



ระบบตรวจจับและแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องด้วยตัวตรวจจับชนิดใยแก้วนำแสงเพื่อ  
ประยุกต์ใช้สำหรับภาคอุตสาหกรรมเกษตรไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แบบ 1.1 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

ระบบตรวจจับและแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องด้วยตัวตรวจจับชนิดใยแก้วนำแสง  
เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับภาคอุตสาหกรรมเกษตรไทย



โดย  
นางสาวไพรินทร์ ไทยสงเคราะห์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แบบ 1.1 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

A CONTINUOUS BIOGAS SENSING AND MONITORING SYSTEM USING A FIBER  
OPTIC BASED REFRACTOMETER APPLIED FOR THAI AGRICULTURAL  
INDUSTRIES



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Doctor of Philosophy ENERGY ENGINEERING  
Department of MECHANICAL ENGINEERING  
Silpakorn University  
Academic Year 2023  
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	ระบบตรวจจับและแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องด้วยตัวตรวจจับชนิดใยแก้วนำแสงเพื่อประยุกต์ใช้สำหรับภาคอุตสาหกรรมเกษตรไทย
โดย	นางสาวไพรินทร์ ไทยสงเคราะห์
สาขาวิชา	วิศวกรรมพลังงาน แบบ 1.1 ปรัชญาคุณภูมิบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. สาโรช พูลเทพ

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปรัชญาคุณภูมิบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุณศรี ลีจิระจำเนียร)	เทคโนโลยีอุตสาหกรรม
พิจารณาเห็นชอบโดย	.....
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประธาน บุรณศิริ)	.....
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. สาโรช พูลเทพ)	.....
.....	ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขาวลิต หามนตรี)	.....
.....	ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทสพล เขตเจนการ)	.....
.....	ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีระศักดิ์ หุตากร)	.....

61406803 : วิศวกรรมพลังงาน แบบ 1.1 ปรัชญาคุณฐิบัณฑิต

คำสำคัญ : ระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพ, ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์, ส่วนหัววัด, สารประกอบทางเคมี, อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง, ระบบแสดงผลในเวลาจริง

นางสาว ไพรินทร์ ไทยสงเคราะห์: ระบบตรวจจับและแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องด้วย ตัวตรวจจับชนิดใยแก้วนำแสงเพื่อประยุกต์ใช้สำหรับภาคอุตสาหกรรมเกษตรไทย อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. สาโรช พูลเทพ

คุณฐิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาระบบตรวจวัดและแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องผ่านระบบ IoTs ด้วยตัวตรวจจับชนิดใยแก้วนำแสงสำหรับประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมเกษตรไทย สารประกอบทางเคมี (Chemistry compounds) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงส่วนปลอก หุ้มชั้นในของสายใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์ (FOR) โดยใช้กลไกของคลื่นอีวานเนสเซน (Mechanisms of evanescent wave) เข้ามาวิเคราะห์ร่วมกับทฤษฎีการหักเหของแสงที่ส่งผลต่อ ความสัมพันธ์ของค่าความเข้มแสง (Intensity) ที่เปลี่ยนแปลง ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) และก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ถูกนำมาพิจารณาในงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งผลการศึกษาและทดสอบการทำงานของระบบตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถตรวจวัดก๊าซชีวภาพเป้าหมายได้จริง โดยสารเงิน (Ag) สามารถนำมาใช้ในการตรวจจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) แต่ไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิม (Recovery) ได้ ขณะที่สารโพลีเฮกซามะทีลีนไบควาโนด์ (PHMB) สามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ได้ นอกจากนั้น ผลการทดลองพบว่าสารประกอบทางเคมีดังกล่าวมีความสามารถในการกลับคืนสู่สภาพเดิมโดยนำกลับมาตรวจวัดซ้ำได้ ทั้งนี้ตัวตรวจจับที่พัฒนาขึ้นสามารถ ตรวจวัดค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ในช่วง 0-1,000 ppm, และ 0-100% สำหรับการ ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตามลำดับ อีกทั้งในการศึกษาพบว่า ค่าความไว (Sensitivity) ของ ตัวตรวจจับที่พัฒนาขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.196 เปอร์เซ็นต์ต่อวินาที และการพัฒนาระบบ IoTs นั้น สามารถตรวจวัดก๊าซชีวภาพเป้าหมายได้ในเวลาจริง (Real-time) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

61406803 : Major ENERGY ENGINEERING

Keyword : Biogas sensing system, Fiber optic refractometer, Sensing element, Chemical compound, Internet of things, Real-time monitoring

MISS Phairin THAISONGKROH : A continuous biogas sensing and monitoring system using a fiber optic based refractometer applied for Thai agricultural industries  
Thesis advisor : Associate Professor Dt. Saroj Pullteap

This thesis is the development of a continuous biogas measurement and monitoring system via the Internet of Things (IoT) using a fiber optic refractometer applied to the Thai agricultural industry. The chemistry compounds have, preliminary, been utilized to remove the fiber cladding of the fiber sensor. By using the mechanism of evanescent waves together with the theory of light refraction, this affects the relationship of changing light intensity values. The hydrogen sulfide and also carbon dioxide gases are taken into account in this research work. The study and testing results showed that the developed measurement system can measure the biogas targets. Besides, the Argentinum (Ag) can perfectly detect hydrogen sulfide gas, but it cannot recover itself. However, the Polyhexamethylene biguanide (PHMB) can also be utilized to measure the carbon dioxide gas. Moreover, the experimental results showed that such a chemical compound (PHMB) can recover itself. This implies that it can be renewable and used at any time. Consequently, the fiber optic sensor can also measure hydrogen sulfide concentration in the range of 0-1,000 ppm, and 0-100% for carbon dioxide measurement, respectively. Furthermore, the sensitivity of the developed system is reported as 0.196 %/sec. Finally, the IoT system can measure the biogas target in real-time effectively.

## กิตติกรรมประกาศ

ดุष्ฎิณิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยได้รับความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.สาโรช พูลเทพ อาจารย์ที่ปรึกษาดุष्ฎิณิพนธ์ ซึ่งให้แนวทางในการศึกษาพร้อมแนวคิดและคำแนะนำต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการทำดุष्ฎิณิพนธ์ในหัวข้อเรื่อง “ระบบตรวจจับและแสดงผลก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องด้วยตัวตรวจจับชนิดใยแก้วนำแสง เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับภาคอุตสาหกรรมเกษตรไทย” รวมถึงงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่อีกหลายฉบับ ตลอดจนถึงในเรื่องของการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินการวิจัย ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์ต่อดุष्ฎิณิพนธ์ในครั้งนี้เป็นอย่างสูงสุด ดังนั้นดุष्ฎิณิพนธ์นี้จะไม่สามารณ์ดำเนินการสำเร็จและลุล่วงไปได้ด้วยดี ถ้าปราศจากอาจารย์ที่ปรึกษาท่านนี้ และข้าพเจ้าขอขอบพระคุณท่านคณะกรรมการสอบทุกท่านที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบป้องกันดุष्ฎิณิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) โดยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) รวมไปถึงได้รับความร่วมมือจาก บริษัท เรย์ลทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาในการดำเนินการดุष्ฎิณิพนธ์ในครั้งนี้ ภายใต้โครงการ พวอ. ปี 2562

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจ คอยเป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้ามีแรงบันดาลใจในการศึกษาและดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ให้แล้วเสร็จได้อย่างสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยดังกล่าวนี้จะเป็็นประโยชน์อย่างมากต่อภาคอุตสาหกรรมเกษตรของประเทศไทย

ไพรินทร์ ไทยสงเคราะห์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตของดุษฎีนิพนธ์.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 สถานที่ดำเนินการ.....	4
1.6 งบประมาณที่ใช้ในการดำเนินงาน.....	5
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินงาน.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ก๊าซชีวภาพ.....	7
2.2 วิวัฒนาการของเครื่องมือวัดค่าดัชนีการหักเหของแสง.....	17
2.3 กลไกการทำงานของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับตรวจวัดก๊าซ.....	24
2.4 สารประกอบทางเคมี.....	28
2.5 รูปแบบการแสดงผลข้อมูลผ่านระบบ IoTs.....	32
2.6 วรรณกรรมวิจารณ์.....	33



บทที่ 3	ขั้นตอนการออกแบบ และวิธีการดำเนินงาน .....	38
3.1	ออกแบบขั้นตอนการดำเนินงานของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง ชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์ผ่านระบบ IoTs .....	39
3.2	การออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิด รีแฟรก โทรมิเตอร์ และการแสดงผลผ่านระบบ IoTs .....	40
3.3	ออกแบบการทดสอบการทำงานของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง ชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์ .....	47
3.4	วัสดุ และอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในดัชนีพนธ์ .....	48
บทที่ 4	ผลการดำเนินงาน และการอภิปรายผลการทดลอง.....	55
4.1	ผลลัพธ์จากการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง ชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์ผ่านระบบอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (IoT) .....	55
4.2	ผลการทดสอบการทำงานของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง .....	67
4.3	สรุปการอภิปรายผลการทดลอง.....	74
บทที่ 5	สรุปผลการดำเนินงาน .....	79
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	79
5.2	ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน .....	81
5.3	ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการทดลอง .....	82
5.4	แนวทางในการพัฒนาต่อในอนาคต.....	83
รายการอ้างอิง .....		84
ประวัติผู้เขียน .....		92

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1สรุปวรรณกรรมวิจารณ์.....	1
ตารางที่ 4.2 การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำแสงชนิดโหมดเดี่ยว และหลายโหมดบนฉากรับแสง .....	58
ตารางที่ 4.3 ค่าความเข้มแสงที่วัดได้จากตัวตรวจจับแสง (PD).....	60
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าความเข้มชั้นของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการคำนวณ และจากเครื่องมือ วัดก๊าซชีวภาพอ้างอิง.....	73



## สารบัญรูปรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	8
รูปที่ 2.2 กระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์.....	9
รูปที่ 2.3 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบปิด Anaerobic covered lagoon .....	10
รูปที่ 2.4 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบยูเอเอสบี .....	10
รูปที่ 2.5 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบโดมคงที่.....	11
รูปที่ 2.6 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบราง.....	11
รูปที่ 2.7 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบตริงฟิล์มจุลินทรีย์ .....	12
รูปที่ 2.8 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบถังกวนสมบูรณ์ .....	13
รูปที่ 2.9 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อหมักไร้ออกซิเจนแบบปิด .....	13
รูปที่ 2.10 เครื่องมือวัดก๊าซชีวภาพ; (ก) แบบพกพา และ (ข) แบบต่อเนื่อง) .....	14
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ .....	15
รูปที่ 2.12 โครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	16
รูปที่ 2.13 ลักษณะการหักเห และการสะท้อนของแสง.....	18
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างเครื่องมือวัดดัชนีการหักเหของแสงของ Ernst Abbé .....	19
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงแบบทั่วไป .....	20
รูปที่ 2.16 ลักษณะการเดินทางของแสงภายในสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว และหลายโหมด..	21
รูปที่ 2.17 ลักษณะการสะท้อนกลับของแสงภายในสายใยแก้วนำแสง .....	21
รูปที่ 2.18 ลักษณะต่าง ๆ ของกำลังทางแสงระหว่างขาเข้า ( $P_{in}$ ) และขาออก ( $P_{out}$ ); (ก) เมื่อ $n_{core} > n_{cladding}$ (ข) เมื่อ $n_{core} = n_{cladding}$ (ค) เมื่อ $n_{core} < n_{cladding}$ .....	23
รูปที่ 2.19 การเดินทางของแสงภายในตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์ .....	24
รูปที่ 2.20 ลักษณะการเดินทางของแสงที่ทำให้เกิดคลื่นอิวานเนสเซนส์ .....	25

รูปที่ 2.21 ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดฟาบริ-เปอร์ตอินเตอร์พรีอิมิตอร์.....	27
รูปที่ 2.22 ตัวอย่างกรดกัดแก้ว (Hydrofluoric acid: HF).....	29
รูปที่ 2.23 สารเงิน (Argentum).....	29
รูปที่ 2.24 โพลีไวนิลบิวทีรัล (Polyvinyl butyral).....	30
รูปที่ 2.25 โพลีเฮกซาเมทิลีนไบกวาไนด์ (Polyhexamethylene biguanide).....	30
รูปที่ 2.26 ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol).....	31
รูปที่ 2.27 เมทานอล (Methanol).....	31
รูปที่ 2.28 อินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things).....	32
รูปที่ 3.1 ผังโครงสร้างการดำเนินงาน.....	38
รูปที่ 3.2 ผังแนวคิดสำหรับการตรวจวัดคุณสมบัติ และความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ ด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิตอร์.....	39
รูปที่ 3.3 ระบบตรวจวัดและแสดงผลของก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิด รีแฟรกโทรมิตอร์ผ่านระบบ IoTs.....	41
รูปที่ 3.4 การออกแบบโครงสร้างการวัดขนาดลำแสงของสายใยแก้วนำแสง.....	42
รูปที่ 3.5 ออกแบบโครงสร้างระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพเพื่อดำเนินการทดสอบคุณสมบัติ ของสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด.....	43
รูปที่ 3.6 ออกแบบกระบวนการพัฒนาส่วนหัววัด; (ก) การเตรียมสายใยแก้วนำแสง เพื่อลอกปลอกหุ้มชั้นใน (ข) ลอกปลอกหุ้มชั้นในด้วยกรดกัดแก้ว และ (ค) ลักษณะหลังการลอกปลอกหุ้มชั้นในของสายทั้ง 2 ชนิด.....	44
รูปที่ 3.7 ออกแบบระบบตรวจวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด ....	45
รูปที่ 3.8 ออกแบบระบบตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง ชนิดรีแฟรกโทรมิตอร์.....	46
รูปที่ 3.9 ผังการทำงานของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพผ่านระบบ IoTs.....	47
รูปที่ 3.10 วิธีการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพ.....	48
รูปที่ 3.11 อุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสงเดี่ยว.....	49

รูปที่ 3.12 สายใยแก้วนำแสงไดโอดเลเซอร์ .....	49
รูปที่ 3.13 ตัวควบคุมกระแสของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ .....	50
รูปที่ 3.14 ตัวควบคุมอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ .....	50
รูปที่ 3.15 สายใยแก้วนำแสง 1x2 Fiber couple.....	51
รูปที่ 3.16 สายใยแก้วนำแสง 1x4 Fiber couple.....	51
รูปที่ 3.17 ตัวตรวจจับแสง (Photodetector).....	52
รูปที่ 3.18 เครื่องแสดงรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า .....	52
รูปที่ 3.19 ตัวอย่างบอร์ดทางแสงที่ใช้ในการดำเนินงาน .....	53
รูปที่ 3.20 เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพมาตรฐาน .....	53
รูปที่ 4.1 ระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทมิเตอร์.....	55
รูปที่ 4.2 กระบวนการพัฒนาส่วนหัววัด; (ก) การเตรียมสายใยแก้วนำแสงไปลอกปลอกหุ้มชั้นใน (ข) ลอกปลอกหุ้มชั้นในด้วยกรดกัดแก้ว และ (ค) ลักษณะการลอกปลอกหุ้มชั้นในของสายทั้ง 2 ชนิด ..	57
รูปที่ 4.3 โครงสร้างการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำแสง .....	58
รูปที่ 4.4 ระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทมิเตอร์; (ก) โครงสร้างของระบบตรวจวัด และ (ข) ส่วนหัววัดที่ถูกปกด้วยสารประกอบทางเคมี .....	59
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการวัดและค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนของแสงในสภาวะต่าง ๆ ที่ได้จากสายใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทมิเตอร์ .....	61
รูปที่ 4.6 กระบวนการพอกสารประกอบเคมี; (ก) เตรียมสายใยแก้วนำแสงที่ลอกปลอกหุ้มชั้นในออก (ข) สารประกอบเคมี Ag และ PVB (ค) นำสารประกอบทางเคมีหยดลงบนแม่พิมพ์ และ (ง) พอกสารประกอบทางเคมีแทนที่ปลอกหุ้มชั้นใน.....	62
รูปที่ 4.7 กระบวนการพอกสารประกอบเคมี; (ก) เตรียมสายใยแก้วนำแสงที่ลอกปลอกหุ้มชั้นในออก (ข) สารประกอบเคมี PHMB และ Methanol (ค) นำสารประกอบทางเคมีหยดลงบนแม่พิมพ์ และ (ง) พอกสารประกอบทางเคมีแทนที่ปลอกหุ้มชั้นใน.....	63
รูปที่ 4.8 หน้าจอการเข้าสู่ระบบ.....	64
รูปที่ 4.9 หน้าจอเมนูหลัก .....	65
รูปที่ 4.10 หน้าจอการแสดงผลการตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่อง.....	66

รูปที่ 4.11 หน้าจอเมนูย่อย.....	66
รูปที่ 4.12 หน้าจอเมนูย่อย.....	67
รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบการวัดค่าความเข้มแสงของสายใยแก้วนำแสงแบบปกติ .....	67
รูปที่ 4.14 ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบการวัดค่าความเข้มแสงของสายใยแก้วนำแสงที่ผ่าน การลอก ปลอกหุ้มชั้นใน .....	68
รูปที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์การลดทอนของสายใยแก้วนำแสงเมื่อลอกปลอกหุ้มชั้นใน ระยะเท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร.....	69
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบการวัดค่าความเข้มแสงของสายใยแก้วนำแสง เมื่อดำเนินการพอก สารประกอบทางเคมี.....	70
รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบการวัดค่าความเข้มแสงของสายใยแก้วนำแสงเมื่อดำเนินการพอก สารประกอบทางเคมี และมีการบรรจุก๊าซชีวภาพเข้าสู่ระบบ (500 ppm).....	71
รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบการวัดค่าความเข้มแสงของสายใยแก้วนำแสงเมื่อดำเนินการพอก สารประกอบทางเคมี และมีการอัดก๊าซชีวภาพเข้าสู่ระบบ (1,000 ppm) .....	71
รูปที่ 4.19 เปอร์เซ็นต์การลดทอนที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวตรวจวัดเมื่อมีการบรรจุก๊าซชีวภาพเข้าสู่ ระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพ .....	72
รูปที่ 4.20 เส้นตรงจากการประมาณข้อมูลของค่าความเข้มชั้นของก๊าซชีวภาพกับผลต่างแรงดันไฟฟ้า .....	73
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มชั้นของก๊าซชีวภาพที่ได้จากเครื่องมือวัดอ้างอิง และตัว ตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้น .....	74
รูปที่ 4.22 ลักษณะสีของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่พอกสารเงิน (Ag) เมื่อไปสัมผัสกับ ก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์; (ก) ตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพก่อนบรรจุก๊าซ และ (ข) ตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพหลัง บรรจุก๊าซ .....	75
รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับ ตรวจวัดก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	76
รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของตัวตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	77

รูปที่ 4.25 ลักษณะสีของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่พอกสารโพลีเอทิลีนไบควาไนต์ (PHMB) เมื่อไปสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์; (ก) ตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพก่อนบรรจุก๊าซ และ (ข) ตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพหลังบรรจุก๊าซ ..... 77



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญ

อุตสาหกรรมเกษตรไทย (Thai agriculture industry) นับเป็นอันดับต้น ๆ ของเอเชีย และเป็นอันดับ 8 ของโลก รองจากสหภาพยุโรป สหรัฐอเมริกา จีน แคนาดา บราซิล อินเดีย ออสเตรเลีย และชิลี [1] ซึ่งมีการส่งออกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากผลผลิตทางการเกษตรไม่ว่าจะเป็น ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (Finished product) หรือผลิตภัณฑ์แปรรูป (Processed products) เช่น อุตสาหกรรมอาหารแปรรูป (Food processed industry), อุตสาหกรรมฟอกหนัง (Tanning leather industry), อุตสาหกรรมยางพาราแปรรูป (Rubber processed industry), และ อุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive industry) เป็นต้น นอกจากนี้ ในภาคอุตสาหกรรมไทยยังมี โรงงานที่เกี่ยวข้องกับการเกษตรอยู่เป็นจำนวนมาก [2] อาทิเช่น ฟาร์มปศุสัตว์ (Ranchland), โรงงานน้ำตาล (Sugar factory), โรงงานแป้งมันสำปะหลัง (Tapioca starch factory), โรงงานกระดาษ (Paper mill) ฯลฯ ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้มักจะปรากฏของเสียออกมาในระหว่าง กระบวนการผลิต เช่น มูลสัตว์ (Dung), ชานอ้อย (Bagasse), เศษอาหาร ผัก ผลไม้ (Food scraps), และน้ำเสีย (Waste water) ส่งผลทำให้เกิดมลพิษทั้งทางน้ำ ทางอากาศ ต่อมนุษย์ สัตว์ และสิ่งมีชีวิต ต่าง ๆ ฉะนั้นเพื่อเป็นการลดปัญหาที่เกิดขึ้น ทำให้มีการนำเอาของเสียดังกล่าวมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ (Biogas) ซึ่งการผลิตก๊าซชีวภาพนั้นจะต้องอาศัยกระบวนการในหลายขั้นตอน โดยเริ่มจากการหมัก และย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่อยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) จนทำให้เกิดเป็น ก๊าซธรรมชาติหรือที่เรียกกันว่าก๊าซชีวภาพนั่นเอง [3]-[4] อีกทั้งองค์ประกอบของก๊าซดังกล่าวนี้จะถูก ผสมผสานกันระหว่างก๊าซชนิดต่าง ๆ จำพวกก๊าซมีเทน (Methane), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide), ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen: N<sub>2</sub>), ก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen: H<sub>2</sub>), และก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide: H<sub>2</sub>S) เป็นต้น ทั้งนี้ในระหว่างกระบวนการผลิตนั้น ก๊าซชีวภาพจะถูกกำเนิดขึ้นอยู่ตลอดเวลาทำให้มีปริมาณและความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และจะก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้ปฏิบัติงานภายในโรงงานได้ ดังนั้นโรงผลิตก๊าซชีวภาพ หรือ โรงงานไฟฟ้าที่ใช้พลังงานจากก๊าซชีวภาพ จึงต้องปฏิบัติตามกฎระเบียบของกระทรวงพลังงานอย่างเคร่งครัดในเรื่องของความปลอดภัย (Biogas safety) [5] เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดอุบัติเหตุ เกี่ยวกับการระเบิดและการเกิดอัคคีภัยภายในโรงผลิตนั้น ๆ โดยทางโรงผลิตก๊าซชีวภาพ หรือ



โรงไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานชีวภาพที่ยังดำเนินธุรกิจอยู่ ณ ปัจจุบัน รวมถึงโรงงานที่กำลังมีแผนจะพัฒนาและก่อตั้งขึ้นใหม่ ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มจำนวนมากขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อให้สอดคล้องกับแผนพัฒนาพลังงานทดแทน และพลังงานทางเลือกช่วง 10 ปี (พ.ศ. 2555 - 2564) ที่กำหนดโดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ซึ่งระบุว่า ภายในปี พ.ศ. 2564 ประเทศไทยจะต้องใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงทดแทนสำหรับการผลิตไฟฟ้ารวม 600 MW และในช่วงปี พ.ศ. 2561 พบว่ามีโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas power plant) ก่อตั้งขึ้นมาแล้วจำนวนทั้งสิ้นประมาณ 1,500 แห่งทั่วประเทศไทย [6] จะต้องดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์หรือมีเครื่องมือในการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพประจำอยู่ทุก ๆ โรงงาน อย่างไรก็ตามเครื่องมือในการตรวจวัดก๊าซชีวภาพนั้น ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมการเกษตรไทยยังคงนำเข้าเครื่องมือวัดดังกล่าวจากต่างประเทศเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานอยู่ เนื่องจากประเทศไทยยังไม่ได้มีการผลิตและพัฒนาเครื่องมือวัดคุณสมบัติและความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพยังไม่ได้มีการพัฒนากันอย่างจริงจังมากนัก ส่งผลทำให้ประเทศสิ้นเปลืองทุนทรัพย์เนื่องจากเครื่องมือวัดชนิดนี้มีราคาสูงถึงประมาณ 200,000 – 1,500,000 บาท / เครื่อง [7] รวมถึงกรณีการส่งซ่อมบำรุง (Maintenance) อาจจะใช้ระยะเวลานานในการดำเนินการ แต่ทั้งหมดนี้จะขึ้นอยู่กับประเภทของเครื่องมือวัดว่าเป็นชนิดแบบพกพา (Portable instrument) หรือชนิดแบบวัดต่อเนื่อง (Continuous instrument) อีกด้วย

นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการตรวจวัดคุณสมบัติ และความเข้มข้นสำหรับก๊าซชีวภาพ พบว่าส่วนใหญ่ผู้ตรวจวัดนิยมใช้เครื่องมือตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบชนิดพกพา (Portable analyzer) โดยมีข้อดี (Advantages) คือ พกพาได้สะดวก มีความน่าเชื่อถือ และใช้งานง่าย ซึ่งเครื่องมือชนิดนี้มีข้อด้อย (Disadvantages) เช่น ไม่สามารถวัดแบบต่อเนื่องได้ (Discrete measurement), ต้องมีผู้ตรวจวัดอยู่ ณ บริเวณพื้นที่ตรวจวัด (Need operator), ไม่สามารถแสดงผลการวัดแบบออนไลน์ (On-line measurement), และไม่สามารถวัดก๊าซในบ่อแบบปิด (Closed-loop measurement) เป็นต้น เพื่อเป็นการแก้ปัญหาในข้างต้นเครื่องมือตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบชนิดต่อเนื่อง (Continuous gas analyzer) จึงถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อการจัดจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ (Commercial) แต่เครื่องมือชนิดนี้ยังคงมีข้อจำกัดในด้านเทคนิคต่าง ๆ อยู่ คือ ไม่สามารถวัดก๊าซในบ่อแบบปิดได้ และยังคงจำเป็นต้องมีผู้ตรวจวัดเข้าไปดำเนินการจดบันทึกผลที่หน้าเครื่องตรวจวัด [8] ซึ่งในการตรวจวัดยังจำเป็นต้องใช้ส่วนหัววัด (Sensing elements) ของก๊าซแต่ละชนิดที่มีความแตกต่างกันในการวัดหรือหาคุณสมบัติของก๊าซชนิดต่าง ๆ อีกทั้งยังมีราคาค่อนข้างสูง (High price) และยังไม่สามารถแสดงผลของการตรวจวัดก๊าซชีวภาพในรูปแบบออนไลน์ผ่านระบบ (Internet of things: IoTs) ได้ ทั้งนี้จากปัญหาข้างต้นทำให้นักวิจัยหลาย ๆ ท่าน ได้มีการนำองค์ความรู้เฉพาะด้านประกอบกับเทคนิคต่าง ๆ ที่มีอยู่มาพัฒนาเป็นเครื่องมือตรวจวัดก๊าซชีวภาพต้นแบบ (Prototype) ขึ้นมา อาทิเช่น A. Rodríguez-Rodríguez *et al.* ได้พัฒนาเครื่องมือวัดความ

เข้มข้นของสารเคมีโดยใช้สายใยแก้วนำแสงหลายโหมดที่มีการแทรกสอด (Multi-mode interference: MMI) มาทำการเคลือบด้วยสารยูนิเวอร์แซล-อินดิเคเตอร์ (Universal indicator) ที่เป็นตัวบ่งชี้ช่วง pH มาประยุกต์ใช้งาน โดยผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำเอาระบบตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้ในการระบุสารรวมถึงของเหลวต่าง ๆ (Identify substances) และมีความแม่นยำสูง (High accuracy) [9] ขณะที่ W. Wen-qing *et al.* ได้กล่าวถึงการปรับความยาวคลื่นด้วยเทคโนโลยีการตรวจจับสัญญาณ โดยใช้หลักการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดด้วยสายใยแก้วนำแสง และใช้วิธีการจำลองการปรับเปลี่ยนค่าฮาร์โมนิกด้วยการนำกฎของ Lambert-Beer มาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งวิธีการตรวจจับดังกล่าวนี้มีความละเอียด (High resolution) และมีความไวสูง (High sensitivity) รวมถึงมีความสามารถในการตรวจจับการตอบสนองของก๊าซชีวภาพได้อย่างรวดเร็ว (Fast responses) [10] นอกจากนี้ H. Zhou *et al.* ยังได้กล่าวถึงวิธีการตรวจวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสายใยแก้วนำแสงชนิดแบร็กเกรตติ้ง (Fiber bragg gating: FBG) โดยการนำสารเงิน (Ag) มาเป็นตัวเคลือบบนผิวในส่วนปลอกหุ้ม (Cladding) ของ FBG เพื่อเพิ่มความเงาและการสะท้อนของแสง จากการทดลองพบว่าสารเงินที่นำมาพอกนั้นมีความสามารถในการดูดกลืนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดี อีกทั้งยังมีการตอบสนองเชิงเส้นของสัญญาณ และมีค่าความไวในการตอบสนองถึง 0.332 dBm ต่อเปอร์เซ็นต์ [11]

ดังนั้นคุณูปการนี้จึงมุ่งเน้นไปในเรื่องของการพัฒนาระบบตรวจวัดและแสดงผลแบบต่อเนื่อง (Continuous measuring and monitoring system) สำหรับระบุคุณสมบัติ (Characterize) และปริมาณความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ (Gas concentration) ด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทมิเตอร์ (Fiber optic based refractometer: FOR) ต้นแบบ (Prototype) โดยจะมุ่งเน้นไปที่การหาปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>), และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) เป็นหลัก ทั้งนี้จะอาศัยหลักการทำงานของตัวตรวจจับชนิดใยแก้วนำแสงมาเป็นระบบตรวจจับหลัก ซึ่งระบบดังกล่าวนี้มีข้อดี คือ มีความไวสูง (High sensitivity), ขนาดเล็ก (Small size), น้ำหนักเบา (Lightweight), ทนทานต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Immunity to electromagnetic wave) และมีความสามารถในการแยกแยะคุณสมบัติของก๊าซต่าง ๆ ได้ [12]-[14] ด้วยการวัดปริมาณทางแสงที่เกิดจากค่าดัชนีการหักเหของแสง (Refractive index) [15] นอกจากนี้ระบบตรวจจับดังกล่าวยังสามารถทำงานร่วมกับการใช้งานของเทคโนโลยี IoTs ซึ่งส่งผลทำให้ผู้ตรวจวัดสามารถอ่านค่าผลที่ได้จากการวัดแบบต่อเนื่องในเวลาจริง (Real time) ได้ในทุก ๆ สถานที่ โดยไม่จำเป็นต้องประจำการอยู่ ณ บริเวณสถานที่ตรวจวัด (On-site measurement) ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายต่อสุขภาพของผู้ตรวจวัดเนื่องจากการสูดดมก๊าซเป็นเวลานาน และเพื่อให้ภาคอุตสาหกรรมได้นำไปพัฒนาและต่อยอด อีกทั้งสามารถนำไปจัดจำหน่ายในเชิงพาณิชย์เพื่อเป็นการลดต้นทุนจากการนำเข้าสินค้าจากต่างประเทศได้อีกประการหนึ่งด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดและแสดงผลแบบต่อเนื่อง สำหรับระบุถึงคุณสมบัติและปริมาณความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ ด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์ผ่านระบบอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (IoT)

## 1.3 ขอบเขตของคุษุณินิพนธ์

1.3.1 ออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดพร้อมทั้งแสดงผลแบบต่อเนื่อง สำหรับระบุคุณสมบัติและปริมาณ ความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์ผ่านระบบ IoTs

1.3.2 ก๊าซชีวภาพที่ใช้จะถูกทดลองในภาชนะทดลอง (Chamber) เท่านั้น โดยจะมีส่วนหัววัด (Sensing elements) ที่ทำมาจากสายใยแก้วนำแสง ติดตั้งอยู่ภายในภาชนะดังกล่าวในลักษณะของการวัดแบบระบบปิด (Closed-loop measurement)

1.3.3 พัฒนาโมดูลสื่อสาร (Communication) ที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบ IoTs โดยโครงสร้างภายในประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับควบคุมการส่งผ่านข้อมูลแบบไร้สาย

1.3.4 พัฒนาซอฟต์แวร์ประยุกต์ทางวิศวกรรมในการประมวลผลข้อมูลที่วัดได้จากตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์ โดยแสดงผลเป็นคุณสมบัติ และปริมาณความเข้มข้นของก๊าซต่าง ๆ ในรูปแบบของตัวเลข หรือกราฟ

1.3.5 ใช้เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติและความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ (Biogas analyser) เพื่อทำหน้าที่เป็นเครื่องมือตรวจวัดอ้างอิง (Reference instrument) สำหรับใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น และค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่อง (Continuous measurement) ในลักษณะบ่อแบบปิด (Closed-loop measurement)

1.4.2 การตรวจวัดก๊าซชีวภาพสามารถแสดงผลแบบออนไลน์ (On-line measurement)

## 1.5 สถานที่ดำเนินการ

1.5.1 ห้องปฏิบัติการระบบฝังตัวทางกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร (วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์)

1.5.2 Laboratory for Analysis and Architecture of Systems (LAAS), Universite de Toulouse, CNRS, Institut National Polytechnique, Toulouse, France.

