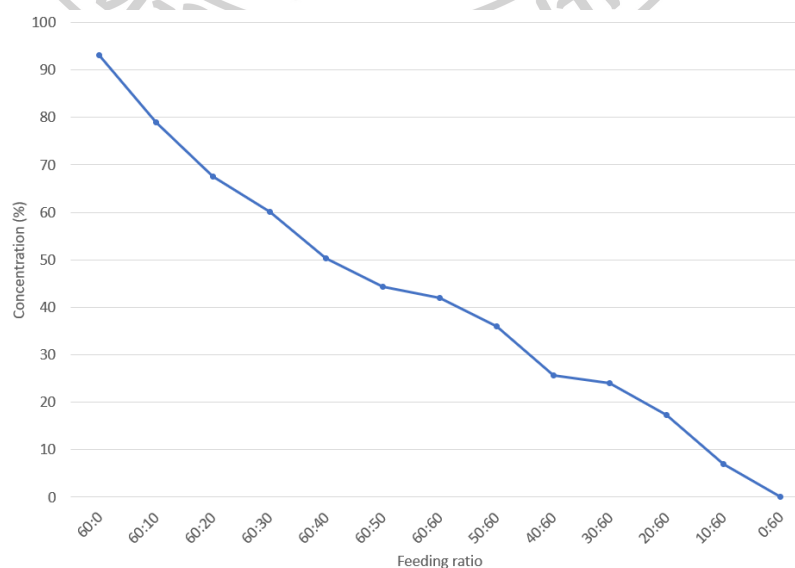
ตารางที่ ก.1 สัดส่วนการผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เวลาการผสม (วินาที)		ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	
คาร์บอนไดออกไซด์	ไนโตรเจน		เฉลี่ย
60	0	92.6	93.13%
		93.1	
		93.7	
60	10	78.9	78.97%
		79	
		79	
60	20	67.5	67.50%
		67.5	
		67.5	
60	30	60	60.07%
		60.1	
		60.1	
60	40	50.2	50.33%
		50.4	
		50.4	
60	50	44.3	44.30%
		44.3	
		44.3	
60	60	41.9	41.97%
		42	
		42	
50	60	36	36.00%
		36	
		36	
40	60	25.7	25.7%
		25.7	
		25.7	

ตารางที่ ก.1 สัดส่วนการผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ต่อ)

เวลาการผสม (วินาที)		ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	
คาร์บอนไดออกไซด์	ไนโตรเจน		เฉลี่ย
30	60	24.1	24.10%
		24.1	
		24.1	
20	60	17.2	17.27%
		17.3	
		17.3	
10	60	6.9	6.97%
		7	
		7	
0	60	0	0%
		0	
		0	

จากตารางพบว่าการผสมก๊าซทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงโดยมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงสามารถแสดงได้ในรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.6 สัดส่วนการผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ก.4 ผลการทดลองการกรองสัญญาณที่ได้จากการทดลอง

ในกระบวนการกรองสัญญาณได้มีการออกแบบโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมขึ้นด้วยภาษาไพทอน โดยแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการย่อยประกอบไปด้วย

- ขั้นตอนที่ 1 การนำเข้าข้อมูลและการเรียงข้อมูลให้เข้าถึงง่าย โดยเมื่อการบันทึกข้อมูลดิบที่ได้จากหน่วยบันทึกข้อมูล (DAQ) ในการทดลองการตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยต้นแบบตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงเรียบร้อยแล้ว ข้อมูลดิบที่ได้จะอยู่ในรูปแบบของข้อมูล Comma separated values file (CSV file) ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ ก.7

	A	B	C	D	E
1	Timestamp	2/17/2024	Timestamp	2/17/2024	2:32:08 PM
2	Interval	0.001	Interval	0.001	
3	Channel name	ref	Channel name	sensing	
4	Unit	V	Unit	V	
5	0	1.316794	0	1.499507	
6	0.001	1.320661	0.001	1.50144	
7	0.002	1.325494	0.002	1.505307	
8	0.003	1.328717	0.003	1.512397	
9	0.004	1.335484	0.004	1.516263	
10	0.005	1.341607	0.005	1.522064	
11	0.006	1.343862	0.006	1.525931	
12	0.007	1.34934	0.007	1.528509	
13	0.008	1.351918	0.008	1.529798	
14	0.009	1.351274	0.009	1.52722	
15	0.01	1.349663	0.01	1.525609	
16	0.011	1.345796	0.011	1.516586	
17	0.012	1.340318	0.012	1.511108	
18	0.013	1.334195	0.013	1.507241	
19	0.014	1.329361	0.014	1.496929	

รูปที่ ก.7 ตัวอย่างข้อมูล CSV file

ดังแสดงในรูปที่ ก.7 ข้อมูลที่ถูกบันทึกจากหน่วยบันทึกข้อมูลประกอบไปด้วย วันเวลาในการบันทึกข้อมูล (Timestamp) คาบการบันทึกข้อมูล (Interval) และข้อมูลดิบที่ถูกบันทึก ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลวินาทีที่เริ่มบันทึก (Unit) และ ค่าความแตกต่างทางกำลังไฟฟ้า (V_{ref} และ V_{sens}) เนื่องจากข้อมูลดิบที่บันทึกเอาไว้มีจำนวนมากและขนาดข้อมูลที่ใหญ่ ข้อมูลดังกล่าวจึงถูกนำมาเรียงเรียงและตั้งชื่อใหม่ เพื่อให้การเข้าถึงข้อมูลเป็นไปได้อย่างยิ่งขึ้น โดยคำสั่งการเรียงเรียงข้อมูลสามารถแสดงได้ในรูปที่ ก.8

```

1 import pandas as pd
2 #Function that rename (V and V.1) into (sens and ref) also calculate delta
3 def rekey(filename) :
4     df = pd.read_csv(filename, skiprows = 3)
5     key = df.keys()
6
7     if (df[key[1]].mean() > df[key[3]].mean()):
8         df=df.rename(columns = {key[1]:'ref', key[3]:'sens'})
9         df=df.drop(columns = ['Unit.1'])
10        df['delta'] = (df['ref'] - df['sens'])
11        df['delta'].abs()
12        return df
13    else:
14        df=df.rename(columns = {key[3]:'ref', key[1]:'sens'})
15        df=df.drop(columns = ['Unit.1'])
16        df['delta'] = (df['ref'] - df['sens'])
17        df['delta'].abs()
18        return df
19

```

รูปที่ ก.8 คำสั่งการเรียงเรียงข้อมูลใหม่

เมื่อเรียกใช้ชุดคำสั่งดังแสดงในรูปที่ ก.8 โปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมจะทำการนำข้อมูลดิบและบันทึกไว้ในตัวแปรชั่วคราว (df) ในบรรทัดที่ 4 ต่อมาจึงเปลี่ยนชื่อตัวแปรทั้งสองเป็น ref (ข้อมูลจากตัวตรวจจับอ้างอิง) และ sens (ข้อมูลจากตัวตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) ในบรรทัดที่ 8 และ 14 ต่อมาจึงลบข้อมูลที่ไม่จำเป็นออกในบรรทัดที่ 9 และ 15 แล้วจึงนำข้อมูลที่เปลี่ยนชื่อแล้วทั้งสองมาคำนวณหาค่าความแตกต่างทางกำลังไฟฟ้า (delta) ในบรรทัดที่ 10 และ 16 ในขั้นตอนสุดท้ายโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมจะนำข้อมูลที่ผ่านการเรียงเรียงแล้วบันทึกลงคอมพิวเตอร์ ตัวอย่างข้อมูลที่ผ่านกระบวนการเรียงเรียงสามารถแสดงได้ในรูปที่ ก.9

	A	B	C	D	E
1	Unit	sens	ref	delta	
2	0	1.310993	1.604559	0.293565	
3	0.001	1.297781	1.602625	0.304844	
4	0.002	1.289725	1.594891	0.305166	
5	0.003	1.280058	1.583935	0.303877	
6	0.004	1.268457	1.572979	0.304522	
7	0.005	1.256212	1.561378	0.305166	
8	0.006	1.244933	1.549455	0.304522	
9	0.007	1.232688	1.539143	0.306455	
10	0.008	1.224954	1.531409	0.306455	
11	0.009	1.221409	1.529798	0.308389	
12	0.01	1.220765	1.53012	0.309355	
13	0.011	1.22302	1.535276	0.312256	
14	0.012	1.229143	1.54301	0.313867	
15	0.013	1.239133	1.552677	0.313545	
16	0.014	1.2488	1.563634	0.314834	
17	0.015	1.260078	1.572979	0.3129	
18	0.016	1.269101	1.582646	0.313545	
19	0.017	1.278124	1.589735	0.311611	
20	0.018	1.284247	1.593602	0.309355	

รูปที่ ก.9 ตัวอย่างข้อมูลที่ผ่านกระบวนการเรียงเรียงแล้ว

- ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์ข้อมูลและกรองสัญญาณ เมื่อได้ข้อมูลพื้นฐานที่ถูกเรียบเรียงใหม่แล้วดังแสดงในรูปที่ ก.9 ต่อมาจึงนำข้อมูลดังกล่าวมาผ่านกระบวนการกรองสัญญาณด้วยวิธีเฉลี่ยค่าเคลื่อนที่ (Simple moving average) โดยคำสั่งในขั้นตอนนี้สามารถแสดงได้ในรูปที่ ก.10

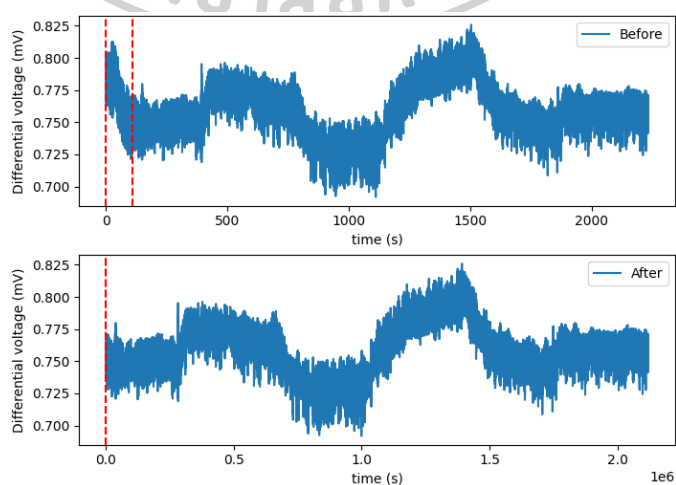
```

43 #Integrate all function to one
44 def analyzgas(df, perc = 5):
45     #Filter datas in DF using Moving Average method
46     window = int(perc*0.01*len(df))
47     sma = pd.DataFrame()
48     sma['ref'] = df['ref'].to_frame()
49     sma['sens'] = df['sens'].to_frame()
50     sma['delta'] = df['delta'].to_frame()
51     sma['sma_ref'] = sma['ref'].rolling(window).mean()
52     sma['sma_sens'] = sma['sens'].rolling(window).mean()
53     sma['sma_delta'] = sma['delta'].rolling(window).mean()
54     sma.dropna(inplace = True)
55     sma.reset_index(drop = True, inplace = True)
56

```

รูปที่ ก.10 คำสั่งการกรองสัญญาณ

ดังแสดงในรูปที่ ก.10 เมื่อเรียกใช้ชุดคำสั่งแล้ว โปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมจะสร้างตัวแปรที่จำเป็นในกระบวนการกรองสัญญาณขึ้น เช่น sma ทำหน้าที่เป็นตัวแปรชั่วคราวในการบันทึกข้อมูลที่ได้ถูกเรียบเรียงแล้ว และ window เป็นจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการเฉลี่ยค่าในกระบวนการ simple moving average โดยได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 5% ของข้อมูลที่น่าเข้ามา ในตัวแปรชั่วคราวได้มีการสร้างตัวแปรย่อยขึ้นสามค่า ได้แก่ sma_ref, sma_sens และ sma_delta โดยตัวแปรทั้งสามตัวทำหน้าที่จัดเก็บข้อมูลที่ผ่านมากระบวนการแล้ว โดยข้อมูลก่อนผ่านกระบวนการกรองจะยังคงจัดเก็บอยู่ภายใน sma เช่นเดิม ดังแสดงในบรรทัดที่ 46 – 55 แต่เนื่องจากการเฉลี่ยค่าเพื่อกรองสัญญาณส่งผลให้ข้อมูลบางส่วนหายไป ตัวอย่างข้อมูลที่หายไปสามารถแสดงได้ในรูปที่ ก.11



รูปที่ ก.11 ตัวอย่างการกรองสัญญาณด้วยวิธีเฉลี่ยค่าเคลื่อนที่

ดังแสดงในรูปที่ ก.11 พบว่าเมื่อผ่านกระบวนการกรองสัญญาณแล้ว ข้อมูลในช่วงเริ่มต้นจะหายไปตามจำนวนข้อมูลที่นำไปเฉลี่ยค่า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการแก้ไขช่วงเวลาเริ่มต้นให้ถูกต้องก่อน โดยคำสั่งในขั้นตอนนี้สามารถแสดงได้ในรูปที่ ก.12

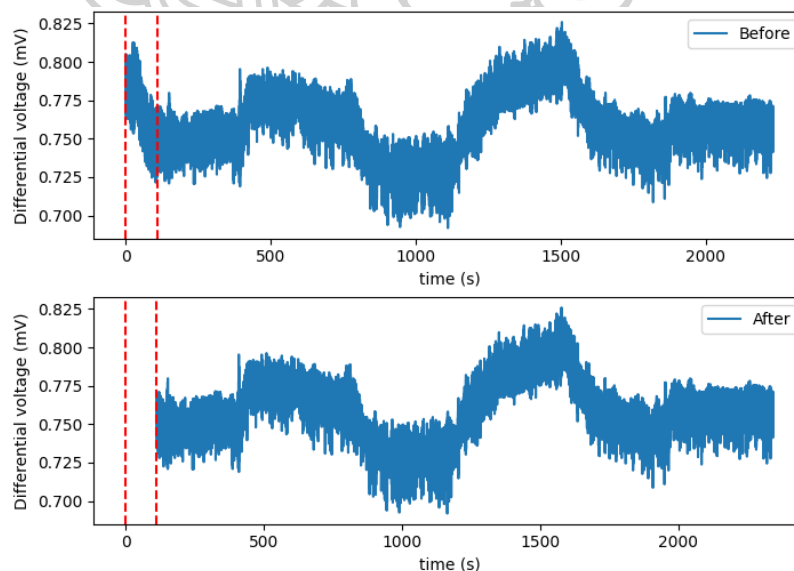
```

57 #Recollect time domain
58 ref_t = df['Unit'].iloc[-1]
59 targ_l = len(sma)-1
60 dt_targ = ref_t/targ_l
61 time_start = df['Unit'].loc[window]+1
62 time_domain = []
63 for i in range(len(sma)):
64     time_domain.append(time_start)
65     time_start+=dt_targ
66 sma['time'] = time_domain
67 return sma

```

รูปที่ ก.12 คำสั่งแก้ไขการบันทึกเวลา

คำสั่งที่แสดงในรูปที่ ก.12 เป็นคำสั่งที่ถูกดำเนินการหลังจากผ่านกระบวนการกรองสัญญาณเป็นที่เรียบร้อยแล้ว โดยในคำสั่งดังกล่าวทำหน้าที่หาเวลาที่เกิดขึ้นจริง ณ ตอนที่มีการทำการทดลองแล้วจึงนำค่าดังกล่าวเข้าไปแก้ไขและนำมาบันทึกลงไปแทนที่เวลาในช่วงแรกที่เสียหาย โดยตัวอย่างข้อมูลหลังจากผ่านกระบวนการแก้ไขแล้วสามารถแสดงได้ในรูปที่ ก.13



รูปที่ ก.13 ตัวอย่างข้อมูลหลังจากแก้ไขค่าเวลา

ดังแสดงในรูปที่ ก.13 ข้อมูลที่ผ่านกระบวนการกรองสัญญาณและได้ถูกแก้ไขช่วงข้อมูลที่สูญหายไปแล้ว ตัวอย่างข้อมูลดิบของกระบวนการดังกล่าวสามารถแสดงได้ในตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.474049	1.335484	0.138565	1.504231	1.345625	0.158606	85.045
1.476305	1.336773	0.139532	1.504231	1.345626	0.158605	85.04605
1.480816	1.340318	0.140499	1.50423	1.345626	0.158605	85.04711
1.484039	1.345151	0.138888	1.50423	1.345626	0.158604	85.04816
1.489195	1.350307	0.138888	1.50423	1.345626	0.158604	85.04921
1.493384	1.355141	0.138243	1.50423	1.345626	0.158603	85.05026
1.498218	1.357074	0.141143	1.504229	1.345627	0.158603	85.05132
1.501762	1.360297	0.141466	1.504229	1.345627	0.158602	85.05237
1.503374	1.362552	0.140821	1.504229	1.345627	0.158602	85.05342
1.502729	1.360619	0.14211	1.504228	1.345627	0.158601	85.05447
1.502085	1.362875	0.13921	1.504228	1.345627	0.158601	85.05553
1.499184	1.360619	0.138565	1.504228	1.345627	0.1586	85.05658
1.51723	1.35353	0.163701	1.504228	1.345627	0.1586	85.05763
1.512719	1.349663	0.163056	1.504228	1.345628	0.1586	85.05868
1.508852	1.345151	0.163701	1.504228	1.345628	0.1586	85.05974
1.503696	1.342573	0.161123	1.504228	1.345628	0.1586	85.06079
1.500796	1.336773	0.164023	1.504228	1.345628	0.1586	85.06184
1.49854	1.332906	0.165634	1.504228	1.345628	0.1586	85.06289
1.49854	1.332906	0.165634	1.504228	1.345628	0.1586	85.06395
1.50144	1.331939	0.169501	1.504229	1.345629	0.1586	85.065
1.499829	1.331939	0.16789	1.504229	1.345629	0.1586	85.06605
1.502729	1.333873	0.168857	1.504229	1.345629	0.1586	85.06711
1.506274	1.33774	0.168534	1.50423	1.345629	0.1586	85.06816
1.512074	1.34064	0.171434	1.50423	1.345629	0.158601	85.06921
1.516908	1.345473	0.171434	1.504231	1.34563	0.158601	85.07026
1.522386	1.351596	0.17079	1.504231	1.34563	0.158601	85.07132
1.527542	1.35643	0.171112	1.504232	1.34563	0.158602	85.07237
1.528509	1.359652	0.168857	1.504232	1.34563	0.158602	85.07342

