



## รายงานวิจัย

การพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สเอทิลีนชนิดยืดหยุ่นด้วย  
อนุภาคของโลหะออกไซด์ระดับนาโนเมตร

Development of flexible micro-ethylene gas sensors  
based on metal-oxide nanoparticle.

ณัฐพร รัตนวิชัย

พิจิตรา องอาจ

รายงานวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามรายวิชาสหกิจศึกษา (401496)

สาขาวิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

พ.ศ. 2563

## รายงานวิจัย

การพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สเอทิลีนชนิดยืดหยุ่น

ด้วยอนุภาคของโลหะออกไซด์ระดับนาโนเมตร

Development of flexible micro-ethylene gas sensors  
based on metal-oxide nanoparticle.

### คณะผู้วิจัย

นางสาวณัฐพร รัตนวิชัย รหัสนักศึกษา 6040209103

นางสาวพิจิตรา องอาจ รหัสนักศึกษา 6040209113

ชั้นปีที่ 4 หมู่เรียนที่ 1

รายงานวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามรายวิชาสหกิจศึกษา (401496)

สาขาวิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

พ.ศ. 2563

หัวข้อโครงการ	การพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สเอทิลีนชนิดยึดหยุ่นด้วยอนุภาคของโลหะออกไซด์ระดับนาโนเมตร
ชื่อผู้วิจัย	นางสาวณัฐพร รัตนวิชัย นางสาวพิจิตรา องอาจ
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์)
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. พัฒนพงษ์ จำรัสประเสริฐ
หน่วยงาน	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ปีการศึกษา	2563

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สเอทิลีนชนิดยึดหยุ่นที่ประดิษฐ์จากอนุภาคนาโนทินออกไซด์เจือด้วยซีเรียมออกไซด์ และทดสอบความสามารถในการตรวจจับแก๊สเอทิลีนของเซ็นเซอร์ต่อความเข้มข้นของแก๊สเอทิลีนในปริมาณที่แตกต่างกัน เพื่อให้เกษตรกรสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่าย มีราคาประหยัด ในส่วนของฟิล์มเซ็นเซอร์เตรียมได้จากการนำส่วนผสมระหว่างอนุภาคนาโนและสารยึดเหนี่ยว (Binder) ในอัตราส่วน 0.03 g : 0.2 mL ไปสปินโคตติง (spin coating) ด้วยเงื่อนไข Step 1; 500 rpm 10 sec Step 2; 2,000 rpm 30 sec ลงบนวัสดุฐานรองรับแผ่น PI ที่สร้างลวดลายอิเล็กทรอนิกส์ด้วยทอง (Au) และทำการควบคุมความหนาของฟิล์มเซ็นเซอร์ให้ได้ความหนาที่ 10  $\mu\text{m}$  จากจำนวนครั้งของการสปินโคตติง จากนั้นทำการทดสอบไมโครฮีตเตอร์ พบว่าสามารถทำงานได้ถึงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลดีต่อการทำปฏิกิริยาของอนุภาคโลหะออกไซด์ที่อยู่บนเซ็นเซอร์กับแก๊สเอทิลีน ซึ่งเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นนี้จะถูกนำไปทดสอบหาความสามารถในการตรวจจับแก๊สเอทิลีนที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อนำไปประยุกต์กับการเป็นตัวบอกระยะการสุกของของผลไม้ และสามารถนำกระบวนการทำเซ็นเซอร์ไปประยุกต์ใช้กับการทำเซ็นเซอร์ชนิดอื่นต่อไปในอนาคต

<b>Title</b>	Development of flexible micro-ethylene gas sensors based on metal-oxide nanoparticle.
<b>Researcher</b>	Miss. Nattaporn Rattanawichai Miss. Phijitra Ongaj
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Physics)
<b>Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Pattanapong Jumrusprasert
<b>Institute</b>	Nakhon Ratchasima Rajabhat University
<b>Year</b>	2020

### **Abstract**

In this research aimed to develop Ethylene gas sensors which wer fabricated from metal oxide semiconductor based on SnO<sub>2</sub> doped CeO<sub>x</sub> nanoparticles. And test the ability to detect gas Sensor ethylene to different concentrations of ethylene gas. So that farmers can easily apply it. Have an economical price. The sensing films were fabricated by coating nanoparticles and a binder at a ratio of 0.03 g: 0.2 mL. And spin coating with condition Step 1; 500 rpm 10 sec Step 2; 2,000 rpm 30 sec onto the base material PI sheet that forms gold electrode pattern (Au). And to control the thickness of the sensor film to a thickness of 10 μm from the number of spinning coats. Then a micro heater test found to be able to work up to a temperature of 400 degrees Celsius which is beneficial for future use. And after that, it was tested for the built-in sensor's ethylene gas detection capability, which has not been tested. Because at BL6:DXL from Synchrotron Thailand Institute has no gas testing system, so this research has not achieved the objectives set.

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.พัฒนพงษ์ จำรัสประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิจัย และอาจารย์ประจำรายวิชาสหกิจศึกษา ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำ และเสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งอาจารย์ ผศ.ชำนาญ พร้อมจันทิก และอาจารย์ ชัญญา เสริมศรีทอง อาจารย์ที่มานิเทศน์ผู้วิจัย และคอยให้คำปรึกษา และข้อเสนอแนะส่งผลให้การฝึกสหกิจและการทำวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.พัฒนพงศ์ จันทร์พวง ผู้จัดการระบบลำเลียงแสงที่ 6 DXL สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่คอยดูแล ให้คำปรึกษา ให้ประสบการณ์ และแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิจัย ส่งผลให้การทำวิจัยราบรื่นผ่านไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ นางสาวพิมพ์ชนก เหลือสูงเนิน นางสาวจารุวรรณ หม่อนกระโทก และนายเกียรติศักดิ์ ศรีโสม นักวิทยาศาสตร์ประจำระบบลำเลียงแสงที่ 6 DXL ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คอยให้ความรู้และที่ปรึกษาในการทำวิจัย คอยแนะนำในการใช้เครื่องมือต่างๆ และคอยตรวจสอบแก้ไข ส่งผลให้เล่มวิจัยมีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

และขอขอบพระคุณครอบครัวของผู้วิจัย ที่คอยห่วงใยและให้กำลังใจ พร้อมทั้งสนับสนุนการศึกษาและค่าใช้จ่ายทั้งหมด และเป็นแรงใจอันสำคัญในการทำวิจัยครั้งนี้ตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จลุล่วงผ่านไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัย

## สารบัญ

บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1	1
บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2	4
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แก๊สเซ็นเซอร์ (gas sensor)	4
2.1.1 องค์ประกอบของแก๊สเซ็นเซอร์	5
2.1.2 ประเภทของแก๊สเซ็นเซอร์	6
2.1.3 สมบัติของแก๊สเซ็นเซอร์	7
2.1.4 แก๊สเซ็นเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์	8
2.2 หลักการตรวจวัดแก๊สของแก๊สเซ็นเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์	9
2.3 เอทิลีน (Ethylene)	10
2.4 อนุภาคนาโนที่ใช้เป็นตัวตรวจจับแก๊ส	11
2.4.1 ทินออกไซด์	11
2.4.2 ซีเรียมออกไซด์	11
บทที่ 3	13
วิธีการดำเนินงาน	13
3.1 การสร้างเซ็นเซอร์	13
3.1.1 กระบวนการสร้างอิเล็กทรอนิกส์และฮาร์ดแวร์	13
3.1.2 การเตรียมตัวตรวจจับแก๊สเอทิลีน	15

3.2 กระบวนการตรวจจับแก๊สเอทิลีน	17
3.2.1 การทดสอบแก๊สเอทิลีนด้วยเครื่อง SRI 310C Gas chromatography	17
3.2.2 ทดสอบแก๊สเอทิลีนด้วย เซ็นเซอร์ รุ่น C2H4/CA-10 (Commercial sensor)	19
3.2.3 ทดสอบแก๊สเอทิลีนด้วยเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์	20
บทที่ 4	22
ผลการศึกษา	22
4.1 ผลการทดสอบไมโครฮีตเตอร์	22
4.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนของสารยึดเหนี่ยว	23
4.3 ผลการศึกษาความหนาของอนุภาคนาโน	24
4.4 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการการกำจัดสารยึดเหนี่ยว	27
4.5 ผลการศึกษาความสามารถในการตรวจจับแก๊สเอทิลีน	28
4.5.1 ผลการทดสอบแก๊สเอทิลีนด้วยเครื่อง SRI 310C Gas chromatography	28
4.5.2 ผลทดสอบแก๊สเอทิลีนด้วยเซ็นเซอร์ รุ่น C2H4/CA-10 (Commercial sensor)	31
4.5.3 ทดสอบแก๊สเอทิลีนด้วยเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์	31
บทที่ 5	32
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	32
5.1 สรุปผลการศึกษา	32
5.2 ข้อเสนอแนะ	32
5.3 ปัญหาที่พบ	32
บรรณานุกรม	33
ภาคผนวก	34
ภาคผนวก ก	35
วัสดุและสารเคมี	35
ภาคผนวก ข	37
เครื่องมือและอุปกรณ์	37
ประวัติผู้วิจัย	40

## สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบของแก๊สเซ็นเซอร์	5
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของเอทิลีน	10
ภาพที่ 3.1 วิธีการดำเนินงานวิจัย	13
ภาพที่ 3.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี	14
ภาพที่ 3.3 ก. อิเล็กโทรด ข. ฮีตเตอร์ขาแคบ ค. ฮีตเตอร์ขากว้าง	15
ภาพที่ 3.4 ติดแคปตันเทปบริเวณขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดลงบนกระจกสไลด์	16
ภาพที่ 3.5 ผสมสารยึดเหนี่ยวกับวัสดุในโถรงบดสาร	16
ภาพที่ 3.6 หยอดสารละลายลงบนอิเล็กโทรดและทำการเคลือบด้วยเทคนิค Spin Coating	17
ภาพที่ 3.7 เสาเพื่อกำจัด binder	17
ภาพที่ 3.8 ตรวจวัดแก๊สเอทิลีนด้วยเครื่อง SRI 310C Gas Chromatograph	18
ภาพที่ 3.9 วัดแก๊สเอทิลีนด้วยเซ็นเซอร์ รุ่น C2H4/CA-10 บริษัท Membrapor AG	20
ภาพที่ 3.10 แผนภาพทดสอบแก๊สเอทิลีน	20
ภาพที่ 4.1 การทดสอบไมโครฮีตเตอร์	22
ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง เมื่อไมโครฮีตเตอร์ถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ	23
ภาพที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มเซ็นเซอร์ของสารยึดเหนี่ยวในอัตราส่วนต่างๆ	24
ภาพที่ 4.4 ความหนาของฟิล์มหมุนเหวี่ยง Step 1; 500 rpm 10 sec Step 2; 2,000 rpm 30 sec	24
ภาพที่ 4.5 ความหนาของฟิล์มหมุนเหวี่ยง Step 1; 500 rpm 10 sec Step 2; 1,500 rpm 30 sec	25
ภาพที่ 4.6 ความหนาของฟิล์มเซ็นเซอร์ที่สปินโคตติงต่างกัน จากเครื่อง Optical Surface Profiler	26
ภาพที่ 4.7 พื้นผิวของฟิล์มเซ็นเซอร์ที่สปินโคตติงต่างกัน จากกล้อง Olympus Microscope	27
ภาพที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวเซ็นเซอร์ที่ใช้อุณหภูมิ 400 และ 450 องศาเซลเซียสในการเผา	28
ภาพที่ 4.9 EDS	29
ภาพที่ 4.10 กราฟมาตรฐานของแก๊สเอทิลีนที่ความเข้มข้นต่างๆ	30
ภาพที่ 4.11 แก๊สเอทิลีนที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อวัดด้วย เซนเซอร์ รุ่น C2H4/CA-10	31



