ผลของการเสื่อมสภาพของพื้นผิวเซ็นเซอร์แก๊สต่อประสิทธิภาพการรู้จำกลิ่น ด้วยปัญญาประดิษฐ์

THE EFFECT OF GAS-SENSOR SURFACE DEGRADATION ON ODOUR RECOGNITION PERFORMANCE WITH ARTIFICIAL INTELLIGENT

วัชระ ชำนาญเดชากุล

WATCHARA CHAMNANDACHAKUL

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

THE EFFECT OF GAS-SENSOR SURFACE DEGRADATION ON ODOUR RECOGNITION PERFORMANCE WITH ARTIFICIAL INTELLIGENT

WATCHARA CHAMNANDACHAKUL

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING

IN NANOMATERIALS ENGINEERING

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY KMITL

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	ผลของการเสื่อมสภาพของพื้นผิวเซ็นเซอร์แก๊สต่อประสิทธิภาพการรู้จำกลิ่นด้วยปัญญาประดิษฐ์
Special Project Title	THE EFFECT OF GAS-SENSOR SURFACE DEGRADATION ON ODOUR RECOGNITION PERFORMANCE WITH ARTIFICIAL INTELLIGENT
นักศึกษา	วัชระ ชำนาญเดชากุล
รหัสประจำตัว	58110054
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.ดร. ขัตติยา ชลาพัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร. สายชล ใจเย็น

คณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ	ลายมือชื่อ
อ.ดร. ขัตติยา ชลาพัฒน์	
ผศ.ดร. สายชล ใจเย็น	
อ.ดร. มยุรี พลเยี่ยม	
ผศ.ดร. ดารินี พรหมโยธิน	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยีวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่........เดือน..........................พ.ศ. 2561

โครงงานพิเศษเรื่อง	ผลของการเสื่อมสภาพของพื้นผิวเซ็นเซอร์แก๊สต่อ ประสิทธิภาพการรู้จำกลิ่นด้วยปัญญาประดิษฐ์
นักศึกษา	นายวัชระ ชำนาญเดชากุล
รหัสนักศึกษา	58110054
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.ดร.ขัตติยา ชลาพัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.สายชล ใจเย็น

บทคัดย่อ

เซ็นเซอร์แก๊สนั้นเมื่อใช้งานเป็นเวลานานจะเกิดการเสื่อมสภาพของพื้นผิววัสดุที่เป็นตัวตรวจจับแก๊สซึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัด โครงงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของพื้นผิวเซ็นเซอร์แก๊ส โดยจะนำเซ็นเซอร์แก๊สชนิดโลหะออกไซด์ของบริษัท Figaro รุ่น TGS826 มาใช้ในการศึกษา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมในการตรวจวัดพื้นผิวของเซ็นเซอร์ดังกล่าวหลังจากการใช้งานเป็นเวลา 1 ถึง 3 เดือน และทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรู้จำแก๊สของเซ็นเซอร์ด้วยปัญญาประดิษฐ์โดยใช้แบบจำลอง ซัพพอร์ต เวกเตอร์ แมชชีน เพื่อดูผลของการเสื่อมสภาพของพื้นผิวเซ็นเซอร์ต่อประสิทธิภาพการรู้จำแก๊ส

คำสำคัญ : เซ็นเซอร์แก๊ส, การเสื่อมสภาพของพื้นผิวเซ็นเซอร์, ปัญญาประดิษฐ์, ซัพพอร์ต เวกเตอร์ แมชชีน

Special Project Title	THE EFFECT OF GAS-SENSOR SURFACE DEGRADATION ON ODOUR RECOGNITION PERFORMANCE WITH ARTIFICIAL INTELLIGENT
Student	Mr. Watchara Chamnandachakul
Student ID.	58110054
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterials Engineering
Year	2018
Special Project Advisor	Dr. Khattiya Chalapat
Special Project Co-Advisor	Asst. Prof. Dr. Saichon Jaiyen

ABSTRACT

When a gas sensor is used for a long time, the surface of the sensor will degrade causing a measurement error. In this research project, we study the degradation of sensor surface by using TGS826 metal-oxide sensors from the FIGARO company. We study the surface degradation after the sensor is used for 1 to 3 months by using an atomic force microscope. We then analyze the performance of the gas-sensor gas recognition based on an artificial intelligent system using the support vector machine (SVM) model in order to determine the effect of the surface degradation on the gas recognition performance.

Keyword : gas sensor, degradation of gas sensor surface, artificial intelligence, Support vector machine (SVM)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ อ.ดร.ขัตติยา ชลาพัฒน์ (หัวหน้าโครงการพัฒนาระบบเครือข่ายจมูกอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเฝ้าระวังกลิ่นและสารระเหยในกลุ่มนิคมอุตสาหกรรมพื้นที่มาบตาพุด ระยะที่ 2 ปีงบประมาณ 2559 และ ระยะที่ 3 ปีงบประมาณ 2560 และ 2562 อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาในการทำการวิจัยและให้แนวคิดแนวทางในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.สายชล ใจเย็น อาจารย์ประจำคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับระบบปัญญาประดิษฐ์สำหรับงานวิจัยในโครงงานพิเศษครั้งนี้

ขอขอบคุณท่านประธานกรรมการสอบโครงงาน อ.ดร. มยุรี พลเยี่ยม และท่านกรรมการสอบโครงงาน ผศ.ดร. ดารินี พรหมโยธิน ที่ได้ให้คำแนะนำเชิงลึกต่างๆในแต่ละด้านที่เป็นความเชี่ยวชาญของแต่ละท่าน เพื่อนำมาใช้ปรับปรุงการจัดรายงานการวิจัยฉบับนี้

ขอขอบคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง และคณะนักวิจัยโครงการพัฒนาเครือข่ายจมูกอิเล็กทรอนิกส์ของวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.ดร.สิรพัฒน์ ประโทนเทพ และ ศ.ดร.จิติ หนูแก้ว ผู้ริเริ่มโครงการวิจัยนี้เมื่อปี พ.ศ. 2551

และขอขอบคุณที่ปรึกษาโครงการพัฒนาเครือข่ายจมูกอิเล็กทรอนิกส์ คุณอัศริน เหล่าศิริลือชาไกล, อ.ดร. นริศรา ทองบุญชู, ผศ.ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์ และ ผศ. ดร. ประพัทธ์ พงษ์เกียรติกุล รวมถึงคณะนักวิจัยและผู้ช่วยนักวิจัยในโครงการพัฒนาเครือข่ายจมูก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผศ.ดร. พิกุลแก้ว ตังติสานนท์ และ ดร. ปิยะเนตร ฉุยฉาย (นักวิจัยปี พ.ศ. 2560 – 2561) ผศ. โกศล ตราชู และ อ. สุจินต์ วังสุยะ (นักวิจัยปี พ.ศ. 2555 – 2559) และคุณอนุรักษ์ สีดา (ผู้ช่วยนักวิจัยปี พ.ศ. 2555 – 2559 และวิศวกรโครงการปี 2560 – 2561)

และขอขอบคุณ ดร. อนงค์ ชานะมูล ผู้อวยการศูนย์วิจัยและฝึกอมรมด้านสิ่งแวดล้อมของกรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อมที่อนุเคราะห์สถานที่สำหรับการทดลองในครั้งนี้ และ ดร. หทัยรัตน์ การีเวทย์, ดร. วรรณา เลาวกุล, ดร. ศิรพงษ์ สุขทวี และ คุณ นิรัน เปี่ยมใย ที่ดูแลและให้ความช่วยเหลือในการทดลองทดสอบการวัดแก๊สมาตราฐานที่ศูนย์วิจัย

และขอขอบคุณ คุณ รัตยาภรณ์ จิตรแหง และทีมงานทุกท่านของบริษัท แอลเอ็มเอส อิสทรูเม้นต์ สำหรับความอนุเคราะห์ให้กับการใช้งานกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมรุ่นคอร์เอเอฟเอ็มในการทดลองการตรวจสภาพพื้นผิวของเซ็นเซอร์

และขอขอบคุณคณะนักวิจัยและนักวิทยาศาสตร์ของวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีสำหรับคำแนะนำด้านเครื่องมือวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของเซ็นเซอร์และเครื่องมือวิเคราะห์อื่นๆ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ที่ให้โอกาสในการศึกษาเล่าเรียนและคอยให้การช่วยเหลือต่างๆตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัยในครั้งนี้

วัชระ ชำนาญเดชากุล

สารบัญ

หน้า

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

สารบัญรูป (ต่อ)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

โครงงานพิเศษนี้จัดทำขึ้นโดยได้รับการสนับสนุนงบประมาณการวิจัยจากโครงการพัฒนาระบบเครือข่ายจมูกอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเฝ้าระวังกลิ่นและสารระเหยในกลุ่มนิคมอุตสาหกรรมพื้นที่มาบตาพุด ของวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี ภายใต้บันทึกข้อตกลงความร่วมมือทางวิชาการระหว่างสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) และการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (กนอ.) โดยข้อตกลงความร่วมมือทางวิชาการฉบับที่ 1 มีกำหนดการตั้งแต่วันที่ 26 มิถุนายน พ.ศ. 2557 ถึงวันที่ 25 มิถุนายน 2560 และข้อตกลงความร่วมมือทางวิชาการฉบับที่ 2 มีกำหนดการตั้งแต่วันที่ 26 มิถุนายน 2560 ถึงวันที่ 25 มิถุนายน 2563

ในโครงการพัฒนาระบบเครือข่ายจมูกอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเฝ้าระวังกลิ่นและสารระเหยในกลุ่มนิคมอุตสาหกรรมพื้นที่มาบตาพุด คณะนักวิจัยจากวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีได้พัฒนาจมูกอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เซ็นเซอร์แก๊สชนิดโลหะออกไซด์จำนวน 7 ตัว และได้ติดตั้งเครือข่ายสถานีจมูกอิเล็กทรอนิกส์เพื่อทดลองใช้งานจริงที่พื้นที่นิคมอุตสาหกรรมเป็นจำนวน 12 ตัวในช่วงปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 และติดตั้งเพิ่มเติมรวมเป็นจำนวน 30 สถานีในช่วงปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 ซึ่งจากการทดสอบใช้งานจริงพบว่าทุกสถานียังทำงานได้ถึงปัจจุบัน

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของสถานีร่วมกับระบบปัญญาประดิษฐ์คณะนักวิจัยและผู้ช่วยนักวิจัยของวิทยาลัยนาโนเทคโนลีได้นำสถานีที่ถูกใช้ในพื้นที่จริงมาตั้งแต่ปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มาทำการทดสอบประสิทธิภาพการรู้จำกลิ่นในระดับห้องปฏิบัติการเมื่อเดือนมิถุนายนถึงกรกฎาคม พ.ศ. 2561 จากการทดสอบพบว่าแม้สถานีจะถูกใช้งานเป็นระยะเวลาที่ยาวนานสถานียังคงสามารถทำงานรู้จำกลิ่นได้ด้วยระบบปัญญาประดิษฐ์

แสดงให้เห็นว่าเซ็นเซอร์ชนิดโลหะออกไซด์ที่คณะนักวิจัยเลือกใช้พัฒนาจมูกอิเล็กทรอนิกส์มีความเหมาะสมสำหรับใช้เฝ้าระวังกลิ่นในนิคมอุตสาหกรรมจึงนำมาสู่คำถามของงานวิจัยในโครงงานพิเศษนี้ คือ ระดับสัญญาณที่ต่ำลงของจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานเป็นเวลานานจะมีผลต่อความถูกต้องและประสิทธิภาพการรู้จำกลิ่นของระบบปัญญาประดิษฐ์หรือไม่

เนื่องจากในสถานีจมูกอิเล็กทรอนิกส์มีการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์แก๊สชนิดโลหะออกไซด์จากบริษัท FIGARO รุ่น TGS ที่ทำมาจาก SnO_2 [1] [2] จึงสนใจศึกษาว่าจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจาก

เซ็นเซอร์ชนิดโลหะอ็อกไซด์เมื่อเสื่อมสภาพจากการถูกใช้งานนานในพื้นที่ซึ่งมีกลิ่นสารระเหยเป็นเวลานานจะมีค่าสัญญาณต่ำลงเกินกว่าที่จะรู้จำกลิ่นด้วยระบบปัญญาประดิษฐ์หรือไม่

โดยทั่วไปพื้นผิวของโลหะออกไซด์สามารถเสื่อมสภาพได้จากกระบวนการต่างๆเช่น 1) ออกซิเดชันของพื้นผิวโลหะออกไซด์ (Oxidation of sensing materials) หมายถึงกระบวนการเคมีที่ทำให้วัสดุเปลี่ยนสภาพจากการสูญเสียอิเล็กตรอน 2) การเปลี่ยนโครงสร้างของพื้นผิวอันเนื่องมาจากความร้อน(Thermally driven reconstruction) 3) การเปลี่ยนโครงสร้างของพื้นผิวอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้า (Electrically driven reconstruction) และ 4) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพื้นผิวอันเนื่องจากปฏิสัมพันธ์กับโฟตอน (Photoionization)

ซึ่งการเสื่อมสภาพทำให้องค์ประกอบของพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงไปเช่นเกิดตำหนิหรือมีอะตอมแปลกปลอม (Defect) ขึ้นในโครงผลึกของโลหะออกไซด์จึงทำให้โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุตรวจจับแก๊ส (sensing material) และ การนำไฟฟ้า (Conductivity) ของเซ็นเซอร์เปลี่ยนแปลงไป แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของพื้นผิว (Surface composition) มีผลต่อสมบัติการตอบสนองต่อและสารเคมีอย่างยิ่ง [3] และอาจมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการรู้จำด้วยระบบปัญญาประดิษฐ์ต่ำลง

อย่างไรก็ตามผลการทดลองในเดือนมิถุนายนและกรกฎาคม 2561 บริเวณระเบียงชั้น 2 อาคารเฉลิมพระเกียรติ 55 พรรษาสมเด็จพระเทพ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังโดยคณะนักวิจัยนำโดย อ.ดร. ขัตติยา ชลาพัฒน์ และคณะผู้ช่วยนักวิจัย (นักศึกษาระดับปริญญาตรีของวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี ได้แก่ นายวัชระ ชำนาญเดชากุล, นายธนกร ศรีสุวรรณ์, นายสุริยา ธรรมชาติ, นายทัศนัย เต็มเปี่ยม, นายสกลวรรษ แก้วกุศลวิวัฒน์, นายศุภวัทน์ บุญราช, นายศิรายุท จันปี้, และ นางสาวเพชรรัตน์ เณรอยู่) ได้ให้เห็นว่าสถานีที่ใช้งานในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมมาเป็นเวลานานยังใช้เก็บข้อมูลกลิ่นเพื่อสอนระบบปัญญาประดิษฐ์ให้รู้จำกลิ่นสารระเหยได้เช่นเดียวกับสถานีที่ยังไม่ได้ถูกใช้งานเป็นเวลานาน

สำหรับโครงงานพิเศษนี้ผู้ทดลองกำหนดขอบเขตงานวิจัยโดยเลือกเซ็นเซอร์ TGS จากบริษัท FIGARO เพื่อการทดสอบ 2 รุ่นคือ TGS826 และ TGS2600 โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อออกแบบการทดลองศึกษาการเสื่อมสภาพของเซ็นเซอร์ชนิดโลหะออกไซด์และผลต่อประสิทธิภาพการรู้จำด้วยระบบปัญญาประดิษฐ์ โดยมุ่งเน้นการศึกษาวิจัยไปที่การเสื่อมสภาพเชิงกายภาพของพื้นผิวเซ็นเซอร์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscopy; AFM) และการวิเคราะห์แก๊สด้วยระบบปัญญาประดิษฐ์ โดยนำแบบจำลอง ซัพพอร์ต เวกเตอร์ แมชชีน (Support vector machine; SVM) [4] มาใช้วิเคราะห์แยกแยะแก๊สมาตราฐาน 4 ชนิด ได้แก่ อากาศบริสุทธิ์ (Air zero), CO, NO_x, และ SO_x ที่มีในห้องปฏิบัติการด้านของศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อมของ

กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อมและจำลองการใช้งานของเซ็นเซอร์ในสิ่งแวดล้อมที่มีสารระเหยที่ห้องปฏิบัติการของวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1.2 จุดมุ่งหมายของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการเสื่อมสภาพของพื้นผิวของเซ็นเซอร์ต่อค่าสัญญาณทางไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ชนิดโลหะออกไซด์ในสถานีจมูกอิเล็กทรอนิกส์

1.2.2 เพื่อศึกษากระบวนการรู้จำกลิ่นและการแยกแยะกลิ่นของสถานีจมูกอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ระบบปัญญาประดิษฐ์

1.3 ความสำคัญของงานวิจัย

งานวิจัยนี้นำไปใช้สำหรับการวิจัยและพัฒนาในโครงการพัฒนาระบบเครือข่ายจมูกอิเล็กทรอนิกส์ของวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความถูกต้องให้กับการตรวจวัดกลิ่นสารอินทรีย์ระเหยง่ายของสถานีจมูกอิเล็กทรอนิกส์

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาถึงผลของการเสื่อมสภาพของเซ็นเซอร์ TGS826 จากการทำงานตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายบางชนิด

1.4.2 ศึกษาการเสื่อมสภาพของพื้นผิวของเซ็นเซอร์ TGS826 ในระดับนาโนเมตรโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

1.4.3 ศึกษาประสิทธิภาพการรู้จำและแยกแยะแก๊สเดี่ยวด้วยเซ็นเซอร์ TGS826 และระบบปัญญาประดิษฐ์ โดยแบบจำลอง ซัพพอร์ต เวกเตอร์ แมชชีน (Support vector machine; SVM)

1.5 สมมติฐานในงานวิจัย

1.5.1 การเสื่อมสภาพของพื้นผิวของของเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจกลิ่นสารอินทรีย์ระเหยง่ายทำให้ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าของกลิ่นที่วัดได้มีค่าต่ำลง

1.5.2 ปัญญาประดิษฐ์สามารถรู้จำแก๊สเดี่ยวสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้แม้ใช้เซ็นเซอร์เพียงตัวเดียว

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ผลที่ได้จากงานวิจัยในโครงงานพิเศษนี้สามารถนำไปใช้ปรับปรุงระบบการวิเคราะห์กลิ่นต่างๆ ในโครงการพัฒนาระบบเครือข่ายจมูกอิเล็กทรอนิกส์ของวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความถูกต้องในการทำงานให้กับสถานีที่จะนำไปใช้ในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมหรือสถานที่อื่นที่ได้รับผลกระทบจากกลิ่นสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เป็นอันตรายต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

จากการสืบค้นข้อมูลทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้และข้อมูลการทดลองจากบทความต่างๆที่มีนักวิจัยท่านอื่นที่ได้วิจัยไว้แล้วนั้นจะนำเสนอตามหัวข้อดังต่อไปนี้

2.1 โลหะออกไซด์ (Metal oxide; MO)

2.1.1 ความหมายของโลหะออกไซด์

2.1.2 ออกไซด์ของดีบุก (Tin oxide; SnO_2)

2.1.3 ประเภทของเซ็นเซอร์แก๊ส

2.1.4 หลักการทำงานของเซ็นเซอร์ชนิดโลหะออกไซด์

2.2 ผลของเวลาต่อการให้ความร้อนกับเซ็นเซอร์ก่อนใช้งาน

2.3 การเรียนรู้ของเครื่องจักรกล (Machine learning)

2.4.1 ความหมายการเรียนรู้ของเครื่องจักรกล

2.4.2 ประเภทของการเรียนรู้ของเครื่องจักรกล

2.4.3 แบบจำลอง ซัพพอร์ต เวกเตอร์ แมชชีน (Support vector machine)

2.4 ทบทวนวรรณกรรม (Literature review)

2.1 โลหะออกไซด์ (Metal oxide)

ในตารางธาตุมีธาตุที่เป็นโลหะตามธรรมชาติมากกว่าร้อยละ 75 ส่วนใหญ่ธาตุเหล่านี้จัดอยู่ในหมู่ที่ 1 ถึงหมู่ที่ 12 เช่น โซเดียม (Na) แคลเซียม (Ca) ไททาเนียม (Ti) โครเมียม (Cr) เหล็ก (Fe) ทองแดง (Cu) ทอง (Au) สังกะสี (Zn) และธาตุหนักในหมู่อื่นเช่น ดีบุก (Sn) และ ตะกั่ว (Pb) ซึ่งเป็นธาตุในหมู่ที่ 14 โดยทั่วไปธาตุโลหะนั้นมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้องมีจุดหลอมเหลว (Melting point) และ ความหนาแน่นที่สูง มีความมันเงา มีรัศมีของอะตอมที่มากที่สุดในคาบด้วยเหตุนี้จึงมีพลังงานไอออไนเซชัน (Ionization energy) และอิเล็คโทรเนกาทิวิติ (Electronegativity) ที่ต่ำดังนั้นการมีค่าพลังงานไอออไนเซชันที่ต่ำทำให้เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายทำให้การนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดี คุณสมบติอีกประการคือความอ่อนและเหนียวของธาตุโลหะจึงสามารถเปลี่ยนรูปร่างโดยไม่เกิดการแตกหักได้

2.1.1 ความหมายของโลหะออกไซด์

โลหะออกไซด์ (Metal oxide) คือสารประกอบที่เกิดจากการรวมตัวกันของโลหะ (Metal) กับของออกซิเจนจะถูกเรียกว่าโลหะออกไซด์

2.1.2 ออกไซด์ของดีบุก (Tin oxide; SnO_2)

ออกไซด์ของดีบุก มีชื่อตามระบบ IU-PAC ว่า Dioxotin หรือชื่ออื่นๆ Stannic oxide และ Tin dioxide โดยการเขียนสูตรโมเลกุลสามารถเขียนได้ 2 แบบ SnO_2 หรือ O_2Sn

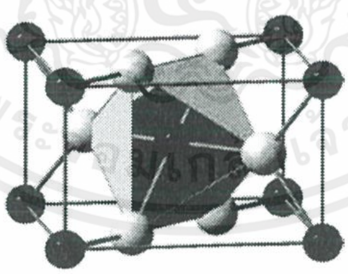
2.1.2.1 สมบัติเชิงเคมีและกายภาพของออกไซด์ของดีบุก (SnO_2)

ตารางที่ 2.1 สมบัติเชิงเคมีและกายภาพ

น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)	150.708 g/mol
ความหนาแน่น (Density)	6.95 g/cm^3
จุดหลอมเหลว (Melting point)	1630 °C
จุดเดือด (Boiling point)	สลายตัว (NIOSH, 2016)
ความสามารถในการละลายในน้ำ (Water solubility)	ไม่ละลาย
สี (Color)	Tetrahedral crystals สีขาว Powder สีขาวหรือสีเทา

2.1.2.2 โครงสร้างของออกไซด์ของดีบุก (SnO_2)

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงออกไซด์ของดีบุก ที่มีโครงสร้างแบบ Rutile กล่าวคืออะตอมของดีบุกถูกรอบล้อมด้วยอะตอมของออกซิเจน 6 อะตอม ที่มารวมตัวกันแล้วมีรูปร่างเป็นทรงแปดหน้าที่บิดเบี้ยว (Distorted octahedron)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของออกไซด์ของดีบุก [5]

โดยอยู่ในระนาบเรขาคณิต (Planar geometry) ที่ถูกบิดรูปทรงมาจาก Trigonal planar โครงสร้าง Rutile โดยโครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างที่แต่ละอะตอมของออกซิเจน ประพฤติตัวเหมือนสะพานที่เป็นตัวคอยเชื่อม shared edge ของสายโซ่ตัวอื่นที่อยู่คนละยูนิตเซลล์เข้าด้วยกัน

2.1.2.3 การใช้งานและการผลิตออกไซด์ของดีบุก (SnO_2)

ในด้านอุตสาหกรรมโลหะออกไซด์ถูกนำไปใช้เป็นสารสี (Pigments) เช่น ใช้ผสมเพื่อทำเป็นน้ำหมึก หรือ ผสมผลิตภัณฑ์เครื่องแก้ว หรือ เคลือบผิววัสดุ เป็นต้น

2.1.2.4 ความเป็นพิษและอาการข้างเคียงจากออกไซด์ของดีบุก (SnO_2)

เส้นทางการรับออกไซด์ของดีบุก สามารถรับได้จาก การสูดดม, การสัมผัสกับผิวหนัง และหรือตาโดยเมื่อได้รับจะเกิดอาการต่าง เช่น โรคฝุ่นแร่ดีบุกจับปอด (Stannosis) ทำให้หายใจลำบากเนื่องจากเมื่อสารเข้าไปยังปอดจะทำให้การทำงานของปอดมีประสิทธิภาพที่ต่ำลง และ จะมีอาการไอ

2.1.3 ประเภทของเซ็นเซอร์

สามารถแยกแยะประเภทของแก๊สเซ็นเซอร์โลหะออกไซด์ได้ 5 ชนิดดังนี้

2.1.3.1 Solid-state (semiconductor) sensors ส่วนใหญ่ทำมาจากวัสดุประเภทโลหะออกไซด์ เช่นออกไซด์ของดีบุก (SnO_2) ออกไซด์ของไททาเนียม (TiO_2) ออกไซด์ของสังกะสี (ZnO) เป็นต้น ซึ่งหลักการทำงานของเซ็นเซอร์ชนิดนี้อธิบายได้ด้วยทฤษฎี Ionosorption รายละเอียดดังแสดงไว้ในหัวข้อถัดไปของโครงงานฉบับนี้ ตามทฤษฎีดังกล่าว โมเลกุลของออกซิเจนจะมีอันตรกิริยากับสิ่งแวดล้อมแตกต่างกันไปตามช่วงอุณหภูมิ ออกซิเจนในอากาศที่มาจับกับพื้นผิววัสดุจะแตกตัวเป็นไอออนได้ 2 กรณี คือ O^- หรือ O^{2-} ไอออนเหล่านี้สามารถทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างแก๊สชนิดอื่นกับพื้นผิวของวัสดุตรวจสอบแก๊สได้ [5]

2.1.3.2 Electrochemical sensors เป็นเซ็นเซอร์ที่ทำงานโดยอาศัยอันตรกิริยาระหว่างขั้วไฟฟ้ากับแก๊ส โดยทั่วเซ็นเซอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าที่ใช้วัดแก๊ส (Working or Sensing electrode) ขั้วไฟฟ้าตรงข้าม (Counter electrode) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) [6] เมื่อแก๊สเข้าสัมผัสกับขั้วที่ใช้วัดแก๊สแล้วเกิดปฏิกิริยาขึ้น เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) จะทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ใช้วัดแก๊สกับขั้วไฟฟ้าตรงข้าม ซึ่งสามารถใช้วงจรภายนอกเพื่อวัดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมได้

2.1.3.3 Photoionization detector (PID) เซ็นเซอร์ PID มีหลักการทำงานโดยใช้โฟตอนพลังงานสูงทำลายให้โมเลกุลให้กลายมาเป็นสถานะที่เป็นไอออนบวกโดยพลังงานจะขึ้นอยู่พลังงานไอออนไนเซชันของแก๊ส เมื่อมีแก๊สเข้าไปยังตัวตรวจจับที่ถูกยิงโดยการยิงแสงเหนือม่วง (Ultraviolet; UV) เมื่อเกิดการดูดซับแสงเหนือม่วงที่ยิงเข้าไปผลลัพธ์ที่ได้จากอิเล็กตรอนและไอออนประจุบวกก็คือค่ากระแสไฟฟ้า

2.1.3.4 Non-dispersive infrared radiation absorption (NDIR) เป็นเซ็นเซอร์ที่ยอมให้แสงใต้แดงผ่านไปยังในภาชนะที่เก็บตัวอย่างได้โดยเซ็นเซอร์ประเภทนี้ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดแสงใต้แดง ภาชนะบรรจุแก๊ส ที่กรองแสง และ เซ็นเซอร์ตรวจจับแสงใต้แดง โดยที่ให้แสงผ่านไปยังภาชนะบรรจุแก๊สที่เก็บตัวอย่างทั้งสองอันโดยที่ภาชนะหนึ่งบรรจุแก๊สมาตราฐานเอาไว้ใช้เปรียบเทียบ และ อีกภาชนะบรรจุแก๊สเป็นภาชนะสำหรับบรรจุแก๊สทดสอบ เช่น แก๊สไนโตรเจน หลังจากที่ฉายแสงใต้แดงเข้าไปแล้วแก๊สจะเกิดการดูดซับความยาวคลื่นบางช่วงเอาไว้และใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับแก๊สแปลผลออกมาซึ่งจะถูกอธิบายในรูปแบบของความเข้มข้น

2.1.4 หลักการทำงานของเซ็นเซอร์ชนิดโลหะออกไซด์

กระบวนการตอบสนองของแก๊สของโลหะออกไซด์ต่อแก๊สชนิดต่างๆ เช่น ออกซิเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ ตามแบบจำลอง Ionosorption มีกระบวนการทางเคมีดังตารางที่ 2.2

Gas detection	Ionosorption model	Oxygen vacancy model
Oxygen	$O_2(ads) + e^-(CB) \leftrightarrow O_2^-(ads)$ $O_2^-(ads) + e^-(CB) \leftrightarrow O_2^{2-}(ads) \leftrightarrow 2O^-(ads)$	$2V_O^\bullet + O_2\ (gas) + 2e^-(CB) \leftrightarrow 2O_O^\times$
CO/presence of oxygen	$CO\ (gas) + O^-(ads) \leftrightarrow CO_2(gas) + e^-(CB)$	$CO\ (gas) + O_O^\times \leftrightarrow CO_2(gas) + V_O^\times$ $V_O^\times \leftrightarrow V_O^\bullet + e^-(CB)$
CO/absence of oxygen	$CO\ (gas) \leftrightarrow CO^-(ads) + e^-(CB)$	$V_O^\bullet \leftrightarrow V_O^{\bullet\bullet} + e^-(CB)$
NO_2	$NO_2\ (gas) + e^-(CB) \leftrightarrow NO_2^-(ads)$	$NO_2(gas) + V_O^\bullet \leftrightarrow NO_2^-(ads) + V_O^{\bullet\bullet}$ $2NO_2(gas) + O_2^-(ads) + V_O^\bullet \leftrightarrow 2NO_3^-(ads) + V_O^{\bullet\bullet}$
Water vapour	$H_2O\ (gas) + O^-(ads) + 2Sn_{Sn}^\times \leftrightarrow 2(Sn_{Sn}^\times - OH) + e^-(CB)$ $H_2O\ (gas) + Sn_{Sn}^\times + O_O^\times \leftrightarrow (Sn_{Sn}^\times - OH) + OH_O^\bullet + e^-(CB)$	$H_2O\ (gas) + 2Sn_{Sn}^\times + O_O^\times \leftrightarrow 2(Sn_{Sn}^\times - OH) + V_O^\bullet + e^-(CB$

ตารางที่ 2.2 กลไกการตอบสนองต่อแก๊สบนออกไซด์ของดีบุก [7]

การถ่ายโอนประจุที่ผิวของวัสดุสามารถอธิบายได้ด้วยพฤติกรรมของประจุพาหะอิสระซึ่งคืออิเล็กตรอนตัวนำ (Conduction electrons) และโฮลล์ตัวนำ (Conduction Holes) ในกรณีของ

ออกซิเจน แบบจำลอง Ionosorption อธิบายการถ่ายเทประจุระหว่างออกซิเจนกับวัสดุกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) และการทำงานของเซ็นเซอร์ [8] ไว้ดังนี้

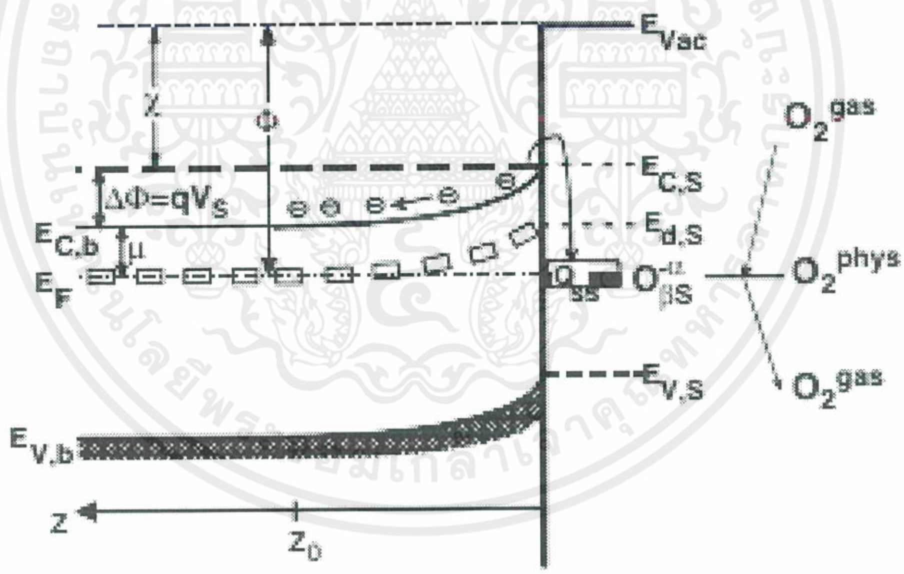
1) Ionosorbed oxygen ประเภทต่างๆเกิดขึ้นจากการถ่ายเทของอิเล็กตรอนตัวนำจากวัสดุกึ่งตัวนำไปยังโมเลกุลของออกซิเจน

2) ออกซิเจนไอออนมีสเถียรภาพต่อไฟฟ้าสถิตในบริเวณพื้นผิว

3) ไม่มีออกซิเจนที่ดูดซับประเภทอื่นอยู่นอกเหนือจาก ออกซิเจนที่ดูดซับด้วยแรงกายภาพ (Physisorbed oxygen) และออกซิเจนไอออน (Oxygen ions)

4) ออกซิเจนที่ดูดซับด้วยแรงกายภาพ (Physisorbed oxygen) เป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้า และออกซิเจนไอออน (Oxygen ions) เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า [7]

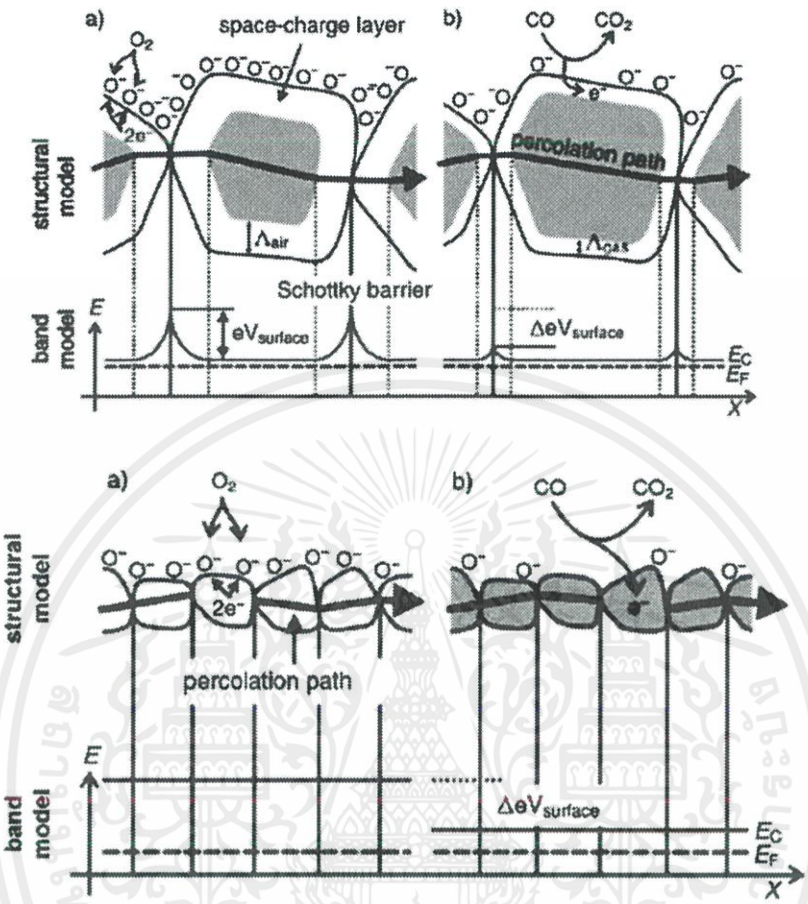
จากกระบวนการดังกล่าวจะทำให้เกิดการเปลี่ยนของแถบพลังงานที่บริเวณพื้นผิวดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเกิดการโค้งงอของระดับชั้นพลังงาน [8]