#### 1.6 งบประมาณที่ใช้ในการดำเนินงาน

ดุชนิพนธ์นี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) โดยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) เป็นจำนวนเงินทั้งสิ้น 1,973,000 บาท อีกทั้งยังได้รับความร่วมมือจาก บริษัท เรือททรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด ภายใต้โครงการ พวอ. ปี 2562



1.7 ระยะเวลาในการดำเนินงาน

ขั้นตอนการทำงาน	2564												2565												2566											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ศึกษาข้อมูลและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	↕																																			
2. สืบค้นแนวทางการออกแบบและพัฒนาระบบ	↕																																			
3. ออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดคุณสมบัติ และปริมาณความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ	↕																																			
4. พัฒนางจรปรับแต่งสัญญาณและเชื่อมต่อโมดูลสื่อสารผ่าน Iots	↕																																			
5. พัฒนาซอฟต์แวร์ประยุกต์ทางวิศวกรรมสำหรับประมวลผลข้อมูล	↕																																			
6. เชื่อมต่อระบบที่พัฒนาขึ้นเข้ากับเครื่องวัดก๊าซชีวภาพอ้างอิง	↕																																			
7. ทดสอบและบันทึกผลการทดลอง	↕																																			
8. วิเคราะห์และอภิปรายผล	↕																																			
9. สรุปและจัดทำรูปเล่มรายงานผลการทำงาน	↕																																			
10. สอบคุษฎีนิพนธ์	↕																																			
11. จัดส่งเล่มรายงานคุษฎีนิพนธ์	↕																																			

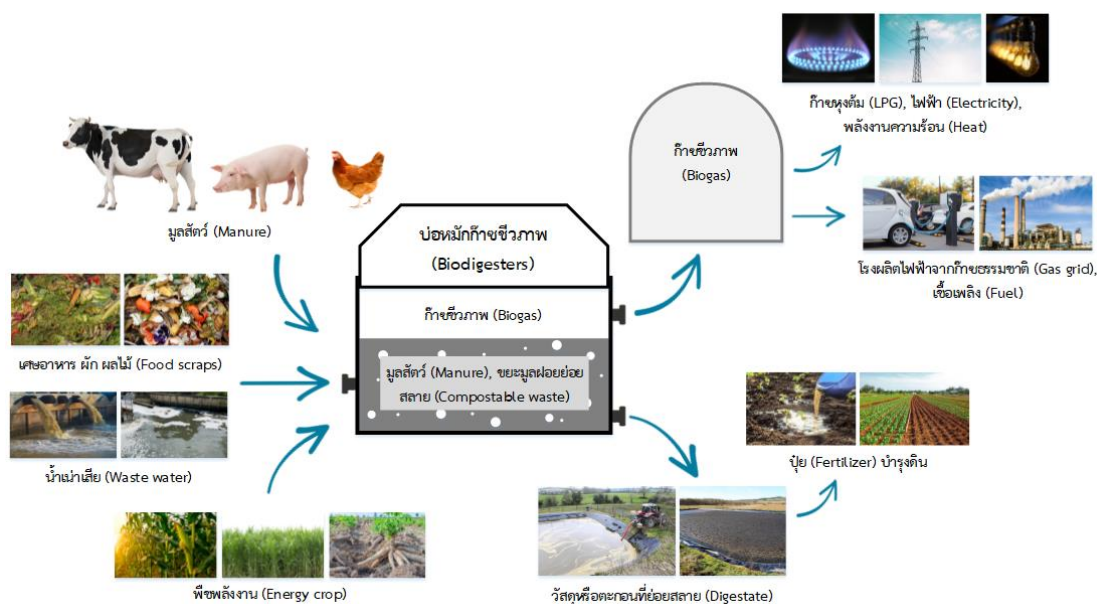
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้เป็นกรกล่าวถึงทฤษฎี องค์ความรู้ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนีนิพนธ์ ซึ่งจะอภิปรายเกี่ยวกับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดก๊าซชีวภาพ สารประกอบทางเคมีที่ทำปฏิกิริยาในการดูดซึมองค์ประกอบของก๊าซเป้าหมาย กลไกการทำงานของตัวตรวจจับชนิดใยแก้วนำแสง และอุปกรณ์ทางแสงต่าง ๆ ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาระบบตรวจวัดดังกล่าว รวมถึงองค์ความรู้เกี่ยวกับระบบอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet of things) โดยจะสามารถแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.1 ก๊าซชีวภาพ

แหล่งกำเนิดก๊าซชีวภาพ (Biogas origin) มักเกิดจากน้ำเน่าเสีย กากใยพืช และเศษอาหารที่ถูกปล่อยออกมาระหว่างกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมแปรรูป ได้แก่ อุตสาหกรรมการผลิตแป้งจากมันสำปะหลัง (Tapioca starch industry), อุตสาหกรรมกระดาษ (Paper industry), อุตสาหกรรมยาง (Rubber industry), อุตสาหกรรมอาหาร (Food industry), อุตสาหกรรมเอทานอล (Ethanol industry), อุตสาหกรรมสุราและเบียร์ (Spirits and beer industry), อุตสาหกรรมปาล์ม (Palm industry), และอุตสาหกรรมที่ได้จากพืชผลทางการเกษตร (Agricultural crops industry) เป็นต้น รวมถึงมูลสัตว์ที่ได้จากฟาร์มปศุสัตว์ เช่น ฟาร์มสุกร ฟาร์มโค และฟาร์มสัตว์อื่น ๆ ซึ่งอุตสาหกรรม และฟาร์มปศุสัตว์ดังกล่าวสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ประมาณ 1,311.33 และประมาณ 879.61 ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อรวมการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดจะได้มากกว่า 2,000 ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี [16] โดยกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพนั้นสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ

ที่มา: <https://pixabay.com/th/>, <https://www.spbiotec.co.uk/digestate-fertiliser/>, <https://www.farmersjournal.ie/news/news/new-digestate-treatment-project-launched-685861>, <https://www.prachachat.net/columns/news-596177>

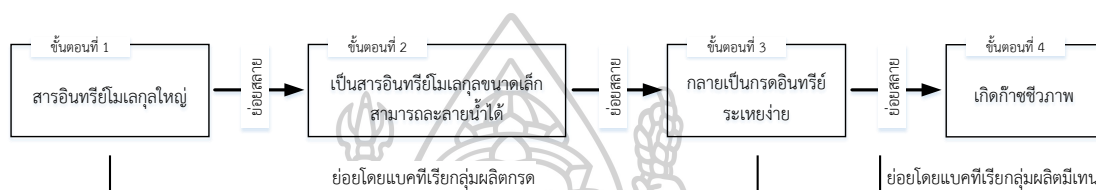
อย่างไรก็ตาม กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพที่เกิดจากระบบการผลิตก๊าซในข้างต้นนั้น เกิดจากการหมักและย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่อยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) จนทำให้เกิดเป็นก๊าซธรรมชาติหรือก๊าซชีวภาพนั่นเอง ก๊าซชีวภาพ (Biogas) จะมีองค์ประกอบของก๊าซชนิดต่าง ๆ ผสมผสานกันอยู่ภายใน เช่น ก๊าซมีเทน (Methane:  $\text{CH}_4$ ), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide:  $\text{CO}_2$ ), ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen:  $\text{N}_2$ ), ก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen:  $\text{H}_2$ ), ก๊าซออกซิเจน (Oxygen:  $\text{O}_2$ ), และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide:  $\text{H}_2\text{S}$ ) เป็นต้น ทั้งนี้ในการเกิดก๊าซชีวภาพนั้นจะต้องอาศัยปฏิกิริยาทางชีวภาพในกระบวนการหมักและย่อยสลายของสารอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ๆ [17] ต่อไปนี้

**ขั้นตอนที่ 1** ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) หรือการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างของโมเลกุลขนาดใหญ่ที่สามารถละลายน้ำได้ และไม่สามารถละลายน้ำได้ จำพวกคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เป็นต้น ส่งผลทำให้โครงสร้างของโมเลกุลลดลง และสามารถละลายน้ำได้

**ขั้นตอนที่ 2** อะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) หรือการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็ก และสามารถละลายน้ำได้ ซึ่งผลที่ได้จากการย่อยสลายนั้นจะได้สารที่เป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่เรียกว่า น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการทำให้เป็นกรดระเหยง่าย (Volatile acid) นั่นเอง

ขั้นตอนที่ 3 อะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis) คือ กระบวนการเปลี่ยนจากกรดระเหยง่ายให้เป็นสารประกอบที่สำคัญสำหรับการสร้างก๊าซมีเทน โดยสารประกอบดังกล่าวจะเป็นจำพวกสารอะซิเตท ฟอร์เมต ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 4 เมทาโนเจเนซิส (Methanogenesis) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแบคทีเรียจำพวกกลุ่มที่ผลิตกรด เช่น กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), กรดโพรพิโอนิก ( $\text{C}_2\text{H}_7\text{COOH}$ ), กรดบิวทิริก ( $\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$ ), และสารประกอบอื่น ๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ), ไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) บางส่วนเพื่อให้เกิดเป็นก๊าซมีเทน ดังแสดงในรูปที่ 2.2

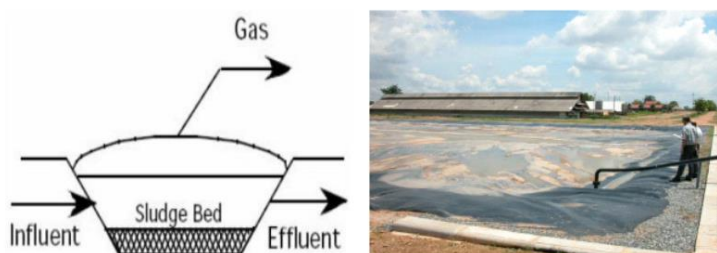


รูปที่ 2.2 กระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์

จากรูปที่ 2.2 เป็นการอธิบายกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์ด้วยแบคทีเรียที่อยู่ในภาวะแวดล้อมแบบไร้ออกซิเจน เพื่อนำไปสู่การเกิดก๊าซชีวภาพที่สมบูรณ์ ทั้งนี้ในการเกิดก๊าซชีวภาพนั้นทางโรงงานอุตสาหกรรม และฟาร์มปศุสัตว์มักจะปล่อยน้ำเสียที่ได้จากการชะล้างสิ่งสกปรกต่าง ๆ ทำให้ส่งกลิ่นเหม็น และเป็นการทำลายระบบนิเวศน์ ซึ่งการแก้ปัญหาในข้างต้นจำเป็นต้องนำน้ำเน่าเสียดังกล่าวมาเข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยบางโรงงานหรือบางฟาร์มมักจะใช้วิธีการชุดบ่อแบบผึ่ง (Oxidation pond) ซึ่งระบบดังกล่าวจะเป็นการเติมออกซิเจนเข้าไปในน้ำด้วยวิธีการทางธรรมชาติ คือ อาศัยแสงแดด และลม บ่อชนิดนี้มีความลึกอยู่ระหว่าง 60 – 150 เซนติเมตร ค่อนข้างที่จะตื้นเขิน ทั้งนี้เพื่อให้แสงแดดสามารถส่องลงไปใต้ผิวน้ำอย่างทั่วถึง อีกทั้งยังใช้พื้นที่ค่อนข้างกว้าง จำเป็นจะต้องมีการชุดลอกคลองอยู่เป็นประจำเนื่องจากมีตะกอน และตะไคร่น้ำที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย [18] ในขณะเดียวกันภาคอุตสาหกรรม โรงงาน และฟาร์มเลี้ยงสัตว์ที่มีขนาดใหญ่ มักจะอาศัยเครื่องจักรกลหรือเทคโนโลยีต่าง ๆ เข้ามาช่วยในส่วนของการผลิตก๊าซชีวภาพ และการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งในประเทศไทยจะมีเทคโนโลยีในการผลิตและบำบัดอยู่ด้วยกันหลายวิธีการ ขึ้นอยู่กับสถานที่ติดตั้ง สิ่งแวดล้อมโดยรอบ และปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากฟาร์มปศุสัตว์ หรือโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปต่าง ๆ โดยเทคโนโลยีที่นิยมใช้ภายในประเทศ จะถูกแบ่งออกเป็น 7 ระบบหลัก ๆ [19] ได้แก่



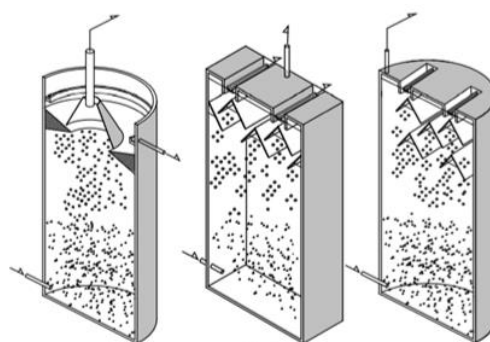
- ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบปิด (Anaerobic covered lagoon) คือ บ่อบำบัดน้ำเสียที่มีโครงสร้างเป็นระบบแบบปิด คลุมด้วยผ้าพลาสติกที่วัสดุมีความยืดหยุ่น เพื่อทำหน้าที่เป็นส่วนกักเก็บก๊าซชีวภาพที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายของแบคทีเรียภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งระบบดังกล่าวนี้สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำได้ทั้งหมด 3 ด้าน ได้แก่ ด้านกายภาพ ด้านชีวภาพ และด้านเคมี กล่าวคือจะช่วยลดความขุ่น กลิ่น สี ความเป็นกรด-ด่างของน้ำ ลดค่า BOD และค่า COD อีกด้วย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบปิด Anaerobic covered lagoon

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

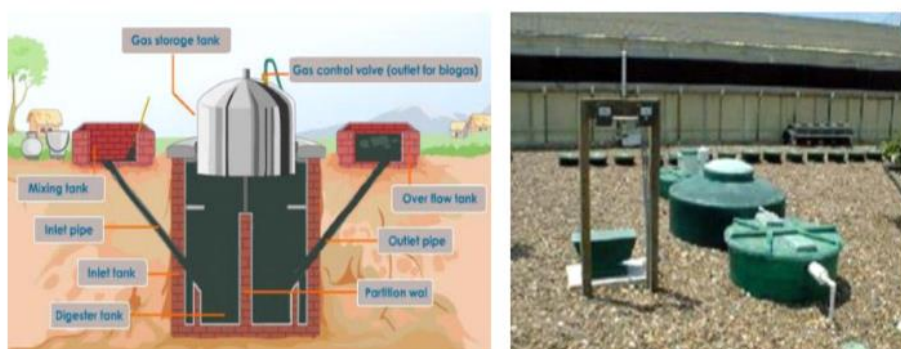
- ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบยูเอเอสบี (Upflow anaerobic sludge blanket: UASB) จะถูกนำมาใช้ในการจัดการเกี่ยวกับระบบน้ำเน่าเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งนี้ยังเป็นระบบพลังงานต่ำ ไม่ต้องใช้สารตัวกลางเพื่อให้แบคทีเรียเกาะติดทำให้เกิดตะกอนน้อยลงเนื่องจากไม่มีการเติมออกซิเจนเข้าไปในระบบ และใช้สารเคมีในการปรับค่า pH น้อย แต่จะขึ้นอยู่กับความเป็นต่าง และ pH ของน้ำที่เข้ามาในระบบ โดยลักษณะการทำงานของระบบ UASB นั้นจะเป็นการช่วยลดการใช้เชื้อเพลิง และช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) รวมถึงก๊าซเรือนกระจกอื่น ๆ สู่ชั้นบรรยากาศที่ก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน สามารถแสดงได้ดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบยูเอเอสบี

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

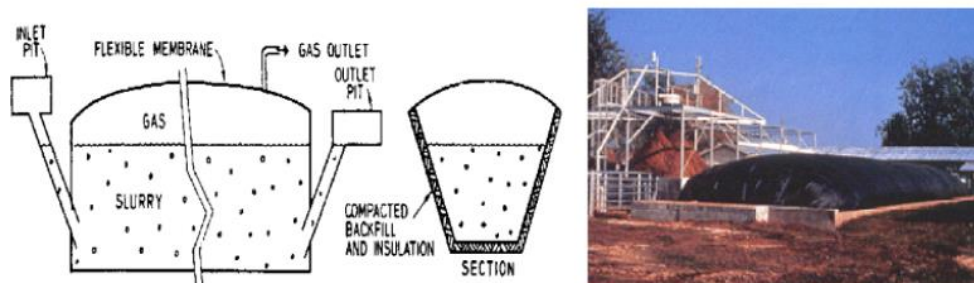
- ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบโดมคงที่ (Fixed dome digester) เป็นบ่อหมักลักษณะทรงกลมฝังอยู่ใต้ดิน ตัวถังเก็บก๊าซมีลักษณะเป็นโดม ข้อดีของบ่อหมักชนิดนี้ คือ ประหยัดพื้นที่เนื่องจากถังหมักอยู่ใต้ผิวดินทำให้เวลาระบายน้ำมูลสุกรจากโรงเรือนไปสู่บ่อหมักนั้นง่าย และสะดวก เพราะจะอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก อีกทั้งภายในบ่อหมักยังมีอุณหภูมิค่อนข้างคงที่ทำให้การหมักก๊าซชีวภาพเป็นไปอย่างต่อเนื่อง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบโดมคงที่

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

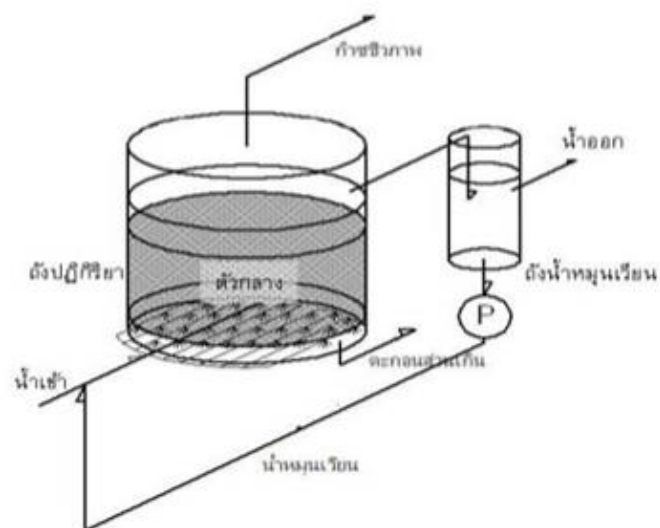
- ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบราง (Plug flow digester) เป็นระบบที่มีหลักการทำงานคล้ายกับระบบแบบ Covered lagoon มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูฝังอยู่ใต้ดินที่กักเก็บก๊าซจะมีลักษณะเป็นผ้าพลาสติก (Red mud plastic) คลุมส่วนบนของบ่อหมัก และมีแผ่นคอนกรีตกั้นเพื่อป้องกันการไหลของน้ำเสีย ซึ่งข้อดีของบ่อลักษณะนี้ คือ ได้ปริมาณของก๊าซจำนวนมากขึ้นเนื่องจากบ่อมีลักษณะเป็นแนวทำให้ต้องใช้เวลาในการหมักของเสียเป็นเวลานาน ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบราง

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

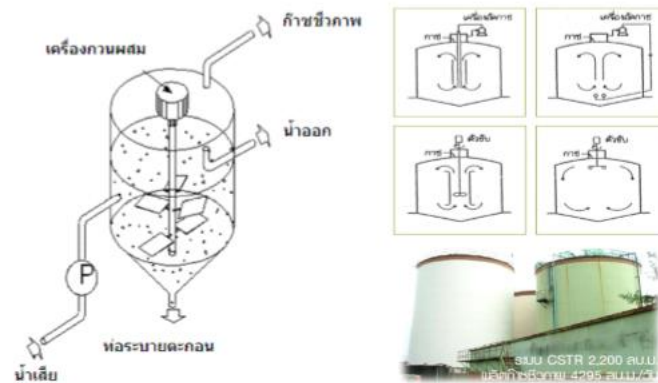
- ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic fixed film: AFF) จะเป็นถังกรองแบบไม่ใช้ออกซิเจน ภายในถังบรรจุวัสดุตัวกลางเอาไว้เพื่อให้น้ำเสียไหลผ่านชั้นตัวกลางดังกล่าว ซึ่งมีทิศทางการไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบน (Up flow) หรือจากด้านบนลงด้านล่าง (Down flow) ระบบบำบัดนี้เข้าได้ดีกับน้ำเน่าเสียที่มีปริมาณสารแขวนลอยต่ำกว่า 500 มิลลิกรัม/ลิตร ไม่เช่นนั้นอาจก่อให้เกิดการอุดตันตามช่องว่างระหว่างตัวกลางได้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

- ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบถังกวนสมบูรณ์ (Completely stirred tank reactor: CSTR) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียถูกพัฒนาขึ้นมาจากถังย่อยสลายแบบธรรมดา (Conventional anaerobic digester) ที่มีประสิทธิภาพต่ำ โดยถังกวนสมบูรณ์นี้มีระบบการกวนผสมได้ดีทำให้แบคทีเรียและน้ำเสียผสมกันอย่างทั่วถึง และไม่เกิดการไหล ซึ่งระบบบำบัดนี้เหมาะกับน้ำเน่าเสียที่มีสารแขวนลอยสูง เนื่องจากมีการนำออกของสารแขวนลอยได้ดีทำให้ลดความเสี่ยงในการเกิดตะกอนภายในถังหมัก สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



### รูปที่ 2.8 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบถังกวนสมบูรณ์

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

- ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อหมักไร้ออกซิเจนแบบปิด (Modified covered lagoon: MCL) เป็นระบบที่พัฒนามาจากระบบ Covered lagoon โดยเพิ่มประสิทธิภาพในการสัมผัสระหว่างจุลินทรีย์และของเสีย บ่อหมักจะมีลักษณะการไหลของน้ำเสียตามแนวยาว (Horizontal flow) ซึ่งได้ถูกออกแบบมาให้มีการหมักและย่อยสลายอย่างต่อเนื่อง ส่วนก๊าซชีวภาพที่ได้จากการผลิตจะถูกกักเก็บไว้ในผ้าพลาสติกที่คลุมบ่อหมัก อีกทั้งยังเพิ่มระบบการดึงกากตะกอนจากระบบเพื่อลดปัญหาด้านการทำงานของกลไก ซึ่งจะช่วยให้กระบวนการบำบัดของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



### รูปที่ 2.9 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อหมักไร้ออกซิเจนแบบปิด

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

อย่างไรก็ตาม จากการอธิบายถึงหลักการทำงานของเทคโนโลยีที่นำมาประยุกต์ใช้ภายในโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพ และโรงบำบัดน้ำเสียจำเป็นต้องใช้เครื่องมือในการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น เพื่อความปลอดภัยของเจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงานภายในโรงงานนั้น ๆ เป็นหลัก อีกทั้งยังเป็นการปฏิบัติตามกฎระเบียบที่ระบุไว้ในคู่มือไบโอแก๊สเซฟตี้ (Biogas safety) ของ

กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ซึ่งในการตรวจวัดก๊าซชีวภาพนั้น จำเป็นต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์เฉพาะด้าน โดยจะแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

### 2.1.1 เครื่องมือตรวจวัดก๊าซชีวภาพ (Instrumentation for biogas sensing)

โรงงานอุตสาหกรรมการผลิตก๊าซชีวภาพไม่ว่าจะเป็นขนาดเล็ก ขนาดกลาง หรือขนาดใหญ่ จำเป็นต้องใช้เครื่องมือตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซที่เกิดขึ้น นอกจากจะเป็นการป้องกันและรักษาความปลอดภัยให้กับเจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงาน ยังเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเกินปริมาณของแต่ละโรงงานกำหนดจนก่อให้เกิดการรั่วไหลของก๊าซได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อยังบ้านเรือนที่อยู่อาศัยในบริเวณรอบ ๆ โรงงานผลิตก๊าซชีวภาพ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงวิธีการและเครื่องมือในการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ เครื่องมือตรวจวัดแบบพกพา (Portable instrument) และแบบต่อเนื่อง (Continuous instrument) โดยอุปกรณ์ตรวจวัดดังกล่าวนี้สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติ และองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพได้ สามารถแสดงได้ดังนี้



(ก)

(ข)

### รูปที่ 2.10 เครื่องมือวัดก๊าซชีวภาพ; (ก) แบบพกพา และ (ข) แบบต่อเนื่อง

ที่มา: คู่มือไบโอแก๊สเซฟตี้ (Biogas safety) กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

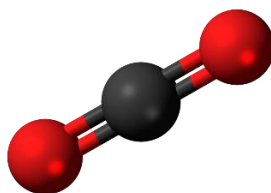
จากรูปที่ 2.10(ก) เป็นเครื่องมือตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบพกพา (Portable analyzer) มีข้อดี คือ พกพาได้สะดวก มีความน่าเชื่อถือ และใช้งานง่าย ซึ่งเครื่องมือชนิดนี้มีข้อด้อย (Disadvantages) คือ ไม่สามารถวัดแบบต่อเนื่องได้ (Discrete measurement), ต้องมีผู้ตรวจวัดอยู่ ณ บริเวณพื้นที่ตรวจวัด (Need operator), ไม่สามารถแสดงผลการวัดแบบออนไลน์, และไม่สามารถวัดก๊าซในบ่อแบบปิด เป็นต้น เพื่อเป็นการแก้ปัญหาข้างต้นเครื่องมือตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่อง (Continuous analyzer) จึงถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อการจัดจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ (Commercial) ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ข) โดยเครื่องมือชนิดดังกล่าวนี้สามารถติดตั้งไว้ภายในโรงงานใกล้เคียงกับบริเวณของบ่อผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งในการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพผู้ตรวจวัดหรือผู้ปฏิบัติการยังจำเป็นต้องดำเนินการตรวจวัดและจดค่าความเข้มข้นของก๊าซแต่ละชนิด ณ บริเวณหน้า

เครื่องมือหรืออุปกรณ์ตรวจวัดอยู่ อย่างไรก็ตามเครื่องมือชนิดนี้ยังคงมีข้อจำกัดในด้านเทคนิคต่าง ๆ คือ ไม่สามารถวัดก๊าซในบ่อแบบปิด จำเป็นต้องใช้หัววัดของก๊าซ (Sensing elements) แต่ละชนิดแตกต่างกันในการวัด หรือหาคุณสมบัติของก๊าซชนิดต่าง ๆ อีกทั้งยังมีราคาสูง (High price) และไม่สามารถแสดงผลการวัดแบบออนไลน์ผ่านระบบ IoTs (Internet of things) ได้ ดังนั้นจากปัญหาที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นทำให้มีนักวิจัยหลาย ๆ ท่าน ได้มีการนำศาสตร์และศิลป์เข้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกับการพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดก๊าซชีวภาพกันอย่างต่อเนื่อง

### 2.1.2 โครงสร้างองค์ประกอบของก๊าซเป้าหมายที่ใช้ในคุษุณินพณ์

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) จะมีองค์ประกอบภายในของก๊าซ จำพวกก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ), ก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ), ก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ), ก๊าซออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ), และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) เป็นต้น ซึ่งคุษุณินพณ์นี้จะกล่าวถึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นหลัก สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

- ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) เป็นอีกหนึ่งก๊าซที่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจก (Greenhouse gases) ในชั้นบรรยากาศส่งผลทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change) คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่ไม่มีสี (Colorless), ไม่มีกลิ่น (No smell), ไม่มีรสชาติ (Tasteless), สามารถละลายน้ำได้ (Dissolve in water), ก่อให้เกิดกรดคาร์บอนิกที่มีฤทธิ์กัดกร่อน, และเป็นพิษต่อมนุษย์ที่สุดดมเข้าสู่ร่างกายในปริมาณมากเกินไปเกินมาตรฐาน คือ 800 – 1,500 ppm (Part per million) หรือ 0.08 – 0.15 เปอร์เซ็นต์ จะรู้สึกเปรี้ยวที่ปาก เกิดการระคายเคืองที่จมูกและคอ ส่งผลทำให้ร่างกายมีเหงื่อออกมาก อัตราการเต้นของหัวใจสูงขึ้น และหายใจติดขัด [20] ขณะเดียวกันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็เป็นสิ่งสำคัญที่สุดในโลกเช่นกัน เพราะว่าการดำรงชีวิตของพืชพันธุ์ และต้นไม้ทั้งหมดจะต้องอาศัยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการสร้างอาหาร (Photosynthesis) เป็นหลัก เช่นเดียวกับมนุษย์ที่ต้องอาศัยก๊าซออกซิเจนในการดำรงชีวิตเช่นกัน ทั้งนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีสูตรทางเคมี คือ  $\text{CO}_2$  ซึ่งจะประกอบไปด้วยโมเลกุลพันธะคู่ทั้งหมด 3 อะตอม คือ อะตอมคาร์บอน (C) 1 อะตอม และอะตอมออกซิเจน (O) 2 อะตอม คือ  $\text{O}=\text{C}=\text{O}$  โดยโครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแสดงได้ดังนี้

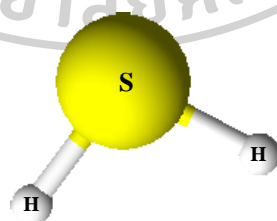


รูปที่ 2.11 ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์

ที่มา: <https://www.istockphoto.com/th/>

จากรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะ สามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ อะตอมคาร์บอน (C) จะอยู่ตรงกลางของโมเลกุล และมีอะตอมออกซิเจน (O) 2 อะตอม เชื่อมต่อกับอะตอมคาร์บอนแบบพันธะคู่ (Double bond) อยู่ด้านข้างทั้ง 2 ของ โมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งไม่ได้มีการเชื่อมต่อกันแบบโดยตรงระหว่างอะตอมออกซิเจน ทั้งนี้ยังเป็นโมเลกุลที่ไม่มีอิสระทางไฟฟ้าหรือโมเลกุลที่ไม่มีขั้วไฟฟ้า (Non-polar) กล่าวคือ ความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ไม่ดี เนื่องจากลักษณะทางกลศาสตร์ของ  $\text{CO}_2$  นั้น มีขั้วบวกและลบที่ไม่ชัดเจน และเป็นโมเลกุลที่ไม่มีการกระจายตัวของอิเล็กตรอนระหว่างอะตอมคาร์บอน และอะตอมออกซิเจนอย่าง ชัดเจน ส่งผลทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีที่เกี่ยวกับการนำไฟฟ้า

- ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide) มีสูตรทางเคมี คือ  $\text{H}_2\text{S}$  เป็นสารละลาย น้ำได้ (Aqueous solution), ไม่มีสี (Colorless), มีกลิ่นคล้ายไข่เน่า (Rotten eggs smells), มีความไวไฟสูง (Highly flammable), มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนโลหะ (Corrosive to metal), [21] และเป็นพิษต่อมนุษย์ที่ได้สูดดมเข้าสู่ร่างกาย (Humans to toxic that inhalational to body) เท่านั้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นที่ได้สูดดมเข้าไป โดยปริมาณที่ทำให้เกิดปฏิกิริยากับร่างกายนั้นจะ เริ่มตั้งแต่ระดับ 0.2 - 10 ppm จะได้กลิ่นและทำให้เกิดการระคายเคืองตา ต่อมาในระดับ 50 - 100 ppm มีอาการระคายเคืองที่เยื่อเมือกตาเพิ่มมากขึ้นเริ่มมีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ ทั้งนี้เมื่อ ระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้นระดับระหว่าง 100 - 500 ppm จะเสียต่อการรับรู้กลิ่น และหลังจากได้มีการสูดดมเข้าไปประมาณ 2 - 15 นาที จะมีอาการปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน และหยุดหายใจ สุดท้ายร่างกายจะขาดออกซิเจน (Asphyxiation) ในทุกระบบของร่างกาย และอาจถึงแก่ชีวิตได้ หลังจากได้สูดดมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในปริมาณความเข้มข้นที่ระดับ 500 - 1,000 ppm [22] อย่างไรก็ตามก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) จะมีรูปร่างโมเลกุล คือ  $\text{H}=\text{S}=\text{H}$  ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรเจนซัลไฟด์

จากรูปที่ 2.12 สามารถแสดงถึงโครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 34.04 โมล ประกอบไปด้วยอะตอมซัลเฟอร์ (S) 1 อะตอม และอะตอมไฮโดรเจน (H) 2 อะตอม ซึ่งอะตอม (H) มีโครงสร้างของน้ำ ( $\text{H}_2$ ) มีการเชื่อมต่อกันแบบปริมาณ (Single bond)

ระหว่างอะตอมไฮโดรเจนและอะตอมซัลเฟอร์ ทั้งนี้โมเลกุลของไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้นยังทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบบางชนิดที่มีอิเล็กตรอนอยู่ในสภาวะที่ต่ำกว่า แต่อย่างไรก็ตามจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้น

### 2.1.3 ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพในภาคอุตสาหกรรม

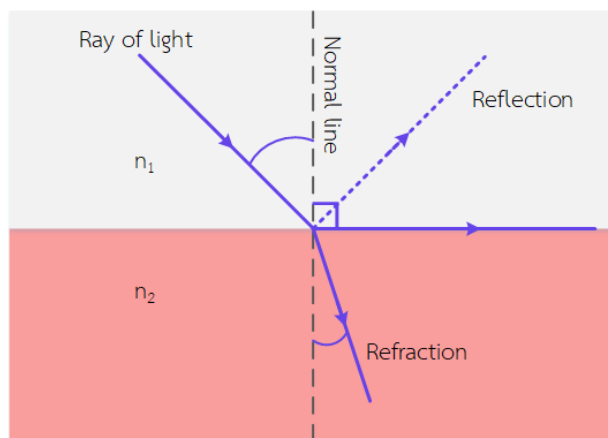
ก๊าซชีวภาพ (Biogas) ที่ผ่านกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่าง ๆ นั้น สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกหลากหลายรูปแบบ เช่น นำไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าในอุตสาหกรรม และส่งต่อไฟฟ้าไปยังบ้านเรือนที่พักอาศัย และนำไปผลิตเป็นพลังงานทดแทนการใช้ น้ำมัน หรือก๊าซที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อม คือ สภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ทั้งนี้ก๊าซชีวภาพยังสามารถนำไปใช้ได้อีกหลายอย่าง ดังนี้

- การผลิตวัสดุทดแทน (Alternative material) โดยก๊าซชีวภาพนั้นสามารถนำไปผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพ (Bio-plastics) ซึ่งก๊าซชีวภาพนั้นจะเป็นส่วนผสมหลักที่ใช้ในการผลิตพลาสติก และสามารถนำมาทดแทนวัสดุที่มีต้นทุนสูงได้
- การผลิตเคมีชีวภาพ (Biochemical) คือ การนำก๊าซมีเทน (Methane) มาเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนแปลงให้อยู่ในรูปแบบของเมทานอล (Methanol) ซึ่งเมทานอลสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง นำไปเป็นวัสดุทำละลาย และนำไปเป็นส่วนผสมของสารเคมีอื่น ๆ อีกมากมาย
- การผลิตไบโอดีเซล (Biodiesel) มีเทนในก๊าซชีวภาพนั้นสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตเป็นเชื้อเพลิงทดแทนที่ผลิตขึ้นจากวัสดุที่มีต้นทุนต่ำ และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เป็นต้น

## 2.2 วิวัฒนาการของเครื่องมือวัดค่าดัชนีการหักเหของแสง

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันการวัดค่าดัชนีการหักเหของแสง (Refractive index: RI) นั้น จะมีเครื่องมือเฉพาะทางที่สามารถวัดการหักเหของแสงได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำ แสงจะถูกนำมาทดลองโดยการนำมาผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันส่งผลทำให้ทิศทางของแสงเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ในขณะที่เดียวกันจะเกิดการสะท้อนของแสง (Reflection) เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกันจะส่งผลต่อความเร็วที่เกิดขึ้น โดยแสงจะเคลื่อนที่เร็วเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความโปร่งใสมากกว่าตัวกลางแบบทึบทำให้เกิดมุมที่ต่างกันออกไป ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.13





รูปที่ 2.13 ลักษณะการหักเห และการสะท้อนของแสง

จากรูปที่ 2.13 สามารถอธิบายได้ว่าแสงเมื่อมีการเคลื่อนที่ และตกกระทบผ่านตัวกลาง แสงจะเกิดการสะท้อนกลับ (Reflection) โดยที่แสงบางส่วนจะเกิดการหักเห (Refraction) ผ่านเข้ามายังตัวกลาง ทั้งนี้เนื่องจากตัวกลางที่ 1 ( $n_1$ ) มากกว่าตัวกลางที่ 2 ( $n_2$ ) และเกิดมุมหักเห ( $\theta_2$ ) มากกว่ามุมตกกระทบ ( $\theta_1$ ) จากกฎของสเนลล์ (Snell's Law) [23] สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างมุมหักเหของแสงในตัวกลางที่แตกต่างกันได้ ดังแสดงจาก (2.1)

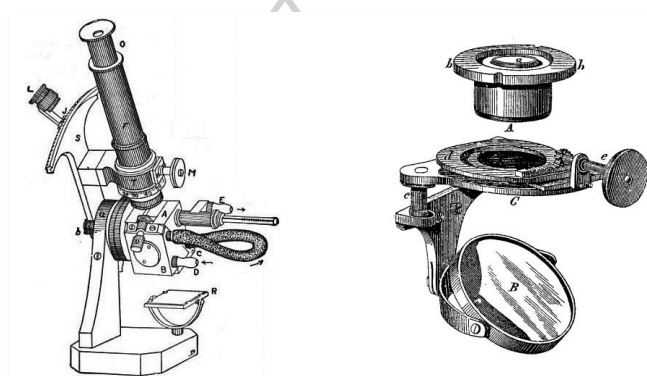
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.1)$$