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบสมบัติของแก๊สเซ็นเซอร์ประเภทต่างๆ	8
ตารางที่ 2.2 ค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อสัมผัสกับแก๊สแต่ละประเภท	10
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดเอทิลีนที่ความเข้มข้นต่างๆ	29

# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของการทำวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งกล่าวถึงวัตถุประสงค์ของการทำวิจัย ขอบเขตของการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ดังนี้

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยถือเป็นแหล่งผลิตและส่งออกผักผลไม้เมืองร้อนที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก ผลิตผลหลายชนิดเป็นที่รู้จักและนิยมของผู้บริโภคทั้งในและต่างประเทศ มีส่วนช่วยในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจทำให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในระดับเกษตรกรที่เป็นชาวสวน แต่อย่างไรก็ตาม การส่งออกผลไม้ของไทยยังมีข้อจำกัดอย่างมาก เนื่องจากผลไม้ส่วนใหญ่มีอายุการเก็บรักษาที่สั้นและเสื่อมสภาพค่อนข้างเร็ว ทำให้การขนส่งไปยังตลาดที่อยู่ไกลๆที่มีความต้องการและมีมูลค่าทางการตลาดสูงเกิดปัญหาและมีอุปสรรคต่างๆตามมาอย่างมาก โดยสาเหตุอาจเกิดมาจากโรค แมลง การเปลี่ยนแปลงทางสรีระ และกระบวนการหายใจซึ่งยังเกิดขึ้นอยู่แม้จะเก็บเกี่ยวมาแล้ว เนื่องจากเนื้อเยื่อพืชทุกชนิดสามารถสร้างแก๊สเอทิลีนได้

เอทิลีนเป็นฮอร์โมนพืชชนิดหนึ่งที่ช่วยเร่งอัตราการเสื่อมสภาพของพืช โดยจะไปกระตุ้นเนื้อเยื่อพืชให้มีอัตราการหายใจสูงขึ้น กระตุ้นให้เกิดการสุก ทำให้อายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สั้นลง ในกรณีที่พืชได้รับเอทิลีนมากเกินไปในบางช่วงที่เจริญเติบโตจะทำให้ใบร่วงมากกว่าปกติ หรือไปเร่งให้ผลสุกเร็วกว่าความต้องการ จึงไม่สามารถเก็บรักษาไว้ได้นานทำให้เกิดผลเสียมากกว่าผลดี ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดเพื่อช่วยเหลือเกษตรกรที่ประสบปัญหาเหล่านี้ โดยแนวคิดในการผลิตเครื่องที่ใช้บอกระยะเวลาการสุกของผลไม้ที่มีราคาต่ำ และสามารถบ่งบอระยะเวลาการสุกของผลไม้ได้โดยการใช้วัสดุอุปกรณ์ที่หาได้ภายในประเทศเป็นองค์ประกอบในการผลิตและพัฒนาเครื่องบอกระยะการสุกของผลไม้ที่มีขนาดพอเหมาะกับการใช้งาน ทำให้สะดวกยิ่งขึ้นต่อการขนส่ง และเกษตรกรทั่วไปที่มีความต้องการใช้งาน ซึ่งเรียกว่า เซ็นเซอร์ (Sensor) เทคโนโลยีการผลิตเซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สชนิดฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (MOS gas sensor) ได้รับความสนใจในการพัฒนาเพื่อเป็นเซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดแก๊สมากที่สุด เนื่องจากมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และมีการตอบสนองต่อแก๊สที่ดี สารที่เลือกนำมาใช้เป็นตัวตรวจจับแก๊สเอทิลีนควรมีการตอบสนองและมีความจำเพาะเจาะจงต่อแก๊สเอทิลีนที่ดี ซึ่งสารที่ผู้วิจัยเลือกมาใช้คือทินออกไซด์ (SnO<sub>2</sub>) ที่เจือด้วยซีเรียมออกไซด์ (CeOx) ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม จากที่ได้มีผู้ทำการทดลองพบว่าสารทั้งสองนี้มีการตอบสนองและมีความจำเพาะเจาะจงต่อแก๊สเอทิลีนที่ดี

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการทำตัวตรวจวัดแก๊สหรือแก๊สเซ็นเซอร์ชนิดฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ที่ใช้ในการตรวจจับแก๊ส เนื่องจากสามารถใช้งานในที่ระดับความเข้มข้นต่ำ มีสภาพความไวสูง สามารถใช้งานในสถานที่ที่มีอุณหภูมิและความดันสูงได้ เพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกให้กับเกษตรกรในการตรวจวัดแก๊สเอทิลีนที่อยู่ในผลไม้ได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สเอทิลีน ด้วยอนุภาคนาโนทินออกไซด์เจือด้วยซีเรียมออกไซด์

1.2.2 เพื่อทดสอบความสามารถในการตรวจจับแก๊สเอทิลีนของเซ็นเซอร์ต่อความเข้มข้นของแก๊สเอทิลีนในปริมาณที่แตกต่างกัน

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 สร้างแก๊สเซ็นเซอร์ชนิดฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ด้วยกระบวนการลิโธกราฟี (Lithography) บนวัสดุฐานรองรับชนิดยืดหยุ่น คือ PI (Polyimide) โดยที่โครงสร้างของเซ็นเซอร์ประกอบไปด้วย

- ชั้น Heater เป็นฟิล์มบางของโลหะ สำหรับงานวิจัยนี้ทำการศึกษาโลหะที่เหมาะสมสำหรับชั้นให้ความร้อน คือ อะลูมิเนียม (Al) ทำการเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (Magnetron sputtering)

- ชั้น dielectric เป็นฟิล์มบางของฉนวน ในที่นี้จะใช้ PI (Polyimide) เนื่องจากมีความเป็นฉนวนที่ดี

- ชั้น electrode เป็นฟิล์มบางของโลหะของทอง (Au) ทำการเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Evaporator)

- และชั้น sensing เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำทินออกไซด์เจือด้วยซีเรียมออกไซด์ ( $\text{CeO}_x\text{-SnO}_2$ ) ซึ่งเตรียมด้วยเทคนิคการสปินโคตติง (Spin Coating) โดยทำการศึกษาที่ความหนาของฟิล์ม อัตราส่วนของสารยึดเหนี่ยว (Binder) และอุณหภูมิในการกำจัด Binder ที่แตกต่างกัน

1.3.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความสามารถในการตรวจจับแก๊สเอทิลีนของเซ็นเซอร์ต่อความเข้มข้นของแก๊สเอทิลีนในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยศึกษาเปรียบเทียบกับ การตรวจวัดแก๊สเอทิลีนที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน ซึ่งวิเคราะห์ความเข้มข้นของแก๊สที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส (gas chromatography, GC)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้พัฒนาเซ็นเซอร์ซึ่งทำจากวัสดุผสมระหว่างอนุภาคนาโนทिनออกไซด์ที่เจือด้วยซีเรียมออกไซด์ ที่มีความจำเพาะเจาะจงต่อแก๊สเอทิลีน

1.4.2 ได้พัฒนาเซ็นเซอร์ที่มีราคาประหยัด เกษตรกรสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อบอกระยะการสุกของผลไม้ได้ง่าย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

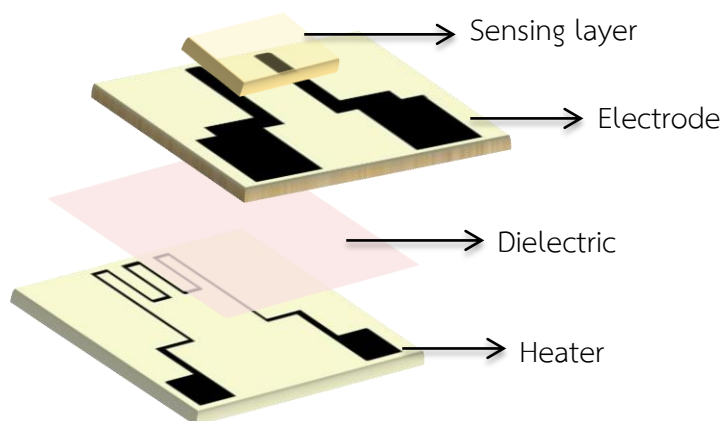
การทำเซ็นเซอร์เพื่อตรวจจับแก๊สเอทิลีนผู้ทำการวิจัยได้ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการทำการทดลอง ผู้วิจัยจึงได้รวบรวมทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องไว้ดังนี้

#### 2.1 แก๊สเซ็นเซอร์ (gas sensor)

เซ็นเซอร์ (sensor) เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ตรวจวัดปริมาณการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์และมีการประมวลผลเพื่อส่งสัญญาณทางไฟฟ้าออกมา โดยมีความสัมพันธ์กันกับปริมาณหรือความเข้มข้นของสิ่งที่ต้องการตรวจวัด โดยมีหลักการทำงานและรูปแบบที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของเซ็นเซอร์ ในปัจจุบันเซ็นเซอร์ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญและถูกประยุกต์ใช้งานกันอย่างหลากหลาย ทั้งทางด้านการจัดการระบบในอุตสาหกรรม การทำฟาร์มอัจฉริยะ การบริหารจัดการน้ำ การควบคุมสภาวะและตรวจสอบคุณภาพอาหาร การบริหารจัดการและการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดทางการแพทย์ การควบคุมและตรวจหาสิ่งแปลกปลอมในสิ่งแวดล้อม รวมถึงการควบคุมคุณภาพของพืชในทางเกษตรกรรม เช่นในงานวิจัยของเราที่ทำตัวเซ็นเซอร์ขึ้นมาเพื่อตรวจวัดแก๊สเอทิลีนในผลไม้ ซึ่งเรียกว่าแก๊สเซ็นเซอร์ (slri.or.th. ออนไลน์. 2563)

แก๊สเซ็นเซอร์ (gas sensor) เป็นอุปกรณ์ที่มีความจำเป็นและมีความสำคัญต่อมนุษย์อย่างยิ่ง เพราะนอกจากจะช่วยเตือนภัยในบริเวณที่มีแก๊สอันตรายในปริมาณที่มากเกินไปแล้ว ยังช่วยในการตรวจวัดคุณภาพอากาศ คุณภาพของอาหารและสินค้า อีกทั้งยังใช้ในการตรวจคัดกรองเพื่อวินิจฉัยโรคบางชนิดได้อีกด้วย เซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สจะไม่สามารถแยกแยะได้ว่า แก๊สที่ตรวจวัดได้นั้นเป็นชนิดใดบ้าง แต่สามารถตั้งค่าเซ็นเซอร์ให้ตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สที่ต้องการตรวจวัดได้ เช่นหากนำไปให้พนักงานในโรงงานที่ใช้แก๊สแอมโมเนีย ในการเดินระบบทำงานทดลองใช้ ก็ต้องตั้งค่าเซ็นเซอร์ให้วัดค่าความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนีย แต่ถ้าในกรณีที่มีแก๊สตัวอื่นรั่วไหลออกมาจากแก๊สแอมโมเนีย เครื่องตรวจวัดแก๊สก็สามารถแจ้งเตือนได้เช่นกัน แก๊สเซ็นเซอร์ (Gas sensor) ทำหน้าที่แยกความหนาแน่นของแก๊สที่อยู่ในอากาศ โดยโครงสร้างภายในจะมีลักษณะพิเศษที่สามารถเปลี่ยนความหนาแน่นของแก๊สเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ โดยส่วนใหญ่แก๊สเซ็นเซอร์มีองค์ประกอบหลักๆ 4 องค์ประกอบ ดังนี้