รูปที่ 2.2-2.3 แสดงให้เห็นว่าถ้าผิววัสดุไม่ได้เป็นผลึกชิ้นเดียวแต่มีลักษณะเป็นอนุภาคเป็นก้อน (Grain) ทำให้ที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาค (Grain boundary) เกิดกำแพงพลังงานศักย์ (Energy barrier) ขวางทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวัสดุ แต่เมื่อมีโมเลกุลของแก๊สตัวอื่นมาจับ

ที่ผิว เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ดังรูปที่ 2.3 ค่ากำแพงศักย์จะมีค่าต่ำลงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเซ็นเซอร์



รูปที่ 2.3 กระบวนการการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของการนำไฟฟ้า [9]

กรณีที่พื้นผิวเซ็นเซอร์มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 2 เท่าของความยาวเดอบาย ($D > 2\boldsymbol{\lambda}_D$ เมื่อ D คือ Grain size และ $\boldsymbol{\lambda}_D$ คือ Debye screening length) การนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงกำแพงศักย์ที่รอยต่อ แต่ถ้าอนุภาคขนาดเล็กกว่า 2 เท่าของความยาวเดอบาย ($D \leq 2\boldsymbol{\lambda}_D$) การนำไฟฟ้าสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวทั้งหมดซึ่งทำให้เซ็นเซอร์มีการตอบสนองที่ดีขึ้น (Higher sensitivity)

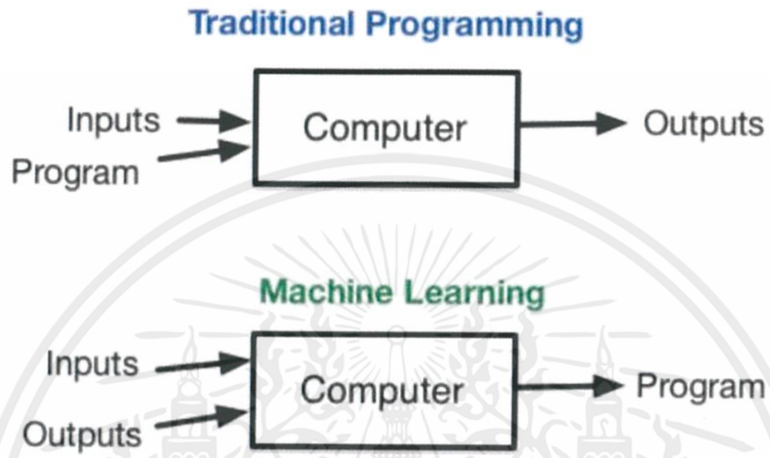
2.2 ผลของเวลาต่อการให้ความร้อนกับเซ็นเซอร์ก่อนใช้งาน

ถ้าอุณหภูมิของวัสดุโลหะออกไซด์มีค่าประมาณ 200°C ถึง 400 °C หรือมากกว่า โมเลกุลของออกซิเจนจะมีอันตรกิริยากับสิ่งแวดล้อมแตกต่างกันไปตามช่วงอุณหภูมิ ออกซิเจนในอากาศที่มาจับกับพื้นผิววัสดุจะแตกตัวเป็นไอออนได้ 2 กรณี คือ O^- หรือ O^{2-} ไอออนเหล่านี้สามารถทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างแก็สชนิดอื่นกับพื้นผิวของวัสดุตรวจสอบแก๊สได้ [5]

2.3 การเรียนรู้ของเครื่องจักรกล (Machine learning)

2.3.1 ความหมายการเรียนรู้ของเครื่องจักรกล

การเรียนรู้ของเครื่องจักรกล (Machine Learning) คือ การทำให้ระบบคอมพิวเตอร์เรียนรู้ได้ด้วยตนเองโดยใช้ข้อมูล



รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบโปรแกรมโดยทั่วไปกับการเรียนรู้ของเครื่องจักรกล [10]

การเรียนรู้ของเครื่องจักรกลแตกต่างกับการเขียนโปรแกรมทั่วไปเพราะการเขียนโปรแกรมจะใส่ข้อมูล (Data) และ โปรแกรม (Program) เข้าไปเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ (Output) แต่การเรียนรู้ของเครื่องจักรกลไม่ได้กำหนดคำตอบเอาไว้ล่วงหน้า ผู้สอนมีหน้าที่ใส่ข้อมูล (Data) และผลลัพธ์ (Output) เข้าไปเพื่อให้เครื่องจักรกลหาโปรแกรมที่สามารถทำนายผลลัพธ์ (Output) ได้ถูกต้องตรงกับความเป็นจริง

2.3.2 ประเภทของการเรียนรู้ของเครื่องจักรกล

ศาสตร์แขนงนี้เป็นแขนงวิชาที่กว้างมาก ซึ่งสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ได้ 3 กลุ่ม

2.3.2.1 การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning)

การเรียนรู้แบบมีผู้สอน เป็นกลุ่มของขั้นตอนวิธี (algorithm) ที่เน้นสอนคอมพิวเตอร์โดยการศึกษาจากข้อมูลตัวอย่างคือมีรูปแบบการประเมินชัดเจนว่าถ้าทำงานแล้วผลลัพธ์ได้แบบนี้คือถูกหรือผิด อ้างอิงจากตัวอย่างที่ได้ทำการสอนไป ซึ่งเราจะเรียกผลลัพธ์ของตัวอย่างที่ใช้ในการสอนว่า

ผลลัพธ์ (label) ตัวอย่างการใช้งานในชีวิตประจำวันเช่น Face Detection ที่ยิ่งมีการให้ข้อมูลเข้าไปมากเท่าไหร่ การทำนายภาพนั้นก็ยิ่งแม้นยำมากยิ่งขึ้น, Image Classification นำไปใช้ในการจำแนกผู้ป่วยที่เป็นโรคมะเร็ง เป็นต้น

2.3.2.2 การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning)

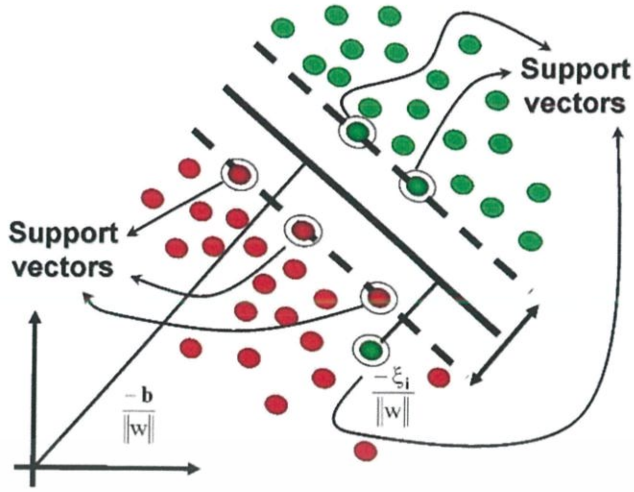
การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน ก็เป็นกลุ่มของ algorithm ที่เน้นสอนให้คอมพิวเตอร์เหมือนกันแต่มีความแตกต่างอยู่ที่ในกระบวนการ Training ให้ชุดข้อมูลที่นำไปใส่ให้เกิดการเรียนรู้นั้นจะไม่ระบุชนิดหรือประเภทเอาไว้ แบบจำลองนั้นจะคำนวณและจัดกลุ่มเองโดยจะจัดกลุ่มให้ข้อมูลที่เหมือนกันคล้ายกันอยู่ในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นั้นจะบอกเพียงว่าข้อมูลใดอยู่ในกลุ่มข้อมูลชุดใด

2.3.2.3 การเรียนรู้แบบเสริมแรง (Reinforcement Learning)

การเรียนรู้แบบเสริมแรง หรือ การเรียนแบบเสริมกำลังพิจารณา autonomous agent ที่สามารถเลือก action ได้โดยอาจเลือกแบบสุ่มก็ได้ หรือเลือกจากข้อมูลสภาพแวดล้อมของมันที่เรามักเรียกว่า state เมื่อ agent นี้ทำ action ดังกล่าวแล้ว state ของสภาพแวดล้อมก็จะเปลี่ยนไปเช่นให้ state เป็นตำแหน่งของ agent ในเขาวงกตและ action ก็คือการเลือกเดิน บน, ล่าง, ซ้าย, และ ขวา เป็นต้น agent จะทำ action ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะไปอยู่ใน state จบ เช่นออกจากเขาวงกต หรือเล่นเกมจบเป็นต้นโดยจะมี Policy หรือ แผนที่คอยจะเป็นตัวกำหนดเอาไว้ว่าใน state นั่นๆ ควรจะเลือกทำ action ใดหลังจากนั้นใน state ใดๆ นั้นจะมีรางวัลเป็นการตอบแทนในกรณีที่ทำถูกเรียกว่า discounted reward

2.3.3 ซัพพอร์ต เวกเตอร์ แมชชีน (SVM)

ในหัวข้อนี้จะเป็นการอธิบายถึงการพัฒนาปัญญาประดิษฐ์เพื่อรู้จำกลิ่นจากเซ็นเซอร์ที่เกิดการเสื่อมสภาพอาศัยวิธีการเรียนรู้ของเครื่องจักรกลแบบมีผู้สอนใช้วิธีประมวลผลโดยแบบจำลอง ซัพพอร์ต เวกเตอร์ แมชชีน และจัดเก็บข้อมูลบางส่วนมาตรวจสอบโดยใช้วิธีการ Holdout method



รูปที่ 2.5 แบบจำลอง Support vector machine (SVM) [11]

ซัพพอร์ต เวกเตอร์ แมชชีน เป็นวิธีประมวลผลสำหรับแก้ปัญหาการจำแนกข้อมูลโดยอาศัยการหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเพื่อนำมาใช้แบ่งข้อมูลโดยมีหลักการคือจะนำข้อมูล Input ที่เป็นเวกเตอร์แบบหลายมิติมา Map ให้อยู่ในรูปแบบของ Feature space โดยฟังก์ชัน Kernel ชนิดต่างๆ อันได้แก่ Polynomial, Radial เป็นต้น แล้วนำมาสร้างให้เป็น Hyperplane

Holdout method คือการนำข้อมูลที่ได้มาแบ่งออกเป็นสองชุดโดยจะมี Training set หรือ ชุดข้อมูลฝึกสอน และ Test set หรือ ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบ

2.4 ทบทวนวรรณกรรม (Literature review)

2.4.1 หลักการการทำงานของเซ็นเซอร์

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1920 ได้มีงานวิจัยที่เริ่มศึกษาถึงอันตรกิริยาของแก๊สที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าของออกไซด์ของโลหะ [12] ค่าความคล่องของประจุอิสระ (Free carrier mobility) ศักยภาพของพื้นผิว และ ฟังก์ชั่นงาน (Work function) ในวัสดุกึ่งตัวนำเป็นจำนวนมาก ซึ่งต่อมาในปี ค.ศ. 1955 S. Roy Morrison [13] ได้ทำการศึกษาผลของกำแพงศักย์พื้นผิวต่อการดูดซับบนออกไซด์ของสังกะสี (ZnO) โดยมีการศึกษาแบบจำลองแถบพลังงาน (The band model) สถานะพื้นผิวและกำแพงศักย์พื้นผิว (Surface states and surface barrier) และ การถ่ายโอนของอิเล็กตรอนในการดูดซับทางเคมีในสภาวะสมดุล (Equilibrium chemisorption) ต่อมาในปี ค.ศ.1970 เซ็นเซอร์ TGS หรือ Taguchi sensor ได้ถูกคิดค้นครั้งแรก โดย N. Taguchi โดยประกอบไปด้วย sensing material ทำมาจาก SnO_2 n-type semiconductor มีลักษณะไม่สัมผัสโดยมีเส้นลวด 2 เส้นที่เป็นขั้วไฟฟ้าและ อีก 2 เส้นสำหรับตัวให้ความร้อน (US Patent NO. 3,631,436) [1] [2] ในเวลาต่อมาเซ็นเซอร์ TGS หรือ Taguchi sensor ก็เป็นที่รู้จักกันเป็นวงกว้างและนำมาใช้ในงานวิจัยที่มากขึ้นจนกระทั่งในการศึกษาเมื่อปี ค.ศ. 2018 โดย Ananya Dey และคณะนักวิจัยของพวกเขาได้ศึกษาถึงหลักการทำงานเซ็นเซอร์ที่ทำมาจากวัสดุกึ่งตัวนำโดยมีฟังก์ชั่นที่เกี่ยวข้องกับการนำของสัญญาณไฟฟ้าอยู่ 2 ฟังก์ชัน ได้แก่ SMO Receptor function สำหรับใช้รับรู้ถึงแก๊สเป้าหมายที่รอยต่อระหว่างพื้นผิวรวมไปถึงประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวของออกไซด์ของโลหะและ Transducer function คือฟังก์ชั่นสำหรับส่งสัญญาณทางไฟฟ้าอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์บนพื้นผิว [14]

2.4.2 การศึกษาวิทยาศาสตร์ของพื้นผิว

ในปี ค.ศ. 1962 Stone F.S. ได้ทำการศึกษาถึงการดูดซับทางเคมีและการเร่งปฏิกิริยาของออกไซด์บนพื้นผิวออกไซด์ของโลหะ (Chemisorption and catalysis on metallic oxides) โดยในงานวิจัยนี้จะมีการศึกษาการดูดซับและออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ (The adsorption and oxidation of Carbon monoxide) ปฏิกิริยาของออกซิเจนที่ถูกดูดซับ (Adsorbed Oxygen) และ การเปลี่ยนแปลงของความเป็นกึ่งตัวนำไฟฟ้าในระหว่างการดูดซับทางเคมี (Semiconductivity changes during chemisorption) [15]

ในช่วงเวลาต่อมาการศึกษาวิทยาศาสตร์ของพื้นผิวในปี ค.ศ. 1988 David F. Cox และคณะได้ศึกษาถึงช่องว่างออกซิเจนและตำหนิของสถานะอิเล็กทรอนิกส์ของออกไซด์ของโลหะ (Oxygen vacancies and defect electronic states on the SnO_2(110)-1X1 surface) จากการศึกษาพบว่าบน Single crystal SnO_2 (110) แสดงให้เห็นว่าการเกิด Thermally driven reconstructions ของออกไซด์ของโลหะจะทำให้โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์มีการเปลี่ยนแปลงไปไปส่งผลให้ค่าการตอบสนองเปลี่ยนแปลงตาม [16]

จากการศึกษาในอดีตในการตรวจสอบพื้นผิวยังไม่มีการนำเครื่องมือมาใช้ในการศึกษาพื้นผิว ซึ่งในปัจจุบันเครื่องมือสำหรับศึกษาพื้นผิวมีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีไปอย่างมากจึงมีการนำเครื่องมือต่างๆนำมาใช้ในการศึกษาพื้นผิวดังตัวอย่างงานวิจัยในปี ค.ศ. 2018 A. M. Nzioka และคณะนักวิจัยของพวกเขาโดยมีการตรวจสอบสภาพพื้นผิวของ E–glass fibers โดยใช้วิธี X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) และ atomic force microscopy (AFM) ในการตรวจสอบพื้นผิวของ E–glass fibers [17]

2.4.3 จมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Nose) และ ระบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligent)

จมูกของมนุษย์นับว่าเป็นเครื่องมือในการตรวจวัดในอันดับต้นๆที่ใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อประเมินคุณภาพของกลิ่น เช่น กลิ่นจากน้ำหอม เป็นต้น ซึ่งการาทำเช่นนี้จะต้องลงทุนเป็นอย่างมากเพราะว่ามนุษย์ที่เชี่ยวชาญในการดมกลิ่นนั้นจะสามารถดมกลิ่นในเพียงในช่วงเวลาอันสั้นเท่านั้น ดังนั้นจึงเกิดต้องการเป็นอย่างมากสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถเรียนแบบประสาทการรับรู้กลิ่นของมนุษย์ที่ช่วยลดต้นทุนและให้ข้อมูลของกลิ่นได้โดยในปี ค.ศ. 1961 จึงเกิดจมูกอิเล็กทรอนิกส์ขั้นมาเป็นครั้งแรก [18] [19] โดยมีการรายงานโดย Wilkens และ Hatman ในปี ค.ศ. 1964 [20]

ซึ่งในการพัฒนาของจมูกอิเล็กทรอนิกส์ต่อมีการพยายามที่นำเอาไปใช้งานทางด้านเคมีดังในปี ค.ศ. 2000 Yu Lu และคณะนักวิจัยของพวกเขาได้รายงานการทดลองเกี่ยวกับเครือข่ายประสาทเทียมเชิงปริมาณ Artificial Neural Network (ANN) เพื่อใช้ในงานทางด้านจมูกอิเล็กทรอนิกส์ โดยการนำ ANN มาประยุกค์ใช้กับวิธีการพื้นฐานการวิเคราะห์ทางเคมีจึงเกิดา RE-ANN (Relative Error Artificial Neural Network) ขั้นมา [21] และ ในอีก 2 ปีต่อมา ค.ศ. 2002 L. Carmel และคณะนักวิจัยของพวกทดลองเกี่ยวกับจมูกอิเล็คทรอนิคส์โดยใช้ Hopfield algorithm หรือ Hopfield-network (HN) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ในการตรวจสอบความเข้มข้นของสารเคมีได้ [22] ต่อมาจากปัญหา

ของการใช้งานในจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นคือสัญญาณที่ได้จากจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่คนละเครื่องกันสัญญาณที่ได้จะไม่เท่ากันดังนั้นในปี ค.ศ. 2015 J. Fonollosa และคณะนักวิจัยของพวกเขาได้รายงานกล่าวถึงการทดลองวิธีการถ่ายโอนข้อมูลโดยมีการสร้างชุดข้อมูลขึ้นมาเพื่อนำมาใช้กับแผงวงจรที่แตกต่างเพื่อใช้ตรวจสอบสารละลายที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกันโดยในแต่ละแผงวงจรจะประกอบด้วยเซ็นเซอร์ที่ทำมาจากโลหะออกไซด์ (Metal oxide sensor) 8 ตัว และนำข้อมูลที่ได้จากแต่ละแผงวงจรนำมาวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลอง Support Vector Regression จากผลการทดลองเมื่อการทำนายเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องจะน้อยลงถ้าหากนำแบบจำลองที่ฝึกสอนมาแล้วแล้วนำไปใช้กับแผงวงจรที่ยังไม่เคยถูกฝึกสอน [23]

จากปัญหาการทำนายที่ได้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ต่ำจึงนำสู่การวิจัยเพื่อพัฒนาให้ระบบปัญญาประดิษฐ์มีการทำนายที่แม่นยำมากยิ่งขึ้นจากงานวิจัยในปี ค.ศ. 2017 Jie He และคณะนักวิจัยของพวกเขาได้ทดลองเพื่อหาว่าแบบจำลองใดของ Machine learning (ML) ที่สามารถช่วยใช้ในการทำนายให้กับจมูกอิเล็กทรอนิกส์ให้มีความแม่นยำที่มากขึ้นโดยในการทดลองใช้เซ็นเซอร์จำนวน 4 ตัวอันได้แก่ QS-01, TGS2600, TGS2602, และ SHT10 โดยจะนำข้อมูลที่ได้นำไปทดลองกับระบบปัญญาประดิษฐ์อันได้แก่ระบบโครงค่ายประสาทเทียม Back propagation neural network (BP), Support vector machine (SVM), Radial basis function (RBF), Learning vector quantization (LVQ) จากผลการทดลองสรุปผลไว้ว่าแบบจำลองที่ใช้ทำนายแม่นยำที่สุดคือแบบจำลอง SVM [4]

ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมานักวิจัยจะทดลองหรือสร้างจมูกอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นมาจากเซ็นเซอร์ที่มากกว่า 1 ชนิดดังนั้นต่อมาในปี ค.ศ. 2018 Matteo Tonezzera และคณะนักวิจัยของพวกเขาจึงทำการทดลองโดยการใช้ออกไซด์ของนิกเกิลวัสดุเพียงชนิดเดียวเพื่อนำมาใช้ในการตรวจสอบแก๊สพิษที่หลายชนิดโดยการให้ความร้อนที่แตกต่างกันออกไปโดยอาศัยหลักการการของ Thermal fingerprints [24] และในปีเดียวกันการพัฒนาของจมูกอิเล็กทรอนิกส์นั้นไม่ได้มีเพียงแต่การพัฒนาแต่ขั้นตอนวิธี (algorithm) ของระบบปัญญาประดิษฐ์แต่เพียงอย่างเดียวแต่มีการพัฒนาในส่วนของวัสดุตรวจสอบแก๊ส (Gas sensing material) ในเซ็นเซอร์แก๊สควบคู่ไปด้วย ดังตัวอย่างงานวิจัยในปี ค.ศ. 2018 โดย Jiaqi Chen และคณะนักวิจัยของพวกเขาได้รายงานการการนำเสนอระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพสูงที่ประกอบด้วย Tin oxide nanotube sensor array ที่ถูกสร้างขั้นมาใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกับ Learning vector quantization (LVQ) [25]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับฝึกพัฒนาสร้างวงจรวัดและควบคุมเซ็นเซอร์ได้แก่ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino), เซ็นเซอร์ DHT11, เซ็นเซอร์แก๊สและตัวต้านทาน

3.1.2 บารอมิเตอร์ 1 อัน

3.1.3 อุปกรณ์เสริมสำหรับวัดแก๊ส

3.1.4.1 มิเตอร์วัดอัตราการไหลของแก๊ส (Rotameter) รุ่น LZB-3 0.03 – 0.3 ลิตรต่อนาที บริษัท ZYIA จำนวน 1 ตัว

3.1.4.2 มิเตอร์วัดอัตราการไหลของแก๊ส (Rotameter) LZM-4T 0.6 – 6 ลิตรต่อนาที บริษัท ZYIA จำนวน 2 ตัว

3.1.4 ภาชนะเตรียมไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds) ขนาด 64 ลิตร

รูปที่ 3.1 ภาชนะเตรียมไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

3.1.5 เครื่องสอบเทียบและเจือจางแก๊สมาตราฐาน (Dilution calibrator – model จากบริษัท Teledyne Technology, Incorporated รุ่น T700) ที่ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental research and training centre ERTC)

3.1.6 เครื่องกำเนิดอากาศบริสุทธิ์ (Zero air generator รุ่น 701 จากบริษัท Teledyne Technology, Incorporated) ของศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental research and training centre; ERTC)

3.1.7 เครื่องควบคุมการบันทึกข้อมูลสัญญาณแบบไร้สาย (Wireless data logger) ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พัฒนาโดยความร่วมมือระหว่างวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังกับคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.1.8 ภาชนะสำหรับติดตั้งวงจรเซ็นเซอร์เข้ากับท่อนำแก๊สซึ่งทำจากวัสดุเทฟลอนและเหล็กกล้าไร้สนิม (PTFE and Stainless steel gas chamber) ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พัฒนาโดยความร่วมมือระหว่างวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังกับคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.1.9 ถังแก๊สมาตราฐาน (CO 1 ถัง NO_2 1 ถัง SO_2 1 ถัง)

3.10 Laser marker IPG 20W โดยความร่วมมือจากร้าน Nakran Laser

3.2 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์

3.2.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope; AFM) ยี่ห้อ Nanosurf รุ่น CoreAFM ที่บริษัท แอลเอ็มเอส อินสทรูเม้นท์ (LMS instrument)

3.3 การประยุกต์ใช้ไมโครคอลโทรเลอร์กับไพทอน(v3.7.0:1bf9cc5093)เพื่อเก็บข้อมูล

3.3.1 ไพทอน (Python)

ไพทอนคือหนึ่งในภาษาคอมพิวเตอร์ที่จัดอยู่ในโหมดภาษาระดับสูงและเป็นภาษาสคริปต์ สามารถทำงานบนระบบปฏิบัติการยูนิกซ์, ลินุกซ์, และผ่านระบบ en:Windows Script Host ไวยากรณ์ที่ใช้จะมีรูปแบบที่สั้นกระชับจะใช้การแบ่งบล็อกโดยการใช้ย่อหน้าแทนไพทอนเป็นภาษากาว (Glue Language) ได้อย่างดีเนื่องจากสามารถเรียกใช้ภาษาโปรแกรมอื่น ๆ ได้หลายภาษา ทำให้เหมาะที่จะใช้เขียนเพื่อประสานงานโปรแกรมที่เขียนในภาษาต่างกันได้โดยในงานวิจัยนี้คณะนักวิจัยได้เลือกภาษานี้เพื่อนำมาใช้ในการเขียนโปรแกรมปัญญาประดิษฐ์ (AI)

3.3.1.1 วิธีการใช้งาน

นำข้อมูลที่ได้มาจากไฟล์ในข้อ 2.3.4.2 ข้อที่ 6 ที่เป็น Text file นำไป save as ให้เป็น .csv โดยภายในไฟล์นั้นจะถูกแบ่งเป็นสองไฟล์ตามหลักการของ Holdout method โดยในแต่ละไฟล์มีลักษณะของการเตรียมข้อมู,ไว้ดังดังนี้

263	0
260	0
250	0
235	0
223	0
210	0
208	0
199	0

รูปที่ 3.2 รูปแบบการจัดเก็บไฟล์ภายในไฟล์ข้อมูลชุดฝึกสอน class 0

ให้ตัดเอาข้อมูลของเวลาออกไปให้เหลือแต่หลักของข้อมูลหลังจากนั้นให้ระบุ class เอาไว้ในอีกหลัก เช่นในตัวอย่างนี้กำหนดให้ ethanol ความเข้มข้น 70% v/v เป็น class 0 หลังจากนำข้อมูลที่ได้มาเรียงแล้วให้นำข้อมูลของอีกตัวอย่างมาเรียงแบบเดิมต่อหลักต่อไป

252	0
245	0
223	0
452	1
425	1
450	1
448	1
469	1

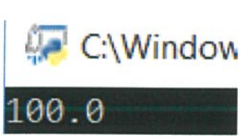
รูปที่ 3.3 รูปแบบการจัดเก็บไฟล์ภายในไฟล์ข้อมูลชุดฝึกสอน class 1

จากรูปจะมีข้อมูลของ 2 ตัวอย่างอยู่ ซึ่งประกอบไปด้วย class 0 ตามที่ได้บอกไปและ class 1 ซึ่งเป็นข้อมูลของอากาศปกติ

452	1
425	1
450	1
448	1
469	1
452	1
425	1
450	1

รูปที่ 3.4 รูปแบบการจัดเก็บไฟล์ภายในไฟล์ข้อมูลชุดทดสอบ

ในส่วนนี้ให้ใส่ข้อมูลของตัวที่ต้องการจะทดสอบเข้าไปโดยใส่ไปให้มีแค่ข้อมูลและ class เท่านั้น โดย class อาจไม่ต้องใส่ให้ตรงชื่อ class จริงได้เพราะว่าไฟล์นี้จะถูกนำไปทำนายว่า ข้อมูลของไฟล์นี้เมื่อให้การประมวลผลของ SVM รู้จำแล้วจะทำนายให้ได้ class อะไรและผลที่ได้จากทำงานของโปรแกรม



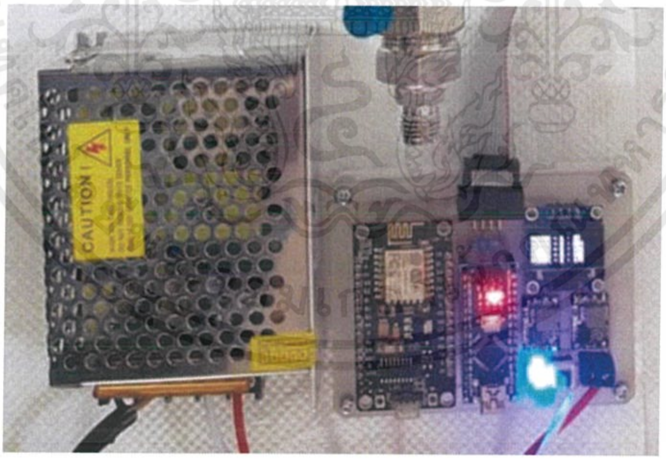
รูปที่ 3.5 ผลการทำนายของ SVM ในรูปแบบค่าความถูกต้อง

โดยค่า accuracy score จะแสดงอยู่มุมซ้ายว่าได้กี่เปอร์เซนต์ ซึ่งสามารถดูว่าการทำนายนั้นถูกต้องทุกตัวหรือไม่โดยการเปิดดูจาก Text file ในกรณีนี้การทำนายแสดง class 0 ทั้งหมดเพราะว่าตอนทดลองใช้ ethanol เป็นตัวทดลองดังนั้นผลที่ควรออกมาถ้าหาก SVM ทำนายถูกต้องก็ต้องให้ค่า เป็น class 0

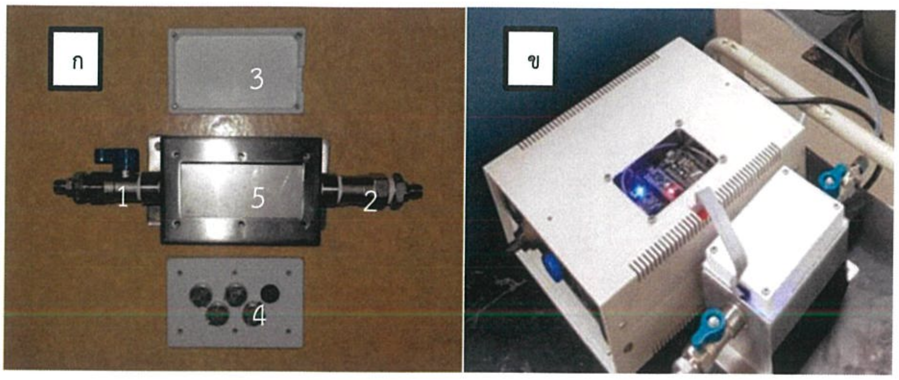
3.3.2 ระบบวัดและบันทึกข้อมูล (Data acquisition and control system)

ไมโครคอลโทรเลอร์ (อุปกรณ์ขนาดเล็กที่มีความสามารถคล้ายระบบคอมพิวเตอร์) ซึ่งรวมเอาหน่วยความจำ, ซีพียู, และพอร์ต ไว้ในบอร์ดเดียวโดยในงานวิจัยนี้คณะนักวิจัยของวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังและคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้ประยุกต์มาใช้สำหรับควบคุมการวัดเครื่องควบคุมการบันทึกข้อมูลสัญญาณแบบไร้สาย (Wireless data logger) ดังรูปที่ 3.6

เครื่องควบคุมการบันทึกข้อมูลสัญญาณแบบไร้สายในรูปที่ 3.6 ถูกใช้สำหรับควบคุมวงจรวัดเซ็นเซอร์แก๊สที่ออกแบบไว้สำหรับต่อเข้ากับภาชนะและท่อนำแก็สดังรูปที่ 3.7 ข้อมูลที่วัดได้จะถูกบันทึกไว้ในกูเกิลไดรฟ์ (Google Drive) บนเซิร์ฟเวอร์ผ่านการสื่อสารไร้สายด้วยอุปกรณ์เชื่อมต่ออินเตอร์เน็ต (Wireless Internet Router)



รูปที่ 3.6 เครื่องควบคุมการบันทึกข้อมูลสัญญาณแบบไร้สาย



รูปที่ 3.7 การต่อวงจรเซ็นเซอร์เพื่อวัดแก๊สมาตราฐาน **ก.** ส่วนประกอบภาชนะต่อวงจรเซ็นเซอร์กับท่อนำแก๊ส 1) วาล์วควบคุมแก๊สเข้า 2) วาล์วควบคุมแก๊สออก 3) ฝาปิดทำจากวัสดุพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนหรือเทฟลอน (PTFE) ป้องกันวงจรการควบคุม 4) วงจรเซ็นเซอร์และฝาปิดทำจากวัสดุเทฟลอน 5) ภาชนะสำหรับติดตั้งวงจรเซ็นเซอร์เพื่อต่อเข้ากับท่อแก๊ส **ข.** การต่อเครื่องควบคุมการบันทึกข้อมูลสัญญาณแบบไร้สายเข้ากับวงจรเซ็นเซอร์และท่อแก๊ส

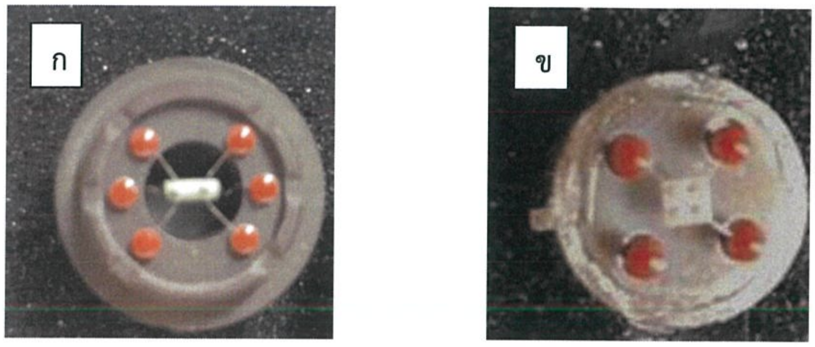
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การฝึกงานวิจัย

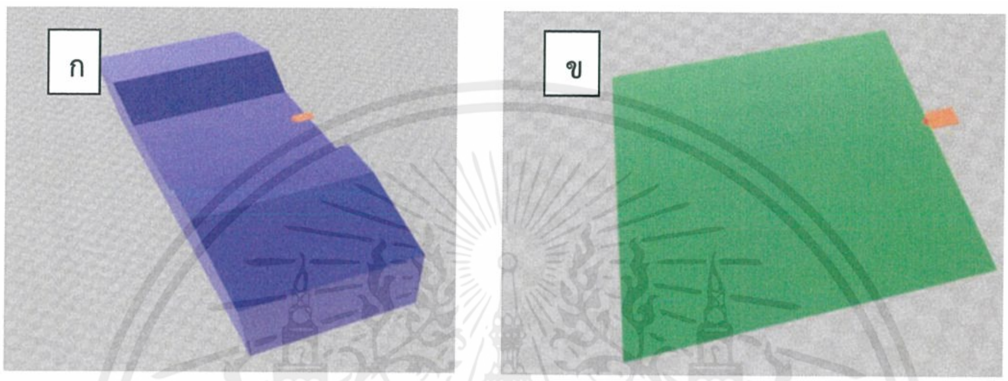
ช่วงเดือนมิถุนายนถึงกรกฎาคม พ.ศ. 2561 ฝึกการออกแบบการทดลองและฝึกเขียนโปรแกรมควบคุมวงจรวัดเซ็นเซอร์ โดยใช้เซ็นเซอร์แก๊ส TGS826 (รูปที่ 3.8) และบอร์ด Arduino และฝึกงานเป็นผู้ช่วยนักวิจัยในโครงการพัฒนาเครือข่ายจมูกอิเล็กทรอนิกส์ของวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีเพื่อทดสอบการทำงานของสถานีจมูกอิเล็กทรอนิกส์และการรู้จำกลิ่นสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยระบบปัญญาประดิษฐ์

3.4.2 การทดสอบเบื้องต้นเพื่อเลือกเซ็นเซอร์สำหรับงานวิจัย

ช่วงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2561 วางแผนการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของเซ็นเซอร์ โดยสร้างภาพสามมิติเพื่อจำลองขนาดของหัวเข็ม AFM เทียบกับพื้นผิวของเซ็นเซอร์สองรุ่น คือ เซ็นเซอร์ TGS826 และ TGS2600 (รูปที่ 3.8 - 3.9)



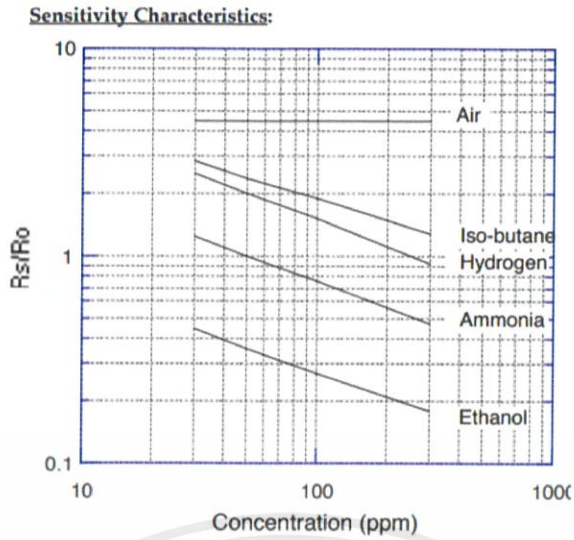
รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายเซ็นเซอร์ **ก.** TGS826 และ **ข.** TGS2600



รูปที่ 3.9 ภาพจำลองสามมิติของพื้นผิวเซ็นเซอร์ **ก.** TGS826 (สีน้ำเงิน) และ **ข.** TGS2600 (สีเขียว) เทียบกับขนาดของหัวเข็ม AFM รุ่น (สีส้ม)

จากภาพจำลองสามมิติในรูปที่ 3.9 พบว่าหัวเข็ม AFM มีขนาดเล็กพอที่จะสแกนภาพของพื้นผิวของเซ็นเซอร์ได้ แต่เมื่อได้ทำการทดลองกับเครื่อง AFM จริงพบว่าหัวเข็มไม่สามารถเข้าถึงบริเวณพื้นผิวกลางเซ็นเซอร์ TGS2600 ได้ จึงต้องเลือกเซ็นเซอร์ TGS826 สำหรับใช้ศึกษาวิจัยในการทดลองวัดแก๊สมาตราฐานและการตรวจสอบพื้นผิวด้วย AFM

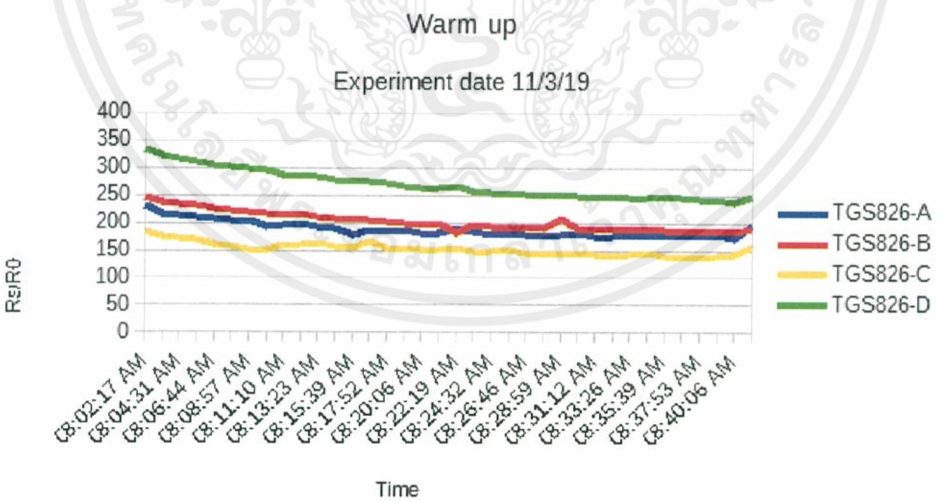
จากรูปที่ 3.10 เซ็นเซอร์ TGS826 มีการตอบสนองเชิงเส้นต่อไอระเหยของเอทานอลในช่วงความเข้มข้นระหว่าง 30 - 300 ppm ผู้ทดลองจึงใช้ไอระเหยของเอทานอลในการจำลองการใช้งานของเซ็นเซอร์



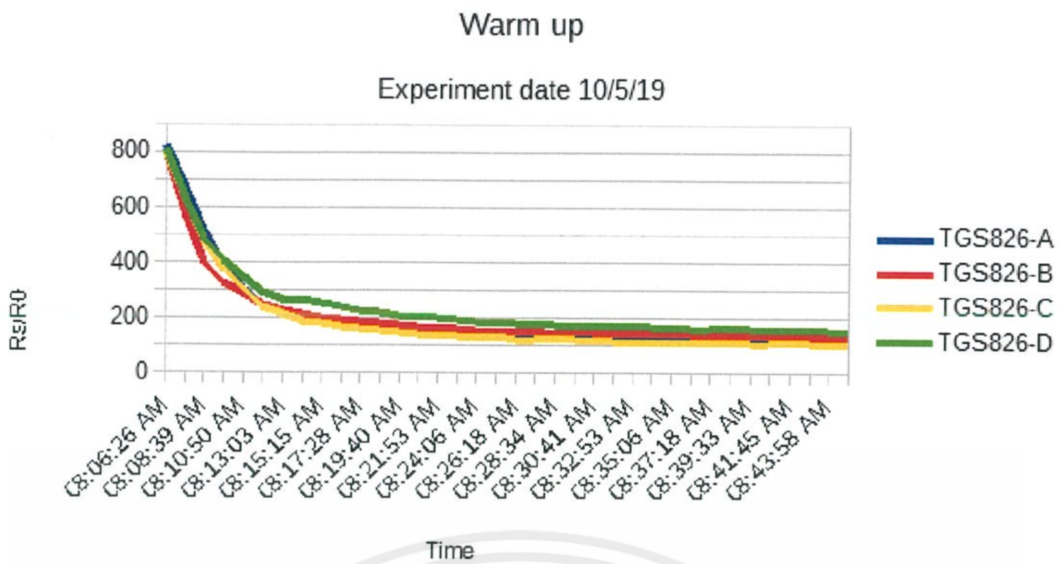
รูปที่ 3.10 กราฟการตอบสนองของเซ็นเซอร์ TGS826 จากคู่มือในเว็บไซต์ของบริษัท Figaro

3.4.3 การทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์ TGS826 ในอากาศปกติ

สืบเนื่องมาจากหัวข้อที่ 2.2 ก่อนทดลองวัดแก๊สมาตราฐานที่ศูนย์วิจัยและอบรมด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อให้เซ็นเซอร์มีการตอบสนองต่อแก๊สให้ได้มีประสิทธิภาพ ดังนั้นคณะผู้ทดลองจึงทดลองเพื่อหาช่วงเวลาในการให้ความร้อนกับเซ็นเซอร์โดยในการทดลองคณะผู้ทดลองได้ทำการวัดสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากอากาศปกติดังรูปที่ 3.11-3.12



รูปที่ 3.11 ค่าการตอบสนองของเซ็นเซอร์ต่ออากาศปกติในระหว่างช่วงให้ความร้อนก่อนใช้งานวันที่ 11 มีนาคม 2562



รูปที่ 3.12 ค่าการตอบสนองของเซ็นเซอร์ต่ออากาศปกติในระหว่างช่วงให้ความร้อนก่อนใช้งานวันที่ 10 พฤษภาคม 2562

จากการทดลองวัดในอากาศปกติดังรูปที่ 3.11-3.12 TGS826 มีการตอบสนองต่ออากาศปกติหลังจากจ่ายไฟให้กับเซ็นเซอร์ไปแล้วอย่างต่ำ 50 นาทีการตอบสนองจึงเริ่มคงตัวเป็นลักษณะของเส้นตรง

3.4.4 การสร้างสัญลักษณ์ลงบนพื้นผิวของเซ็นเซอร์ TGS826 โดยใช้เลเซอร์

นำเซ็นเซอร์ 5 ตัว ไปทำสัญลักษณ์เป็นรูปเส้นตรงยาว 100 um 2 เส้น วางขนานกันห่างกัน 100 um ด้วยการยิงเลเซอร์โดยใช้เครื่อง IPG 20W ด้วยกำลัง 50% ที่ร้าน Nakran Laser (รูปที่ 3.13)

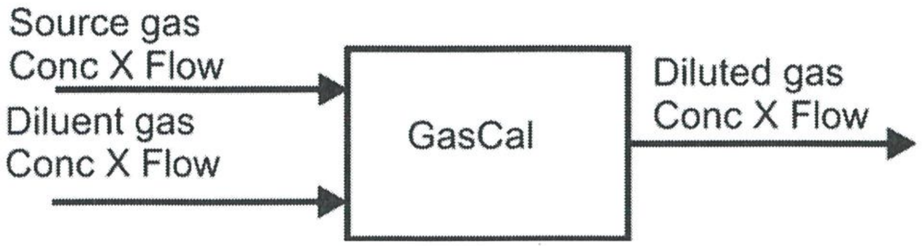
รูปที่ 3.13 ห้องสำหรับทำเลเซอร์มาร์คกิ้งที่ร้าน Nakran Laser

3.4.5 การทดลองวัดเซ็นเซอร์ด้วยแก๊สมาตราฐาน

ทำการทดลองวัดแก๊สมาตตราฐานที่ห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยและฝึกอมรมด้านสิ่งแวดล้อมร่วมกับนักวิจัยของห้องปฏิบัติการ (ดร.ศิรพงษ์ สุขทวี หัวหน้าห้องปฏิบัติการและ คุณนิรัน เปี่ยมใย เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัย) โดยใช้เครื่อง Dilution Calibrator รุ่น T700 และเครื่อง Zero Air Module 701 โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.4.5.1 ใส่วงจรวัดเซ็นเซอร์ TGS826 ในภาชนะเทฟลอนและต่อสายสัญญาณจากวงจรวัดเข้ากับเครื่องควบคุมการบันทึกข้อมูลสัญญาณแบบไร้สาย

3.4.5.2 ต่อท่อนำแก๊สที่ช่อง CAL OUT ของเครื่อง Dilution Calibrator รุ่น T700 หลังจากนั้นให้นำท่อนำแก๊สต่อกับขาเข้าของภาชนะเทฟลอนดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 โดยในระหว่างทดลองสามารถคำนวณความเข้มข้นของแก๊สมาตราฐานได้จากรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ทฤษฎีการเจือจางสาร (Dilution Theory) [27]

การคำนวณค่าความเข้มข้นของแก๊สมาตราฐานที่เจือจางโดยเครื่อง Dilution Calibrator เริ่มจาก สมการการอนุรักษ์มวล

$$m_{in} = m_{out} \tag{1}$$

$$C_{in}V_{in} = C_{out}V_{out} \tag{2}$$

โดยที่ m_{in} คือ มวลแก็สขาเข้า

m_{out} คือ มวลแก็สขาออก

C_{in} คือ ความเข้มข้นของแก๊สก่อนเจือจาง

C_{out} คือ ความเข้มข้นของแก๊สเมื่อถูกเจือจาง

V_{in} คือ ปริมาตรของแก็สขาเข้า

V_{out} คือ ปริมาตรของแก็สขาออก

จะได้ว่า

$$C_sV_s + C_dV_d = C_{out}V_{out} \tag{3}$$

โดยที่ C_d คือ ความเข้มข้นของแก็สจากเครื่องกำเนิดอากาศบริสุทธิ์ (Diluent gas)
และ C_s คือ ความเข้มข้นของแก็สมาตรฐาน (Source gas) (CO = 3030 ppm, NOx = 44.5 ppb, SOx = 45.5 ppb)

เนื่องจาก C_d มีค่าใกล้เคียงศูนย์ จะได้ว่า

$$C_sQ_s = C_{out}Q_{out} \tag{4}$$

เมื่อ $Q_d = dV_d/dt$ คือ อัตราการไหลของแก็สจากเครื่องกำเนิดอากาศบริสุทธิ์

และ $Q_s = dV_s/dt$ คือ อัตราการไหลของแก๊สมาตราฐาน

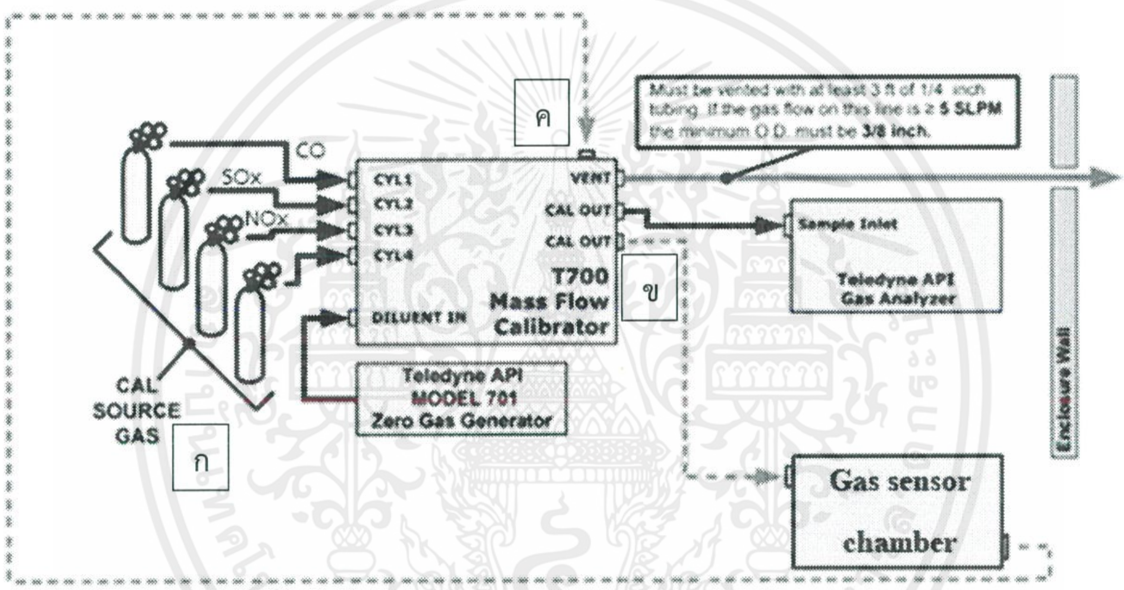
เนื่องจาก $Q_{out} = Q_s + Q_d$ สมการที่ (4) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$C_s Q_s = C_{out}(Q_s + Q_d) \qquad (5)$$

จะได้สมการสำหรับคำนวณค่าความเข้มข้นของแก๊สเมื่อถูกเจือจางดังนี้

$$C_{out} = C_s\left(\frac{Q_s}{Q_s+Q_d}\right) \qquad (6)$$

3.4.5.3 นำท่อนำแก๊สที่ต่ออยู่กับขาออกจากภาชนะเทฟลอนต่อกับช่อง CAL GAS Vent ของเครื่อง Dilution Calibrator รุ่น T700 ดังรูปที่ 3.14 และ 3.16



รูปที่ 3.15 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์การวัดแก๊สมาตราฐาน [26] **ก.** CAL SOURCE GAS คือ ถังแก๊สมาตราฐาน **ข.** CAL OUT คือ ทางออกของแก๊สมาตราฐานที่เจือจางแล้วและถูกส่งไปยังภาชนะเทฟลอนขาเข้า **ค.** ช่องทางนำแก๊สของเสียที่ใช้จากการทดลองนำไปปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

3.4.5.2 เริ่มการทดลองโดยมีระยะเวลาและลำดับการวัดแก๊สมาตราฐานตามช่วงเวลาดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาและลำดับขั้นตอนการวัดแก๊สมาตราฐาน

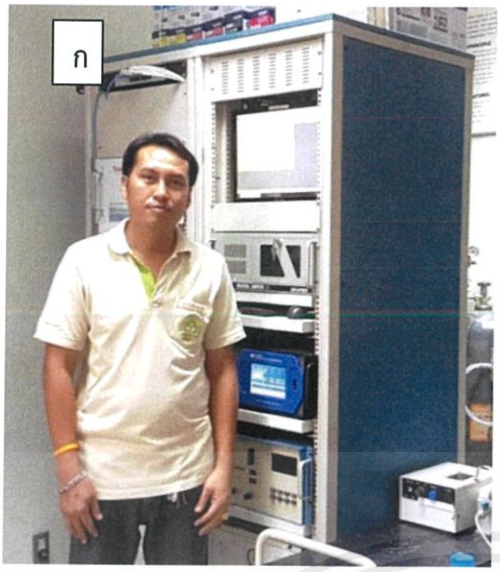
กิจกรรม	ช่วงเวลาการทดลองวัดแก๊สมาตราฐาน				
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
Warm up	10.10–10.40	9.03-10.04	7.53-8.46	8.36-9.19	8.06-9.02
Air zero	10.41-10.42	10.05-10.55	8.47-9.37	9.20-10.10	9.03-9.53
CO	10.43-10.57	10.56-11.45	9.39-10.34	10.14-11.04	9.56-10.46
Air zero	10.58-11.19	11.46-13.56	10.35-10.45	11.05-11.15	10.47-10.48
Mixed NOx	16.07-17.07	13.57-14.45	10.48-11.38	11.16-12.06	12.34-13.25
Air zero	15.47-16.09	14.46-14.50	11.40-13.02	12.07-12.59	12.15-15.33
Mixed SOx	14.46-15.44	14.51-15.44	13.03-13.53	13.00-13.50	10.49-11.40
Purg	17.08-17.14	15.45-15.57	13.56-14.03	13.53-14.05	13.27-13.35

หมายเหตุ CO มีความเข้มข้น 45 ppm

NOx และ SOx มีความเข้มข้น 450 ppb

Purg คือ การล้างภาชนะเทฟลอนด้วยอากาศบริสุทธิ์ (Air zero) จากเครื่องสอบเทียบและเจือจางแก๊สมาตราฐานโดยใช้ช่องกำจัดของเสีย (Vent)

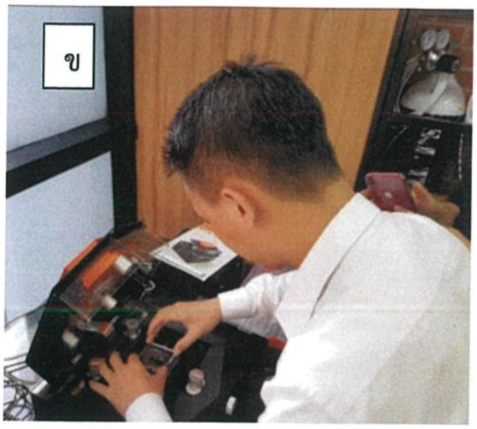
3.4.5.3 หลังจากการล้างภาชนะเทฟลอนด้วยอากาศบริสุทธิ์ (Purg) ผู้ทดลองบันทึกข้อมูลและปิดการทำงานของระบบวัด



รูปที่ 3.16 การทดลองวัดแก๊สมาตราฐาน **ก.** ห้องปฏิบัติการตรวจวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศและเจ้าหน้าที่ควบคุมการใช้เครื่องสอบเทียบและเจือจางแก๊สมาตราฐาน (คุณนิรัน เปี่ยมใย) ศูนย์วิจัยและฝึกอมรมด้านสิ่งแวดล้อม **ข.**การต่อเครื่องควบคุมการบันทึกข้อมูลสัญญาณแบบไร้สายเข้ากับวงจรเซ็นเซอร์และท่อแก๊ส

3.4.6 การตรวจสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

นำเซ็นเซอร์ไปวัดสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม รุ่น CoreAFM ที่บริษัท แอลเอ็มเอส อินสทรูเม้นต์ AFM (รูปที่ 3.13) โหมด Tapping โดยเข็มที่ใช้วัดคือ Tap190Al-G ทำการตรวจสภาพพื้นผิวเซ็นเซอร์ในสภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศปกติขนาดพื้นที่ที่ใช้ในการวัด 100 um x 100 um มีทิศทางของการสแกนจากล่างขึ้นบนมีการสแกนทั้งสิ้น 256 จุดและ 256 เส้นโดยในแต่ละเส้นจะใช้เวลาในการสแกน 780 ms โดยมีขั้นตอนในการปฏิบัติดังนี้ นำแท่นวางชิ้นงานติดตั้งไปยังฐานของ AFM หลังจากนั้นเปิดฝาครอบเซ็นเซอร์ออกแล้วนำเซ็นเซอร์ไปวางบนแท่นวางชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.17 ตั้งค่าเลเซอร์ของเครื่องและจากโปรแกรม ตั้งค่าตัวแปร Set point, P-gain, I-gain, D-gain, Tip voltage, และ Vibration amplitude โดยตัวแปรที่ใช้ในแต่การทดลองปรากฎดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.17 การตรวจสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมที่บริษัท แอลเอมเอส อินสทรูเม้นต์ **ก.** การสอนการใช้งานกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมก่อนปฏิบัติการทดลอง **ข.** การปฏิบัติการทดลองด้วยตรวจสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองวัดพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

TGS826	เดือน	Approach					
		Setpoint (%)	P-gain	I-gain	D-gain	Tip Voltage (V)	Vibration ampl. (V)
A	มี.ค.	80	700	4500	700	1.3	4.5
	เม.ย.	80	700	4500	700	1.3	4.5
	พ.ค.	80	700	4500	700	1.3	4.5
B	มี.ค.	80	700	4500	700	1.3	4.5
	เม.ย.	80	700	7000	700	1.3	8
	พ.ค.	80	700	7000	700	1.3	8
C	มี.ค.	80	700	5500	700	1.3	5.5
	เม.ย.	80	700	5500	700	1.3	5.5
	พ.ค.	80	700	5500	700	1.3	7
D	มี.ค.	80	700	6000	700	1.3	6
	เม.ย.	70	800	7000	800	1.3	9
	พ.ค.	70	800	7000	800	1.3	9

หมายเหตุ ตัวเลขที่สีเหมือนกันคือใช้เข็มอันเดียวกันในการวัด

3.4.7 การตรวจวัดด้วย FTIR

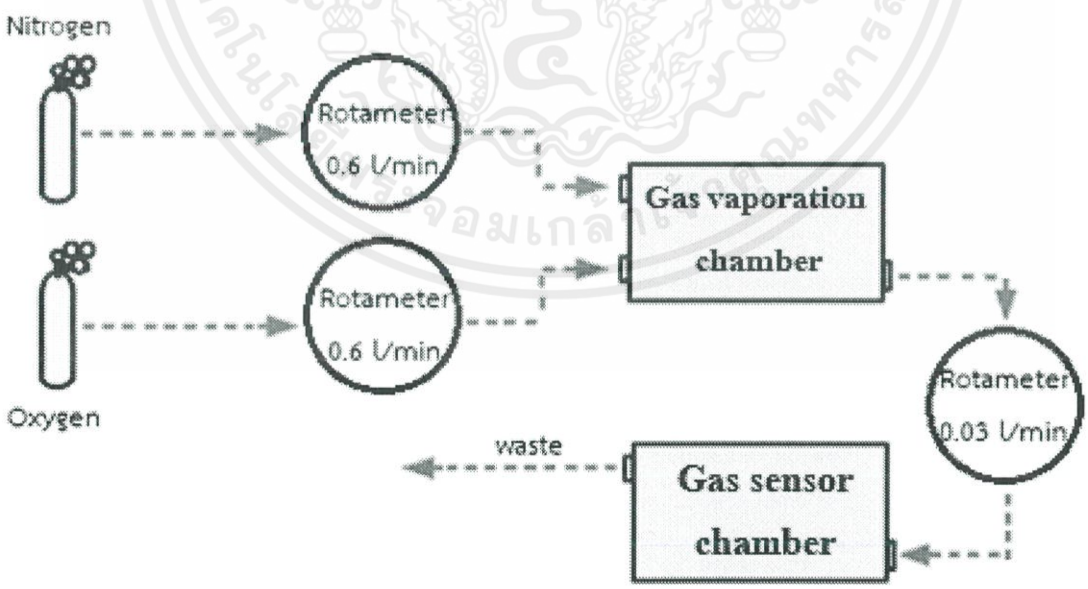
นำเซ็นเซอร์ออกมาจากภาชนะบรรจุแก๊ส 1 ตัว (ในการทดลองเลือก TGS826-E) เพื่อนำไปทำลาย แล้วนำไปวัด FTIR แต่จากการทดลองพบว่าจำนวนตัวอย่างที่ได้ออกมาน้อยมากและพอนำไปวัดไม่สามารถให้ข้อมูลของตัวอย่างได้ดังนั้นในการทดลองจึงเหลือเซ็นเซอร์เพียง 4 ตัว

3.4.8 การทดลองการจำลองการใช้งานจริงของเซ็นเซอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีสารระเหย

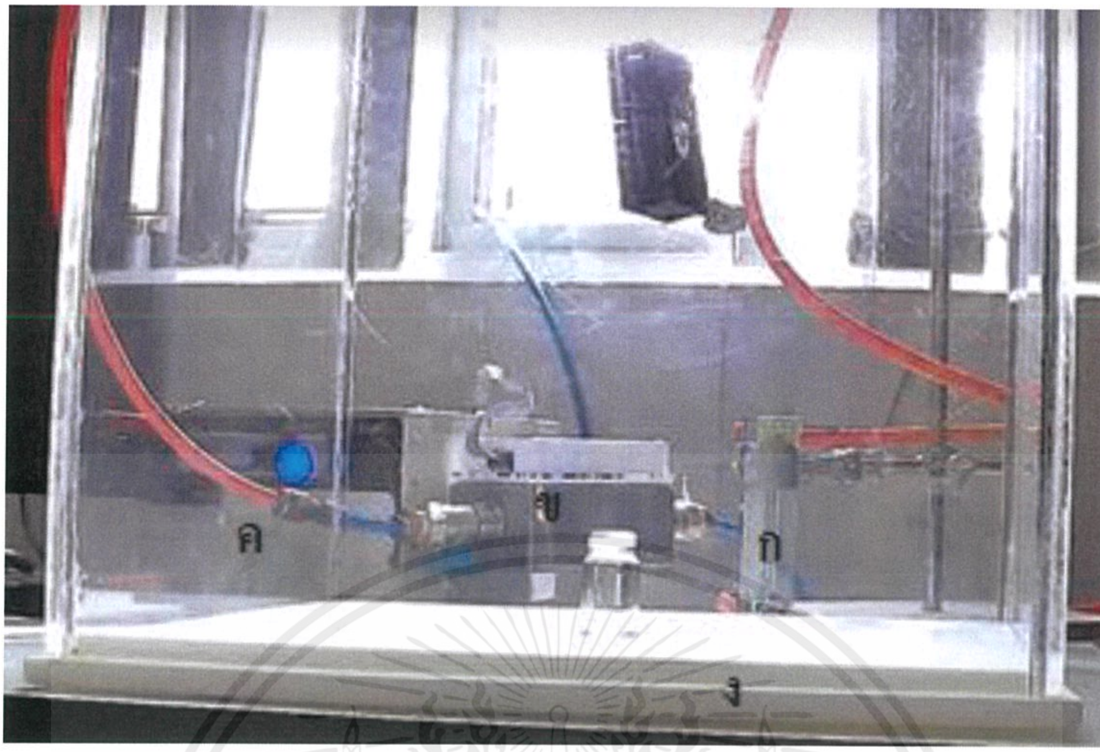
3.4.8.1 นำเซ็นเซอร์ทั้ง 4 ตัวใส่ในภาชนะบรรจุแก๊สแบบเทฟลอนและต่อสายสัญญาณเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องควบคุมการบันทึกข้อมูลสัญญาณแบบไร้สาย

3.4.8.2 เตรียมสารระเหยเอทานอล 90% ในภาชนะบรรจุแก๊สสำหรับใช้เตรียมสารระเหย

3.4.8.3. ให้แก๊สออกซิเจนกับแก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพาหะนำพาให้ไอระเหยของเอทานอลไปยังภาชนะบรรจุแก๊สแบบเทฟลอนที่ไว้เซ็นเซอร์ด้วยอัตราส่วน 2:1 โดยที่ท่อขาออกของภาชนะบรรจุแก๊สสำหรับเตรียมสารระเหยใช้ rotameter ควบคุมด้วยอัตราการไหล 0.6 ลิตรต่อนาที ใช้ภาษาไทย ทั้งแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนส่วนท่อขาเข้าไปยังภาชนะบรรจุแก๊สแบบเทฟลอนที่ใส่เซ็นเซอร์ใช้ rotameter ควบคุมด้วยอัตราการไหล 0.03 ลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 3.18-3.19



รูปที่ 3.18 แผนผังการทดลองวัดเซ็นเซอร์ TGS826 ด้วยไอระเหยเอทานอล



รูปที่ 3.19 การจำลองการใช้งานจริงโดยนำเซ็นเซอร์ไปวัดในภาชนะบรรจุเซ็นเซอร์แก๊สในสภาวะที่มีไอระเหยของเอทานอล **ก.** เครื่องมือวัดอัตราการไหลของอากาศหรือของเหลว (Rotameter) **ข.** ภาชนะบรรจุเซ็นเซอร์แก๊ส **ค.** เครื่องควบคุมการบันทึกข้อมูลสัญญาณแบบไร้สาย **ง.** ภาชนะเตรียมไอระเหย

บทที่ 4

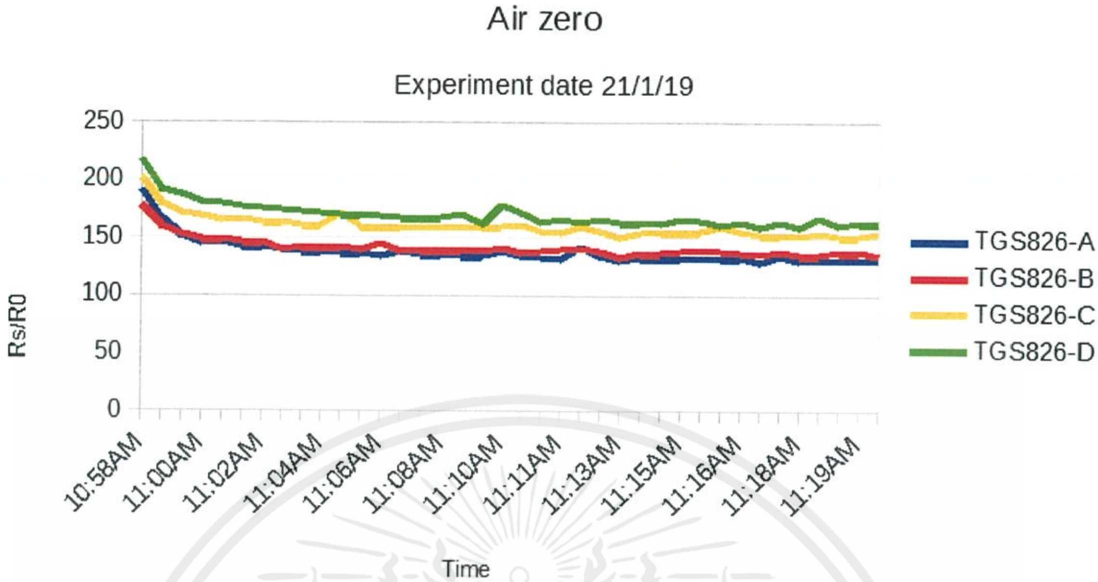
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดลองวัดแก๊สมาตราฐานด้วยเซ็นเซอร์ TGS826 ก่อนและหลังทำสัญลักษณ์ด้วยเลเซอร์

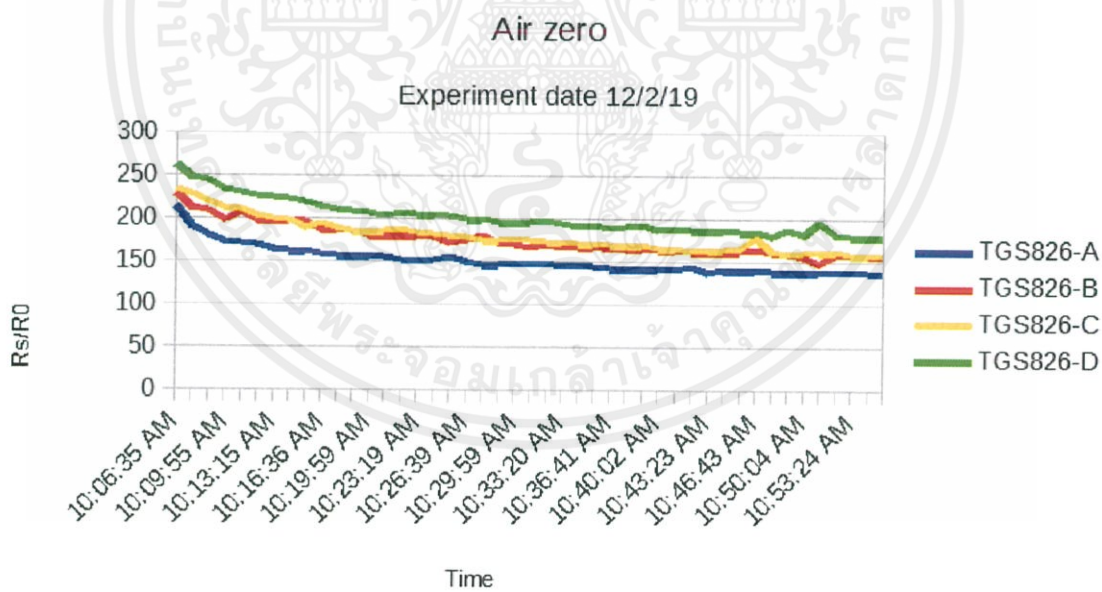
จากการทดลองวัดแก๊สมาตราฐานทั้ง 4 แก๊ส คือ อากาศบริสุทธิ์ (Air zero), CO, SOx, และ NOx ให้กับเซ็นเซอร์ TGS826 ทั้ง 4 เซ็นเซอร์ โดยถูกตั้งค่าความเข้มข้นและอัตราการไหลขาเข้าและขาออกจากเครื่องไปยังขาเข้าของภาชนะบรรจุแก๊สแบบเทฟลอนที่มีเซ็นเซอร์อยู่โดยเครื่อง Dilute calibrator – model T700 และอากาศปกติที่ผ่านกระบวนการกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์และกลุ่มแก๊สที่ปนเปื้อนในอากาศออกไปแล้ว (Air zero) กรองโดยเครื่อง Zero air module model 701