อีกทั้งทฤษฎีดังกล่าวยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายต่าง ๆ ได้ อย่างไรก็ตาม เครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดค่าดัชนีการหักเหของแสงเพื่อนำมาคำนวณในการหาค่าความเข้มข้นของสารต่าง ๆ นั้น จะถูกจำแนกออกเป็น 3 ชนิดหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

### 2.2.1 เครื่องวัดการหักเหของแสง

ในปีคริสต์ศักราช 1869, Ernst Abbé ได้ทำการออกแบบและประดิษฐ์เครื่องวัดการหักเหของแสง (Refractometer) ขึ้นมาเป็นครั้งแรก แต่ยังไม่ได้มีการนำมาวางจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ต่อมา Ernst Abbé ได้ทำการพัฒนาเครื่องมือวัดการหักเหของแสงโดยการใช้มุมวิกฤติเพื่อให้เกิดการสะท้อนกลับหมด (Total internal refraction: TIR) ทำให้สามารถระบุดัชนีการหักเหของแสงหรือ  $n$  ในของเหลวเพียง 1 หยดได้อย่างแม่นยำในปี ค.ศ. 1872 [24] ตลอดจนระยะเวลาเกือบ 40 ปี ถัดมา Carl Zeiss ซึ่งเป็นผู้ก่อตั้งบริษัท Carl Zeiss AG และเป็นบริษัทแรกของโลกที่ผลิตกล้องจุลทรรศน์ในเชิงอุตสาหกรรม ได้มีการร่วมมือกับ Ernst Abbé ในการพัฒนาเครื่องมือวัดการหักเหของแสง และได้

เป็นผู้ผลิตเครื่องมือวัดดังกล่าวให้กับ Abbé เพียงรายเดียวเท่านั้น ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้ได้มีการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงมาเรื่อย ๆ และยังคงใช้หลักการทั่วไปอยู่ อย่างไรก็ตามยังมีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญประการหนึ่ง คือ การนำปริซึมที่ห่อหุ้มด้วยอุณหภูมิมมาทำการเปลี่ยนแปลงและเพิ่มในส่วนของความแม่นยำในการวัด หลังจากนั้นอีก 5 ปีต่อมาเขาได้ทำการตีพิมพ์หนังสือเล่มเล็ก (Booklet) เกี่ยวกับทฤษฎีและอธิบายสำหรับเครื่องมือวัดดัชนีการหักเหของแสงโดยการใช้ปริซึมและการสะท้อนกลับหมด ซึ่งในที่นี้ Ernst Abbé ได้อธิบายเกี่ยวกับการหักเหของแสงในของเหลวเป็นครั้งแรกอีกด้วย โดยเครื่องมือวัดชนิดดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างเครื่องมือวัดดัชนีการหักเหของแสงของ Ernst Abbé

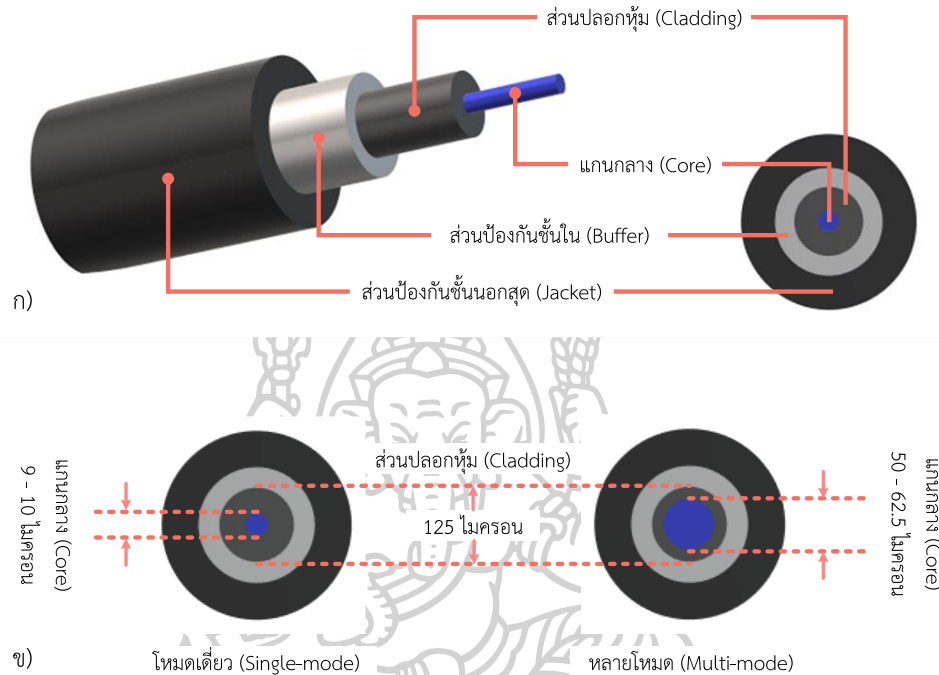
ที่มา: [https://en.wikipedia.org/wiki/Abbe\\_refractometer](https://en.wikipedia.org/wiki/Abbe_refractometer)

### 2.2.2 สายใยแก้วนำแสง

สายใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางชนิดหนึ่งที่ใช้แสงในการส่งผ่านข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทาง โดยต้องมีการเชื่อมต่อเข้ากับระบบเครือข่ายเพื่อให้สามารถส่งผ่านข้อมูลได้ ส่วนมากจะนำไปใช้ในด้านการสื่อสาร โทรคมนาคม ซึ่งการส่งข้อมูลผ่านแสงนั้นจะมีประสิทธิภาพสูง สามารถโอนถ่ายข้อมูลในระยะไกลได้อย่างรวดเร็วโดยไม่มีการสูญเสียสัญญาณ อีกทั้งยังปลอดภัยเนื่องจากสายใยแก้วนำแสงนั้นมีความต้านทานต่อการรบกวนจากสัญญาณไฟฟ้า และคลื่นสัญญาณอื่น ๆ จากภายนอกที่จะเข้ามารบกวนเมื่อเทียบกับสายสื่อสารชนิดเดิมที่ใช้สัญญาณไฟฟ้าในการส่งผ่านข้อมูล ทั้งนี้จึงได้มีการนำเอาสายใยแก้วนำแสงไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ อีกมากมาย อาทิเช่น ด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรมการเกษตร งานด้านวิทยาศาสตร์ และงานวิจัยต่าง ๆ รวมถึงนำไปพัฒนาและต่อยอดเป็นตัวตรวจจับ (Sensors) จำพวกสารเคมี ก๊าซชีวภาพ และก๊าซพิษอีกด้วย

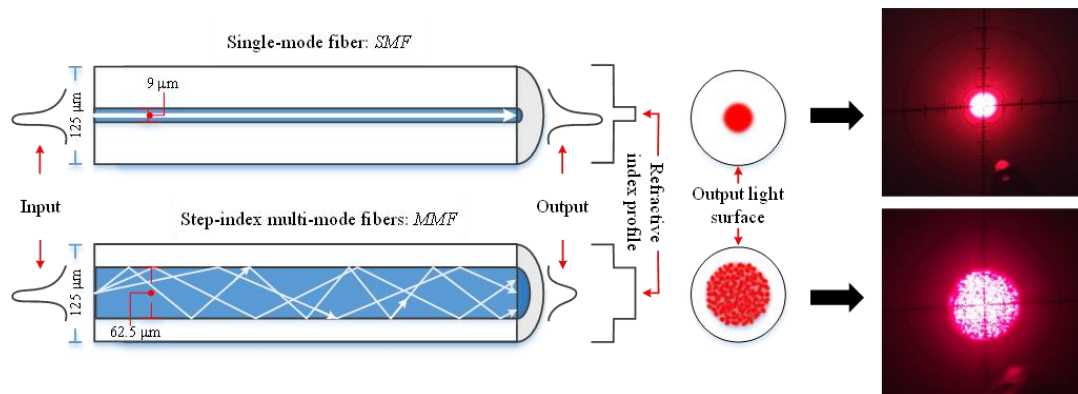
อย่างไรก็ตาม ในส่วนนี้จะเป็นการกล่าวถึงโครงสร้างทั่วไปของสายใยแก้วนำแสง (General of fiber optics) โดยปกติสายใยแก้วนำแสงจะถูกผลิตขึ้นจากแก้ว (Silica) หรือพลาสติก

(Plastic) ซึ่งโครงสร้างภายในของสายจะประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ส่วนป้องกันชั้นนอกสุด (Jacket), ส่วนป้องกันชั้นใน (Buffer), ส่วนปลอกหุ้ม (Cladding), และแกนกลาง (Core) ซึ่งจะเป็นชั้นในสุดที่ถูกผลิตขึ้นจากแก้วบริสุทธิ์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.15



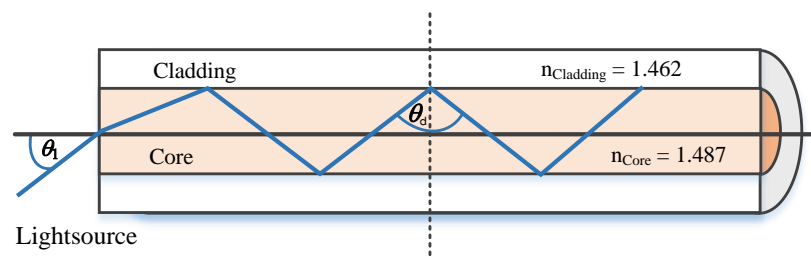
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงแบบทั่วไป

จากรูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นว่าสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางในส่วนของปลอกหุ้มชั้นใน (Cladding) ที่เท่ากัน คือ 125 ไมโครเมตร แต่มีความแตกต่างกันในส่วนแกนกลาง (Core) ซึ่งจะเห็นได้ว่าสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว (Single-mode fiber: SMF) นั้นมีขนาดของแกนกลางเท่ากับ 9 - 10 ไมโครเมตร ขณะที่สายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด (Multi-mode fiber: MMF) มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 50 - 62.5 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวมีขนาดแกนกลางที่เล็กกว่าจึงทำให้ลักษณะของแสงนั้นเดินทางเป็นเส้นตรง ขณะที่สายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดมีขนาดแกนกลางใหญ่กว่าทำให้แสงเดินทางแบบกระจัดกระจาย ดังสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ลักษณะการเดินทางของแสงภายในสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว และหลายโหมด

จากรูปสามารถอธิบายได้ว่าการเดินทางของแสงได้ถูกจำแนกออกเป็นอีกหลายลักษณะ อาทิเช่น การเดินทางแบบเส้นตรง (Single mode), การเดินทางแบบกระจัดกระจาย (Step index), และการเดินทางแบบเกรดอินเด็กซ์ (Graded index) เป็นต้น ซึ่งโดยปกติลักษณะการเดินทางของแสงภายในสายใยแก้วทั้ง 2 จะเป็นการเดินทางแบบเส้นตรง และแบบกระจัดกระจาย ดังแสดงได้จาก รูปที่ 2.16 ทั้งนี้การสะท้อนแสงจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อต้องอาศัยการสะท้อนกลับของแสงที่เกิดจากความแตกต่างของค่าดัชนีการหักเห (Refractive index: RI) ระหว่างแกนกลาง (Core) และส่วนเปลือกหุ้มชั้นใน (Cladding) ของสายใยแก้วนำแสง ซึ่งปรากฏการณ์สะท้อนกลับของแสงจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อค่าดัชนีการหักเหของแสง ณ แกนกลางของใยแก้วนำแสง ( $n_{\text{core}}$ ) สูงกว่าค่าดัชนีการหักเหของส่วนเปลือกหุ้มชั้นใน ( $n_{\text{cladding}}$ ) ดังสามารถแสดงโครงสร้างลักษณะการเดินทางของแสงได้ในรูปที่ 2.17 นอกจากนั้นสำหรับการวัดตัวแปรทางกายภาพต่าง ๆ เช่น ความเค้น, อุณหภูมิ, หรือการสั่นสะเทือน สามารถทำได้จากการแปลผลจากคุณสมบัติของแสงที่เปลี่ยนไป เช่น ความเข้มแสง, เฟส, หรือความถี่ เป็นต้น



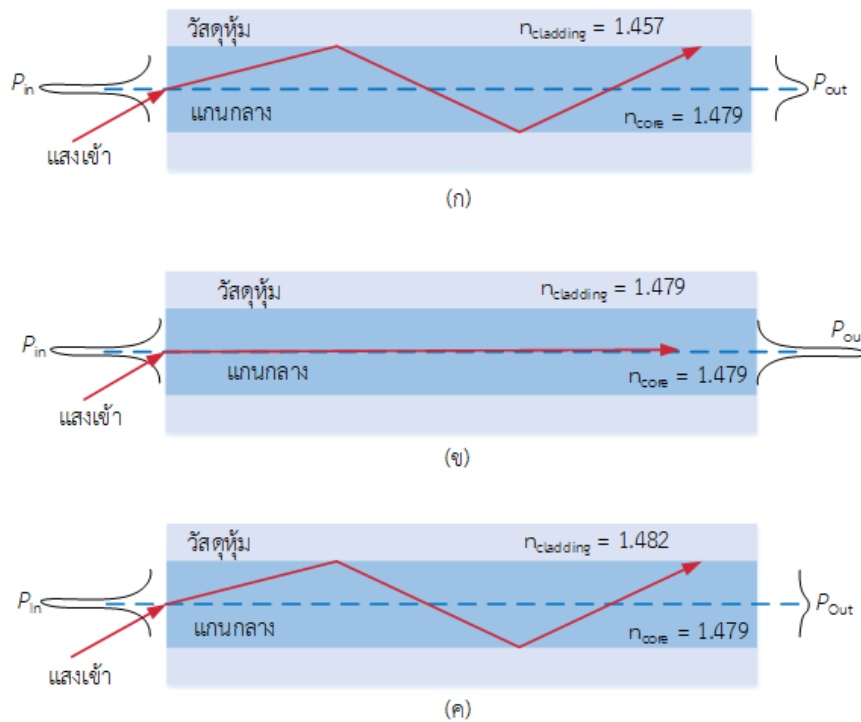
รูปที่ 2.17 ลักษณะการสะท้อนกลับของแสงภายในสายใยแก้วนำแสง

จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าดัชนีการหักเหของแสงในแกนกลางที่ทำมาจากแก้ว ( $\text{SiO}_2$ ) โดยปกติจะมีค่าเท่ากับ 1.487 ขณะที่ค่าดัชนีการหักเหส่วนของเปลือกหุ้มชั้นในมีค่าเท่ากับ 1.462 ทั้งนี้เนื่องจากการเติมสารเจือ (Impurity atom) [25] เข้าไปในส่วนเปลือกหุ้มชั้นในส่งผลทำให้ค่าดัชนีการหักเหของแสงเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้ ( $n_{\text{core}} > n_{\text{cladding}}$ ) จะส่งผลทำให้คลื่นแสงสามารถเดินทางภายในสายใยแก้วนำแสงได้โดยไม่มีการสูญเสียกำลังทางแสง (Optical power loss) ออกไปยังส่วนเปลือกหุ้มชั้นใน หรือที่เรียกว่า “การสะท้อนกลับหมด (Total internal reflection: TIR)” นั่นเอง โดยมีมุม  $\theta_c$  แสดงถึงมุมวิกฤต (Critical angle) ที่จะต้องมีค่าน้อยกว่ามุมตกกระทบ ( $\theta_1$ ) ของแสงที่ส่งผ่านในใยแก้วนำแสง อย่างไรก็ตาม เพื่อให้เกิดการสะท้อนกลับหมดของแสงภายในใยแก้วนำแสง ที่มุมตกกระทบภายในสายใยแก้วนำแสงนั้นจะต้องมีค่ามากกว่ามุมวิกฤต ( $\theta_1 > \theta_c$ ) อยู่เสมอ

### 2.2.3 ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์

ถือได้ว่าเป็นอีกประเภทหนึ่งของตัวตรวจจับที่ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงปริมาณแสง (Optical power) มาเป็นตัวกำหนดค่าปริมาณทางกายภาพ (Physical quantities) ที่วัดได้จากวัตถุหรือชิ้นงานทดสอบ โดยตัวตรวจจับประเภทนี้ได้ถูกพัฒนามานานมากกว่า 20 ปี ด้วยมีข้อดีหลากหลายประการ เช่น มีขนาดเล็ก (Small size), น้ำหนักเบา (Lightweight), ความไวสูง (High sensitivity), ทนทานต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Immunity to electromagnetic wave), สามารถนำไปใช้งานในพื้นที่การวัดแคบ ๆ หรือพื้นที่อันตราย, และสามารถแยกแยะคุณสมบัติภายในของก๊าซต่าง ๆ ได้ [26]-[29] ทำให้มีการนำเอา FOR ไปประยุกต์ใช้งานในทางวิศวกรรมเป็นจำนวนมาก เช่น การวัดคุณสมบัติ และความเข้มข้นของก๊าซชนิดต่าง ๆ อุณหภูมิ ปริมาณสารเคมี หรือความหนาของแผ่นฟิล์มบาง เป็นต้น [30] โดยหลักการการทำงานของตัวตรวจจับชนิดนี้จะเปลี่ยนปริมาณทางกายภาพให้อยู่ในรูปแบบของค่าดัชนีการหักเหของแสงที่เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนั้นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทางแสงจะถูกดำเนินการแปลค่า (Decode) เป็นปริมาณทางกายภาพที่ผู้วัดต้องการทราบค่าต่อไป

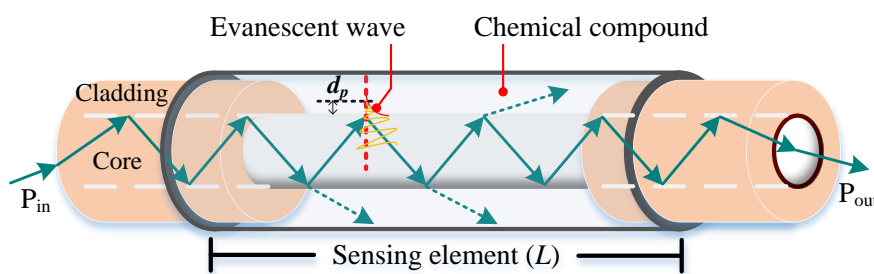
อย่างไรก็ตามหลักการทำงานพื้นฐานของไฟเบอร์ออปติก-รีแฟรกโทรมิเตอร์นั้นจะเป็นการพิจารณาถึงการหักเหของแสงระหว่างแกนกลาง ( $n_{\text{core}}$ ) และส่วนหุ้มแกน ( $n_{\text{cladding}}$ ) ของสายใยแก้วนำแสงเป็นหลัก ซึ่งโดยปกติทั่วไปเมื่อ  $n_{\text{core}}$  มีค่ามากกว่า  $n_{\text{cladding}}$  เพียงเล็กน้อย จะส่งผลให้ไม่มีการสูญเสียของกำลังทางแสง (Optical power loss) เกิดขึ้น ในทำนองเดียวกัน เมื่อ  $n_{\text{core}}$  มีค่าเท่ากับ หรือน้อยกว่า  $n_{\text{cladding}}$  จะส่งผลให้ค่ากำลังทางแสงที่ปลายของใยแก้วนำแสงมีค่าลดลง ดังสามารถแสดงแนวคิดดังกล่าวได้ดังรูปที่ 2.18



**รูปที่ 2.18** ลักษณะต่าง ๆ ของกำลังทางแสงระหว่างขาเข้า ( $P_{in}$ ) และขาออก ( $P_{out}$ );

(ก) เมื่อ  $n_{\text{core}} > n_{\text{cladding}}$  (ข) เมื่อ  $n_{\text{core}} = n_{\text{cladding}}$  (ค) เมื่อ  $n_{\text{core}} < n_{\text{cladding}}$

จากรูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นถึงแนวคิดของการเปลี่ยนแปลงกำลังทางแสงภายในสายใยแก้วนำแสง อย่างไรก็ตามเมื่อนำเอาแนวคิดดังกล่าวมาดำเนินการในการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของปริมาณทางกล (Mechanical quantities) เช่น การหาคุณสมบัติของก๊าซต่าง ๆ หรือหาความเข้มข้นของก๊าซเหล่านั้น ก็สามารถดำเนินการได้โดยการนำเอาสายใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์ประยุกต์ร่วมกับการปรับปรุงของแคลดดิ้ง (De-cladded fiber) ส่งผลทำให้ค่าดัชนีการหักเหของแสงเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติก๊าซบางชนิดจะถูกดูดกลืนแสงกับสารประกอบทางเคมี (Chemistry compound) ทำให้กำลังทางแสง ณ ปลายของสายใยแก้วนำแสงมีค่าลดลง [13] โดยแนวคิดดังกล่าวนี้สามารถอธิบายการเดินทางของแสงภายในตัวตรวจจับชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์ และแสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 2.19



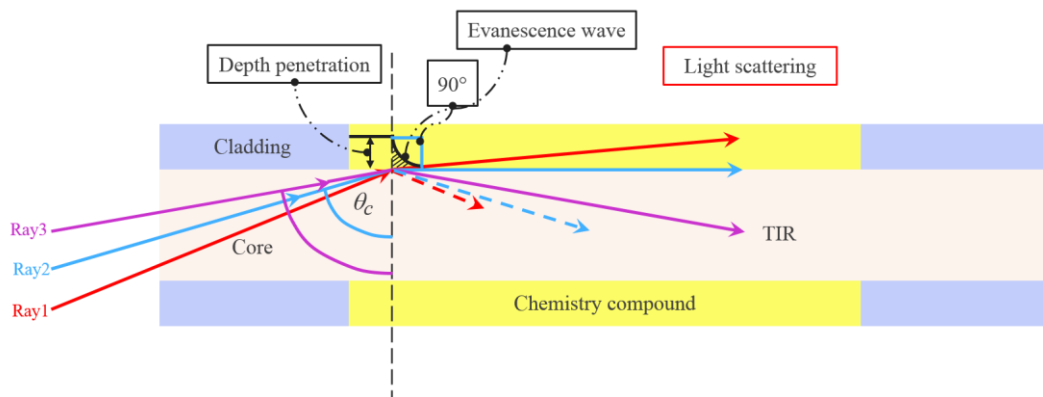
รูปที่ 2.19 การเดินทางของแสงภายในตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์

จากรูปที่ 2.19 สามารถอธิบายถึงโครงสร้างและการเดินทางของแสงภายในส่วนหัววัด (Sensing element) ของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในส่วนการปรับปรุงของปลอกหุ้มชั้นในจะมีการนำเอาสารประกอบทางเคมีมาพอก (Coating) เข้าไปแทนที่ ส่งผลทำให้ค่าดัชนีการหักเหของแสงเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม อีกทั้งยังส่งผลไปยังค่ากำลังทางแสงขาออก ( $P_{out}$ ) อีกด้วย

## 2.3 กลไกการทำงานของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับตรวจวัดก๊าซ

### 2.3.1 คลื่นอีวานเนสเซนส์ (Evanescent wave)

คลื่นอีวานเนสเซนส์ (EW) หรือชื่อไทยเรียกว่าคลื่นที่หลบหลีก คือ คลื่นอิเล็กโทรแมกเนติก (Electromagnetic wave) หรือคลื่นไฟฟ้า ที่มีอยู่ภายในส่วนของ cladding และเมื่อมีการปรับปรุงสาย fiber ในส่วนนี้จะทำให้การสูญเสียการแผ่รังสีของการส่งผ่านแสงภายในสายลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponentially decay) [31] ในปี ค.ศ. 2021, B. Renganathan *et. al.* ได้พัฒนาตัวตรวจจับก๊าซพิษโดยใช้วิธีการปรับปรุงส่วนของปลอกหุ้ม (De-cladded) และใช้สารดีบุกหรือทินออกไซด์ (Tin oxide) มาทำการพอก/แทนที่ (Coating/replace) ส่วนของปลอกหุ้มที่ถูกลอกออกไป ซึ่งตัวตรวจจับที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดก๊าซพิษได้ตั้งแต่ 0 – 100 ppm. โดยก๊าซพิษดังกล่าวคือ เบนซีน (Benzene), เมทานอล (Methanol), คลอโรฟอร์ม (Chloroform), และแอมโมเนีย (Ammonia) ทั้งนี้จะมีการตอบสนอง (Response) และการคืนสู่สภาพเดิม (Recovery) ในเวลาประมาณ 51 และ 37 นาที ตามลำดับ [32] อย่างไรก็ตาม สามารถแสดงโครงสร้างการทำงานของคลื่นอีวานเนสเซนส์ (EW) ได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ลักษณะการเดินทางของแสงที่ทำให้เกิดคลื่นอีวาเนสเซนส์

จากรูปที่ 2.20 สามารถอธิบายหลักการเดินทางของแสงที่ทำให้เกิดคลื่นอีวาเนสเซนส์ (EW) ได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น เมื่อลำแสงที่ 1 เดินทางเข้ามายังสายใยแก้วนำแสงผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกันแสงจะเกิดการหักเห และกระเจิงออกไปยังภายนอกของสายใยแก้วนำแสง ต่อมาเมื่อลำแสงที่ 2 เข้ามายังสายใยแก้วนำแสง และทำมุมตั้งฉาก 90 องศาที่ระหว่างแกนกลาง (core) และส่วนปลอกหุ้มชั้นใน (cladding) จะทำให้เกิดมุมวิกฤต (Critical angle) จากนั้นเมื่อลำแสงที่ 3 เดินทางมายังสายใยแก้วนำแสง และทำมุมมากกว่า 90 องศา จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมด หรือเรียกว่า Total internal reflection (TIR) ทั้งนี้เมื่อแสงได้ทำมุมที่ 90 องศาจะทำให้เกิดคลื่นอีวาเนสเซนส์ (EW) และเกิดการดูดกลืนแสง (Absorption) ซึ่งสามารถคำนวณการค่าการดูดกลืนแสงได้จากความลึกของการแทรกซึม (Depth of penetration) [33]-[35] ได้จาก (2.2) ในขณะที่มุมวิกฤต (Critical angle) นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Snell's Law ดังสมการ (2.1)

$$dp = \frac{\lambda}{2\pi(n_{co}^2 \sin^2 \theta - n_{cl}^2)^{1/2}} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $n_{co}$  และ  $n_{cl}$  คือ ค่าดัชนีหักเหของแกนกลาง ( $n_{core}$ ) และค่าดัชนีการหักเหส่วนของปลอกหุ้มชั้นใน ( $n_{cladding}$ ) ภายใต้อันสายใยแก้วนำแสง ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อดำเนินการปรับปรุงในส่วนของปลอกหุ้มชั้นใน (Cladding) จะส่งผลไปยังค่ากำลังทางแสงขาออก ( $P_{out}$ ) ซึ่งในการคำนวณค่า ( $P_{out}$ ) นั้น [36]-[37] สามารถคำนวณได้จาก (2.3)

$$P_{out} = \int_{\theta_0}^{90^\circ} P_{in} \cdot \exp(-\zeta L) \quad (2.3)$$



$\zeta$  = ค่าประสิทธิภาพการลดทอนกำลังทางแสงจากการกระเจิงระหว่างแกนกลาง และส่วนปลอกหุ้มชั้นใน (Evanescent wave attenuation coefficient)

$L$  = ค่าความยาวในส่วนการปรับปรุงของปลอกหุ้มชั้นใน (Length of de-cladded fiber)

$$\zeta = N \times T \quad (2.4)$$

$N$  = ค่าการสะท้อนแสงภายในสายใยแก้วนำแสงต่อความยาวสาย (Reflections per unit length)

$T$  = ค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงภายในส่วนของปลอกหุ้มชั้นใน (Transmission coefficient into cladding)

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงค่าการสะท้อนแสง (Reflections) และค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านแสง (Transmission coefficient) นั้น สามารถคำนวณได้จาก (2.5) และ (2.6)

$$N = \frac{\cot \theta_1}{2a} \quad (2.5)$$

$$T = \frac{\alpha \lambda \times n_{co} \cos \theta_1}{\pi n_{sml}^2 \cos^2 \theta_{ccc} \sqrt{\cos^2 \theta_{ccc} - \cos^2 \theta_1}} \quad (2.6)$$

$a$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของแกนกลางภายในสายใยแก้วนำแสง (Core diameter of fiber optic cable)

$\alpha$  = ค่าประสิทธิภาพการดูดกลืนแสง (Bulk absorption coefficient)

$\lambda$  = ค่าความยาวคลื่นแสง (Wavelength)

$n_{sml}$  = ค่าดัชนีการหักเหแสงของการปรับปรุงส่วนของปลอกหุ้มชั้นใน (refractive index of sensing medium de-cladded)

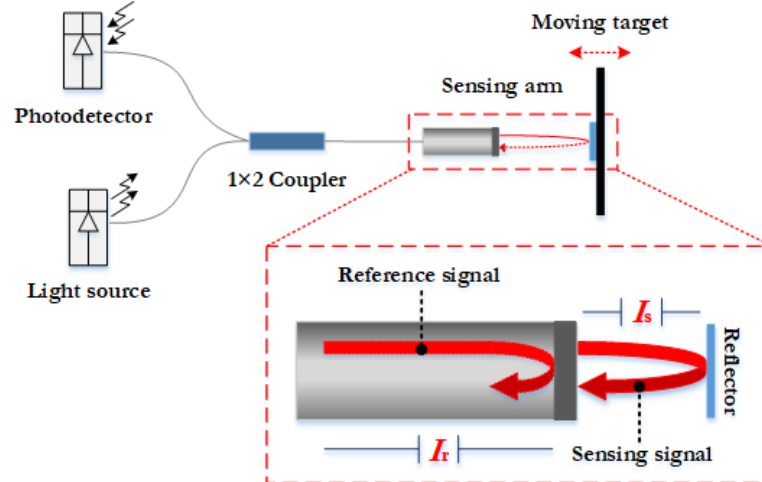
$\theta_1$  = มุมตกกระทบของแสงที่เข้าไปในสายใยแก้วนำแสง (the angle for every power distribution)

$n_{co}$  = ค่าดัชนีการหักเหแสงของส่วนปลอกหุ้มชั้นใน (refractive index of fiber core)

$\theta_{ccc}$  = มุมวิกฤตภายในส่วนปรับปรุงของปลอกหุ้มชั้นใน (critical angle of chemical compound)

### 2.3.2 ฟาบริ-เปโรต์อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

ฟาบริ-เปโรต์อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ (Fabry-Perot interferometer: FPI) เป็นอีก 1 ประเภทของสายใยแก้วนำแสงชนิดอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ที่มีคุณสมบัติเด่นหลายประการจะมีความไวสูง (High sensitivity), ขนาดเล็ก (Small size), น้ำหนักเบา (Lightweight), ทนทานต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Immunity to electromagnetic wave), สามารถใช้งานในบริเวณพื้นที่มีสัญญาณรบกวน (Noise) ได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังสามารถใช้งานในพื้นที่อันตรายและพื้นที่การวัดแคบ (Using in hazardous area) ได้ [38]–[39] โดยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดนี้ ถือว่าเป็นที่นิยมกันอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรม สำหรับการวัดละเอียด (High precision measurement) ทั้งนี้เนื่องจากระบบมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน (Non-complexity), ใช้งานง่าย (Simple to use), และมีราคาถูก (Low cost) [40] ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้มีหลายภาคอุตสาหกรรมนำตัวตรวจจับชนิดดังกล่าวมาใช้ในการทดสอบ และวัดค่าต่าง ๆ อาทิเช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี (Petrochemical industry), อุตสาหกรรมความปลอดภัย (Industrial safety), และการทดสอบลมในอุโมงค์ (Wind tunnel test) เป็นต้น [41] ซึ่งโครงสร้างของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิด EFFPI สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดฟาบริ-เปโรต์อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

จากรูปที่ 2.1 สามารถอธิบายได้ว่าการทำงานของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดฟาบริ-เปโรต์อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ซึ่งจะแตกต่างจากตัวตรวจจับอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ในแบบอื่น ๆ โดยแสงเดี่ยวความยาวคลื่น 1310 นาโนเมตร (Monochromatic lightwave) จากแหล่งกำเนิดแสงถูกส่งผ่านมายัง 1x2 Fiber coupler ก่อนที่จะส่งต่อไปยังหัววัด (Sensing arm) ประมาณ 4% ของแสง

จะถูกสะท้อนกลับที่ปลายของหัววัด (Fiber caved-end) และเรียกสัญญาณดังกล่าวนี้ว่า “สัญญาณอ้างอิง (Reference signal:  $I_r$ )” ขณะที่ปริมาณแสงส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านแสงไปยังชิ้นงานทดสอบ (Moving target) ซึ่งมีตัวสะท้อนแสง (Reflector) ติดตั้งอยู่ และสะท้อนกลับ (Back reflection) เข้ามาที่หัววัดอีกครั้งหนึ่ง โดยเรียกสัญญาณดังกล่าวว่า “สัญญาณการวัด (Sensing signal:  $I_s$ )” ต่อจากนั้นสัญญาณทั้งสองจะถูกรวมกัน (Superpositioned) ในลักษณะที่มีความต่างเฟสซึ่งกันและกัน (Phase difference) และเรียกชื่อผลลัพธ์ของการรวมกันของทั้งสองสัญญาณนี้ว่า “สัญญาณการแทรกสอดของแสง (Interference signal:  $I$ )” ซึ่งค่าความเข้มของแสงสามารถคำนวณได้จาก (2.7) [42]-[43]

$$I = I_s + I_r + 2\sqrt{I_s I_r} \cos(\varphi) \quad (2.7)$$

เมื่อ  $I_s$  คือ ความเข้มแสงของสัญญาณการวัด  
 $I_r$  คือ ความเข้มแสงของสัญญาณอ้างอิง  
 $\varphi$  คือ ความต่างของเฟสระหว่างสองสัญญาณ

จากสมการ (2.7) เป็นการคำนวณหาค่าความเข้มของริ้วสัญญาณการแทรกสอดระหว่าง 2 สัญญาณ ( $I_s$  และ  $I_r$ ) ที่มีความต่างกันของเฟส (Phase difference:  $\varphi$ ) โดยกำหนดให้  $n$  คือ ค่าดัชนีการหักเหของแสง ( $n = 1$  เมื่อตัวกลางคืออากาศ) และ  $\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่นแสงมีหน่วยเป็นนาโนเมตร โดยความสัมพันธ์นั้นสามารถเขียนออกมาในรูปแบบของสมการได้ดังต่อไปนี้ (2.8) [43]

$$\varphi = \frac{4\pi n D}{\lambda} \quad (2.8)$$

ดังนั้นในการหาระยะกระจัดของวัตถุ (Displacement:  $D$ ) จะใช้ความสัมพันธ์ที่ได้จากจำนวนของริ้วการแทรกสอดของแสง ( $N$ ) ที่วัดได้จาก FFPI ในช่วงเวลาหนึ่งรูปคลื่น (Period time) ซึ่งจะสามารถคำนวณได้จาก (2.9) [43]

$$D = N \frac{\lambda}{2} \quad (2.9)$$

## 2.4 สารประกอบทางเคมี

### 2.4.1 สารกัดแก้ว (Hydrofluoric acid)

สารกัดแก้ว หรือกรดกัดแก้ว (Hydrofluoric acid: HF) เป็นกรดที่มีความรุนแรงสามารถกัดและละลายแก้วได้เป็นอย่างดีและรวดเร็ว สามารถทำให้เกิดความเสียหายที่ลึกถึงชั้นใน

ของแก้ว ซึ่งสารเคมีชนิดนี้เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์และสิ่งมีชีวิต [44] โดยเฉพาะเมื่อสารไปสัมผัสกับผิวหนังจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการเมแทบอลิซึม (Metabolism) และเซลล์เม็ดเลือด อีกทั้งยังสามารถซึมผ่านผิวหนังและเป็นอันตรายถึงระบบประสาท ทั้งนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.22