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.531409	1.363519	0.16789	1.504233	1.345631	0.158603	85.07658
1.528187	1.363519	0.164667	1.504233	1.345631	0.158603	85.07763
1.524964	1.358686	0.166279	1.504234	1.345631	0.158603	85.07868
1.521742	1.356108	0.165634	1.504234	1.345631	0.158603	85.07974
1.515297	1.350629	0.164667	1.504235	1.345631	0.158604	85.08079
1.509496	1.344184	0.165312	1.504235	1.345631	0.158604	85.08184
1.502729	1.336773	0.165956	1.504235	1.345631	0.158604	85.08289
1.49854	1.330328	0.168212	1.504236	1.345631	0.158604	85.08395
1.489839	1.328717	0.161123	1.504236	1.345631	0.158605	85.085
1.483394	1.327428	0.155967	1.504236	1.345631	0.158605	85.08605
1.492095	1.325494	0.166601	1.504236	1.345631	0.158605	85.08711
1.488873	1.328717	0.160156	1.504236	1.345631	0.158605	85.08816
1.475661	1.328717	0.146944	1.504237	1.345632	0.158605	85.08921
1.481461	1.340318	0.141143	1.504237	1.345632	0.158605	85.09026
1.485972	1.34644	0.139532	1.504237	1.345632	0.158605	85.09132
1.491451	1.351596	0.139854	1.504237	1.345632	0.158605	85.09237
1.49564	1.355785	0.139854	1.504237	1.345632	0.158605	85.09342
1.498862	1.35933	0.139532	1.504237	1.345632	0.158605	85.09447
1.50144	1.362875	0.138565	1.504237	1.345632	0.158604	85.09553
1.50144	1.364486	0.136954	1.504237	1.345633	0.158604	85.09658
1.500151	1.364808	0.135343	1.504237	1.345633	0.158604	85.09763
1.497895	1.364808	0.133087	1.504237	1.345633	0.158604	85.09868
1.494029	1.360941	0.133087	1.504237	1.345633	0.158604	85.09974
1.498218	1.35643	0.141788	1.504237	1.345633	0.158604	85.10079
1.493384	1.349985	0.143399	1.504237	1.345633	0.158604	85.10184
1.487906	1.347407	0.140499	1.504237	1.345634	0.158604	85.10289
1.483072	1.343218	0.139854	1.504237	1.345634	0.158604	85.10395
1.47985	1.339029	0.140821	1.504237	1.345634	0.158603	85.105

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.475983	1.333873	0.14211	1.504237	1.345635	0.158602	85.10816
1.487906	1.334839	0.153067	1.504237	1.345635	0.158602	85.10921
1.491773	1.334839	0.156933	1.504237	1.345635	0.158602	85.11026
1.487261	1.344184	0.143077	1.504237	1.345635	0.158601	85.11132
1.490162	1.34354	0.146622	1.504236	1.345636	0.158601	85.11237
1.496606	1.355785	0.140821	1.504236	1.345636	0.1586	85.11342
1.500796	1.359652	0.141143	1.504236	1.345636	0.1586	85.11447
1.505307	1.363197	0.14211	1.504236	1.345636	0.1586	85.11553
1.507563	1.365453	0.14211	1.504236	1.345636	0.158599	85.11658
1.506596	1.367386	0.13921	1.504235	1.345637	0.158599	85.11763
1.506596	1.366419	0.140177	1.504235	1.345637	0.158598	85.11868
1.504663	1.364486	0.140177	1.504235	1.345637	0.158598	85.11974
1.500151	1.359974	0.140177	1.504235	1.345637	0.158597	85.12079
1.497251	1.355463	0.141788	1.504234	1.345637	0.158597	85.12184
1.491451	1.353852	0.137599	1.504234	1.345637	0.158597	85.12289
1.487261	1.348696	0.138565	1.504234	1.345638	0.158596	85.12395
1.481783	1.343218	0.138565	1.504234	1.345638	0.158596	85.125
1.478561	1.338706	0.139854	1.504234	1.345638	0.158595	85.12605
1.475661	1.334839	0.140821	1.504234	1.345638	0.158595	85.12711
1.473405	1.332261	0.141143	1.504233	1.345639	0.158595	85.12816
1.474049	1.332261	0.141788	1.504233	1.345639	0.158594	85.12921
1.475661	1.332584	0.143077	1.504233	1.345639	0.158594	85.13026
1.479205	1.334517	0.144688	1.504233	1.345639	0.158594	85.13132
1.48275	1.338062	0.144688	1.504234	1.345639	0.158594	85.13237
1.487584	1.342895	0.144688	1.504234	1.34564	0.158594	85.13342
1.490484	1.347407	0.143077	1.504234	1.34564	0.158594	85.13447
1.493384	1.348374	0.14501	1.504234	1.34564	0.158594	85.13553
1.497251	1.352563	0.144688	1.504234	1.34564	0.158594	85.13658

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.496929	1.353207	0.143721	1.504234	1.34564	0.158594	85.13974
1.493062	1.350307	0.142755	1.504234	1.34564	0.158594	85.14079
1.489517	1.347085	0.142432	1.504234	1.34564	0.158594	85.14184
1.483394	1.342895	0.140499	1.504234	1.34564	0.158594	85.14289
1.479205	1.338062	0.141143	1.504234	1.34564	0.158594	85.14395
1.473727	1.332261	0.141466	1.504234	1.34564	0.158594	85.145
1.468249	1.326461	0.141788	1.504234	1.34564	0.158594	85.14605
1.46406	1.322272	0.141788	1.504233	1.34564	0.158594	85.14711
1.461804	1.319694	0.14211	1.504233	1.34564	0.158593	85.14816
1.46116	1.317116	0.144044	1.504233	1.34564	0.158593	85.14921
1.502729	1.317438	0.185291	1.504234	1.34564	0.158594	85.15026
1.503051	1.333873	0.169179	1.504234	1.34564	0.158594	85.15132
1.507563	1.337095	0.170468	1.504235	1.34564	0.158594	85.15237
1.512074	1.342251	0.169823	1.504235	1.34564	0.158595	85.15342
1.516586	1.346762	0.169823	1.504235	1.34564	0.158595	85.15447
1.522386	1.352241	0.170146	1.504236	1.34564	0.158595	85.15553
1.527542	1.357074	0.170468	1.504236	1.345641	0.158596	85.15658
1.52722	1.361263	0.165956	1.504237	1.345641	0.158596	85.15763
1.526898	1.360619	0.166279	1.504237	1.345641	0.158596	85.15868
1.531409	1.364486	0.166923	1.504237	1.345641	0.158596	85.15974
1.526575	1.362552	0.164023	1.504238	1.345641	0.158597	85.16079
1.523997	1.35933	0.164667	1.504238	1.345641	0.158597	85.16184
1.518519	1.357719	0.1608	1.504238	1.345641	0.158597	85.16289
1.511752	1.348374	0.163378	1.504238	1.345641	0.158597	85.16395
1.507241	1.345796	0.161445	1.504239	1.345641	0.158597	85.165
1.499184	1.339351	0.159834	1.504239	1.345641	0.158598	85.16605
1.497573	1.335162	0.162412	1.504239	1.345641	0.158598	85.16711
1.476627	1.336128	0.140499	1.504239	1.345641	0.158598	85.16816

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.474372	1.335484	0.138888	1.504239	1.345642	0.158598	85.17132
1.47695	1.33774	0.13921	1.50424	1.345642	0.158598	85.17237
1.481139	1.341929	0.13921	1.50424	1.345642	0.158598	85.17342
1.486295	1.346118	0.140177	1.50424	1.345642	0.158597	85.17447
1.489839	1.351274	0.138565	1.50424	1.345643	0.158597	85.17553
1.498218	1.354496	0.143721	1.50424	1.345643	0.158597	85.17658
1.502407	1.360297	0.14211	1.50424	1.345643	0.158597	85.17763
1.505629	1.364808	0.140821	1.50424	1.345643	0.158597	85.17868
1.50853	1.368353	0.140177	1.504241	1.345643	0.158597	85.17974
1.50853	1.370286	0.138243	1.504241	1.345644	0.158597	85.18079
1.507563	1.370286	0.137276	1.504241	1.345644	0.158597	85.18184
1.506596	1.367386	0.13921	1.504241	1.345644	0.158597	85.18289
1.503374	1.36513	0.138243	1.504241	1.345644	0.158597	85.18395
1.498218	1.358686	0.139532	1.504241	1.345644	0.158597	85.185
1.493062	1.354496	0.138565	1.504241	1.345645	0.158597	85.18605
1.488228	1.350307	0.137921	1.504241	1.345645	0.158597	85.18711
1.483072	1.344829	0.138243	1.504242	1.345645	0.158597	85.18816
1.479527	1.339673	0.139854	1.504242	1.345645	0.158597	85.18921
1.47695	1.33774	0.13921	1.504242	1.345645	0.158596	85.19026
1.476305	1.336773	0.139532	1.504242	1.345646	0.158596	85.19132
1.477272	1.336451	0.140821	1.504242	1.345646	0.158596	85.19237
1.480172	1.338384	0.141788	1.504242	1.345646	0.158596	85.19342
1.483072	1.341284	0.141788	1.504243	1.345646	0.158596	85.19447
1.48855	1.345151	0.143399	1.504243	1.345647	0.158596	85.19553
1.493062	1.348051	0.14501	1.504243	1.345647	0.158596	85.19658
1.49854	1.354819	0.143721	1.504243	1.345647	0.158596	85.19763
1.502407	1.359974	0.142432	1.504243	1.345647	0.158596	85.19868
1.504985	1.362552	0.142432	1.504244	1.345647	0.158596	85.19974

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.505307	1.36513	0.140177	1.504244	1.345648	0.158596	85.20289
1.502729	1.36223	0.140499	1.504244	1.345648	0.158596	85.20395
1.498218	1.358041	0.140177	1.504244	1.345648	0.158596	85.205
1.493706	1.35353	0.140177	1.504244	1.345649	0.158596	85.20605
1.487584	1.348374	0.13921	1.504244	1.345649	0.158596	85.20711
1.481461	1.343218	0.138243	1.504245	1.345649	0.158596	85.20816
1.476627	1.337095	0.139532	1.504245	1.345649	0.158596	85.20921
1.470827	1.328717	0.14211	1.504245	1.345649	0.158596	85.21026
1.467282	1.325172	0.14211	1.504245	1.345649	0.158596	85.21132
1.465993	1.322272	0.143721	1.504245	1.345649	0.158596	85.21237
1.465993	1.322272	0.143721	1.504245	1.345649	0.158596	85.21342
1.467604	1.323561	0.144044	1.504245	1.345649	0.158596	85.21447
1.470827	1.327428	0.143399	1.504245	1.345649	0.158596	85.21553
1.475016	1.330972	0.144044	1.504245	1.345649	0.158596	85.21658
1.47985	1.335806	0.144044	1.504245	1.345649	0.158596	85.21763
1.522386	1.34064	0.181746	1.504245	1.345649	0.158596	85.21868
1.525931	1.356752	0.169179	1.504246	1.345649	0.158596	85.21974
1.530442	1.361586	0.168857	1.504246	1.34565	0.158597	85.22079
1.533342	1.363519	0.169823	1.504247	1.34565	0.158597	85.22184
1.532376	1.36513	0.167245	1.504247	1.34565	0.158597	85.22289
1.53302	1.364808	0.168212	1.504247	1.34565	0.158597	85.22395
1.529798	1.362875	0.166923	1.504248	1.34565	0.158598	85.225
1.526253	1.359008	0.167245	1.504248	1.34565	0.158598	85.22605
1.522708	1.356108	0.166601	1.504249	1.34565	0.158598	85.22711
1.517875	1.351918	0.165956	1.504249	1.34565	0.158599	85.22816
1.513041	1.346118	0.166923	1.504249	1.345651	0.158599	85.22921
1.507563	1.341284	0.166279	1.50425	1.345651	0.158599	85.23026
1.504663	1.338706	0.165956	1.50425	1.345651	0.158599	85.23132

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.502407	1.334195	0.168212	1.504252	1.345651	0.1586	85.23447
1.500796	1.335484	0.165312	1.504252	1.345651	0.158601	85.23553
1.500796	1.333228	0.167568	1.504252	1.345652	0.158601	85.23658
1.502729	1.338384	0.164345	1.504253	1.345652	0.158601	85.23763
1.489195	1.341284	0.147911	1.504253	1.345652	0.158601	85.23868
1.495318	1.352563	0.142755	1.504253	1.345652	0.158601	85.23974
1.499829	1.358363	0.141466	1.504253	1.345652	0.158601	85.24079
1.502729	1.363197	0.139532	1.504253	1.345652	0.158601	85.24184
1.505307	1.365775	0.139532	1.504253	1.345652	0.158601	85.24289
1.506918	1.367386	0.139532	1.504253	1.345653	0.158601	85.24395
1.505952	1.368031	0.137921	1.504254	1.345653	0.158601	85.245
1.504663	1.366097	0.138565	1.504254	1.345653	0.158601	85.24605
1.500796	1.363841	0.136954	1.504254	1.345653	0.158601	85.24711
1.495962	1.359008	0.136954	1.504254	1.345653	0.158601	85.24816
1.491128	1.355785	0.135343	1.504254	1.345653	0.158601	85.24921
1.486939	1.350629	0.13631	1.504254	1.345654	0.1586	85.25026
1.480816	1.345796	0.135021	1.504254	1.345654	0.1586	85.25132
1.477916	1.341607	0.13631	1.504254	1.345654	0.1586	85.25237
1.480172	1.340318	0.139854	1.504254	1.345654	0.1586	85.25342
1.478561	1.338062	0.140499	1.504255	1.345654	0.1586	85.25447
1.478239	1.33774	0.140499	1.504255	1.345655	0.1586	85.25553
1.483072	1.339995	0.143077	1.504255	1.345655	0.1586	85.25658
1.485972	1.343862	0.14211	1.504255	1.345655	0.1586	85.25763
1.490162	1.348696	0.141466	1.504255	1.345655	0.1586	85.25868
1.494995	1.352563	0.142432	1.504256	1.345656	0.1586	85.25974
1.50144	1.358041	0.143399	1.504256	1.345656	0.1586	85.26079
1.505307	1.363197	0.14211	1.504256	1.345656	0.1586	85.26184
1.508207	1.366742	0.141466	1.504256	1.345656	0.1586	85.26289

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.51143	1.371575	0.139854	1.504257	1.345657	0.1586	85.26605
1.50853	1.369642	0.138888	1.504257	1.345657	0.1586	85.26711
1.504018	1.366419	0.137599	1.504257	1.345657	0.1586	85.26816
1.501118	1.360619	0.140499	1.504257	1.345658	0.1586	85.26921
1.496606	1.354819	0.141788	1.504257	1.345658	0.1586	85.27026
1.491128	1.343862	0.147266	1.504258	1.345658	0.1586	85.27132
1.485972	1.346118	0.139854	1.504258	1.345658	0.1586	85.27237
1.480816	1.340962	0.139854	1.504258	1.345658	0.1586	85.27342
1.477272	1.336128	0.141143	1.504258	1.345658	0.1586	85.27447
1.47695	1.333228	0.143721	1.504258	1.345658	0.1586	85.27553
1.477594	1.335806	0.141788	1.504258	1.345659	0.1586	85.27658
1.480494	1.336451	0.144044	1.504259	1.345659	0.1586	85.27763
1.483072	1.339673	0.143399	1.504259	1.345659	0.1586	85.27868
1.487261	1.344507	0.142755	1.504259	1.345659	0.1586	85.27974
1.491451	1.347407	0.144044	1.504259	1.345659	0.1586	85.28079
1.495318	1.351274	0.144044	1.504259	1.34566	0.1586	85.28184
1.49854	1.355785	0.142755	1.504259	1.34566	0.1586	85.28289
1.501118	1.358363	0.142755	1.504259	1.34566	0.1586	85.28395
1.502729	1.360941	0.141788	1.50426	1.34566	0.1586	85.285
1.502729	1.362552	0.140177	1.50426	1.34566	0.158599	85.28605
1.499507	1.360619	0.138888	1.50426	1.34566	0.158599	85.28711
1.496284	1.355785	0.140499	1.50426	1.34566	0.158599	85.28816
1.49274	1.351274	0.141466	1.50426	1.34566	0.158599	85.28921
1.487906	1.34644	0.141466	1.50426	1.34566	0.158599	85.29026
1.483072	1.341607	0.141466	1.50426	1.34566	0.158599	85.29132
1.477272	1.336128	0.141143	1.50426	1.34566	0.158599	85.29237
1.472438	1.33065	0.141788	1.50426	1.34566	0.158599	85.29342
1.504985	1.337417	0.167568	1.50426	1.34566	0.1586	85.29447

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.503696	1.331939	0.171757	1.504261	1.345661	0.158601	85.29763
1.505952	1.334517	0.171434	1.504262	1.345661	0.158601	85.29868
1.509174	1.338384	0.17079	1.504262	1.345661	0.158601	85.29974
1.512397	1.342573	0.169823	1.504263	1.345661	0.158602	85.30079
1.518519	1.34644	0.172079	1.504263	1.345661	0.158602	85.30184
1.520775	1.354819	0.165956	1.504264	1.345662	0.158602	85.30289
1.526575	1.357397	0.169179	1.504264	1.345662	0.158603	85.30395
1.531409	1.362552	0.168857	1.504265	1.345662	0.158603	85.305
1.533665	1.364808	0.168857	1.504265	1.345662	0.158603	85.30605
1.532376	1.36513	0.167245	1.504266	1.345662	0.158603	85.3071
1.530442	1.364808	0.165634	1.504266	1.345662	0.158604	85.30816
1.523675	1.363519	0.160156	1.504266	1.345662	0.158604	85.30921
1.521742	1.359008	0.162734	1.504267	1.345663	0.158604	85.31026
1.515619	1.352241	0.163378	1.504267	1.345663	0.158604	85.31132
1.502407	1.348374	0.154033	1.504267	1.345663	0.158605	85.31237
1.500473	1.341607	0.158867	1.504267	1.345663	0.158605	85.31342
1.495318	1.335806	0.159511	1.504268	1.345663	0.158605	85.31447
1.475338	1.330006	0.145333	1.504268	1.345663	0.158605	85.31553
1.474049	1.336128	0.137921	1.504268	1.345663	0.158605	85.31658
1.473083	1.334839	0.138243	1.504268	1.345663	0.158605	85.31763
1.474049	1.335484	0.138565	1.504268	1.345663	0.158605	85.31868
1.475661	1.337095	0.138565	1.504268	1.345663	0.158605	85.31974
1.480816	1.340962	0.139854	1.504268	1.345664	0.158605	85.32079
1.484683	1.345473	0.13921	1.504269	1.345664	0.158605	85.32184
1.490162	1.349985	0.140177	1.504269	1.345664	0.158605	85.32289
1.494351	1.354819	0.139532	1.504269	1.345664	0.158605	85.32395
1.498862	1.359652	0.13921	1.504269	1.345664	0.158605	85.325
1.506274	1.364808	0.141466	1.504269	1.345665	0.158605	85.32605

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.509819	1.370286	0.139532	1.50427	1.345665	0.158605	85.32921
1.507563	1.362875	0.144688	1.50427	1.345665	0.158605	85.33026
1.503374	1.364808	0.138565	1.50427	1.345665	0.158605	85.33132
1.499507	1.361908	0.137599	1.50427	1.345665	0.158605	85.33237
1.494351	1.357397	0.136954	1.50427	1.345666	0.158605	85.33342
1.489195	1.352885	0.13631	1.50427	1.345666	0.158604	85.33447
1.484683	1.347085	0.137599	1.50427	1.345666	0.158604	85.33553
1.481139	1.342573	0.138565	1.504271	1.345666	0.158604	85.33658
1.478239	1.339351	0.138888	1.504271	1.345666	0.158604	85.33763
1.477594	1.338062	0.139532	1.504271	1.345667	0.158604	85.33868
1.477916	1.338062	0.139854	1.504271	1.345667	0.158604	85.33974
1.480494	1.339995	0.140499	1.504271	1.345667	0.158604	85.34079
1.484683	1.341929	0.142755	1.504272	1.345667	0.158604	85.34184
1.491451	1.345473	0.145977	1.504272	1.345668	0.158604	85.34289
1.49274	1.339673	0.153067	1.504272	1.345668	0.158604	85.34395
1.497573	1.354819	0.142755	1.504272	1.345668	0.158604	85.345
1.502729	1.360619	0.14211	1.504272	1.345668	0.158604	85.34605
1.505307	1.363841	0.141466	1.504272	1.345668	0.158604	85.3471
1.508207	1.366097	0.14211	1.504273	1.345668	0.158604	85.34816
1.507885	1.366419	0.141466	1.504273	1.345669	0.158604	85.34921
1.507563	1.365775	0.141788	1.504273	1.345669	0.158604	85.35026
1.504985	1.366419	0.138565	1.504273	1.345669	0.158604	85.35132
1.500796	1.363519	0.137276	1.504273	1.345669	0.158604	85.35237
1.497251	1.358363	0.138888	1.504273	1.345669	0.158604	85.35342
1.493384	1.353207	0.140177	1.504273	1.345669	0.158604	85.35447
1.485328	1.348051	0.137276	1.504273	1.345669	0.158604	85.35553
1.480172	1.34064	0.139532	1.504273	1.345669	0.158604	85.35658
1.475983	1.334195	0.141788	1.504274	1.34567	0.158604	85.35763