ในกระบวนทดลองวัดแก๊สมาตราฐานนั้นในทุกๆครั้งก่อนที่ผู้ทดลองจะเริ่มทดลองจะต้องเปิดให้ระบบวัดและบันทึกข้อมูลที่ใส่เซ็นเซอร์ลงไปข้างในภาชนะบรรจุแก๊สแล้วทำงานเป็นเวลา 50 นาที เพื่อให้ความร้อน (Warm up) กับเซ็นเซอร์เพื่อให้การตอบสนองของเซ็นเซอร์มีค่ามากขึ้นเมื่อนำไปใช้ในการวัดแก๊สมาตราฐานและในระหว่างการทดลองผู้ทดลองจะจดบันทึกข้อมูลจากเครื่อง Dilute calibrator – model T700

4.1.1 ผลการวัด Air zero

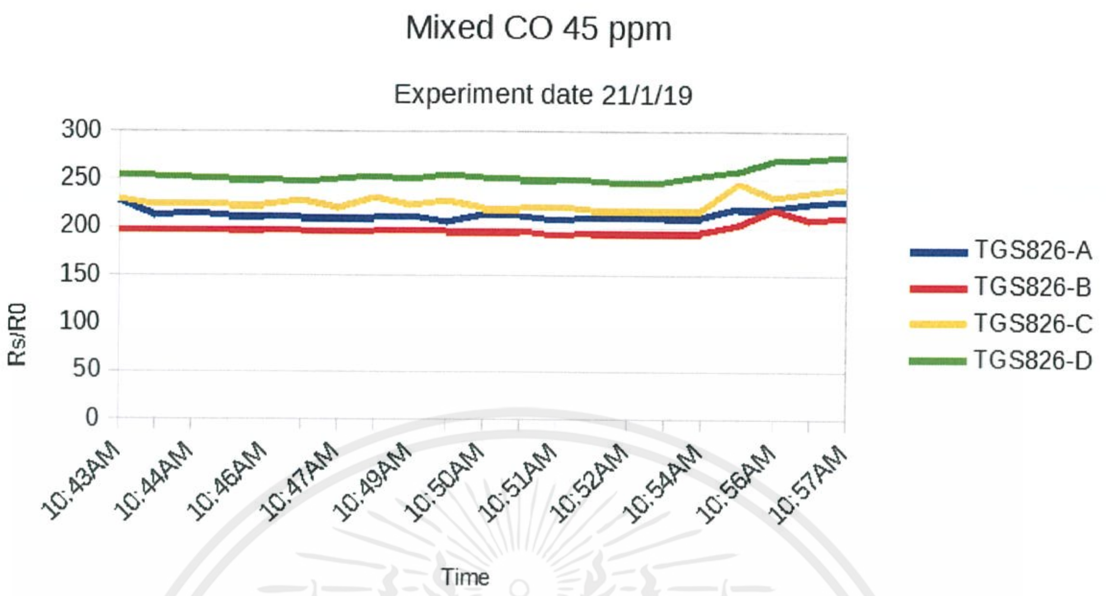


รูปที่ 4.1 สัญญาณจากการวัด Air zero หลังจากการ Warm up ไปแล้ว 50 นาที (ก่อนทำสัญลักษณ์)

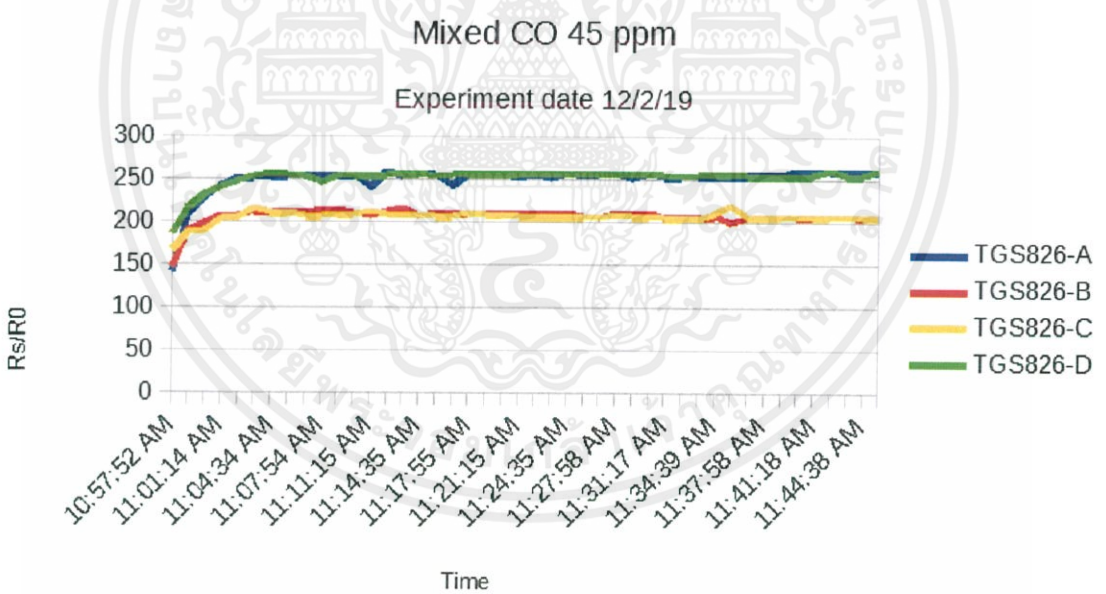


รูปที่ 4.2 ค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์ที่ได้หลังจากการ warm up อุปกรณ์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยทำการเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 50 นาที (หลังทำสัญลักษณ์)

4.1.2 ผลการวัด CO

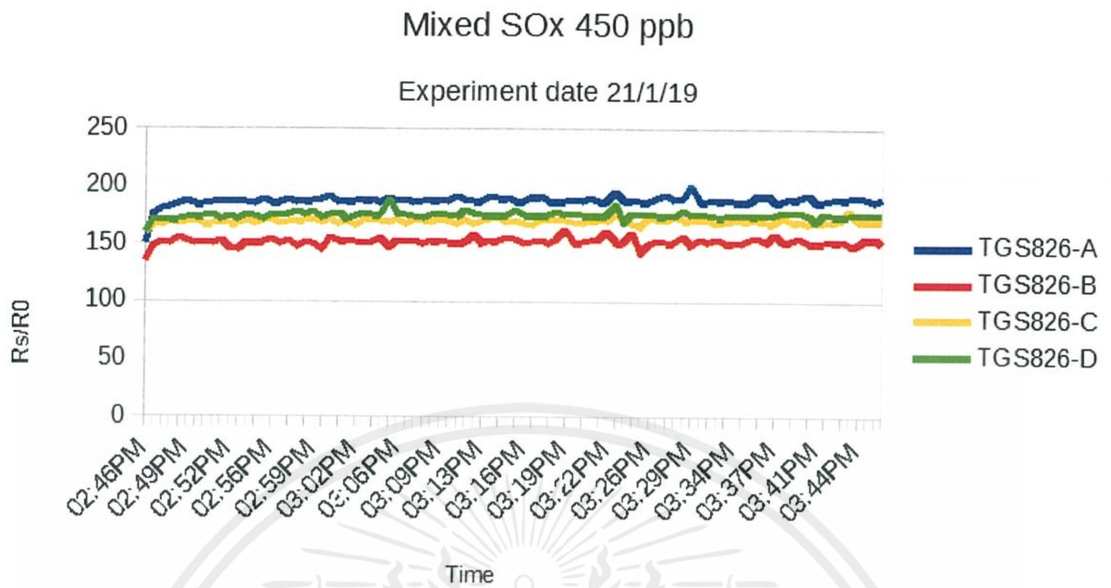


รูปที่ 4.3 สัญญาณจากการวัด CO หลังจากการวัด Air zero ไปแล้ว 50 นาที (ก่อนทำสัญลักษณ์)

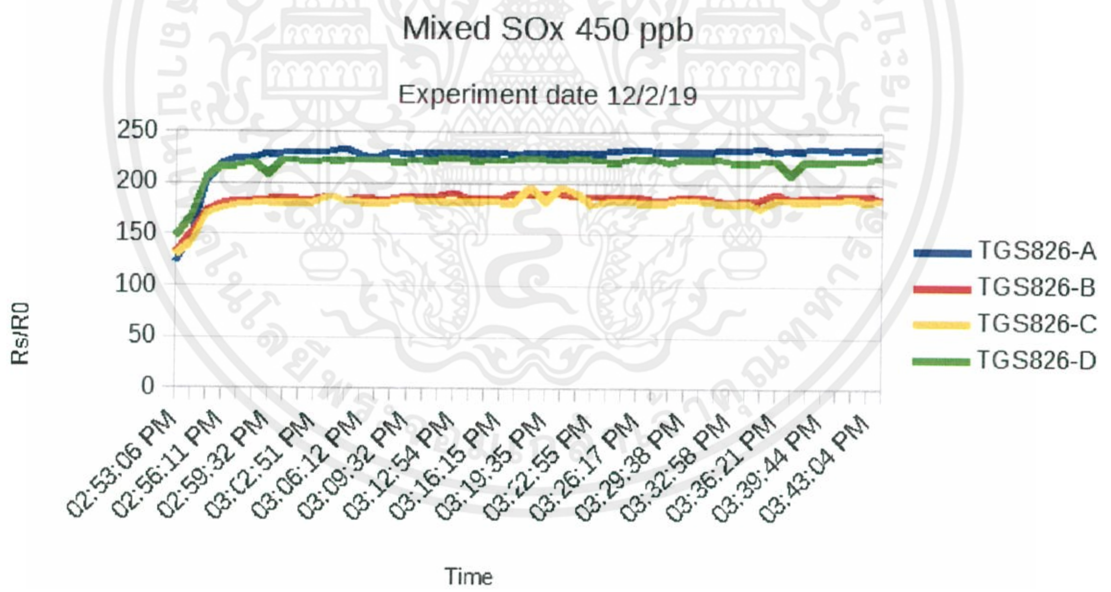


รูปที่ 4.4 ค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์ที่ได้หลังจากการวัด Air zero ไปแล้ว 10 นาที โดยจะทำการเก็บข้อมูลของ CO 45 ppm เป็นระยะเวลาอีก 50 นาที โดยที่ C_{out} เฉลี่ย คือ 44.96±0.09 ppm (หลังทำสัญลักษณ์)

4.1.3 ผลการวัด SOx

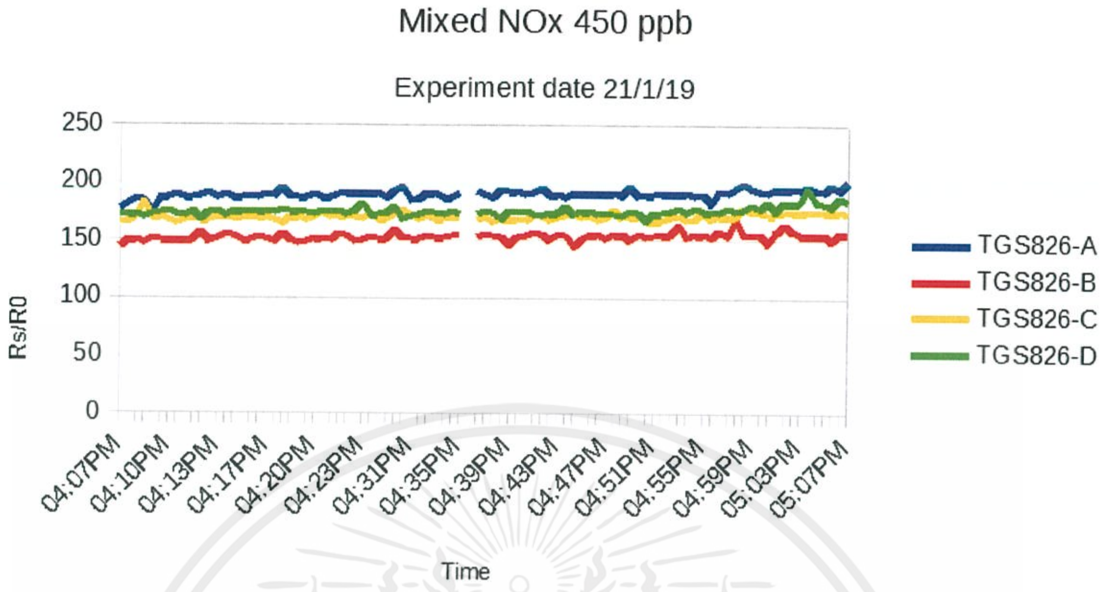


รูปที่ 4.5 สัญญาณจากการวัด SOx หลังจากการวัด CO ไปแล้ว 50 นาที (ก่อนทำสัญลักษณ์)

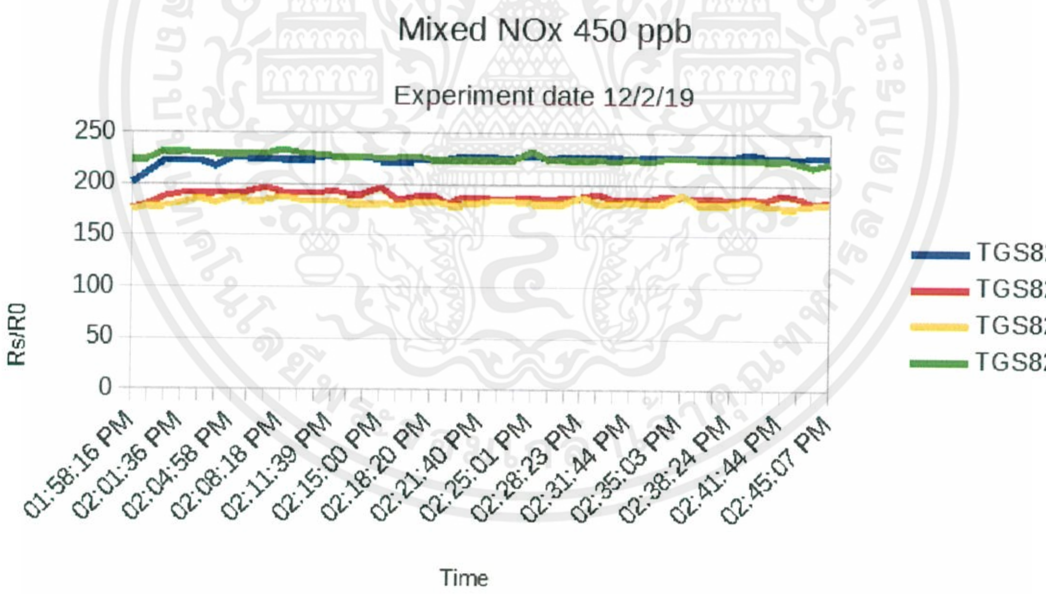


รูปที่ 4.6 ค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์ที่ได้หลังจากการวัด CO ไปแล้ว 10 นาที โดยจะทำการเก็บข้อมูลของ SOx 450 ppb เป็นระยะเวลาอีก 50 นาที โดยที่ C_{out} เฉลี่ย คือ 459.53±2.14 ppb (หลังทำสัญลักษณ์)

4.1.4 ผลการวัด NOx



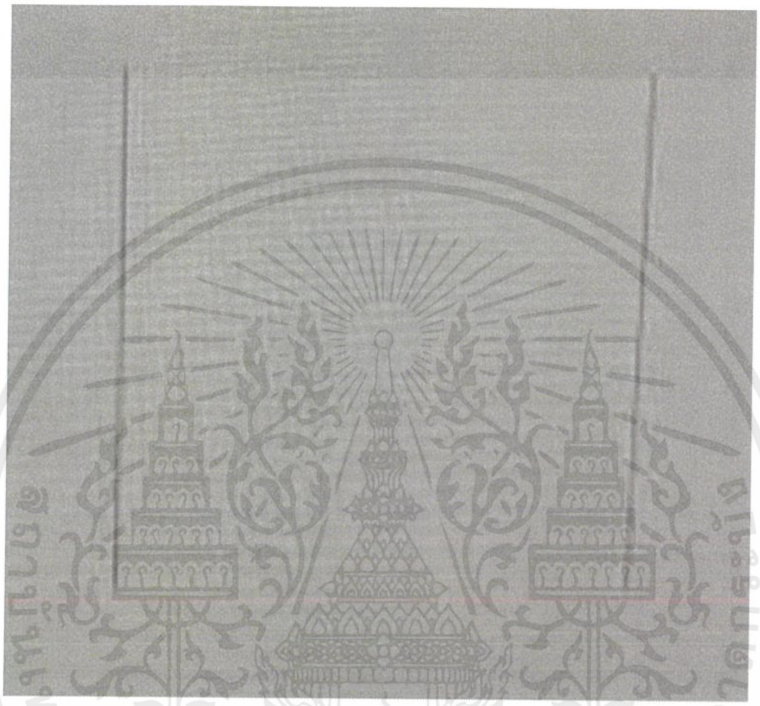
รูปที่ 4.7 สัญญาณจากการวัด NOx หลังจากการวัด SOx ไปแล้ว 50 นาที (ก่อนทำสัญลักษณ์)



รูปที่ 4.8 ค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์ที่ได้หลังจากการวัด CO ไปแล้ว 10 นาที โดยจะทำการเก็บข้อมูลของ NOx 450 ppb เป็นระยะเวลาอีก 50 นาที โดย C_{out} เฉลี่ย คือ 449.49±0.11 ppb (หลังทำสัญลักษณ์)

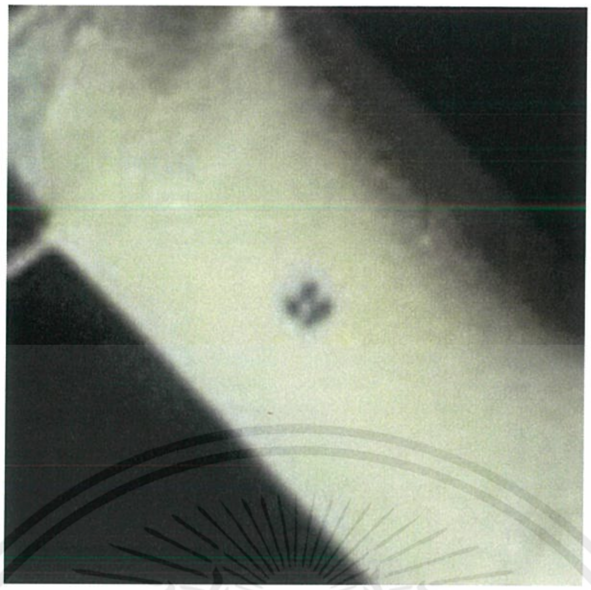
4.2 ภาพสัญลักษณ์หลังจากการยิงเลเซอร์

จากกราฟตั้งแต่รูปที่ 4.2 4.4 4.6 และ 4.8 เป็นสัญญาณของเซ็นเซอร์ที่วัดได้หลังจากนำเซ็นเซอร์ไปยิงด้วยเลเซอร์จากเครื่อง IPG 20W ใช้กำลังการยิงลงบนพื้นผิว 50% beam diameter 10 mm ที่ร้าน Nakarn โดยมีการยิงเลเซอร์ลงไปตามรูปที่ 4.10 เส้นสองเส้นจะมีขนาดความยาว 100 um และอยู่ห่างกัน 100 um โดยโปรแกรมที่ใช้ในการเขียน CAD ใช้โปรแกรม EzCad2.14.9



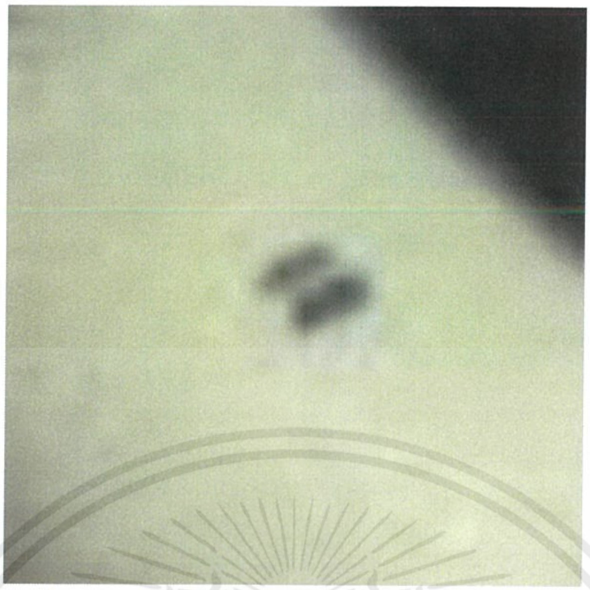
รูปที่ 4.9 ภาพลายที่ใช้ยิงเลเซอร์

โดยภาพต่อไปนี้คือภาพที่ได้จากการไปยิงเลเซอร์ลงบนพื้นผิวของเซ็นเซอร์ที่ร้าน Nakran Laser วันที่ 24 มกราคม



รูปที่ 4.9ก สัญลักษณ์ที่ได้จากการยิงเลเซอร์ลงบนพื้นผิว TGS826-A

รูปที่ 4.9ข สัญลักษณ์ที่ได้จากการยิงเลเซอร์ลงบนพื้นผิว TGS826-B



รูปที่ 4.9ค สัญลักษณ์ที่ได้จากการยิงเลเซอร์ลงบนพื้นผิว TGS826-C

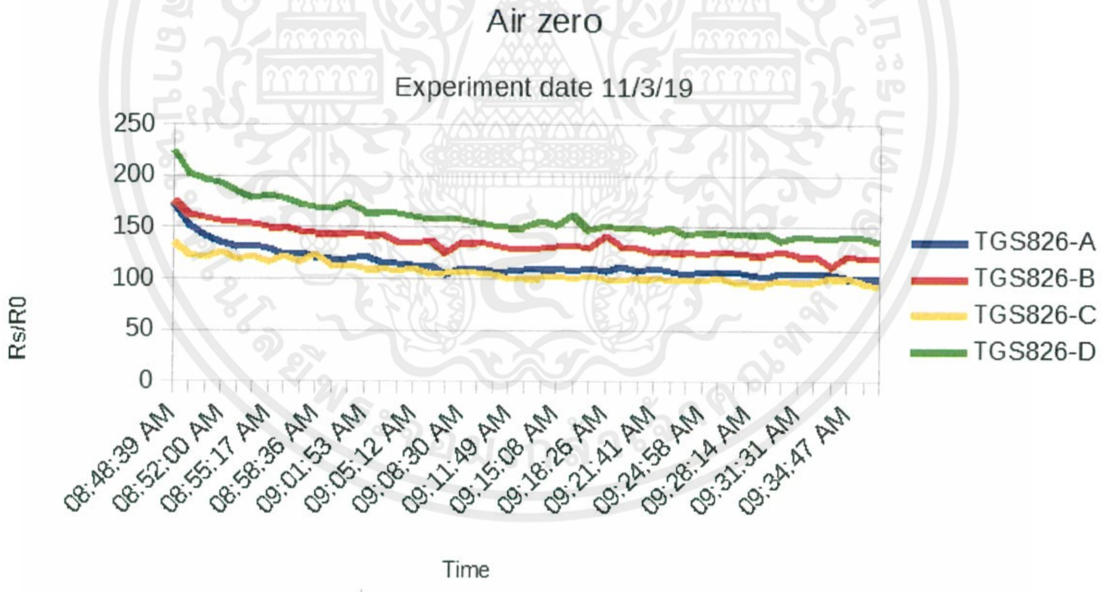
รูปที่ 4.9ง สัญลักษณ์ที่ได้จากการยิงเลเซอร์ลงบนพื้นผิว TGS826-D

4.3 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของพื้นผิวเซ็นเซอร์แก๊ส TGS826

หลังจากนำเซ็นเซอร์ไปยิงเลเซอร์ลงบนพื้นผิวของเซ็นเซอร์ที่ร้าน Nakran Laser วันที่ 24 มกราคมและทดลองวัดแก๊สมาตราฐานที่ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อมต่อมาในวันที่ 12 กุมภาพันธ์ ผู้ทดลองได้นำเซ็นเซอร์ทั้ง 4 ตัวไปตรวจสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ด้วยโหมด Tapping ในวันที่ 22 กุมภาพันธ์ ที่บริษัท แอลเอ็มเอส อินสทรูเมนต์ และนำไปวัดแก๊สมาตราฐานอีกรอบในวันที่ 11 มีนาคม

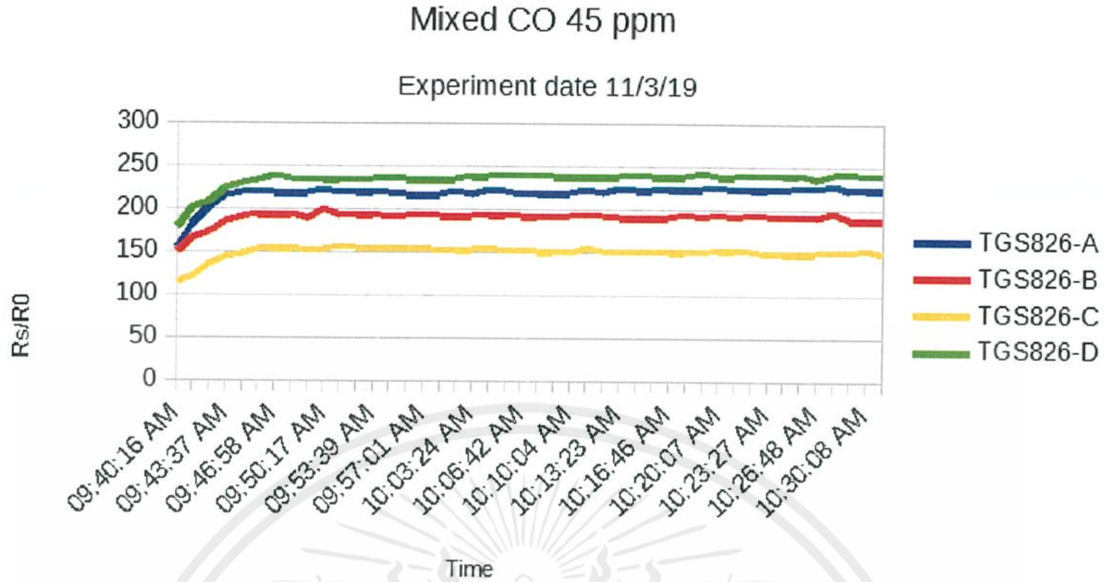
4.3.1 ผลการทดลองค่าสัญญาณของวันทำการทดลองวันที่ 11 มีนาคม 2562

4.3.1.1 ค่าสัญญาณการวัด Air zero



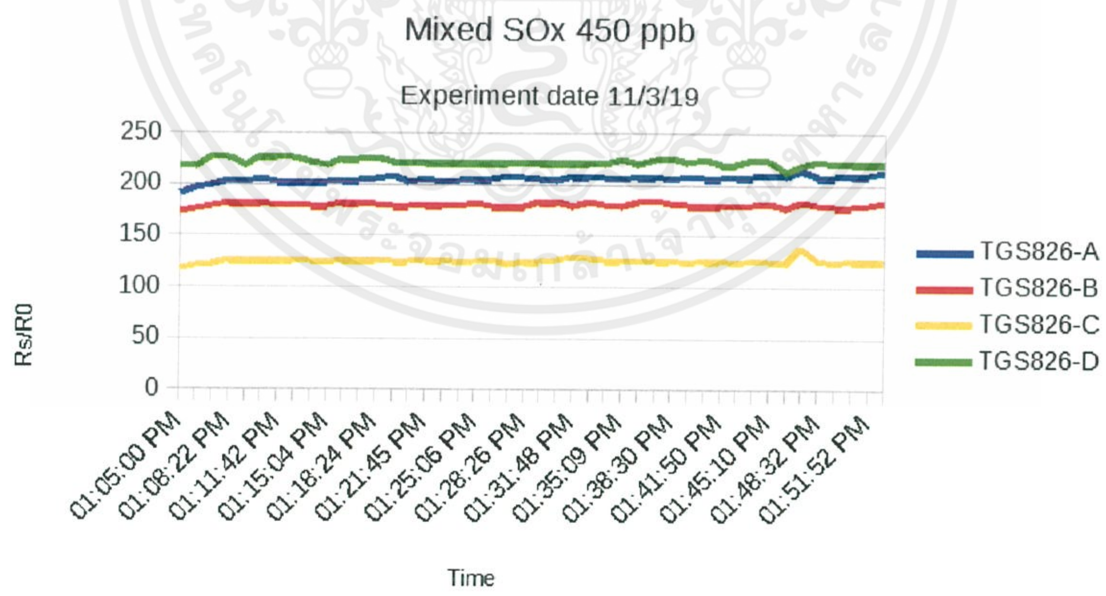
รูปที่ 4.10 ค่าสัญญาณของ Air zero จากเซ็นเซอร์ที่ได้หลังจากการ warm up เป็นเวลา 50 นาที โดยที่ค่าสัญญาณที่ได้ดังกล่าวคือค่าสัญญาณที่ได้จากการทดลองในเดือนแรกและจะเป็นชุดข้อมูลที่ใช้สำหรับนำไปใช้เป็นชุดข้อมูลฝึกสอนในการทดลองครั้งต่อไป

4.3.1.2 ค่าสัญญาณของ CO



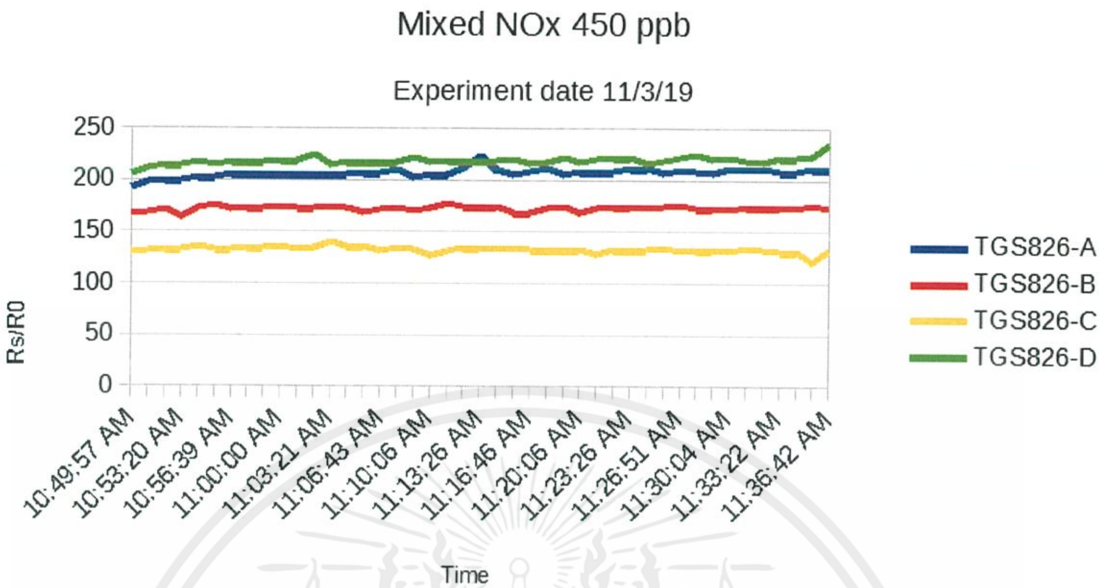
รูปที่ 4.11 ค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์หลังจากการวัด Air zero 10 นาทีโดยข้อมูลที่ได้คือข้อมูลจากการวัด CO 45 ppmโดยข้อมูลชุดนี้จะนำไปใช้เป็นชุดข้อมูลฝึกสอน โดยที่ C_{out} เฉลี่ย คือ 49.49±0.11 ppm

4.3.1.3 ค่าสัญญาณของ SOx



รูปที่ 4.12 ค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์ที่ได้หลังจากการวัด CO 10 นาทีโดยข้อมูลที่ได้คือข้อมูลจากการวัด SOx 450 ppb โดยข้อมูลชุดนี้จะนำไปใช้เป็นชุดข้อมูลฝึกสอน โดยที่ C_{out} เฉลี่ย คือ 449.86±0.03 ppb

4.3.1.4 ค่าสัญญาณของ NOx



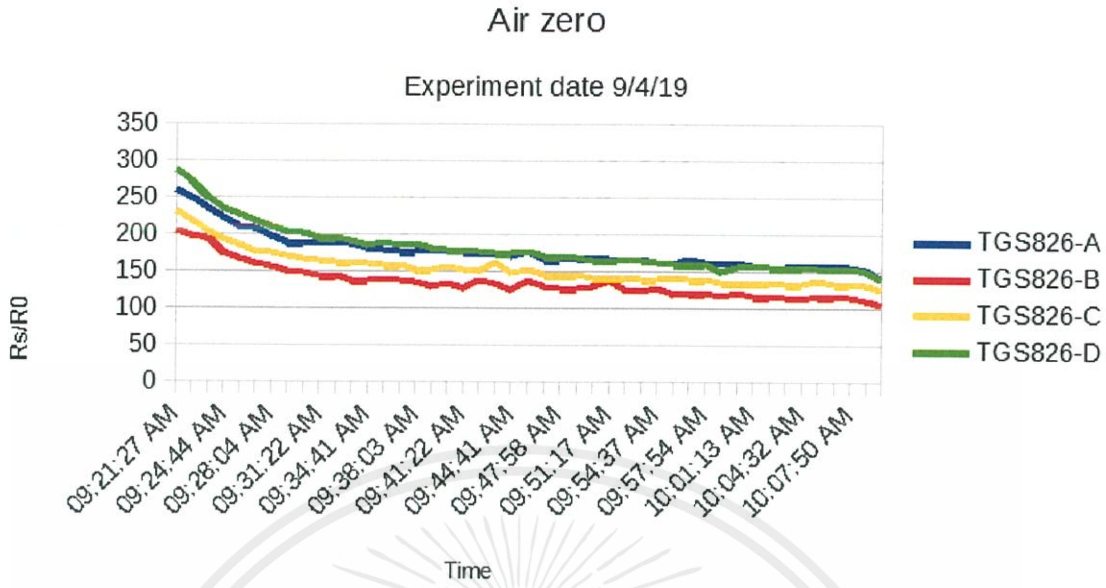
รูปที่ 4.13 ค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์ที่ได้หลังจากการวัด SOx 10 นาทีโดยข้อมูลที่ได้คือข้อมูลจากการวัด NOx 450 ppb โดยข้อมูลชุดนี้จะนำไปใช้เป็นชุดข้อมูลฝึกสอน โดยที่ C_{out} เฉลี่ย คือ 449.56±0.11 ppb

4.3.2 ผลการทดลองค่าสัญญาณของวันทำการทดลองวันที่ 9 เมษายน 2562

หลังจากทดลองวัดแก็สมาตรฐานวันที่ 11 มีนาคม 2562 คณะนักวิจัยได้นำเซ็นเซอร์ทั้งหมดไปวัดภาพพื้นผิวด้วย AFM ที่บริษัท แอลเอ็มเอส อินสทรูเมนต์ ในวันที่ 18 มีนาคม 2562 หลังจากนั้นจึงนำไปทดลองเพื่อจำลองการใช้งานจริงในภาชนะบรรจุแก๊สแบบเทฟล่อน ในวันที่ 19 มีนาคม ถึง 7.เมษายน 2562 โดยใช้แก๊สไนโตรเจนและออกซิเจนผสมกันในอัตราส่วน 2:1 psi และควบคุมอัตราการไหลด้วย rotameter ด้วยอัตราการไหล 0.6 l/min