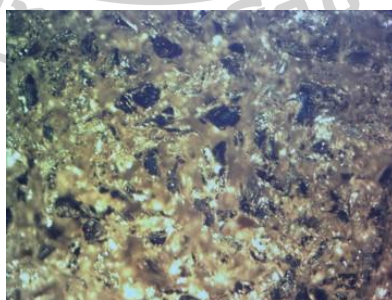


รูปที่ 2.22 ตัวอย่างกรดกัดแก้ว (Hydrofluoric acid: HF)

ที่มา: <https://officeaceshop.com/product/>

#### 2.4.2 สารเงิน (Argentum)

สารเงิน (Argentum: Ag) เป็นภาษาลาติน ที่แปลว่า Silver เป็นธาตุองค์ประกอบที่มีคุณสมบัติทางเคมีในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์  $H_2S$  ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [45] ด้วยโครงสร้างของโมเลกุลที่เป็นหมู่ (Cluster) จะมีลักษณะเป็นตารางที่มีอะตอมเงินเชื่อมโยงกัน ซึ่งความสามารถในการเปลี่ยนไอออนให้เป็นบวก ( $Ag^+$ ) นั้นจะขึ้นอยู่กับสภาวะการตอบสนองต่อสารจำพวกออกไซด์ อีกทั้งยังมีความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ทั้งนี้สามารถแสดงโครงสร้างของสารเงิน (Structure of Argentum) ได้ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 สารเงิน (Argentum)

#### 2.4.3 โพลีไวนิลบิวทิล (Polyvinyl butyral)

โพลีไวนิลบิวทิล (Polyvinyl butyral: PVB) มีสูตรโมเลกุล คือ  $(C_8H_{14}O_2)_n$  เป็นสารประกอบทางเคมีที่สามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์ คีโตน เอสเทอร์ หรือตัวทำละลายอื่น ๆ โดยมี

คุณสมบัติในการยึดเกาะได้ดี ชั้นรูปฟิล์มบาง หรือกระจกใต้ [46] มีความต้านทานแรงดึงสูง และแสงสามารถส่งผ่านได้ โดยโครงสร้างของโพลีไวนิลบิวทียรัลนั้นจะมีลักษณะเป็นเส้นใยเล็ก ๆ เชื่อมต่อกัน ส่งผลทำให้เมื่อนำมาผลิตเป็นกระจกรถยนต์ หรือแผ่นกั้นเสียงจะเกิดความแข็งแรงมากขึ้น ดังแสดงโครงสร้างได้ในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 โพลีไวนิลบิวทียรัล (Polyvinyl butyral)

#### 2.4.4 โพลีเฮกซะเมทิลีนไบกวาไนด์ (Polyhexamethylene biguanide)

โพลีเฮกซะเมทิลีนไบกวาไนด์ (PHMB) เป็นสารประกอบทางเคมีที่มีโครงสร้างของโบรอนไทกัวไนด์ (Biguanide) ถือเป็นสารประกอบอินทรีย์ไม่มีสี สามารถละลายน้ำได้ดี มักถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ เช่น นำไปผลิตเป็นเครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์ดูแลสุขภาพ [47] เป็นต้น ทั้งนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 โพลีเฮกซะเมทิลีนไบกวาไนด์ (Polyhexamethylene biguanide)

#### 2.4.5 ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol)

ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol: IPA) มีคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี (Physical and chemical properties) คือ เป็นของเหลวใส มีกลิ่นเฉพาะตัวถูกนำมาใช้เป็นตัว

ทำละลายในสารประกอบทางเคมี [48] เช่น กาว ทินเนอร์ หมึกพิมพ์ และอุตสาหกรรมยา เพื่อใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ฆ่าเชื้อโรค (Antiseptic) เพื่อยับยั้งการเติบโตของจุลินทรีย์ต่าง ๆ เป็นต้น ทั้งนี้ยังมีอัตราการระเหยที่สัดส่วนเท่ากับ 3(n-Butyl Acetate=1) แต่อย่างไรก็ตามสัดส่วนดังกล่าวไม่ได้แสดงถึงอัตราการระเหยที่แน่ชัด ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมโดยรอบ ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol)

ที่มา: <https://eastern-produce.com/product/ipa/>

#### 2.4.6 เมทานอล (Methanol)

เมทานอล (Methanol) หรือเมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl alcohol) มีโครงสร้างทางเคมีคือ  $\text{CH}_3\text{OH}$  เป็นของเหลว ใสไปจนถึงสีฟ้าอ่อน ระเหยง่าย ใช้เป็นเชื้อเพลิงนิยมใช้เป็นตัวทำละลาย และเป็นสารเคมีชีวภาพ [49] อีกทั้งยังเป็นสารเคมีที่เป็นพิษต่อมนุษย์เมื่อไปสัมผัสหรือนำเข้าสู่ร่างกายเป็นจำนวนมาก ดังสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 เมทานอล (Methanol)

ที่มา: <https://gammaco.com/gammaco/CH3OH->

## 2.5 รูปแบบการแสดงผลข้อมูลผ่านระบบ IoTs

อินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoTs) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ถูกเชื่อมต่อเข้าสู่โลกอินเทอร์เน็ต ทำให้มนุษย์สามารถสั่งการควบคุมการใช้งาน อุปกรณ์ต่าง ๆ โดยมีอินเทอร์เน็ตเป็นตัวขับเคลื่อน ไม่ว่าจะเป็นในด้านการแพทย์ (Medical), การดูแลผู้สูงอายุ (Elderly care), การขนส่ง (Transportation), รวมไปถึงด้านการเกษตร (Agriculture) อีกด้วย เช่น การเปิด-ปิดอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน ดูกำลังวงจรปิด สั่งเปิดปิดพัดลม หรือรดน้ำต้นไม้ภายในโรงเรือนเพาะปลูก เพียงแค่มือถือหรือแท็บเล็ตมีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตก็จะสามารถควบคุม และสั่งการทุกอย่างได้ [50] ซึ่งจะมีการส่งข้อมูลหรือคำสั่งต่าง ๆ ส่งขึ้นไปบน Cloud และส่งข้อมูลกลับมายังผู้ใช้งาน โดยไม่จำเป็นต้องเดินทางไปยังสถานที่เหล่านั้นตลอดเวลาเพราะผู้ใช้งานสามารถที่จะมอเน็ตอร์ทุกอย่างได้อยู่บนหน้าจอมือถือ แท็บเล็ต หรือคอมพิวเตอร์ได้ทุกสถานที่ ทุกเวลา อีกทั้งยังประหยัดเวลา ประหยัดค่าใช้จ่าย เป็นต้น ดังสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 อินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things)

ที่มา: <https://www.istockphoto.com/th/>

จากการอธิบายในข้างต้นทำให้คุณชินพันธ์นี้มีการนำเทคโนโลยี IoTs เข้ามามีส่วนร่วมในการพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพในครั้งนี้ โดยการนำมาเป็นระบบเชื่อมต่อในการแสดงผลข้อมูลบนหน้าจอการแสดงผลผ่านระบบอินเทอร์เน็ต ซึ่งจะมีการเชื่อมต่อกันระหว่างระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตหลัก ก่อนส่งต่อข้อมูลไปยังเครื่องลูกข่าย และทำการแสดงผลการทดลองเข้าสู่หน้าจอคอมพิวเตอร์ หรือแท็บเล็ตของผู้ใช้งาน ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ใช้งานระบบ หรือผู้ตรวจวัดสามารถอ่านค่าผลที่ได้จากการวัดแบบต่อเนื่องในเวลาจริง (Real time) ได้ในทุก ๆ สถานที่ โดยไม่จำเป็นต้องประจำการอยู่ ณ บริเวณสถานที่ตรวจวัด (On-site measurement) ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายต่อสุขภาพของผู้ตรวจวัด เนื่องจากการสูดดมก๊าซเป็นเวลานาน

## 2.6 วรรณกรรมวิจารณ์

M. Fredenslund *et al.* ได้ศึกษาข้อมูล และตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซมีเทนในโรงงานก๊าซชีวภาพ จำนวน 4 แห่ง ด้วยใช้ 2 วิธีการคือ วัดความเข้มข้นการปล่อยก๊าซมีเทนภายในโรงงาน ด้วยกล้องอินฟราเรดและเครื่องวิเคราะห์ก๊าซมีเทนแบบพกพา เสริมด้วยกล้องถ่ายภาพด้วยแสงแบบออปติคัล และวัดปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนโดยการสำรวจระยะไกลในระดับภาคพื้นดิน ด้วยวิธีการกระจายก๊าซ (Tracer gas dispersion method: TDM) ซึ่งผลลัพธ์ของการวัดความเข้มข้นก๊าซมีเทนของโรงงานก๊าซชีวภาพทั้ง 4 แห่งด้วยกล้องอินฟราเรด และเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซมีเทนแบบพกพา เสริมด้วยกล้องถ่ายภาพด้วยแสงแบบออปติคัล ทำให้ทราบถึงจุดต่าง ๆ การปล่อยของก๊าซมีเทนในโรงงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [51]

W. Jin *et al.* ได้ทำการพัฒนาระบบการตรวจจับก๊าซด้วยใยแก้วนำแสงแบบไมโครอิเล็กทรอนิกส์ และนาโนอิเล็กทรอนิกส์ โดยในงานวิจัยได้กล่าวถึงหลักการตรวจจับก๊าซทั้งหมด 2 หลักการ คือ หลักการดูดกลืนแสงโดยตรง (Absorption) และหลักการของการใช้คลื่นเสียงตรวจสอบสเปกตรัม (Photoacoustic spectroscopy) อย่างไรก็ตามผู้วิจัยพบว่าการพัฒนาระบบใยแก้วนำแสงแบบดูดกลืนแสงเพื่อการตรวจจับก๊าซ มีความไวสูงในการรับสัญญาณ (High sensitivity), และมีการตอบสนองที่รวดเร็ว (High response) โดยผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการประมวลผลในการหาสัญญาณการตรวจจับก๊าซได้เป็นอย่างดี [52]

J. Shemshad ได้ทำการวิเคราะห์ความผิดพลาดของการวัดความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของแสงเลเซอร์ชนิดดีเอฟบี (Distributed feedback laser: DFB) ภายในเส้นใยแก้วนำแสงที่มีค่าความยาวคลื่น 1,666 นาโนเมตร และใช้วิธีของ Wavelength modulation spectroscopy ด้วยเทคนิค Second harmonic ( $2f$ ) ซึ่งได้กำหนดสัญลักษณ์  $2f$  ให้เป็นค่าเฉลี่ยของความเข้มแสงของเลเซอร์ ที่มีค่าเพิ่มขึ้น 73 เปอร์เซ็นต์ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของแสงในเลเซอร์ จะส่งผลทำให้ค่า  $2f$  เปลี่ยนแปลง โดยความผิดพลาดจะเพิ่มขึ้นตามแนวเส้นตรง (Linear error) ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่วัดได้นั้นเอง [53]

W. Wen-qing *et al.* กล่าวถึงความก้าวหน้าด้านพลังงานสะอาดก๊าซธรรมชาติ (Methane) ที่มีสัดส่วนการใช้พลังงานมากขึ้น เทคโนโลยีการตรวจจับก๊าซมีเทนจึงได้กลายเป็นงานวิจัยที่สำคัญสำหรับสัญญาณเตือนไฟไหม้ โดยใช้การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ซึ่งจากกฎของ Lambert-Beer ระบุว่าก๊าซมีเทน และก๊าซหุงต้มส่วนใหญ่มีคุณสมบัติการดูดซึมที่ดีในย่านของสเปกตรัมอินฟราเรด และวิธีการตรวจจับฮาร์โมนิกส์นั้นมีความไวสูง, ความละเอียดสูง, และสามารถตรวจจับการตอบสนองของก๊าซได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้การปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นร่วมกับเทคนิคการตรวจจับสัญญาณฮาร์โมนิกส์ตรวจจับก๊าซเป้าหมาย ซึ่งผลการวิจัยพบว่าการดูดกลืนแสงนั้นสามารถสร้าง



สัญญาณฮาร์โมนิกที่เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของก๊าซ และแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟเส้นต่าง ๆ เพื่อนำไปพัฒนาระบบตรวจจับการรั่วไหลของก๊าซได้ สรุปว่าการใช้เทคโนโลยีการตรวจจับก๊าซมีเทนนั้นมีความสำคัญสำหรับการตรวจจับอค์ภัยเป็นอย่างมาก และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับการตรวจจับการรั่วไหลของก๊าซ [9]

S. N. Riddick *et al.* กล่าวถึงการสลายตัวทางเคมีของสารอินทรีย์ในหลุมฝังกลบซึ่งเป็นแหล่งสำคัญของก๊าซมีเทน โดยผู้วิจัยกล่าวว่า หลุมฝังกลบนั้นจะปล่อยก๊าซมีเทนร้อยละ 3 ถึง 19 ซึ่งมีผลมาจากกระบวนการทางชีวธรณีเคมี ดังนั้นเพื่อทดสอบสมมุติฐานดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงได้ทำการตรวจจับก๊าซมีเทน โดยใช้เครื่องมือวัดความเข้มข้นของก๊าซมีเทน 2 ชนิดคือ *Picarro Cavity Ring-Down Spectrometer* และ *Ellutia Gas Chromatograph - Flame Ionization Detector* หลังจากนั้นนำข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ของทั้งสองเครื่องมือ และข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา มาคำนวณหาอัตราการปล่อยก๊าซมีเทนจากหลุมฝังกลบ โดยการป้อนข้อมูลเข้าไปยังเครื่องมือในการคำนวณที่ชื่อว่า “*WindTrax*” ซึ่งผู้วิจัยได้ค้นพบว่าค่ากลางการปล่อยก๊าซมีเทน (Mean value) มีค่าเท่ากับ  $709 \mu\text{g m}^{-2}\text{s}^{-1}$  โดยมีค่าสูงสุด (Max. value) เท่ากับ  $6.21 \text{ mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$  ตามลำดับ [54]

B. Renganathan *et al.* ได้ทำการทดลองการหุ้มฉนวนของสายใยแก้วนำแสงโดยการพอกด้วยนาโนคริสตัลไลน์ (ZnO) และนำมาตรวจวัดแอมโมเนีย เมทานอล และเอทานอล ที่อุณหภูมิห้องซึ่งมีความเข้มข้น 0 ถึง 500 ppm โดยใช้หลักการของคลื่นอิวาเนสเซนส์เข้ามามีส่วนร่วมในงานวิจัย ทั้งนี้พบว่าในการตรวจวัดแอมโมเนีย มีค่าความไวเท่ากับ  $-0.017/\text{kPa}$  ซึ่งมีค่าสูงกว่าเอทานอล และเมทานอล ที่วัดได้เท่ากับ  $-0.021/\text{kPa}$  และ  $-0.08/\text{kPa}$  ตามลำดับ ขณะที่การเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นนั้นแสดงให้เห็นว่าตัวตรวจวัดก๊าซด้วยสายใยแก้วนำแสงที่ใช้นาโนคริสตัลไลน์ (ZnO) เป็นสารในการตรวจจับ มีการตอบสนองที่ดีต่อแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เวลาในการตอบสนองเท่ากับ 100 นาที ขณะที่เวลาในการฟื้นฟูตัวตรวจจับเพื่อตรวจวัดซ้ำเท่ากับ 80 นาที [55]

H. Zhou *et al.* ได้กล่าวถึงวิธีการตรวจวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสายใยแก้วนำแสงชนิดแบร์ริกเกรตติ้ง (Fiber Bragg Gating: FBG) โดยการนำสารเงิน (Ag) มาเป็นตัวเคลือบบนผิวหุ้มของ FBG เพื่อเพิ่มความเงาและการสะท้อนของแสง โดยการทดลองพบว่าสารเงินที่นำมาพอกนั้นมีความสามารถในการดูดกลืนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดี ทำให้สีผิวของเงินเข้มขึ้น และพื้นผิวเปลี่ยนสภาพเป็นขรุขระผลึกนูนขึ้นมา ซึ่งผลึกนี้สามารถมองเห็นได้ นอกจากนั้นผลการทดลองพบว่าการตอบสนองเชิงเส้นของสัญญาณ ซึ่งมีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ  $0.332 \text{ dBm}$  ต่อเปอร์เซ็นต์ [10]

M. Subramanian *et al.* ศึกษาประสิทธิภาพในการตรวจจับก๊าซด้วยวัสดุนาโนสำหรับการประยุกต์ใช้กับตัวตรวจจับก๊าซด้วยสายใยแก้วนำแสงแบบคลื่นอิวาเนสเซนส์ โดยทำการดัดแปลงส่วนปลอกหุ้มชั้นใน และพอกด้วย  $\text{Ba}_3(\text{VO}_4)_2$  ที่ความหนา 3 เซนติเมตร เพื่อตรวจหาก๊าซระเหยง่าย เช่น

แอมโมเนีย อะซิโตน เมทานอล และเอทานอล ที่อุณหภูมิห้อง และมีความเข้มข้นต่างกันตั้งแต่ 50 ถึง 500 ppm และใช้ตัวตรวจจับแสงเป็นโฟโตไดโอดเปลี่ยนความเข้มแสงเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยใช้มัลติมิเตอร์ที่ติดอยู่ในส่วนการตอบสนองของตัวตรวจจับในการวัด ทั้งนี้คำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ของแรงดันขาออกของตัวตรวจจับสายใยแก้วนำแสงกับความเข้มข้นของก๊าซที่ทดสอบพบว่าสารที่พอกมีความไวต่อแอมโมเนียและเอทานอล โดยมีการตอบสนองที่รวดเร็วเท่ากับ 52 นาที และสามารถตรวจวัดซ้ำอีกครั้งในเวลา 61.5 นาที สาเหตุหลักมาจากโครงสร้างของสาร  $Ba_3(VO_4)_2$  ที่นำมาพอกมีพื้นที่ผิวมาก และมีรูพรุนสูง [56]

Z. Samavati *et al.* ได้ทำการปรับปรุงสายใยแก้วนำแสงด้วยการลอกส่วนเปลือกหุ้มชั้นในบางส่วนออก และพอกด้วยสารกึ่งตัวนำแบบโลหะออกไซด์ โดยโครงสร้างขนาดนาโน คือ ZnO NPs (Nanoparticles) ด้วยความหนาของการพอกสาร ZnO คือ 650 นาโนเมตร เพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของน้ำมันดิบที่ผสมในไดเอทิลอีเทอร์ (Diethyl Ether) จากนั้นทดสอบที่ความเข้มข้นของน้ำมันดิบตั้งแต่ 0 ซึ่งมีค่าดัชนีหักเห (Refractive Index: RI) = 1.35 ถึงความเข้มข้น 100 มีค่า RI = 1.47 การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำมันจาก 0 เปอร์เซ็นต์ เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าดัชนีหักเหของสาร ZnO แตกต่างกันตั้งแต่ 2.671 ถึง 2.726 จะส่งผลให้เกิดการกระจายของแสง ทำให้การเดินทางของแสงเปลี่ยนความยาวคลื่นประมาณ 10 นาโนเมตร และความเข้มของแสงลดลงถึง 72 เปอร์เซ็นต์ของค่าสูงสุด [57]

S. Shanavas *et al.* ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัดก๊าซภายในสายใยแก้วนำแสง ค่าความไวในการตอบสนอง รวมถึงระยะเวลาในการเตรียมการทดลองให้กลับมาอยู่ในสภาวะพร้อมใช้งาน โดยการนำเอาโลหะออกไซด์มาเป็นตัวตรวจวัดก๊าซภายในสายใยแก้วนำแสง โดยการสังเคราะห์โลหะออกไซด์ ( $CeO_2/MWCNT$ ) ระดับนาโน และใช้วิธีการไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งเมื่อนำมาเคลือบสายใยแก้วนำแสงเพื่อเป็นตัวตรวจวัด ซึ่งพบว่าการจัดเรียงเป็นเนื้อเดียวกัน และมีพื้นที่ผิวมากถึง 108 ตารางเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนเพียง 12.71 นาโนเมตร ทำให้ดูดซับก๊าซได้ไว และมีประสิทธิภาพการตรวจวัดก๊าซเพิ่มขึ้น ซึ่งเหมาะสมและตอบสนองได้ดีกับเอทานอล ผลการวิจัยพบว่า  $CeO_2/MWCNT$  ให้ค่าความไวสูงถึง 78/counts/ppm การตอบสนองอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 17 วินาที และใช้เวลาในการเตรียมการทดลองให้อยู่ในสภาวะพร้อมใช้งานเท่ากับ 9 วินาที [58]

B.Renganathan *et al.* ศึกษาการเปลี่ยนแปลงจากการตรวจวัดความเข้มข้นของแอมโมเนีย เมทานอล และเอทานอล (0 ถึง 500 ppm) ด้วยสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด (MMF) ที่ทำการปรับแต่งส่วนเปลือกหุ้มชั้นใน และพอกด้วยสารซีเรียมออกไซด์ ( $CeO_2$ ) ที่ได้มาจากวิธีไฮโดรไลซิสด้วยสารซีเรียมไนเตรตเสกซ์ไฮเดรตเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ตะกอนเป็นซีเรียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิห้องและอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าความเข้มแสงจะเพิ่มขึ้นสำหรับแอมโมเนีย และเมทานอล และลดลงสำหรับเอทานอล สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการอบ ความเข้มข้น

สูงสุดของแอมโมเนียจะเพิ่มขึ้นและค่าอื่น ๆ จะลดลง เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของก๊าซทั้ง 3 เทียบกับแรงดันในช่วงค่าสูงสุดของความยาวคลื่น พบว่า CeO<sub>2</sub> เหมาะสมที่สุดสำหรับการตรวจจับเมทานอลที่อุณหภูมิห้องที่ค่า -71/MPa [59]

Jie Liu *et al.* ศึกษาแนวทางการดูดซับโลหะที่มีประสิทธิภาพในการปรับเปลี่ยน และเพิ่มคุณสมบัติของโครงสร้างโพลีเมอร์ที่มีรูพรุน เพื่อกระตุ้นความสามารถในการตรวจจับปฏิกิริยาระหว่างโลหะและพอลิเมอร์ การแยกตัว ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในครั้งแรกได้ทำการทดสอบการดูดซับโลหะให้มีประสิทธิภาพ เตรียมสารละลาย AgNO<sub>3</sub> ผสมกับ TMBPT ที่ความเข้มข้น 50 ppm เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องและห้องที่บแสงได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นของแข็งสีเหลือง ซึ่งจะนำมากรองและล้างซ้ำเพื่อกำจัดเกลือที่ตกค้าง ทั้งนี้จากการดูดซับของเงินพบว่า การดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) จะเกิดจากสภาวะคอคอด ซึ่งขัดขวางการผ่านโมเลกุลของแก๊ส และความเข้มข้นของไอออนสารเงินลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 8 ชั่วโมงแรก เนื่องจาก TMBPT ที่เป็นโลหะมีรูพรุน และมีพื้นที่ผิวสัมผัสขนาดใหญ่ จึงช่วยให้การวิเคราะห์การกระจายไปทั่วเพิ่มปริมาณมาก และสามารถเข้าถึงโลหะที่ติดตั้งได้อย่างเต็มที่ อีกทั้งยังมีความเสถียรภาพสูง ป้องกันการชะล้าง เสถียรต่อน้ำ และไม่เปลี่ยนเป็นสีดำแม้สัมผัสแสงเป็นเวลาหลายชั่วโมง สอดคล้องในงานวิจัยนี้ยังกล่าวไว้ว่าความคงตัวของน้ำของของแข็ง Ag-TMBPT เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ [60]

S. Devendiran *et al.* ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองของตัวตรวจจับสำหรับแอมโมเนีย และเอทานอล สำหรับประยุกต์ใช้กับตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดใหม่ โดยการตรวจจับแสงจากบริเวณที่ทำการดัดแปลงส่วนปลอกหุ้มชั้นในด้วยโลหะออกไซด์ (Nanocrystalline ZnO) พบว่าตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงมีความไวในการตอบสนองที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าความไวของเอทานอลและแอมโมเนีย คือ  $56 \times 10^{-3}/\text{kPa}$  และ  $24 \times 10^{-3}/\text{kPa}$  ตามลำดับ ซึ่งความไวของตัวตรวจจับมีค่าสูงกว่าตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงแบบการปรับแต่งส่วนปลอกหุ้มชั้นในประมาณ 6 เท่า (สำหรับแอมโมเนีย) โดยใช้เวลาในการตอบสนอง และเวลาการฟื้นฟูเท่ากับ 11 นาที และ 8 นาที ตามลำดับ [61]

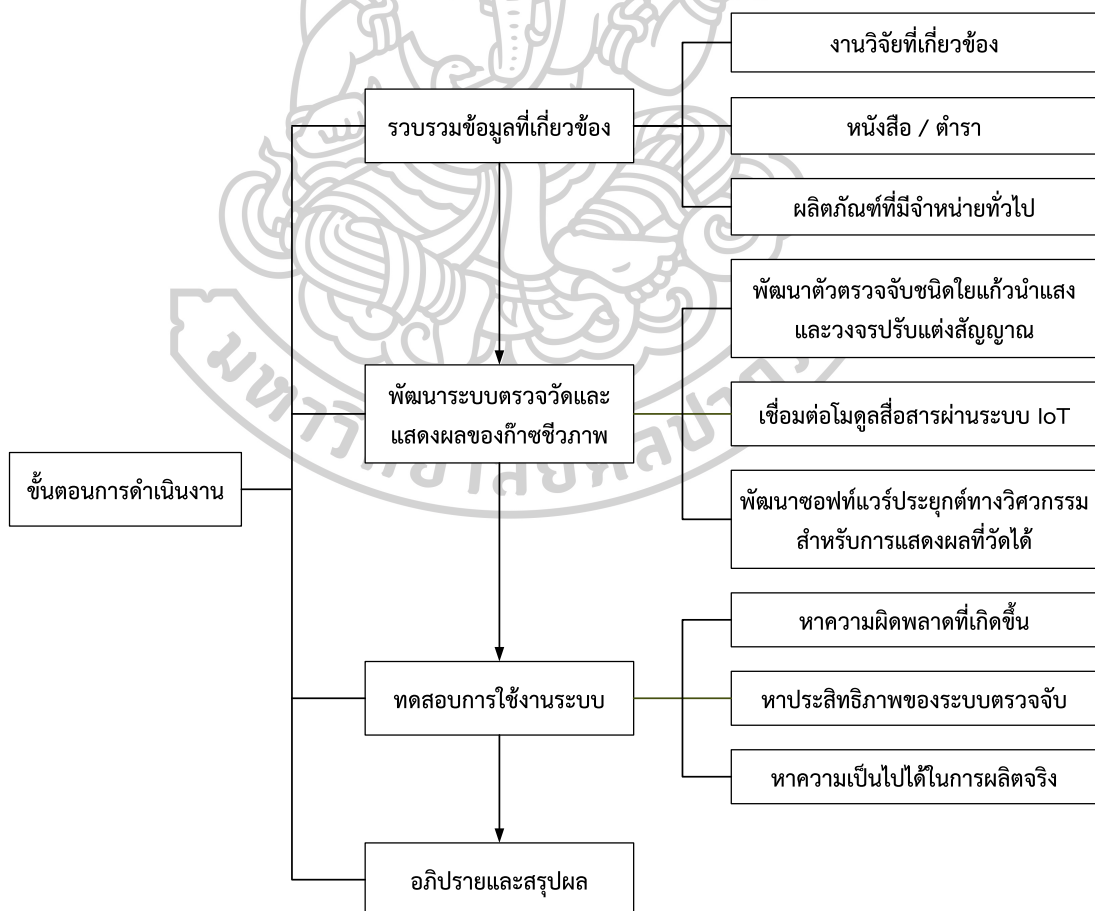
ตารางที่ 2.1สรุปวรรณกรรมวิจัย

อ้างอิง (Reference)	ปี (Year)	กลไกการทำงาน (Mechanisms)	ความไว (Sensitivity)	สารเคมีที่ใช้ในการพอก (Chemical coating)	วิธีการพอก (Coating method)	เวลาการตอบสนอง (Response time)	เวลาการคืนสภาพ (Recovery time)
62	2020	Photonic crystal	24%	NA	NA	NA	NA
63	2020	Spectroscopic	$-1.6 \times 10^{-6}$ / ppm	MTEOS, Ethanol, Thymol blue, TMAH	Dip - coating	86 s.	236 s.
64	2015	Evanescent	NA	Cu-BTC	Solvothermal method	40 s.	75 s.
65	2018	Spectroscopic	35 pm / %	PAVB and SU-8 epoxy	Dip - coating	About 6.1 to 8.0 min.	NA
66	2022	Spectroscopic	0.19 nm / %	pH dyes such as thymol blue, phenol red or fluorescent compounds.	Dip - coating	98 s.	418 s.
67	2019	Spectroscopic	NA	Ormosil, thymol blue, and tetramethylammonia hydroxide	Dip - coating	19 s.	170 s.
68	2021	Spectroscopic	83 counts / ppm	Nickel oxide/Reduced graphene oxide	Dip - coating	16 s.	22 s.
69	2023	Spectroscopic	$0.25 \pm 0.05$ dB / %	Tetraoctylammonium hydroxide solution, Tetrahydrofuran, and Tetraoctylammonium Cresol-Red dye	Dip - coating	Fast response	10 h.
70	2020	Evanescent	High sensitivity	Zinc oxide, gold nanoparticles	Drop - casting	50 s.	110 s.
71	2020	Photonic crystal	2335 nm / RIU	NA	NA	7 min.	NA

### บทที่ 3

#### ขั้นตอนการออกแบบ และวิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานของดุษฎีนิพนธ์ ซึ่งเนื้อหาจะเป็นการอธิบายถึงหลักการออกแบบและการพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์ สำหรับระบุคุณสมบัติและปริมาณความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพเป้าหมาย โดยสารประกอบทางเคมีที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืน (Absorption) ก๊าซชีวภาพแต่ละชนิดจะถูกนำมาประยุกต์ใช้งาน รวมถึงการออกแบบหน้าจอการแสดงผลที่ได้จากการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพดังกล่าวผ่านระบบอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet of things: IoTs) ทั้งนี้ขั้นตอนการดำเนินงานจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก ๆ ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.1

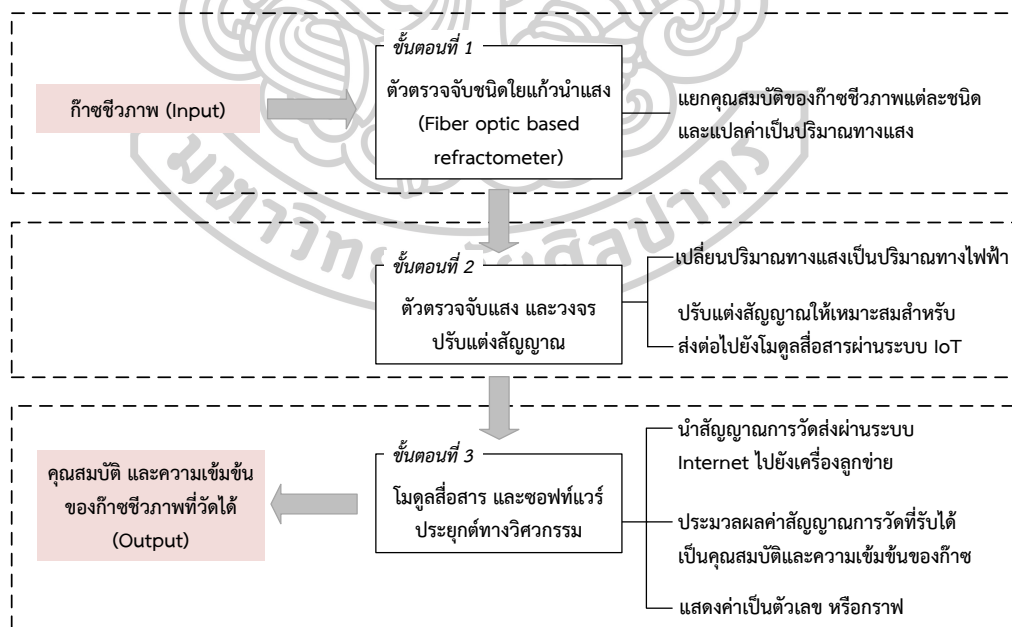


รูปที่ 29 ผังโครงสร้างการดำเนินงาน

จากรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างการดำเนินงานของดุษฎีนิพนธ์นี้สามารถแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 4 ส่วนหลัก ๆ คือ 1) การรวบรวมข้อมูล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปสู่กระบวนการสร้างกรอบแนวคิดในการออกแบบ และพัฒนาระบบในขั้นตอนต่อไป 2) การออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง พร้อมทั้งแสดงผลคุณสมบัติและความเข้มข้นของก๊าซเป้าหมายผ่านระบบ IoTs 3) เข้าสู่กระบวนการทดสอบการทำงานของระบบตรวจวัด เพื่อหาค่าความผิดพลาด และประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่ถูกพัฒนานานาขึ้น และ 4) นำผลการทดสอบที่ได้มาดำเนินการอภิปราย และสรุปผลในขั้นตอนสุดท้าย

### 3.1 ออกแบบขั้นตอนการดำเนินงานของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทมิเตอร์ผ่านระบบ IoTs

การออกแบบขั้นตอนการดำเนินงานระบบตรวจวัดพร้อมกับการแสดงผลแบบต่อเนื่องสำหรับระบุถึงคุณสมบัติ และปริมาณความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทมิเตอร์ผ่านระบบ IoTs นั้น ผู้วิจัยได้ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลตลอดจนงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 จึงได้มีแนวคิดในการออกแบบขั้นตอนการทำงานจากระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพขึ้นมา โดยผังการทำงานดังกล่าวสามารถแสดงรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 30 ผังแนวคิดสำหรับการตรวจวัดคุณสมบัติ และความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทมิเตอร์

จากรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นถึงผังแนวคิดสำหรับกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการพัฒนาระบบตรวจวัดเพื่อระบุคุณสมบัติ และความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์ ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 คือ การนำก๊าซชีวภาพเข้าสู่ระบบตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นจากสายใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์ โดย 2 ตัวแปรหลักที่จะถูกนำมาพิจารณานั้นคือ คุณสมบัติ และปริมาณความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพแต่ละชนิด ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อการดูดกลืนของแสง ณ บริเวณส่วนการปรับปรุงของปลอกหุ้มชั้นใน (De-cladded) และแปรผกผันต่อปริมาณทางแสงที่วัดได้จากตัวตรวจจับแสง (Photodetector: PD) ที่ถูกเชื่อมต่ออยู่บริเวณปลายของสายใยแก้วนำแสง (Fiber end) ซึ่งเป็นการวัดปริมาณทางแสงแบบอ้อม (Absolute measurement)

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการเปลี่ยนปริมาณทางแสง ซึ่งในที่นี่จะอยู่ในรูปแบบของค่าความเข้มแสง (Intensity) ที่วัดได้จากตัวตรวจจับแสง (PD) ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า (Electrical quantity) อย่างไรก็ตามค่าสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้มักจะมีขนาดเล็ก รวมถึงมีสัญญาณรบกวน (Noise) ดังนั้นจึงต้องดำเนินการปรับแต่งสัญญาณให้มีความเหมาะสมด้วยวงจรปรับแต่งสัญญาณ (Signal conditioning circuit) ก่อนจะถูกส่งต่อไปยังโมดูลสื่อสาร (Communication module) สำหรับส่งสัญญาณที่วัดได้ต่อไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ลูกข่าย (Remote / client computer) โดยผ่านระบบ IoT ต่อไป