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.470182	1.329361	0.140821	1.504274	1.34567	0.158604	85.36079
1.471794	1.329683	0.14211	1.504274	1.34567	0.158604	85.36184
1.473727	1.328717	0.14501	1.504274	1.34567	0.158604	85.36289
1.477916	1.332584	0.145333	1.504274	1.34567	0.158604	85.36395
1.48275	1.337095	0.145655	1.504274	1.34567	0.158604	85.365
1.487261	1.341607	0.145655	1.504274	1.34567	0.158604	85.36605
1.491128	1.345473	0.145655	1.504274	1.34567	0.158604	85.3671
1.493706	1.34934	0.144366	1.504274	1.34567	0.158604	85.36816
1.496284	1.352241	0.144044	1.504274	1.34567	0.158604	85.36921
1.496929	1.352885	0.144044	1.504274	1.34567	0.158604	85.37026
1.49564	1.352885	0.142755	1.504274	1.34567	0.158604	85.37132
1.492417	1.351596	0.140821	1.504274	1.34567	0.158604	85.37237
1.528509	1.349018	0.179491	1.504275	1.34567	0.158605	85.37342
1.523997	1.35643	0.167568	1.504275	1.34567	0.158605	85.37447
1.519808	1.350952	0.168857	1.504275	1.34567	0.158605	85.37553
1.513363	1.34644	0.166923	1.504276	1.34567	0.158605	85.37658
1.506918	1.341607	0.165312	1.504276	1.34567	0.158606	85.37763
1.50434	1.33774	0.166601	1.504277	1.345671	0.158606	85.37868
1.501762	1.334517	0.167245	1.504277	1.345671	0.158606	85.37974
1.501118	1.333228	0.16789	1.504278	1.345671	0.158607	85.38079
1.50144	1.332906	0.168534	1.504278	1.345671	0.158607	85.38184
1.503374	1.33355	0.169823	1.504278	1.345671	0.158607	85.38289
1.509496	1.338706	0.17079	1.504279	1.345671	0.158608	85.38395
1.513685	1.34064	0.173046	1.504279	1.345671	0.158608	85.385
1.510141	1.344829	0.165312	1.50428	1.345672	0.158608	85.38605
1.515297	1.350952	0.164345	1.50428	1.345672	0.158608	85.3871
1.516263	1.352885	0.163378	1.50428	1.345672	0.158609	85.38816
1.519164	1.356752	0.162412	1.504281	1.345672	0.158609	85.38921

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.503696	1.36513	0.138565	1.504281	1.345672	0.158609	85.39237
1.503051	1.363519	0.139532	1.504281	1.345672	0.158609	85.39342
1.499184	1.360941	0.138243	1.504281	1.345672	0.158609	85.39447
1.494029	1.357397	0.136632	1.504281	1.345673	0.158609	85.39553
1.492417	1.354496	0.137921	1.504281	1.345673	0.158609	85.39658
1.487261	1.350952	0.13631	1.504282	1.345673	0.158609	85.39763
1.48275	1.345151	0.137599	1.504282	1.345673	0.158609	85.39868
1.478883	1.341607	0.137276	1.504282	1.345673	0.158609	85.39974
1.475661	1.338706	0.136954	1.504282	1.345673	0.158609	85.40079
1.475016	1.336128	0.138888	1.504282	1.345673	0.158609	85.40184
1.475661	1.336128	0.139532	1.504282	1.345674	0.158609	85.40289
1.477916	1.338384	0.139532	1.504282	1.345674	0.158608	85.40395
1.482105	1.341284	0.140821	1.504282	1.345674	0.158608	85.405
1.48855	1.347085	0.141466	1.504283	1.345674	0.158608	85.40605
1.494673	1.343862	0.150811	1.504283	1.345674	0.158608	85.4071
1.499184	1.356108	0.143077	1.504283	1.345675	0.158608	85.40816
1.502729	1.361263	0.141466	1.504283	1.345675	0.158608	85.40921
1.505307	1.35933	0.145977	1.504283	1.345675	0.158608	85.41026
1.508207	1.368997	0.13921	1.504283	1.345675	0.158608	85.41132
1.509496	1.369964	0.139532	1.504284	1.345675	0.158608	85.41237
1.507885	1.36932	0.138565	1.504284	1.345675	0.158608	85.41342
1.506596	1.368675	0.137921	1.504284	1.345676	0.158608	85.41447
1.504018	1.36513	0.138888	1.504284	1.345676	0.158608	85.41553
1.499507	1.361586	0.137921	1.504284	1.345676	0.158608	85.41658
1.494995	1.353207	0.141788	1.504284	1.345676	0.158608	85.41763
1.490162	1.348374	0.141788	1.504284	1.345676	0.158608	85.41868
1.483394	1.344184	0.13921	1.504285	1.345676	0.158608	85.41974
1.481461	1.332906	0.148555	1.504285	1.345676	0.158608	85.42079

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.479527	1.335162	0.144366	1.504285	1.345677	0.158608	85.42395
1.479205	1.336451	0.142755	1.504285	1.345677	0.158608	85.425
1.482428	1.338706	0.143721	1.504286	1.345677	0.158608	85.42605
1.487261	1.341284	0.145977	1.504286	1.345677	0.158608	85.4271
1.491451	1.345473	0.145977	1.504286	1.345678	0.158608	85.42816
1.496606	1.353207	0.143399	1.504286	1.345678	0.158608	85.42921
1.500796	1.357074	0.143721	1.504286	1.345678	0.158608	85.43026
1.504018	1.361586	0.142432	1.504286	1.345678	0.158608	85.43132
1.505629	1.363841	0.141788	1.504287	1.345678	0.158608	85.43237
1.506274	1.364808	0.141466	1.504287	1.345678	0.158608	85.43342
1.504985	1.363519	0.141466	1.504287	1.345679	0.158608	85.43447
1.503374	1.361586	0.141788	1.504287	1.345679	0.158608	85.43553
1.49854	1.357719	0.140821	1.504287	1.345679	0.158608	85.43658
1.494029	1.353207	0.140821	1.504287	1.345679	0.158608	85.43763
1.488228	1.348374	0.139854	1.504287	1.345679	0.158608	85.43868
1.482428	1.344184	0.138243	1.504287	1.345679	0.158608	85.43974
1.47695	1.338062	0.138888	1.504287	1.345679	0.158608	85.44079
1.47276	1.333228	0.139532	1.504287	1.345679	0.158608	85.44184
1.469216	1.330006	0.13921	1.504287	1.345679	0.158608	85.44289
1.469216	1.328072	0.141143	1.504287	1.345679	0.158608	85.44395
1.470182	1.327428	0.142755	1.504287	1.345679	0.158608	85.445
1.471794	1.328072	0.143721	1.504288	1.345679	0.158608	85.44605
1.475016	1.330972	0.144044	1.504288	1.345679	0.158608	85.4471
1.480172	1.335806	0.144366	1.504288	1.345679	0.158608	85.44816
1.485328	1.339995	0.145333	1.504288	1.34568	0.158608	85.44921
1.490162	1.345473	0.144688	1.504288	1.34568	0.158608	85.45026
1.494351	1.351918	0.142432	1.504288	1.34568	0.158608	85.45132
1.49854	1.355463	0.143077	1.504288	1.34568	0.158608	85.45237

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.502729	1.359974	0.142755	1.504288	1.34568	0.158608	85.45553
1.500473	1.359652	0.140821	1.504288	1.34568	0.158608	85.45658
1.497251	1.357397	0.139854	1.504288	1.34568	0.158608	85.45763
1.493706	1.353207	0.140499	1.504288	1.34568	0.158608	85.45868
1.489517	1.349663	0.139854	1.504289	1.34568	0.158608	85.45974
1.484039	1.344507	0.139532	1.504289	1.34568	0.158608	85.46079
1.478561	1.339995	0.138565	1.504289	1.34568	0.158608	85.46184
1.475338	1.335806	0.139532	1.504289	1.345681	0.158608	85.46289
1.473727	1.333228	0.140499	1.504289	1.345681	0.158608	85.46395
1.472116	1.331939	0.140177	1.504289	1.345681	0.158608	85.465
1.471794	1.332584	0.13921	1.504289	1.345681	0.158608	85.46605
1.475338	1.33355	0.141788	1.504289	1.345681	0.158608	85.4671
1.47985	1.337417	0.142432	1.504289	1.345681	0.158608	85.46816
1.485328	1.341929	0.143399	1.50429	1.345681	0.158608	85.46921
1.490162	1.345796	0.144366	1.50429	1.345681	0.158608	85.47026
1.494673	1.351274	0.143399	1.50429	1.345682	0.158608	85.47132
1.499829	1.356108	0.143721	1.50429	1.345682	0.158608	85.47237
1.502085	1.360941	0.141143	1.50429	1.345682	0.158608	85.47342
1.503696	1.364164	0.139532	1.50429	1.345682	0.158608	85.47447
1.508207	1.369642	0.138565	1.50429	1.345682	0.158608	85.47553
1.508207	1.369642	0.138565	1.50429	1.345682	0.158607	85.47658
1.50434	1.368675	0.135665	1.50429	1.345683	0.158607	85.47763
1.501762	1.35933	0.142432	1.50429	1.345683	0.158607	85.47868
1.497573	1.359652	0.137921	1.50429	1.345683	0.158607	85.47974
1.494995	1.35643	0.138565	1.50429	1.345683	0.158607	85.48079
1.490484	1.352563	0.137921	1.50429	1.345683	0.158607	85.48184
1.485328	1.34644	0.138888	1.50429	1.345683	0.158607	85.48289
1.480494	1.343218	0.137276	1.50429	1.345683	0.158607	85.48395

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.477272	1.33774	0.139532	1.50429	1.345684	0.158606	85.4871
1.479205	1.339351	0.139854	1.50429	1.345684	0.158606	85.48816
1.48275	1.337095	0.145655	1.504291	1.345684	0.158606	85.48921
1.488228	1.347407	0.140821	1.504291	1.345685	0.158606	85.49026
1.491773	1.350952	0.140821	1.504291	1.345685	0.158606	85.49132
1.49854	1.357074	0.141466	1.504291	1.345685	0.158606	85.49237
1.502085	1.361263	0.140821	1.504291	1.345685	0.158606	85.49342
1.505307	1.364808	0.140499	1.504291	1.345685	0.158605	85.49447
1.508852	1.367708	0.141143	1.504291	1.345686	0.158605	85.49553
1.50853	1.368997	0.139532	1.504291	1.345686	0.158605	85.49658
1.50853	1.36932	0.13921	1.504291	1.345686	0.158605	85.49763
1.506918	1.368675	0.138243	1.504291	1.345686	0.158605	85.49868
1.503696	1.364486	0.13921	1.504291	1.345686	0.158605	85.49974
1.498862	1.359652	0.13921	1.504291	1.345687	0.158605	85.50079
1.494995	1.355141	0.139854	1.504291	1.345687	0.158605	85.50184
1.489517	1.349663	0.139854	1.504292	1.345687	0.158605	85.50289
1.483394	1.341929	0.141466	1.504292	1.345687	0.158605	85.50395
1.477916	1.339029	0.138888	1.504292	1.345687	0.158605	85.505
1.476305	1.330328	0.145977	1.504292	1.345687	0.158605	85.50605
1.475661	1.332584	0.143077	1.504292	1.345687	0.158605	85.5071
1.475338	1.33355	0.141788	1.504292	1.345687	0.158605	85.50816
1.477272	1.334839	0.142432	1.504292	1.345687	0.158605	85.50921
1.481139	1.337095	0.144044	1.504292	1.345687	0.158605	85.51026
1.484039	1.341284	0.142755	1.504292	1.345688	0.158605	85.51132
1.489517	1.345151	0.144366	1.504293	1.345688	0.158605	85.51237
1.493384	1.349018	0.144366	1.504293	1.345688	0.158605	85.51342
1.497251	1.353852	0.143399	1.504293	1.345688	0.158605	85.51447
1.500151	1.357074	0.143077	1.504293	1.345688	0.158605	85.51553

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.503051	1.361263	0.141788	1.504293	1.345688	0.158605	85.51868
1.500473	1.360297	0.140177	1.504293	1.345688	0.158605	85.51974
1.497251	1.357719	0.139532	1.504293	1.345688	0.158605	85.52079
1.493384	1.35353	0.139854	1.504293	1.345688	0.158605	85.52184
1.488228	1.349018	0.13921	1.504293	1.345688	0.158605	85.52289
1.484039	1.343862	0.140177	1.504293	1.345688	0.158605	85.52395
1.478561	1.339029	0.139532	1.504293	1.345688	0.158605	85.525
1.474372	1.333873	0.140499	1.504293	1.345688	0.158605	85.52605
1.471794	1.331295	0.140499	1.504293	1.345688	0.158605	85.5271
1.470827	1.329683	0.141143	1.504293	1.345688	0.158605	85.52816
1.471149	1.329361	0.141788	1.504293	1.345688	0.158605	85.52921
1.474372	1.331295	0.143077	1.504293	1.345688	0.158605	85.53026
1.477594	1.333873	0.143721	1.504293	1.345688	0.158605	85.53132
1.482428	1.338706	0.143721	1.504293	1.345689	0.158605	85.53237
1.487261	1.342895	0.144366	1.504293	1.345689	0.158605	85.53342
1.493062	1.348051	0.14501	1.504293	1.345689	0.158604	85.53447
1.497251	1.353207	0.144044	1.504293	1.345689	0.158604	85.53553
1.499829	1.357397	0.142432	1.504293	1.345689	0.158604	85.53658
1.503696	1.359974	0.143721	1.504293	1.345689	0.158604	85.53763
1.50434	1.363841	0.140499	1.504293	1.345689	0.158604	85.53868
1.504018	1.363841	0.140177	1.504293	1.345689	0.158604	85.53974
1.502085	1.362875	0.13921	1.504293	1.345689	0.158604	85.54079
1.49854	1.359974	0.138565	1.504293	1.345689	0.158604	85.54184
1.495318	1.356108	0.13921	1.504293	1.345689	0.158604	85.54289
1.491128	1.351596	0.139532	1.504293	1.345689	0.158604	85.54395
1.485328	1.346762	0.138565	1.504293	1.345689	0.158604	85.545
1.480172	1.341607	0.138565	1.504293	1.345689	0.158604	85.54605
1.476627	1.33774	0.138888	1.504293	1.34569	0.158604	85.5471

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.473727	1.332584	0.141143	1.504293	1.34569	0.158604	85.55026
1.475661	1.335162	0.140499	1.504294	1.34569	0.158604	85.55132
1.480172	1.338062	0.14211	1.504294	1.34569	0.158604	85.55237
1.484361	1.342251	0.14211	1.504294	1.34569	0.158603	85.55342
1.489839	1.346762	0.143077	1.504294	1.34569	0.158603	85.55447
1.494995	1.352563	0.142432	1.504294	1.345691	0.158603	85.55553
1.498862	1.356752	0.14211	1.504294	1.345691	0.158603	85.55658
1.502085	1.360619	0.141466	1.504294	1.345691	0.158603	85.55763
1.503696	1.363519	0.140177	1.504294	1.345691	0.158603	85.55868
1.50434	1.366097	0.138243	1.504294	1.345691	0.158603	85.55974
1.504018	1.365453	0.138565	1.504294	1.345691	0.158603	85.56079
1.502407	1.363519	0.138888	1.504294	1.345691	0.158603	85.56184
1.498218	1.358686	0.139532	1.504294	1.345691	0.158603	85.56289
1.494029	1.354496	0.139532	1.504294	1.345691	0.158603	85.56395
1.494673	1.357397	0.137276	1.504294	1.345691	0.158603	85.565
1.490806	1.351596	0.13921	1.504294	1.345691	0.158603	85.56605
1.485328	1.347085	0.138243	1.504294	1.345692	0.158603	85.5671
1.481461	1.341607	0.139854	1.504294	1.345692	0.158603	85.56816
1.479205	1.33774	0.141466	1.504294	1.345692	0.158603	85.56921
1.477594	1.336128	0.141466	1.504295	1.345692	0.158603	85.57026
1.475983	1.336128	0.139854	1.504295	1.345692	0.158603	85.57132
1.478239	1.336773	0.141466	1.504295	1.345692	0.158603	85.57237
1.483717	1.338706	0.14501	1.504295	1.345692	0.158603	85.57342
1.487584	1.343218	0.144366	1.504295	1.345693	0.158602	85.57447
1.490484	1.347729	0.142755	1.504295	1.345693	0.158602	85.57553
1.496606	1.352563	0.144044	1.504295	1.345693	0.158602	85.57658
1.500473	1.357074	0.143399	1.504295	1.345693	0.158602	85.57763
1.503696	1.361263	0.142432	1.504295	1.345693	0.158602	85.57868

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.505952	1.365453	0.140499	1.504296	1.345693	0.158602	85.58184
1.504663	1.363519	0.141143	1.504296	1.345693	0.158602	85.58289
1.500796	1.360619	0.140177	1.504296	1.345693	0.158602	85.58395
1.496284	1.355785	0.140499	1.504296	1.345693	0.158602	85.585
1.490162	1.351918	0.138243	1.504296	1.345693	0.158602	85.58605
1.486295	1.345473	0.140821	1.504296	1.345693	0.158602	85.5871
1.480816	1.340318	0.140499	1.504296	1.345693	0.158602	85.58816
1.47695	1.335162	0.141788	1.504296	1.345693	0.158602	85.58921
1.474372	1.332584	0.141788	1.504296	1.345693	0.158602	85.59026
1.472116	1.330006	0.14211	1.504296	1.345694	0.158602	85.59132
1.472116	1.330972	0.141143	1.504296	1.345694	0.158602	85.59237
1.474049	1.33065	0.143399	1.504296	1.345694	0.158602	85.59342
1.477594	1.334195	0.143399	1.504296	1.345694	0.158602	85.59447
1.480816	1.337417	0.143399	1.504296	1.345694	0.158602	85.59553
1.485972	1.341284	0.144688	1.504296	1.345694	0.158602	85.59658
1.490806	1.347729	0.143077	1.504296	1.345694	0.158602	85.59763
1.494029	1.352885	0.141143	1.504296	1.345694	0.158602	85.59868
1.498862	1.356108	0.142755	1.504296	1.345694	0.158602	85.59974
1.501762	1.358686	0.143077	1.504296	1.345694	0.158602	85.60079
1.501762	1.359974	0.141788	1.504296	1.345694	0.158602	85.60184
1.502729	1.359974	0.142755	1.504296	1.345694	0.158602	85.60289
1.500473	1.35933	0.141143	1.504296	1.345694	0.158602	85.60395
1.496929	1.356752	0.140177	1.504296	1.345694	0.158601	85.605
1.493062	1.353207	0.139854	1.504296	1.345694	0.158601	85.60605
1.489839	1.348696	0.141143	1.504296	1.345694	0.158601	85.6071
1.484039	1.344829	0.13921	1.504296	1.345695	0.158601	85.60816
1.478883	1.339673	0.13921	1.504296	1.345695	0.158601	85.60921
1.475661	1.335806	0.139854	1.504296	1.345695	0.158601	85.61026