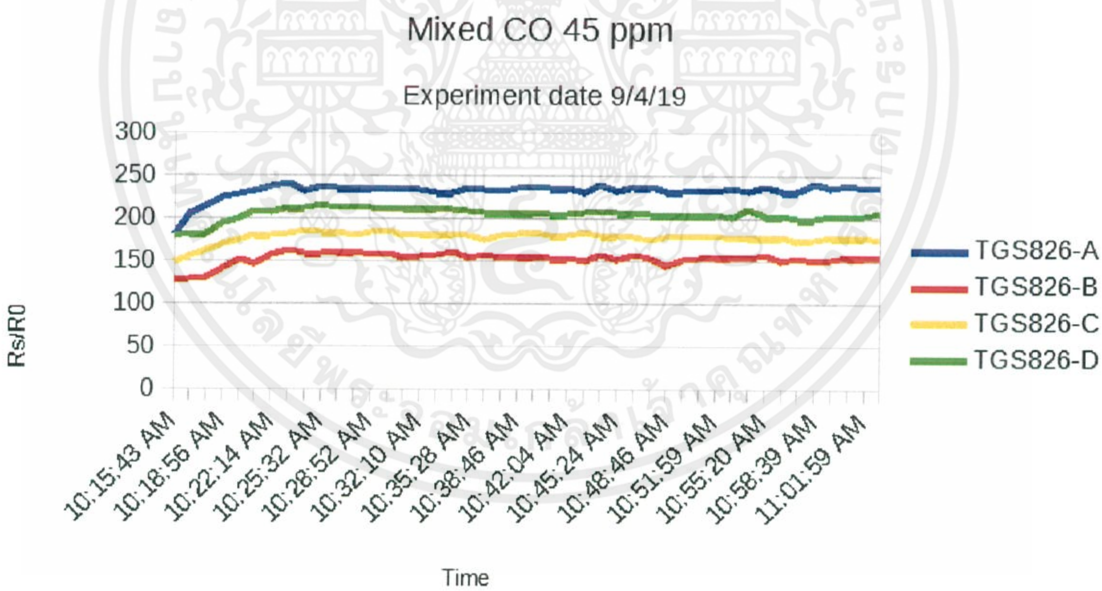
หลังจากนั้นจึงนำเซ็นเซอร์กลับไปทดลองวัดแก็สมาตรฐานที่ห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อมในวันที่ 9 เมษายน 2562

4.3.2.1 ค่าสัญญาณการวัด Air zero



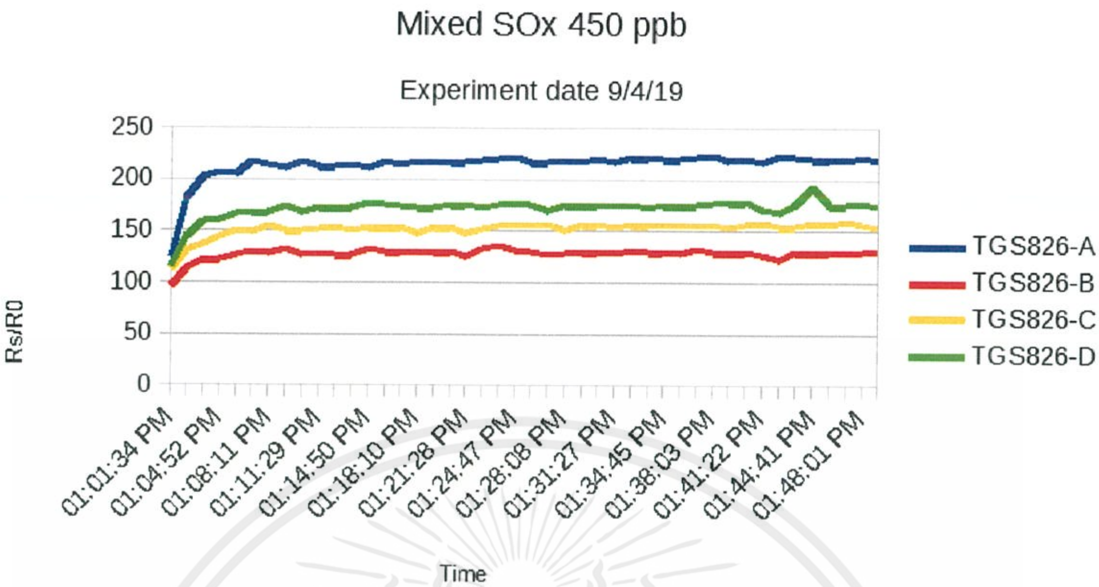
รูปที่ 4.14 ค่าสัญญาณของ Air zero จากเซ็นเซอร์ที่ได้หลังจากการ warm up เป็นเวลา 50 นาที

4.3.2.2 ค่าสัญญาณของ CO



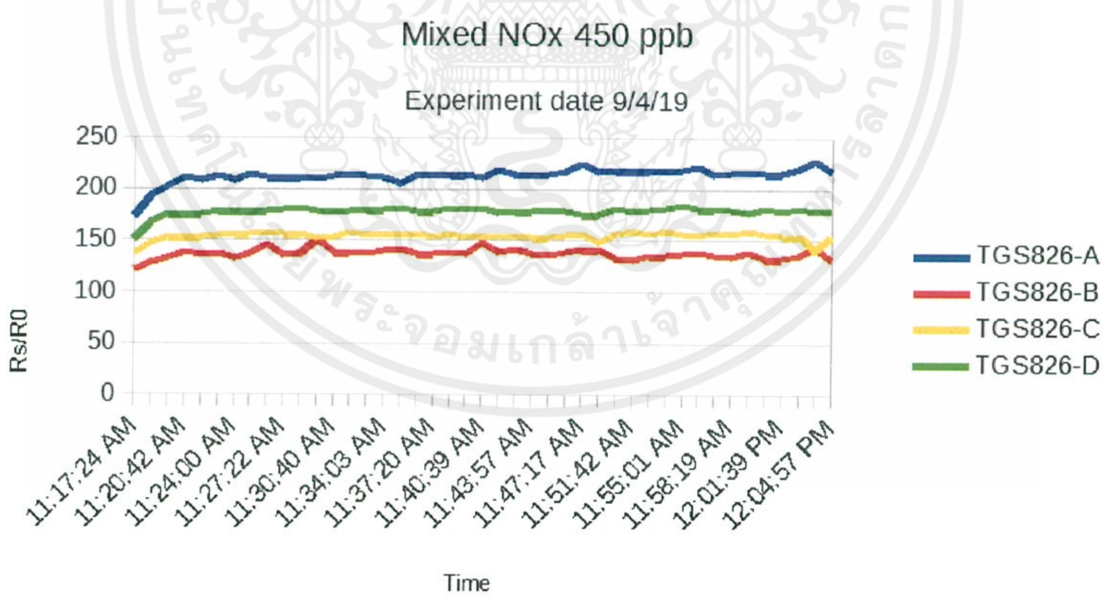
รูปที่ 4.15 ค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์ที่ได้หลังจากการวัด Air zero 10 นาทีโดยข้อมูลชุดนี้คือค่าสัญญาณของ CO 45 ppm 50 นาที โดยที่ C_{out} เฉลี่ย คือ 49.96±0.11 ppm

4.3.2.3 ค่าสัญญาณของ SOx



รูปที่ 4.16 ค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์ที่ได้หลังจากการวัด CO 50 นาทีโดยข้อมูลชุดนี้คือค่าสัญญาณของ SOx 450 ppb 50 นาที โดยที่ C_{out} เฉลี่ย คือ 449.63±0.06 ppb

4.3.2.4 ค่าสัญญาณของ NOx

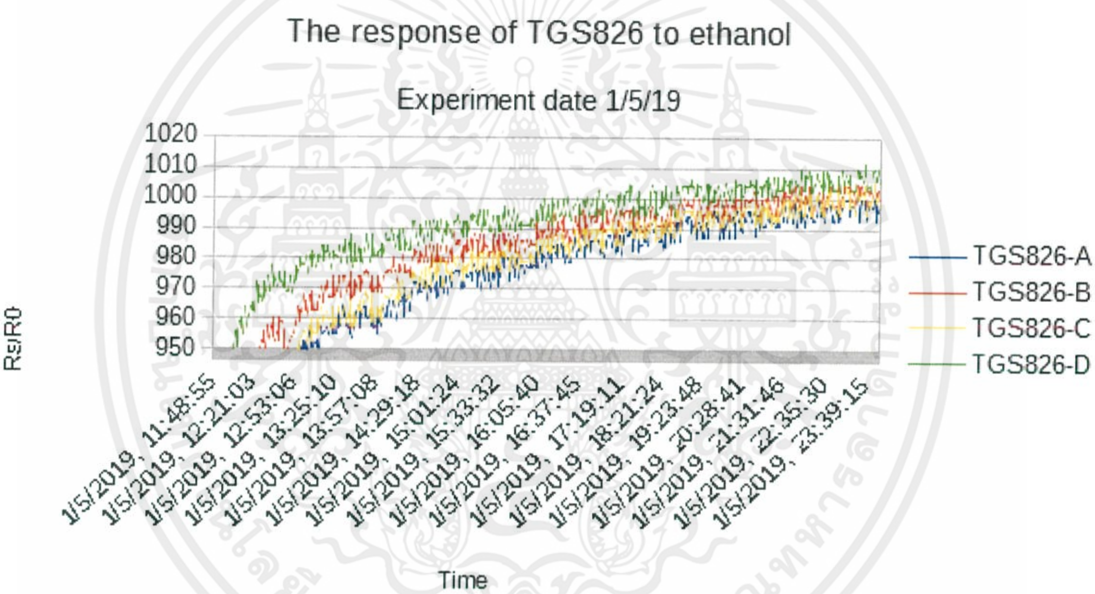


รูปที่ 4.17 ค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์ที่ได้หลังจากการวัด SOx 50 นาทีโดยข้อมูลชุดนี้คือค่าสัญญาณของ NOx 450 ppb 50 นาที โดยที่ C_{out} เฉลี่ย คือ 449.65±0.1 ppb

4.3.3 ผลการทดลองค่าสัญญาณของวันทำการทดลองวันที่ 10 พฤษภาคม 2562

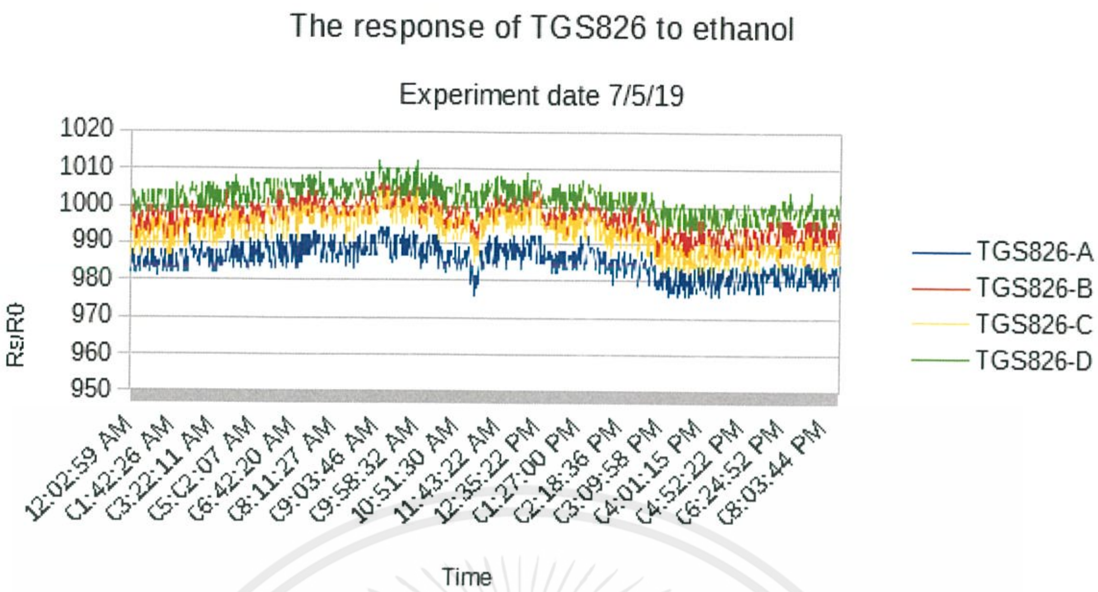
หลังจากทดลองวัดแก็สมาตรฐานวันที่ 9 เมษายน 2562 คณะนักวิจัยได้นำเซ็นเซอร์ทั้งหมดไปวัดภาพพื้นผิวด้วย AFM ที่บริษัท แอลเอ็มเอส อินสทรูเมนต์ ในวันที่ 19 เมษายน 2562 หลังจากนั้นจึงนำไปทดลองเพื่อจำลองการใช้งานจริงในภาชนะบรรจุแก๊สแบบเทฟล่อนในวันที่ 1 พฤษภาคม ถึง 7 พฤษภาคม 2562 โดยนำขวดบรรจุเอทานอล (Ethanol) ความเข้มข้น 90% V/V ปริมาตร 33 ml ใส่ในภาชนะเตรียมไอระเหยของเอทานอล โดยมีอัตราการระเหยอยู่ที่ 1 ml/hr

รูปที่ 4.18-4.19 แสดงตัวอย่างผลการวัดไอระเหยของเอทานอล เมื่อวันที่ 1 พฤษภาคม และวันที่ 7 พฤษภาคม 2562



รูปที่ 4.18 การตอบสนองของเซ็นเซอร์ TGS826 ต่อไอระเหยเอทานอล วันที่ 1 พฤษภาคม 2562

เพื่อจำลองการใช้งานจริงในภาชนะบรรจุแก๊สแบบเทฟล่อนในวันที่ 1 พฤษภาคม เวลา 11.27 น. ผู้ทดลองจึงเริ่มให้ไอระเหยของเอทานอลในภาชนะเตรียมไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายหลังจากนั้นภายไป 11 นาที จากรูปที่ 4.18 เห็นได้ว่าเซ็นเซอร์ TGS826 เริ่มมีการตอบสนองต่อไอระเหยของเอทานอลโดยมีลักษณะของการตอบสนองแบบฟังก์ชันเลขชี้กำลังจนกระทั่งระดับสัญญาณไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 1000 การตอบสนองจึงเริ่มเปลี่ยนเป็นแบบเส้นตรงและคงที่

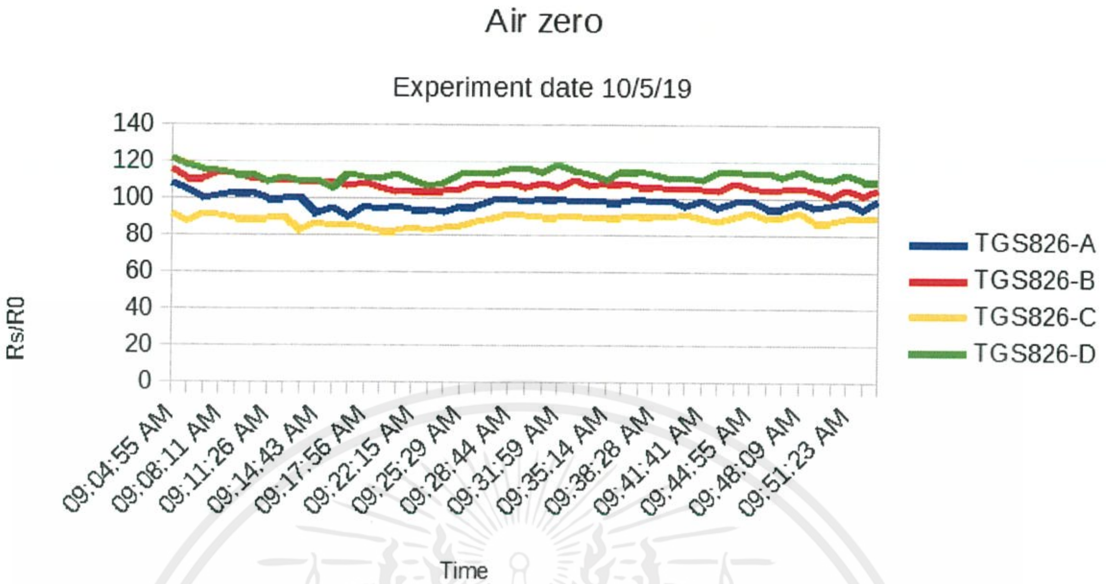


รูปที่ 4.19 การตอบสนองของเซ็นเซอร์ TGS826 ต่อไอระเหยเอทานอล วันที่ 7 พฤษภาคม 2562

จากรูปที่ 4.19 ซึ่งเป็นข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าวันที่ 7 พฤษภาคม 2562 ที่ได้มาจากการทดลองต่อเนื่องในวันที่ 1 พฤษภาคม 2562 โดยจากรูปที่ 4.19 พบว่าเซ็นเซอร์ TGS826 ทั้ง 4 ตัวยังคงสามารถใช้วัดไอระเหยของสารอินทรีย์ได้และมีระดับสัญญาณไฟฟ้าอยู่ประมาณ 1000 เท่าเดิมเหมือนวันที่ 1 พฤษภาคม ตอนช่วงที่สัญญาณมีการตอบสนองแบบเส้นตรง

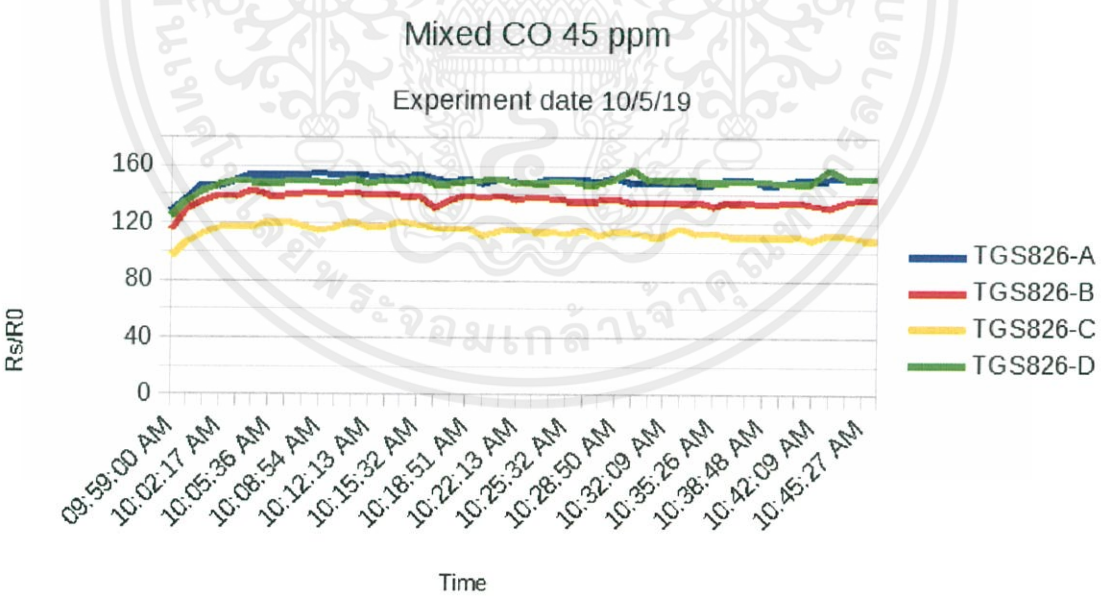
หลังจากนั้นจึงนำเซ็นเซอร์ไปทดลองวัดแก๊สมาตราฐานอีกครั้งที่ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อมในวันที่ 10 พฤษภาคม 2562

4.3.3.1 ค่าสัญญาณการวัด Air zero



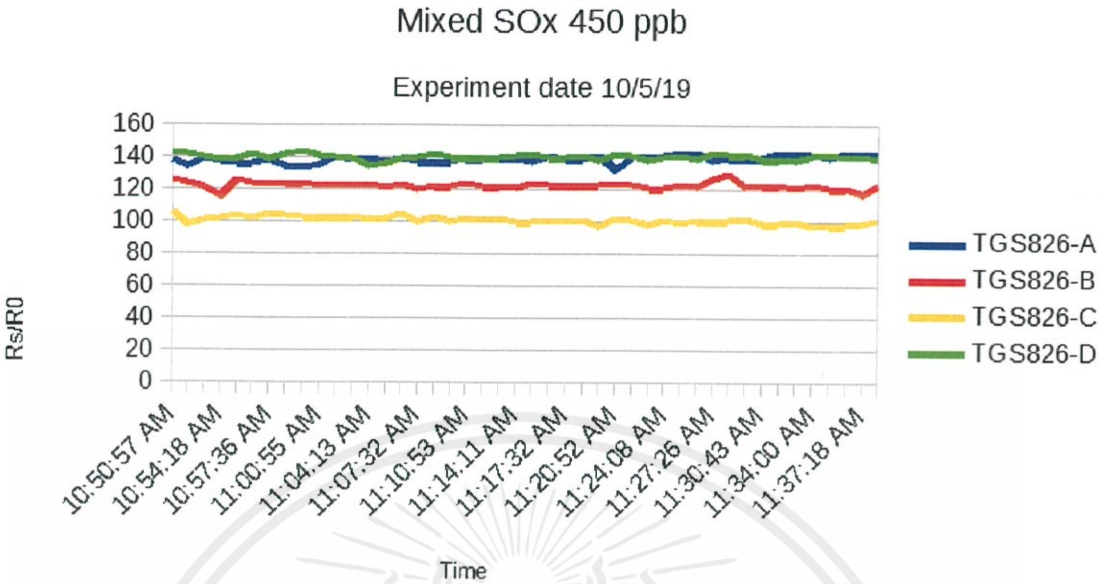
รูปที่ 4.20 ค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์ที่ได้จากการวัด Air zero 50 นาที

4.3.3.2 ค่าสัญญาณการวัด CO



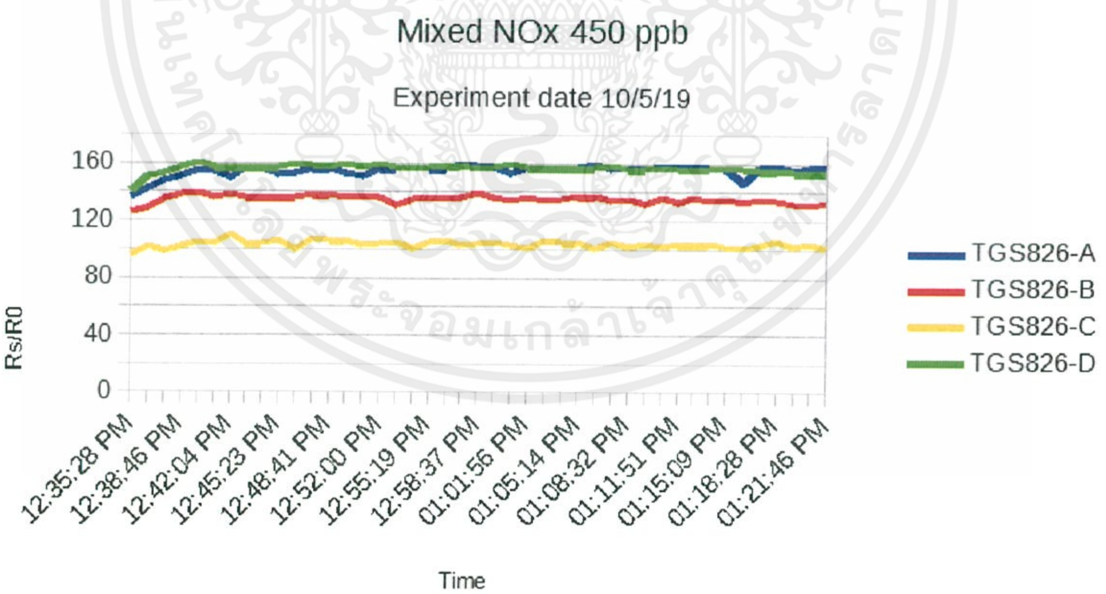
รูปที่ 4.21 ค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์ที่ได้หลังจากการวัด Air zero 10 นาทีโดยข้อมูลชุดนี้คือค่าสัญญาณของ CO 45 ppm 50 นาที โดยที่ C_{out} เฉลี่ย คือ 44.96±0.1 ppm

4.3.3.3 ค่าสัญญาณการวัด SOx



รูปที่ 4.22 ค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์ที่ได้หลังจากการวัด CO 50 นาทีโดยข้อมูลชุดนี้คือค่าสัญญาณของ SOx 450 ppb 50 นาที โดยที่ C_{out} เฉลี่ย คือ 449.88±0.03 ppb

4.3.3.4 ค่าสัญญาณการวัด NOx



รูปที่ 4.23 ค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์ที่ได้หลังจากการวัด SOx 50 นาทีโดยข้อมูลชุดนี้คือค่าสัญญาณของ NOx 450 ppb 50 นาที โดยที่ C_{out} เฉลี่ย คือ 439.93±0.11 ppb

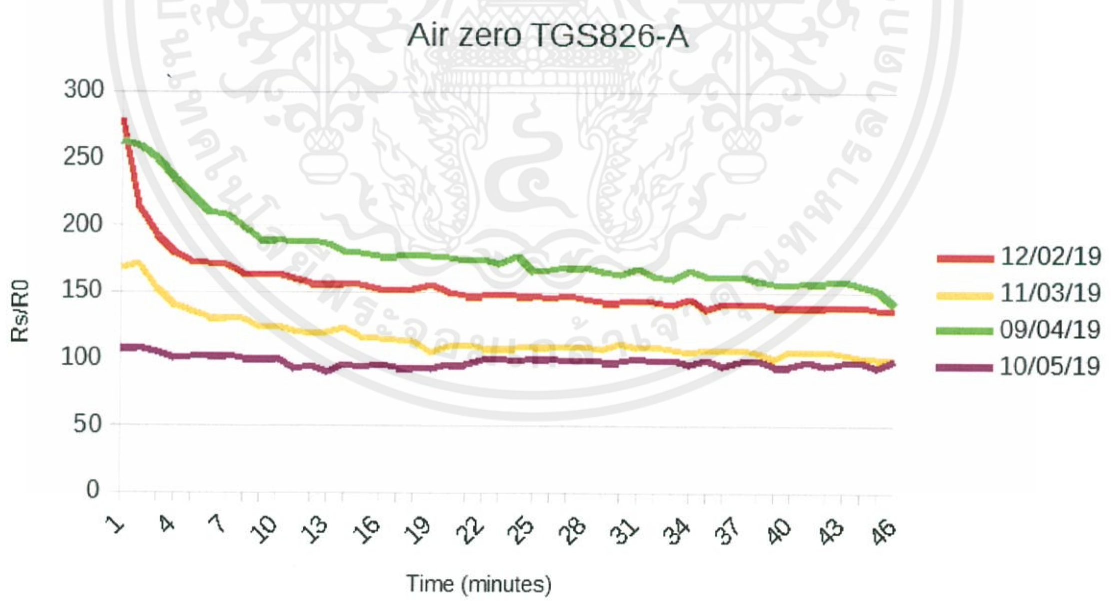
จากกราฟที่ 4.20 จนถึงกราฟที่ 4.23 เป็นค่าสัญญาณที่ได้หลังจากการทดลองจำลองการใช้งานจริงโดยวัดกับไอสารระเหย Ethanol ซึ่งจากกราฟนั้นจะเห็นชัดเลยว่าระดับสัญญาณจากการวัดแก๊สมาตราฐานที่ได้นั้นมีค่าลดลงอย่างชัดเจนซึ่งต่างจากเดือนที่ผ่านมามีนาคมและเมษายนที่ยังไม่มีการวัดด้วยไอสารระเหย

จากการคำนวณค่า C_{out} ที่ได้ออกมาพบว่าค่าที่มีความผิดปกตินั้นได้แก่ รูปที่ 4.6 4.11 และ 4.23 นั้นจะส่งผลต่อระดับสัญญาณในแต่ละเดือนซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการที่ค่า C_{out} มีค่าไม่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้กำหนดเอาไว้ในเครื่อง Dilute calibrator – model T700 จะส่งผลให้ระดับสัญญาณในเดือนหลังๆมีค่ามากกว่าในช่วงเดือนแรกๆได้เช่นการที่สัญญาณของเดือนเมษยนมากกว่าเดือนมีนาคมดังรูปที่ 4.28 และ 4.30

4.3.4 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไป

4.3.4.1 ค่าสัญญาณของ Air zero

4.3.4.1.1 TGS826-A

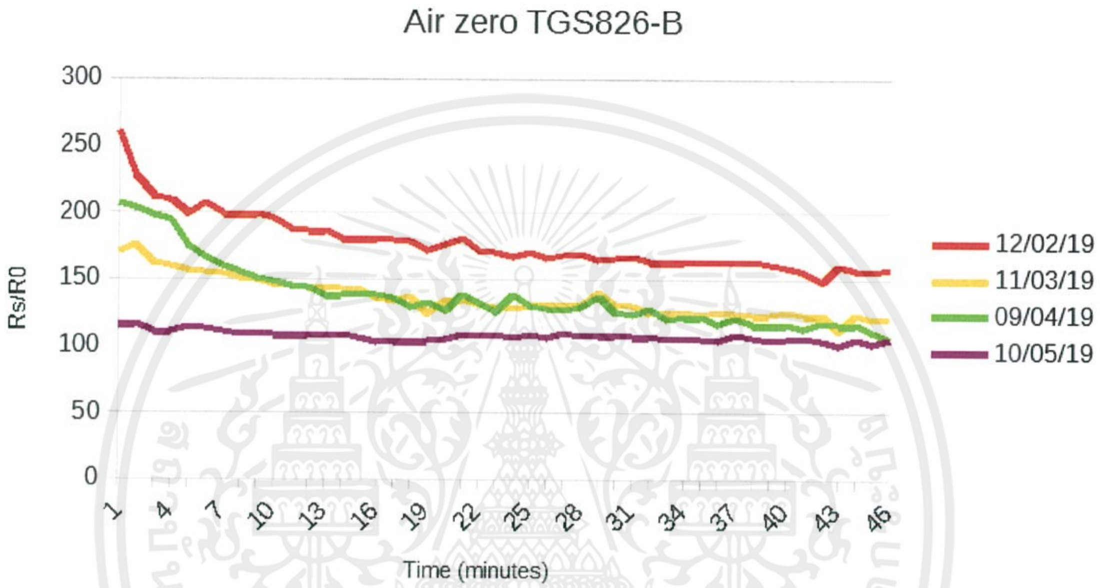


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปของ TGS826-A (Air zero)

จากกราฟแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมโดยที่จะเห็นได้ว่าในเดือนมีนาคมนั้นสัญญาณลดลงต่ำกว่าเดือนกุมภาพันธ์ซึ่งเป็นไปตามที่คาดหวังเอาไว้ว่าถ้า

หากเซ็นเซอร์มีการนำไปใช้งานจะทำให้ค่าสัญญาณนั้นมีค่าลดลงแต่พอสังเกตสัญญาณของเดือนเมษายนสิ่งที่เกิดขึ้นคือค่าสัญญาณกลับมีค่าที่มากกว่าใน 2 เดือนแรกซึ่งโดยปกติแล้วไม่ควรจะเป็นเช่นนี้สาเหตุอาจเกิดมาจากในกระบวนการเปิดฝาครอบเซ็นเซอร์เพื่อนำไปใช้วัดด้วย AFM อาจมีสิ่งปนเปื้อนตกลงไปเกาะบนพื้นผิวของเซ็นเซอร์ก็เป็นไปได้จึงส่งผลให้ค่าสัญญาณมีค่าที่มากขึ้น

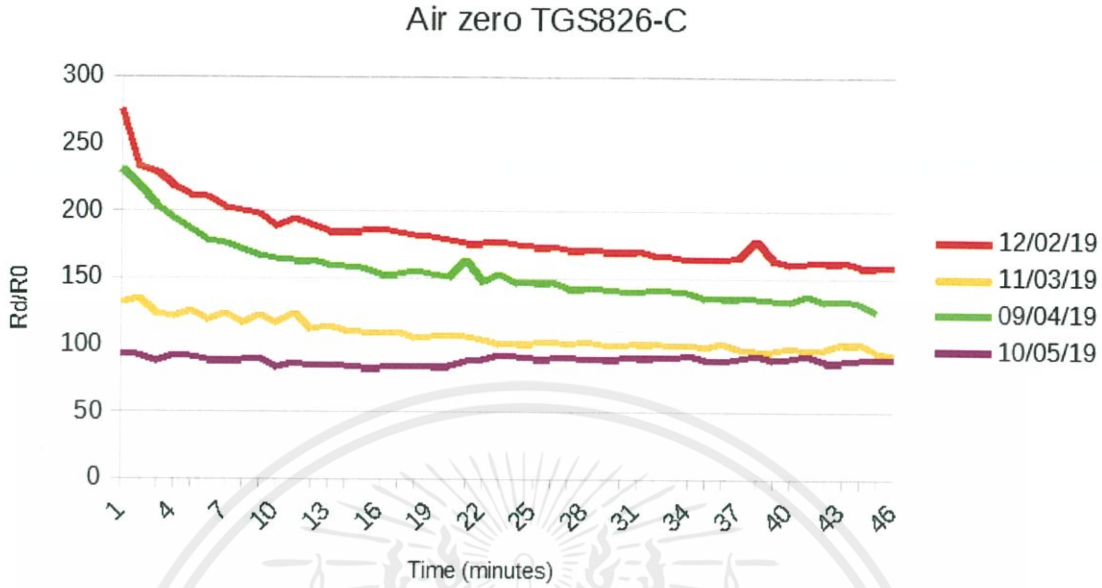
4.3.4.1.2 TGS826-B



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปของ TGS826-B (Air zero)

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าสัญญาณของเดือนมีนาคมและเมษายนนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต่างกันมากอาจเป็นเพราะว่าพื้นผิวของเซ็นเซอร์ตัวนี้อาจไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่มากพอสำหรับทำให้สัญญาณเปลี่ยนแปลงไป

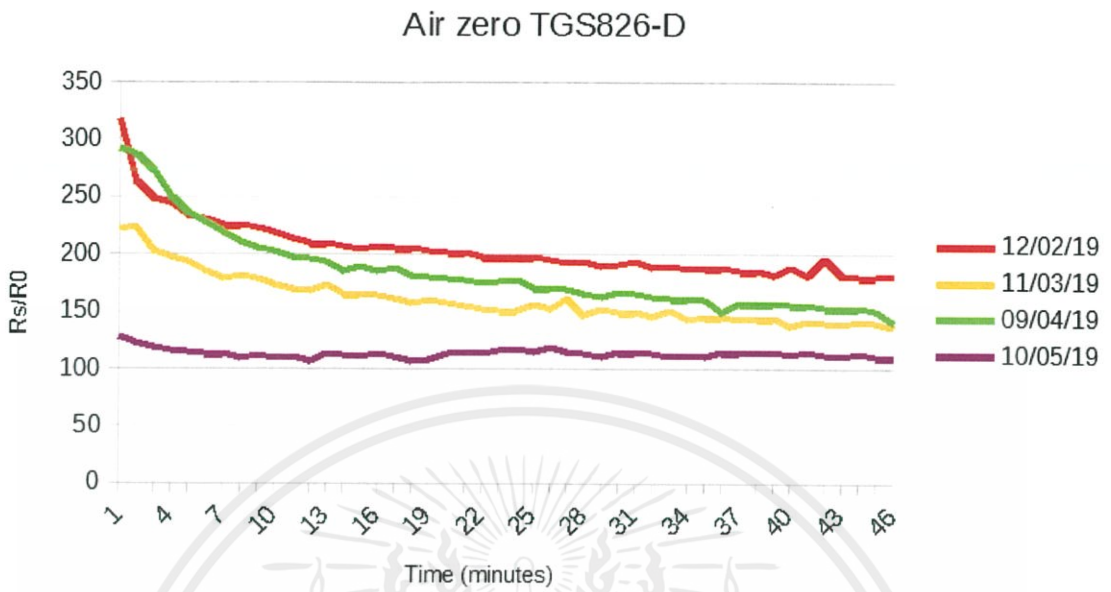
4.3.4.1.3 TGS826-C



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปของ TGS826-C (Air zero)

จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าถ้ามองแค่เดือนกุมภาพันธ์กับมีนาคมสัญญาณยังคงลดลงตามที่คาดการเอาไว้แต่ในการทดลองเดือนเมษายนกลับพบว่าสัญญาณที่ได้มีค่ามากกว่าของเดือนมีนาคมซึ่งในกรณีนี้จะเหมือนกับของ TGS826-A ที่ค่าสัญญาณเดือนหลังมีค่ามากกว่าสัญญาณเดือนแรกๆ

4.3.4.1.4 TGS826-D



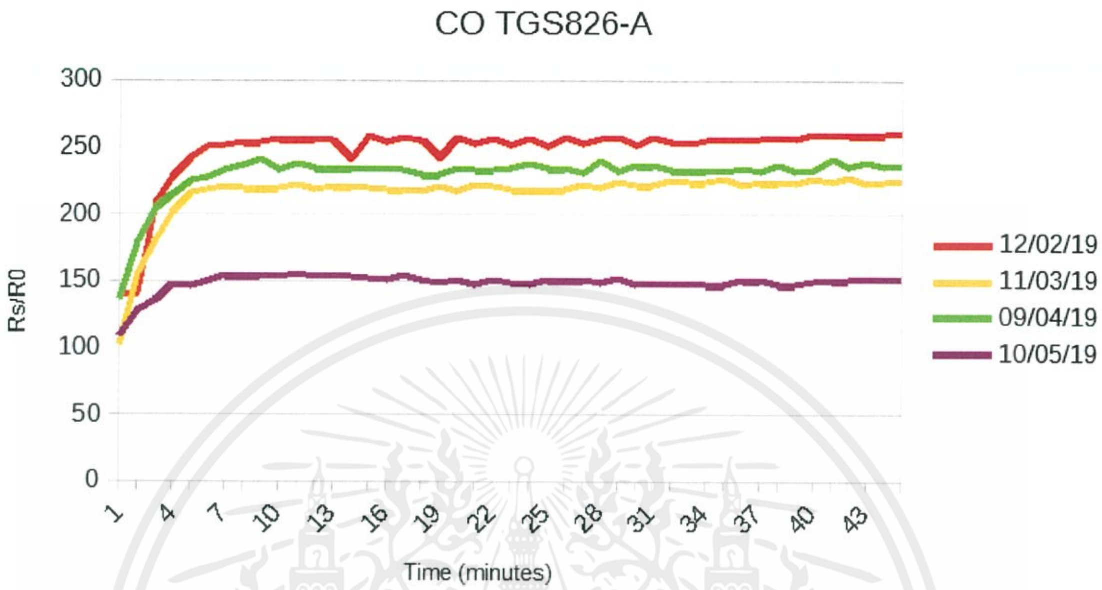
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปของ TGS826-D (Air zero)

จากกราฟสัญญาณที่ได้นั้นของเดือนมีนาคมและเมษายนพบว่าสัญญาณนั้นให้ค่าที่ใกล้เคียงกันโดยที่ค่าจะต่ำกว่าในเดือนกุมภาพันธ์แสดงว่าพื้นผิวเซ็นเซอร์อาจยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่มากพอที่จะทำให้สัญญาณเปลี่ยนแปลงจนเห็นความแตกต่าง

จากกราฟที่ 4.24 – 4.27 จากการผลการทดลองจะสังเกตเห็นได้สัญญาณของเดือนมีนาคมมีระดับสัญญาณที่ต่ำกว่าเดือนกุมภาพันธ์ซึ่งในความจริงแล้วเซ็นเซอร์ที่ยังไม่เคยถูกนำไปใช้งานเป็นระยะเวลานานระดับสัญญาณที่ได้ควรจะมีค่าใกล้เคียงกับรดับสัญญาณเดิมแต่ในกรณีสัญญาณที่ได้จากการวัด Air zero ระดับสัญญาณที่ได้ไม่เป็นไปตามความจริงจากการวิเคราะห์กระบวนการทดลองที่ได้ทำมาสาเหตุที่ทำให้สัญญาณของเดือนมีนาคมต่ำกว่ากุมภาพันธ์มีความเป็นไปได้ว่าอาจเกิดมาจากเข็มของ AFM ในช่วงการทดลองระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ถึงมีนาคมได้ไปทำลายพื้นผิวบางส่วน อีกสาเหตุที่มีความเป็นไปได้สูงคือ Air zero ที่ใช้ในการทดลองวัดอาจมีแก๊สชนิดอื่นปนเข้ามาดังนั้นจึงทำให้ระดับสัญญาณที่ได้ผิดเพี้ยนออกไป

4.3.4.2 ค่าสัญญาณของ CO

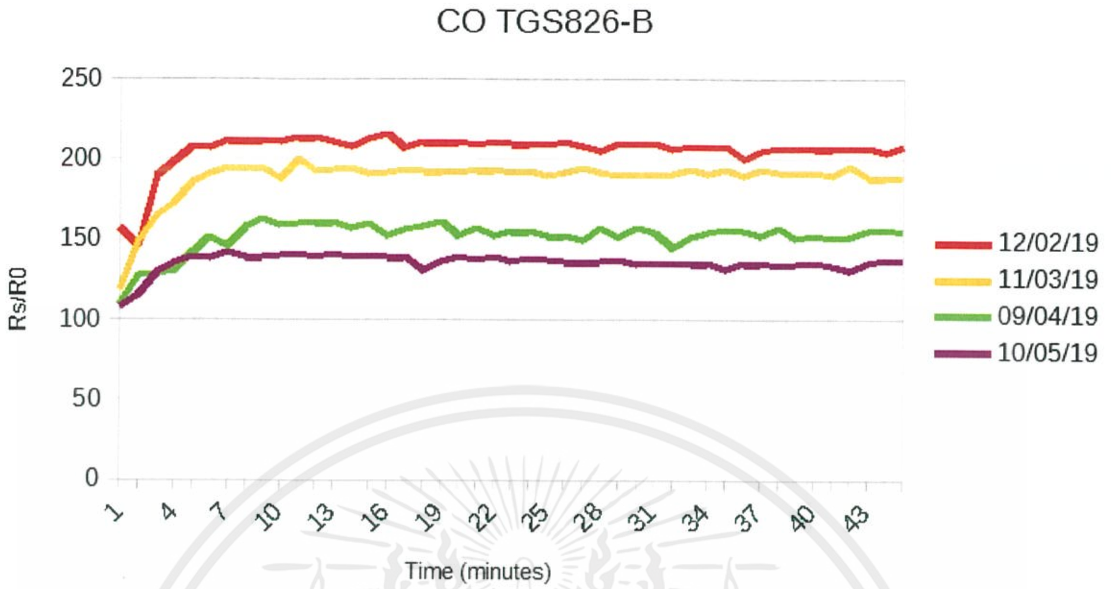
4.3.4.2.1 TGS826-A



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปของ TGS826-A (CO)

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าสัญญาณของเดือนมีนาคมและเมษายนมีค่าการเปลี่ยนแปลงที่ไม่มากสักเท่าไรจากผลการทดลองนี้ว่าคาดว่าพื้นผิวของเซ็นเซอร์ตัวนี้อาจยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่มากพอที่จะทำให้สัญญาณที่ได้จาก CO มีการเปลี่ยนแปลง และอีกสาเหตุก็คือในกระบวนการวัดแก๊สมาตราฐานรูปที่ 4.11 จากการคำนวณค่า C_{out} ของ CO ที่ได้นั้นพบว่าค่าที่ได้ไม่ได้มีความเข้มข้นที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้ตั้งเอาไว้ใน Dilute calibrator – model T700 นั้นแสดงว่าค่าความเข้มข้นที่วัดในขณะเวลานั้นค่าความเข้มข้นมีค่าผิดปกติจึงทำให้สัญญาณของเดือนมีนาคมต่ำลงกว่าเมษายน

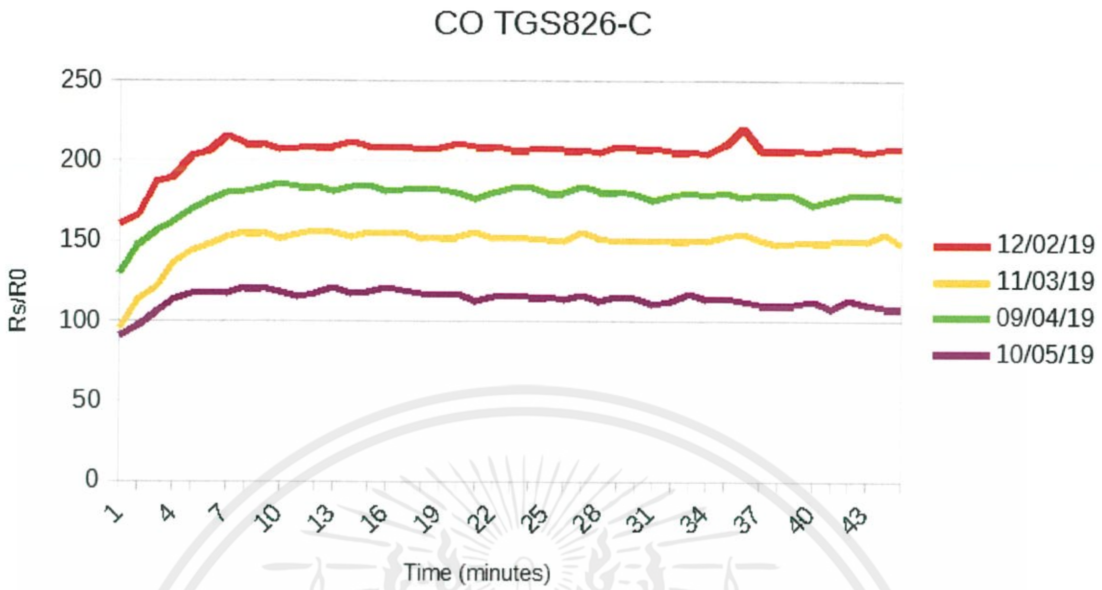
4.3.4.2.2 TGS826-B



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปของ TGS826-B (CO)

จากกราฟค่าสัญญาณของทั้ง 3 เดือนมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัดโดยที่ค่าสัญญาณของเดือนมีนาคมมีค่าที่มากกว่าเดือนเมษายนเป็นไปตามที่คาดเอาไว้สาเหตุนั้นอาจเป็นเพราะว่าพื้นผิวของเซ็นเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงที่เพียงพอต่อการทำให้เกิดสัญญาณที่ต่ำลง

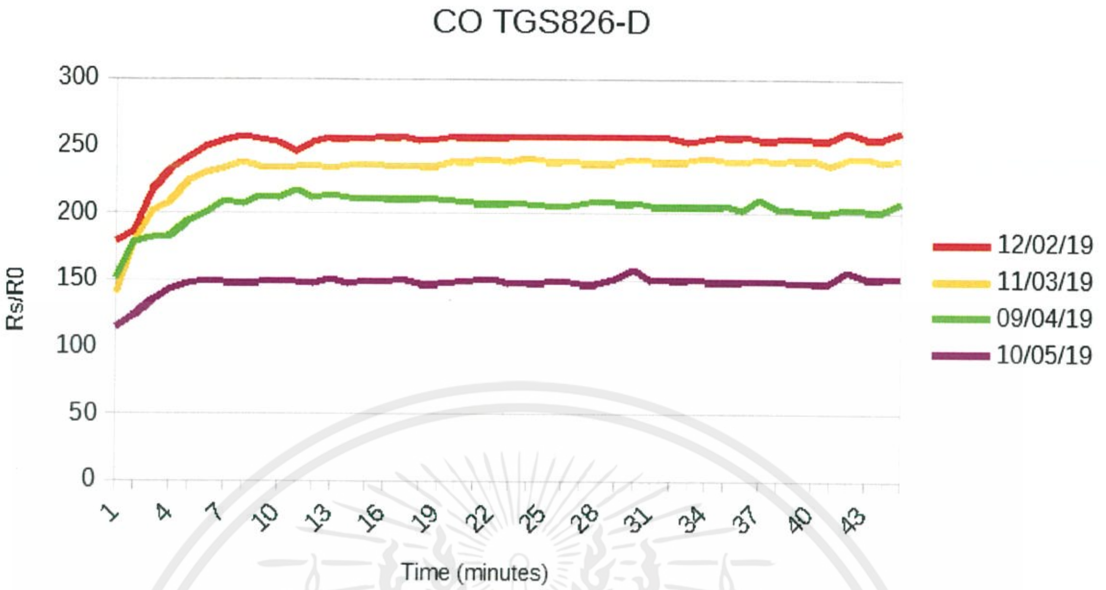
4.3.4.2.3 TGS826-C



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปของ TGS826-C (CO)

จากผลการทดลองนี้จะเหมือนกับผลการทดลองของรูปที่ 4.24 ที่สัญญาณของเดือนเมษายนมีค่าที่มากกว่าเดือนมีนาคมสาเหตุนั้นคาดว่าน่าจะเป็นมาจากอาจมีสิ่งปนเปื้อนตกไปเกาะบนพื้นผิวซึ่งอาจทำให้ค่าความต้านของเซ็นเซอร์ Rs มีค่าที่มากขึ้นจึงทำให้สัญญาณมากขึ้นผิดปกติและอีกสาเหตุก็คือในกระบวนการวัดแก๊สมาตราฐานรูปที่ 4.11 จากการคำนวณค่า C_{out} ของ CO ที่ได้นั้นพบว่าค่าที่ได้ไม่ได้มีความเข้มข้นที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้ตั้งเอาไว้ในเครื่อง Dilute calibrator – model T700 เช่นเดียวกับรูปที่ 4.27 จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้สัญญาณของเดือนมีนาคมต่ำลงกว่าเมษายน

4.3.4.2.4 TGS826-D



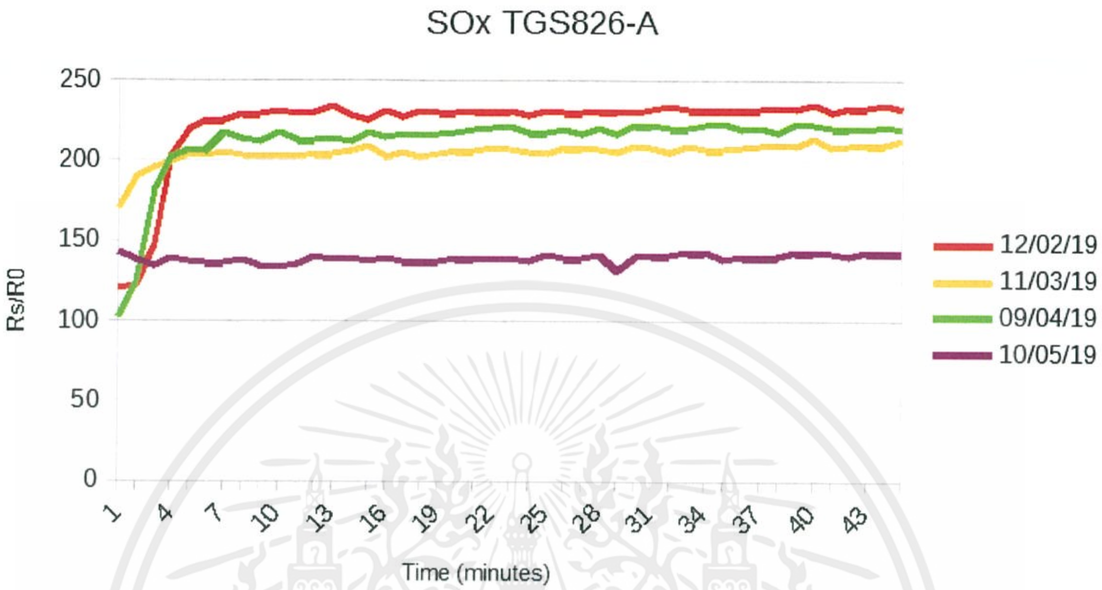
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปของ TGS826-D (CO)

จากผลการทดลองผลที่ได้มีการลดลงของค่าสัญญาณที่เห็นได้ชัดโดยสัญญาณของเดือนเมษายนให้ค่าที่ต่ำกว่าเดือนมีนาคมอย่างมากซึ่งอาจเกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวก็เป็นได้ และอีกสาเหตุอาจเป็นเพราะว่าเซ็นเซอร์ตัวนี้มีการตอบสนองต่อ CO ที่ดีดังนั้นการเปลี่ยนแปลงไปของพื้นผิวไม่มากก็น้อยนั้นจึงทำให้เห็นสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างมากของทั้งสองเดือนนี้

จากข้อมูลการทดลองรูปที่ 4.28 จนถึง 4.31 จะเห็นว่าค่าสัญญาณนั้นต่ำลงมาก่อนจะเริ่มการทดลองในเดือนนมีนาคมสาเหตุนั้นเกิดมาจากในช่วงระหว่างเดือนกุมภาพันธ์จนถึงมีนาคมได้มีการเปิดฝาครอบของเซ็นเซอร์เพื่อที่จะนำเซ็นเซอร์ไปวัดสภาพพื้นผิวซึ่งในระหว่างการวัดภาพด้วย AFM อยู่นั้นมีความเป็นไปได้ว่าเข็มของ AFM อาจไปทำลายพื้นผิวบางส่วนของเซ็นเซอร์สัญญาณหรือในระหว่างที่กระบวนการปิดฝาครอบเซ็นเซอร์คืนนั้นอาจมีฝุ่นลงไปเกาะติดบนพื้นผิวดังนั้นเมื่อนำเซ็นเซอร์ไปวัดแก๊สมาตราฐานโมเลกุลของแก๊สที่จะวัดนั้นอาจจับไปบนพื้นผิวเซ็นเซอร์ได้ไม่เท่าเดิม ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าสัญญาณของเดือนมีนาคมได้ไม่เท่ากับเดือนกุมภาพันธ์ทั้งๆที่ยังไม่ได้มีการใช้งานมาก่อน

4.3.4.3 ค่าสัญญาณของ SOx

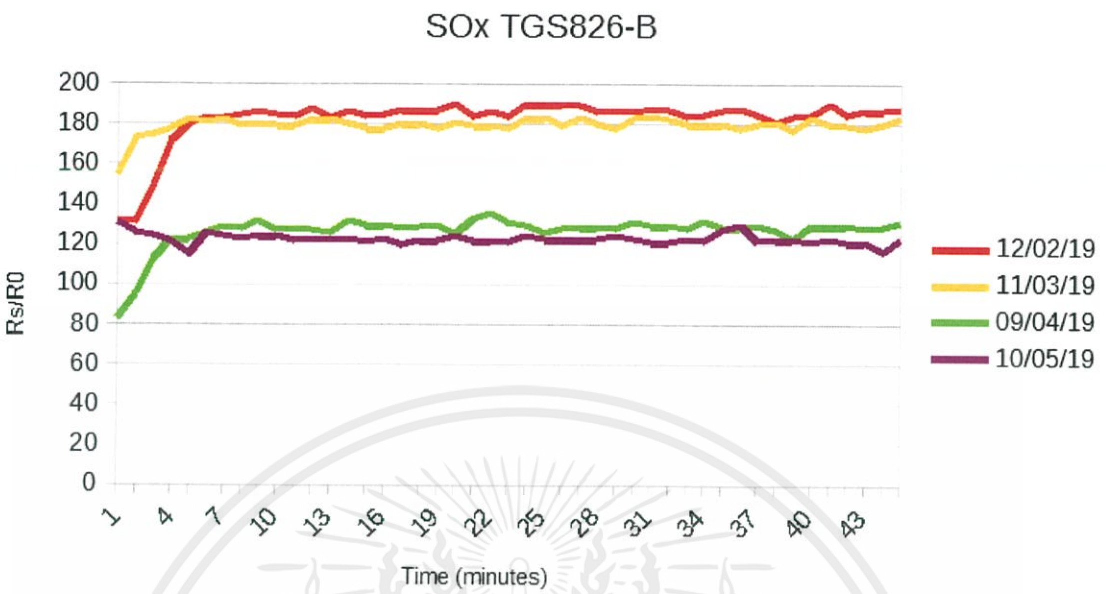
4.3.4.3.1 TGS826-A



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปของ TGS826-A (SOx)

จากผลการลองสัญญาณที่ได้มามีการกระจายตัวที่น้อยมากสาเหตุที่นั้นคาดว่าเซ็นเซอร์ตัวนี้พื้นผิวนั้นอาจไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่มากพอหรือเซ็นเซอร์ตัวนี้อาจยังมีการตอบสนองกับ SOx ที่ยังไม่ไม่ดีพอในส่วนของการตอบสนองนั้นอาจจะต้องพิจารณาเซ็นเซอร์ตัวที่เหลือก่อนดูอีกที

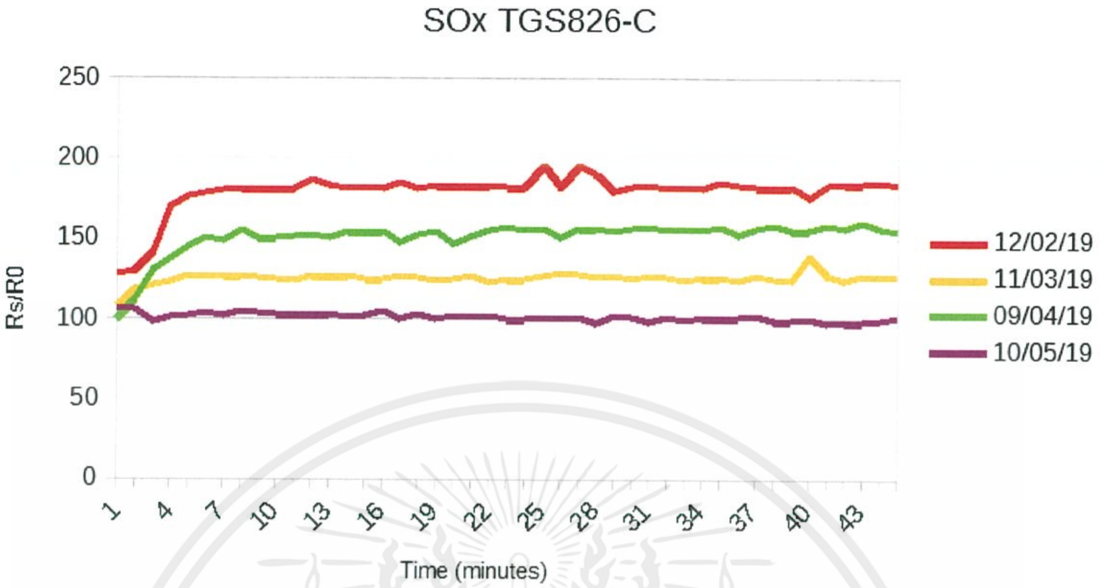
4.3.4.3.2 TGS826-B



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปของ TGS826-B (SOx)

ซึ่งจากรูปที่ 4.32 ที่ได้กล่าวไว้ถึงเรื่องการตอบสนองนั้นพอมาพิจารณาที่ผลการลองนี้ค่าสัญญาณของเดือนกุมภาพันธ์กับมีนาคมนั้นมีค่าที่ไม่เปลี่ยนแปลงแต่อย่างใดแต่พอเดือนเมษายนกับมีค่าสัญญาณที่ต่ำลงอย่างมากซึ่งจากผลการทดลองของ TGS826-B ที่ผ่านมานั้นให้ค่าสัญญาณเดือนเมษายนต่ำกว่าของทุกเดือนแสเดงให้เห็นว่า TGS826-A และ TGS826-B นั้นมีการตอบสนองที่ไม่มดีพอสำหรับ SOx ที่จะทำให้ได้ค่าสัญญาณที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจนซึ่งการที่ค่าสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่มากพอจะมีผลต่อการนำข้อมูลไปใช้ทดลองการณ์จำกลิ่นของปัญญาประดิษฐ์แต่เนื่องจากการทดลองครั้งนี้ข้อมูลชุดแรกที่จะใช้และนำไปเป็นชุดข้อมูลฝึกสอนถูกกำหนดไว้แล้วว่าจะใช้ข้อมูลของเดือนมีนาคมดังนั้นหากข้อมูลของเดือนมีนาคมและเมษายนมีความแตกต่างที่มากพอก็ยังคงสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ได้

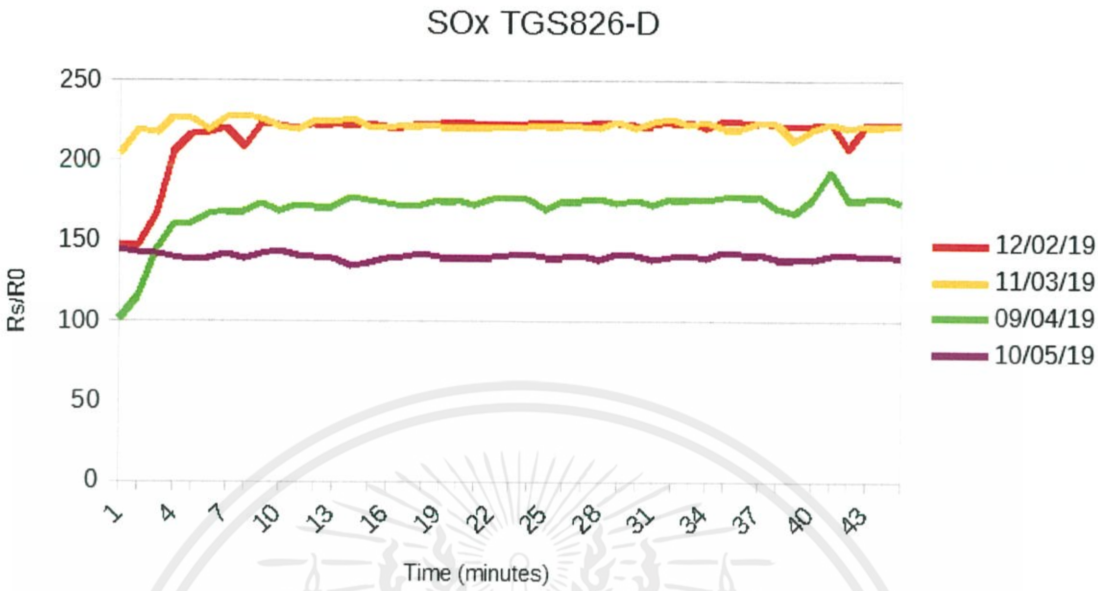
4.3.4.3.3 TGS826-C



กราฟที่ 4.34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปของ TGS826-C (SOx)

จากกราฟแสดงให้เห็นถึงสัญญาณของเดือนเมษายนที่มากกว่ามีนาคมซึ่งไม่เป็นไปตามที่คาดเอาไว้จากกราฟที่ 4.32 และ 4.33 ที่ได้ให้เหตุผลเอาไว้อาจไม่สอดคล้องสำหรับเซ็นเซอร์ตัวนี้ก็เป็นได้เพราะ TGS826-A และ TGS826-B นั้นมีการตอบสนองที่ไม่ดีพอต่อ SOx แต่ในกรณีนี้กลับมีการตอบสนองจนทำให้ได้ค่าสัญญาณที่แตกต่างกันออกไปสาเหตุอาจเป็นเพราะสิ่งปนเปื้อนที่พอไปเกาะอยู่บนพื้นผิวแล้วพอโมเลกุลของ SOx เข้ามาจับกับผิวเซ็นเซอร์อาจทำให้ค่าความต้าน Rs ที่มากขึ้น

4.3.4.3.4 TGS826-D



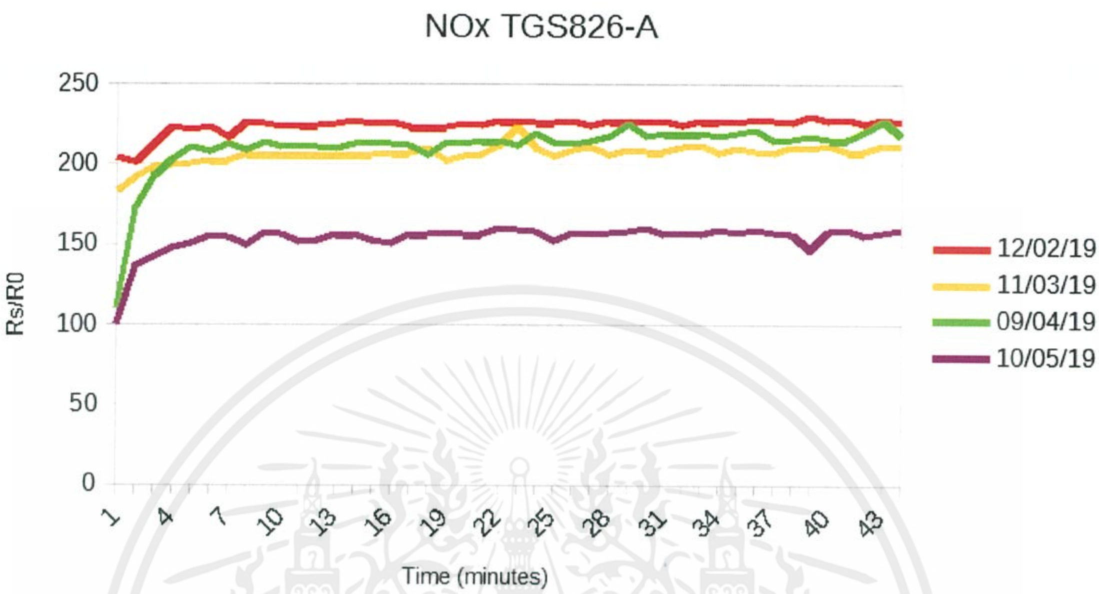
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปของ TGS826-D (SOx)

จากกราฟนี้เป็นกราฟที่ช่วยยืนยันได้ว่า TGS826 อาจมีการตอบสนองที่ไม่ดีพอสำหรับการนำไปใช้วัด SOx เพื่อเก็บสัญญาณนำไปใช้เป็นชุดข้อมูลสำหรับการรู้จำกลิ่นของปัญญาประดิษฐ์ก็เป็นได้แต่เนื่องจากการทดลองครั้งนี้ข้อมูลชุดแรกที่จะใช้และนำไปเป็นชุดข้อมูลฝึกสอนถูกกำหนดไว้แล้วว่าจะใช้ข้อมูลของเดือนมีนาคมดังนั้นหากข้อมูลของเดือนมีนาคมและเมษายนมีความแตกต่างที่มากพอก็ยังคงสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ได้

จากข้อมูลการทดลองกราฟที่ 4.27 จนถึง 4.31 ในส่วนของ TGS826-B และ TGS826-D ให้ค่าสัญญาณของเดือนกุมภาพันธ์และเดือนมีนาคมมีระดับสัญญาณที่ใกล้เคียงกันมากซึ่งในความเป็นจริงแล้วในผลทดลองของ CO ที่ TGS826-B และ TGS826-D ระดับสัญญาณที่ได้จากเดือนมีนาคมถึงจะต่ำกว่าเดือนกุมภาพันธ์แต่ก็ยังมีความใกล้เคียงกันอยู่ซึ่งจะสอดคล้องกับกรณีของ SOx นั้นแสดงให้เห็นว่าระดับสัญญาณของ TGS826-A และ TGS826-C ที่ผิดปกติไปนั้นอาจเกิดมาจากการที่เข็มของ AFM ไปทำลายพื้นผิวและฝุ่นที่ไปเกาะบนพื้นผิวเซ็นเซอร์ในขั้นตอนการปิดฝาครอบ

4.3.4.4 ค่าสัญญาณของ NOx

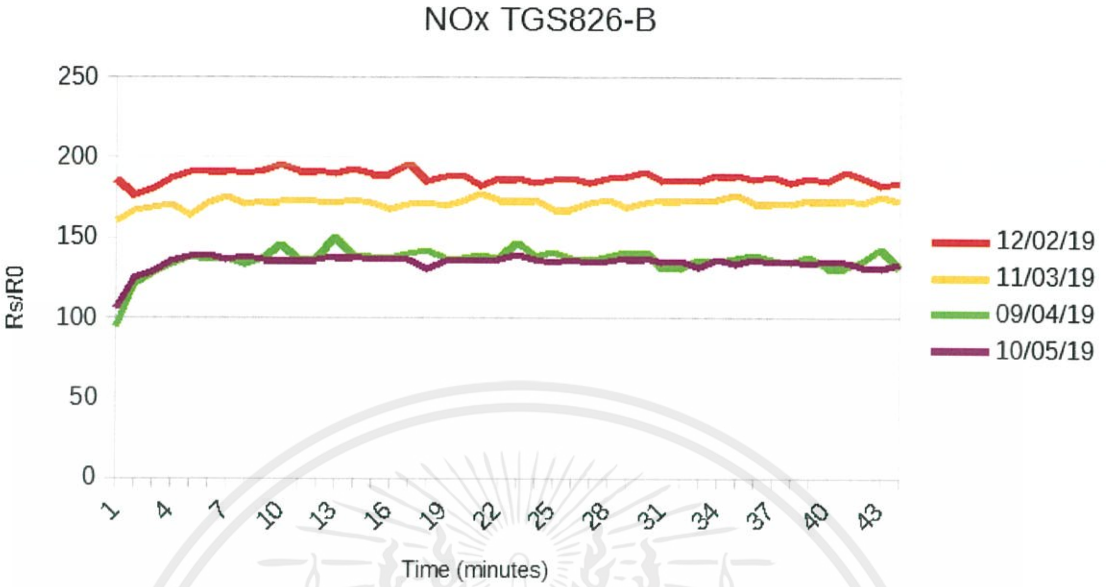
4.3.4.4.1 TGS826-A



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปของ TGS826-A (NOx)

จากกราฟค่าสัญญาณที่ได้นั้นยังไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงสักเท่าไหร่ซึ่งสาเหตุที่นั้นคาดว่าเซ็นเซอร์ตัวนี้พื้นผิวนั้นอาจไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่มากพอหรือเซ็นเซอร์ตัวนี้อาจยังมีการตอบสนองกับ NOx