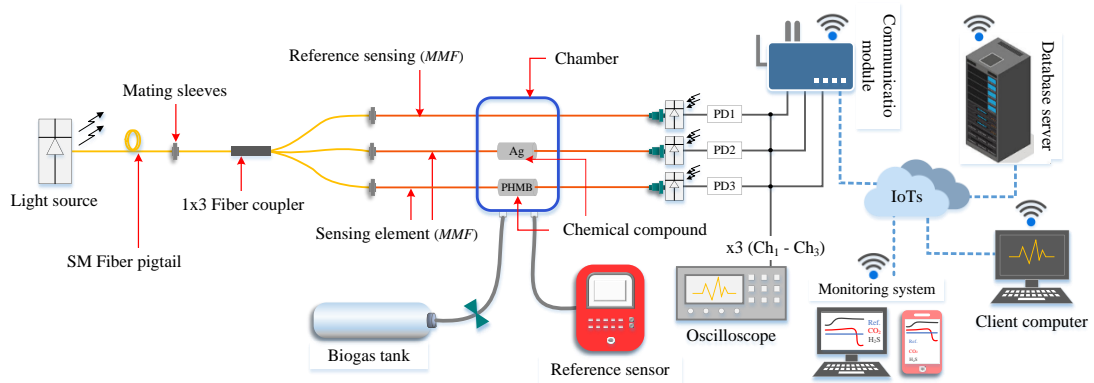
ขั้นตอนที่ 3 การนำเอาสัญญาณไฟฟ้าที่รับมาจากโมดูลสื่อสารเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์ประยุกต์ทางวิศวกรรมที่พัฒนาขึ้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมดังกล่าวจะแสดงค่าของคุณสมบัติ และปริมาณความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพที่วัดได้ โดยจะแสดงให้อยู่ในรูปแบบของจำนวนเชิงตัวเลข (Number) หรือกราฟ (Graph) บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ หรือสมาร์ตโฟน เป็นต้น

### 3.2 การออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์ และการแสดงผลผ่านระบบ IoTs

การออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ระบบหลัก คือ การออกแบบระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์ และการออกแบบหน้าจอการแสดงผลผ่านระบบ IoTs ซึ่งทั้ง 2 ระบบดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

#### 3.2.1 การออกแบบระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์

โดยในการออกแบบระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพในเบื้องต้น สามารถแสดงผังโครงสร้างการวัดและการแสดงผลของระบบได้ดังรูปที่ 3.3



**รูปที่ 31** ระบบตรวจวัดและแสดงผลของก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์ผ่านระบบ IoTs

จากรูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นถึงภาพรวมในการออกแบบระบบตรวจวัด และแสดงผลของก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์ผ่านระบบ IoTs โดยระบบจะเริ่มจากแหล่งกำเนิดแสงเดี่ยว (Light source) ที่ความยาวคลื่น 1310 นาโนเมตร ส่งผ่านแสงไปยังสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (Fiber pigtail) ผ่านตัวอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Mating sleeves) ก่อนส่งผ่านไปยัง 1x3 Fiber coupler เพื่อทำการแยกแสงออกเป็น 3 ส่วน แสงส่วนที่ 1 จะถูกส่งผ่านไปยังสายใยแก้วนำแสงที่เป็นหัวอ้างอิง ขณะที่แสงส่วนที่ 2 และ 3 จะถูกส่งผ่านไปยังส่วนหัววัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide:  $H_2S$ ) และคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide : $CO_2$ ) ซึ่งส่วนหัววัดทั้ง 3 จะถูกบรรจุอยู่ในภาชนะทดลองที่มีแก๊สชีวภาพอัดอยู่ภายใน เมื่อแสงเดินทางมาถึงจุดที่สายใยแก้วนำแสงได้ทำการปรับปรุงส่วนของปลอกหุ้มชั้นใน (De-cladded) และพอกสารประกอบทางเคมีที่มีคุณสมบัติดูดกลืนก๊าซเป้าหมายเข้าไปแทนที่ แสง และสารประกอบทางเคมีจะทำปฏิกิริยาดูดกลืนกับก๊าซดังกล่าว ทำให้การเดินทางของแสงเปลี่ยนแปลงไปและเกิดการลดทอนของแสง ทำให้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่ถูกส่งผ่านมายังตัวตรวจจับแสง (PD) เพื่อตรวจจับค่าความเข้มแสงที่วัดได้ จากนั้นค่าความเข้มแสงจะถูกส่งต่อไปที่วงจรปรับแต่งสัญญาณ เพื่อทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้เหมาะสมก่อนจะนำไปประมวลผล และแสดงผลผ่านระบบ IoTs ในส่วนสุดท้าย

อย่างไรก็ตามในการออกแบบระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์นั้นจะถูกจำแนกออกเป็นอีก 3 ส่วนย่อย ๆ คือ 1) ออกแบบการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพ และหาคุณสมบัติที่เหมาะสมของสายใยแก้วนำแสง 2) ออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 3) ออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งนี้การออกแบบการทดสอบที่ 1 จะถูกแบ่งย่อยออกเป็นอีก 2 ลักษณะ คือ การวัดขนาดของลำแสง (Spot) ที่ส่งผ่านแสงจากแหล่งกำเนิดแสงไปยังส่วนปลายของสายใยแก้วนำแสง (Fiber end) และ

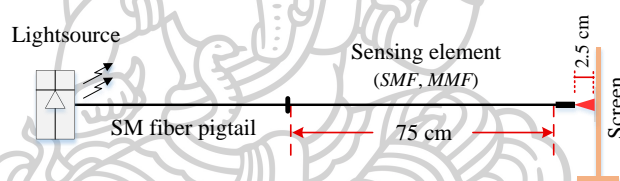


การวัดค่าความเข้มแสง (Light intensity) ผ่านตัวตรวจจับแสงระหว่างสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมสำหรับนำมาพัฒนาเป็นส่วนหัววัด (Sensing element) ของระบบตรวจจับก๊าซชีวภาพ ดังต่อไปนี้

ออกแบบระบบย่อยส่วนที่ 1 คือ การนำสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (Single-mode fiber: SMF) และหลายโหมด (Multi-mode fiber: MMF) มาทำการทดสอบประสิทธิภาพ และหาคุณสมบัติที่เหมาะสมของสายใยแก้วนำแสงที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนหัววัด (Sensing element) ซึ่งการออกแบบในส่วนนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

- การวัดขนาดลำแสงของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว และหลายโหมด

การนำสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (SMF) และหลายโหมด (MMF) มาดำเนินการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลำแสง (Spot diameter) ของสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด สำหรับหาคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพ ชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์ โดยโครงสร้างการออกแบบระบบย่อยส่วนที่ 1 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



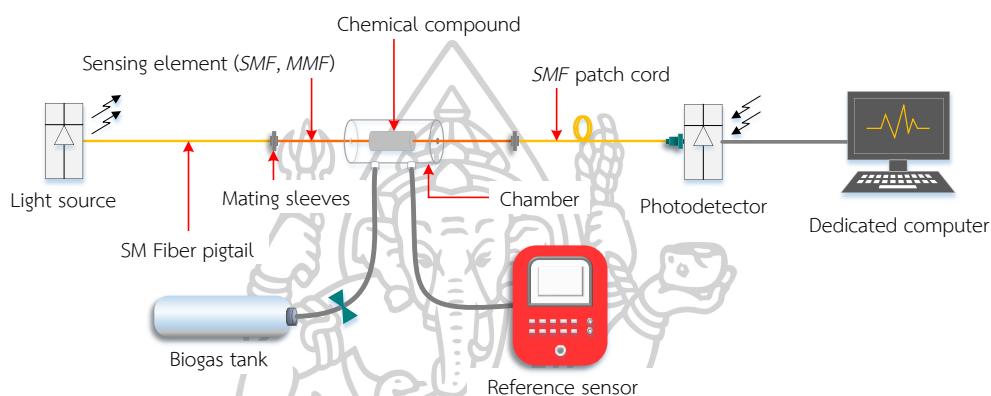
รูปที่ 32 การออกแบบโครงสร้างการวัดขนาดลำแสงของสายใยแก้วนำแสง

จากรูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นว่าแหล่งกำเนิดแสง (Light source) ถูกส่งผ่านแสงไปยังสายใยแก้วนำแสง ก่อนส่งต่อไปยังส่วนหัววัด (Sensing element) ที่ระยะห่างระหว่างปลายสายใยแก้วนำแสง และฉากรับแสงเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ทั้งนี้จะดำเนินการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลำแสงของสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างสายชนิดโหมดเดี่ยว (SMF) และหลายโหมด (MMF) เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติ และลักษณะลำแสงที่ออกมายังปลายสาย (Fiber end) ของสายใยแก้วนำแสงแต่ละชนิด

- การวัดค่าความเข้มแสงด้วยตัวตรวจจับแสง

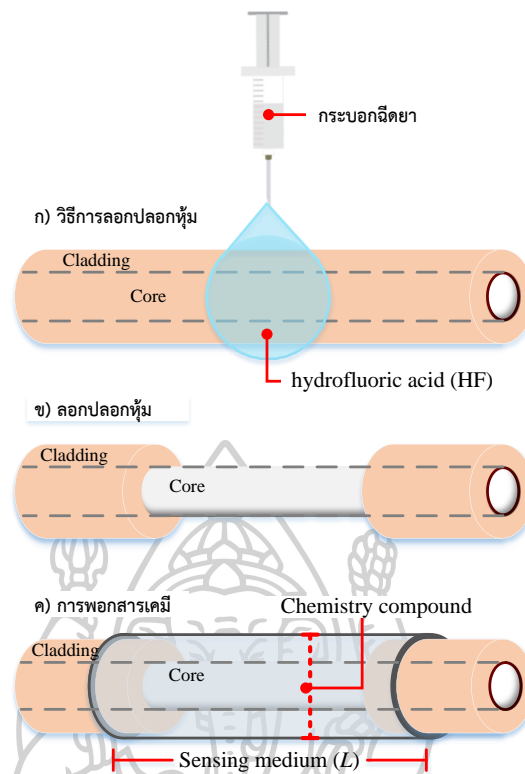
การออกแบบในส่วนนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อย ๆ ได้แก่ การวัดค่าความเข้มแสงของสายใยแก้วนำแสงแบบไม่ลอกปลอกหุ้มชั้นใน (Fiber cladde) ของสายทั้ง 2 ชนิด การวัดค่าความเข้มแสงแบบลอกปลอกหุ้มชั้นใน (Fiber de-cladde) ออกไปบางส่วน และการวัดค่าความเข้มแสงแบบนำสารประกอบทางเคมี (Chemical compound) เข้ามาพอกหรือแทนที่ (Coating) ใน

ส่วนปลอกหุ้มชั้นในที่ถูกลอกออกไป ตามลำดับ ทั้งนี้การออกแบบในส่วนที่ 2 และส่วนที่ 3 จะมีการบรรจุก๊าซชีวภาพ (Feed) เข้าไปในภาชนะทดลอง (Chamber) และดำเนินการวัดค่าความเข้มแสงที่ได้จากตัวตรวจจับแสง (PD) จากนั้นดำเนินการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดกลืนระหว่างสารประกอบเคมี และก๊าซชีวภาพเป้าหมาย ซึ่งโครงสร้างของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบและนำไปพัฒนาในส่วนหัววัด (Sensing element) ในขั้นตอนต่อไป ดังสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.5



รูปที่ 33 ออกแบบโครงสร้างระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพเพื่อดำเนินการทดสอบคุณสมบัติของสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด

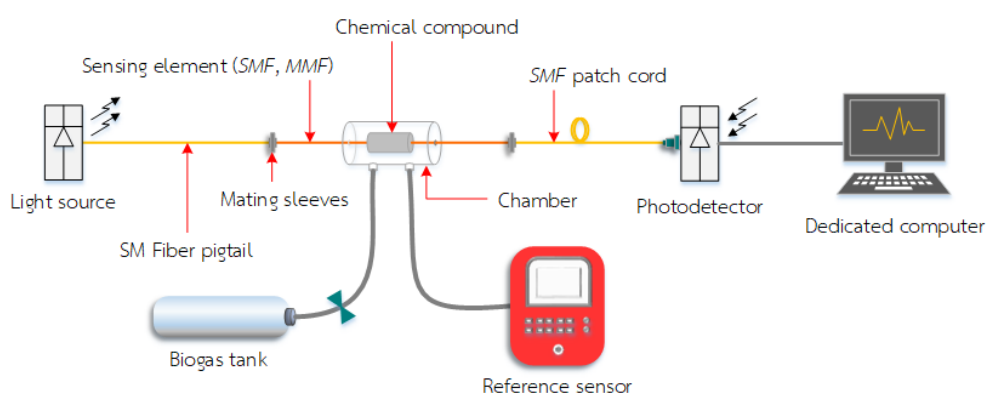
จากรูปที่ 3.5 แหล่งกำเนิดแสงเดี่ยว (Monochromatic light source) ที่ความยาวคลื่น 1,310 นาโนเมตร ถูกส่งผ่านแสง (Injected) ไปยังสายใยแก้วนำแสง (SM fiber pigtail) ก่อนถูกส่งไปยังส่วนหัววัดที่ทำมาจากสายใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยว (SMF) และหลายโหมด (MMF) และส่งต่อไปยังตัวตรวจจับแสง (PD) เพื่อวัดค่าความเข้มของแสง ณ ปลายของสายใยแก้วนำแสง โดยผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำไปดำเนินการวิเคราะห์ผลในขั้นตอนต่อไป อย่างไรก็ตามในการพัฒนาส่วนหัววัด (Sensing element) จะมีวิธีการลอกปลอกหุ้มชั้นใน (Remove cladding process) ตามรายละเอียดและขั้นตอนดังต่อไปนี้



**รูปที่ 34** ออกแบบกระบวนการพัฒนาส่วนหัววัด; (ก) การเตรียมสายใยแก้วนำแสงเพื่อลอกปลอกหุ้มชั้นใน (ข) ลอกปลอกหุ้มชั้นในด้วยกรดกัดแก้ว และ (ค) ลักษณะหลังการลอกปลอกหุ้มชั้นในของสายทั้ง 2 ชนิด

จากรูปที่ 3.6 สามารถอธิบายถึงขั้นตอนและวิธีการพัฒนาในส่วนหัววัด (Sensing element) โดยเริ่มจากการเตรียมสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด นำมาลอกส่วนปลอกหุ้มชั้นนอก (Buffer) ที่ทำมาจากพลาสติกออกตามความยาว ( $L$ ) ที่ต้องการ ซึ่งการทดสอบครั้งนี้จะลอกส่วนปลอกหุ้มชั้นนอกออกที่มีความยาวเท่ากับ 1 มิลลิเมตร จากนั้นนำสายใยแก้วนำแสงที่เตรียมไว้ไปดำเนินการลอกปลอกหุ้มชั้นใน (Cladding) ที่ทำมาจากวัสดุแก้ว (Silica) ด้วยกรดกัดแก้ว (Hydrofluoric acid: HF) โดยใช้วิธีการหยดสารเคมี (Dropping technique) [72]-[74] ดังรูปที่ 3.6(ก) ซึ่งเวลาที่ใช้ในการหยดสารกัดแก้วลงบนสายใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยว และหลายโหมด มีค่าเท่ากับ 1 ชั่วโมง 25 นาที และ 55 นาที ตามลำดับ ทั้งนี้ขั้นตอนการลอกปลอกหุ้มชั้นในออกบางส่วนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6(ข) จากนั้นนำสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิดที่ได้ทำการลอกปลอกหุ้มชั้นในเรียบร้อยแล้วไปดำเนินการพอกสารประกอบทางเคมี (Coating with chemical compound) ที่มีคุณสมบัติการดูดกลืนองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพแต่ละชนิด ดังรูปที่ 3.6(ค)

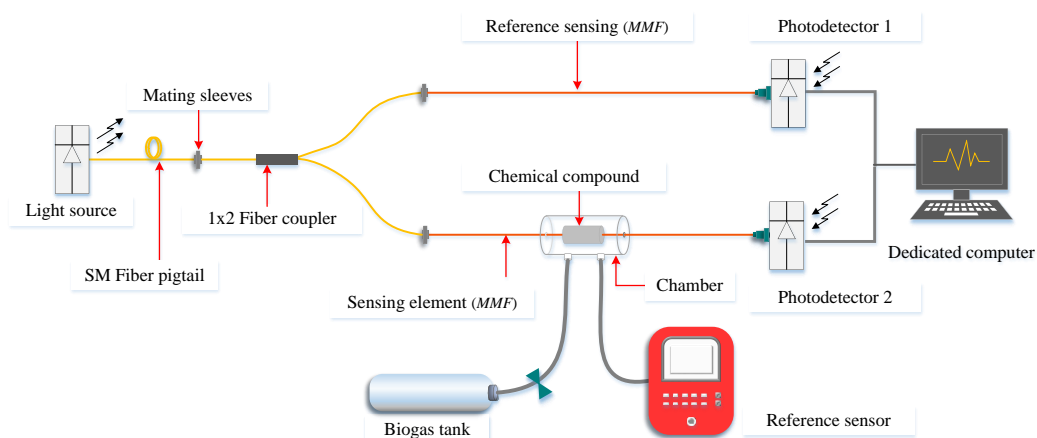
ออกแบบระบบย่อยส่วนที่ 2 คือ การออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) ด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์ โดยสารเงิน (Argentum: Ag) ถูกนำมาใช้ เพื่อทำหน้าที่ตรวจจับและดูดซึม (Absorption) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ซึ่งโครงสร้างการออกแบบระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพดังกล่าวนี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 35 ออกแบบระบบตรวจวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด

จากรูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นว่าแหล่งกำเนิดแสงเดี่ยว (Monochromatic light source) ที่ความยาวคลื่น 1,310 นาโนเมตร ถูกส่งผ่านแสง (Injected) ไปยังสายใยแก้วนำแสง (SM fiber pigtail) ก่อนส่งไปยังส่วนหัววัดที่ผ่านกระบวนการลอกปลอกหุ้มชั้นใน และพอกสารประกอบเคมีเข้ามาแทนที่ ซึ่งทำมาจากสายใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยว (SMF) และหลายโหมด (MMF) และส่งต่อไปยังตัวตรวจจับแสง (PD) เพื่อวัดค่าความเข้มของแสง ณ ปลายของสายใยแก้วนำแสง โดยผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำไปดำเนินการวิเคราะห์ผลในขั้นตอนต่อไป

ออกแบบระบบย่อยส่วนที่ 3 คือ การออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) ด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์ โดยสารประกอบเคมีชื่อโพลีเฮกซาเมทิลีนไบกวานิด (Polyhexamethylene biguanide: PHMB) ได้ถูกนำมาใช้ เพื่อทำหน้าที่ในการตรวจจับ และดูดซึม (Absorption) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ซึ่งโครงสร้างการออกแบบระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพดังกล่าวนี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8



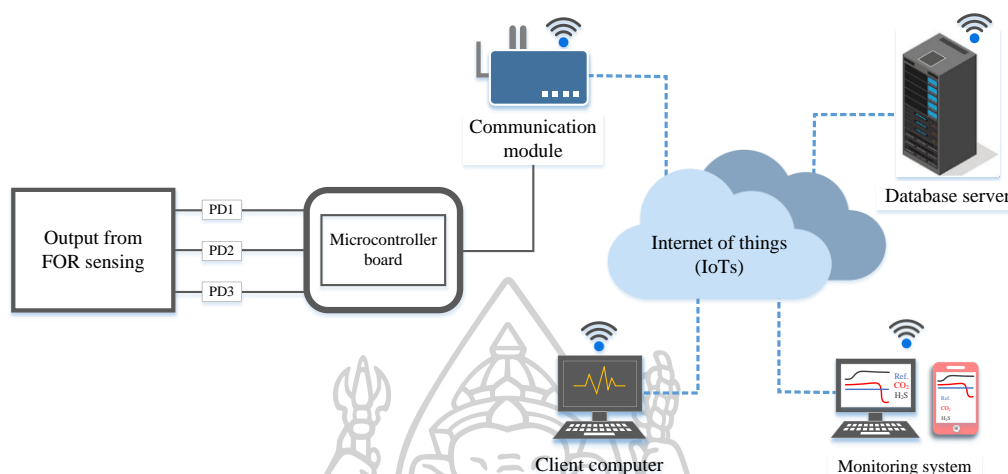
รูปที่ 36 ออกแบบระบบตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรคโทรมิเตอร์

จากรูปที่ 3.8 จากแหล่งกำเนิดแสงเดี่ยว (Monochromatic light source) ที่ความยาวคลื่น 1,310 นาโนเมตร ถูกส่งผ่านแสง (Injected) ไปยังสายใยแก้วนำแสง (SM fiber pigtail) ผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อสาย (Mating sleeves) ไปยังอุปกรณ์แยกแสง (1x2 Fiber coupler) เพื่อทำการแบ่งแสงออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 จะถูกส่งผ่านไปยังสายใยแก้วนำแสงที่เป็นหัววัดอ้างอิง (Reference sensor) และส่วนที่ 2 จะถูกส่งผ่านไปยังส่วนหัววัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ที่ถูกบรรจุอยู่ในภาชนะทดลอง (Chamber) ที่มีแก๊สชีวภาพอัดอยู่ด้านใน เมื่อแสงเดินทางมาถึงจุดที่สายใยแก้วนำแสงได้ดำเนินการปรับปรุงในส่วนของปลอกหุ้มชั้นใน (De-cladded) แสงและสารประกอบทางเคมีจะทำปฏิกิริยาดูดกลืนกับก๊าซเป้าหมายทำให้การเดินทางของแสงเปลี่ยนแปลงไป เกิดการลดทอนของแสง จากนั้นแสงจะส่งต่อไปยังตัวตรวจจับแสง (PD) เพื่อตรวจจับค่าความเข้มแสงที่วัดได้ ณ ปลายของสาย (Fiber end) โดยผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำไปดำเนินการวิเคราะห์ผลในขั้นตอนต่อไป

3.2.2 การออกแบบระบบตรวจวัดและแสดงผลของก๊าซชีวภาพที่พัฒนาขึ้นผ่านอินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง (IoT)

ในส่วนนี้เป็นการออกแบบระบบตรวจวัดและหน้าจอกการแสดงผลที่ได้รับค่าจากการทดลองของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพที่ถูกพัฒนาขึ้นด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรคโทรมิเตอร์ ซึ่งการออกแบบระบบดังกล่าวนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ระบบหลัก ๆ คือ ระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพเพื่อเปลี่ยนปริมาณทางแสงให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้า และระบบหน้าจอกการแสดงผลที่ได้จากการวัดก๊าซชีวภาพ โดยผู้วิจัยได้นำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เข้ามาประยุกต์ใช้งาน อาทิเช่น

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller board), และอุปกรณ์เชื่อมต่อระบบเครือข่าย (Router) เป็นต้น ทั้งนี้สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 3.9

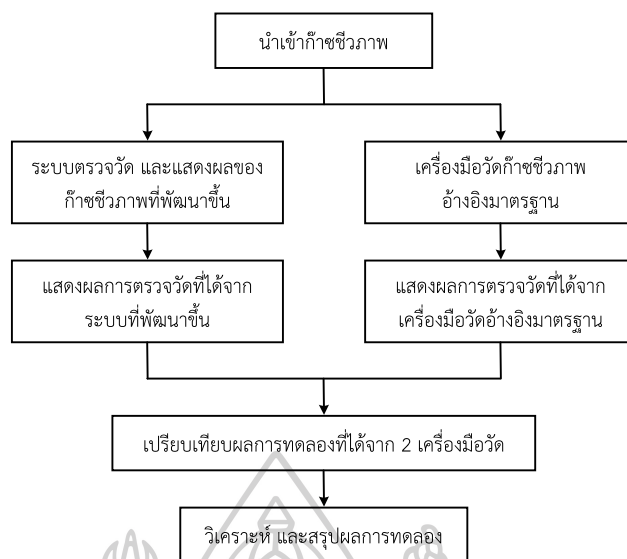


รูปที่ 37 ผังการทำงานของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพผ่านระบบ IoTs

จากรูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นว่าบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์มีหน้ารับค่าปริมาณทางแสงที่วัดได้จากตัวตรวจจับแสง (PD) โดยทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to digital converter) อีกทั้งยังทำหน้าที่ในการขยายสัญญาณให้เหมาะสมก่อนจะนำไปประมวลผล ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลจะถูกส่งต่อไปยังโมดูลสื่อสาร (Communication module) และทำการส่งข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (IoT) ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ลูกข่าย (Client computer) เพื่อประมวลผลข้อมูล (Data processing) ด้วยโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรม (Engineering application program) ที่พัฒนาขึ้น โดยข้อมูลที่นำมาแสดงผลนั้นจะแสดงถึง คุณสมบัตินี้ และความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ บนหน้าจอบคอมพิวเตอร์ หรือสมาร์ทโฟน และจะเป็นการแสดงผลแบบต่อเนื่องในเวลาจริง (Real time) นั่นเอง

### 3.3 ออกแบบการทดสอบการทำงานของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทมิเตอร์

ในขั้นตอนนี้เป็นการออกแบบการทดสอบระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพที่ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อหาค่าความผิดพลาด (Error) และประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ทั้งนี้สามารถแสดงวิธีการทดสอบระบบดังกล่าวได้ตามขั้นตอนในรูปที่ 3.10



### รูปที่ 38 วิธีการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพ

จากรูปที่ 3.10 สามารถอธิบายได้ว่าการออกแบบวิธีการทดสอบระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพดังกล่าว จะถูกแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.3.1 นำก๊าซชีวภาพเข้าสู่ระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยมีเครื่องมือวัดก๊าซชีวภาพอ้างอิงติดตั้งเข้ากับระบบดังกล่าว

3.3.2 จากนั้นดำเนินการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซแต่ละชนิดด้วยระบบตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องมือวัดก๊าซชีวภาพอ้างอิง

3.3.3 นำผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจวัดของทั้ง 2 ระบบ มาดำเนินการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความผิดพลาดของระบบที่พัฒนาขึ้น

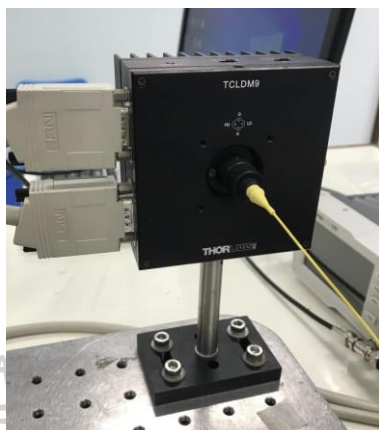
3.3.4 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

### 3.4 วัสดุ และอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในดัชนีนิพนธ์

อุปกรณ์ทางแสง (Optical devices) ที่นำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์ สำหรับระบุคุณสมบัติและปริมาณความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ ซึ่งเครื่องมือและอุปกรณ์ทั้งหมดที่นำมาประยุกต์ใช้งาน สามารถอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับหน้าที่ และหลักการทำงานของอุปกรณ์นั้น ๆ ได้ดังต่อไปนี้

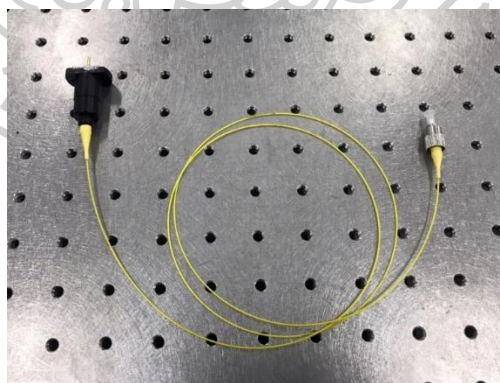
3.4.1 แหล่งกำเนิดแสงเดี่ยว (Monochromatic light source) มีความยาวคลื่นแสงที่ 1310 นาโนเมตร เป็นแหล่งกำเนิดของแสงสีขาวย โดยคลื่นแสงนี้จะอยู่ในช่วงรังสีอินฟราเรด (Infrared) ซึ่ง

มนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เนื่องจากความยาวคลื่นในช่วงนี้อยู่นอกขอบเขตของสเปกตรัมที่สามารถมองเห็นได้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 39 อุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสงเดี่ยว

3.4.2 สายใยแก้วนำแสงไดโอดเลเซอร์ (Fiber pigtail laser diode) รุ่น LPS-1310-FC มีหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อ (Connector) ระหว่างแหล่งกำเนิดแสงเดี่ยว และตัวตรวจจับต่าง ๆ ซึ่งหน้าที่หลัก คือ การส่งผ่านแสงจากต้นทางไปยังปลายทาง กล่าวคือนำแสงจากไดโอดเลเซอร์ส่งผ่านไปยังสายใยแก้วนำแสงชนิดอื่น ๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 40 สายใยแก้วนำแสงไดโอดเลเซอร์

3.4.3 ตัวควบคุมกระแสของแหล่งกำเนิดแสงไดโอดเลเซอร์ (Laser diode controller 500mA) รุ่น LDC205C ขนาดของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 500 mA เป็นชุดควบคุมกระแสของ



แหล่งกำเนิดแสงดังกล่าว ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อจัดการกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวไดโอดเลเซอร์ ทำให้มีการทำงานที่เหมาะสมเพื่อให้มีความเสถียรภาพ และความปลอดภัยของไดโอดเลเซอร์ อีกทั้งยังสามารถควบคุมการปรับค่ากระแสตามความต้องการ โดยในการทดลองของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพนี้กระแสไฟฟ้าจะถูกตั้งไว้เท่ากับ 30 mA ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.13



รูปที่ 41 ตัวควบคุมกระแสของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

3.4.4 ตัวควบคุมอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดแสงไดโอดเลเซอร์ (Temperature controller) รุ่น TED200C ยี่ห้อ Thorlabs ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของตัวไดโอดเลเซอร์ ช่วยรักษาความเสถียรภาพของความยาวคลื่นให้คงที่ตลอดระหว่างทำการทดลอง ซึ่งการทดลองของดุษฎีนิพนธ์นี้จะตั้งอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 42 ตัวควบคุมอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

3.4.5 สายใยแก้วนำแสง 1x2 Fiber couple หรือ Splitter เป็นอุปกรณ์ทางแสงมีหน้าที่ในการแยกแสงจากทางเดียวให้เป็นสองทาง หรือจากสองทางให้เป็นทางเดียว กล่าวคือ มีแสง 1 ส่วนที่สามารถเดินทางเข้าไป (Input) ยังสายใยแก้วนำแสง และถูกส่งผ่านแสงออก (Output) เป็น 2 ส่วน ดังสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.15



รูปที่ 43 สายใยแก้วนำแสง 1x2 Fiber couple

3.4.6 สายใยแก้วนำแสง 1x4 Fiber couple หรือ Splitter เป็นอุปกรณ์ทางแสงมีหน้าที่ในการแยกแสงจากทางเดียวให้เป็นสี่ทาง กล่าวคือ เมื่อมีแสง 1 ส่วนที่สามารถเดินทางเข้าไป (Input) ยังสายใยแก้วนำแสง และถูกส่งผ่านแสงออก (Output) เป็น 4 ส่วน โดยแบ่งปริมาณความเข้มแสงที่เท่ากันทั้งหมด 4 ส่วน ดังสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.16



รูปที่ 44 สายใยแก้วนำแสง 1x4 Fiber couple

3.4.7 ตัวตรวจจับแสง (Photodetector: PD) รุ่น PDA10CS2 Amplified detector 900-1700 nm ยี่ห้อ Thorlabs เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับความเข้มแสงที่ได้จากการวัดของแหล่งกำเนิดแสง และได้จากส่วนหัววัด (Sensing arm) ของระบบตรวจวัดความดันขนาดเล็ก ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 45 ตัวตรวจจับแสง (Photodetector)

3.4.8 เครื่องแสดงรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า (Digital storage oscilloscope: OSC) รุ่น TDS 2014B 4 Channels ถือเป็นอีกหนึ่งในเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่รับคลื่นสัญญาณไฟฟ้าจากตัวตรวจจับแสง (PD) และแปลค่าแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบของกราฟ และสามารถแสดงค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาจริง (Real time) ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 46 เครื่องแสดงรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า

3.4.9 บอร์ดทางแสง (Optical breadboard) RoHS Compliant part number: M-IG-34-2 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานทางด้านแสงโดยเฉพาะ มักผลิตขึ้นจากสแตนเลส และอลูมิเนียมที่แข็งแรง คุณสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์ชนิดนี้มักจะมีโครงสร้างที่แข็งแรง ลดการสั่นสะเทือนของโครงสร้างเป็นอย่างดี และกำจัดแหล่งกำเนิดเสียงสะท้อนอื่น ๆ จากปัจจัยภายนอก อีกทั้งยังมีรูที่เกิดจากกระบวนการตีปเกลียว (Tapping process) ซึ่งถูกออกแบบให้เป็นแนวยาวคล้ายกับรังผึ้ง ทำหน้าที่ในการติดตั้ง จัดวาง และปรับตำแหน่งของอุปกรณ์ทางแสง (Optical devices) ต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 47 ตัวอย่างบอร์ดทางแสงที่ใช้ในการดำเนินงาน

ที่มา: <https://www.newport.com/c/optical-breadboards>

3.4.10 เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ (Biogas analyser) เป็นเครื่องมือวัดแบบพกพา (Portable instrument) ใช้ในการวิเคราะห์ และตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพแต่ละชนิด ได้แก่ ก๊าซมีเทน (Methane: CH<sub>4</sub>), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide: CO<sub>2</sub>), และ ก๊าซออกซิเจน (Oxygen: O<sub>2</sub>) อีกทั้งยังสามารถตรวจวัดปริมาณการรั่วไหลของก๊าซจากบ่อหมัก และตรวจวัดก๊าซพิษ เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide: H<sub>2</sub>S) เป็นต้น ทั้งนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 48 เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพมาตรฐาน

อย่างไรก็ตามการอธิบายในข้างต้นเกี่ยวกับวัสดุ และอุปกรณ์ทางแสงนั้นเป็นเพียงส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ โดยยังมีอุปกรณ์อีกหลายชนิดที่นำมาประยุกต์ใช้ภายในงาน อาทิเช่น อุปกรณ์เชื่อมต่อ (Mating sleeves) ระหว่างสายใยแก้วนำแสง, หัวเชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงแบบชั่วคราว (Bare fiber adapter) ชนิด FC/PC, เครื่องเชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสง (Optical fusion splicer) เป็นต้น ทั้งนี้จะนำไปอธิบายร่วมกับการผลการดำเนินงานในบทถัดไป อีกทั้งในการออกแบบระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทมิเตอร์ที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ซึ่งได้อิงตามเนื้อหาและทฤษฎีที่ได้ศึกษาค้นคว้าตามในบทที่ 2 ดังนั้นเมื่อ

ดำเนินการออกแบบเสร็จสิ้นขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำไปพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดก๊าซชีวภาพ และดำเนินการเก็บผลการทดลองต่อไป



## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน และการอภิปรายผลการทดลอง

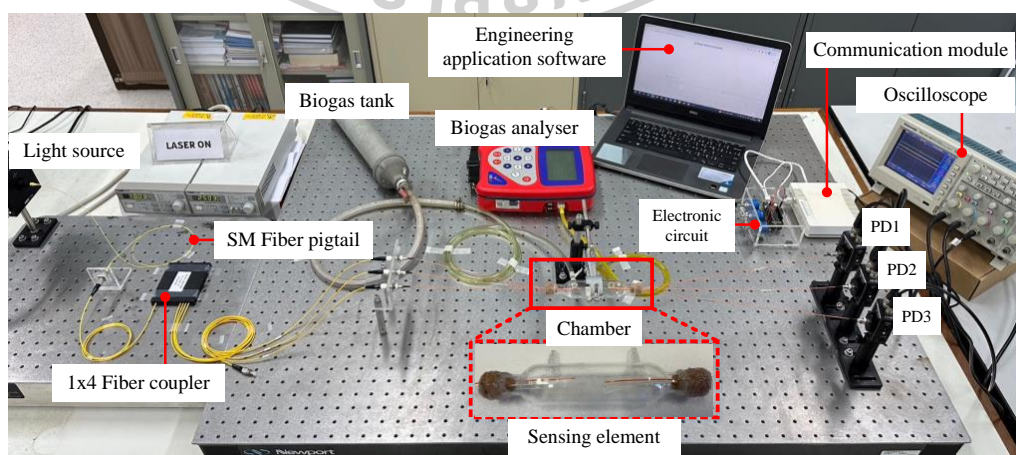
ในบทนี้เป็นการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบระบบของบทที่ 2 มาดำเนินการพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทมิเตอร์ (Fiber optic based refractometer: FOR) โดยเนื้อหาจะมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงในส่วนหัววัด (Sensing element) รวมถึงการพัฒนาระบบการแสดงผลแบบต่อเนื่องผ่านระบบ IoTs ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพจะถูกนำมาอภิปราย และเปรียบเทียบผลการทดลองสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลลัพธ์จากการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทมิเตอร์ผ่านระบบอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (IoTs)

จากการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพดังกล่าวจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ระบบหลัก ๆ ได้แก่ ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทมิเตอร์ และผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบระบบตรวจวัดและแสดงผลของก๊าซชีวภาพผ่านอินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง (IoTs) ทั้งนี้สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 ผลลัพธ์จากการออกแบบระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทมิเตอร์

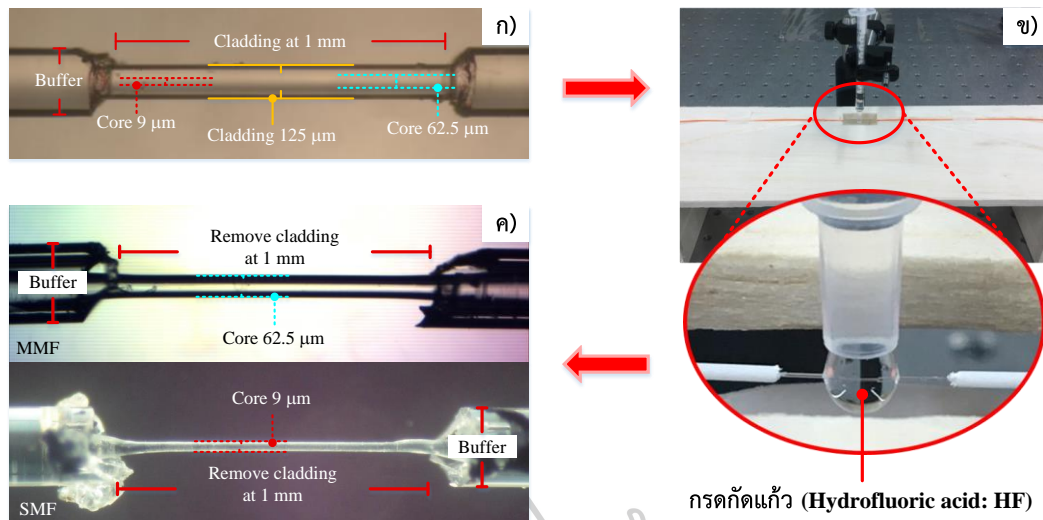
สำหรับการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทมิเตอร์ที่มีการแสดงผลแบบต่อเนื่องผ่านระบบ IoTs ในบทที่ 2 นั้น สามารถแสดงผลลัพธ์ในการพัฒนาโครงสร้างการทำงานของระบบดังกล่าวได้ในรูปที่ 4.1



รูปที่ 49 ระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทมิเตอร์

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างการทำงานของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์แบบต่อเนื่องผ่านระบบอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (IoT) ซึ่งระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพที่ถูกพัฒนาขึ้นมีความสามารถในการตรวจวัด และระบุงค์ประกอบภายในของก๊าซชีวภาพได้ นั่นคือ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide: H<sub>2</sub>S) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide: CO<sub>2</sub>) อีกทั้งระบบดังกล่าวนี้จะเป็นการนำก๊าซชีวภาพที่ผ่านกระบวนการหมักและย่อยสลายของสารอินทรีย์ด้วยแบคทีเรียที่อยู่ในภาวะแวดล้อมแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) เข้ามาใช้เพื่อเป็นก๊าซเป้าหมายของการวิจัยในครั้งนี้ ทั้งนี้ก๊าซชีวภาพดังกล่าวจะถูกบรรจุไว้ในภาชนะทดลอง (Chamber) เท่านั้น โดยจะมีส่วนหัววัด (Sensing elements) ที่ทำมาจากสายใยแก้วนำแสง ติดตั้งอยู่ภายในภาชนะทดลองดังกล่าวในลักษณะของการวัดแบบระบบปิด (Closed-loop measurement) จำนวน 3 เส้น คือ ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงอ้างอิง (Reference sensor), ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับตรวจวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide sensing), และตรวจวัดจับใยแก้วนำแสงสำหรับตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide sensing) จากนั้นเมื่อแสงเดินทางผ่านตัวตรวจจับที่ได้ดำเนินการปรับปรุงในส่วนของปลอกหุ้มชั้น (De-cladded) ก่อนส่งต่อไปยังตัวตรวจจับแสง (Photodetector: PD) ที่เชื่อมต่ออยู่บริเวณปลายของสายใยแก้วนำแสง (Fiber end) เพื่อวัดปริมาณความเข้มแสง (Intensity) ซึ่งค่าที่ตรวจวัดได้จะถูกส่งต่อไปยังเครื่องวัดรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า (Oscilloscope: OSC) และวงจรปรับแต่งสัญญาณ เพื่อทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้เหมาะสมก่อนจะนำไปประมวลผล และแสดงผลผ่านระบบ IoT โดยผลการตรวจวัดจะแสดงอยู่บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ หรือสมาร์ตโฟนผ่านโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมที่พัฒนาขึ้น

อย่างไรก็ตามจากการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพในข้างต้นได้มีการกล่าวไว้ในบทที่ 3 เกี่ยวกับการออกแบบวิธีการทดสอบสายใยแก้วนำแสง เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาพัฒนาเป็นส่วนหัววัด (Sensing element) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์ของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพ โดยผู้วิจัยได้นำสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว (Single-mode fiber: SMF) และหลายโหมด (Multi-mode fiber: MMF) เข้ามามีส่วนร่วมในการทดสอบครั้งนี้ ซึ่งวิธีการหาคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับสายใยแก้วนำแสงที่จะนำไปพัฒนาเป็นส่วนหัววัด และผลการทดลองในขั้นตอนต่าง ๆ นั้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2(ก) – 4.2(ค)



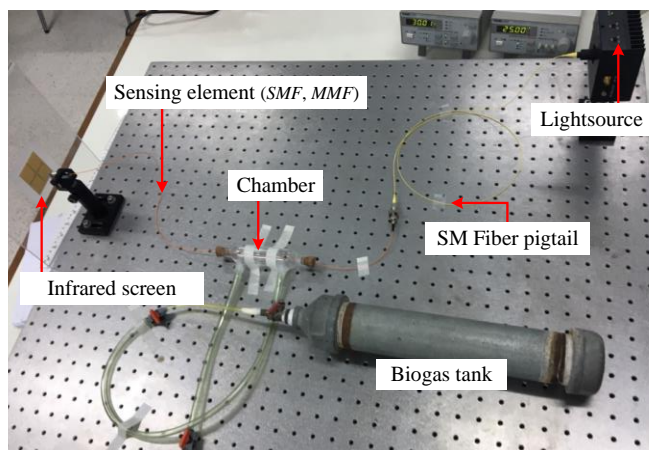
**รูปที่ 50** กระบวนการพัฒนาส่วนหัววัด; (ก) การเตรียมสายใยแก้วนำแสงไปลอกปลอกหุ้มชั้นใน (ข) ลอกปลอกหุ้มชั้นในด้วยกรดกัดแก้ว และ (ค) ลักษณะการลอกปลอกหุ้มชั้นในของสายทั้ง 2 ชนิด

จากรูปที่ 4.2 สามารถอธิบายถึงขั้นตอนและกระบวนการพัฒนาส่วนหัววัดก๊าซชีวภาพ โดยเริ่มจากการเตรียมสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมตเดี่ยว (SMF) และหลายโหมต (MMF) มาทำการลอกปลอกหุ้มชั้นนอก (Buffer) ที่ทำมาจากพลาสติกออกตามความยาว (L) ซึ่งการทดลองในส่วนนี้จะมี ความยาวเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.2(ก) จากนั้นนำสายที่เตรียมไว้ไปเข้ากระบวนการลอกปลอกหุ้มชั้นใน (Cladding) ที่ถูกผลิตขึ้นจากวัสดุแก้ว (Silica) ด้วยกรดกัดแก้ว (Hydrofluoric acid: HF) โดยใช้วิธีการหยดสารเคมี (Dropping technique) ซึ่งเวลาที่ใช้ในการหยดสารกัดแก้วลงบนสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมตเดี่ยว และหลายโหมต จะเท่ากับ 1 ชั่วโมง 25 นาที และ 55 นาที ตามลำดับ ทั้งนี้ในการทดลองจะเป็นการลอกปลอกหุ้มชั้นในออกแค่บางส่วน ดังรูปที่ 4.2(ข) และ 4.2(ค) จากนั้นจะเป็นการนำสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด ที่ทำการลอกปลอกหุ้มชั้นในออกเรียบร้อยแล้วไปเข้าสู่กระบวนการพอกสารประกอบทางเคมี (Coating with chemical compound) ที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในขั้นตอนต่อไป

ทั้งนี้ในการทดลองและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิดนั้นได้ถูกออกแบบไว้ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ การวัดขนาดของลำแสง (Spot size) ที่ส่งผ่านแสงจากแหล่งกำเนิดแสงไปยังส่วนปลายของสาย (Fiber end) และการวัดค่าความเข้มแสง (Light intensity) ผ่านตัวตรวจจับแสง (PD) ระหว่างสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด ดังสามารถแสดงผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้



- ผลการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางลำแสงของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว และหลายโหมด จากการออกแบบวิธีการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลำแสงของสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นั้นสามารถแสดงดังรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.1 ตามลำดับ



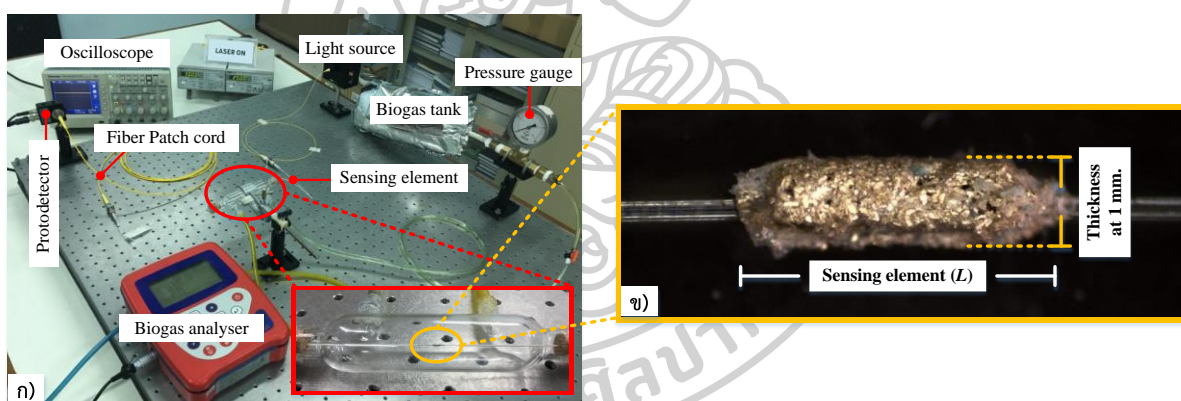
รูปที่ 51 โครงสร้างการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำแสง

ตารางที่ 4.2 การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำแสงชนิดโหมดเดี่ยว และหลายโหมดบนฉากรับแสง

Investigation conditions	Spot site (mm.)		Spot profiles	
	SMF	MMF	SMF	MMF
Fiber cladding	4	26		
Fiber de-cladding	4	26		
Chemical compound coating	4	26		
Biogas feeding	4	26		

จากรูปที่ 4.3 แสดงถึงโครงสร้างในการวัดขนาดลำแสงจากสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด โดยผลการทดลองพบว่าการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่างสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมตเดี่ยว (SMF) และหลายโหมต (MMF) มีขนาดเท่ากับ 4 และ 26 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสายชนิดหลายโหมตมีขนาดของแกนกลางที่ใหญ่กว่าจึงทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางนั้นมีขนาดที่กว้างกว่าสายชนิดโหมตเดี่ยว นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงลักษณะของลำแสงจะเห็นได้ว่าสายชนิดโหมตเดี่ยวมีลำแสง ๓ ฉากรับแสงเป็นจุดเดี่ยว ขณะที่สายชนิดหลายโหมตจะมีลำแสงเป็นจุดเล็ก ๆ หลายจุด เนื่องจากสายชนิดนี้มีการเดินทางของแสงแบบกระจัดกระจาย (Step index) จึงทำให้ลำแสงที่ออกไปยังฉากรับแสงนั้นมีลักษณะตารางที่ 4.1 ตามลำดับ

- ผลการวัดค่าความเข้มแสงด้วยตัวตรวจจับแสง (Photodetector) จากการออกแบบระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมของสายใยแก้วนำแสงแต่ละชนิด โดยเครื่องมือวัดก๊าซชีวภาพ (Biogas analyser) ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมืออ้างอิง (Reference instrument) สำหรับวัดความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพที่ถูกบรรจุเข้าไปยังภาชนะทดลอง (Chamber) ซึ่งโครงสร้างของระบบที่ได้ออกแบบนั้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4(ก)



รูปที่ 52 ระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์;  
(ก) โครงสร้างของระบบตรวจวัด และ (ข) ส่วนหัววัดที่ถูกพอกด้วยสารประกอบทางเคมี

นอกจากนั้นในรูปที่ 4.4(ข) จะเป็นการพัฒนาส่วนหัววัด (Sensing element) ก๊าซชีวภาพ โดยการนำสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมตเดี่ยว (SMF) และหลายโหมต (MMF) มาลอกปลอกหุ้มชั้นในออก (De-cladded) จากนั้นนำมาพอกด้วยสารประกอบทางเคมีชื่อว่าสารเงิน (Argentum: Ag) ที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ มีลักษณะแวววาว (Shiny) ทำให้เกิดการสะท้อนแสง (Reflection) ได้ ดังนั้นเมื่อแสงไปกระทบกับสารเงิน แสงจะสามารถซึมผ่านและแพร่กระจายไปยังพื้นผิว (Surface) ของส่วนหัววัดส่งผลให้เกิดช่วงมุมตกกระทบกันระหว่างแกนกลาง

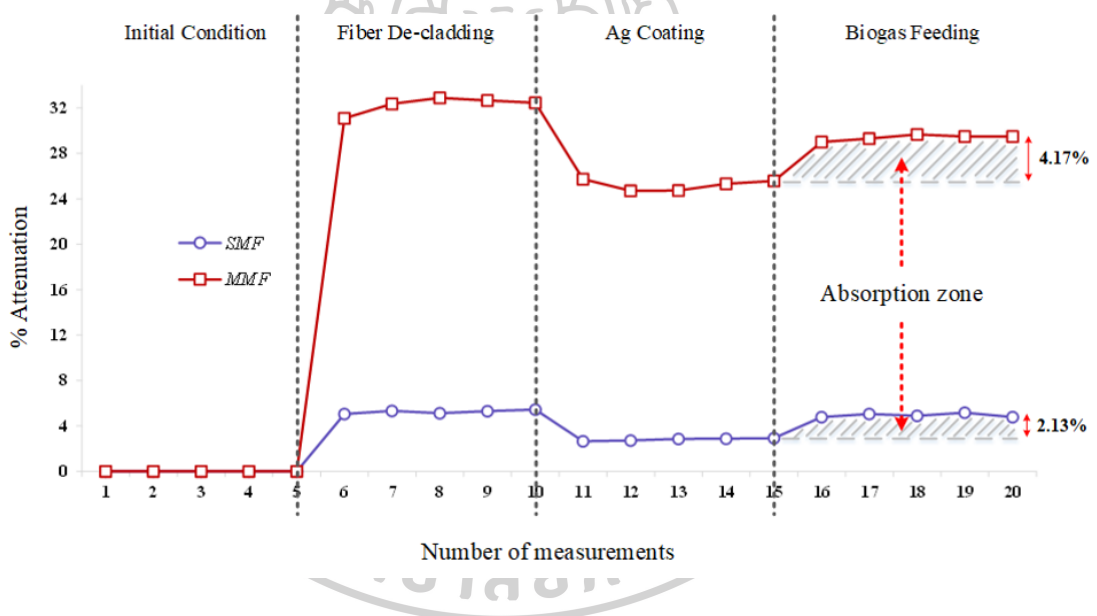
(Core) และ ส่วนปลอกหุ้มชั้นใน (Cladding) ที่ระยะการปรับปรุง (L) เกิดการสะท้อนกลับภายใน ขณะเดียวกันการเดินทางของแสงดังกล่าวจะมีบางส่วนที่กระเจิง (Scattering) ออกไปภายนอกส่งผลให้เกิดการสูญเสียกำลังทางแสง และค่าความเข้มแสง ณ ปลายสายจะถูกลดทอนไป อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้สามารถพิสูจน์ได้จากผลการทดลองในตารางที่ 1 นอกจากนั้น การทดลองยังถูกแบ่งออกเป็น 3 การทดลองย่อย ๆ ซึ่งในแต่ละการทดลองนั้นจะดำเนินการวัดซ้ำจำนวน 5 ครั้ง ดังต่อไปนี้

**ตารางที่ 4.3** ค่าความเข้มแสงที่วัดได้จากตัวตรวจจับแสง (PD)

No.	SMF and MMF (Core 9, 62.5 micron, and L = 1 mm)					
	Fiber cladded with non-biogas feeded (V)		Fiber de-cladded with biogas feeded (V)			
			Without coating		With coating	
	SMF	MMF	SMF	MMF	SMF	MMF
1	3.76	3.86	3.52	2.58	3.58	2.76
2	3.75	3.87	3.51	2.54	3.59	2.77
3	3.76	3.85	3.52	2.54	3.59	2.76
4	3.77	3.86	3.52	2.54	3.58	2.77
5	3.75	3.86	3.52	2.50	3.59	2.77
Average	3.76	3.86	3.52	2.54	3.59	2.77
	%Attenuation		6.39	34.20	1.90	8.17

จากตารางสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อนำสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมตเดี่ยว (SMF) และหลายโหมต (MMF) ไปดำเนินการติดตั้งภายในภาชนะทดลอง จากนั้นดำเนินการวัดค่าความเข้มแสงผ่านตัวตรวจจับแสง (PD) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสายใยแก้วนำแสงแบบไม่ลอกปลอกหุ้มชั้นใน (Fiber cladded) ของสายชนิดโหมตเดี่ยว (SMF) และหลายโหมต (MMF) มีค่าความเข้มแสงเฉลี่ยเท่ากับ 3.76 และ 3.86 โวลต์ จากนั้นทำการบรรจุก๊าซชีวภาพ (Feed biogas) ที่ค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทน (Methane), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide), และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) มีค่าเท่ากับ 43.8%, 37.8%, และ 223 ppm เข้าไปภายในภาชนะทดลอง โดยมีสายใยแก้วนำแสงที่ได้ผ่านการปรับปรุงส่วนของปลอกหุ้มชั้นในเรียบร้อยแล้ว (Fiber de-cladded without coating) ติดตั้งอยู่ภายใน ซึ่งค่าที่วัดได้จะลดลงเฉลี่ยเท่ากับ 3.52 และ 2.54 โวลต์ โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนเฉลี่ย (% attenuation) เท่ากับ 6.39% และ 34.20% ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด ถูกพอกด้วยสารเงิน และบรรจุก๊าซชีวภาพ ค่าความเข้มแสงจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ยเท่ากับ 3.59 และ 2.77 โวลต์ หรือมีค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.90%

และ 8.17% ตามลำดับ โดยผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่าสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (SMF) มีค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนต่ำกว่าสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด (MMF) เนื่องจากมีขนาดแกนกลางเล็กลักษณะการเดินทางของแสงคล้ายกับเส้นตรง ทำให้เมื่อแสงเดินทางผ่านไปยังส่วนหัววัด (Sensing element) เกิดการกระเจิงเล็กน้อยส่งผลให้ค่าความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงเพียงไม่มากนัก ในขณะที่สายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดมีขนาดแกนกลางที่ใหญ่ มีลักษณะการเดินทางของแสงเป็นแบบกระจัดกระจายทำให้เมื่อแสงผ่านไปยังส่วนหัววัดมีการกระเจิงออกไปยังภายนอกได้มาก ส่งผลให้ค่าความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการสรุปผลการทดลองการหาคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาพัฒนาเป็นส่วนหัววัด (Sensing element) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์ของระบบตรวจจับก๊าซชีวภาพให้อยู่ในรูปแบบของกราฟเส้น ดังสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.5

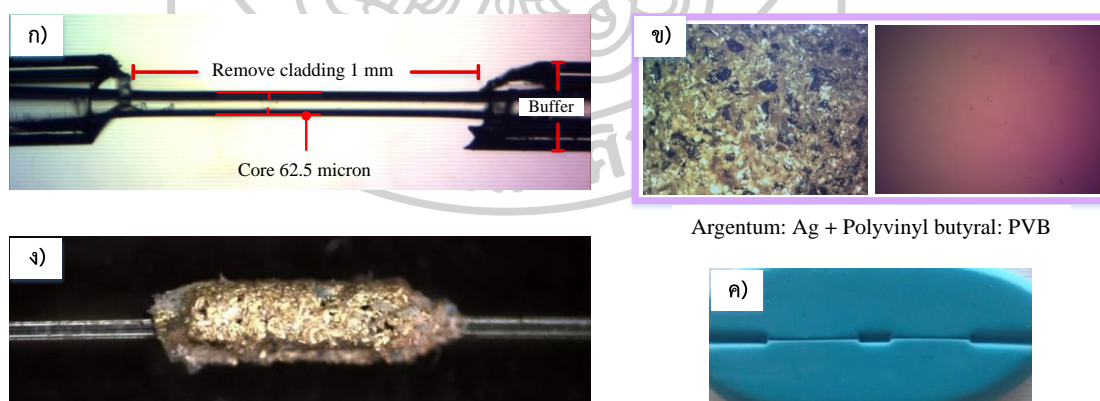


รูปที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการวัดและค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนของแสงในสถานะต่าง ๆ ที่ได้จากสายใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์

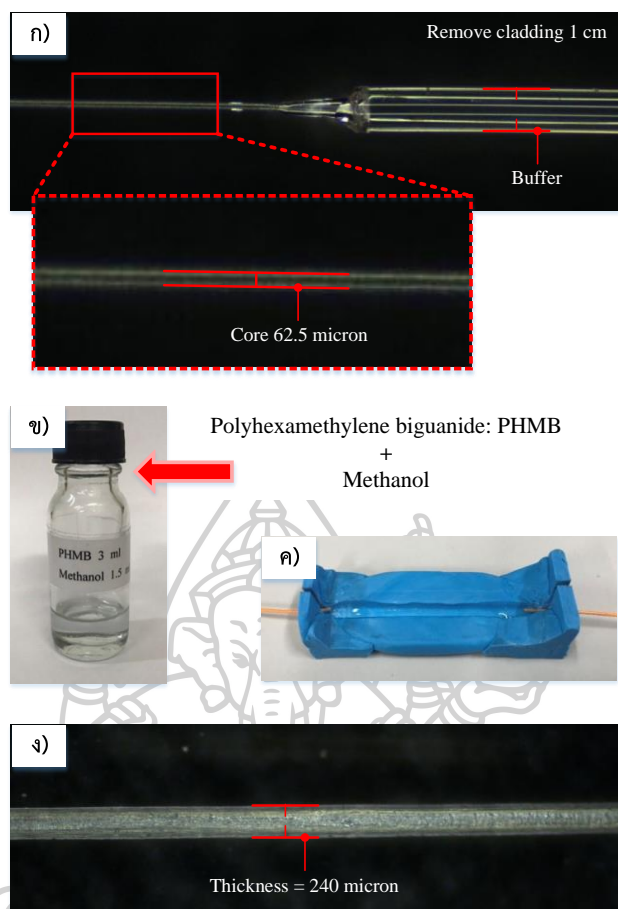
จากรูปที่ 4.5 สามารถสรุปผลการทดลองการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด เพื่อนำมาพัฒนาเป็นตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์สำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพ โดยการทดลองจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำแสง และการวัดค่าความเข้มแสง ณ ส่วนปลายของตัวตรวจจับรีแฟรกโทรมิเตอร์ ซึ่งผลการทดลองพบว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของลำแสงระหว่างสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (SMF) และหลายโหมด (MMF) นั้น จะมีขนาดเท่ากับ 4 และ 26 มิลลิเมตร โดย

ลักษณะการเดินทางของแสงภายในสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 ชนิด มีความต่างกัน คือ แบบเส้นตรง และแบบกระจัดกระจาย ตามลำดับ ขณะที่การวัดค่า ความเข้มแสงผ่านตัวตรวจจับแสง (PD) พบว่า เมื่อมีการบรรจุก๊าซชีวภาพเข้าไปภายในระบบตรวจวัดที่มีส่วนหัววัด (Sensing element) ติดตั้งอยู่ ผลการทดลองพบว่าสายชนิดโหมดเดี่ยว และหลายโหมดที่ผ่านกระบวนการลอกปลอกหุ้มชั้นในออก จะมีค่าเฉลี่ยความเข้มแสงที่ลดลง ขณะที่เมื่อนำสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 มาเข้ากระบวนการพอกสารประกอบทางเคมี ผลการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มแสงจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ค่าที่วัดได้จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน อย่างไรก็ตามค่าความเข้มแสง (Intensity) ที่ถูกลดทอนจากสายชนิดหลายโหมด (MMF) จะมีค่าเฉลี่ยมากกว่าสายชนิดโหมดเดี่ยว (SMF) ซึ่งค่าดังกล่าวนี้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการดูดกลืนก๊าซชีวภาพได้ดีกว่า ดังนั้นการทดลองในส่วนนี้จึงสรุปได้ว่าสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด (MMF) จะมีความเหมาะสมในทางกายภาพมากกว่าสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (SMF) ในกรณีของการนำมาพัฒนาเป็นส่วนหัววัดของระบบตรวจจับก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตามเมื่อดำเนินการคัดเลือกสายใยแก้วนำแสงที่มีความเหมาะสมทางกายภาพสำหรับนำมาพัฒนาเป็นส่วนหัววัด (Sensing element) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์ของระบบตรวจจับก๊าซชีวภาพเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นผู้วิจัยจะดำเนินการอธิบายขั้นตอนในการพอกสารประกอบทางเคมีเข้ามาแทนที่ส่วนปลอกหุ้ม (cladding) ที่ถูกลอกออกไปอย่างละเอียด ทั้งนี้สามารถแสดงขั้นตอนการพอกสารประกอบทางเคมีได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 54 กระบวนการพอกสารประกอบเคมี; (ก) เตรียมสายใยแก้วนำแสงที่ลอกปลอกหุ้มชั้นในออก (ข) สารประกอบเคมี Ag และ PVB (ค) นำสารประกอบทางเคมีหยดลงบนแม่พิมพ์ และ (ง) พอกสารประกอบทางเคมีแทนที่ปลอกหุ้มชั้นใน



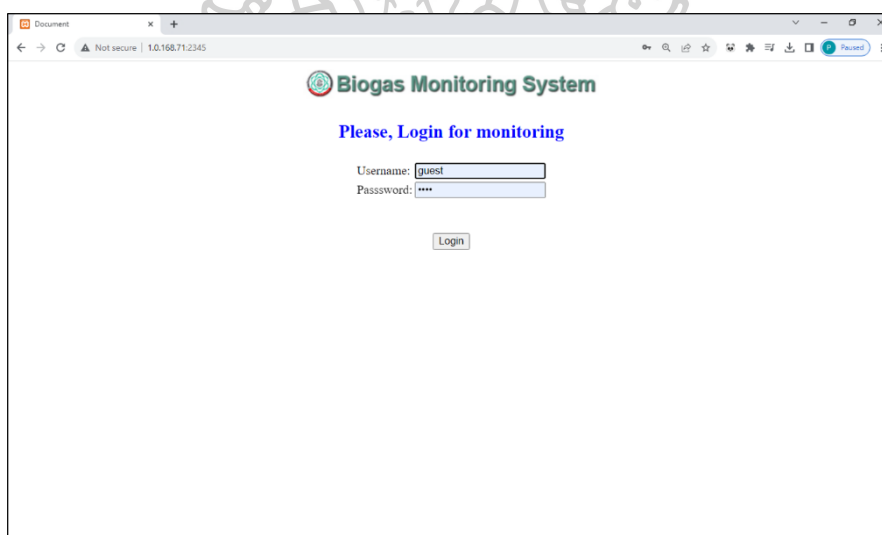
รูปที่ 55 กระบวนการพอกสารประกอบเคมี; (ก) เตรียมสายใยแก้วนำแสงที่ลอกปลอกหุ้มชั้นในออก (ข) สารประกอบเคมี PHMB และ Methanol (ค) นำสารประกอบทางเคมีหยดลงบนแม่พิมพ์ และ (ง) พอกสารประกอบทางเคมีแทนที่ปลอกหุ้มชั้นใน

จากรูปที่ 4.7 แสดงถึงขั้นตอนและวิธีการพอกสารประกอบทางเคมี โดยสารโพลีเฮกซาเมทิลีนไบกวาไนด์ (Polyhexamethylene biguanide: PHMB) ที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ถูกนำมาใช้งานร่วมกับเมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl alcohol) ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติในการทำละลายผู้วิจัยจึงนำมาผสมเพื่อทำให้การเคลือบสารลงบนสายใยแก้วนำแสงง่ายและรวดเร็วมากขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.7(ข) ทั้งนี้เมื่อจะเข้าสู่กระบวนการพอกสารประกอบทางเคมีผู้วิจัยจะต้องเตรียมสายใยแก้วนำแสงที่ผ่านการลอกปลอกหุ้มชั้นในเรียบร้อยแล้วดังรูปที่ 4.7(ก) มายึดติดเข้ากับแม่พิมพ์ (Mold) ที่เตรียมไว้ โดยในครั้งนี้จะนำสารประกอบเคมีดังกล่าวที่เตรียมไว้หยด (Dropping) ลงบนแม่พิมพ์และทิ้งไว้ให้สารประกอบดังกล่าวมีความหนืดเล็กน้อย เนื่องจากจะส่งผลทำให้สารประกอบทางเคมีที่นำมาประยุกต์ใช้นั้นเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะเข้ากับสายใยแก้วนำ

แสงได้ดี อีกทั้งระยะความยาว (L) ในการพอกจะเท่ากับ 2, 3, และ 4 เซนติเมตร ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 110-120 นาที ในการทำให้สารดังกล่าวนั้นแห้งและสามารถนำมาใช้งานได้ อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบการทำงานของระบบตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะสามารถแสดงได้ในหัวข้อถัดไป

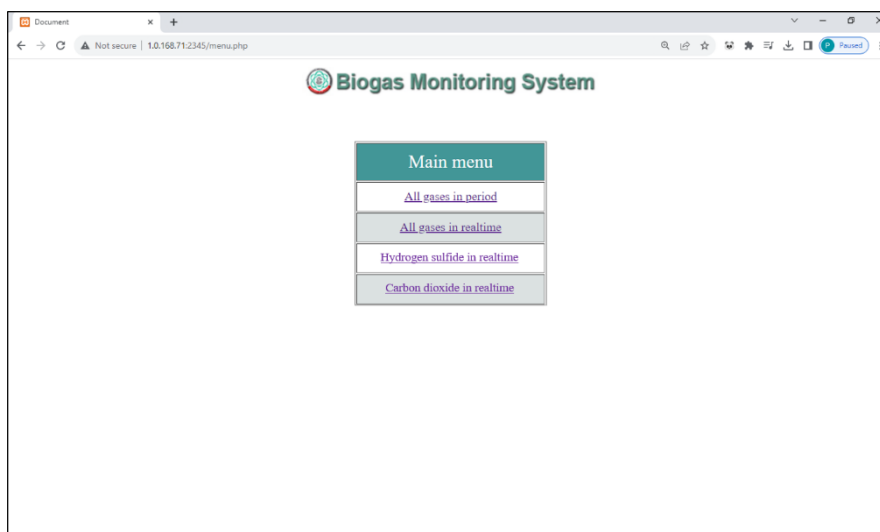
#### 4.1.2 ผลลัพธ์จากการออกแบบระบบตรวจวัดและแสดงผลของก๊าซชีวภาพผ่านระบบ (IoT)

จากการออกแบบและพัฒนาระบบหน้าจอการแสดงผลของการตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องด้วยโปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์ (Web browser) ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวสามารถเข้าถึงข้อมูล (Data) และสามารถแสดงผลหน้าจอให้อยู่ในรูปแบบของเว็บเพจ (Webpage) ได้ ทั้งนี้เมื่อผู้ใช้งาน (User/Guest) ต้องการเข้าสู่ระบบที่พัฒนาขึ้น จำเป็นจะต้องกรอกโดเมนเนม (Domain name) เพื่อเข้าสู่หน้าจอหลัก (Main menu) โดยผู้ใช้งานจะต้องทำการกรอกชื่อผู้ใช้งาน (Username) และรหัส (Password) ก่อนเข้าสู่ระบบทุกครั้ง ดังสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.8



รูปที่ 56 หน้าจอการเข้าสู่ระบบ

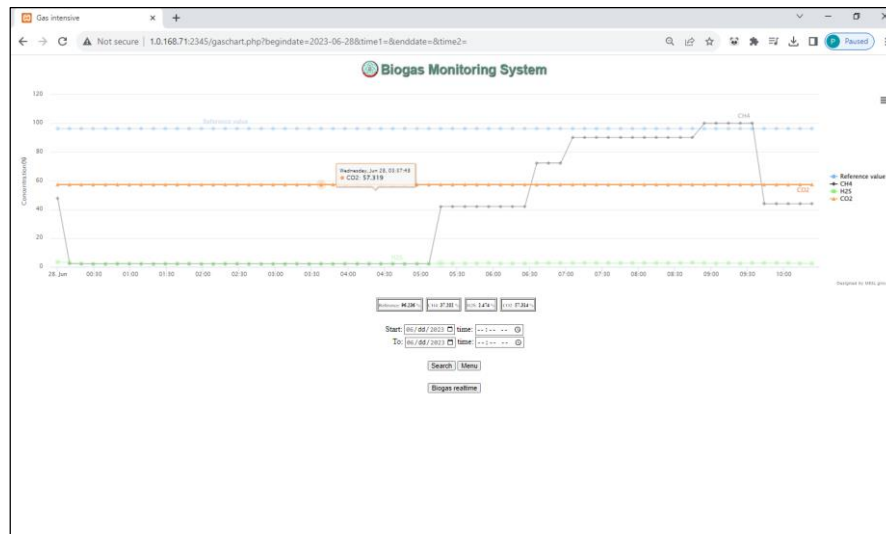
เมื่อผู้ใช้งานทำการกรอกชื่อผู้ใช้ และรหัสได้ถูกต้องผู้ใช้งานจะพบกับหน้าจอเมนูหลัก (Main menu) ซึ่งหน้าจอในส่วนนี้จะเป็นการแสดงผลเมนูในการเข้าถึงข้อมูลที่ได้ค่ามาจากระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยได้มีการอธิบายไปแล้วในข้างต้น ทั้งนี้สามารถแสดงหน้าจอเมนูหลักได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 57 หน้าจอเมนูหลัก