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.471794	1.331617	0.140177	1.504296	1.345695	0.158601	85.61342
1.474372	1.33355	0.140821	1.504296	1.345695	0.1586	85.61447
1.478561	1.336451	0.14211	1.504296	1.345695	0.1586	85.61553
1.48275	1.341607	0.141143	1.504296	1.345695	0.1586	85.61658
1.487261	1.34644	0.140821	1.504296	1.345696	0.1586	85.61763
1.493384	1.349985	0.143399	1.504296	1.345696	0.1586	85.61868
1.498218	1.355785	0.142432	1.504296	1.345696	0.1586	85.61974
1.502085	1.358686	0.143399	1.504296	1.345696	0.1586	85.62079
1.504018	1.363197	0.140821	1.504296	1.345696	0.1586	85.62184
1.505307	1.363841	0.141466	1.504296	1.345696	0.1586	85.62289
1.504985	1.364164	0.140821	1.504296	1.345696	0.158599	85.62395
1.502407	1.362875	0.139532	1.504296	1.345696	0.158599	85.625
1.499829	1.361263	0.138565	1.504296	1.345696	0.158599	85.62605
1.494029	1.356108	0.137921	1.504296	1.345696	0.158599	85.6271
1.490162	1.353207	0.136954	1.504296	1.345697	0.158599	85.62816
1.484683	1.347729	0.136954	1.504296	1.345697	0.158599	85.62921
1.47985	1.340962	0.138888	1.504295	1.345697	0.158599	85.63026
1.475661	1.334839	0.140821	1.504295	1.345697	0.158599	85.63132
1.478883	1.338706	0.140177	1.504295	1.345697	0.158599	85.63237
1.477916	1.337417	0.140499	1.504296	1.345697	0.158598	85.63342
1.478883	1.337095	0.141788	1.504296	1.345697	0.158598	85.63447
1.480494	1.339029	0.141466	1.504296	1.345698	0.158598	85.63553
1.484039	1.341284	0.142755	1.504296	1.345698	0.158598	85.63658
1.488873	1.346118	0.142755	1.504296	1.345698	0.158598	85.63763
1.493384	1.350952	0.142432	1.504296	1.345698	0.158598	85.63868
1.498862	1.355463	0.143399	1.504296	1.345698	0.158598	85.63974
1.503051	1.359974	0.143077	1.504296	1.345699	0.158598	85.64079
1.506596	1.364808	0.141788	1.504296	1.345699	0.158597	85.64184

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.509174	1.367708	0.141466	1.504296	1.345699	0.158597	85.645
1.507241	1.367064	0.140177	1.504296	1.345699	0.158597	85.64605
1.503696	1.364808	0.138888	1.504296	1.3457	0.158597	85.6471
1.499184	1.360297	0.138888	1.504296	1.3457	0.158597	85.64816
1.494029	1.356108	0.137921	1.504296	1.3457	0.158597	85.64921
1.489195	1.351918	0.137276	1.504296	1.3457	0.158596	85.65026
1.485328	1.346118	0.13921	1.504297	1.3457	0.158596	85.65132
1.481783	1.342251	0.139532	1.504297	1.3457	0.158596	85.65237
1.478239	1.338062	0.140177	1.504297	1.3457	0.158596	85.65342
1.477594	1.336128	0.141466	1.504297	1.345701	0.158596	85.65447
1.477272	1.335806	0.141466	1.504297	1.345701	0.158596	85.65553
1.478883	1.336451	0.142432	1.504297	1.345701	0.158596	85.65658
1.482105	1.339995	0.14211	1.504297	1.345701	0.158596	85.65763
1.486617	1.343862	0.142755	1.504297	1.345701	0.158596	85.65868
1.491128	1.348051	0.143077	1.504297	1.345701	0.158596	85.65974
1.496284	1.353852	0.142432	1.504297	1.345702	0.158595	85.66079
1.500796	1.358686	0.14211	1.504297	1.345702	0.158595	85.66184
1.502729	1.363197	0.139532	1.504297	1.345702	0.158595	85.66289
1.504985	1.364808	0.140177	1.504297	1.345702	0.158595	85.66395
1.506274	1.366742	0.139532	1.504297	1.345702	0.158595	85.665
1.505629	1.366097	0.139532	1.504297	1.345702	0.158595	85.66605
1.503374	1.364808	0.138565	1.504297	1.345702	0.158595	85.6671
1.499829	1.36223	0.137599	1.504297	1.345703	0.158595	85.66816
1.495962	1.358686	0.137276	1.504297	1.345703	0.158594	85.66921
1.491773	1.353852	0.137921	1.504297	1.345703	0.158594	85.67026
1.487261	1.349018	0.138243	1.504297	1.345703	0.158594	85.67132
1.481783	1.342895	0.138888	1.504297	1.345703	0.158594	85.67237
1.478561	1.339351	0.13921	1.504297	1.345703	0.158594	85.67342

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.475338	1.334195	0.141143	1.504297	1.345703	0.158594	85.67658
1.477272	1.335162	0.14211	1.504297	1.345704	0.158594	85.67763
1.481139	1.338062	0.143077	1.504297	1.345704	0.158594	85.67868
1.48565	1.342573	0.143077	1.504297	1.345704	0.158593	85.67974
1.491451	1.346762	0.144688	1.504297	1.345704	0.158593	85.68079
1.495962	1.352563	0.143399	1.504297	1.345704	0.158593	85.68184
1.500151	1.358041	0.14211	1.504298	1.345704	0.158593	85.68289
1.50434	1.361908	0.142432	1.504298	1.345704	0.158593	85.68395
1.506596	1.363519	0.143077	1.504298	1.345705	0.158593	85.685
1.506596	1.365775	0.140821	1.504297	1.345705	0.158593	85.68605
1.505952	1.366742	0.13921	1.504297	1.345705	0.158592	85.6871
1.504018	1.365453	0.138565	1.504297	1.345705	0.158592	85.68816
1.500151	1.362875	0.137276	1.504297	1.345705	0.158592	85.68921
1.497251	1.35933	0.137921	1.504297	1.345706	0.158592	85.69026
1.49274	1.355463	0.137276	1.504297	1.345706	0.158592	85.69132
1.48855	1.350629	0.137921	1.504297	1.345706	0.158592	85.69237
1.483072	1.345796	0.137276	1.504297	1.345706	0.158591	85.69342
1.480172	1.34064	0.139532	1.504297	1.345706	0.158591	85.69447
1.47695	1.338384	0.138565	1.504297	1.345706	0.158591	85.69553
1.476627	1.336451	0.140177	1.504297	1.345706	0.158591	85.69658
1.477594	1.337095	0.140499	1.504297	1.345707	0.158591	85.69763
1.479205	1.338384	0.140821	1.504297	1.345707	0.15859	85.69868
1.483717	1.341929	0.141788	1.504297	1.345707	0.15859	85.69974
1.487906	1.346762	0.141143	1.504297	1.345707	0.15859	85.70079
1.492417	1.351596	0.140821	1.504297	1.345708	0.15859	85.70184
1.498218	1.35643	0.141788	1.504297	1.345708	0.15859	85.70289
1.502085	1.361586	0.140499	1.504297	1.345708	0.15859	85.70395
1.506274	1.365453	0.140821	1.504297	1.345708	0.158589	85.705

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.50853	1.369964	0.138565	1.504297	1.345709	0.158589	85.70816
1.506596	1.368675	0.137921	1.504297	1.345709	0.158588	85.70921
1.499184	1.365453	0.133732	1.504297	1.345709	0.158588	85.71026
1.493062	1.354496	0.138565	1.504297	1.345709	0.158588	85.71132
1.495318	1.355141	0.140177	1.504297	1.345709	0.158588	85.71237
1.490806	1.349985	0.140821	1.504297	1.34571	0.158588	85.71342
1.486295	1.344507	0.141788	1.504297	1.34571	0.158588	85.71447
1.482105	1.340318	0.141788	1.504297	1.34571	0.158588	85.71553
1.479527	1.337095	0.142432	1.504297	1.34571	0.158588	85.71658
1.479205	1.335162	0.144044	1.504297	1.34571	0.158588	85.71763
1.478883	1.335162	0.143721	1.504298	1.34571	0.158588	85.71868
1.480494	1.337417	0.143077	1.504298	1.34571	0.158588	85.71974
1.485006	1.340318	0.144688	1.504298	1.34571	0.158588	85.72079
1.490162	1.34354	0.146622	1.504298	1.34571	0.158588	85.72184
1.493706	1.347729	0.145977	1.504298	1.34571	0.158588	85.72289
1.499829	1.35353	0.146299	1.504298	1.345711	0.158587	85.72395
1.502085	1.356108	0.145977	1.504298	1.345711	0.158587	85.725
1.505307	1.364164	0.141143	1.504298	1.345711	0.158587	85.72605
1.507241	1.366097	0.141143	1.504298	1.345711	0.158587	85.7271
1.508852	1.366742	0.14211	1.504298	1.345711	0.158587	85.72816
1.506596	1.367064	0.139532	1.504298	1.345711	0.158587	85.72921
1.506596	1.364486	0.14211	1.504298	1.345711	0.158587	85.73026
1.501762	1.360619	0.141143	1.504298	1.345711	0.158587	85.73132
1.498218	1.357074	0.141143	1.504298	1.345711	0.158587	85.73237
1.491773	1.35353	0.138243	1.504298	1.345711	0.158587	85.73342
1.487261	1.347085	0.140177	1.504298	1.345711	0.158587	85.73447
1.48275	1.344184	0.138565	1.504299	1.345711	0.158587	85.73553
1.479205	1.335484	0.143721	1.504299	1.345712	0.158587	85.73658

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.474372	1.333873	0.140499	1.504299	1.345712	0.158587	85.73974
1.475661	1.33355	0.14211	1.504299	1.345712	0.158587	85.74079
1.480172	1.336451	0.143721	1.504299	1.345712	0.158587	85.74184
1.484361	1.340962	0.143399	1.504299	1.345712	0.158587	85.74289
1.489195	1.344507	0.144688	1.504299	1.345712	0.158587	85.74395
1.493062	1.348696	0.144366	1.504299	1.345712	0.158587	85.745
1.496284	1.353207	0.143077	1.504299	1.345712	0.158587	85.74605
1.499829	1.35643	0.143399	1.504299	1.345712	0.158587	85.7471
1.502407	1.359652	0.142755	1.504299	1.345712	0.158586	85.74816
1.502085	1.360619	0.141466	1.504299	1.345713	0.158586	85.74921
1.502407	1.361586	0.140821	1.504299	1.345713	0.158586	85.75026
1.500151	1.359652	0.140499	1.504299	1.345713	0.158586	85.75132
1.495962	1.357074	0.138888	1.504299	1.345713	0.158586	85.75237
1.492417	1.352885	0.139532	1.504299	1.345713	0.158586	85.75342
1.489195	1.349018	0.140177	1.504299	1.345713	0.158585	85.75447
1.48275	1.344507	0.138243	1.504298	1.345713	0.158585	85.75553
1.477916	1.338706	0.13921	1.504298	1.345713	0.158585	85.75658
1.473405	1.33355	0.139854	1.504298	1.345713	0.158585	85.75763
1.471149	1.330972	0.140177	1.504298	1.345713	0.158585	85.75868
1.470182	1.329683	0.140499	1.504298	1.345713	0.158585	85.75974
1.470505	1.330006	0.140499	1.504298	1.345713	0.158585	85.76079
1.473727	1.331939	0.141788	1.504298	1.345714	0.158584	85.76184
1.477594	1.335162	0.142432	1.504298	1.345714	0.158584	85.76289
1.481461	1.339351	0.14211	1.504298	1.345714	0.158584	85.76395
1.487906	1.344184	0.143721	1.504298	1.345714	0.158584	85.765
1.492095	1.350307	0.141788	1.504298	1.345714	0.158584	85.76605
1.497251	1.354819	0.142432	1.504298	1.345714	0.158584	85.7671
1.500151	1.358041	0.14211	1.504298	1.345715	0.158584	85.76816

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างข้อมูลดิบจากกระบวนการกรองสัญญาณ (ต่อ)

Ref	Sens	Delta	Sma_ref	Sma_sens	Sma_delta	Time
1.50434	1.364486	0.139854	1.504298	1.345715	0.158583	85.77132
1.502729	1.361908	0.140821	1.504298	1.345715	0.158583	85.77237
1.498862	1.359008	0.139854	1.504298	1.345715	0.158583	85.77342
1.494995	1.355141	0.139854	1.504298	1.345715	0.158582	85.77447
1.490162	1.351274	0.138888	1.504298	1.345715	0.158582	85.77553
1.485328	1.347085	0.138243	1.504298	1.345715	0.158582	85.77658
1.481139	1.340962	0.140177	1.504297	1.345716	0.158582	85.77763
1.476305	1.338062	0.138243	1.504297	1.345716	0.158582	85.77868
1.476316	1.334195	0.139854	1.504297	1.345716	0.158582	85.77974

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกราฟเปรียบเทียบตัวแปร (Calibration graph) จากการรวบรวมข้อมูลที่ผ่านมาผ่านกระบวนการกรองสัญญาณเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงได้มีการรวบรวมค่าความแตกต่างทางกำลังไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ตอนที่มีการบันทึกข้อมูล โดยในขั้นตอนการสร้างกราฟเปรียบเทียบตัวแปร ได้มีการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมที่ต่างจากขั้นตอนก่อนหน้านี้เล็กน้อย โดยใช้ Jupyter lab ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและสามารถเปลี่ยนแปลงคำสั่งต่าง ๆ ได้อิสระมากยิ่งขึ้น เริ่มขึ้นจากการเรียกใช้โมดูลพื้นฐานที่จำเป็นและการนำเข้าข้อมูลทั้งหมดสามารถแสดงได้ในรูปที่ ก.14

```
[4]: # Import modules
import glob
import pandas as pd
import numpy as np
from scipy import stats
import matplotlib.pyplot as plt
name = ['15_1', '15_2', '15_3', '15_4', '10_1', '10_2', '25_1', '25_2', '20_1', '20_2']

[2]: #Get path and files
path = r'C:\Users\Precha\OneDrive - Silpakorn University\Spec_Test\Final\3_Analyzed\*.csv'
data = glob.glob(path)
filtered = []
for n in data:
    file = pd.read_csv(n)
    filtered.append(file)
```

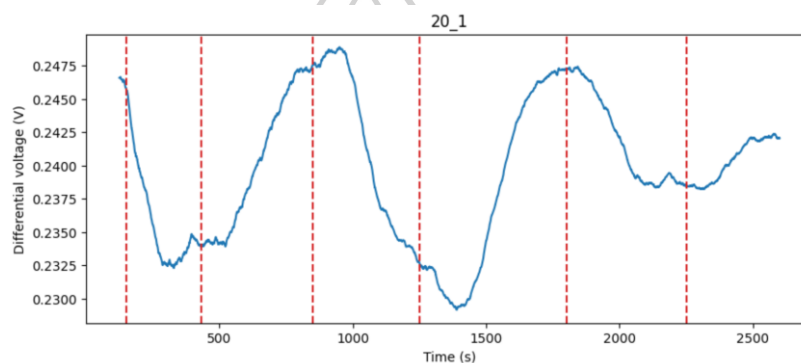
รูปที่ ก.14 คำสั่งการนำเข้าข้อมูลและสร้างตัวแปร

เมื่อนำเข้าข้อมูลทั้งหมดแล้ว ต่อมาจึงได้มีการสร้างกราฟข้อมูลเพื่อหาตำแหน่งที่มีค่าความแตกต่างทางไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด ต่อมาจึงบันทึกตำแหน่งทั้งหมดเพื่อนำไปให้ค่าเฉลี่ย ณ ตำแหน่งดังกล่าว ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ ก.15 และ ก.16

```
[8]: #Gas feeding and air mixing periods
no = 8
list = [150, 430, 850, 1250, 1800, 2250]
f2,a2 = plt.subplots(figsize = (10, 4))
a2.plot(filtered[no]['time'], filtered[no]['sma_delta'].abs())
a2.set_title(name[no])
a2.set_xlabel('Time (s)')
a2.set_ylabel('Differential voltage (V)')
putline(a2, list, 'v', 'tab:red')
```

รูปที่ ก.15 คำสั่งการบอกตำแหน่งข้อมูลด้วยกราฟเส้นประ

ดังแสดงในรูปที่ ก.15 เมื่อได้ตำแหน่งต่าง ๆ มาแล้วจึงบันทึกลงไปในตัวแปร list ซึ่งต่อมาข้อมูลดังกล่าวที่ถูกบันทึกไว้จะแสดงบนกราฟที่สร้างขึ้นมาเพื่อแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งต่าง ๆ บนข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างทางกำลังไฟฟ้าสามารถแสดงได้ในรูปที่ ก.16



รูปที่ ก.16 ผลลัพธ์กราฟข้อมูลพร้อมการบอกตำแหน่ง

ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ ก.16 ตำแหน่งต่าง ๆ ที่แสดงด้วยเส้นประสีแดง คือตำแหน่งของข้อมูลที่ถูกเลือกขึ้นมาเพื่อนำมาคำนวณหาค่ากำลังทางแสงที่เปลี่ยนแปลงมากที่สุดระหว่างการจ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการผสมออกซิเจน โดยค่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังทางแสงเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแสดงได้ในตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสำหรับการทำกราฟสอบเทียบค่า (Data for calibrating process)

ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	ค่าความแตกต่างทางกำลังไฟฟ้า (mV)
14.35	1.125
15.768	3.223
20.53	9.968
22.33	13.754
24.6	23.423
35.76	41.174
41.03	53.984

เมื่อได้ข้อมูลข้างต้นแล้วจึงสามารถนำข้อมูลดังกล่าวเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) เนื่องจากข้อมูลดังกล่าวมีแนวโน้มการกระจายตัวแบบเส้นตรง โดยในขั้นตอนนี้สามารถนำข้อมูลเข้าโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมได้ทันที โดยตัวอย่างคำสั่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ ก.17

```
#Plot rearranged data
x_sim = [14.35, 15.768, 20.53, 22.33, 24.6, 35.76, 41.03]
y_sim = [1.125, 3.223, 9.968, 13.754, 23.423, 41.174, 53.984]

#Linear regression using numpy
coef = np.polyfit(x_sim,y_sim,1)
poly1d_fn = np.poly1d(coef)

#Linear regression using scipy
res = stats.linregress(x_sim, y_sim)
r_sq = res.rvalue
slp = res.slope
itc = res.intercept
#fit_eq = (x_sim*slp) + itc

f2, a2 = plt.subplots()
a2.plot(x_sim, y_sim, 'o', x_sim, poly1d_fn(x_sim), 'r--')
a2.set_xlabel('Concentration (%)')
a2.set_ylabel('Differential voltage (mV)')
f2.savefig('CaribrationLine.tiff')
```

รูปที่ ก.17 คำสั่งกระบวนการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น

ดังแสดงในรูปที่ ก.17 ในขั้นตอนแรกได้มีการนำเข้าข้อมูลที่ผ่านการประมวลผลแล้วลงในตัวแปร x_sim และ y_sim ต่อมาได้มีการใช้โมดูล numpy ซึ่งมีชุดคำสั่งสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอยู่แล้วมาใช้ ต่อมาจึงใช้ชุดคำสั่ง np.polyfit nb และ np.poly1d ในการสร้างแบบจำลองการถดถอยขึ้นมา ในแบบจำลองได้มีการบันทึกตัวแปรต่าง ๆ ลงไป ซึ่งได้ถูกนำมาใช้ในการหาสมการเชิงเส้นและนำมาสร้างกราฟที่แสดงในวิทยานิพนธ์นี้ ในขั้นตอนสุดท้ายเมื่อประมวลผลเรียบร้อยแล้วชุดคำสั่งจะบันทึกกราฟการถดถอยลงในคอมพิวเตอร์



ภาคผนวก ข

ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ระดับนานาชาติ

2023 8th International STEM Education Conference (iSTEM-Ed) , vol.85,
pp.103807, 2024.