### 2.1.1 องค์ประกอบของแก๊สเซ็นเซอร์



ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบของแก๊สเซ็นเซอร์

- ชั้น sensing เป็นชั้นที่มีส่วนสำคัญมากที่สุด ใช้ในการตรวจจับแก๊ส โดยสำหรับงานวิจัยนี้ จะใช้เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำทินออกไซด์เจือด้วยซีเรียมออกไซด์ ( $\text{CeO}_x\text{-SnO}_2$ ) ซึ่งเตรียมด้วยเทคนิคการสปินโคตติง (Spin Coating) โดยทำการศึกษาที่ความหนาของฟิล์ม อัตราส่วนของสารยึดเหนี่ยว (Binder) และอุณหภูมิในการกำจัด Binder ที่แตกต่างกัน

- ชั้น electrode เป็นชั้นที่เชื่อมต่อกับไฟฟ้า เพื่อวัดการไหลของกระแสในชั้น sensing สำหรับในงานวิจัยนี้เป็นฟิล์มบางของโลหะของทอง (Au) ทำการเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Evaporator)

- ชั้น dielectric เป็นฟิล์มบางของฉนวน เพื่อป้องกันไม่ให้ชั้น Heater และ ชั้น electrode เกิดการลัดวงจร ในที่นี่จะใช้ PI (Polyimide) เนื่องจากมีความเป็นฉนวนที่ดี และมีความยืดหยุ่นสูง

- ชั้น Heater เป็นฟิล์มบางของโลหะ เป็นตัวให้ความร้อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความไวในการตรวจจับแก๊สได้ดียิ่งขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้ทำการศึกษาโลหะที่เหมาะสมสำหรับชั้นให้ความร้อน ได้แก่ แพลตตินัม (Pt) และอะลูมิเนียม (Al) ทำการเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Magnetron sputtering)

## 2.1.2 ประเภทของแก๊สเซ็นเซอร์

2.1.2.1 Catalytic Sensor เป็นแก๊สเซ็นเซอร์ที่ใช้ตรวจวัดแก๊สโดยใช้สารเร่งปฏิกิริยา หลักการทำงานคือ เมื่อมีแก๊สผ่านเข้ามายังตัวเซ็นเซอร์ ก็จะส่งผลให้ค่าความต้านทานลัฟท์ในวงจรบริดจ์เกิดการไม่สมดุล และส่งสัญญาณเอาต์พุตออกมา ซึ่งเป็นค่าที่แปรผันแบบเป็นสัดส่วนกับค่าความหนาแน่นของแก๊ส เซ็นเซอร์ชนิดนี้มีข้อดี คือ ราคาไม่แพง มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ง่ายต่อการออกแบบในการใช้งาน รวมถึงมีความทนทานสูงอีกด้วย ส่วนข้อเสีย คือ อาจมีผลกระทบที่เป็นพิษได้จากสารเร่งปฏิกิริยาที่ฉาบเคลือบที่ขดลวดไฟฟ้า เซ็นเซอร์ประเภทนี้เหมาะกับการตรวจวัดแก๊สติดไฟได้ (Combustible Gases)

2.1.2.2 Electrochemical Sensor เป็นแก๊สเซ็นเซอร์ที่ใช้ตรวจวัดแก๊สโดยพลังงานไฟฟ้าและพลังงานเคมี มีหลักการทำงานคือ โครงสร้างที่อยู่ภายในอันประกอบไปด้วยสารอิเล็กโทรไลต์ จะทำปฏิกิริยากับแก๊สที่ผ่านเข้ามายังตัวเซ็นเซอร์ แต่ก็มีข้อจำกัดตรงที่ตรวจวัดแก๊สได้เป็นบางชนิด เช่น คลอรีน คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และไฮโดรเจน เซ็นเซอร์ประเภทนี้เหมาะกับการตรวจวัดแก๊สพิษที่ไม่ติดไฟ

2.1.2.3 Optical Sensor เป็นแก๊สเซ็นเซอร์ที่ใช้ตรวจวัดแก๊สโดยใช้แสง มีหลักการทำงานคือ ใช้อุปกรณ์ประเภทแสงทำหน้าที่ตรวจวัดแก๊ส เซ็นเซอร์ชนิดนี้มีข้อดี คือ ไม่เกิดผลกระทบที่เป็นพิษจากสารเร่งปฏิกิริยาภายในตัวเซ็นเซอร์ ส่วนข้อเสีย คือ ลำแสงที่ใช้ในการตรวจวัดแก๊สอาจถูกเบี่ยงเบนโดยสิ่งกีดขวางอื่นๆ ได้ เซ็นเซอร์ประเภทนี้เหมาะกับการตรวจวัดแก๊สติดไฟได้ (Combustible Gases)

2.1.2.4 Metal oxide Sensor เป็นแก๊สเซ็นเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ มีหลักการทำงานคือ เมื่อมีแก๊สผ่านเข้ามายังตัวเซ็นเซอร์ ก็จะมีโครงสร้างภายในที่ประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำ จะทำการตอบสนองต่อแก๊สที่ผ่านเข้ามา โดยเกิดการเปลี่ยนค่าความต้านทาน ข้อดีคือสามารถตรวจวัดแก๊สได้หลายชนิดในย่าน ppm อีกทั้งราคาไม่แพง มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน รวมถึงมีความทนทานสูงอีกด้วย แต่ก็มีข้อเสีย คือ อาจมีความจำเป็นต้องปรับตั้งเครื่องบ่อย เนื่องจากอาจเกิดความผิดพลาดในการอ่านค่าได้เมื่อเซ็นเซอร์ตอบสนองกับแก๊สที่ปะปนอยู่ในธรรมชาติ เซ็นเซอร์ประเภทนี้เหมาะกับการตรวจวัดแก๊สพิษที่ไม่ติดไฟ (erp.mju.ac.th. ออนไลน์. 2560)

### 2.1.3 สมบัติของแก๊สเซ็นเซอร์

แก๊สเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดแก๊สโดยทั่วไปจะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพ และคุณสมบัติหลักๆ ดังนี้

2.3.1 ความไวต่อการตอบสนอง (Response Time) คือ ความสามารถในการตอบสนองได้อย่างรวดเร็วในทันทีที่แก๊สที่ทำการวัดมาสัมผัสเข้ากับตัวเซ็นเซอร์ คุณสมบัติข้อนี้มีความสำคัญมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแก๊สที่ทำการวัดเป็นแก๊สพิษ หรือ แก๊สไวไฟ เพื่อจะได้หลีกเลี่ยงและแก้ไขได้อย่างทันท่วงที ก่อนที่จะได้รับอันตรายหรือเกิดเหตุการณ์ร้ายแรงในบริเวณที่ทำการวัดแก๊ส หากเกิดกรณีแก๊สรั่วไหลออกมา

2.3.2 ความไวในการวัด (Sensitivity) คือ ความสามารถของตัวเซ็นเซอร์ที่จะบอกความแตกต่างของปริมาณแก๊สที่จะทำการวัด เช่น เซ็นเซอร์บางชนิดไม่สามารถบอกความแตกต่างของแก๊สในปริมาณน้อยๆ ได้ ดังนั้นเมื่อนำไปวัด แก๊สในสองบริเวณที่มีแก๊สแตกต่างกันน้อยมาก ก็จะทำให้เกิดความเข้าใจผิดได้ว่าบริเวณทั้งสองมีแก๊สในปริมาณเท่ากัน คุณสมบัติชนิดนี้จึงมีความสำคัญในกรณีแก๊สที่วัดมีปริมาณน้อยๆ หรือต้องการความถูกต้องในการวัดสูงเท่านั้น

2.3.3 ความมีเสถียรภาพ (Stability) คือ ผลในการวัดคงที่ไม่เสื่อมสภาพเร็วในการใช้งาน เพื่อให้เซ็นเซอร์สามารถใช้วัดได้อย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปเมมเบรนของเซ็นเซอร์ที่ทำจากสารโพลีเมอร์ มักประสบปัญหานี้ในระหว่างการใช้งาน

2.3.4 พิสัยการวัด (Dynamic Range) คือ ช่วงกว้างของการวัดของเซ็นเซอร์ โดยเซ็นเซอร์บางตัวสามารถวัดแก๊สปริมาณตั้งแต่ 100-10,000 ppm แต่บางตัวมีพิสัยการวัดในช่วง 10-50 ppm เท่านั้น

2.3.5 ความจำเพาะ (Selectivity) คือ ความสามารถในการแยกแยะความแตกต่างระหว่างแก๊สที่ต้องการวัดกับแก๊สที่ไม่ต้องการวัดได้ กล่าวคือ เซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งๆ ควรมีความสามารถในการตอบสนองเฉพาะแก๊สชนิดที่ต้องการวัด ไม่ควรที่จะตอบสนองต่อแก๊สชนิดอื่น เพราะจะรบกวนการวัดได้ ต้องหาวัสดุที่เหมาะสมที่ไวเฉพาะต่อแก๊สที่ต้องการวัดมาใช้ทำเมมเบรนของเซ็นเซอร์ หรืออาจจะเจือสารบางตัวลงไปในวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรนเพื่อทำให้เมมเบรนมีความไวในการตอบสนองต่อแก๊สที่ต้องการวัดขึ้นมาได้ หรือเฉื่อยต่อแก๊สที่ไม่ต้องการวัด



ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบสมบัติของแก๊สเซ็นเซอร์ประเภทต่างๆ

ประเภท	ความไวในการตอบสนอง	ความเสถียร	ความไวในการวัด	ความจำเพาะ	ค่าใช้จ่าย
Catalytic gas Sensor	สูง	ปานกลาง	สูง	ต่ำ	ปานกลาง
Electrochemical gas Sensor	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง	ปานกลาง
Optical gas Sensor	ต่ำ	ปานกลาง	สูง	สูง	สูง
Metal oxide gas Sensor	สูง	ปานกลาง	สูง	ปานกลาง	ต่ำ

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าแก๊สเซ็นเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (Metal oxide gas sensor) มีสภาพความไวสูงสามารถใช้งานในสถานที่ที่มีอุณหภูมิและความดันสูงได้ ตอบสนองต่อแก๊สที่ตรวจวัดโดยส่งผลให้ค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของแก๊สที่ทำการตรวจวัด อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำ ผู้วิจัยจึงได้เลือกทำแก๊สเซ็นเซอร์ประเภทนี้

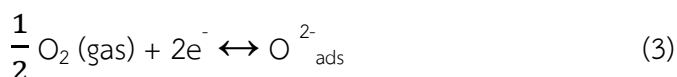
#### 2.1.4 แก๊สเซ็นเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

แก๊สเซ็นเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (Metal oxide semi-conductor gas sensor : MOS gas sensor ) หรือ มอส (MOS) เป็นเซ็นเซอร์ที่นิยมใช้สำหรับตรวจวัดแก๊สมากที่สุด เนื่องจากมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และมีการตอบสนองต่อแก๊สที่ดี มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีเกรนขนาดเล็ก และสามารถตรวจวัดแก๊สภายใต้อุณหภูมิต่ำๆ ได้ ส่วนใหญ่แล้วเซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สประเภทนี้จะถูกนำมาใช้ในเรื่องการควบคุมคุณภาพอากาศ และหาสิ่งแปลกปลอมในอากาศ แต่มีข้อด้อยเรื่องความจำเพาะในการคัดแยกชนิดของแก๊ส และใช้พลังงานสูง จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีหลายวิธีที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สของเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ เช่น การลดขนาดเกรนให้อยู่ในระดับนาโนเมตร และการเพิ่มสารเจือ หรือ ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เหมาะสม ชนิดของสารเจือที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น แพลเลเดียม (Pd), ทองคำ (Au) และแพลทินัม (Pt) เป็นต้น จากที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า มีหลากหลายตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มในการตรวจวัดแก๊ส เช่น ขนาดของเกรน ความเป็นผลึก และชนิดของสารเจือ ดังนั้นกระบวนการหาลักษณะเฉพาะของวัสดุและพื้นผิวฟิล์ม มีความสำคัญอย่างมากกับงานทางด้าน