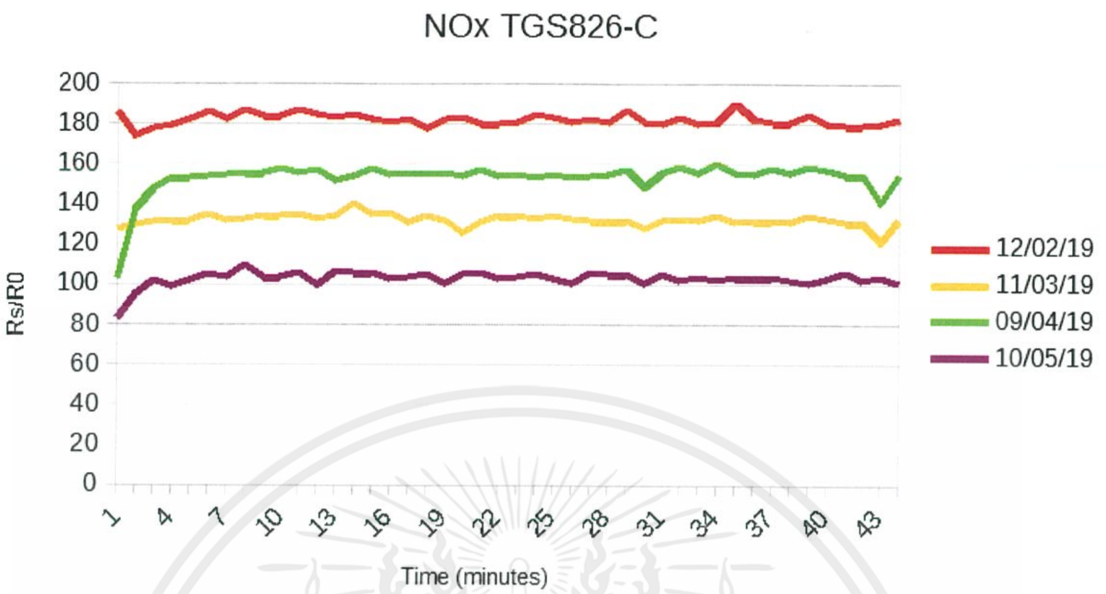
4.3.4.4.2 TGS826-B



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปของ TGS826-B (NOx)

จากผลการทดลองค่าสัญญาณของเดือนมีนาคมมีค่ามากกว่าเดือนเมษายนตามที่คาดเอาไว้ ซึ่ง TGS826-B นั้นสำหรับทุกการทดลองมีค่าไปในทางเดียวกันทั้งหมดนั้นแสดงว่า TGS826-B อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวที่มากพอจะเปลี่ยนแปลงให้ค่าสัญญาณนั้นมีความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนเหมาะสำหรับนำไปใช้ในการทดลองการรู้จำกลิ่นของปัญญาประดิษฐ์

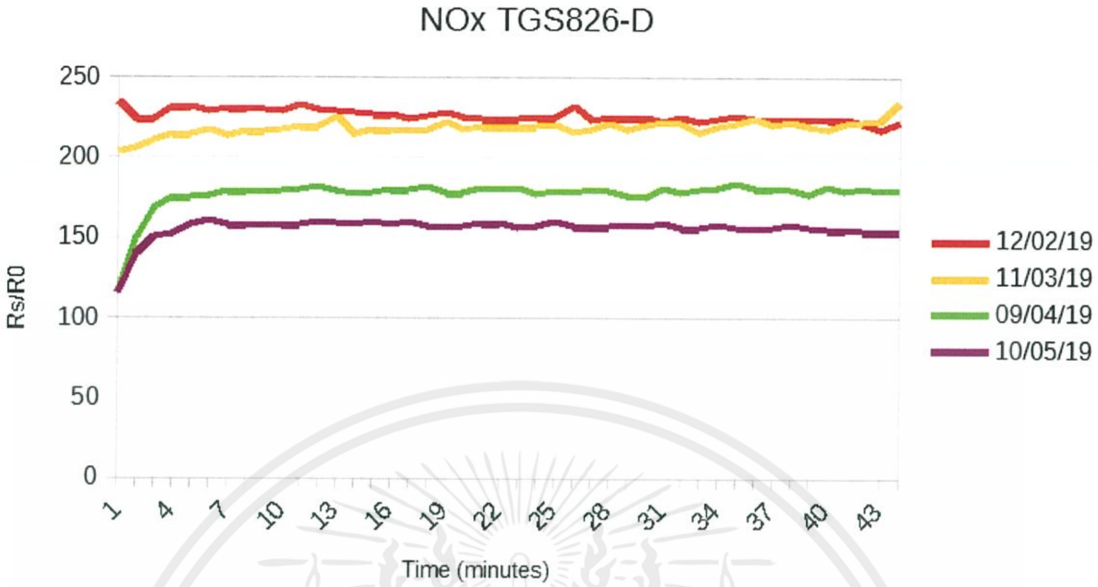
4.3.4.4.3 TGS826-C



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปของ TGS826-C (NOx)

จากกราฟค่าสัญญาณที่วัดได้มีแนวโน้มเหมือนกับ TGS826-C ตัวอื่นๆคือสัญญาณของเดือนเมษายนมากกว่ามีนาคมแสดงว่าสาเหตุที่เกิดนั้นเกิดมาจากเกาะติดของสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวแล้วทำให้ค่าความต้านทาน Rs เปลี่ยนแปลงไป

4.3.4.4.4 TGS826-D



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปของ TGS826-D (NOx)

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าสัญญาณของเดือนมีนาคมยังคงมากกว่าเดือนเมษายนซึ่งสาเหตุนั้นก็ยังคงคาดว่าเป็นเช่นเดียวกับกรณี TGS826-D ที่วัดกับแก๊สอื่นคือน่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวเซ็นเซอร์

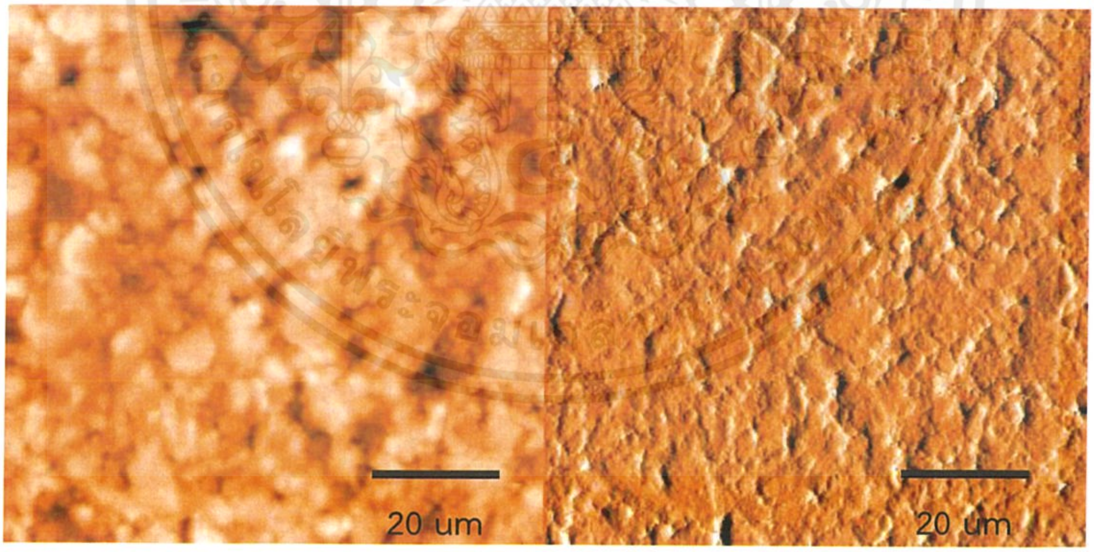
จากข้อมูลการทดลองรูปที่ 4.36 จนถึง 4.39 จากราฟระดับสัญญาณของเดือนกุมภาพันธ์กับมีนาคมของ TGS826-B และ TGS826-D ยังคงให้ค่าที่ใกล้เคียงเหมือนในกรณีของการวัด CO และ SOx จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าระดับสัญญาณที่ผิดปกติของ TGS826-A และ TGS826-C เกิดมาจากพื้นผิวของเซ็นเซอร์ถูกทำลายไปในขั้นตอนการวัดภาพด้วย AFM ในช่วงกุมภาพันธ์ถึงมีนาคมจริงและอีกข้อสรุปหนึ่งที่ได้จากผลลการทดลองนี้คือระดับสัญญาณจากการวัด Air zero ที่มีค่าผิดปกติทั้ง 4 ตัวนั้นเกิดมาจากความไม่บริสุทธิ์ของ Air zero ที่ใช้งานนั้นเอง

อีกข้อสังเกตุที่ได้จากการวิเคราะห์ระดับสัญญาณของ TGS826 ทั้งหมดที่ได้มาระดับสัญญาณของเดือนเมษายนของเซ็นเซอร์บางตัวจะมีความผิดปกติของระดับสัญญาณที่เหมือนกันอยู่นั้นก็คือระดับสัญญาณของเดือนเมษายนจะมากกว่าเดือนมีนาคมอันได้แก่ข้อมูลผลการทดลองกราฟ 4.28 4.30 4.32 4.34 4.36 และ 4.38 หากพิจารณาดูจะเห็นว่าข้อมูลที่กล่าวมาจะเกิดขึ้นกับเฉพาะ TGS826-A และ TGS826-C สาเหตุนั้นเกิดมาจากในกระบวนการทดลองนำเซ็นเซอร์ไปวัดภาพพื้นผิว

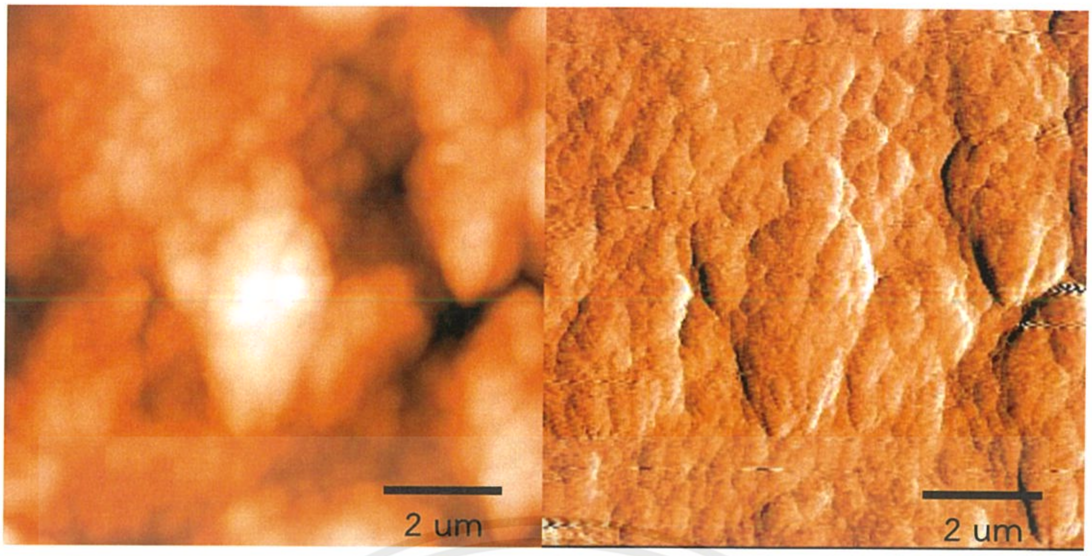
ด้วย AFM นั้นก่อนจะไปทดลองจะใช่ที่สูบลมลูกโปร่งมาใช้ทำความสะอาดทุกครั้งในกระบวนการทำความสะอาดในส่วนของ TGS826-A และ TGS826-C อาจทำความสะอาดจนทำให้ฝุ่นที่ติดอยู่บริเวณพื้นผิวหลุดออกไปมากขึ้นดังนั้นจึงทำให้โมเลกุลของแก๊สที่จะมาเกาะบนพื้นผิวมีโอกาสที่จะเกาะได้มากขึ้นเมื่อนำไปวัดระดับสัญญาณจึงทำให้สัญญาณของเดือนเมษายนมีค่ามากกว่าเดือนมีนาคม

4.4 ผลการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของพื้นผิวเซ็นเซอร์แก๊สที่บริเวณเครื่องหมายบนพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

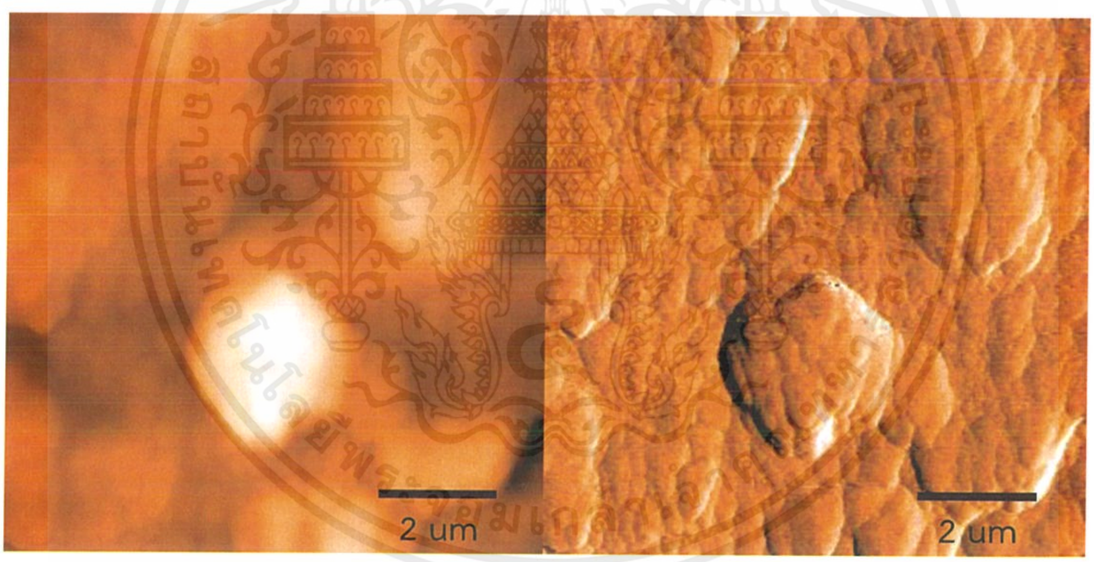
ภาพที่ได้จากกล่องจุลทรรศน์โดยเครื่อง AFM จาก บริษัท Nanosurf รุ่น CoreAFM ได้ถูกวัดที่ บริษัท แอลเอ็มเอส อินสตรูเมนต์ (LMS Instruments Co., Ltd) มีรายละเอียดการวัดดังนี้ การตั้งค่าตัวแปร 1) Scan group Measurement environment: air, Operating mode: Dynamic Force, Cantilever: Tap190Al-G, Image size: 100um x 100um, Scan direction: Up, Time/Line: 780ms, Points: 256, Lines: 256, และ 2) การตั้งค่าตัวแปร Approach Setpoint (%), P-gain, I-gain, D-gain, Tip Voltage (V), และ Vibration amplitude (V) ในส่วนของค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับแต่ละชิ้นงานที่วัดโดยในทุกๆครั้งที่จะทำการทดลองผู้ทดลองจะต้องตรวจสอบตำแหน่งของเซ็นเซอร์ก่อนการวัดทุกครั้งว่าคำว่า TGS826 ที่ปรากฏอยู่ด้านข้างของฐานพลาสติกแข็งสีดำของเซ็นเซอร์จะต้องหันหน้าเข้าทางด้านในของตัวเครื่องเสมอเพื่อที่จะทำให้ได้ภาพในการวัดที่มีความใกล้เคียงกันในแต่ละเดือนอย่างมากที่สุดเท่าที่วัดได้ โดยในช่วงเดือนมกราคมผู้ทดลองได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเซ็นเซอร์โดยได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.38 4.39ก 4.39ข และ 4.39ค



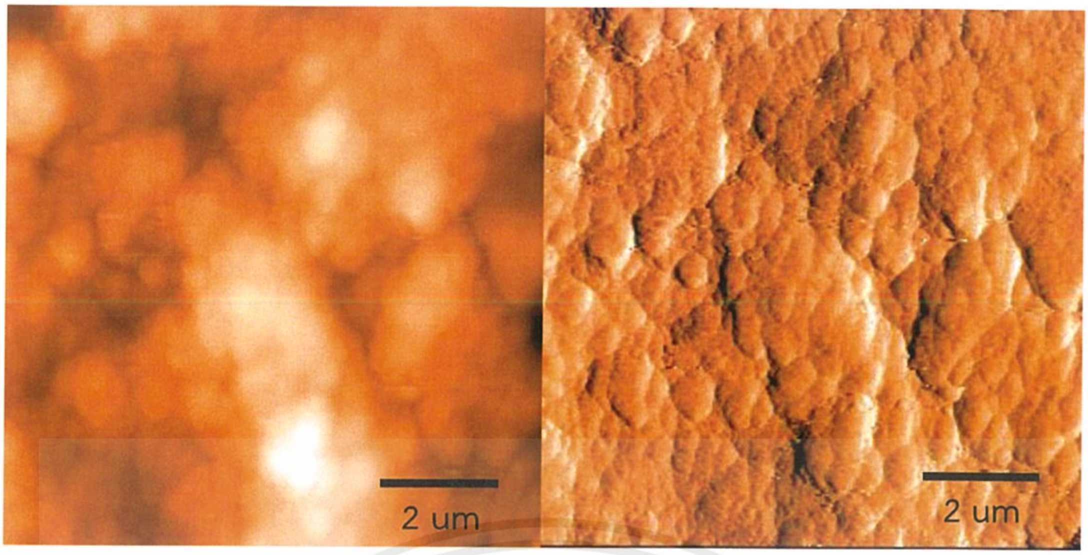
รูปที่ 4.40 พื้นผิวของ TGS826 ก่อนยิงเลเซอร์ ขนาด 90 um x 90 um **ภาพซ้าย** ภาพลักษณะทางกายของพื้นผิว TGS826 **ภาพขวา** ภาพจากการคำนวณความคลาดเคลื่อนจากการประมวลผลของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม



รูปที่ 4.41ก พื้นผิวของ TGS826 ก่อนยิงเลเซอร์ ขนาด 10 um x 10 um ในการวัดครั้งที่ 1 **ภาพซ้าย** ภาพลักษณะทางกายของพื้นผิว TGS826 **ภาพขวา** ภาพจากการคำนวณความคลาดเคลื่อนจากการประมวลผลของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม



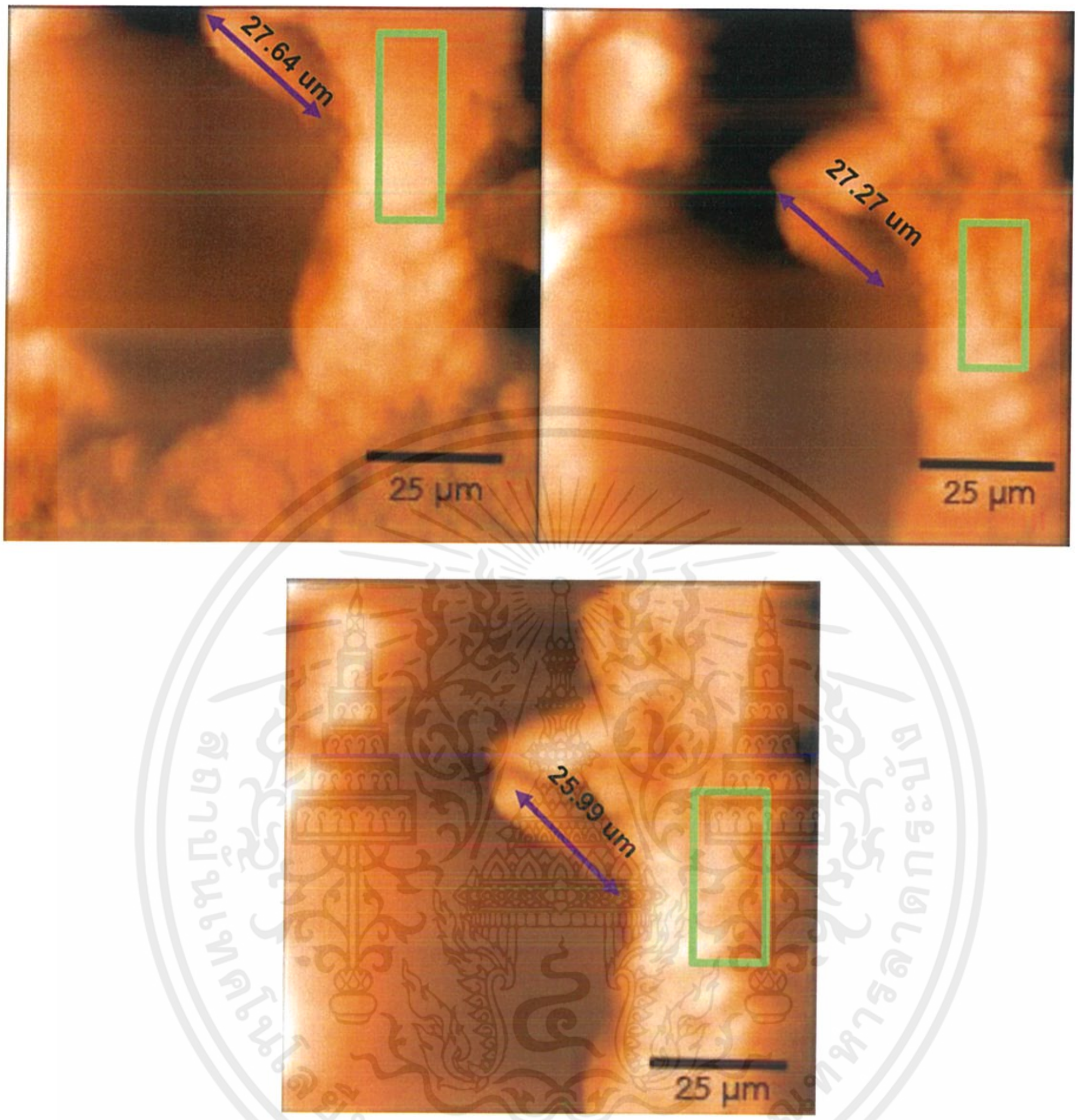
รูปที่ 4.41ข พื้นผิวของ TGS826 ก่อนยิงเลเซอร์ ขนาด 10 um x 10 um ในการวัดครั้งที่ 2 **ภาพซ้าย** ภาพลักษณะทางกายของพื้นผิว TGS826 **ภาพขวา** ภาพจากการคำนวณความคลาดเคลื่อนจากการประมวลผลของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม



รูปที่ 4.41ค พื้นผิวของ TGS826 ก่อนยิงเลเซอร์ ขนาด 10 um x 10 um ในการวัดครั้งที่ 3 **ภาพซ้าย** ภาพลักษณะทางกายของพื้นผิว TGS826 **ภาพขวา** ภาพจากการคำนวณความคลาดเคลื่อนจากการประมวลผลของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว TGS826 ก่อนไปยิงเลเซอร์จากรูปที่ 4.40 พบว่าพื้นผิวมีลักษณะเป็นก้อน (Grain) หลายก้อนมารวมกันและเมื่อขยายภาพดูพื้นผิวด้วยกำลังขยายสูงขึ้น ที่ขนาดภาพ 10 um x 10 um พบว่าจากรูปที่ 4.40 และรูปที่ 4.41ก - 4.41ค พื้นผิวประกอบด้วยก้อนขนาดแตกต่างกันไป มีทั้งขนาดใหญ่และเล็กกว่าหนึ่งไมโครเมตร โดยก้อนขนาดใหญ่ที่มีขนาดตั้งแต่ 1 um - 2 um ที่วัดได้จากรูปที่ 4.40 เกิดจากการรวมตัวกันของก้อนที่มีขนาดเล็กกว่าหนึ่งไมโครเมตร และเมื่อสุ่มวัดขนาดของก้อนขนาดเล็กพบว่ามีความกว้างเฉลี่ยประมาณ 644±196 nm

4.4.1 เซ็นเซอร์แก๊ส TGS826-A

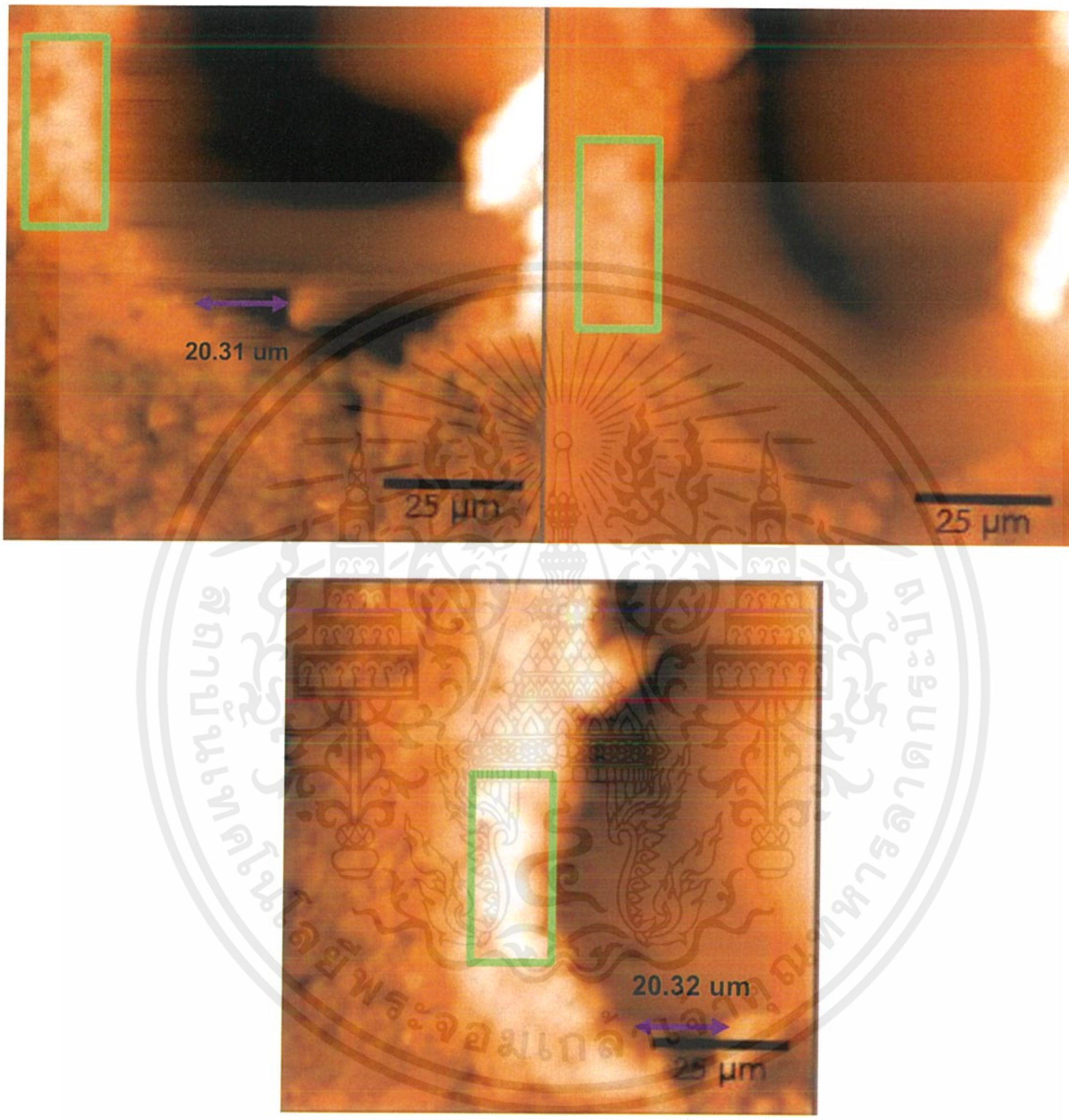


รูปที่ 4.42ก ภาพการเปลี่ยนแปลงไปของพื้นผิวเซ็นเซอร์ TGS826-A **ภาพซ้ายบน** ภาพที่วัดไว้เมื่อ 18 มีนาคม 2562 **ภาพขวาบน** ภาพที่วัดไว้เมื่อ 19 เมษายน 2562 **ภาพล้าง** ภาพที่วัดไว้เมื่อ 16 พฤษภาคม 2562

ในบริเวณที่ในรอบสี่เหลี่ยมสีเขียวล้อมรอบเอาไว้นั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวและตำแหน่งที่ผู้ทดลองวัดขนาดเอาไว้โดยเลือกวัดจากตำแหน่งที่เห็นพื้นผิวบางส่วนง่ายที่สุดจากการวัดพบว่าหลังจากเดือนมีนาคมขนาดส่วนของพื้นผิวที่วัดจะมีขนาดที่เล็กลงจาก 27.64 um ลงเป็น 27.27 um ซึ่งจากผลวิเคราะห์สำหรับค่าสัญญาณของ TGS826-A ที่ได้ระบุเอาไว้ในหัวข้อ 4.3.3 นั้นจะสังเกตเห็นว่าการที่สัญญาณของ TGS826-A มีการเปลี่ยนแปลงนั้นเกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงของ

พื้นผิวเซ็นเซอร์จริงแต่ในส่วนที่ทีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ไม่มากนักอาจเป็นเพราะว่าเหตุผลเดิมคือการเปลี่ยนแปลงนั้นอาจยังไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ

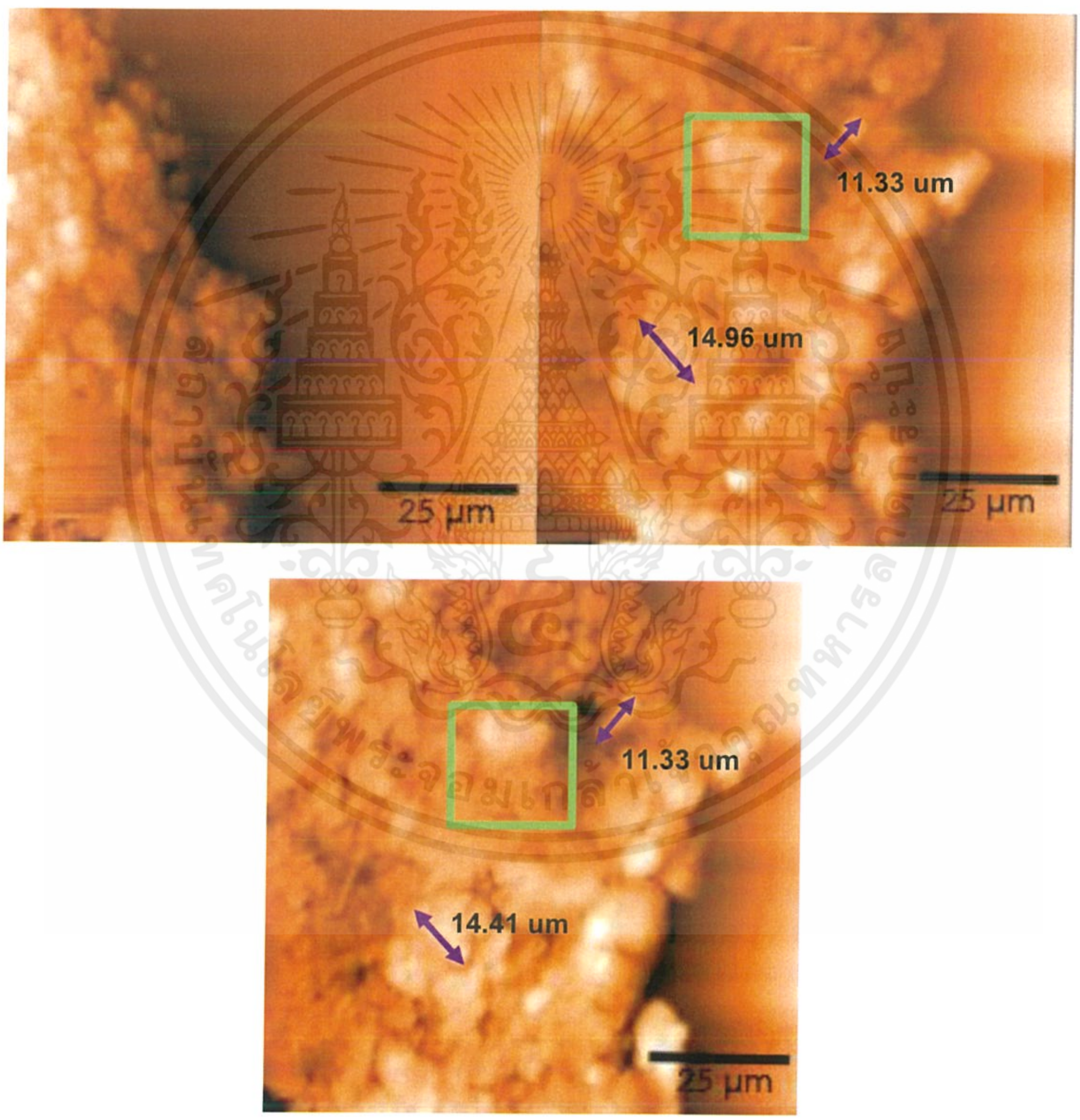
4.4.2 เซ็นเซอร์แก๊ส TGS826-B



รูป 4.42ข ภาพการเปลี่ยนแปลงไปของพื้นผิวเซ็นเซอร์ TGS826-B **ภาพซ้ายบน** ภาพที่วัดไว้เมื่อ 18 มีนาคม 2562 **ภาพขวาบน** ภาพที่วัดไว้เมื่อ 19 เมษายน 2562 **ภาพล้าง** ภาพที่วัดไว้เมื่อ 16 พฤษภาคม 2562

จากภาพที่ได้บริเวณที่ทำสี่เหลี่ยมสีเขียวล้อมรอบเอาไว้เห็นได้ชัดว่าในกรณีของภาพขวานั้นพื้นที่บางส่วนที่ไม่สามารถวัดได้เนื่องจากบริเวณที่ระบุเอาไว้มีความสูงที่แตกต่างอย่างมากจากบริเวณขอบใกล้กับสัญลักษณ์ที่ได้ไปทำมาดังนั้นจึงทำให้ได้ภาพที่ไม่เห็นผิวขรุขระซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวเกิดการเปลี่ยนแปลงจริงดังนั้นจากการวิเคราะห์ด้านบนที่แสดงให้เห็นถึงค่าสัญญาณที่แปลงไปนั้นจึงสรุปได้ว่าในกรณีของ TGS826-B นั้นที่ค่าสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวเซ็นเซอร์