Investigation of effect from etching process in fiber refractometer for CO₂ measurement

Patchanon Sekhararidhi
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
and Industrial Technology
Silpakorn University (Sanam Chandra Palace Campus)
Nakhon Pathom, Thailand
sekhararidhi_p@su.ac.th

Saraj Pullteap
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
and Industrial Technology
Silpakorn University (Sanam Chandra Palace Campus)
Nakhon Pathom, Thailand
saraj@su.ac.th

Abstract— In this work, a study of power loss within the fiber optic-based refractometer (FOR) due to the chemical etching process has been proposed. The sensing element of FOR with 3 etching lengths: 0.1, 1, and 3 cm, has been de-cladded using a hydrofluoric acid (HF). The output signal during the etching has, continuously, been recorded by a 4-channel data logger. The analytical results showed that the etching length of 0.1 cm is more fragile than the others. It causes the tension of the element making fiber broken. On the other hand, the etching lengths of 1 and 3 cm have more flexible, but large noise exploited. It is due to the environment affected. Besides, the power loss of 48.86%, 87.41%, and 93.31% are exploited from all the demonstration lengths. Finally, we might conclude that the etching length the etching length had an inversely proportional to the etched time and direct proportional to the power loss.

Keywords—Etching process, carbon dioxide, fiber optic cable, refractometer, gas sensing instrument.

I. INTRODUCTION

Nowadays, carbon dioxide concentration measurement is essential in various industries for example, power generation plants, biogas plants, etc. [1]. It is necessary to monitor and control carbon dioxide concentration, which is a part of greenhouse gases that affect to the environment such as increasing average temperature, increasing risk of wildfire, increasing ocean level, etc. [2]. However, there are 2 types of carbon dioxide measuring instruments in Thai industry that are commonly employed, portable type and continuous type. The portable type increases the risk to the users because of the necessity of in situ measuring [3]. On the other hand, the continuous type is more expensive than the portable type due to its ability to continuously measure carbon dioxide concentration [3]. Meanwhile these instruments also have disadvantages such as the less precise, time-consuming data collection, and safety concerns. In the past 5 years, fiber optic sensor has received significant attention due to the awareness of the drawbacks of the portable type and the continuous type. Furthermore, the fiber optic-based refractometer (FOR) has been used in gas sensing fields, which is type of fiber optic sensor, to compensate the drawbacks. In addition, the fiber optic-based refractometer became popular in gas sensing application due to the lower cost, higher accuracy, and can be installed in remote areas [4]. Due to these advantages, Rahman *et al.* modified fiber optic cables into sensing elements by chemical etching and coating with zinc oxide. The fiber optic-based refractometer has been used as an instrument for measuring carbon dioxide concentrations ranging from 0 to 60 ppm with sensitivity was 0.008 mW/ppm [5]. Furthermore, Ramos *et al.* introduced zinc oxide nanorods decorated with gold nanoparticles on the sensing element to measure carbon

dioxide concentration. The experiment results showed that zinc oxide nanorods decorated with gold nanoparticles had 10% less recovery time compared to sensing element with only zinc oxide [6]. Subsequently, Kim *et al.* applied zeolitic imidazole framework-8 (ZIF-8) on the sensing element for detecting concentration of carbon dioxide and other small molecules (H₂, N₂, O₂, and CO). Further, it was found that mentioned compound has more sensitivity and detection ability to carbon dioxide than others [7]. In 2022, Prasanth *et al.* applied zinc oxide on sensing element and measured volatile organic compounds (VOC) with concentrations ranging between 0 – 250 ppm. The results shown that the response time and recovery time were 17 and 21 seconds, respectively [8]. In 2023, Thaisongkroh *et al.* has been investigated two types of fiber, single-mode (SMF) and multimode fiber (MMF) to applied into sensing element for biogas sensing. After the investigation, the results shown that the spot diameter from both fiber types are constantly at 4 and 26 mm. Therefore, it can be concluded that the MMF is more suitable than SMF for employment of the fiber refractometer [9].

In this work, fiber optic cables are modified as a sensing element by removing the jacket layer and chemical etching the fiber cladding into 3 lengths of 0.1, 1, and 3 cm. Physical behaviour and power loss of each etching length has been investigated during the chemical etching process. Further, MATLAB programming is utilized to analyze the collected data from the etching process to select the most suitable etching length for applied to the biogas measurement, especially, the carbon dioxide measurement.

II. RELATED THEORIES

A. Carbon dioxide and measuring methods

Carbon dioxide (CO₂) is a colorless and non-flammable gas which is released through human activities such as deforestation, burning fossil fuels, and biofuels (biogas and biomass) [10]. Meanwhile, the carbon dioxide also occurs in anaerobic digestion within the biogas plants. However, the increasing of carbon dioxide makes greenhouse gas emissions higher, caused the average temperature to rise [2]. The structure of carbon dioxide can be shown in Fig.1.

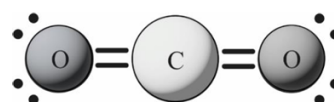


Fig.1. Basic structure of carbon dioxide

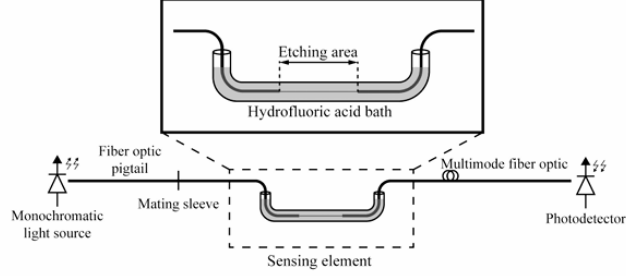


Fig.2. Schematic of fiber optic-based refractometer for carbon dioxide measurement

As shown in Fig.1 the carbon dioxide consists of one carbon atom and two oxygen atoms, with two double bonds between each atom with linear structure. There are several types of carbon dioxide measuring sensors such as electrochemical sensor, potentiometric sensor, opto-chemical sensor, non-dispersive infrared sensor, etc. [10]. The electrochemical sensor measures electrical current to determine carbon dioxide concentration in the air. When carbon dioxide fed into the sensing element, the polymer surface within the sensor would chemically be reacted due to the concentration of the gas, resulting in a voltage change. Which the advantages are the simple measurement procedure, short response time, sufficient sensitivity, selectivity, etc. [10]. However, the sensors have a narrow temperature range, due to the material physical properties of the sensor. Meanwhile potentiometric sensor determines the potential change at one electrode against another to measure the concentration [10]. Meanwhile, the potentiometric sensor shows advantages of small size, rapid response, and low cost. On the other hand, the disadvantage of the membrane potential is affected by the absorption of the solution components. The opto-chemical sensor detects color of the chemical pad in the sensor due to the chemical reaction of carbon dioxide, making the sensor has advantages such as low cost, high selectivity, and immunity to electromagnetic interference [10]. In addition, the ambient light can interfere with the operation [10]. Finally, non-dispersive infrared sensors measure absorption of light within the chamber that allow the gases to flow through the sensor, which this type of sensor has a stable long-term operation and high precise. On the contrary, it may have interference due to the environment such as humidity, freezing, and infrared light that allowed into the chamber [10].

B. Fiber optic-based refractometer (FOR)

Fiber optic-based refractometer is a type of optical fiber sensor (FOS) use to measure the change of refractive index (RI), due to the change of RI in the surrounding environment. Due to these abilities the sensor capable to measure diverse parameters in several application such as chemical analysis, gas sensing, and environment monitoring [11]. The fiber optic-based refractometer can mainly be divided into three parts, consists of: light source, sensing element, and detection system as shown its structure in Fig.2. Focusing on sensing element, the measuring procedure occurs on this part due to the changing of the environment such as the change of the gas

concentration making the RI to changed caused by the structure of sensing element, making the light propagated inside the fiber core to propagate into the environment. Therefore, the power loss (intensity attenuation) can, thus, be collects to compare the gas concentration level.

C. Evanescent wave

Generally, the light to propagate only within the fiber core, two conditions must be achieved, in order to make a phenomenon known as "total internal reflection". Firstly, the refractive index of the core must be greater than the cladding. Secondly, the angle of incident light must be greater than the critical angle, which can be calculated by (1) [12].

$$\theta_{crit} = \arcsin\left(\frac{n_{cladding}}{n_{core}}\right) \quad (1)$$

When n_{core} is refractive index of fiber core

$n_{cladding}$ is refractive index of fiber cladding

θ_{crit} is critical angle

The light propagation within the optical fiber is reflected only within the fiber core caused by the higher refractive index of the core than the cladding. Due to the reflection inside the optical fiber, electromagnetic fields are generated in the cladding layer [13-16]. This electromagnetic wave that occurred on the cladding layer is called "Evanescent wave" [17-19]. The loss of the evanescent wave that occurred along the external region has an exponential decay. Moreover, the main parameter to determine the sensitivity of sensing element is the penetration depth of evanescent wave, can be calculated using (2). Due to the current trends evanescent wave is one of the most, commonly, applied phenomena in optical field and measuring metrology [20]. There are several applications that has exploited this phenomenon to measure other parameters for example, gas sensing and glucose level measuring [21, 22].

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi(n_{core}^2 \sin^2 \theta - n_{cladding}^2)^{1/2}} \quad (2)$$

When d_p is penetration depth

λ is optical wavelength

θ is incident angle

III. EXPERIMENTAL SETUP

In this work, multi-mode fiber optic (MMF) with a length of 1 m is used as a sensing element. The jacket layer and buffer of the element has been removed by a mechanical fiber stripper to confine the corrosion area and etched by a chemical compound in different lengths, consists of 0.1, 1, and 3 cm, respectively. In addition, Thorlabs model: *LPS-1310-FC* is operated as a light source and controlled by the laser current and temperature controller, in addition, making the light stable and coherent to maintain a wavelength of 1310 nm. Consequently, Thorlabs model: *PDA10CS-ES* and National Instrument model: *NIUSB-6002* are also utilised as a photodetector and data logger to measure light intensity in volts within the wavelength range of 900-1700 nm. Furthermore, the hydrofluoric acid (HF) has been used as a chemical compound with concentration of 50% for the etching process, due to its ability to corrode glass [23, 24]. Focusing on the etching process, the small rubber tube is used as a hydrofluoric acid bath within room temperature around 25 - 28 °C, due to the shape with a slightly curve reducing the chance of core broken, experimental setup can be shown in Fig.3.

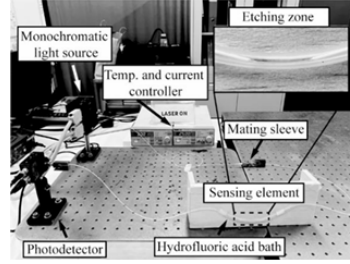


Fig.3. Configuration of fiber optic-based refractometer for carbon dioxide measurement

Before doing the etching process, the fiber optic cables were modified by removing the jacket layer and buffer can be shown in Fig.4(a). Moreover, the etching area after removing the jacket can also be shown in Fig.4(b). Consequently, the buffer is used to confine the corrosion area can be shown in Fig.4(c), due to the hydrofluoric acid cannot corrode

polymers due to the structure of the polymers. After modified the sensing element, the results can be shown in Fig.4(d). We observe that the chemical compounds can be deposit on the sensing element to detects carbon dioxide. After carbon dioxide passing through the sensing element, due to the chemical reaction between the chemical compounds and carbon dioxide making the refractive index (RI) changed. Furthermore, the experiments are divided into two main parts. The first part is to use hydrofluoric acid to etch the de-cladded area of the sensing element with two time of repeatability to study the physical behavior and power loss during the etching process, while the sensing element is taken through the Olympus model: CHS. Meanwhile, the power loss data is collected continuously until the sensing element is broken by the corrosion. Later, the data is analyzed in MATLAB programming to determine the trends of the power loss in different etching lengths and summarize into three conditions. Finally, the analyzed data can be utilized to study the power loss characteristics and physical behaviors that occur during the fiber etching process. Therefore, the studying of the power loss and physical behaviour making it possible to choose the most suitable etching length to be developed as a fiber optic-based refractometer.

IV. EXPERIMENTAL RESULT AND DISCUSSION

After analyzing the collected data during etching process, the results were separated into 3 conditions as following; initial condition, power loss condition, and destroyed condition, respectively. However, there was no change of light intensity in the initial condition. Due to the hydrofluoric acid (HF) that only corrode cladding layer, making the light cannot leak out from fiber core. In addition, we can prove that the room temperature does not affect the collected data. However, when the HF reaches the fiber core, light within the core started to leak out which had a direct proportional to the etching length considered as power loss condition. After reaching the fiber core, the sensing element would be broken which was considered as destroyed condition.

A. Comparison of the etching length and etched time

After the experiment, the results shown that the etching length had a direct proportional to power loss. Due to the increasing the etching length led to more surface contact of HF. According to the etching length at 0.1 cm, there was no

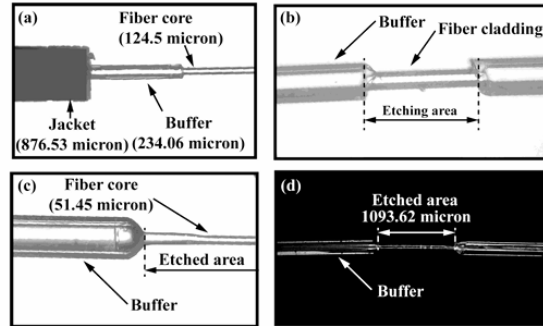


Fig.4. Preparing of sensing element: (a) removing of jacket and buffer, (b) etching area of sensing element, (c) sensing element confined by buffer, (d) etched sensing element

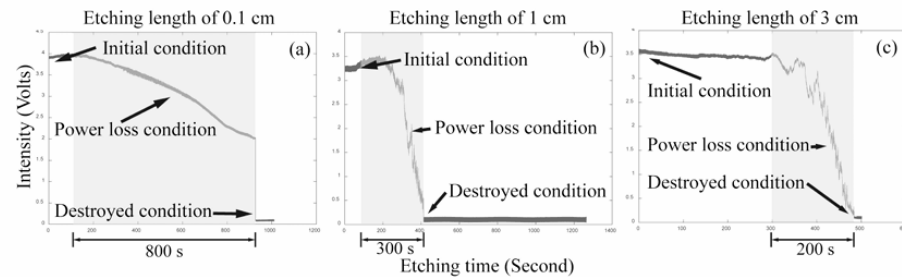


Fig.5. Comparison of power loss in different etching lengths: (a) of 0.1 cm, (b) of 1 cm, (c) of 3 cm

attenuation of light during initial condition. However, when the HF reached the fiber core the light started to attenuate during 200 to 900 seconds considered as power loss condition. After the power loss condition, there was drop of light intensity which occurred by the fiber core broken considered as destroyed condition. This phenomenon can be shown in Fig.5(a). On other hand, the results of 1 cm indicated that there was decreasing of light intensity for 300 seconds which had 2.6 times less compared to the etching length of 0.1 cm can be shown in Fig.5(b). Meanwhile in Fig.5(c), there was also decreasing of light intensity for 200 seconds which took 4 times less compared to the etching length of 0.1 cm. Moreover, there was environmental effects such as the small movement of HF molecules led to the fluctuation of the light intensity which could be shown in the power loss condition of Fig.5(b) and 5(c), respectively.

As mentioned above, it could be summarized that after compared the ratio of the etching length with the etched time, resulting in the significantly drop of the values, due to the decreasing of the etched time of the sensing element. Therefore, we concluded that the etching length had an inversely proportional to the etched time, as a consequence of the increasing of the etching area.

B. Analyzing of power loss during etching process

After collecting the power loss during etching process in lengths of 0.1, 1, and 3 cm, the power loss is 48.86%, 87.41%, and 93.31%, respectively. The attenuation of light occurred due to corrosion of the fiber core making the light within the fiber core leak out into the environment due to the decreasing of the fiber core diameter which can be shown in Fig.6.

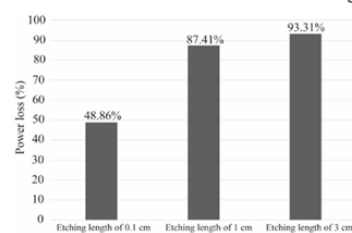


Fig.6. Percentage of power loss in different conditions of etching process

As shown in Fig. 6, After comparing the power loss of 1 and 3 cm with the etching length of 3 cm, it was found that the power loss increased by 1.78 and 1.9 times, respectively. This phenomenon was corresponded to the ratio of the etching length and etched time, due to the increasing of etching area. Therefore, we summarize that the power loss had a direct proportional to the etching length.

V. CONCLUSION

The investigation of effect from etching process in fiber refractometer for carbon dioxide measurement has been studied in this work. Multimode fiber has been modified as a sensing element in different etching lengths of 0.1, 1 and 3 cm. After collecting the power loss data and analyzing with MATLAB programming, it can be concluded that, the etched time has decreased 2.6 and 4 times. On the other hand, the power loss has increased 1.78 and 1.9 times. The results indicated that the etching length had an effect to the changed of the etched time and power due to the increasing of the contact area to the environment. Furthermore, the increasing of power loss from 0.1 to 1 cm can indicated that the HF can corrode deeper, making it easier to control the desire thickness after the etching process. Finally, we can conclude that the etching length of 1 cm is the most suitable etching length to applied into the fiber optic-based refractometer for carbon dioxide measurement due to the easiest to modified into the sensor with the power loss of 87.41%.

REFERENCES

- [1] M. Aresta. *Carbon Dioxide as Chemical Feedstock*, Wiley, 2010.
- [2] A. Mikhaylov, N. Moiseev, and T. Burkhardt, "Global climate change and greenhouse effect," *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, vol. 7, no. 4, pp. 2897 - 2913, 2020.
- [3] M. H. Ramsey, "Challenges for the estimation of uncertainty of measurements made in situ," *Accred Qual Assur*, vol. 26, pp. 183-192, 2021.
- [4] R. Ginu. *Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications*, CRC Press, 2017.
- [5] W. B. Rahman, N. H. Azeman, N. H. Kamaruddin, P. S. Menon, A. A. Shabaneh, M. A. Mahdi, M. H. Mokhtar, N. Arsal, and A. A. Bakar, "Label-free detection of dissolved carbon dioxide utilizing multimode tapered optical fiber coated zinc oxide nanorice," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 4538-4545, 2019.
- [6] A. Ramos, M. Enrique, N. Chamorro, J. Isaac, C. Torres, R. Carlos, S. Zeferino, and Raúl, "Room temperature CO₂ sensing using Au-decorated ZnO nanorods deposited on an optical fiber," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 262, p. 114720, 2020.