ตรวจวัดแก๊ส จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดเป็นเหตุผลสำคัญที่ผู้วิจัยได้เลือกทำแก๊สเซ็นเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

## 2.2 หลักการตรวจวัดแก๊สของแก๊สเซ็นเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็น (n-type) และสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดพี (p-type) โดยสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็นจะมีอิเล็กตรอน (electron) เป็นประจุพาหะ ส่วนสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดพีมีโฮล (hole) เป็นประจุพาหะ ซึ่งจะมีกลไกการตรวจจับแก๊สแตกต่างกัน สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็นมีอิเล็กตรอนเป็นประจุพาหะ ส่วนสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดพีมีโฮลเป็นประจุพาหะ เมื่อสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์สัมผัสกับอากาศ โมเลกุลของแก๊สออกซิเจนจะถูกดูดซับ (adsorbed) โดยการจับกับอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของหัววัดแก๊สเกิดเป็นออกซิเจนไอออนและกลายเป็นชั้นออกไซด์ (oxide layer) บางๆ ที่ผิวหน้าของหัววัดแก๊ส ส่งผลให้เกิดชั้นปลอดประจุพาหะ (depletion layer) ขึ้น ทั้งนี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่อุณหภูมิต่ำโมเลกุลของแก๊สออกซิเจนจะจับกับอิเล็กตรอนกลายเป็นโมเลกุลของแก๊สออกซิเจนไอออน ( $O_{2,ads}^-$ ) ตามปฏิกิริยา (1) หากอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 250 องศาเซลเซียส โมเลกุลของแก๊สออกซิเจนจะแตกตัวเป็นอะตอมออกซิเจนและเมื่อจับอิเล็กตรอนที่ผิวของหัววัดแก๊สจะเกิดเป็นออกซิเจนไอออน ( $O_{ads}$ ) หรือ ( $O_{ads}^{2-}$ ) ตามปฏิกิริยา (2) และ (3) จากปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของหัววัดแก๊สสูงขึ้น เนื่องจากสูญเสียอิเล็กตรอนไปจากผิว ในทางกลับกันในกรณีสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดพี เช่น คอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งมีโฮลเป็นประจุพาหะ ความต้านทานไฟฟ้าของหัววัดแก๊สจะลดลงเนื่องจากสูญเสียอิเล็กตรอน



เมื่อนำหัววัดแก๊สไปตรวจวัดแก๊สเป้าหมาย แก๊สเป้าหมายจะทำปฏิกิริยากับชั้นออกไซด์ที่เกิดจากโมเลกุลออกซิเจนไอออนหรือออกซิเจนไอออนบนผิวของหัววัดแก๊สดังที่กล่าวมาแล้ว ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้สองแบบ กล่าวคือ ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าลดลงหรือทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊สเป้าหมายที่ตรวจวัดซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะจำแนกแก๊สเป้าหมายออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แก๊สรีดักชัน (reduction gas) อาทิ ไฮโดรเจน (hydrogen,  $H_2$ ) เอทานอล (ethanol,  $C_2H_5OH$ ) แอมโมเนีย (ammonia,  $NH_3$ ) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (carbon monoxide,  $CO$ ) ประเภทที่สอง คือ แก๊สออกซิเดชัน (oxidation gas) ได้แก่ ออกซิเจน (oxygen,  $O_2$ ) ไนโตรเจน

ไดออกไซด์ (nitrogen dioxide, NO<sub>2</sub>) โอโซน (ozone, O<sub>3</sub>) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulphur dioxide, SO<sub>2</sub>) เป็นต้น (researchgate.net. ออนไลน์. 2558)

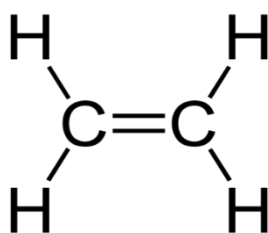
**ตารางที่ 2.2** ค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อสัมผัสกับแก๊สแต่ละประเภท

ชนิดของสารกึ่งตัวนำ	แก๊สชนิดรีดิวซิง	แก๊สชนิดออกซิไดซ์ซิง
n-type	ลดลง	เพิ่มขึ้น
p-type	เพิ่มขึ้น	ลดลง

(ที่มา : itthesis-ir.su.ac.th. ออนไลน์. 2558)

### 2.3 เอทิลีน (Ethylene)

เป็นฮอร์โมนพืชที่มีสภาพเป็นแก๊สซึ่งเป็นที่รู้จักมานาน ในปี ค.ศ. 1901 นักศึกษาชาวรัสเซียพบว่าเอทิลีนเป็นหนึ่งในแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ใช้เป็นแหล่งแสงสว่างตามท้องถนน ในช่วงต้นศตวรรษที่ 19 หลังจากนั้นได้มีการพิสูจน์ให้เห็นว่าเอทิลีนเป็นแก๊สที่พืชสังเคราะห์ขึ้นได้ในปริมาณน้อยและสามารถเร่งกระบวนการสุกของผลไม้บางชนิดได้ จึงจัดเอทิลีนเป็นฮอร์โมนพืชที่สำคัญทางด้านสรีรวิทยาหลังเก็บเกี่ยว และพบว่าเอทิลีนเป็นแก๊สที่สังเคราะห์ขึ้นโดยพืช ทำหน้าที่ควบคุมกระบวนการเติบโตที่เกี่ยวข้องกับความชรา การหลุดร่วงของใบ ดอก ผล และควบคุมการเจริญของพืชเมื่ออยู่ในสถานะที่ไม่เหมาะสม ซึ่งแก๊สนี้จะเกิดขึ้นในกระบวนการเมตาบอลิซึมของพืช โดยเฉพาะในช่วงที่ผลไม้สุก จะมีแก๊สแพร่ออกมาจำนวนมาก ทำให้ผลไม้ที่อยู่ข้างๆ สุกตามไปด้วย ในกรณีที่พืชได้รับเอทิลีนมากเกินไปในช่วงที่เจริญเติบโตจะทำให้ใบร่วงมากกว่าปกติหรือไปเร่งให้ผลสุกเร็วกว่าความต้องการ จึงไม่สามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน ทำให้เกิดผลเสียมากกว่าผลดีซึ่งกรณีที่ส่งออกผลไม้ไปขายจะต้องหาทางกำจัดเอทิลีนที่เกิดขึ้นในช่วงขนส่ง เพื่อเก็บรักษาผลไม้ให้คงอยู่ในสภาพเดิมได้นานโดยไม่สุกหรือเน่าในระหว่างทำการขนส่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลไม้ที่มีอัตราการหายใจสูง เช่น กล้วย มะม่วง เป็นต้น



**ภาพที่ 2.2** โครงสร้างของเอทิลีน

(ที่มา : biology.ipst.ac.th. ออนไลน์)

เอทิลีนมีสูตรโครงสร้างคือ  $C_2H_4$  มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 28 สารตั้งต้นที่ใช้ในการสร้างเอทิลีนคือ กรดอะมิโนชนิด Methionine โดย Shang Fa Yang เป็นผู้ค้นพบวัฏจักรการสังเคราะห์เอทิลีนที่สมบูรณ์ เรียกว่า วัฏจักร Yang เนื่องจากคุณสมบัติของเอทิลีนที่เป็นแก๊สทำให้สามารถแพร่ผ่านเนื้อเยื่อพืชได้ง่าย

## 2.4 อนุภาคนาโนที่ใช้เป็นตัวตรวจจับแก๊ส

### 2.4.1 ทินออกไซด์

คุณสมบัติพื้นฐานโดยทั่วไปของทินออกไซด์นั้น มีชื่อเรียกมากมาย เช่น ทินไดออกไซด์, สแตนนิกออกไซด์ ในธรรมชาติทั่วไปเราสามารถพบทินออกไซด์ได้ในรูปของแร่ชนิดหนึ่งชื่อว่า แคสซิเทอไรต์ ทินออกไซด์จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีค่าของช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างประมาณ 3.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ณ อุณหภูมิ 300 เคลวิน เป็นสารประกอบออกไซด์ที่เป็นได้ทั้งกรดและเบสมวลโมเลกุล 150.69 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 6.90 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดเดือด 1800 -1900 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1500 - 1630 องศาเซลเซียส ไม่ละลายในน้ำสามารถละลายในกรดและเบส ถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรทางเคมีและความร้อนสูง ไม่เป็นพิษ และราคาถูก ทินออกไซด์นั้นยังเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ที่มีสมบัติวงเวในการเกิดปฏิกิริยาและยังทำหน้าที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาเคมีที่ดีอีกด้วย ลักษณะและสมบัติทางกายภาพ คือ เป็นของแข็งสีขาว บางครั้งก็เห็นเป็นสีขาวนวลจนถึงสีเทา สมบัติของทินออกไซด์ มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ความสามารถในการละลายต่ำ ความเสถียรสูง นอกจากนั้นได้มีการศึกษาเปรียบเทียบสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่นำมาใช้ในกระบวนการกระตุ้นเชิงแสงพบว่าการใช้ทินออกไซด์แบบแขวนลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากทินออกไซด์มีช่องว่างพลังงานประมาณ 3.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ โดยส่วนใหญ่ทำให้ต้องใช้พลังงานแสงในช่วงของแสงยูวี ( $\lambda \leq 400$  นาโนเมตร) ในแสงอาทิตย์ที่ส่องมาถึงพื้นโลกมีแสงยูวีน้อยกว่า 1% ทำให้ไม่สามารถใช้แสงธรรมชาติได้จำเป็นต้องใช้แสงจากหลอดรังสียูวีเป็นแหล่งกำเนิดแสง

### 2.4.2 ซีเรียมออกไซด์

ซีเรียมออกไซด์ ( $CeO_2$ ) เป็นธาตุหายาก (Rare earths) ธาตุหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ตั้งแต่การใช้ผสมในเหล็กหล่อชนิดพิเศษ การผลิตผงขัดเลนส์ การเติมให้เกิดสีในแก้ว การเติมในสีทนแสงยูวี การผลิตสารเร่งปฏิกิริยาในการกลั่นน้ำมัน และการลดมลพิษจากท่อไอเสียรถยนต์ ปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวาง ในการใช้สารประกอบซีเรียมออกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide fuel cell) และการผลิตสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ในการแยกไฮโดรเจนจากสารไฮโดรคาร์บอน เพื่อใช้ป้อน