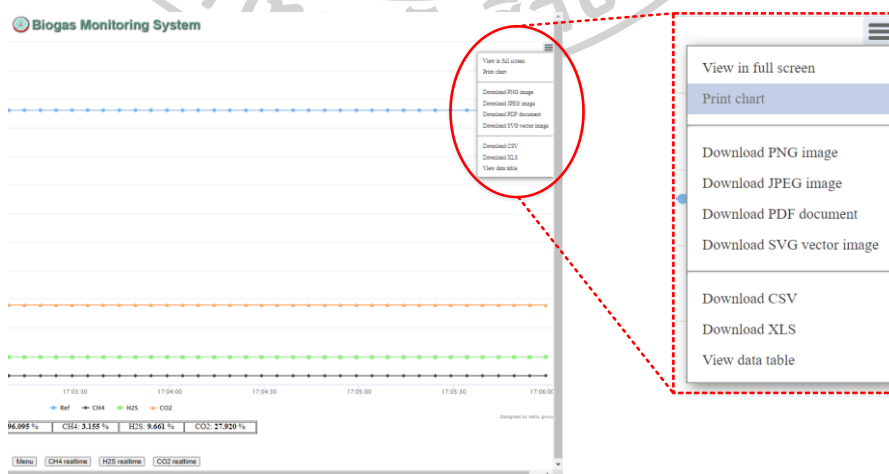
จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นถึงหน้าจอเมนูหลักซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 4 เมนูฟังก์ชันหลัก ได้แก่ ฟังก์ชันการแสดงผลแบบช่วงเวลาหนึ่ง (Period), ฟังก์ชันการแสดงผลแบบเวลาจริง (Real-time), ฟังก์ชันการแสดงผลของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบเวลาจริง (Hydrogen sulfide in real-time), และฟังก์ชันการแสดงผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบเวลาจริง (Carbon dioxide in real-time) ตามลำดับ ทั้งนี้ระบบการแสดงผลการตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องนั้นจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับโมดูลการสื่อสาร (Communication module) เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อสำหรับควบคุมการส่งผ่านข้อมูลแบบไร้สายไปยังฐานข้อมูล (Database server) โดยโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมีหน้าที่แปลค่าความเข้มแสงที่ได้รับมาจากตัวตรวจจับแสง (Photodetector) ซึ่งตัวตรวจจับแสงจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้น ทั้งนี้สามารถแสดงตัวอย่างหน้าจอการแสดงผลของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องผ่านระบบ IoTs ได้ดังรูปที่ 4.10





รูปที่ 58 หน้าจอการแสดงผลการตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่อง

อย่างไรก็ตามในหน้าจอการแสดงผลการตรวจวัดก๊าซชีวภาพดังกล่าวนี้ยังมีเมนูฟังก์ชันย่อย (Sub function menu) ที่สามารถนำออกข้อมูล (Export data) ให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์ Excel และไฟล์รูปภาพ โดยที่ผู้ใช้งานสามารถกดไปที่ปุ่ม 3 ขีดบนมุมขวาของหน้าจอการแสดงผลการตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบเวลาจริง จากนั้นหน้าจอจะแสดงหน้าต่างย่อย (Pop-up) ขึ้นมาทางขวาของหน้าจอแสดงผล ทั้งนี้ผู้ใช้สามารถเลือกฟังก์ชันย่อยตามที่ต้องการนำออกข้อมูลได้อย่างง่ายดาย โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 อีกทั้งเมื่อผู้ใช้งานต้องการจะนำออกข้อมูล (Export data) ให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์ excel ก็สามารถดำเนินการได้อย่างสะดวก และสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 59 หน้าจอเมนูย่อย

DateTime	Ref	CH4	H2S	CO2
24/10/2023 17:01	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:01	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:01	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:01	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:01	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:02	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:02	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:02	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:02	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:02	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:02	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:02	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:02	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:02	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:02	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:02	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:02	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:03	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:03	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:03	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:03	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006
24/10/2023 17:03	96.0952163	3.155170224	9.660823171	27.92016006

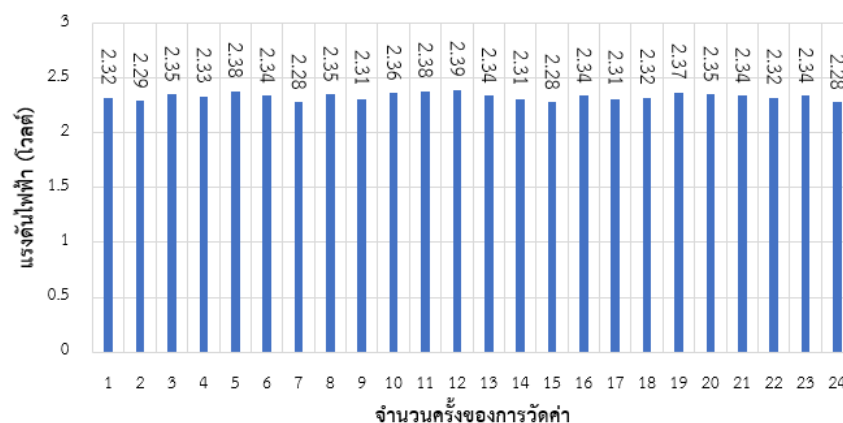
## รูปที่ 60 หน้าจอเมนูย่อย

### 4.2 ผลการทดสอบการทำงานของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสง

ในการทดลองของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์นั้น จะแบ่งผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลออกเป็น 4 ส่วน คือ ผลการวิเคราะห์การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ผลการวิเคราะห์กระบวนการลอกปลอกหุ้มชั้นใน ผลการวิเคราะห์กระบวนการพอกสารเคมีประกอบทางเคมี และผลการวิเคราะห์ในกระบวนการบรรจุก๊าซชีวภาพเข้าสู่ระบบตรวจวัด

#### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์การวัดค่าความเข้มแสงอ้างอิง

การทดลองในส่วนนี้จะเริ่มจากการนำสายใยแก้วนำแสงแบบปกติ คือ สายใยแก้วนำแสงที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการลอกปลอกหุ้มชั้นใน (De-cladded) หรือกระบวนการพอกสารประกอบทางเคมีเข้ามาแทนที่ (Coated) มาดำเนินการวัดค่าความเข้มแสง (Intensity) จากนั้นนำค่าที่วัดได้ไปใช้เป็นค่าอ้างอิงในการคำนวณต่อไป ดังสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.13

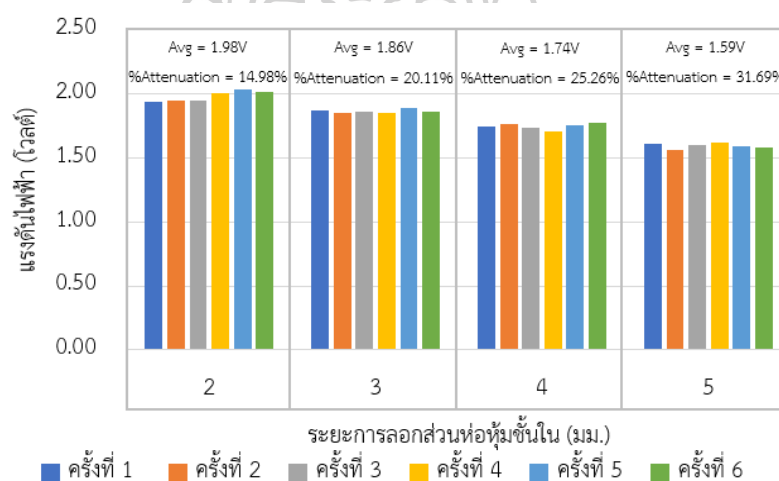


รูปที่ 61 ผลการทดสอบการวัดค่าความเข้มแสงของสายใยแก้วนำแสงแบบปกติ

จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำสายใยแก้วนำแสงแบบปกติ จำนวน 24 เส้น มาดำเนินการวัดค่าความเข้มแสง ซึ่งในที่นี้จะอยู่ในรูปแบบของค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.33 V โดยค่าที่ได้จากการวัดความเข้มแสงในการทดลองนี้จะถูกนำไปใช้เป็นตัวอ้างอิงในการทดสอบขั้นตอนต่อไป

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์กระบวนการลอกปลอกหุ้มชั้นใน

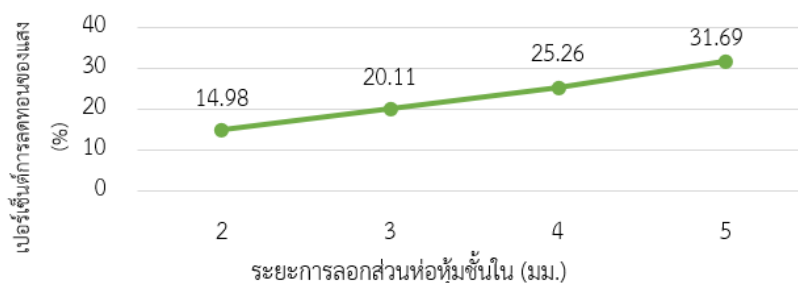
เมื่อดำเนินการวัดค่าความเข้มแสงของสายใยแก้วนำแสงแบบปกติจนกระทั่งได้ค่าการวัดอ้างอิงมาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นกระบวนการต่อไปนี้จะเป็นการทดลองการวัดค่าความเข้มแสงของสายที่ผ่านการลอกปลอกหุ้มชั้นในออกบางส่วนที่ระยะความยาว (L) เท่ากับ 2, 3, 4, และ 5 มิลลิเมตร โดยการวัดค่าความเข้มแสงในการทดลองครั้งนี้เพื่อต้องการหาค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนของแสงที่เกิดขึ้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองนี้สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.14



รูปที่ 62 ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบการวัดค่าความเข้มแสงของสายใยแก้วนำแสงที่ผ่านการลอกปลอกหุ้มชั้นใน

จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าค่าความเข้มแสงในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าของสายใยแก้วนำแสงที่ผ่านกระบวนการลอกปลอกหุ้มชั้นในออกบางส่วนที่ระยะความยาวเท่ากับ 2 มิลลิเมตร จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1.98 V ขณะที่สายใยแก้วนำแสงในระยะความยาวเท่ากับ 3, 4 และ 5 มิลลิเมตรนั้น มีแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1.86, 1.74 และ 1.59 V ตามลำดับ ดังนั้นจะสังเกตได้ว่าเมื่อนำสายใยแก้วนำแสงไปผ่านกระบวนการลอกปลอกหุ้มชั้นใน (De-cladded) ออกบางส่วนตามระยะความยาวในข้างต้น อัตราการลดทอนของแสงจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการลอกปลอกหุ้มชั้นในที่ระยะความยาวที่เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งค่าความเข้มแสงที่วัดได้จากตัวตรวจจับแสง (PD) นั้นจะเป็นสัดส่วน

โดยตรงกันกับระยะความยาวของส่วนปลอกหุ้มชั้นใน (Cladding) ที่ถูกลอกออกไป ทั้งนี้สามารถแสดงกราฟค่าการลดทอนของแสงได้ดังรูปที่ 4.15

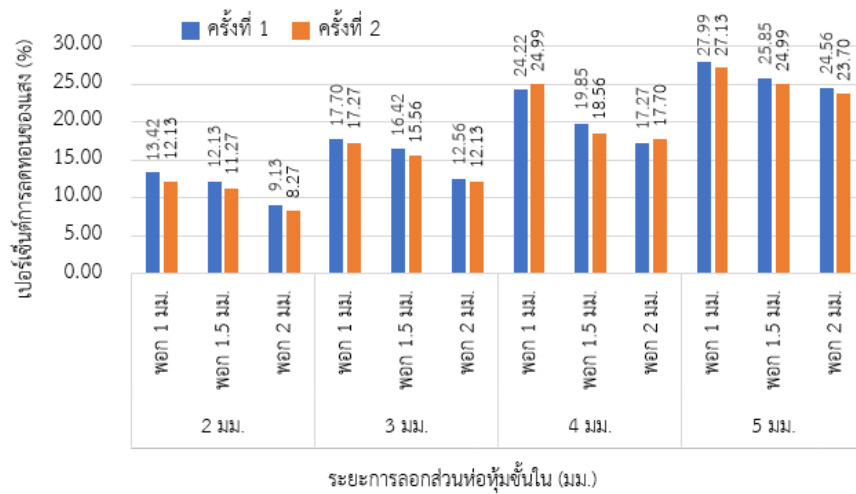


**รูปที่ 63** เปอร์เซ็นต์การลดทอนของสายใยแก้วนำแสงเมื่อลอกปลอกหุ้มชั้นใน ระยะเท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.15 พบว่าอัตราการลดทอนของแสงต่อระยะความยาว (L) ของการลอกปลอกหุ้มชั้นในที่ระยะเท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 นั้น มีค่าอัตราการลดทอนต่ำสุด และสูงสุดเท่ากับ 14.98 และ 31.69 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

#### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์กระบวนการพอกสารเคมีประกอบทางเคมี

หลังจากที่ได้ดำเนินการวัดค่าความเข้มแสงของสายใยแก้วนำแสงในกระบวนการลอกปลอกหุ้มชั้นในออกเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำสายใยแก้วนำแสงที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวมาทำการพอกสารประกอบทางเคมี โดยสารประกอบที่นำมาใช้นั้นจะเป็นสารเงิน (Ag) และสารโพลีไวนิลบิวทิล (PVB) มาทำการพอกตามขั้นตอนและวิธีการที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.1 โดยการทดลองนี้จะทำขึ้นเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนของแสงเมื่อมีการพอกสารประกอบทางเคมีที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) เข้าไปแทนที่ส่วนของปลอกหุ้มชั้นใน (Cladding) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อนี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.16



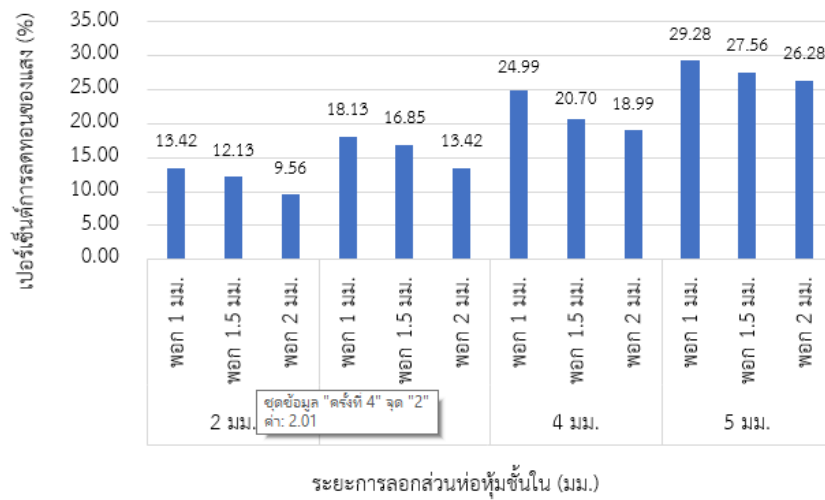
**รูปที่ 64** ผลการทดสอบการวัดค่าความเข้มแสงของสายใยแก้วนำแสง  
เมื่อดำเนินการลอกสารประกอบทางเคมี

จากรูปที่ 4.16 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมีการลอกสารประกอบทางเคมี หรือสารเงินเข้าไปแทนส่วนของปลอกหุ้มชั้นในที่ผ่านกระบวนการลอกออกบางส่วน พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนของแสงน้อยกว่าการทดลองที่ 4.2.2 จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการเพิ่มความหนาในการลอกสารเงิน (Ag) เข้าไป ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนของแสงที่ลดลงจากเดิม ทั้งนี้เนื่องจากสารเงินที่นำมาใช้นั้นมีขนาดที่ค่อนข้างเล็ก และมีหน้าตัดของการสะท้อนแสง เมื่อนำมารวมกันเป็นจำนวนมาก และแสงมีการเดินทางผ่านมายังส่วนหัววัด (Sensing element) แสงจะเกิดการหักเห (Refraction) และมีเกิดการสะท้อนกลับ (Reflection) เข้ามายังแกนกลาง (Core) ของสายใยแก้วนำแสง และส่งผ่านแสงไปยังปลายสาย (Fiber end) ที่ถูกเชื่อมต่อเข้ากับตัวตรวจจับแสง (Photodetector) ดังนั้นเมื่อทำการเพิ่มความหนาในการลอกสารเงินเข้าไปแทนที่ แสงจะเกิดสะท้อนกลับมายังแกนกลางได้มากขึ้นส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนของแสงมีค่าลดลง และเมื่อมีระยะการลอกปลอกหุ้มชั้นในเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนของแสงเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ผลการทดลองในส่วนนี้ยังคงสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.2 ที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้

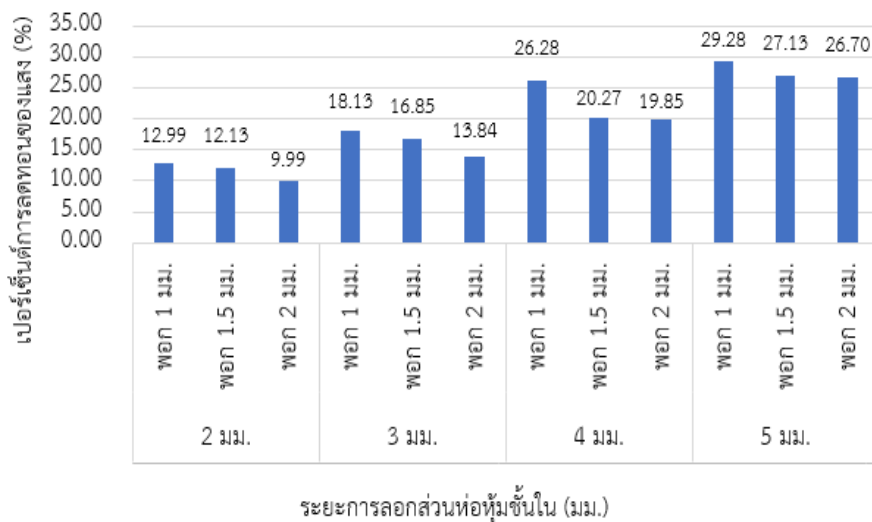
#### 4.2.4 ผลการวิเคราะห์กระบวนการอัดก๊าซชีวภาพเข้าสู่ระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพ

ในการทดลองนี้เป็นการนำสายใยแก้วนำแสงที่ผ่านกระบวนการลอกสารประกอบทางเคมีมาเข้าสู่ขั้นตอนของการบรรจุก๊าซชีวภาพเข้าสู่ภาชนะทดลองในลักษณะการวัดแบบระบบปิด (Closed-loop measurement) โดยมีการกำหนดช่วงความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ )

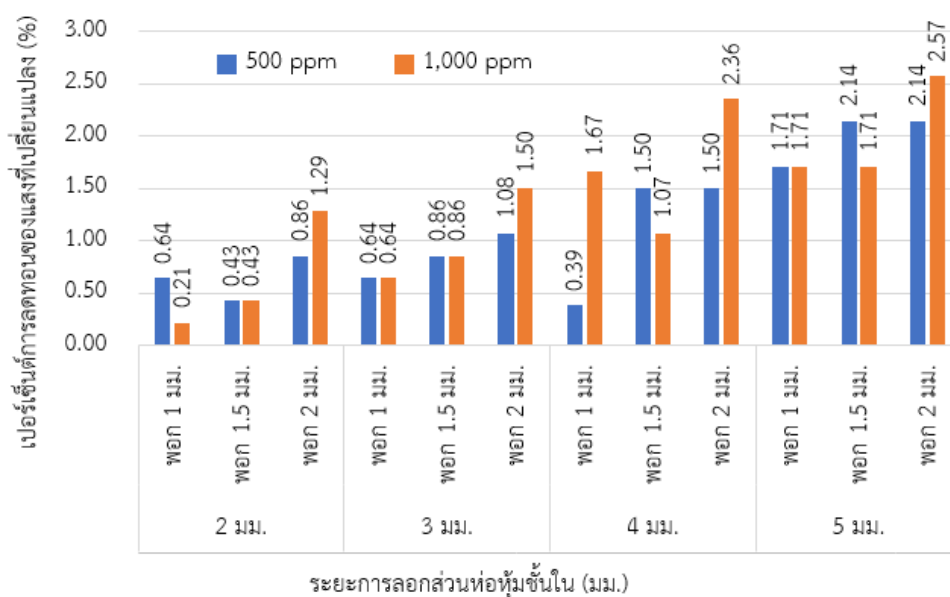
คือ 500 และ 1,000 ppm จากนั้นดำเนินการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนของแสงที่เกิดขึ้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองนี้สามารถแสดงกราฟรูปภาพได้ดังรูปที่ 4.17-4.19 ตามลำดับ



รูปที่ 65 ผลการทดสอบการวัดค่าความเข้มแสงของสายใยแก้วนำแสงเมื่อดำเนินการพอกสารประกอบทางเคมี และมีการบรรจุก๊าซชีวภาพเข้าสู่ระบบ (500 ppm)



รูปที่ 66 ผลการทดสอบการวัดค่าความเข้มแสงของสายใยแก้วนำแสงเมื่อดำเนินการพอกสารประกอบทางเคมี และมีการอัดก๊าซชีวภาพเข้าสู่ระบบ (1,000 ppm)

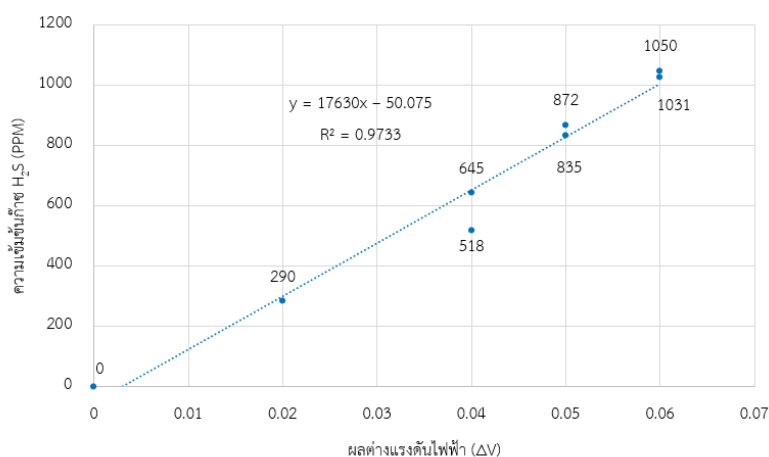


**รูปที่ 67** เปอร์เซ็นต์การลดทอนที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวตรวจวัดเมื่อมีการบรรจุก๊าซชีวภาพเข้าสู่ระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพ

จากรูปที่ 4.17-4.19 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการบรรจุก๊าซชีวภาพ (Gas feeding) ที่มีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ใน 2 ช่วงความเข้มข้นเท่ากับ 500 และ 1,000 ppm จะเห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนของแสงจะเพิ่มขึ้นจากกระบวนการพอกสารประกอบทางเคมี โดยค่าที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวนี้จะแปรผันตรงตามระยะความยาว (L) ในการลอกปลอกหุ้มชั้นใน และความหนาในการพอกสารเงิน (Ag) ทั้งนี้พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนของแสงที่เพิ่มขึ้นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.57 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะความยาวการลอกปลอกหุ้มชั้นในเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ความหนาในการพอกสารเงินเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และมีการบรรจุความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในช่วง 1,000 ppm

จากการวิเคราะห์ผลในข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่ระยะความยาวในการลอกปลอกหุ้มชั้นในออกเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ที่ความหนาในการพอกสารเงิน 2 มิลลิเมตร นั้น มีการดูดกลืนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และมีการตอบสนองได้ดีที่สุด ทำให้ผู้วิจัยได้ทำการนำข้อมูลของการทดลองในระยะความยาวดังกล่าวมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซ (Gas concentration) กับผลต่างแรงดันไฟฟ้า (Voltage difference) ก่อนและหลังบรรจุก๊าซชีวภาพโดยใช้สมการเชิงเส้น (Linear equation) เพื่อนำมาเป็นกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) หรือกราฟมาตรฐานความเข้มข้น (Concentration calibration curve) ทั้งนี้เพื่อให้สามารถเป็นข้อมูลอ้างอิงในการวัดค่าความเข้มข้นในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1,000 ppm เมื่อมีผลต่างแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังการบรรจุก๊าซชีวภาพระหว่าง 0.00 ถึง 0.06 โวลต์ อย่างไรก็ตามเมื่อทำการสร้างกราฟ

มาตรฐานเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะสามารถประมาณค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพกับผลต่างแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังการบรรจุก๊าซชีวภาพได้ ซึ่งสมการเชิงเส้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.20



**รูปที่ 68** เส้นตรงจากการประมาณข้อมูลของค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพกับผลต่างแรงดันไฟฟ้า

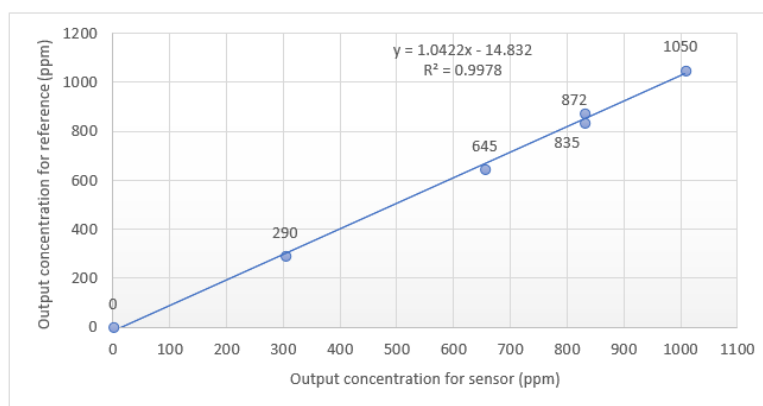
จากรูปที่ 4.20 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อทำการประมาณข้อมูลของค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพกับผลต่างแรงดันไฟฟ้าจะสามารถสร้างกราฟสมการเส้นตรง  $y = 17630x - 50.075$  โดยมีค่า R-squared เท่ากับ 0.9733 และเมื่อนำค่าผลต่างแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้แทนลงในสมการดังกล่าว จะได้ผลลัพธ์ความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพจากการคำนวณ ทั้งนี้จะนำค่าที่ได้จากการคำนวณดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพที่วัดได้จากเครื่องมือวัดก๊าซชีวภาพ (Biogas Analyzer) อ่างอิง เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้น ดังสามารถแสดงผลการเปรียบเทียบได้ในตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.4** การเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการคำนวณ และจากเครื่องมือวัดก๊าซชีวภาพอ่างอิง

จำนวนครั้ง	ผลต่างแรงดันไฟฟ้า ( $\Delta V$ )	ค่าความเข้มข้นจากเครื่องมือวัดอ่างอิง (ppm)	ค่าความเข้มข้นจากการคำนวณ (ppm)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
1	0.02	290	303	4.48
2	0.04	645	655	1.55
3	0.05	835	831	0.48
4	0.05	872	831	4.70
5	0.06	1050	1008	4.00



จากตารางที่ 4.3 เมื่อนำค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการคำนวณมาดำเนินการเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพที่วัดได้จากเครื่องมือวัดก๊าซชีวภาพอ้างอิง พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่ำสุด และสูงสุดเท่ากับ 0.48 และ 4.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพที่ได้จากเครื่องมือวัดก๊าซชีวภาพอ้างอิง และค่าที่วัดได้จากตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมาทำการออกแบบเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ โดยจะสร้างให้อยู่ในรูปแบบของกราฟสมการเชิงเส้น พบว่ามีค่า R-squared เท่ากับ 0.9978 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 ทั้งนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าที่ได้จากการวัดของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์สำหรับตรวจวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพนั้นมีความแม่นยำ (Accuracy) ในการตรวจจับก๊าซชีวภาพเป้าหมาย ซึ่งสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 69 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพที่ได้จากเครื่องมือวัดอ้างอิง และตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้น

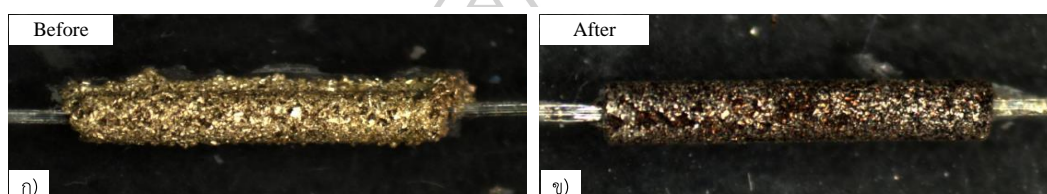
#### 4.3 สรุปการอภิปรายผลการทดลอง

จากการอภิปรายผลการทดลองทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น สามารถแบ่งการสรุปผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ผลการทดลองที่ได้จากระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์ และผลการทดลองที่ได้จากระบบการแสดงผลแบบต่อเนื่องผ่านระบบ IoTs โดยสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

##### 4.3.1 ผลการทดลองที่ได้จากระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์

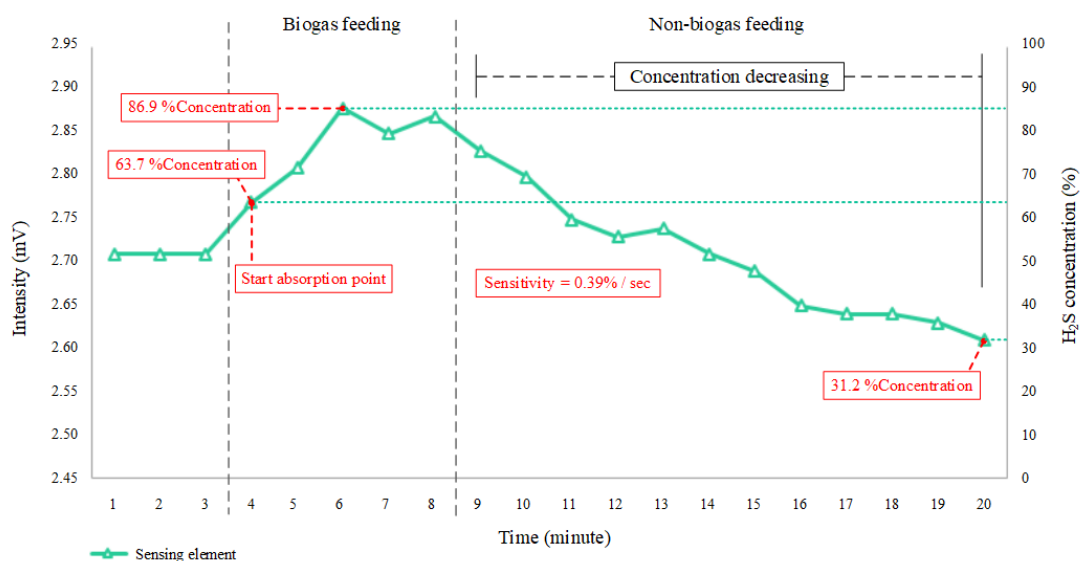
จากการทดสอบการทำงานของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์ที่ผู้วิจัยประดิษฐ์และพัฒนาขึ้น สามารถอธิบายได้ว่าระบบดังกล่าวสามารถ

ตรวจวัดก๊าซชีวภาพเป้าหมายได้จริง เนื่องจากสารประกอบทางเคมีชื่อว่า สารเงิน (Argentum: Ag) มีคุณสมบัติในการตรวจจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ได้ แต่ไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิม (Recovery) เพื่อนำกลับมาตรวจวัดซ้ำได้อีก เนื่องจากเมื่อแสงเดินทางผ่านแกนกลาง (Core) ที่มีการปรับปรุง (De-cladded) ส่วนของปลอกหุ้มชั้นใน (Cladding) ให้มีตัวกลางเป็นสารประกอบทางเคมี (Ag) จากนั้นเมื่อสารเงินไปสัมผัสเข้ากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) และทำปฏิกิริยาทางเคมี สารเงินที่เป็นสารตั้งต้นจะเปลี่ยนแปลงไปกลายเป็นสารซิลเวอร์ซัลไฟด์ ( $Ag_2S$ ) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นของแข็ง อยู่ในรูปแบบของตะกั่ว และจะเกาะติดบนผิวของสารเงิน ดังสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.22(ก) และ 4.22(ข)



รูปที่ 70 ลักษณะสีของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่พอกสารเงิน (Ag) เมื่อไปสัมผัสกับ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์; (ก) ตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพก่อนบรรจุก๊าซ และ (ข) ตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพหลังบรรจุก๊าซ

ทั้งนี้สารตะกั่วดังกล่าวนี้มีความสามารถในการละลายต่ำ ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้สารเงิน (Ag) นั้นไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีก แต่อย่างไรก็ตามระบบตรวจวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์นี้มีค่าความไว (Sensitivity) ของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่พัฒนาขึ้นเท่ากับ 0.39 เปอร์เซ็นต์ต่อวินาที ดังสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.23

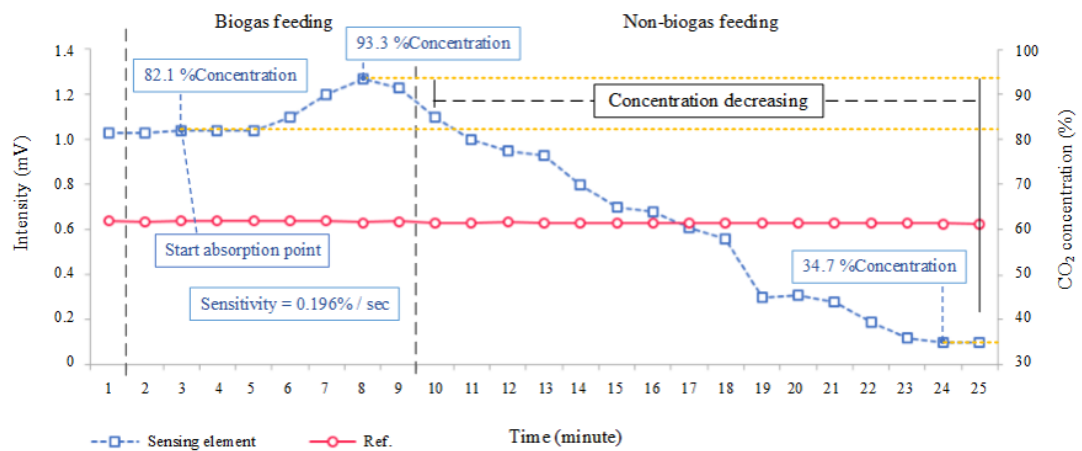


รูปที่ 71 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงสำหรับตรวจวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