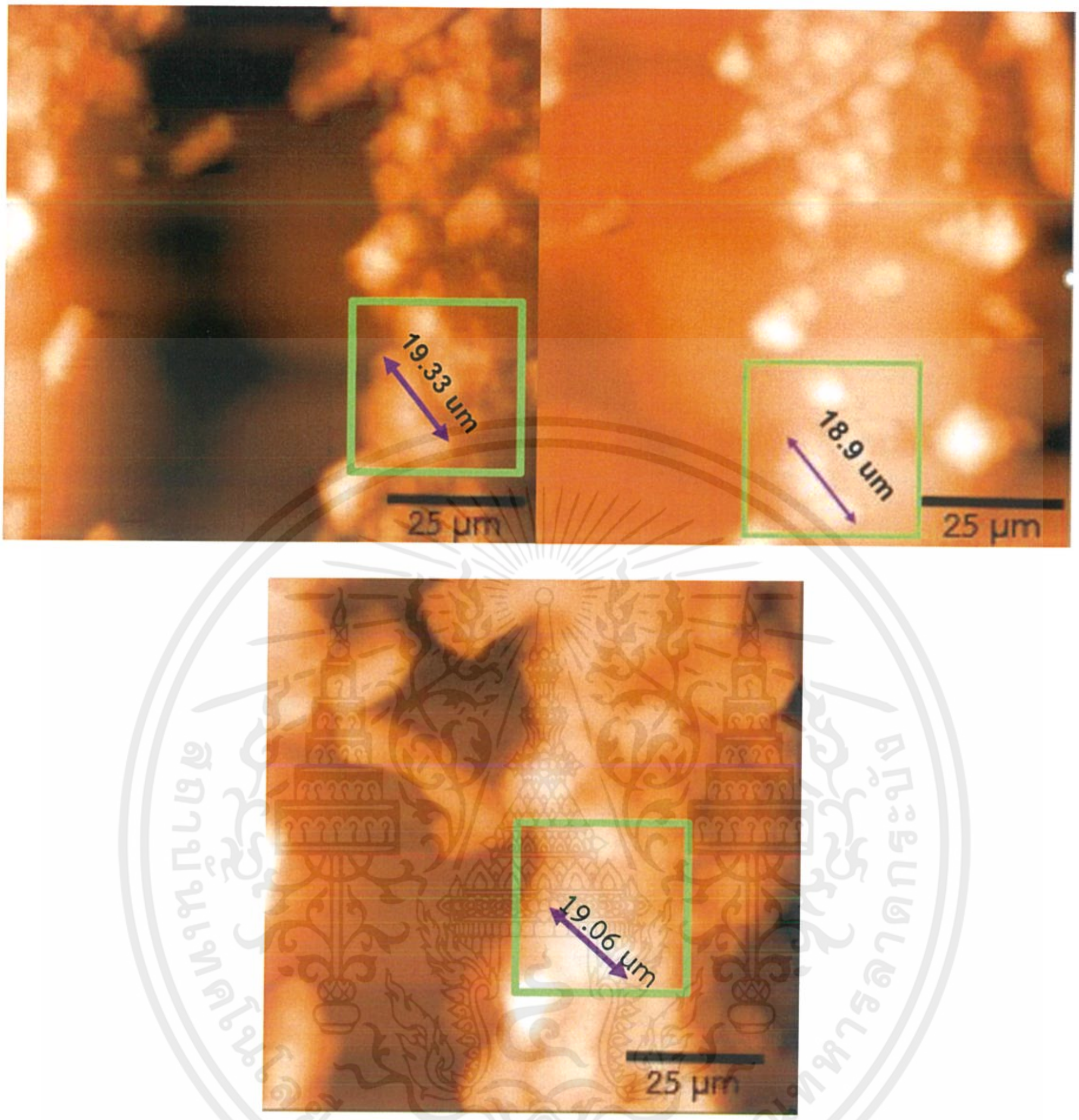
4.4.3 เซ็นเซอร์แก๊ส TGS826-C



รูปที่ 4.42ค ภาพการเปลี่ยนแปลงไปของพื้นผิวเซ็นเซอร์ TGS826-C **ภาพซ้ายบน** ภาพที่วัดไว้เมื่อ 18 มีนาคม 2562 **ภาพขวาบน** ภาพที่วัดไว้เมื่อ 19 เมษายน 2562 **ภาพล้าง** ภาพที่วัดไว้เมื่อ 16 พฤษภาคม 2562

จากการทดลองพบว่าภาพของเดือนมีนาคมและเมษายนไม่สามารถนำมาใช้ในการเปรียบเทียบได้เพราะเนื่องจากในการวัดจริงนั้นพบว่าบริเวณเดิมที่วัดในเดือนมีนาคมมีพื้นผิวที่โค้งมากดังนั้นขณะที่สั่งให้หัวเข็มนั้นจรดไปยังที่ตำแหน่งที่ต้องการวัดหัวเข็มจะเกิดการขยับไปยังบริเวณอื่นทันทีดังนั้นการที่จะวัดให้ได้รูปภาพบริเวณตำแหน่งเดิมของ TGS826-C นั้นจึงเป็นไปได้ยากใน แต่ในการทดลองวัดในเดือนพฤษภาคมพบว่าภาพที่ได้จากเดือนนี้ได้ภาพเหมือนกับเดือนเมษายนดังนั้นหากต้องการเปรียบเทียบภาพของ TGS826-C จะสามารถใช้ได้เพียงภาพจากเดือนเมษายนและพฤษภาคมเท่านั้น

4.4.4 เซ็นเซอร์แก๊ส TGS826-D



ภาพที่ 4.42ง ภาพการเปลี่ยนแปลงไปของพื้นผิวเซ็นเซอร์ TGS826-D **ภาพซ้ายบน** ภาพที่วัดไว้เมื่อ 18 มีนาคม 2562 **ภาพขวาบน** ภาพที่วัดไว้เมื่อ 19 เมษายน 2562 **ภาพล้าง** ภาพที่วัดไว้เมื่อ 16 พฤษภาคม 2562

จากภาพเมื่อไม่พิจารณาถึงสัญญาณที่เข้ามารบกวนในรูปภาพจะเห็นว่าบริเวณที่ทำสี่เหลี่ยมสีเขียวล้อมรอบเอาไว้ทางด้านขอบขวาจะมีลักษณะเหมือนกับมีพื้นผิวบางส่วนหายไปซึ่งยืนยันว่าพื้นผิวนั้นเปลี่ยนแปลงไปจริงจึงทำให้สัญญาณของ TGS826-D ในเดือนเมษายนนั้นเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมตามที่ได้วิเคราะห์เอาไว้

4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าสัญญาณด้วยการเรียนรู้ของเครื่องจักรโดยใช้แบบจำลอง ซัพพอร์ต เวกเตอร์ แมชชีน (SVM)

ในการเลือกข้อมูลชุดฝึกสอนและชุดทดสอบมีวิธีการเลือกเพื่อนำข้อมูลไปใช้กับแบบจำลอง SVM ดังหัวข้อ 2.3 และ 3.3.1.1 โดยการทดสอบจะให้ชุดข้อมูลเดือนกุมภาพันธ์เป็นชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ คือ ชุดข้อมูลจากเดือนกุมภาพันธ์ มีนาคม เมษายน และ พฤษภาคม โดยสรุปวิธีการจัดชุดข้อมูลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การกำหนดชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบจากข้อมูลการวัดแก๊สมาตราฐาน

TGS826	Training set กุมภาพันธ์	Test set กุมภาพันธ์	Test set มีนาคม	Test set เมษายน	Test set พฤษภาคม
A	แก๊สมาตราฐาน	แก๊สมาตราฐาน	แก๊สมาตราฐาน	แก๊สมาตราฐาน	แก๊สมาตราฐาน
B	แก๊สมาตราฐาน	แก๊สมาตราฐาน	แก๊สมาตราฐาน	แก๊สมาตราฐาน	แก๊สมาตราฐาน
C	แก๊สมาตราฐาน	แก๊สมาตราฐาน	แก๊สมาตราฐาน	แก๊สมาตราฐาน	แก๊สมาตราฐาน
D	แก๊สมาตราฐาน	แก๊สมาตราฐาน	แก๊สมาตราฐาน	แก๊สมาตราฐาน	แก๊สมาตราฐาน

โดยข้อมูลจากตารางที่ 4.1 ได้มาจากการวัดสัญญาณไฟฟ้าของแก๊สมาตราฐาน คือ อากาศบริสุทธิ์ (Air zero) CO และ NOx โดยที่ชุดข้อมูลฝึกสอนของแต่ละเซ็นเซอร์ประกอบด้วยชุดข้อมูลของแก๊สมาตราฐานทั้ง 4 แก๊สในเดือนกุมภาพันธ์ และ ชุดข้อมูลทดสอบอีก 4 ชุดของแต่ละเซ็นเซอร์ประกอบไปด้วยข้อมูลแก๊สมาตราฐานทั้ง 4 แก๊สในเดือนกุมภาพันธ์ มีนาคม เมษายน และ พฤษภาคม เดือนละชุดข้อมูล โดยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องได้มาจากผลลัพท์ของเมทริกซ์คอนฟิวชั่นจากตารางที่ 4.3 โดยใช้ข้อมูลจำนวน 40 จุดข้อมูลในแต่ละข้อมูลแก๊ส ดังนั้นใน 1 ชุด ชุดข้อมูลฝึกสอนหรือชุดข้อมูลทดสอบมีข้อมูลของ อากาศบริสุทธิ์ (Air zero) 40 จุด CO 40 จุด และ NOx 40 จุด รวมใน 1 ชุดข้อมูลฝึกสอนหรือชุดข้อมูลทดสอบรวม 120 ชุดข้อมูลของแต่ละเดือนในแต่ละเซ็นเซอร์

ตารางที่ 4.2 ตารางสรุปการดำเนินการทดลองตั้งแต่วันที่ 21 มกราคม ถึง 16 พฤษภาคม 2562

เดือน	กิจกรรม			หมายเหตุ
	1	2	3	
ม.ค.	21 ม.ค.	-	-	เซ็นเซอร์อาจเสื่อมสภาพจากการยิงเลเซอร์จากร้าน Nakran Laser เมื่อ วันที่ 24 ม.ค. 2562
ก.พ.	12 ก.พ.	22 ก.พ.	23 ก.พ.–9 มี.ค. (วัดในอากาศปกติ)	เซ็นเซอร์อาจเสื่อมสภาพจากการตรวจสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม
มี.ค.	11 มี.ค.	18 มี.ค.	19 มี.ค.–7 เม.ย. (วัดด้วยแก๊สผสมออกซิเจนและไนโตรเจน)	เซ็นเซอร์อาจเสื่อมสภาพจากการตรวจสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมและการจำลองการใช้งานวัดแก๊สผสมออกซิเจนและไนโตรเจน
เม.ย.	9 เม.ย.	19 เม.ย.	1 พ.ค.–7 พ.ค. (วัดด้วยไอระเหยของเอทานอล)	เซ็นเซอร์อาจเสื่อมสภาพจากการตรวจสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมและการจำลองการใช้งานวัดไอระเหยของเอทานอล
พ.ค.	10 พ.ค.	16 พ.ค.	-	-

หมายเหตุ กิจกรรมที่ 1 คือ ทดลองวัดแก๊สมาตราฐานที่ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม

2 คือ นำเซ็นเซอร์ไปตรวจสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมที่บริษัทแอลเอ็มเอส อินสทรูเมนต์

3 จำลองการใช้งานของเซ็นเซอร์โดยการวัดในสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน

4.5.1 ผลการทดสอบจากเมทริกซ์คอนฟิวชั่นโดยการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองซัพพอร์ต เวกเตอร์ แมชชีน (SVM) ด้วยฟังก์ชันเคอร์เนลแบบเส้นตรง

ตารางที่ 4.3 จำนวนข้อมูลที่ทำนายได้ถูกต้องจากเมทริกซ์คอนฟิวชันด้วยเคอร์เนลฟังก์ชันแบบเส้นตรง

TGS826	กุมภาพันธ์			มีนาคม			เมษายน			พฤษภาคม		
	Class			Class			Class			Class		
	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2
A	38	36	40	40	0	38	32	2	37	40	0	0
B	33	39	38	37	1	0	34	9	0	40	0	0
C	25	35	38	40	0	0	36	0	0	40	0	0
D	36	38	40	36	2	5	38	1	0	40	0	0

โดยที่ class 0 คือ ชุดข้อมูลของอากาศบริสุทธิ์ (Air zero) class 1 คือ ชุดข้อมูลของ CO และ class 2 คือ ชุดข้อมูลของ NOx

จากตารางที่ 4.3 วันที่ 12 กุมภาพันธ์ซึ่งเป็นการทดลองวัดแก๊สมาตราฐานที่ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อมเป็นครั้งแรกหลังจากยิงเลเซอร์ดังนั้นข้อมูลชุดที่ได้จากเดือนกุมภาพันธ์เมื่อนำไปให้ระบบปัญญาประดิษฐ์รู้จำกลิ่นจึงทำให้จำนวนจุดที่ทำนายถูกต้องจากตารางที่ 4.4 ในเดือนกุมภาพันธ์ได้จำนวนจุดที่ทำนายถูกใกล้เคียง 40 จุด

จากตารางที่ 4.3 วันที่ 11 มีนาคม 2562 ทำการทดลองวัดแก๊สมาตราฐานที่ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อมหลังจากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้จากเดือนมีนาคมมาให้ระบบปัญญาประดิษฐ์รู้จำกลิ่นซึ่งในระหว่างช่วง 23 กุมภาพันธ์ ถึง 9 มีนาคม 2562 จำลองการใช้งานของเซ็นเซอร์โดยวัดกับอากาศปกติแต่ผลจากตารางที่ 4.4 ในเดือนมีนาคมจำนวนจุดที่ทำนายได้ลดลงมากในการทำนาย CO และ NOx แสดงว่าพื้นผิวเซ็นเซอร์ถูกทำลายไปจากการตรวจสภาพพื้นผิวด้วย AFM และจึงทำให้จำนวนจุดที่ทำนายถูกมีค่าที่ลดลง

จากตารางที่ 4.3 วันที่ 9 เมษายน 2562 ทำการทดลองวัดแก๊สมาตราฐานที่ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม โดย วันที่ 19 มีนาคม ถึง 7 เมษายน 2562 การทดลองจำลองการใช้งานจริงของเซ็นเซอร์ได้ทดลองวัดกับแก๊สไนโตรเจนและออกซิเจนและวันที่ 18 มีนาคม 2562 นำเซ็นเซอร์ไปตรวจสภาพพื้นผิวด้วย AFM ดังนั้นการที่ระบบปัญญาประดิษฐ์ทำนายจุดข้อมูลที่ถูกต้องที่น้อยลงเพราะพื้นผิวเกิดการเปลี่ยนแปลงไปโดยเกิดมาจากการถูกทำลายโดยเข็มของ AFM และปฏิกิริยาบนพื้นผิวของเซ็นเซอร์กับแก๊สออกซิเจนที่ใช้วัด

จากตารางที่ 4.3 วันที่ 10 พฤษภาคม 2562 เป็นการทดลองวัดแก๊สมาตราฐานที่ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อมครั้งสุดท้ายซึ่งก่อนหน้านี้ วันที่ 1 พฤษภาคม 2562 ถึง 7 พฤษภาคม 2562 เป็นการทดลองจำลองการใช้งานจริงในภาชนะบรรจุแก๊สโดยมีไอระเหยจากเอทานอล จากตารางที่ 4.4 เห็นได้ชัดว่าเมื่อนำเซ็นเซอร์ใช้วัดไอระเหยของเอทานอลเป็นเวลานานเมื่อนำชุดข้อมูลมาให้ระบบปัญญูประดิษฐ์รู้จำกลิ่นการทำนายจุดข้อมูลที่ถูกต้องจะลดลงมากกว่าในเดือน กุมภาพันธ์ มีนาคม และ เมษายน

โดยจากตารางที่ 4.3 สามารถแปลงข้อมูลให้เป็น f1-score เพื่อใช้พิจารณาเปอร์เซ็นต์ที่ระบบปัญญาประดิษฐ์สามารถทำนายจุดข้อมูลที่ถูกต้องของแต่ละแก๊สได้ในแต่ละเซ็นเซอร์ได้จากสมการ

$$F1 = (2 \times (Precision \times Recall) / (Precision \times Recall)) \times 100 \ [28]$$

โดยที่ F1: f1-score, Precision: ค่าความแม่นยำ, Recall: ค่าการระลึก

ตารางที่ 4.4 ค่าคะแนน f1 (f1-score) จากการรายงานจำแนกประเภท (Classification report)

TGS826	เดือน	Air zero	CO	NOx
A	ก.พ.	95%	94%	96%
	มี.ค.	94%	0%	66%
	เม.ย.	83%	9%	63%
	พ.ค.	50%	0%	0%
B	ก.พ.	88%	95%	92%
	มี.ค.	61%	5%	0%
	เม.ย.	48%	32%	0%
	พ.ค.	50%	0%	0%
C	ก.พ.	77%	91%	86%
	มี.ค.	50%	0%	0%
	เม.ย.	57%	0%	0%
	พ.ค.	50%	0%	0%
D	ก.พ.	94%	97%	94%
	มี.ค.	52%	9%	19%
	เม.ย.	50%	4%	0%
	พ.ค.	50%	0%	0%

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.2 4.1.3 และ 4.1.4 พบว่าข้อมูลของการวัดแก๊สมาตราฐานที่ศูนย์วิจัยและอบรมด้านสิ่งแวดล้อมในวันที่ 21 มาราคม ระดับสัญญาณของเซ็นเซอร์ก่อนนำไปยิงเลเซอร์ที่ร้าน Nakran Laser ในวันที่ 24 มกราคมนั้นสำหรับ CO และ NOx จะมีระดับสัญญาณที่ไม่แตกต่างกันมากแต่พอนำเซ็นเซอร์ทั้ง 4 ตัวไปวัดแก๊สมาตราฐานใหม่อีกรอบในวันที่ 12 กุมภาพันธ์ พบว่าระดับสัญญาณของเซ็นเซอร์ทั้ง 4 ที่ควรจะอยู่ในระดับเดียวกันเกินการแบ่งระดับสัญญาณออกเป็น 2 กลุ่มอย่างเห็นได้ชัดคือ TGS826-A และ TGS826-D มีระดับใกล้เคียงกัน และ TGS826-B และ TGS826-C ก็มีระดับสัญญาณอยู่ในระดับเดียวกันและเมื่อพิจารณาจากการตารางที่ 4.4 และ 4.5 พบว่า TGS826-C ในเดือนมีนาคมไม่สามารถทำนายข้อมูลของ CO และ NOx ได้แม้แต่ตัวเดียว และในการทำนายข้อมูลของอากาศบริสุทธิ์ (Air zero) แสดงให้เห็นว่า TGS826-C หลังจากยิงเลเซอร์ TGS826-C ไม่สามารถทำงานได้อย่างปกติและเนื่องจาก TGS826-B ให้สัญญาณที่เกาะกลุ่มอยู่กับสัญญาณของ TGS826-C ดังนั้นการทำนายค่าที่ได้จากเมทริกซ์คอนฟิวชันของ TGS826-B จึงไม่ใช้ค่าที่ถูกต้องด้วยเหตุนี้ผู้ทดลองจึงเห็นว่า TGS826-B และ TGS826-C ไม่สามารถใช้งานได้ตามปกติ

ในส่วนของ TGS826-A และ TGS826-D จากตารางที่ 4.3 - 4.4 สำหรับ TGS826-A เห็นได้ชัดว่าระบบปัญญาประดิษฐ์สามารถทำนายข้อมูลของอากาศบริสุทธิ์ (Air zero) CO และ NOx ได้ในเดือนกุมภาพันธ์ หลังจากนั้นในเดือนมีนาคมถึงพฤษภาคมระบบปัญญาประดิษฐ์จะทำนายได้เพียงอากาศบริสุทธิ์และ NOx เท่านั้น นั้นแสดงว่าถ้าหากพื้นผิวของ TGS826-A เกิดการเปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้ระบบปัญญาประดิษฐ์ไม่สามารถทำนายข้อมูลของ CO ได้ จากจำนวนของจุดข้อมูลที่ทำนายได้โดยได้นำข้อมูลของเดือนกุมภาพันธ์มาเป็นตัวอย่างสำหรับอากาศบริสุทธิ์ (Air zero) ระบบปัญญาประดิษฐ์ทำนายจุดข้อมูลถูก 38 จุดจาก 40 จุดคิดเป็น f1-score 95% สำหรับ CO ระบบปัญญาประดิษฐ์ทำนายจุดข้อมูลถูก 36 จุดจาก 40 จุดคิดเป็น f1-score 94% และสำหรับ NOx ระบบปัญญาประดิษฐ์ทำนายจุดข้อมูลถูก 40 จุดจาก 40 จุดคิดเป็น f1-score 96%

สำหรับ TGS826-D จากตารางที่ 4.3 - 4.4 พบว่าจำนวนที่ได้จากการทำนายจุดข้อมูลของแต่ละแก๊สมาตราฐานด้วยระบบปัญญาประดิษฐ์มีความใกล้เคียงกับ TGS826-A คือ อากาศบริสุทธิ์ (Air zero) CO และ NOx โดยของเดือนกุมภาพันธ์มี อากาศบริสุทธิ์ (Air zero) CO และ NOx ที่มีการทำนายได้คะแนน f1 ที่ใกล้เคียงกันของเดือนมีนาคม และในเดือนเมษายน อากาศบริสุทธิ์ (Air zero) CO และ NOx และ พฤษภาคม อากาศบริสุทธิ์ (Air zero)

จากผลการทดลองหลังจากคณะผู้ทดลองได้ให้ค่าสัญญาณกับแบบจำลอง SVM โดยในการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องจะสามารถคำนวณโดยใช้สมการ

$$CA = [(TN+TP) / (TN+TP+FN+FP)] \times 100\ \%$$

Classification Accuracy (CA) [29]

โดยที่ CA: Classification Accuracy, TN: True Negative, TP: True Positive, FN: False Negative, FP: False Positive.

โดยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ได้มาจะเกิดจากชุดข้อมูลฝึกสอนที่ถูกทดสอบด้วยชุดข้อมูลทดสอบโดยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ได้จะเป็นเปอร์เซ็นต์โดยรวมของการทำนายโดยคิดจากจำนวนจุดข้อมูลที่ทำนายถูกต้องทั้งหมดของในแต่ละเซ็นเซอร์โดยได้ค่าออกมาดังปรากฎในตารางที่ 4.6

4.5.2 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องโดยใช้ข้อมูลชุดฝึกสอนเดือนกุมภาพันธ์และชุดข้อมูลทดสอบเดือนกุมภาพันธ์ มีนาคม เมษายน และพฤษภาคม ของแต่ละเซ็นเซอร์

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นความถูกต้องเมื่อชุดข้อมูลทดสอบเป็นเดือนกุมภาพันธ์ มีนาคม เมษายน และพฤษภาคมและชุดข้อมูลฝึกสอนเป็นของเดือนกุมภาพันธ์ในการฝึกสอนแบบจำลอง

TGS826	เดือน	แก๊สมาตราฐาน
A	ก.พ.	95%
	มี.ค.	65%
	เม.ย.	59.17%
	พ.ค.	33.33%
B	ก.พ.	91.67%
	มี.ค.	31.67%
	เม.ย.	35.83%
	พ.ค.	33.33%
C	ก.พ.	85%
	มี.ค.	33.33%
	เม.ย.	30%
	พ.ค.	33.33%
D	ก.พ.	95%
	มี.ค	35.83%
	เม.ย.	32.5%
	พ.ค.	33.33%

จากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของ TGS826-A และ TGS826-D ส่วนใหญ่ได้มาจากการทำนายที่ถูกต้องโดยระบบปัญญาประดิษฐ์ของจุดข้อมูลที่ได้จากการวัด อากาศปกติ (Air zero) CO และ NOx ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์และหลังจากเดือนกุมภาพันธ์ส่วนใหญ่ได้มาจากการทำนายที่ถูกต้องโดยระบบปัญญาประดิษฐ์ของจุดข้อมูลที่ได้จากการวัด อากาศปกติ (Air zero) และ NOx โดยต่อไปนี้จะเป็นตัวอย่างของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของ TGS826-A เดือนกุมภาพันธ์ที่มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง 95% ที่เกิดมาจากการทำนายจุดข้อมูลที่ถูกต้องของระบบปัญญาประดิษฐ์ จากตารางที่ 4.3 โดยที่ อากาศบริสุทธิ์ (Air zero) ได้ 38 จุดจาก 40 จุด CO 36 จุด

จาก 40 จุด และ NOx 40 จุดจาก 40 จุด รวมจำนวนจุดที่ทำนายได้ถูกต้อง 114 จุดจาก 120 จุด นั้นจึงเป็นเหตุที่ว่าทำไมเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการทำนายจึงมี 95%

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากสมมติฐานที่ว่าการเสื่อมสภาพของพื้นผิวเซ็นเซอร์แก็สทำให้ค่าสัญญาณไฟฟ้าขณะตรวจวัดแก็สมีค่าต่ำลง และเซ็นเซอร์แก็ส 1 ตัวชนิดเดียวสามารถใช้รู้จำแก็สเดี่ยวได้โดยอาศัยปัญญาประดิษฐ์ จึงนำมาสู่การออกแบบการทดลองจำลองการใช้งานจริงของเซ็นเซอร์แก๊สและการศึกษาระดับสัญญาณไฟฟ้าและลักษณะทางกายภาพของเซ็นเซอร์ TGS826 ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์ชนิดเดียวกันกับเซ็นเซอร์ที่ใช้ในสถานีจมูกอิเล็กทรอนิกส์ของโครงการพัฒนาเครือข่ายจมูกอิเล็กทรอนิกส์โดยวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จากการศึกษาทดลองโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมตรวจสอบสภาพพื้นผิวเซ็นเซอร์พบว่าพื้นผิวมีลักษณะเป็นก้อนมีความกว้างเฉลี่ยประมาณ 644±196 nm และหลังการทดลองนำเซ็นเซอร์ไปใช้งาน และทำการตรวจสอบพื้นผิวอีกครั้งด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมพบว่าพื้นผิวส่วนใหญ่มีลักษณะทางกายภาพเหมือนเดิม มีเฉพาะบางจุดสังเกตที่มีสภาพเปลี่ยนไป

จากการทดลองวัดสัญญาณการตอบสนองของเซ็นเซอร์กับแก๊สมาตราฐาน 4 ชนิด คืออากาศบริสุทธิ์ แก๊สคาร์บอนอกไซด์ความเข้มข้น 45 ppm แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ความเข้มข้น 450 ppb และ แก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ 450 ppb จากการทดลองพบว่าเมื่อนำสัญญาณที่ได้จากการวัดไปทดสอบด้วยระบบปัญญาประดิษฐ์โดยใช้แบบจำลอง ซัพพอร์ต เวกเตอร์ แมชชีน พบว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพเพียงพอในการแยกแยะอากาศบริสุทธิ์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และ แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ โดยชุดข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลชุดทดสอบสร้างจากข้อมูลสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้จากแก๊สมาตราฐานทั้ง 4 เดือน คือ เดือนกุมภาพันธ์ มีนาคม เมษายน และ พฤษภาคม โดยใช้ข้อมูลสัญญาณของอากาศบริสุทธิ์ (Air zero) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และ แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ถึงแม้เซ็นเซอร์ TGS826 ไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้วัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ แต่เมื่อนำมาใช้งานร่วมกับระบบปัญญาประดิษฐ์โดยมีเซ็นเซอร์ TGS826-A สามารถแยกแยะแก๊สมาตราฐานได้เมื่อใช้ข้อมูลฝึกสอนชุดเดียวกันกับชุดข้อมูลชุดทดสอบได้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องได้ 95% หลังจากการตรวจสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมและนำเซ็นเซอร์ใช้งานวัดในอากาศปกติระบบปัญญาประดิษฐ์ทำนายเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องได้ 65%

ต่อมาหลังจากการตรวจสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมและนำเซ็นเซอร์ใช้งานวัดแก๊สผสมของแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนระบบปัญญาประดิษฐ์ทำนายเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องได้ 59.17% และสุดท้ายหลังการตรวจสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมและนำเซ็นเซอร์ใช้งานวัดไอระเหยของเอทานอลระบบปัญญาประดิษฐ์ทำนายเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องได้ 33.33% แสดงให้เห็นว่าเซ็นเซอร์ TGS826-A สามารถวัดอากาศบริสุทธิ์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้ก็ต่อเมื่อสภาพพื้นผิวของเซ็นเซอร์ยังไม่เกิดการเสื่อมสภาพและเซ็นเซอร์ยังทำงานตามปกติ แต่เมื่อนำเซ็นเซอร์ไปจำลองการใช้งานจริงในการวัดกับไอระเหยของเอทานอลจนทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของพื้นผิวและนำข้อมูลของอากาศบริสุทธิ์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และ แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ที่ได้จากการวัดแก๊สมาตราฐานอีกรอบนำไปทดสอบกับระบบปัญญาประดิษฐ์โดยใช้แบบจำลอง ซัพพอร์ต เวกเตอร์ แมชชีน พบว่าแบบจำลองนี้ไม่สามารถนำมาใช้แยกแยะแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ได้

จากผลทดลองสรุปผลได้ดังนี้ 1) เซ็นเซอร์แก๊สชนิดโลหะออกไซด์เมื่อถูกนำมาใช้งานวัดสารระเหยอินทรีย์เป็นระยะเวลานานค่าสัญญาณไฟฟ้าจะลดต่ำลง และ 2) แบบจำลอง ซัพพอร์ต เวกเตอร์ แมชชีน จะยังคงสามารถรู้จำแก๊สเดี่ยวได้อย่างถูกต้องก็ต่อเมื่อสภาพพื้นผิวเซ็นเซอร์ยังอยู่ในสภาพเดิมหรือยังไม่ถูกใช้งาน

สุดท้ายนี้คณะผู้ทดลองหวังว่างานวิจัยนี้จะมีประโยชน์ต่อการพัฒนาต่อยอดให้กับโครงการพัฒนาเครือข่ายจมูกอิเล็กทรอนิกส์ โดยวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในอนาคตและงานทางด้านปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้ในอนาคตจะได้สามารถพัฒนาระบบให้สามารถช่วยทำนายผลให้มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่มากยิ่งขึ้นเพื่อประหยัดงบประมาณการลงทุนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

บรรณานุกรม

[1] Taguchi. N. (1962) Gas-detecting device. Jpn Pat 45-38200

[2] Chiba A (1992) Development of the TGS gas sensor. In: Yamauchi S (ed) Chemical sensor technology, Elsevier, Amsterdam pp 1-18

[3] Matthias Batzill. "Surface Science Studies of Gas Sensing Materials: SnO_2", *Sensors*, vol. 6, 134–1366, September 2006.

[4] Jie He, Liyuan Xu, Peng Wang, Qin Wang, "A high precise E-nose for daily indoor air quality monitoring in living environment ", *Integration*, vol. 58, 256-294, June. 2017

[5] The PubChem Project. (2018). **Tin (IV) Oxide**. Retrieved Nov. 5, 2018 from https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/29011#section=To

[6] McLennan, F.,Kowalski, B.D. (1995). **Process Analytical Chemistry**. [online]. Page 217-218. Springer Netherlands. eBook ISBN 978-94-011-0591-0. Doi 10.1007/978-94-011-0591-0

[7] Table 1.1 "Gas sensing mechanism on SnO_2 according to ionosorption and oxygen vacancy models", Aleksander Gurlo, Insights into the mechanism of Gas Sensor Operation, Metal Oxide Nanomaterials for Chemical Sensors, Page 9, Springer Science+Business Media New York 2013, ISBN 978-1-4614-5395-6 (eBook)

[8] Fig 1.3, Aleksander Gurlo, Insights into the mechanism of Gas Sensor Operation, Metal Oxide Nanomaterials for Chemical Sensors, Page 12, Springer Science+Business Media New York 2013, ISBN 978-1-4614-5395-6 (eBook)

[9] Fig 1.4, Aleksander Gurlo, Insights into the mechanism of Gas Sensor Operation, Metal Oxide Nanomaterials for Chemical Sensors, Page 13, Springer Science+Business Media New York 2013, ISBN 978-1-4614-5395-6 (eBook)

[10] Medium. (2018). **Machine learning**. Retrieved Nov. 7, 2018 from

https://medium.com/@dumpdatasci.th/machine-learning-คืออะไรขพร้อมตัวอย่างใน ชีวิตจริง-b3f8faf0b4da

[11] Medium. (2018). **SVM**. Retrieved Nov. 7, 2018 from

https://medium.com/@dumpdatasci.th/machine-learning-คืออะไรพร้อมตัวอย่างใน ชีวิตจริง-b3f8faf0b4da

[12] Radishlav A. Potyrailo. (2013). **Metal Oxide Nanomaterials for Chemical Sensors**. [online]. Page 4. London, Springer. 10.1007/978-1-4614-5395-6_1

[13] Morrison, S. R. "*Surface Barrier Effects in Adsorption, Illustrated by Zinc Oxide. Advances in Catalysis*", 259–301. 1955

[14] Ananya Dey, "Semiconductor metal oxide gas sensors: A review", *Materials Science and Engineers: B*, vol. 229, 206-217, Mar. 2018

[15] Stone, F. S. "*Chemisorption and Catalysis on Metallic Oxides. Advances in Catalysis*", 1–53. 1962.

[16] Cox, D. F., Fryberger, T. B., & Semancik, S. "*Oxygen vacancies and defect electronic states on the SnO_2(110)-1×1 surface. Physical Review B*", 38(3), 2072–2083. 1988.

[17] A M Nzioka, Y J Kim, "Surface analysis of glass fibres using XPS and AFM: case study of glass fibres recovered from the glass fibre reinforced polymer using chemical recycling", *Journal of Physics: Conference Series*, vol.953, 2018

[18] R.W. Moncrieff, An instrument for measuring and classifying odours, J. Appl. Physiol., 16 (1961) 742.

[19] Gardner, J. W., & Bartlett, P. N. "*A brief history of electronic noses. Sensors and Actuators B: Chemical*", 18(1-3), 210–211. 1994.

[20] W.F. Wilkens and A.D. Hatman, An electronic analog for the olfactory processes, Ann. NY Acad Sci., 116 (1964) 608.

[21] Yu Lu, Liping Bian, Pengyuan, Yang, "Quantitative artificial neural network for electronic noses, *Analytica Chimica Acta"*, vol. 437, 101-110, July 2000

[22] L. Carmel, N. Sever, D. Lamcet, D. Harel, "An eNose algorithm for identifying chemicals and determining their concentration", *Sensors and Actuators B,* vol. 93(1-3), 77-83, Dec. 2002

[23] J. Fonollosa, E. Neftcib, R. Huertab, S.Marco, "Evaluation of calibration transfer strategies between metal oxide gas sensor arrays", *Procedia Engineering,* vol. 120, 261-264, 2015

[24] Matteo Tonezzera, et. al., "Selective discrimination of hazardous gases using one single metal oxide resistive sensor", *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 277, 121-128, Dec. 2018

[25] Jiaqi Chen, et. al., "Ultra-low power smart electronic nose system based on three-dimentional Tin-Oxide Nanotube Arrays", *ACSNANO*, vol. 12(6), May 2018

[26] Operation Manual Model T700 Dynamics Dilution Calibrator, 2015, Page 56.

[27] Figure 1, GasCAl 1100 Dilution Calibrator Version 3.5, 2012, Page 17.

[28] scikit-learn. (2018). **F1-score**. Retrieved Nov. 7, 2018 from https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.f1_score.html

[29] Researchgate. (2018). **Classification accuracy.** Retrieved May. 9, 2019 from https://www.researchgate.net/post/How_to_calculate_the_classifier_accuracy_after_classifying_the_segmented_regions

[30] Robert B. Northrop. (2017). **Introduction to Instrumentation and Measurements**. Third edition. United States of Ameriaca: CRC Press, Taylor & Francis Group. J. L. G.

[31] Fierro. (2600). **Metaloxides chemistry and applications.** United States of Ameriaca: CRC Press, Taylor & Francis Group.

[32] PyPi. (2018). **pyserial**. Retrieved Nov. 7, 2018 from https://pypi.org/project/pyserial/

[33] Python. (2018). **serial**. Retrieved Nov. 7, 2018 from https://www.python.org/search/?q=serial&submit=

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นาย วัชระ ชำนาญเดชากุล
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2539
ที่อยู่	8 ซอยวชิรธรรมสาธิต 37 ถนนสุขุมวิท 101/1 แขวงบางจาก เขตพระโขนง กรุงเทพมหานคร 10260 โทร 085-0440306
E-mail address	58110054@kmitl.ac.th watchara.c.lee@gmail.com
ประวัติการศึกษา	ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ระชั้นปริญญาตรีช่วงชั้นที่ 4 ณ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2558 เคยได้เข้ารับการศึกษาระดับชั้นปริญญาตรีชั้นปีที่ 1 ในระดับมัธยมศึกษาเคยรับการศึกษาที่โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง(ฝ่ายมัธยม)