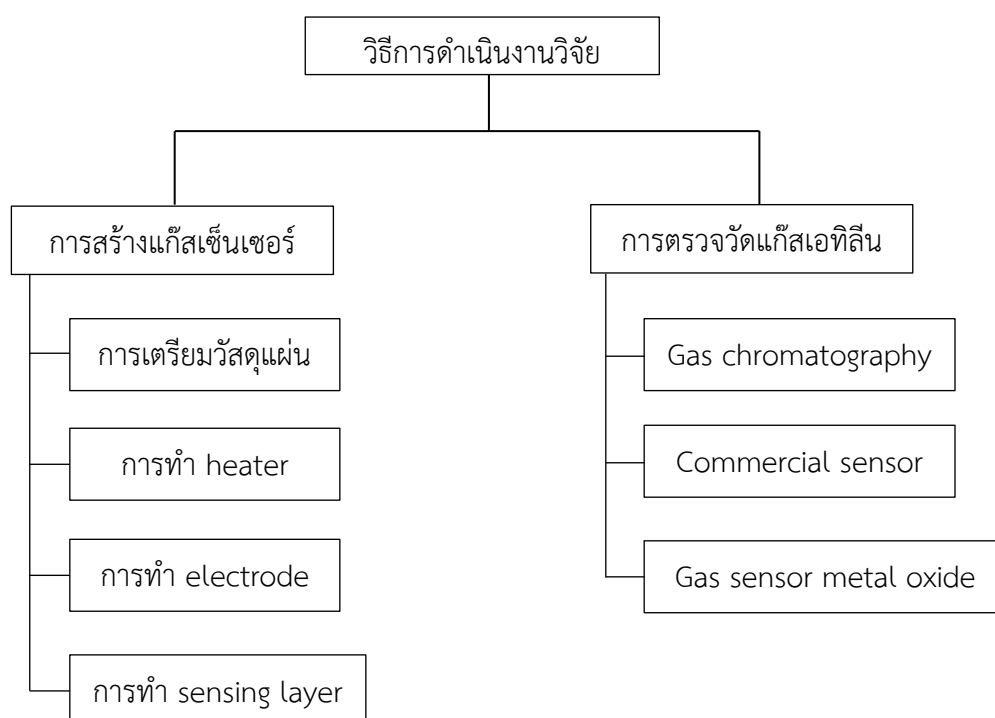
เซลล์เชื้อเพลิง โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้เทคโนโลยีการสังเคราะห์อนุภาคนาโน (Nano-sized particle) ของสารประกอบของซีเรียมออกไซด์ โดยมีธาตุอื่นๆเจือปน (Dope) เข้ามาด้วยในปริมาณที่เหมาะสม ทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดี ลดอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งลงมาและเพิ่มประสิทธิภาพการเป็นสารเร่งปฏิกิริยาในการแยกไฮโดรเจนได้ เนื่องจากมีการพบว่ามีสารประกอบซีเรียมออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตรนี้ ช่วยลดอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป (Sintering) ทำให้เนื้อวัสดุมีความสม่ำเสมอสูง มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานทางด้านสารเร่งปฏิกิริยาและเซลล์เชื้อเพลิงได้ดี

คุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญของซีเรียมออกไซด์คือ สารที่ทนความร้อนได้สูง และมีออกซิเจนในโครงสร้างผลึกและสามารถถ่ายเทออกซิเจนออกไปสู่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ง่าย (High oxygen ion conductivity) ที่อุณหภูมิประมาณ 500-800 องศาเซลเซียส ซีเรียมออกไซด์จึงเป็นที่รู้จักในฐานะเป็นสารเชื้อเพลิงในรูปของแข็ง (Solid oxide fuel cell, SOFC) ซีเรียมออกไซด์จึงสามารถให้ออกซิเจนกับปฏิกิริยาเผาไหม้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ จากการที่ผลึกโครงสร้างของซีเรียมออกไซด์เป็นโครงสร้างในรูปแบบของ Fluorite ทำให้อะตอมของออกซิเจนอยู่ในทุกระนาบของโครงสร้างผลึก จึงทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนได้ง่ายและรวดเร็ว ทำให้เกิดช่องว่างของอะตอมออกซิเจนเกิดขึ้นในโครงสร้างที่จะสามารถหมุนเวียน ออกซิเจนไปตามช่องว่างต่างๆ และนำไปใช้งานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี โดยซีเรียมออกไซด์สามารถถูกรีดิวซ์กลายเป็นซีเรียมออกไซด์ที่มีเลขออกซิเดชันเป็น  $3+$  ได้ ซึ่งทำให้ขนาดของซีเรียมออกไซด์มีขนาดเล็กลงในระดับนาโนได้จากลักษณะสมบัติ เฉพาะดังกล่าวของซีเรียมออกไซด์ จึงได้มีการนำซีเรียมออกไซด์นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเซลล์เชื้อเพลิง และสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ในการใช้งานอุตสาหกรรม สำหรับในงานวิจัยของเรานำซีเรียมออกไซด์เข้าไปเจือกับทินออกไซด์เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ดี และมีความจำเพาะเจาะจงต่อแก๊สเอทิลีนได้ดียิ่งขึ้น

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย ตั้งแต่เตรียมวัสดุแผ่นรองรับ กระบวนการสร้าง อิเล็กโทรดและฮีตเตอร์ การเตรียมสารยึดเหนี่ยว การทำตัวตรวจจับแก๊ส รวมถึงขั้นตอนการตรวจวัด แก๊ส ซึ่งมีวิธีการดำเนินงาน ดังนี้



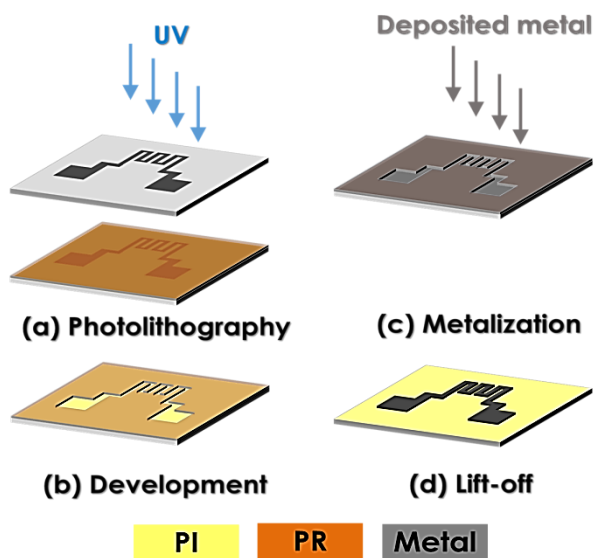
ภาพที่ 3.1 วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 การสร้างเซ็นเซอร์

##### 3.1.1 กระบวนการสร้างอิเล็กโทรดและฮีตเตอร์

ในงานวิจัยนี้เราจะสร้างอิเล็กโทรดและฮีตเตอร์บนวัสดุแผ่นรองรับเดียวกัน ซึ่งมีกระบวนการสร้าง ดังนี้

3.1.1.1 ตัดแผ่นแคปตันเป็นวงกลม ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร หลังจากนั้นนำมาทำความสะอาดด้วย Acetone, IPA และน้ำ RO ตามลำดับ อย่างละ 5 นาที นำไปเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนทั้ง 2 ด้านให้แห้ง และนำไปอบในเตาที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

(ที่มา : P.Janphuang, et.al. 2020)

3.1.1.2 นำแผ่นแคปตันที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วมาสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้สารไวแสง AZ4620 สปินโคตติงที่ความเร็วรอบ 500 rpm เวลา 10 วินาที และ 2000 rpm 30 วินาที

3.1.1.3 อบเพื่อให้สารไวแสงแห้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที

3.1.1.4 ฉายแสงยูวีผ่านหน้ากากกันแสงด้วยเครื่อง EVG610 UV Mask Aligner เป็นเวลา 20 วินาที

3.1.1.5 ทำการล้างสารไวแสงด้วยน้ำยาขึ้นรูปที่ผสมด้วย Boric acid : KOH ในอัตราส่วน 1:4 ในน้ำ 250 mL

3.1.1.6 ทำการเคลือบฟิล์มบางแบบระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนโดยใช้โครเมียม (Cr) และอะลูมิเนียม (Au) ด้วยเครื่อง Electron Beam Evaporator

3.1.1.7 จากนั้นทำการ lift-off และนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.1.1.8 หลังจากที่ทำตัวอิเล็กทรอนิกส์แล้วเสร็จ อีกฝั่งจะเป็นฮีตเตอร์ ซึ่งมีขั้นตอนการสร้างเช่นเดียวกับอิเล็กทรอนิกส์ ดังขั้นตอนที่ (3.1.1) ถึงขั้นตอนที่ (3.1.7) สำหรับขั้นนี้จะทำการเคลือบฟิล์มบาง โดยใช้แพตตินัม (Pt) และอะลูมิเนียม (Al) ด้วยกระบวนการสปัตเตอริง

3.1.1.9 ไมโครฮีตเตอร์ที่ได้จะถูกนำมาทดสอบ โดยวางบน hot plate และนำเทอร์โมคัปเปิลมาเป็นตัววัดอุณหภูมิ เพื่อทำการทดสอบฮีตเตอร์ โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 400 องศาเซลเซียส และกำหนดจุดอุณหภูมิที่จะทำการวัดค่าความต้านทานโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์เป็นตัววัด



ก.

ข.

ค.

ภาพที่ 3.3 ก. อิเล็กโทรด ข. ฮีตเตอร์ขาแคบ ค. ฮีตเตอร์ขากว้าง

### 3.1.2 การเตรียมตัวตรวจจับแก๊สเอทิลีน

ชั้นตรวจจับแก๊ส หรือ ชั้น sensing เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำทินออกไซด์ เจือด้วยซีเรียมออกไซด์ ( $\text{CeO}_x\text{-SnO}_2$ ) ซึ่งเตรียมด้วยเทคนิคการสปินโคตติง (Spin Coating) โดยทำการศึกษาที่ความหนาของฟิล์ม อัตราส่วนของสารยึดเหนี่ยว (Binder) และอุณหภูมิในการกำจัด Binder ที่แตกต่างกัน

- ศึกษาอัตราส่วนของสารยึดเหนี่ยว (Binder) โดยมีอัตราส่วนระหว่างเอทิลเซลลูโลสต่อแอลฟา-เทอไพนิออลที่อัตราส่วน คือ 0.2 g : 18 mL, 0.48 g : 18 mL, 0.3 g : 18 mL, 0.4 g : 18 mL และ 0.58 g : 18 mL

- ศึกษาอุณหภูมิในการกำจัด Binder คือ 300, 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนในการทำ ดังนี้

3.1.2.1 ตัวเชื่อมประสานเตรียมได้จากการนำสารแอลฟา-เทอไพนิออลและเอทิลเซลลูโลส ใส่ลงในบีกเกอร์ จากนั้นนำไปวางบนเครื่องทวนสารละลายและใส่แม่เหล็กบาร์ เพื่อผสมสารทั้งสองชนิดให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยตั้งอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงหลังจากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง

3.1.2.2 นำอิเล็กโทรดวางบนกระจกสไลด์ติดด้วยแคปตันเทป เพื่อไม่ให้อิเล็กโทรดและกระจกสไลด์หลุดออกจากกัน

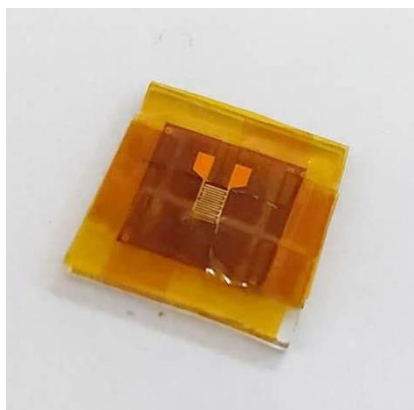


3.1.2.3 เตรียมสารละลายโดยชั่งหินออกไซด์ที่เจือด้วยซีเรียมออกไซด์และสารยึดเหนี่ยว ใส่ลงในโถรงบตสารทำการผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลาประมาณ 30 นาที จนกระทั่งสารกับ Binder ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