- [7] K. J. Kim, P. Lu, J. T. Culp, and P. R. Ohodnicki, "Metal-organic framework thin film coated optical fiber sensors: A novel waveguide-based chemical sensing platform," *ACS Sensors*, vol. 3, no. 2, pp. 386-394, 2018.
- [8] A. Prasanth, S. R. Meher, and Z. C. Alex, "Metal oxide thin films coated evanescent wave based fiber optic VOC sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 338, p. 113459, 2022.
- [9] P. Thaisongkroh and S. Pullteap, "Investigation of Fiber optic based-Refractometer for Biogas Sensing," *Applied Science and Engineering Program*, vol. 16, no. 4, p. 6793, 2023.
- [10] G. Gerlach, U. Guth, and W. Oellner, *Carbon Dioxide Sensing: Fundamentals, Principles, and Applications*. Wiley, 2019.
- [11] F. Baldini, *Optical Chemical Sensors*. Springer Netherlands, 2006.
- [12] B. D. Gupta, *Fiber optic sensors principles and applications*. New India Publishing Agency, 2006.
- [13] A. K. Sharma, J. Gupta, and I. Sharma, "Fiber optic evanescent wave absorption-based sensors: A detailed review of advancements in the last decade (2007-18)," *Optik*, vol. 183, pp. 1008-1025, 2019.
- [14] L. jiao, N. Zhao, X. Zhao, S. Ma, X. Fu, and D. Dong, "Recent advances in fiber-optic evanescent wave sensors for monitoring organic and inorganic pollutants in water," *Trends in Analytical Chemistry*, vol. 127, p. 115892, 2020.
- [15] M. Wang, F. Yang, S. Dai, Z. Cao, J. Su, S. Ding, and P. Zhang, "Effect of the geometries of Ge-Sb-Se chalcogenide glass tapered fiber on the sensitivity of evanescent wave Sensors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 14, pp. 4828-4836, 2021.
- [16] A. J. Y. Tan, S. M. Ng, P. R. Stoddart, and H. S. Chua, "Trends and applications of U-shaped fiber optic sensors: A review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 1, pp. 120-131, 2021.
- [17] R. Tabassum and R. Kant, "Recent trends in surface plasmon resonance based fiber-optic gas sensors utilizing metal oxides and carbon nanomaterials as functional entities," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 310, p. 127813, 2020.
- [18] Y. Liu, N. Zhang, P. Li, S. Bi, X. Zhang, S. Chen, and W. Peng, "Nanopatterned evanescent-field fiber-optic interferometer as a versatile platform for gas sensing," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 301, p. 127136, 2019.
- [19] D. A. Hussein, Y. Karanth, J. Zhou, D. Wilhelm, X. Qian, R. Gutierrez-Osuna, G. L. Cote, P. L. Lin, and S. A. Sukhishvili, "Surface functionalization utilizing mesoporous silica nanoparticles for enhanced evanescent-field mid-infrared waveguide gas sensing," *Coatings*, vol. 11, no. 2, p. 118, 2021.
- [20] M. Chauhan and V. Kumar Singh, "Review on recent experimental SPR/LSPR based fiber optic analyte sensors," *Optical Fiber Technology*, vol. 64, p. 102580, 2021.
- [21] Z. Samavati, A. Samavati, A. F. Ismail, M. H. D. Othman, and M. A. Rahman, "Comprehensive investigation of evanescent wave optical fiber refractive index sensor coated with ZnO nanoparticles," *Optical Fiber Technology*, vol. 52, p. 101976, 2019.
- [22] S. W. Harun, *Application of Optical Fiber in Engineering*. IntechOpen, 2021.
- [23] N. F. Idrisi, N. A. M. Yahya, M. H. Yaacob, A. H. Idris, S. W. Harun, and N. Saidin, "Optical fiber coated Zinc Oxide (ZnO) nanorods decorated with Palladium (Pd) for hydrogen sensing," *Optical Materials*, vol. 96, p. 109291, 2019.
- [24] S. Korganbayev, M. Shaimerdenova, T. Ayupova, M. Sypabekova, A. Bekmurzayeva, W. blanc, and D. Tosi, "Refractive index sensor by interrogation of etched MgO nanoparticle-doped optical fiber signature," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 31, no. 15, pp. 1253-1256, 2019.



Regular Articles

Development of carbon dioxide sensor using fiber optic-based refractometer



Patchanon Sekhararidhi, Phairin Thaisongkroh, Saroj Pullteap*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University (Sanam Chandra Palace Campus), Nakhon Pathom 73000, Thailand

ARTICLE INFO

Keywords:

Carbon dioxide sensor
Fiber optic refractometer
Chemical compound
Sensing probe
Power attenuation

ABSTRACT

In this work, a fiber optic-based refractometer has continuously been developed for measuring carbon dioxide (CO₂) using the evanescent wave method. Consequently, this technique is utilized to determine the light absorption values. Further, the chemical compound is also used to coat onto the modified sensing probe. However, this probe is, generally, made from multi-mode fiber (MMF). Moreover, the principle of altering the refractive index (RI) value is applied by removing the cladding of the sensing probe using hydrofluoric acid (HF). In addition, the zinc oxide (ZnO) mixed with the sodium silicate (Na₂SiO₃), known for its CO₂ absorption capabilities, is used as a compound to coat the modified cladding. Besides, the sensing probe has been developed in three selected lengths (*L*) which are 10, 20, and 25 mm, and then tested from 0 to 40 % of CO₂ concentration. Moreover, a biogas analyzer has been operated as a standard reference instrument. Afterward, an engineering application software is also developed for data processing to analyze the data in the relationship between the differential voltage, percentage of attenuation, and percentage of concentration versus time domain, respectively. The experimental results reported that the developed sensing can detect CO₂ in any sensing length from 8.11 to 38.25 % with a sensitivity of 0.0102 mV/%concentration. In addition, a percentage attenuation of 2.11 %, 14.52 %, and 29.29 % is achieved in whole sensing lengths. However, this analyzes that at 10 mm the probe is more suitable due to its high responsibility to detect the CO₂. Furthermore, the experimental results showed that the selected compound can recover with a recovery time of approximately 6 min.

1. Introduction

Nowadays, Global warming is considered a world threat that affects human daily life such as food shortages, the increasing of sea level, risk of wildfire, etc [1]. The accumulation of greenhouse gases that occurs in the troposphere [2] causes the global average temperature to be higher which affects the rise of sea level and other issues. However, Carbon dioxide is the main factor as it accounts for 75.32 % of the greenhouse gas effect. Consequently, the increasing world population results in the rise of electricity demand, and thus leads to more fossil fuel and coal combustion [3]. Therefore, the higher demand for fossil fuels and coal combustion is the primary reason for carbon dioxide emissions [4,5]. On the other hand, the power production industry is 73.20 % of overall industries that emit greenhouse gases. Accordingly, the measurement of carbon dioxide (CO₂) in the mentioned industry is crucial for monitoring and controlling the emission levels. Currently, carbon dioxide measuring instruments can be categorized into various types based on different detection methods, such as electrochemical sensors, thermal

conductive sensors, and non-dispersive infrared (NDIR) sensors [6]. Meanwhile, NDIR sensors are the most common in the power production industry. However, due to the drawbacks of these types of instruments, such as sensitive to temperature and humidity, high maintenance costs, and also sensitive to other gases, there has been a development of alternative detection methods to address the aforementioned issues. For example, Francisco *et al.* developed a fiber optic-based refractometer for detecting carbon dioxide using the principle of surface plasmon resonance in 2021. Furthermore, the developed sensor exhibited a precision of 5.15×10^{-5} RIU⁻¹ and also indicated a sensitivity of 19.4 RIU⁻¹ [7]. Following in 2023, Phairin and Saroj explored the utilization of two types of optical fibers, single-mode fiber (SMF) and multi-mode fiber (MMF), to develop a fiber optic-based refractometer (FOR). The aim was to study the attenuation of two light modes and the size of the light spot. The result detailed that the multimode fiber was suitable for application in the fiber optic-based refractometer due to its lower light attenuation compared to the SMF [8]. Currently, these measurement tools are still necessary to be imported from abroad, as a consequence of the

* Corresponding author.

E-mail address: saroj@su.ac.th (S. Pullteap).<https://doi.org/10.1016/j.yofte.2024.103807>

Received 14 March 2024; Received in revised form 11 April 2024; Accepted 19 April 2024

Available online 22 April 2024

1068-5200/© 2024 Elsevier Inc. All rights reserved.

unattainable capability to manufacture this type of instrument. According to the disclosed information from the Thai Ministry of Finance in the year 2023, there was an import of measurement and inspection instruments, approximately 19.5 billion THB [9].

In this work, the fiber optic refractometer (FOR) applied for CO₂ measurements has continuously been studied [10]. However, the sensing probe of the FOR has been modified to various lengths for investigating or characterizing the output power attenuation. In addition, the selected chemical compound has been used to coat the modified sensing probe at a constant thickness. Generally, this compound can ability to absorb the desired carbon dioxide gas. Therefore, the main purpose of this research work is to investigate the capability of the compound for detecting CO₂ in several concentrations in any selected lengths by using the FOR. Anticipating the findings, we aim to develop the fiber optic-based refractometric sensor as a prototype instrument that works as a remote gas sensor and also eliminates the need for users to enter hazardous areas.

2. Related theories

Generally, there are many different types of optical fiber sensors for detecting toxic gases, and the structure and operating principles of such sensors are also different [11–15]. Moreover, it would have a function to measure the amount of gas concentration and also measure the leakage of each type of gas, etc [8,11]. Therefore, the selection of appropriate sensors would depend on each type of work and application. In this section, the working principle of a fiber optic-based refractometer would be discussed in conjunction with the theory of evanescent wave for the measurement of carbon dioxide, the details can be shown as follows:

2.1. Types of carbon dioxide sensor

Since the Industrial Revolution, humans have been producing electricity by burning large quantities of fossil fuels (coal, oil, and gas) and releasing them into the atmosphere [16]. Tracking carbon dioxide emissions data in relevant industrial sectors is considered a crucial step in helping to reduce greenhouse gas emissions. Furthermore,

understanding the origin and occurrence of these gases is essential for solving problems more accurately. Therefore, industries dealing with carbon dioxide emissions require measurement tools suitable for their specific sector, carbon dioxide instruments can be classified according to characteristics of measurement including a non-dispersive infrared sensor (NDIR) which measures the amount of infrared light absorbed by carbon dioxide gas molecules [8,17,18]. This makes it possible to convert the quantity of light absorption into the percentage of gas concentration [8,13,19]. In contrast, a chemical absorption sensor uses the amount of adsorption of a sensitive chemical on a target gas to determine the carbon dioxide concentration [8]. Basically, the metal oxide semiconductor sensor measures the changes in electrical properties when the carbon dioxide gas flows through a semiconductor, resulting the changes in electrical quantities, and the gas concentration can, consequently, be measured [10–23]. Finally, the photoacoustic sensor measures the sound produced by the vibrations of carbon dioxide gas molecules when struck by light of the appropriate wavelength [11,14]. The concept of the mentioned sensors can be given an idea in Fig. 1.

As shown in Fig. 1(a), the basic structure of a non-dispersive infrared sensor (NDIR) consists of 3 main parts: infrared light source, gas chambers (sensing and reference chambers), and detectors, respectively. The infrared light source splits the light into two beams; the sensing beam and the reference beam. These beams are then propagated to the two chambers as sensing and reference chambers, respectively. However, the CO₂ has been fed into the sensing chamber while there's no gas feeding in the reference. Consequently, the output power from the chambers has been detected by using two detectors. Without CO₂ feeding, the output power would be equivalent. On the other hand, this value, however, fluctuates when the CO₂ gas is fed into the sensing system. However, the quantity of the output power is normally related to the concentration of gas. Another CO₂ instrument namely the photoacoustic sensor has, further, been shown in Fig. 4(b). This instrument uses a microphone to detect the vibration of the molecules of the desired gas. The output of the sound level is, however, directly demodulated into the gas concentration. Thirdly, the fundamental structure of the CO₂ sensor can be detailed in Fig. 1(c). This sensor consists of electrodes

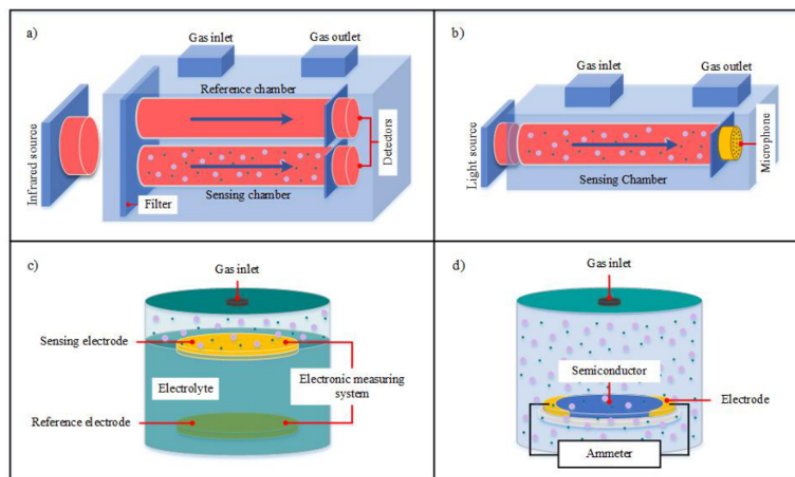


Fig. 1. Carbon dioxide sensor types; (a) non-dispersive infrared sensor; (b) photoacoustic sensor; (c) chemical absorption sensor; and (d) metal oxide semiconductor sensor [18].

(sensing electrode and reference electrode), electrolytes, and also electronic measurement system, respectively. After the CO_2 contact with the sensing electrode, it exploits the difference in the electrical quantities detected by the electronic measurement system and then converts it into the gas concentration. Finally, the metal oxide-based semiconductor has been proposed for the CO_2 measurement, its structure is detailed in Fig. 1(d). The operating principle of a such sensor is described in terms of the direct contact between the semiconductor and CO_2 gas. This phenomenon leads to a decrease in the current flow within the system to detect the CO_2 concentration.

2.2. Fiber optic-based refractometer

A fiber optic refractometer (FOR) is an optical tool utilized for measuring physical properties such as temperature, thickness of materials, properties of various gases, etc [12,24]. The principle of this instrument involves the change in optical quantities through the alteration of the refractive index (RI). Consequently, the obtained values can then be translated into various physical properties as desired by the researcher [25]. Additionally, the operating principle of such fiber refractometer is based on the modifications in optical properties within the fiber sensor. This involves the use of certain chemical compounds to modify the cladding of fiber optic cable/cord, causing changes in the refractive index value (n), and subsequently affecting the optical power value at the fiber end. The basic structure of the fiber optic refractometer can be seen in Fig. 2.

Fig. 2 detailed the basic structure of the FOR, and also the phenomenon of light propagation within the fiber optic cable along the sensing probe (arm). From the figure, when focusing on the modification of the fiber cladding, the chemical compounds have been applied instead of the cladding causing a change in the refractive index value from its original state. This alteration results in an output power value (I), where the input power is determined (I_0). This calculation can be derived from (1) [27].

$$I = I_0 \exp[-EL] \quad (1)$$

where: E is the evanescent wave attenuation coefficient between the core and cladding, while L is the length of the fiber de-cladding. However, the coefficient of attenuation of optical power from the scattering of light can be calculated by (2) [28].

$$E = R_l \times T_c \quad (2)$$

where: R_l = Reflections per unit length

T_c = Transmission coefficient into cladding.

To calculate the reflectance of propagation light within the optical fiber along the fiber length (R_l), and also the light transmission coefficient within the fiber cladding (T_c), it can, however, be expressed by (3) – (4) [29]. These parameters are expected to the performance of the

fiber to media the light from the source to the target.

$$R_l = \frac{\cot \theta_1}{2r} \quad (3)$$

$$T_c = \frac{\phi \lambda \times n_{\text{core}} \cos \theta_1}{\pi n_{\text{cm}}^2 \cos^2 \theta_{\text{cc}} \sqrt{\cos^2 \theta_{\text{cc}} - \cos^2 \theta_1}} \quad (4)$$

where: r is the diameter of the core within the optical fiber, ϕ is the absorption coefficient of the chemical compound, λ is the wavelength, while n_{cm} and n_{core} are the refractive index between the chemical compounds and core. It is also specified that θ_1 and θ_{cc} are the constant values. Therefore, the absorption coefficient is the main factor in determining the attenuation of the output power. From (1) – (4) the optical power at the fiber end can, however, be calculated only when light refraction occurs. This is because the medium has changed, and light is absorbed causing evanescent waves [13,27].

2.3. Phenomenon of evanescent wave

In general, the characteristics of light propagation in a multi-mode fiber optic (MMF) have been scattered (multi-mode step index) and reflected back and forth within the optical fiber [27]. On the other hand, a single-mode fiber (SMF) experiences the propagation of light in a straight line (mono-mode step index) [30]. However, this causes a difference in the refractive index (RI) between the core and cladding. This phenomenon is called the total internal reflection (TIR) [31]. Besides, when the light propagation passes through the de-cladding area, the electromagnetic waves between the two joints occur, it is called an “evanescent wave”. The basic structure of this can be illustrated in Fig. 3.

As shown in Fig. 3, the amount of electromagnetic waves is very large on the cladding surface, and it would be smaller in exponential decay when the light penetration [32]. Furthermore, it can be explained that when the injected light (Ray1) is propagated into the fiber optic and then passes through a medium in different densities, the light beam would be refracted and scattered outside the fiber. Besides, when the Ray2 is injected into the fiber and then reflected in a perpendicular angle of 90 degrees between the core and the cladding, it creates a critical angle (θ_c). However, when the third beam (Ray3) passes into the optical fiber making an angle of more than 90 degrees, the light beam can propagate along the fiber length causing the total internal reflection (TIR) [33]. Moreover, when light has an angle of 90 degrees, it causes an evanescent wave and absorption phenomenon. However, the penetration depth can thus be calculated by (5) [34].

$$d_p = \frac{\lambda}{4\pi \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}} \quad (5)$$

Generally, when there is a change in the optical properties within the range of the evanescent wave (penetration depth: d_p), it would result in a

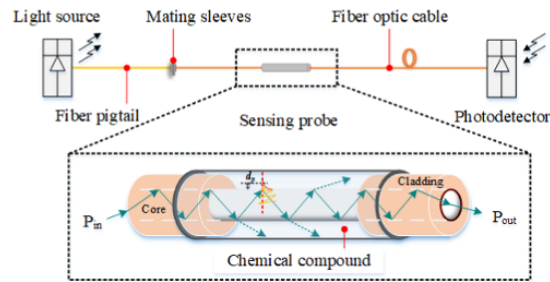


Fig. 2. Basic structure of fiber optic refractometer [26].

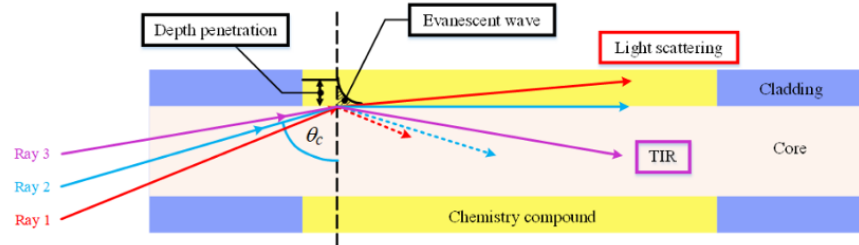


Fig. 3. Basic structure of evanescent wave phenomenon within fiber optic.

change in the optical power value (I). Furthermore, the distance of the evanescent wave would depend on the wavelength (λ) of the light propagation within the fiber optic, and also the refractive index of the core (n_1) and cladding (n_2).