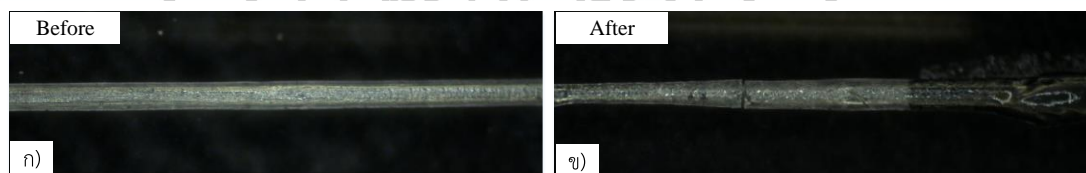
จากรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสง (Intensity) และเวลา (Time) ในการตรวจวัดก๊าซชีวภาพเป้าหมาย ซึ่งการทดลองใน 1 ครั้ง จะดำเนินการบรรจุก๊าซชีวภาพเข้าสู่ระบบตรวจวัดและทำการเก็บค่าผลการทดลอง จากกราฟในรูปที่ 4.23 เวลาตั้งแต่ 0-3 นาทีแรกจะเป็นการกำจัดอากาศส่วนเกินออกจากระบบจนกลายเป็นสุญญากาศ (Vacuum) จากนั้นจะเริ่มบรรจุก๊าซชีวภาพ (Biogas feeding) เข้าสู่ระบบหลังจากครบเวลาใน 3 นาที จะสังเกตได้ว่าตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพที่พัฒนาขึ้นนั้นมีการตอบสนอง (Response) ต่อก๊าซชีวภาพเป้าหมายในนาทีที่ 4 ที่ค่าความเข้มของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ 63.7 เปอร์เซ็นต์ และจะมีการดูดกลืนก๊าซในปริมาณที่เพิ่มขึ้นสูงสุดจนถึง 86.9 เปอร์เซ็นต์ จึงหยุดทำการบรรจุก๊าซชีวภาพเข้าสู่ระบบจากนั้นค่าความเข้มของก๊าซชีวภาพจะค่อย ๆ ลดลง ทั้งนี้ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดปริมาณความเข้มขั้นต่ำสุดของก๊าซได้ เท่ากับ 31.2 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงนาทีที่ 20 จากนั้นตัวตรวจจับดังกล่าวจะไม่มี การตอบสนองใด ๆ ต่อก๊าซชีวภาพเป้าหมายได้อีก

อีกทั้งการทดสอบการทำงานของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์สำหรับตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้นำสารประกอบทางเคมีชื่อว่า โพลีเฮกซามเมทิลีนไบกวานไนด์ (Polyhexamethylene biguanide: PHMB) ที่มีความสามารถตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ซึ่งในการทดสอบนี้ ตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดก๊าซเป้าหมายได้จริง และมีความสามารถในการกลับสู่สภาพ

เดิม (Recovery) ของสารประกอบทางเคมีและนำกลับมาตรวจวัดซ้ำได้อีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากสารโพลีเฮกซาเมทิลีนไบกวาไนด์ (PHMB) เป็นสารประกอบประเภทพอลิเมอร์จึงทำให้มีการคืนสภาพของโครงสร้างทางเคมีเมื่อสัมผัสกับอากาศ โดยค่าความไว (Sensitivity) เท่ากับ 0.196 เปอร์เซ็นต์ต่อวินาที เวลาการตอบสนอง (Response time) เท่ากับ 120 วินาที และเวลากลับสู่สภาพเดิม (Recovery time) เท่ากับ 180 วินาที ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.24 อย่างไรก็ตามยังสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของสารประกอบเคมีที่นำมาประยุกต์ได้ดังรูปที่ 4.25(ก) และ 4.25(ข)



รูปที่ 72 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของตัวตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 73 ลักษณะสีของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่พอกสารโพลีเฮกซาเมทิลีนไบกวาไนด์ (PHMB) เมื่อไปสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์; (ก) ตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพก่อนบรรจุก๊าซ และ (ข) ตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพหลังบรรจุก๊าซ

#### 4.3.2 ผลการทดลองที่ได้จากระบบการแสดงผลแบบต่อเนื่องผ่านระบบ IoTs

โปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรม และโมดูลสื่อสาร (Communication) ที่ถูกพัฒนาขึ้น ได้ถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet of things: IoTs) โดยโครงสร้างภายในประกอบด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับควบคุมการส่งผ่านข้อมูลแบบไร้สาย อีกทั้งยังถูก

เชื่อมต่อเข้ากับระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับแสงชนิดรีแฟรกโทมิเตอร์ สำหรับตรวจจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide:  $H_2S$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide:  $CO_2$ ) ทั้งนี้สามารถแสดงผลการตรวจวัดแบบต่อเนื่อง (Continuous measurement) ได้ โดยผลลัพธ์ที่แสดงบนหน้าจอการแสดงผลของผู้ใช้งาน (User interface) นั้นจะถูกแปลค่าออกมาให้อยู่ในรูปแบบของตัวเลข (Number) และกราฟ (Graph) ซึ่งผลลัพธ์ที่ถูกนำมาแปลค่าและแสดงผลนั้นจะเป็นค่าที่ได้รับมาจากตัวตรวจจับแสง (Photodetector) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าระบบตรวจจับและแสดงผลตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงที่พัฒนาขึ้นนั้นมีความสามารถในการตรวจวัดก๊าซชีวภาพเป้าหมายได้ในเวลาจริง (Real-time)



## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงาน

ดัชนีชี้วัดนี้เป็นการพัฒนาาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทมิเตอร์ (Fiber optic based refractometer: FOR) และแสดงผลแบบต่อเนื่องผ่านระบบ IoTs สำหรับแสดงคุณสมบัติ (Characterize) และปริมาณความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพ (Gas concentration) โดยจะมุ่งเน้นไปที่การหาปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide: CO<sub>2</sub>), และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide: H<sub>2</sub>S) เป็นหลัก ทั้งนี้จะนำเอาหลักการการทำงานของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงมาเป็นระบบตรวจจับหลัก ซึ่งระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพดังกล่าวอาศัยการวัดปริมาณทางแสงที่เกิดจากค่าดัชนีการหักเหของแสง (Refractive index) ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการนำสารประกอบทางเคมี (Chemistry compounds) เข้ามามีส่วนร่วมในการดำเนินงาน อย่างไรก็ตามในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการดำเนินงาน รวมถึงแสดงปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินการ และข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่จะนำพัฒนาต่อไปในอนาคต โดยรายละเอียดสามารถอภิปรายได้ดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการพัฒนาาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทมิเตอร์ และการแสดงผลแบบต่อเนื่องผ่านระบบอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet of things: IoTs) สำหรับระบุองค์ประกอบภายในของก๊าซชีวภาพเป้าหมายแต่ละชนิดนั้นสามารถดำเนินการได้โดยการนำสารประกอบทางเคมีเข้ามามีส่วนร่วมในการแยกแยะองค์ประกอบของก๊าซ อีกทั้งยังต้องอาศัยหลักการการทำงานของตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทมิเตอร์ (FOR) และนำเอากลไกการทำงานของคลื่นอีวานเนสเซน (Mechanisms of evanescent wave) มาใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกับทฤษฎีการหักเหของแสงที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ต่อค่าความเข้มแสง (Intensity) ที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งในดัชนีชี้วัดนี้เป็นารออกแบบและพัฒนาระบบ รวมไปถึงการออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบการทำงาน และประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น ทั้งนี้ผลลัพธ์ที่ได้จากการพัฒนาระบบสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้

##### 5.1.1 ผลการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟร็กโทมิเตอร์

ในการพัฒนาตัวตรวจจับก๊าซชีวภาพจำเป็นต้องดำเนินการพิจารณาสายใยแก้วนำแสงเพื่อนำมาใช้ประกอบเป็นส่วนหัววัด (Sensing element) ทั้งนี้ได้มีการทดลองเปรียบเทียบคุณสมบัติ

ทางกายภาพของสายใยแก้วนำแสง 2 ชนิดได้แก่สายใยแก้วนำแสงชนิดโหมตเดี่ยว (SMF) และหลายโหมต (MMF) เพื่อนำมาพัฒนาเป็นตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรก-โทรมิเตอร์สำหรับประยุกต์ใช้ในระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพ โดยการทดลองถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำแสง และการวัดค่าความเข้มแสง ณ ส่วนปลายของตัวตรวจจับชนิดรีแฟรก-โทรมิเตอร์ (Fiber end) โดยผลการทดลองพบว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของลำแสงระหว่างสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมตเดี่ยว และหลายโหมตนั้น มีขนาดเท่ากับ 4 และ 26 มิลลิเมตร ซึ่งลักษณะการเดินทางของแสงภายในสายใยแก้วนำแสง (Dispersion of light) ทั้ง 2 ชนิดมีความแตกต่างกันคือ เป็นแบบเส้นตรง (Linear) และแบบกระจัดกระจาย (Distributed) ตามลำดับ ขณะที่ผลลัพธ์การวัดค่าความเข้มของแสงผ่านตัวตรวจจับแสง (PD) พบว่า เมื่อมีการบรรจุก๊าซชีวภาพ (Gas feeding) เข้าไปในระบบตรวจวัดผ่านหัววัด (Sensing element) ผลการทดลองพบว่าสายชนิดโหมตเดี่ยว และหลายโหมต ที่ผ่านกระบวนการลอกปลอกหุ้มชั้นในออกจะมีค่าเฉลี่ยความเข้มแสงที่ลดลง และเมื่อนำสายใยแก้วนำแสงทั้ง 2 มาเข้ากระบวนการพอกสารประกอบทางเคมี ผลการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มแสงจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ค่าที่วัดได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ค่าความเข้มของแสง (Intensity) ที่ถูกลดทอนจากสายชนิดหลายโหมต (MMF) จะมีค่าเฉลี่ยมากกว่าสายชนิดโหมตเดี่ยว (SMF) ซึ่งค่าดังกล่าวนี้เป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการดูดกลืนก๊าซชีวภาพ ดังนั้นการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่า สายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมต (MMF) นั้นมีความเหมาะสมในทางกายภาพมากกว่าสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมตเดี่ยว (SMF) สำหรับกรณีศึกษาของการพัฒนาเป็นส่วนหัววัดของระบบตรวจจับก๊าซชีวภาพ

อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการคัดเลือกสายใยแก้วนำแสงที่จะนำมาพัฒนาเป็นส่วนหัววัดสำหรับตรวจจับก๊าซชีวภาพเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนการศึกษาต่อไปคือ การนำสารประกอบทางเคมี (Chemical compounds) เข้ามาประยุกต์ใช้ในการแยกแยะคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพแต่ละชนิด ซึ่งสารประกอบทางเคมีที่นำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ สารเงิน (Argentum: Ag) ที่ถูกนำมาใช้สำหรับการทดลองในการดูดกลืนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide: H<sub>2</sub>S) และสารโพลีเฮกซามะทิลีนไบ-กัวไนด์ (Polyhexamethylene biguanide: PHMB) สำหรับใช้ในการศึกษาการดูดกลืนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide: CO<sub>2</sub>) ตามลำดับ โดยผลการศึกษาและทดสอบการทำงานของระบบตรวจวัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถอภิปรายได้ว่า ระบบตรวจจับที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดก๊าซชีวภาพเป้าหมายได้จริง ซึ่งสารเงิน (Ag) มีคุณสมบัติในการตรวจจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) แต่ไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิม (Recovery) และไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีก เนื่องจากเมื่อแสงเดินทางผ่านส่วนหัววัดที่มีตัวกลางเป็นสารประกอบทางเคมี (Ag) จากนั้นเมื่อสารเงินไปสัมผัสเข้ากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และทำปฏิกิริยาทางเคมี สารเงินที่เป็นสารตั้งต้นจะเปลี่ยนแปลงไปกลายเป็นสารซิลเวอร์ซัลไฟด์ (Ag<sub>2</sub>S) ทำให้มีลักษณะเป็นของแข็งอยู่ในรูปแบบของตะกั่ว และจะ

เกาะติดบนผิวของสารเงิน ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้สารเงิน (Ag) นั้นไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีก ขณะที่ผลการทดสอบการทำงานของระบบตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) นั้น ตัวตรวจจับสามารถตรวจวัดก๊าซเป้าหมายได้จริง และมีความสามารถในการกลับสู่สภาพเดิม (Recovery) ของสารประกอบทางเคมีและนำกลับมาตรวจวัดซ้ำได้ ทั้งนี้เนื่องจากสารโพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์ (PHMB) เป็นสารประกอบประเภทพอลิเมอร์จึงทำให้มีการคืนสภาพของโครงสร้างทางเคมีเมื่อสัมผัสกับอากาศ โดยตัวตรวจจับสามารถวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพได้ในช่วง 0-1,000 ppm สำหรับการวัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ และ 0-100% สำหรับการตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ โดยค่าความไว (Sensitivity) ของตัวตรวจจับที่พัฒนาขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.39 และ 0.196 เปอร์เซ็นต์ต่อวินาที ตามลำดับ

### 5.1.2 ผลการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดและแสดงผลของก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องผ่านระบบ (IoT)

โปรแกรมเว็บเบราว์เซอร์ (Web browser) ถูกนำมาใช้ในการออกแบบและพัฒนาระบบหน้าจอการแสดงผลของระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมที่พัฒนาขึ้น ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้ภาษา PHP และ JavaScript ในการพัฒนาระบบการแสดงผลการตรวจวัดดังกล่าว โดยระบบการแสดงผลการตรวจวัดก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องนั้นจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับโมดูลการสื่อสาร (Communication module) เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อสำหรับควบคุมการส่งผ่านข้อมูลแบบไร้สายไปยังฐานข้อมูล (Database server) ซึ่งโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมีหน้าที่แปลค่าความเข้มแสงที่ได้รับมาจากตัวตรวจจับแสง (Photodetector: PD) ทั้งนี้ตัวตรวจจับแสงจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าระบบตรวจจับและแสดงผลการตรวจวัดของก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่อง (Continuous measurement) และสามารถตรวจวัดก๊าซชีวภาพเป้าหมายได้ในเวลาจริง (Real-time) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน

ในการดำเนินงานของดุษฎีนิพนธ์นี้ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาผู้วิจัยมีอุปสรรคมากมายในการดำเนินงาน ทั้งนี้จะทำการสรุปและจำแนกออกเป็นข้อย่อย ๆ ดังนี้

5.2.1 การพัฒนาตัวตรวจจับใยแก้วนำแสงชนิดรีแฟรกโทรมิเตอร์ในส่วนหัววัด (Sensing element) ทั้งนี้เนื่องจากผู้วิจัยจำเป็นต้องปรับปรุงโครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงในส่วนของปลอกหุ้มชั้นใน (Cladding) ซึ่งโครงสร้างในส่วนนี้ถูกขึ้นรูปมาจากซิลิกา (Silica) โดยมีขนาดเล็กแตกหักง่าย อีกทั้งในการปรับปรุงโครงสร้างดังกล่าวจำเป็นต้องใช้สารกัดแก้ว (Hydrofluoric acid: HF) ทั้งนี้เพื่อดำเนินการลอกปลอกหุ้มชั้นในออก และนำสายใยแก้วนำแสงที่ผ่านกระบวนการ



ดังกล่าวมาทำการพอกสารประกอบทางเคมีเข้ามาแทนที่ ดังนั้นจึงทำให้ระหว่างกระบวนการปรับปรุงโครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงนั้นเกิดการแตกหัก และมีสายขาดเป็นจำนวนมาก เนื่องจากสายใยแก้วนำแสงมีขนาดเล็ก เปราะบาง และแตกหักได้ง่าย ซึ่งกระบวนการพัฒนาส่วนหัววัดนี้ถือได้ว่าเป็นขั้นตอนการดำเนินงานที่ค่อนข้างยากลำบากมากที่สุด

5.2.2 การควบคุมปริมาณความเข้มข้นขององค์ประกอบภายในของก๊าซชีวภาพ ทั้งนี้เนื่องจากในดัชนีพินนี้ผู้วิจัยจะต้องดำเนินการหมักก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการหมักแบบไร้ออกซิเจน และเนื่องจากมีปัจจัยในหลาย ๆ ด้านที่ไม่เอื้ออำนวยในเรื่องของการผลิตก๊าซชีวภาพ อาทิเช่น การเติมมูลสัตว์ในปริมาณที่เหมาะสมไม่มากก็น้อยเกินไป อุณหภูมิที่ไม่สามารถควบคุมได้ ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงที่ทำการหมักก๊าซชีวภาพเป็นช่วงที่มีอากาศเย็น และมีฝนตก ทำให้แบคทีเรียที่ใช้ในการย่อยสลายเกิดการอ่อนแอจนไม่สามารถเกิดก๊าซชีวภาพได้ รวมไปถึงเกิดโรคระบาดในสุกรหรืออหิวาต์แอฟริกาในสุกร (African swine fever) ฟาร์มสุกรส่วนใหญ่ใช้การพ่นยาฆ่าเชื้อ ซึ่งจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่ย่อยสลาย ดังนั้นจึงยากที่จะหามูลสัตว์มาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ อีกทั้งราคาของก๊าซสำเร็จรูปนั้นมีราคาค่อนข้างสูง

5.2.3 อุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในดัชนีพินนี้มีราคาค่อนข้างสูง และจำเป็นจะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งในการสั่งซื้อและอุปกรณ์ต่าง ๆ มักใช้ระยะเวลาค่อนข้างนาน

5.2.4 สารประกอบทางเคมี ค่อนข้างหายากในประเทศและมีความยากลำบากในการผสม (Mix) รวมถึงการพอกสายในส่วนหัววัดเนื่องจากมีความเปราะบาง

### 5.3 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการทดลอง

สำหรับข้อเสนอแนะสำหรับการดำเนินการวิจัยต่อไปนั้น ผู้วิจัยสามารถแสดงข้อสังเกตได้ดังต่อไปนี้

5.3.1 ในการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดก๊าซชีวภาพด้วยตัวตรวจจับแสงชนิดรีแฟร็กโทรมิเตอร์สำหรับตรวจวัดองค์ประกอบภายในของก๊าซชีวภาพนั้น ผู้วิจัยควรที่จะพัฒนาเลือกสารประกอบทางเคมีที่มีคุณสมบัติในการตรวจจับก๊าซเป้าหมายได้อย่างชัดเจนมากกว่านี้ และต้องมีความสามารถในการกลับสู่สภาวะเดิม (Recovery) ของสารที่นำมาใช้ได้

5.3.2 ในการออกแบบและพัฒนาระบบหน้าจอกการแสดงผลด้วยโปรแกรมประยุกต์ทางวิศวกรรมควรมีความสามารถปรับความละเอียดในการรับค่าที่ได้จากอุปกรณ์ทางแสงได้ละเอียด (Resolution) มากขึ้น อีกทั้งหน้าจอกการแสดงผลในส่วนของผู้ใช้งาน (GUI) นั้นยังมีข้อบกพร่องอยู่ในบางประการ ส่งผลทำให้การใช้งานยังไม่เสถียรเท่าที่ควร ดังนั้นในการออกแบบโปรแกรมควรมีความง่ายต่อการใช้งาน (User friendly) และสามารถพัฒนาต่อยอดได้ง่าย

#### 5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อในอนาคต

สำหรับแนวทางในการพัฒนาต่อของงานวิจัยนี้ สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

5.4.1 ระบบตรวจจับควรมีความสามารถตรวจจับก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) และก๊าซชีวภาพชนิดอื่น ๆ ได้ อย่างไรก็ตามสำหรับการตรวจวัดก๊าซมีเทนนั้น มีความยุ่งยากในการใช้สารประกอบทางเคมีเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากการศึกษาพบว่า สารประกอบที่สามารถดูดกลืนก๊าซมีเทน ได้แก่ คลิปโตเฟน (Cryptophane) และนาโนบอล (Nano ball) ซึ่งเป็นสารประกอบทางเคมีที่มีราคาสูง และต้องสังเคราะห์ (Synthesis) ออกมาเท่านั้น ดังนั้นนักวิจัยที่ต้องการพัฒนาต่อยอดงานวิจัยนี้ควรต้องพิจารณาถึงความคุ้มค่า รวมถึงความพร้อมในการวิจัยอย่างรอบคอบ

5.4.2 ควรศึกษาถึงความคุ้มค่าในการพัฒนาระบบเพื่อต่อยอดเป็น Mass production สำหรับใช้ในภาคอุตสาหกรรมของประเทศ

5.4.3 การศึกษาถึงการขยายประสิทธิภาพของการตรวจวัดให้สามารถครอบคลุมสำหรับการวัดก๊าซชนิดอื่น ๆ ที่มีใช้เฉพาะก๊าซชีวภาพ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรม และภาคเกษตรกรรมของประเทศอย่างสูงสุด



## รายการอ้างอิง

### Uncategorized References

1. A. Alzahrani and M.Z. Asghar, *Cyber vulnerabilities detection system in logistics-based IoT data exchange*. Egyptian Informatics Journal, 2024. **25**(100448): p. 1-19.
2. A. Garrido-Hernández et al., *Effect of europium on the blue-green emission of ZnS thin films by polyol and dip-coating technique*. Materials Science in Semiconductor Processing, 2021. **121**(105403): p. 1-8.
3. A. Rodríguez-Rodríguez, R.D.-C., D. May-Arrijoja, I. Matías-Maestro, C. Ruiz-Zamarreño and F. Arregui, *MMI Fiber Optic Refractometer with Universal pH Indicator Coating*. Photonics, Optics and Laser Technology, 2016(4): p. 275-278.
4. al, A.L.e., *A review of fiber-optic biosensors*. Sensors and Actuators B, 2007. **125**: p. 688-703.
5. al, D.D.V.e., *Measurement of low-pressure Knudsen force with deflection approximation for gas detection*. Results Phys., 2019. **13**: p. 102257.
6. al, M.A.H.e., *Measurements of methane emissions from biogas production*. Energiforsk, Sweden, Tech. Report, 2015.
7. al, M.B.G.e., *Effect of Knudsen thermal force on the performance of low-pressure micro gas sensor*. Eur. Phys. J. Plus., 2017. **132**(7).
8. al., S.S.e., *A facile microwave route for fabrication of NiO/rGO hybrid sensor with efficient CO<sub>2</sub> and acetone gas sensing performance using cladmodified fiber optic method*. Optik, 2021. **226**: p. 1-11.
9. Allwright., D., *From Snell's law to Fermat's principle*. Journal of Sound and Vibration, 2022. **536**,(117101): p. 1-4,.
10. Anuj K. Sharma et al., *Fiber optic evanescent wave absorption-based sensors: A detailed review of advancements in the last decade (2007–18)*. Optik, 2019. **183**: p. 1008-1025.
11. B. Chen et al., *The Impact of Surficial Biochar Treatment on Acute H<sub>2</sub>S Emissions during Swine Manure Agitation before Pump-Out: Proof-of-the-*

- Concept. Catalysts, 2020. **10**(8): p. 1-21.
12. B. D. Gupta and C. D. Singh, *Evanescent-absorption coefficient for diffuse source illumination: uniform- and tapered-fiber sensors*,. APPLIED OPTICS, 1994. **33**(13): p. 2737 -2742.
  13. B. D. GUPTA AND C. D. SINGH, *Fiber-optic Evanescent Field Absorption Sensor: A Theoretical Evaluation*. Fiber and Integrated Optics, 2006. **13**: p. 433-443.
  14. B. D. Gupta et al., *Fibre-optic evanescent field absorption sensor based on a U-shaped probe*. Optical and Quantum Electronics,, 1996. **28**,: p. 1629-1639,.
  15. B. Renganathan et al., *Nanocrystalline ZnO coated fiber optic sensor for ammonia gas detection*. Optics & Laser Technology, 2011(43): p. 1398-1404.
  16. B. Renganathan et al., *Nanocrystalline cerium oxide coated fiber optic gas sensor*. Current Applied Physics, 2014. **14**: p. 467-471.
  17. B. Renganathan et. al., *Investigating the gas sensing potential in CeO<sub>2</sub> Fiber Optic Sensor via trivalent Gadolinium ion substitution at room temperature*. Materials Letters, , 2021. **325**: p. 132766.
  18. B. Yang et al., *A Sensing Peak Identification Method for Fiber Extrinsic Fabry–Perot Interferometric Refractive Index Sensing*. J. Sens, 2019. **19**(96).
  19. Björn Agnarsson et al., *Evanescent-wave fluorescence microscopy using symmetric planar waveguides*. OPTICS EXPRESS, 2009. **17**(7): p. 5075- 5082.
  20. C. Elosua, e.a., *Optical Fiber Sensors to Detect Volatile Organic Compound in Sick Building Syndrome Applications*. The Open Construction and Building Technology Journal, 2010. **4**: p. 113-120.
  21. D. Li et al., *U-shaped fiber-optic ATR sensor enhanced by silver nanoparticles for continuous glucose monitoring*. Biosensors and Bioelectronics, 2015. **72**: p. 370–375.
  22. D.G. Searcy, M.A.P., *Hydrogen sulfide consumption measured at low steady state concentrations using a sulfidostat*. Analytical Biochemistry, 2004. **324**: p. 269–275.
  23. E. Asiamah et al., *Enhancing the functional and physicochemical properties of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit through polysaccharides edible dipping technique coating under various storage conditions*. Bioactive Carbohydrates

- and Dietary Fibre, 2023. **30**(100373): p. 1-11.
24. E. Barakhovskaia et al., *Impact of graphene coating created by dipping technique on film-wise condensation*. Applied Thermal Engineering,, 2023. **223**(120007): p. 1-11,.
  25. Eastern produce, *Isopropyl alcohol*, in *Material safety data sheet*. p. 1-11.
  26. H. Liao et al., *Phase demodulation of short-cavity Fabry–Perot interferometric acoustic sensors with two*. IEEE Photonics J., 2017. **9**(2).
  27. H. Zhou, J.Q.W., X. Z. Zhang, W. Wang, D. Q. Feng, Q. Wang, and F. Jia, *Study on Fiber-optic Hydrogen Sulfide Gas Sensor*. Physics Procedia, 2014. **56**: p. 1102-1106.
  28. H.-E. Joe et. al., *Detection and quantification of underground CO<sub>2</sub> leakage into the soil using a fiber-optic sensor*. Optical Fiber Technology, 2020. **60**: p. 1-6.
  29. HANYANG LI et al., *Guanidine derivative polymer coated microbubble resonator for high sensitivity detection of CO<sub>2</sub> gas concentration*. OPTICS EXPRESS, 1991. **27**(3).
  30. Innovation, A., *Service Contract Gas Detector, CEMS, Calibration Gas, System Components*.
  31. J. Jiang et al., *Noncontact ultrasonic detection in low-pressure carbon dioxide medium using high sensitivity fiber-optic fabry–perot sensor system*. J Lightwave Technol., 2017. **35**(23): p. 5079-5085.
  32. J. Shemshad, , no. 222, pp. , . *Analysis of inaccuracy induced by intensity variation of a DFB laser in fibre optic multipoint 2f-WMS measurements of methane near 1666 nm*. Sensors and Actuators A: Physical, 2015(222): p. 96 - 101.
  33. Jie Liu et al., *Selective Ag (I) Binding, H<sub>2</sub>S Sensing, and White-Light Emission from an Easy-to-Make Porous Conjugated Polymer*. JACS,, 2014. **136**(7): p. 2818-2824.
  34. Jushuai Wu et. al., *In situ u-printed optical fiber-tip CO<sub>2</sub> sensor using a photocrosslinkable poly(ionic liquid)*.. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018. **259**: p. 833-839,.
  35. K. J. Gàsvisk, *Optical Metrology*,. Wiley & Sons. 2002.: London.
  36. Liang Liang Liu et. al., *A reflection-mode fibre-optic sensor for breath carbon*

- dioxide measurement in healthcare*. Sensing and Bio-Sensing Research, 2019. **22**: p. 1-8.
37. Liang Liang Liu et. al., *Multi-Parameter Optical Fiber Sensing of Gaseous Ammonia and Carbon Dioxide*,. LIGHTWAVE TECHNOLOGY,, 2020. **38**: p. 2037-2045.
  38. Liang Liang Liu et. al., *A single-film fiber optical sensor for simultaneous measurement of carbondioxide and relative humidity*,. Optics and Laser Technology, 2022. **147**: p. 1-9.
  39. M. Fredenslund, e.a., *On-site and ground-based remote sensing measurements of methane emissions from four biogas plants: A comparison study*. Bioresource Technology,, 2018(270): p. 88 - 95,.
  40. M. Subramanian et al., *Room temperature fiber optic gas sensor technology based on nanocrystalline Ba<sub>3</sub>(VO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>: Design, spectral and surface science*,. Materials Research Bulletin, 2019. **119**(110560),).
  41. M.A.B.M. Yusof et al., *In-ground lagoon anaerobic digester in the treatment of palm oil mill effluent (POME): Effects of process parameters and optimisation analysis*. Fuel Processing Technology, 2024. **357**(129916): p. 1-20.
  42. M.E. Álvarez-Ramos et. al., *Room temperature CO<sub>2</sub> sensing using Au-decorated ZnO nanorods deposited on an optical fiber*,. Materials Science & Engineering: B, 2020. **262**: p. 1-8,.
  43. Md. R. Sardar et. al., *Design and characterization of rectangular slotted porous core photonic crystal fiber for sensing CO<sub>2</sub> gas*. Sensing and Bio-Sensing Research, 2020. **30**: p. 1-9.
  44. Nova Analytical Systems. *Landfill Gas Analyzers & Biogas Analyzers*.
  45. P. Thaisongkroh et al., *Low-Pressure Measurement Using an Extrinsic Fiber-Based Fabry-Perot Interferometer for Industrial Applications*. Engineering Journal, 2021. **25**(2).
  46. produce, E., *Isopropyl alcohol*, in *Material safety data sheet*. p. 1-11.
  47. R. Furushima et al., *Compatibility of PVB of Mixed Organic Solvents in Alumina Slurries and its Effect on Morphology of Green Sheets*. Journal of the American Ceramic Society,, 2011. **94**(9): p. 2819-2824.

48. R.W. Temp et al., *Characteristic fatigue strength and reliability of dental glass-ceramics: Effect of distinct surface treatments – Hydrofluoric acid etching and silane treatment vs one-step self-etching ceramic primer*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2024. **150**(106338): p. 1-8.
49. S. Devendiran, D.S., *Gas sensing based on detection of light radiation from a region of modified cladding (nanocrystalline ZnO) of an optical fiber*. Optics & Laser Technology, 2017. **89**: p. 186-191.
50. S. N. Riddick, e.a., *Development of a low-maintenance measurement approach to continuously estimate methane emission: A case study*. Waste Management, 2018(73): p. 210 - 219.
51. S. Pullteap and H. C. Seat, *An Extrinsic Fiber Fabry-Perot Interferometer for Dynamic Displacement Measurement*. PHOTONIC SENSORS, , 2015. **5**(1): p. 50–59.
52. S. Shanavas et al., *Development of high-performance fiber optic gas sensor based rice-like CeO<sub>2</sub>/MWCNT nanocomposite synthesized by facile hydrothermal route*. Optics and Laser Technology, 2020. **123**(105902).
53. T. Martan et. al., *Local detection of gaseous carbon dioxide using optical fibers and fibertapers of single-cell dimensions*. Sensors and Actuators B: Chemical,, 2023. **375**: p. 1-9,.
54. T. Reinelt et al., *Field measurements of fugitive methane emissions from three Australian waste management and biogas facilities*. Waste Management,, 2022. **137**: p. 294–303,.
55. T.-K. Lam, *Metagenomics vs metaproteomics: A review of their application on anaerobic digestion in biogas generation*. Bioresource Technology Reports, 2023. **24**(101668).
56. W. A. D. Zobaa, vol. 20, no. 2, pp. , , *Optical Fiber Cryptophane Sensor for Gas Detection*. Journal of Babylon University/Pure and Applied Sciences, 2012. **20**(2): p. 1–8.
57. W. Jin, e.a., *Gas detection with micro-and nano-engineered optical fibers*. Optical Fiber Technology, 2013(19): p. 741 - 759.
58. W. Ni et al., I.P.J., vol. 9, no. 2, p. , , *Highly sensitive optical fiber curvature and*

- acoustic sensor based on thin core ultralong period fiber grating*. IEEE Photonics J., 2017. **9**: p. 7100909.
59. W. Puttachai et al., L.a.n.c.r.b.w.-t.-e.a.e.c.i.G., " Energy Reports, Vol. 7, pp. 286–292, 2021., *Linear and nonlinear causal relationships between waste-to-energy and energy consumption in Germany*. Energy Reports, 2021. **7**: p. 286–292.
  60. W. Wen-qing, Z.L., and Z. Wei-Hua, *Analysis of Optical Fiber Methane Gas Detection System*. Procedia Engineering, 2013. **52**: p. 401-407.
  61. Weber., G.G.a.C., *The effect of inflation on CO2 emissions: An analysis over the period 1970–2020*. Ecological Economics, 2024. **217**(108029): p. 1-7.
  62. Wolfbeis, X.D.W.a.O.S., *Optical methods for sensing and imaging oxygen*. materials, spectroscopies and applications, 2014. **43**: p. 3666 – 3761.
  63. X. Qi et al., *Fiber Optic Fabry-Perot Pressure Sensor with Embedded MEMS Micro-Cavity for Ultra-High Pressure Detection*, J Lightwave Technol., 2018. **37**: p. 1-7.
  64. X. Wang et al., *The influence of exhaust gas recirculation coupling with fuel injection pressure on the combustion and emission characteristics of engine fueled with methanol-gasoline blends*,. Fuel Processing Technology, 2024. **255**(108048): p. 1-12, .
  65. Xinyuan Chong et. al., *Ultrashort Near-Infrared Fiber-Optic Sensors for Carbon Dioxide Detection*,. IEEE Sensors Journal,, 2015. **15**: p. 5327-5332.
  66. Y. Javed et al., *A review of principles of MEMS pressure sensing with its aerospace applications*. Sensor Review, 2019. **39**(5): p. 652–664,.
  67. Y. Zhang, Y.K., K. Oshita et al., , *Economic assessment of biogas purification systems for removal of both H2S and siloxane from biogas*,. Renewable Energy,, 2021. **168**: p. 119-130,.
  68. Y. Zhuo et al., *Low H2S content biogas biodesulfurization from high solid sludge anaerobic digestion using limited external aeration biotrickling filter: Effect of gas-liquid pattern on oxygen utilization performance*. Journal of Environmental Management,, 2022. **314**(115084).
  69. Yasin, M., *Fiber Optic Sensors*. Eds. InTech, 2012: p. 27-52.
  70. Yong Zhao et al., *Fiber optic volatile organic compound gas sensors: A review*.



Coordination Chemistry Reviews,, 2023. **493**(215297,).

71. Z. Samavati et al., *Comprehensive investigation of evanescent wave optical fiber refractive index sensor coated with ZnO nanoparticle*. *Optical Fiber Technology*, 2019. **52**(101976,).
72. กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ, ศ., การส่งออกสินค้าเกษตรของกับประเทศคู่ FTA ไตรมาสแรก ปี 2564. 2564.
73. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (*Biogas*) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม, ed. พ. 1. 2553.
74. กระทรวงพลังงาน, มือประกอบการฝึกอบรมพัฒนาบุคลากรด้านพลังงานทดแทนประเภทเอทานอลและก๊าซชีวภาพ, in กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2559.



[1-74]



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

นางสาวไพรินทร์ ไทยสงเคราะห์

วุฒิการศึกษา

วิทยาศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร  
เหนือ