3.1.2.4 นำกระจกสไลด์ที่ติดอิเล็กโทรดวางลงบนเครื่องเคลือบผิวแบบสปินโคตรติง จากนั้นหยดสารละลายที่ได้เตรียมลงบนอิเล็กโทรดและเริ่มทำการสปินโดยใช้ค่าการหมุนด้วยกัน 2 ค่า คือ 500 rpm 10 วินาที และ 2000 rpm 30 วินาที ทำทั้งหมด 7 รอบ

3.1.2.5 จากนั้นนำไปอบบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3-5 นาที และนำไปเผาในเตาเผาเพื่อกำจัด binder เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำซ้ำตามข้อที่ 3.3.1-3.3.4 อีกครั้ง แต่เพิ่มจำนวนครั้งในการสปินโคตรติงเป็น 10 และ 15 รอบ เพื่อสร้างชั้นตรวจจับแก๊สที่มีความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้น

3.1.2.6 นำเซ็นเซอร์ที่เตรียมได้หลังจากการเผาไปทดสอบการตรวจวัดแก๊สเป็นลำดับต่อไป



ภาพที่ 3.4 ติดแคปตันเทปบริเวณขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดลงบนกระจกสไลด์



ภาพที่ 3.5 ผสมสารยึดเหนี่ยวกับวัสดุในโถรงบตสาร



ภาพที่ 3.6 หยดสารละลายลงบนอิเล็กโทรดและทำการเคลือบด้วยเทคนิค Spin Coating



ภาพที่ 3.7 เผาเพื่อกำจัด binder

### 3.2 กระบวนการตรวจจับแก๊สเอทิลีน

ในกระบวนการทดสอบแก๊สเอทิลีน เราจะทดสอบทั้งหมด 3 เงื่อนไข คือ เงื่อนไขแรกจะทดสอบแก๊สเอทิลีนด้วย Gas chromatography เงื่อนไขที่ 2 ทดสอบแก๊สเอทิลีนด้วย เซ็นเซอร์ รุ่น C2H4/CA-10 และเงื่อนไขสุดท้ายทดสอบแก๊สเอทิลีนด้วยตัวเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ที่ผู้วิจัยได้ทำขึ้นมา ซึ่งมีวิธีการทดสอบ ดังนี้

#### 3.2.1 การทดสอบแก๊สเอทิลีนด้วยเครื่อง SRI 310C Gas chromatography

เตรียมแก๊สเอทิลีนและตรวจวัดแก๊สเอทิลีนที่ความเข้มข้นต่างๆ (ช่วงความเข้มข้น  $\leq 100$  ppm) ด้วย Gas Chromatograph เตรียมเอทิลีนที่ความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 50 ppm โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.1.1 ใช้ syringe ดูดแก๊สจากถังเอทิลีนที่มีแก๊สเอทิลีนความบริสุทธิ์สูง 99.9% ในปริมาณ 2 mL ลงในถังปิดขนาด 2 L จะได้ความเข้มข้นของเอทิลีน 1,000 ppm

3.2.1.2 ใช้ syringe ดูดแก๊ส 50 mL จากถังที่มีความเข้มข้นของเอทิลีน 1,000 ppm ใส่ถึงปิดขนาด 1 L จะได้ความเข้มข้นของเอทิลีน 50 ppm

3.2.1.3 ใช้ syringe ดูดแก๊ส 20 mL จากถังที่มีความเข้มข้นของเอทิลีน 1,000 ppm ใส่ถึงปิดขนาด 1 L จะได้ความเข้มข้นของเอทิลีน 20 ppm

3.2.1.4 ใช้ syringe ดูดแก๊ส 15 mL จากถังที่มีความเข้มข้นของเอทิลีน 1,000 ppm ใส่ถึงปิดขนาด 1 L จะได้ความเข้มข้นของเอทิลีน 15 ppm

3.2.1.5 ใช้ syringe ดูดแก๊ส 10 mL จากถังที่มีความเข้มข้นของเอทิลีน 1,000 ppm ใส่ถึงปิดขนาด 1 L จะได้ความเข้มข้นของเอทิลีน 10 ppm

3.2.1.6 ใช้ syringe ดูดแก๊ส 5 mL จากถังที่มีความเข้มข้นของเอทิลีน 1,000 ppm ใส่ถึงปิดขนาด 1 L จะได้ความเข้มข้นของเอทิลีน 5 ppm

ทำการตรวจวัดแก๊สเอทิลีนจากเครื่อง SRI 310C Gas Chromatograph โดยเตรียมแก๊สเอทิลีนในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ เพื่อนำกราฟไปเปรียบเทียบกับแก๊สเอทิลีนที่อยู่ในทุเรียน มีสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบไปด้วยอุณหภูมิของคอลัมน์เริ่มต้น 80 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นที่อัตรา 30° C/min จนถึง 200 องศาเซลเซียส กราฟมาตรฐานแสดงดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.8 ตรวจวัดแก๊สเอทิลีนด้วยเครื่อง SRI 310C Gas Chromatograph

### 3.2.2 ทดสอบแก๊สเอทิลีนด้วย เซ็นเซอร์ รุ่น C2H4/CA-10 (Commercial sensor)

เตรียมแก๊สเอทิลีนและตรวจวัดแก๊สเอทิลีนที่ความเข้มข้นต่างๆ (ช่วงความเข้มข้น  $\leq 100$  ppm) ด้วยเซ็นเซอร์ รุ่น C2H4/CA-10 บริษัท Membrapor AG เตรียมเอทิลีนที่ความเข้มข้น 5, 10, 15, 20, 50 และ 100 ppm โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.2.1 ใช้ syringe ดูดแก๊สจากถังเอทิลีนที่มีแก๊สเอทิลีนความบริสุทธิ์สูง 99.9% ในปริมาณ 2 mL ลงในถังปิดขนาด 2 L จะได้ความเข้มข้นของเอทิลีน 1,000 ppm

3.2.2.2 ใช้ syringe ดูดแก๊ส 200 mL จากถังที่มีความเข้มข้นของเอทิลีน 1,000 ppm ลงใน Chamber ทดสอบที่มีความจุขนาด 2 L จากนั้นทำการตรวจวัดเอทิลีนใน Chamber เพื่อเป็นข้อมูลแก๊สเอทิลีนที่ความเข้มข้น 100 ppm

3.2.2.3 ใช้ syringe ดูดแก๊ส 150 mL จากถังที่มีความเข้มข้นของเอทิลีน 1,000 ppm ลงใน Chamber ทดสอบที่มีความจุขนาด 2 L จากนั้นทำการตรวจวัดเอทิลีนใน Chamber เพื่อเป็นข้อมูลแก๊สเอทิลีนที่ความเข้มข้น 75 ppm

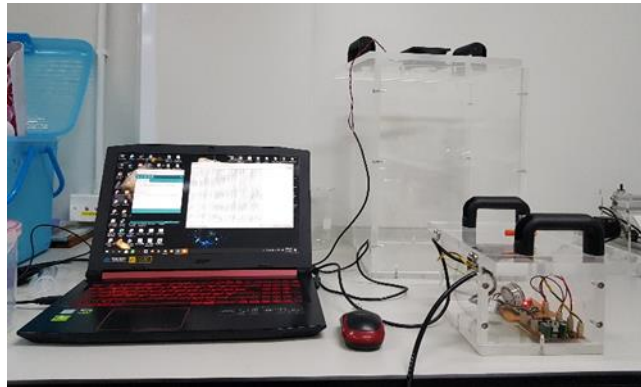
3.2.2.4 ใช้ syringe ดูดแก๊ส 100 mL จากถังที่มีความเข้มข้นของเอทิลีน 1,000 ppm ลงใน Chamber ทดสอบที่มีความจุขนาด 2 L จากนั้นทำการตรวจวัดเอทิลีนใน Chamber เพื่อเป็นข้อมูลแก๊สเอทิลีนที่ความเข้มข้น 50 ppm

3.2.2.5 ใช้ syringe ดูดแก๊ส 50 mL จากถังที่มีความเข้มข้นของเอทิลีน 1,000 ppm ลงใน Chamber ทดสอบที่มีความจุขนาด 2 L จากนั้นทำการตรวจวัดเอทิลีนใน Chamber เพื่อเป็นข้อมูลแก๊สเอทิลีนที่ความเข้มข้น 25 ppm

3.2.2.6 ใช้ syringe ดูดแก๊ส 30 mL จากถังที่มีความเข้มข้นของเอทิลีน 1,000 ppm ลงใน Chamber ทดสอบที่มีความจุขนาด 2 L จากนั้นทำการตรวจวัดเอทิลีนใน Chamber เพื่อเป็นข้อมูลแก๊สเอทิลีนที่ความเข้มข้น 15 ppm

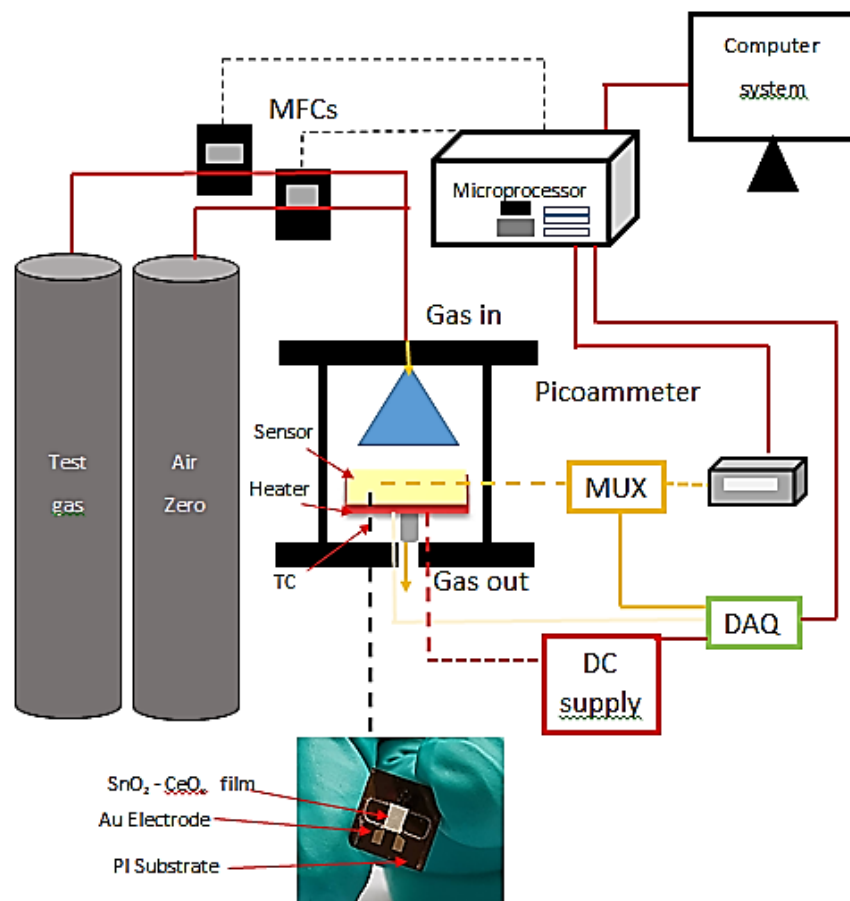
3.2.2.7 ใช้ syringe ดูดแก๊ส 20 mL จากถังที่มีความเข้มข้นของเอทิลีน 1,000 ppm ลงใน Chamber ทดสอบที่มีความจุขนาด 2 L จากนั้นทำการตรวจวัดเอทิลีนใน Chamber เพื่อเป็นข้อมูลแก๊สเอทิลีนที่ความเข้มข้น 10 ppm

3.2.2.8 ใช้ syringe ดูดแก๊ส 10 mL จากถังที่มีความเข้มข้นของเอทิลีน 1,000 ppm ลงใน Chamber ทดสอบที่มีความจุขนาด 2 L จากนั้นทำการตรวจวัดเอทิลีนใน Chamber เพื่อเป็นข้อมูลแก๊สเอทิลีนที่ความเข้มข้น 5 ppm