3. Experimental setup

In this section, the experimental setup has been designed into three main parts as follows: the sensing probe development, carbon dioxide sensor testing, and data processing, respectively. However, the details of this experiment have, consequently, been summarized in Fig. 4.

3.1. Sensing probe development

The sensing probe is a main part as a sensing element of the fiber refractometer for detecting the desired measurand. However, the procedure to develop a carbon dioxide sensing probe can be divided into two processes: the fiber etching process and the fiber coating process, respectively. Consequently, the details of such procedures can be described below:

3.1.1. Etching process

The concept of carbon dioxide concentration detection using a fiber optic-based refractometer relies on the detecting of changes in the refractive index (RI) within the sensing probe. The commonly used method, due to its simplicity and minimal equipment requirements, involves etching the fiber optic with a chemical substance to remove the cladding layer, causing the light to penetrate through the core. In this work, a hydrofluoric acid (HF) with a concentration of 50 % is operated as an etching substance, with the ability to corrode silica (glass), which is the primary material of the sensing probe [35]. Further, the buffer layer of the sensing probe would then be removed using an optical cleaver at different etching lengths (l) of 10, 20, and 25 mm, respectively. Consequently, the sensing probe would then next be immersed in hydrofluoric acid for 45 min. Following that, the fiber optic cable could be cleaned and dried using a 50 Watts halogen lamp with an operating temperature of 40 °C for at least 20 min. As mentioned, these processes are exploited in Fig. 5.

As shown in Fig. 5, the desired etching length from 10 to 25 mm has been prepared by removing the fiber buffer and jacket using an optical fiber stripper. Consequently, the etching process has, next, been conducted by employing the HF. Then, the fiber etching cord has been cleaned with the distilled water. In this research work, the sensing probe has, however, been implemented for 5 cords per length to verify the ability, repeatability, and stability of the fiber optic refractometer for measuring CO₂ gas. However, an example of this process can thus be illustrated in Fig. 5(b).

3.1.2. Coating process

After removing the fiber cladding, the prepared probes are, consequently, coated with a chemical compound that is responsive to the CO₂ gas. In this research, zinc oxide (ZnO) has been selected due to its ability to absorb carbon dioxide gas and its cost-effectiveness. As ZnO is a solid substance, it, however, needs to be mixed with a light-transmitting adhesive material [36]. For this purpose, sodium silicate (Na₂SiO₃) has been chosen, as it possesses all the mentioned properties. Both substances are mixed in a ratio of 40 mg/ml and then dried at the temperature of 40 °C for 30 min. The overall process of coating the sensing probe can be detailed in Fig. 6.

In this research work, the concept of the coating process can be shown in Fig. 6(a). Furthermore, the manual dipping method has been chosen due to its simple implementation, low cost, and less procedure than the other methods such as sol-gel usage, rolling technique, vapor deposition technique, etc [37–40]. However, the example of this process has been illustrated in Fig. 6(b).

3.2. Carbon dioxide sensor testing

In this process, the testing procedure against carbon dioxide has been investigated for studying the CO₂ detection performance of the fiber refractometer. Generally, the fiber refractometer can be divided into 3 main parts: Monochromatic light source (Thorlabs model: LPS-1310-FC) that is controlled by current and temperature control to maintain the light wavelength of 1310 nm. Following that is the sensing element, a section of the developed probe with a coated chemical compound responsive to the target gas. The latter part is a data acquisition system

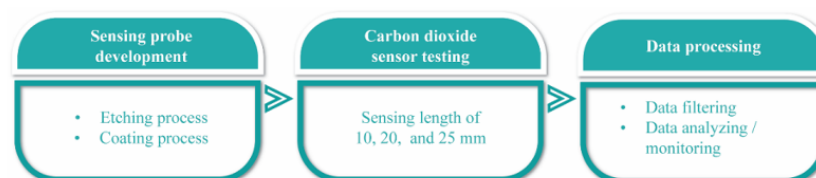


Fig. 4. Experimental workflow for CO₂ sensing development.

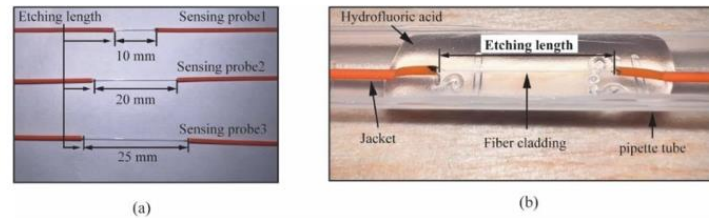


Fig. 5. Etching process procedures; (a) buffer removing; (b) cladding removing using hydrofluoric acid.

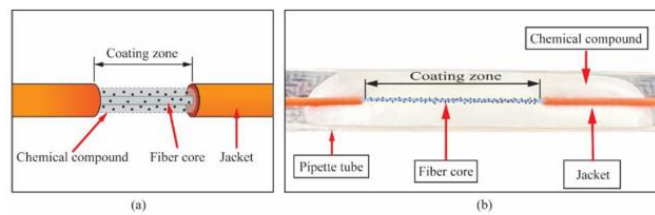


Fig. 6. Coating processes; (a) conceptual design; (b) experimental procedure.

consisting of two photodetectors (*Thorlabs model: PDA10CS2*) and a data acquisition (*National Instrument model: NIUSB-6002*). However, the configuration of the CO₂ sensing system can be shown in Fig. 7.

Focusing on the experimental configuration, three sensing probes with difference lengths of 10, 20, and 25 mm have, preliminary, been studied to detect carbon dioxide gas at the concentration range of approximately 0–40 %. Several reasons for choosing these sensing lengths are as follows; the relationship between sensing length and sensitivity is directly proportional to each other, while the long etching length is more complex and fragile to etch, etc [41,42]. In addition, Z. Zhou *et al.* proposed the development of fiber Bragg grating (FBG) for CO₂ sensing [38]. The sensing length was indicated from 10 – 20 mm. For testing the developed system, three feeding conditions have been considered; initial condition (no gas feeding), CO₂ feeding, and air mixing with nitrogen (N₂ + O₂) feeding, respectively. Normally, these gases have directly been fed into the gas chamber in which the sensing probe is installed inside. Consequently, the feeding time has been

defined at 8 min for each condition. The output power from 2 photodetectors, sensing probe (PD₁) and reference probe (PD₂) has then been recorded via the data acquisition system. Consequently, the output acquiring data would next be transferred to a dedicated computer for data processing. Moreover, a biogas analyzer (*Geotech model: biogas 5000*) is utilized as a reference sensor for comparing the experimental results with the fiber optic refractometer. Also, it is used to validate the performance of the developed system.

3.3. Data processing procedure

This process is detailed in the data filtering process and data analyzing process obtained from the optical fiber sensor. Furthermore, the designed concept can be exploited in main 3 functions; the relationship between the differential voltage and percentage of CO₂ concentration versus time domain, and the percentage of power attenuation versus sensing probe lengths, respectively. This process starts by

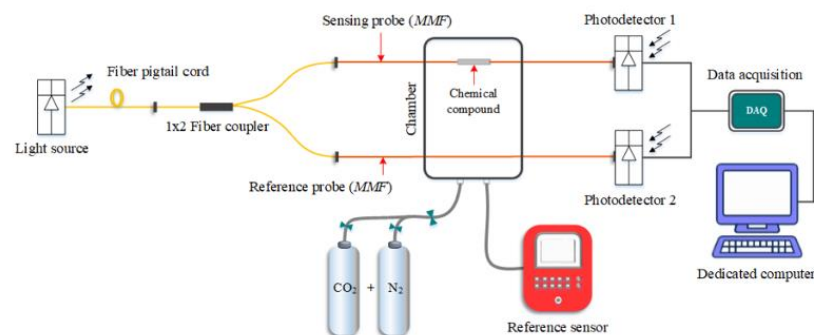


Fig. 7. Configuration of fiber refractometer for carbon dioxide sensing.

collecting the output data from the sensing system and then transferring it to the computer for data processing/analysis by using the application software to archive the differential voltage (ΔV) obtained from both photodetectors (PD₁ and PD₂). Consequently, the percentage of CO₂ concentration has been investigated. To obtain the mentioned value, the output obtained from the reference sensor and the ΔV has been calibrated in terms of a calibration curve. This implied that when the ΔV output is achieved the CO₂ concentration can, thus, be indicated. Later, the relationship between the percentage of attenuation and sensing length has, next, been addressed. This procedure would analyze the suitable length of the sensing probe that is appropriate to operate as a sensing element for the CO₂ measurement. However, the flowchart of such developed software has been illustrated in Fig. 8.

As shown in Fig. 8, a demodulation procedure for data processing via the application software has been described. The concept of a designed program has been started by importing the data from a couple of photodetectors (V_{ref} and V_{sens}), which are stored by a data acquisition (DAQ) to obtain the differential voltage (ΔV). Consequently, these data would eliminate the noise signals by using a simple moving average (SMA) method as a filtering algorithm [39]. However, the mentioned methods are calculated by:

$$\Delta V = abs(V_{ref} - V_{sens}) \quad (6)$$

$$SMA = \frac{P_M + P_{M-1} + P_{M-2} + \dots + P_{M-(n-1)}}{n} \quad (7)$$

where: P_M = Data point.
 n = Quantity number.

After filtering, the filtered data has then been passed to calculate a couple of parameters, CO₂ concentration and percentage of attenuation, respectively. Consequently, the calculating data is next displayed on the computer screen in the pattern of a line graph. However, these graphs represent the relationship between the time domain (t) and output differential voltage, the percentage of CO₂ concentration, and also the percentage of attenuation, respectively. By the way, the graphs can

identify the capability of the fiber refractometer for measuring the CO₂ by considering the trend of the desired gas in long-period measurements and also indicating the recovery time of the chemical compound used, etc.

4. Experimental results and discussions

As described previously, the experimental results and any discussions have, consequently, been reported and summarized in this section. However, the proposed details of the experimental results and discussions have been followed below:

4.1. Results of sensing probe development

From the etching process, the jacket was first removed using an optical fiber cleaver at the desired length (10, 20, 25 mm). Afterward, the cladding was then de-cladded into the fiber core using a hydrofluoric acid (HF). Subsequently, immersing the optical fiber in hydrofluoric acid for 45 min resulted in an average core diameter reduction of 62.5 μ m. The output of this procedure can, however, be imaged in Fig. 9.

After the etching process, it was next subjected to dry by using a halogen lamp to allow the chemical and residual liquid to evaporate. Consequently, an alloy compound, zinc oxide (ZnO) mixed with the sodium silicate (Na₂SiO₃), in an appropriate ratio was employed to coat the sensing probe with the mixing process of ~ 30 min. Subsequently, the compound attained sufficient viscosity to adhere to the optical fiber without forming lumps. After observing, the thickness could be measured with an average value of 6 μ m over the sensing probe length for 5 times repeatability. The output image of this procedure results could, however, be illustrated in Fig. 10.

As described above, we realize that hydrofluoric acid can be employed for etching the fiber cladding in the desired etching length by controlling the etching time. However, the HF is more dangerous for humans. Therefore, we need to prepare a special operating space with a ventilation system and also use rubber gloves and masks at any time

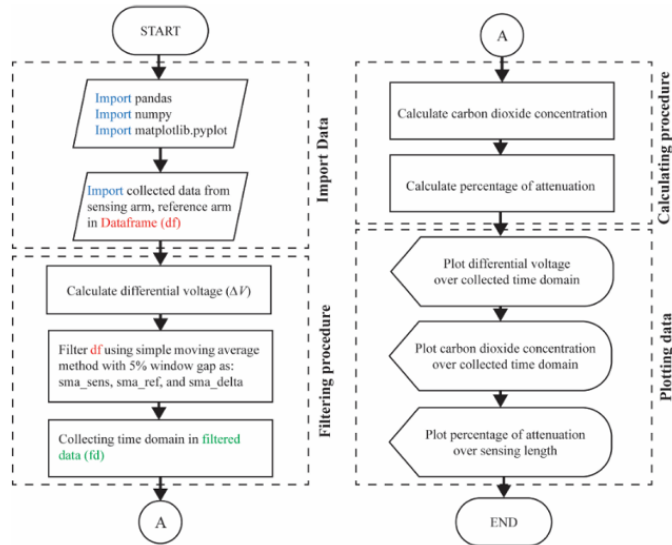


Fig. 8. Flowchart of demodulation program for data analysis and monitoring.

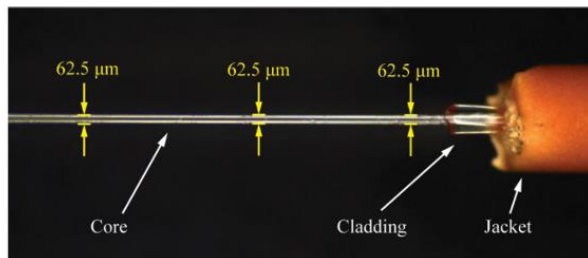


Fig. 9. Output image of sensing probe development after etching process.

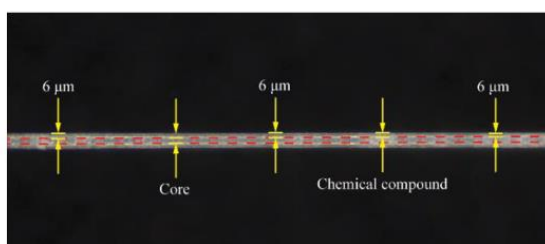


Fig. 10. Coating process imaging with chemical compound at sensing probe.

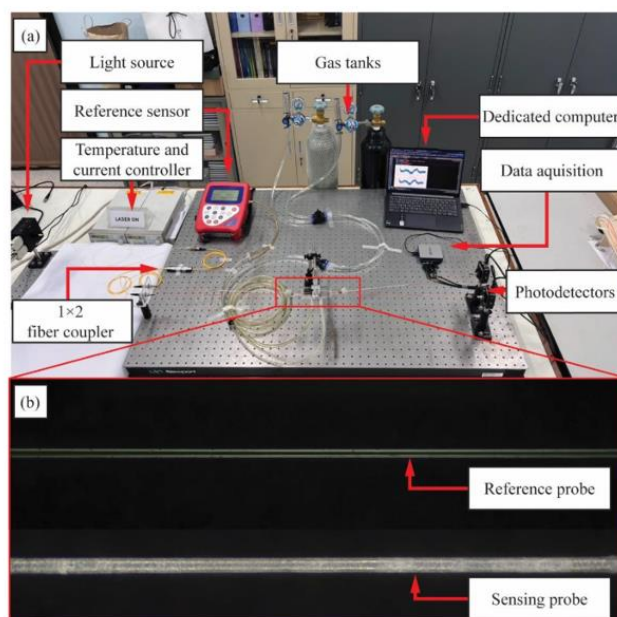


Fig. 11. Configuration of fiber refractometer for CO₂ measurement; a) experimental setup; b) zoom-in of reference and sensing probes.

during the experiment. Furthermore, the output results showed that the selected chemical compound can be coated onto the sensing probe using the dipping technique [43]. Besides, the thickness of the coating process depends on the dipping time. However, it is more complicated to implement due to the modified fiber is very fragile and thin. This causes an easy to break the modified fiber.

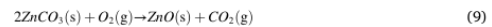
4.2. Results of carbon dioxide sensor testing

This section shows the output results of the CO₂ sensing system using the fiber optic-based refractometer. The actual configuration of such a sensing system can be illustrated in Fig. 11.

As shown in Fig. 11, when light propagated through a 1x2 fiber coupler, the intensity would then be equally separated by the reference and sensing probes. Consequently, both probes were exposed to carbon dioxide with a concentration range of approximately 0–40 %. Furthermore, the output data in each sensing length (10, 20, 25 mm) in long-term measurement (~40 min) can thus be displayed as an example obtained from the developed system in Fig. 12.

As illustrated in Fig. 12, the experiment has been separated into 3 conditions: initial condition, CO₂ feeding, and air mixing condition, respectively. Furthermore, the testing of the gas-feeding process has been launched into 3 periods per each etching length (8 min each). According to the first period, when carbon dioxide is released into the chamber (CO₂ feeding), the differential voltage decreases (see Fig. 12 (a) – (c)). Subsequently, when oxygen is next mixed into the chamber (O₂ mixing), the differential voltage increases. In the latter periods, it is observed that the sensing probe still responds to carbon dioxide, but the fluctuation of the differential voltage occurred. After testing 5 times for each repeatability, the experimental results are compared, revealing a change in the color pigment of the chemical compound on the coated region/area. However, these output images are then processed using an application software for image digitizing using image processing techniques [44]. Consequently, the processing results showed that an average grayscale intensity (ΔGS_{avg}) in the chemical area increased by 5.29 % after the gas was fed into the chamber. This verifies that the selected compound that coated onto the sensing probe responds to the CO₂ gas. An example of the processing procedure can be shown in Fig. 13.

According to the experimental results as shown in Fig. 13, it can be observed that the color pigment in the gas-feeding condition as illustrated in Fig. 13(b) is brighter than the regular condition (see Fig. 13(a)). Therefore, this verifies that the chemical compound coated at the sensing probe is reacted to the CO₂ gas. In addition, this phenomenon can be explained by using the chemical equilibrium mechanism method which is detailed in (8), and (9), respectively [45].



Focusing on the equations above, when the CO₂ is however absorbed by the mixed compounds (ZnO plus sodium silicate (Na₂SiO₃)), the output mixture can archive the zinc carbonate (ZnCO₃). Basically, the color of such material property is exploited in light bluish-gray. This phenomenon can, however, be explained as why the color of ZnO is brightened when the CO₂ is absorbed into the sensing probe (see Fig. 13 (b)).

4.3. Results of data processing procedure

In this section, the data processing procedure was discussed. Generally, this process was divided into 2 main procedures; filtering and analyzing / monitoring process, respectively. By using developed application software, 3 sub-functions as follows; noise filtering, percentage of CO₂ gas concentration calculation, and also percentage of power attenuation, were reported. The details of this purpose can be described below:

4.3.1. Filtering procedure

After collecting the experimental data in each sensing length from the DAQ, the raw data were then transferred to the dedicated computer, and next processed by using the developed software. An example of the data plotted by the software could thus be shown in Fig. 14.

According to Fig. 14, we observe that the output data from Fig. 14(a) have obtained a lot of noise. To eliminate this effect, the filtering function has been proposed. This function is based on the simple moving average method as mentioned in (7). However, the output after the filtering process is, then, exploited in Fig. 14(b). Therefore, this method has, next, been used for the data analyzing/monitoring process.

4.3.2. Data analyzing/monitoring process

In this section, the filtered data has been analyzed to achieve the relationship between the differential voltage (ΔV) and also the percentage of CO₂ concentration incorporated with the time domain. Consequently, these output data are next plotted into the line graph pattern to analyze the performance of the sensing system for the CO₂ measurement. However, an example of the mentioned graph in terms of the relationship between the time domain and the percentage of CO₂ concentration can thus be monitored in Fig. 15.