ภาพที่ 3.9 วัดแก๊สเอทิลีนด้วยเซ็นเซอร์ รุ่น C2H4/CA-10 บริษัท Membrapor AG

### 3.2.3 ทดสอบแก๊สเอทิลีนด้วยเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์



ภาพที่ 3.10 แผนภาพทดสอบแก๊สเอทิลีน

(ที่มา : P. Leangtanom, et.al. 2020)

จากภาพที่ 3.10 เซ็นเซอร์แก๊สได้รับการทดสอบโดยใช้ระบบตรวจจับแก๊สที่ไหลผ่าน อากาศและแก๊สจะอยู่ในห้องทดสอบโดยใช้ตัวควบคุมการไหลของมวลควบคุมด้วยคอมพิวเตอรื (MFCs) แต่ในรอบของการตรวจจับ เซ็นเซอร์จะอยู่ภายใต้แก๊สเป็นเวลา 10 นาที ตามด้วยอากาศเป็นเวลา 25 นาที ให้แรงดันไฟฟ้า 10 V กับเซ็นเซอร์และวัดกระแสเพื่อกำหนดความต้านทานของเซ็นเซอร์โดยใช้พีโคแอมมิเตอร์แบบคอมพิวเตอรืผ่านมัลติเพล็กซ์เซอร์ (MUX) ซึ่งส่งสัญญาณผ่านอุปกรณ์รับข้อมูล (DAQ) ที่เชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอรื วัดอุณหภูมิในการทำงานโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดที่ติดอยู่กับฮีตเตอร์ ทำการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ 250 ถึง 400 ° C โดยการควบคุมกระแสฮีตเตอร์ที่ใช้ของแหล่งจ่ายไฟ DC ที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอรืผ่าน DAQ โดยใช้รูปแบบการควบคุมแบบสัดส่วน - อินทิกรัล - ดิฟเฟอเรนเชียล การทดลองดำเนินการโดยอัตโนมัติโดยซอฟต์แวร์ที่ใช้คือ Labview บ่งบอกถึงการตอบสนองของเซ็นเซอร์ ความเสถียรประเมินด้วยอัตราส่วนคอมโพสิตที่อุณหภูมิในการทำงานแตกต่างกัน

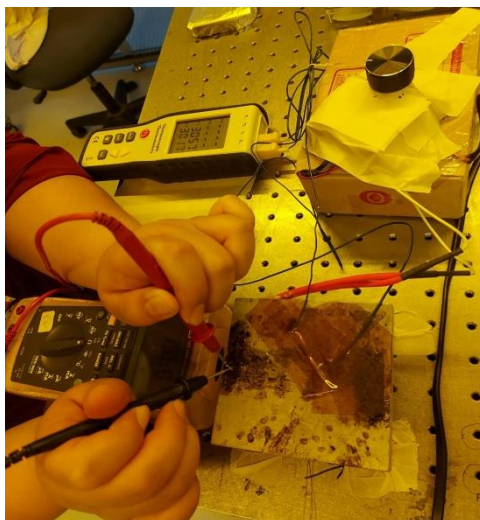
## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

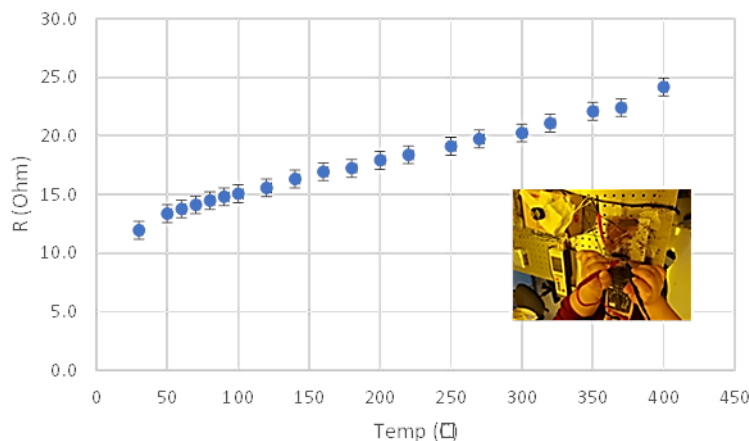
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาความหนาของอนุภาคนาโน สัดส่วนของสารยึดเหนี่ยวที่ใช้เป็นตัวยึดระหว่างอนุภาคนาโนกับชั้นอิเล็กโทรด และอุณหภูมิที่ใช้ในการกำจัดสารยึดเหนี่ยวแตกต่างกัน มีผลการศึกษา ดังนี้

#### 4.1 ผลการทดสอบไมโครฮีตเตอร์

ในการทดสอบไมโครฮีตเตอร์จะใช้เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการป้อนค่าอุณหภูมิให้กับระบบทดสอบฮีตเตอร์ ไมโครฮีตเตอร์ที่ได้จะถูกนำมาทดสอบ โดยวางบน hot plate และนำเทอร์โมคัปเปิลมาเป็นตัววัดอุณหภูมิ เพื่อทำการทดสอบฮีตเตอร์ โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 400 องศาเซลเซียส และกำหนดจุดอุณหภูมิที่จะทำการวัดค่าความต้านทานโดยใช้เทอร์มิสเตอร์เป็นตัววัด การทดลองจะแสดงให้เห็นว่าไมโครฮีตเตอร์ยังสามารถทำงานได้เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งจะส่งผลดีต่อการนำไปใช้งานในอนาคตสำหรับการทดสอบแก๊สเอทิลีนซึ่งต้องใช้อุณหภูมิในการตรวจวัดในช่วง 350 - 400 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.1 การทดสอบไมโครฮีตเตอร์



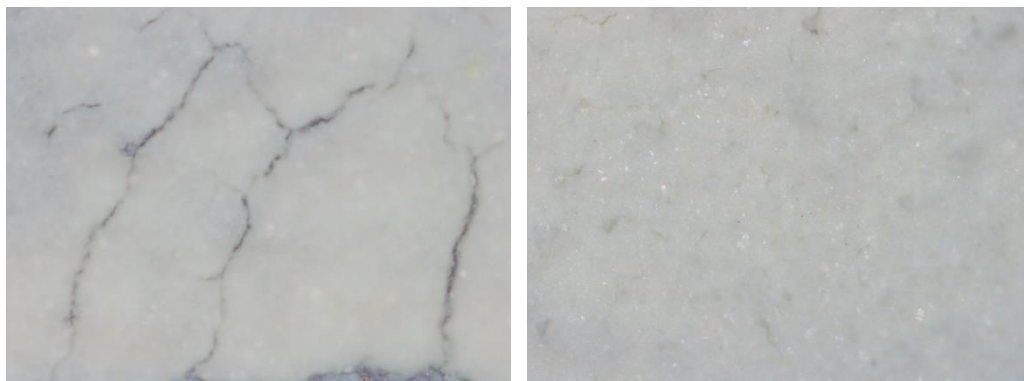
ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง เมื่อไมโครฮีตเตอร์ถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

#### 4.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนของสารยึดเหนี่ยว

ในการเตรียมตัวตรวจจับแก๊สจะต้องมีสารยึดเหนี่ยว (Binder) เพื่อช่วยยึดระหว่างอนุภาคนาโนทินออกไซด์เจือด้วยซีเรียมออกไซด์กับตัวอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากเราไม่สามารถที่จะนำอนุภาคนาโนไปวางบนอิเล็กทรอนิกส์ได้ เราจึงจะต้องหาอัตราส่วนของสารยึดเหนี่ยวที่ดีที่สุดมาเป็นตัวยึดเกาะจากการทดลองได้ทำการศึกษ้อัตราส่วนระหว่างเอทิลเซลลูโลสต่อเทอไพนิออล คือ 0.2 g : 18 mL, 0.3 g : 18 mL, 0.4 g : 18 mL, 0.48 g : 18 mL และ 0.58 g : 18 mL กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นกวนผสมต่อที่อุณหภูมิห้องอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง สารยึดเหนี่ยวที่ได้จะมีความหนืดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนที่ผสม จากนั้นนำสารยึดเหนี่ยวมาผสมกับอนุภาคนาโนในอัตราส่วน 0.15 mL : 0.03 g แล้วทำการหยดสารลงบนฐานวัสดุรองรับ ทำการอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ก่อนจะนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 และ 450 องศาเซลเซียส เพื่อไล่สารระเหย (Solvent) ที่อยู่ใน Binder

และจากการทดลองพบว่า เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 และ 450 องศาเซลเซียส ส่งผลทำให้วัสดุฐานรองรับเสียรูป ฟิล์มเซ็นเซอร์เกิดการแตกร้าว และไม่สามารถไล่สารระเหยที่อยู่ในสารยึดเหนี่ยวออกได้ตั้งแต่อัตราส่วนที่ 0.3 : 18 – 0.58 : 18 แม้จะใช้อุณหภูมิในการเผาที่ 450 องศาเซลเซียส ผู้วิจัยจึงได้ทำการลดสารยึดเหนี่ยวลงเป็น 0.2 : 18 เพื่อลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา จากนั้นนำสารยึดเหนี่ยวในอัตราส่วน 0.2 : 18 ไปเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส พบว่าก็ไม่สามารถเผาสารระเหยออกจากสารยึดเหนี่ยวออกได้หมด จึงเพิ่มอุณหภูมิเป็น 350 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถเผาสารระเหยออกได้หมด ฟิล์มเซ็นเซอร์ไม่เกิดการแตกร้าว และแผ่น PI ไม่เกิดการเสียรูป จึงสามารถสรุปได้ว่าสารยึดเหนี่ยวที่อัตราส่วน 0.2 : 18 เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดที่ใช้ในการยึดเกาะระหว่างอนุภาคนาโนกับวัสดุฐานรองรับ





ก.

ข.

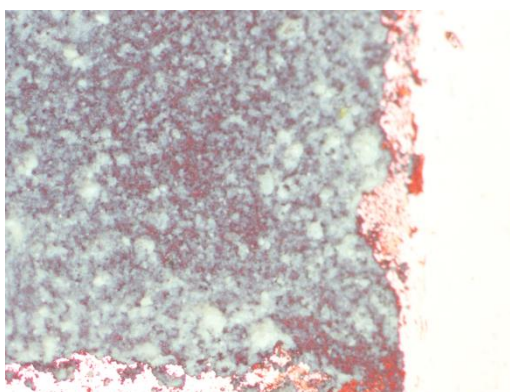
ภาพที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มเซ็นเซอร์ของสารยัดเหนียวในอัตราส่วนต่างๆ

ก. ลักษณะพื้นผิวฟิล์มเซ็นเซอร์สารยัดเหนียวอัตราส่วนที่ 0.3 : 18 – 0.58 : 18

ข. ลักษณะพื้นผิวฟิล์มเซ็นเซอร์สารยัดเหนียวอัตราส่วนที่ 0.2 : 18

#### 4.3 ผลการศึกษาความหนาของอนุภาคนาโน

การเตรียมชั้นตรวจจับแก๊สสำหรับ Ethylene sensor โดยให้มีความหนาของฟิล์มเซ็นเซอร์มากกว่า 10  $\mu\text{m}$  เพื่อให้เพียงพอสำหรับการเป็นชั้นตรวจจับแก๊สเอทิลีน หลังจากที่ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนของสารยัดเหนียวที่อัตราส่วน 0.2 : 18 เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดสำหรับการเป็นสารยัดเกาะ จากนั้นเราจะทำการศึกษาความหนาของฟิล์มเซ็นเซอร์ การทดลองนี้จะใช้รอบในการสปินโคตติงแตกต่างกัน 2 เงื่อนไขคือ (1) Step 1; 500 rpm 10 sec, Step 2; 2,000 rpm 30 sec พบว่าฟิล์มที่ได้ไม่แตกร้าวแต่ความหนาของฟิล์มอยู่ในช่วง 2-4  $\mu\text{m}$  ซึ่งบางมากและไม่เพียงพอสำหรับการเป็นชั้นตรวจจับแก๊สเอทิลีนที่ความเข้มข้นต่ำๆ