As shown in Fig. 15, an example of the experimental result in 3 conditions over 3 periods of time has been reported via the application software. Focusing on the initial condition, we observe that the percentage of CO₂ concentration started from 0 % in each sensing length. This means that the sensing system can ability to detect the concentration from 0 %. It implies that every optical equipment is warmed up and settled at this stage. Further, the CO₂ feeding condition is next considered. The desired gas has slowly been fed into the gas chamber for a few

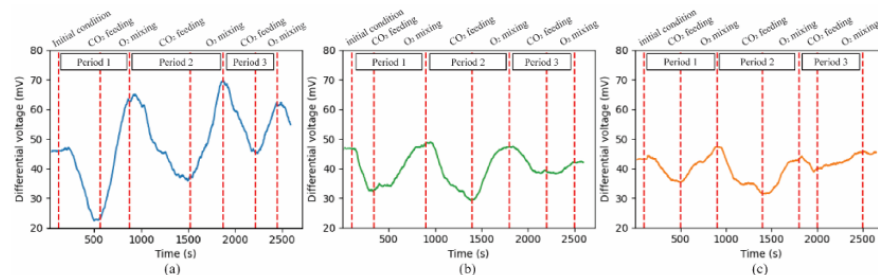


Fig. 12. Example of filtered data detected from fiber refractometer in difference sensing length; a) 10 mm; b) 20 mm; c) 25 mm.

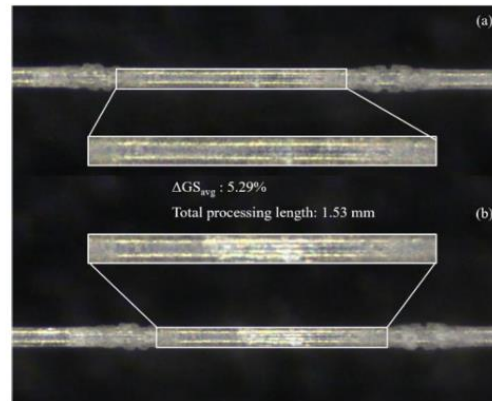


Fig. 13. Example of output sensing probe using image processing technique; a) before; b) after gas feeding.

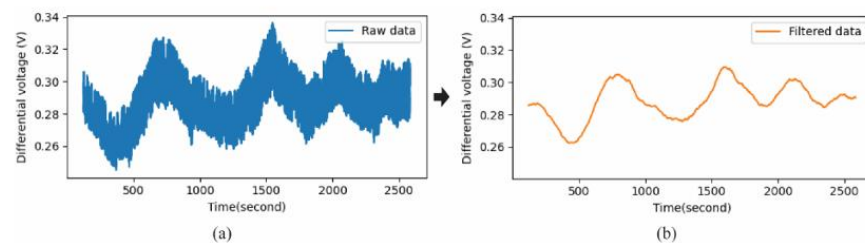


Fig. 14. Example result from filtering function; (a) without filtering; (b) with filtering.

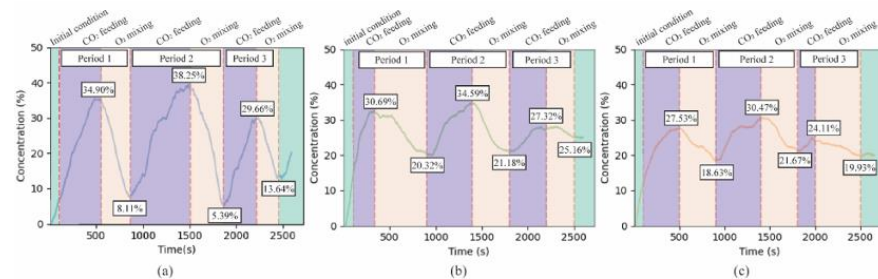


Fig. 15. Example of output relationship between time domain and the percentage of CO₂ concentration using application software; a) 10 mm; b) 20 mm; c) 25 mm.

minutes. The output showed that the percentage of CO₂ concentration in any sensing length is increasing until stable as indicated in Fig. 15. Besides, this stage uses an operating time of around 8 min. By the way, the experimental results showed that the FOR can detect the CO₂ concentration of 34.90 %, 30.69 %, and 27.53 % from 10, 20, and 25 mm of the sensing lengths, respectively. Consequently, the mixture of oxygen (O₂) and nitrogen (N₂) gases has been operated in the next stage. The CO₂ gas from the chamber is released by the mixture of gases. Furthermore, the

output CO₂ concentration is now slowly decreasing till saturated. The results indicated that the CO₂ concentration decreased to 8.11 %, 20.32 %, and 18.63 % from each sensing length respectively. This implied that the selected compound (ZnO) can recover itself when the mixture of gases is blown into the chamber. This result is very important for gas sensor development because some compounds cannot recover when gas is absorbed [8]. To validate this hypothesis, the CO₂ feeding and O₂ + N₂ mixing procedures are then repeated in the second and third periods.

However, the output results are reported quite similarly from the first period. This concludes that the developed fiber refractometer incorporated with the selected compound has, preliminarily, detected the CO₂ gas and also can measure the output gas continuously. Moreover, the experimental results also indicated that the FOR can measure the CO₂ concentration in the range from approximately 0 to 40 % with a sensitivity of 0.0102 mV/%concentration.

In addition, the investigation of the power attenuation in each sensing length is next studied. This parameter is, however, used to characterize the performance of the fiber refractometer for CO₂ measurement in each sensing length. According to the CO₂ feeding condition, the experimental results in 5 times of repeatability can be summarized in Fig. 16.

As illustrated above, the relationship between the sensing lengths and the percentage of power attenuation has been considered. The results showed that the percentage of power attenuation is indicated as 2.11 %, 14.52 %, and 29.29 % for the whole sensing probe lengths (10, 20, 25 mm). From this result, we therefore summarize that the power attenuation is directly proportional to the sensing probe length. Moreover, it implies that a smaller sensing length is suitable for operating as a detection system due to it being very sensitive to CO₂ absorption. This corresponds to (1) with the evanescent wave being too tiny. In contrast, power attenuation is largely exploited when the sensing probe length increases. Therefore, the increasing sensing length makes it easier to achieve the power losses within the sensing system. From the results, we, therefore, realize that the suitable sensing length of the fiber refractometer is 10 mm due to the sensing probe having a higher responsibility than the others as seen in Fig. 15.

In addition, by comparing the configuration of the developed sensor with other CO₂ fiber sensors, the former utilizes less equipment with lower cost, leading to reduced complexity and increased affordability in the gas sensing application [38]. However, the etching method utilized the hydrofluoric acid, which is more dangerous than other techniques. Nevertheless, this approach – in addition to the chosen fiber type and fabrication procedure (etching and coating process) – makes the developed sensing probe easier to fabricate compared to the others [46], contributing to a lower development cost and consequently high competitiveness in the industrial market. Therefore, the proposed fiber optic sensing probe has a high capability and also an economic advantage in CO₂ measurement, which could be suitable for future industrial applications such as CO₂ concentration measurement performed in remote areas.

5. Conclusion

In this work, the fiber optic-based refractometer for carbon dioxide (CO₂) sensing was continuously developed. Besides, three probe lengths of the fiber refractometer (10, 20, 25 mm) were investigated for the performance of CO₂ measurements. To develop the probe, the fiber cladding was removed with a 50 % hydrofluoric acid in the desired length and then coated with zinc oxide (ZnO) at an average thickness of 6 µm. Consequently, the developed sensor was tested by slowly feeding the carbon dioxide gas with a concentration range from 0 to 40 % swapped with the mixture of oxygen and nitrogen (O₂ + N₂) to a dedicated chamber in 3 periods. With 5 times repeatability validation, the results showed that all three lengths of the sensing probe could thus detect the CO₂ gas over the concentration range. Moreover, the experimental results showed that the percentage of CO₂ concentration of 8.11 % – 38.25 %, 20.32 % – 34.59 %, and 18.63 % – 30.47 % could be detected from the sensing probe length of 10–25 mm with a sensitivity of 0.0102 mV/%concentration. Furthermore, the percentage of power attenuation from all probe lengths was indicated at 2.11 %, 14.52 %, and 29.29 %, respectively. This implied that the probe length was directly proportional to the power attenuation. From this result, we also realized that the sensing probe length of 10 mm was more appropriate to utilize as a probe of fiber optic refractometer due to its higher responsibility to

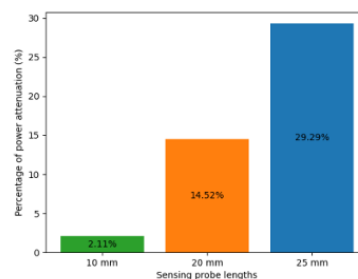


Fig. 16. Relationship between percentage of attenuation and sensing lengths.

CO₂ absorption compared with others. In addition, we found that the selected compound could recover itself, in which the recovery time was exploited at 6 min. Last but not least, we conclude that the developed sensor could perfectly detect CO₂ in a long measurement range, and could further be implemented to continuously measure different CO₂ concentrations in remote areas.

CRediT authorship contribution statement

Patchanon Sekhararidhi: Writing – review & editing, Writing – original draft, Software, Investigation. **Phairin Thaisongkroh:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Methodology, Investigation. **Saroj Pullteap:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Validation, Supervision, Resources, Methodology, Conceptualization.

Declaration of competing interest

The authors declare the following financial interests/personal relationships which may be considered as potential competing interests: Saroj Pullteap reports financial support was provided by Silpakorn University. Saroj Pullteap reports a relationship with Silpakorn University Faculty of Engineering and Industrial Technology that includes: employment. If there are other authors, they declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

No data was used for the research described in the article.

Acknowledgment

This research has received funding and support from the Silpakorn University Research, Innovation, and Creative Fund.

References

- [1] B.R. Singh., Global Warming: Causes, Impacts and Remedies. InTech, 2015.
- [2] A. Mikhaylov, N. Moiseev, K. Aleshin, et al., Global climate change and greenhouse effect, *Entrep. Sustain.* Iss. 7 (4) (2020) 2897.
- [3] S. Gorjian, H. Ebadi, Chapter 1 - Introduction, in: S. Gorjian, A. Shukla (Eds.), *Photovoltaic Solar Energy Conversion*, Academic Press, 2020, pp. 1–26.
- [4] I. Khan, F. Hou, H.P. Le, The impact of natural resources, energy consumption, and population growth on environmental quality: Fresh evidence from the United States of America, *Sci. Total Environ.* 754 (2021) 142222.
- [5] L. Jeffrey, M.Y. Ong, S. Nomanbhay, et al., Greenhouse gases utilization: A review, *Fuel* 301 (2021) 121017.
- [6] G. Gerlach, U. Guth, W. Oellner, *Carbon Dioxide Sensing: Fundamentals, Principles, and Applications*, Wiley-VCH, Germany, 2019.

- [7] F. Pérez-Ocón, A.M. Pozo, J. Cortina, et al., "Surface Plasmon Resonance Sensor of CO₂ for Indoors and Outdoors," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 15, doi: 10.3390/app11156869.
- [8] P. Thaisongkroh, S. Pullteap, Investigation of fiber optic-based-refractometer for biogas sensing, *Appl. Sci. Eng. Progress* 16 (4) (2023) 1–13.
- [9] S. Panth and M. Sommer., "International Monetary Fund: The Executive Board of the International Monetary Fund (IMF) concluded the Article IV consultation1 with Thailand," IMF Country Report, no. 24/35, 2024.
- [10] F. Pérez-Ocón, A.M. Pozo, J. Cortina, et al., Surface plasmon resonance sensor of CO₂ for indoors and outdoors, *Appl. Sci.* 11 (15) (2021) 1–8.
- [11] E. Dervieux, M. Théron, W. Uhring, Carbon dioxide sensing: biomedical applications to human subjects, *Sensors* 22 (1) (2022) 1–45.
- [12] I. Vitoria, C.R. Zamarreno, A. Ozcariz, et al., Fiber optic gas sensors based on lossy mode resonances and sensing materials used therefor: a comprehensive review, *Sensors* 21 (3) (2021) 1–26.
- [13] K.J. Ravindra, Non-dispersive infrared gas sensing technology: a review, *IEEE Sens. J.* 22 (1) (2022) 1–15.
- [14] S. Palzer, Photoacoustic-based gas sensing: a review, *Sensors* 20 (9) (2020) 1–22.
- [15] Z. Samavati, A. Samavati, A.F. Ismail, et al., Optical fiber sensor for glycoprotein detection based on localized surface plasmon resonance of discontinuous Ag-deposited nanostructure, *Opt. Fiber Technol.* 62 (2021) 102476.
- [16] V. Masson-Delmotte et al., "Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)," *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, ISBN: 9781009157896, 2023.
- [17] G. Ramsay, Commercial biosensors applications to clinical, bioprocess, and environmental samples, John Wiley & Sons, 1998.
- [18] G.K. Gulati, L.K. Gulati, S. Kumar, Carbon monoxide sensing technologies, *Mater. Res. Forum* LLC (2021).
- [19] S. Dhall, B.R. Mehta, A.K. Tyagi, et al., A review on environmental gas sensors: Materials and technologies, *Sensors International* 2 (2021).
- [20] S. Mulmi, V. Thangadurai, Editors' choice—review—solid-state electrochemical carbon dioxide sensors: fundamentals, materials and applications, *J. Electrochem. Soc.* 167 (3) (2020) 037567.
- [21] F.S. Ligler, C.A.R. Taitt, Optical biosensors: present & future, Antony Rowe Ltd. (2002).
- [22] S. Uma, M.K. Shobana, Metal oxide semiconductor gas sensors in clinical diagnosis and environmental monitoring, *Sensors and Actuators A* 349 (2023).
- [23] N. Goel, K. Kunal, A. Kushwaha, et al., Metal oxide semiconductors for gas sensing, *Engineering Reports* 5 (6) (2022).
- [24] I.R. Matias, S. Ikezawa, J. Corres, *Fiber Optic Sensors: Current Status and Future Possibilities*, Springer Nature, 2017.
- [25] N. Sureshkumar, A. Dutta, *Environmental Gas Sensors Based on Nanostructured Thin Films*, 2020.
- [26] P. Sekhararidhi, S. Pullteap, Investigation of effect from etching process in fiber refractometer for CO₂ measurement, 8th International STEM Education Conference (ISTEM-Ed), 20–22 Sept. 2023, pp. 1–6.
- [27] C.S. Mario Bertolotti, A.M. Guzman, *Evanescence Waves in Optics*, Springer Cham, 2017.
- [28] Z. Samavati, A. Samavati, A.F. Ismail, et al., Effect of acetone/methanol ratio as a hybrid solvent on fabrication of polymethylmethacrylate optical fiber sensor, *Opt. Laser Technol.* 123 (2020) 105896.
- [29] M. Milosevic, *Internal refraction and ATR spectroscopy*, John Wiley & Sons (2012).
- [30] E.W. Max Born, *Principles of Optics*, Cambridge University Press, 1999.
- [31] M. Azadeh, *Fiber Optics Engineering*, Springer Science-Business Media, 2009.
- [32] A.K. Sharma, J. Gupta, J. Sharma, Fiber optic evanescent wave absorption-based sensors: A detailed review of advancements in the last decade (2007–18), *Optik* 183 (2019) 1008–1025.
- [33] X.J. Hao, X.H. Zhou, Z. Yan, et al., Melamine detection in dairy products by using a reusable evanescent wave fiber-optic biosensor, *Sens. Actuators, B* 204 (2014) 682–687.
- [34] D. Li, S. Yu, C. Sun, et al., U-shaped fiber-optic ATR sensor enhanced by silver nanoparticles for continuous glucose monitoring, *Biosens. Bioelectron.* 72 (2015) 370–375.
- [35] P. Zaca-Morán, J.P. Padilla-Martínez, J.M. Pérez-Corte, et al., Etched optical fiber for measuring concentration and refractive index of sucrose solutions by evanescent waves, *Laser Phys.* 28 (2018) 1–5.
- [36] A. Prasanth, S.R. Meher, Z.C. Alex, Metal oxide thin films coated evanescent wave-based fiber optic VOC sensor, *Sens. Actuators, A* 338 (2022) 113459.
- [37] N. Punjabi, J. Satija, S. Mukherji, Evanescent Wave Absorption Based Fiber-Optic Sensor - Cascading of Bend and Tapered Geometry for Enhanced Sensitivity, in: A. Mason, S.C. Mukhopadhyay, K.P. Jayasundera (Eds.), *Sensing Technology: Current Status and Future Trends III*, Springer International Publishing, Cham, 2015, pp. 25–45.
- [38] Z. Zhou, Y. Xu, C. Qiao, L. Liu, Y. Jia, A novel low-cost gas sensor for CO₂ detection using polymer-coated fiber Bragg grating, *Sens. Actuators B* 332 (2021) 129482.
- [39] M. Turemis, et al., ZnO/polyaniline composite based photoluminescence sensor for the determination of acetic acid vapor, *Talanta* 211 (2020) 120658.
- [40] F. Lu, R. Wright, P. Lu, P.C. Cvetcic, P.R. Ohodnicki, Distributed fiber optic pH sensors using sol-gel silica based sensitive materials, *Sens. Actuators B* 340 (2021) 129853.
- [41] A.J.Y. Tan, S.M. Ng, P.R. Stoddart, H.S. Chua, Theoretical Model and Design Considerations of U-Shaped Fiber Optic Sensors: A Review, *IEEE Sens. J.* 20 (24) (2020) 14578–14589.
- [42] S.R. Srivastava, Y.K. Meena, G. Singh, Forecasting on Covid-19 infection waves using a rough set filter driven moving average models, *Appl. Soft Comput.* 131 (2022) 1–26.
- [43] J. Wuln, M.J. Yin, K. Seefeldt, et al., In situ u-printed optical fiber-tip CO₂ sensor using a photocrosslinkable poly(ionic liquid), *Sens. Actuators, B* 259 (2018) 833–839.
- [44] G.B. Garcia, J.L.E. Aranda, I.S. Gracia, et al., Learning Image Processing with OpenCV: Exploit the Amazing Features of OpenCV to Create Powerful Image Processing Applications Through Easy-to-follow Examples, Packt Publishing (2015).
- [45] M. Agúndez, J.I. Martínez, P.L. de Andrés, et al., Chemical equilibrium in AGB atmospheres: successes, failures, and prospects for small molecules, clusters, and condensates, *A&A* 637 (2020).
- [46] M.R. Sardar, M. Faisal, K. Ahmed, Simple hollow-core photonic crystal fiber for monitoring carbon dioxide gas with very high accuracy, *Sens. Bio-Sens. Res.* 31 (2021) 100401.



Patchanon Sekhararidhi, received a Bachelor's degree in Mechanical Engineering from Silpakorn University, Thailand, in 2019 and is currently studying for a Master's Degree in Energy Engineering. The research interests are in the development of a fiber optic-based refractometer to measure the concentration of carbon dioxide.



Phairin Thaisongkroh (Ph.D.) received a B.S. degree in Software Engineering from the Nakhon Pathom Rajabhat University, Thailand, in 2014 and an M.Sc. degree in Management Information Systems from King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand, in 2018. In addition, she got a Doctoral degree in energy engineering at Silpakorn University, Thailand, in 2024. Her research interests are the development of a fiber-optic sensor for biogas sensing applications.



Saroj Pullteap (Ph.D.) is, currently, an Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering, Silpakorn University, Thailand. He received a Bachelor of Industrial Education in Computer Technology Program from King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok in 2002, and also a Master of Engineering in Industrial Metrology from King Mongkut's University of Technology Thonburi in 2003. In 2007, he, consequently, received a Philosophy Doctor in Optical Engineering from the University of Toulouse, France. His research works are the development of a fiber optic sensor for mechatronics engineering and biomedical engineering applications.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ภัทรชนน เศรษฐธิ
วัน เดือน ปี เกิด	5 กันยายน 2541
สถานที่เกิด	นนทบุรี
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล GPA 2.72
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 69/157 ซอยหอการค้าไทย ซอยย่อย 15 ถนนทางหลวงชนบท นนทบุรี 2051 ตำบลคลองพระอุดม อำเภอปากเกร็ด นนทบุรี 11120