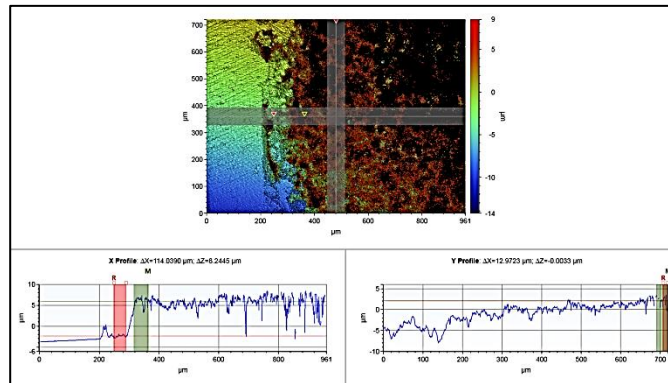
ภาพที่ 4.4 ความหนาของฟิล์มหมุนเหวี่ยง Step 1; 500 rpm 10 sec Step 2; 2,000 rpm 30 sec

และ (2) Step 1; 500 rpm 10 sec Step 2; 1,500 rpm 30 sec พบว่าฟิล์มเซ็นเซอร์ที่อยู่บนแผ่น PI ยังมีรอยแตกร้าว และความหนาของฟิล์มอยู่ในช่วง 6-8  $\mu\text{m}$  ซึ่งยังคงไม่เพียงพอสำหรับการเป็นชั้นตรวจจับแก๊สเอทีลิน จากการทดลองความเป็นไปได้ในการเตรียมชั้นฟิล์มให้มีความหนามากขึ้นจากการสปินโคตติงเพื่อเคลือบสารหลายๆ ชั้น จึงทำการเลือกเงื่อนไขการสปินโคตติงที่ Step 1; 500 rpm 10 sec Step 2; 2,000 rpm 30 sec พบว่าการเคลือบสารโดยการสปินโคตติงหลายๆ ชั้น ทำให้ฟิล์มที่ได้มีความหนาเพิ่มขึ้น แต่ยังคงทำให้เกิดรอยร้าวของฟิล์มเซ็นเซอร์

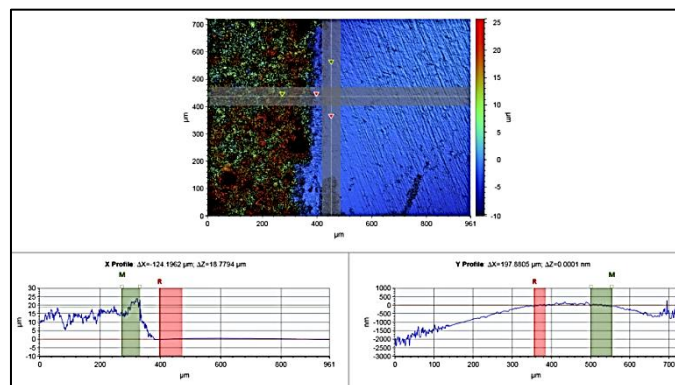


ภาพที่ 4.5 ความหนาของฟิล์มหมุนเหวี่ยง Step 1; 500 rpm 10 sec Step 2; 1,500 rpm 30 sec

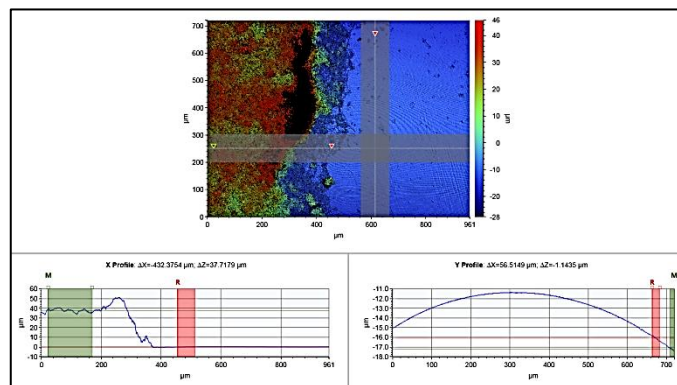
เนื่องจากในการทดลองยังคงพบปัญหาฟิล์มเซ็นเซอร์มีการแตกร้าว จึงทำการเพิ่มปริมาณสารยึดเหนี่ยวจาก 0.15 mL เป็น 0.2 mL เพื่อให้การยึดเกาะของอนุภาคนาโนกับวัสดุฐานรองรับดีขึ้น ทำการเตรียมฟิล์มเซ็นเซอร์บนแผ่น PI โดยผสมอนุภาคนาโน 0.03 g ในสารยึดเหนี่ยว 0.2 mL ใช้การสปินโคตติงด้วยเงื่อนไข Step 1; 500 rpm 10 sec Step 2; 2,000 rpm 30 sec จากนั้นทำการอบบน Hot plate ที่ 65 องศาเซลเซียส ในแต่ละชั้นก่อนนำไปอบที่ 80 องศาเซลเซียส และเผาที่ 350 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เพื่อลดปัญหาความเค้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว โดยที่ความหนาของฟิล์มเซ็นเซอร์จะทำการเพิ่มจำนวนรอบในการเคลือบ คือ 7 รอบ, 10 รอบ และ 15 รอบ ซึ่งได้วัดความหนาของฟิล์มด้วยเครื่องวัดความหนาและความหยาบของพื้นผิวชิ้นงาน (Optical Surface Profiler) พบว่าความหนาของฟิล์มเซ็นเซอร์อยู่ในช่วง 5-10  $\mu\text{m}$ , 10-20  $\mu\text{m}$  และ 30-50  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ



ก.



ข.



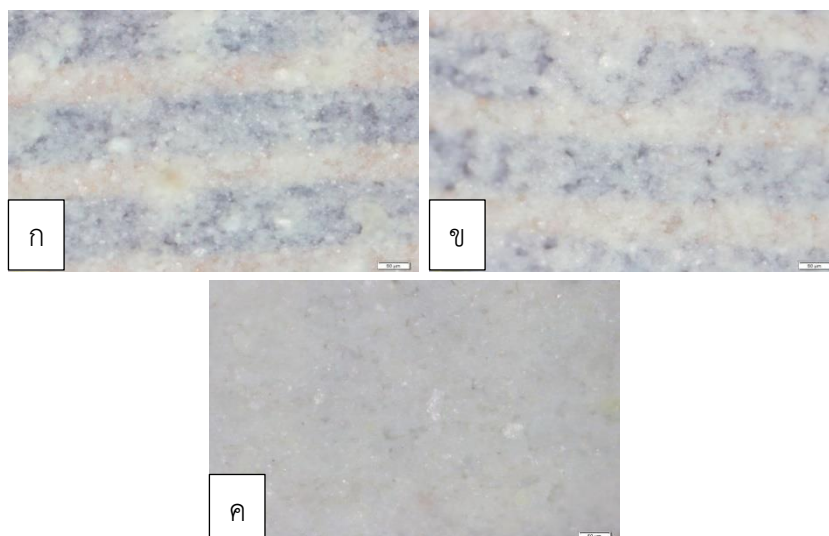
ค.

ภาพที่ 4.6 ความหนาของฟิล์มเซินเซอร์ที่สปินโคตติงต่างกัน จากเครื่อง Optical Surface Profiler

ก. ความหนาของฟิล์มเซินเซอร์ที่สปินโคตติง 7 ชั้น (5-10  $\mu\text{m}$ )

ข. ความหนาของฟิล์มเซินเซอร์ที่สปินโคตติง 10 ชั้น (10-20  $\mu\text{m}$ )

ค. ความหนาของฟิล์มเซินเซอร์ที่สปินโคตติง 15 ชั้น (30-50  $\mu\text{m}$ )

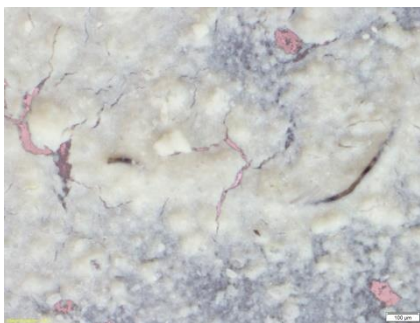


ภาพที่ 4.7 พื้นผิวของฟิล์มเซิร์นเซอร์ที่สพินโคตติงต่างกัน จากกล้อง Olympus Microscope

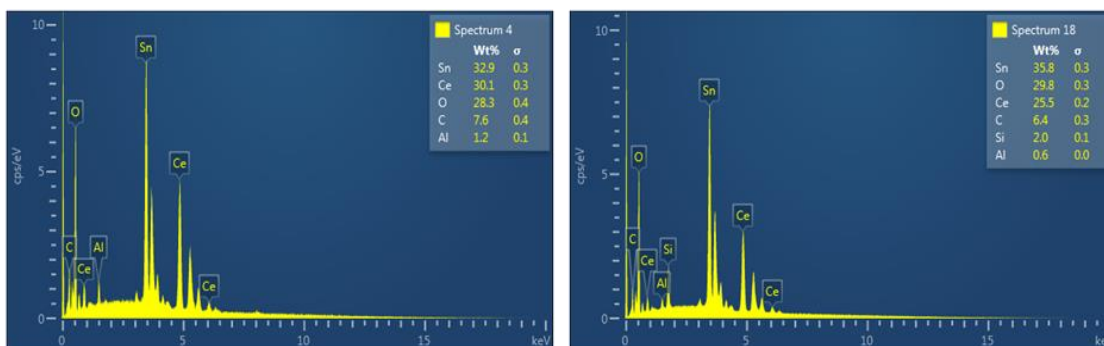
- ก. พื้นผิวของเซิร์นเซอร์ที่เตรียมได้จากการสพินโคตติง 7 ครั้ง
- ข. พื้นผิวของเซิร์นเซอร์ที่เตรียมได้จากการสพินโคตติง 10 ครั้ง
- ค. พื้นผิวของเซิร์นเซอร์ที่เตรียมได้จากการสพินโคตติง 15 ครั้ง

#### 4.4 ผลการศึกษาอนุภาคนิวที่ใช้ในการการกำจัดสารยึดเหนี่ยว

เมื่อเราได้ทำเซิร์นเซอร์จากการสพินโคตติงแล้ว เราจะนำเซิร์นเซอร์ไปเผาเพื่อกำจัดสารยึดเหนี่ยว (Binder) ออกให้หมด เพราะถ้ามีสารยึดเหนี่ยวหลงเหลืออยู่จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าได้ไม่ดี อนุภาคนิวที่เราใช้ศึกษาในการเผา Binder คือ 300, 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส และจากการศึกษาพบว่า อนุภาคนิว 300 องศาเซลเซียส ไม่สามารถกำจัดสารยึดเหนี่ยวออกให้หมดได้ ยังมีสารยึดเหนี่ยวหลงเหลืออยู่ ส่วนอนุภาคนิว 350 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดสารยึดเหนี่ยวออกได้หมด และพื้นผิวของเซิร์นเซอร์ยังสามารถยึดติดกัน ไม่แตกออกจากกัน และสำหรับอนุภาคนิว 400 และ 450 องศาเซลเซียส พบว่าทำให้พื้นที่ผิวของตัวเซิร์นเซอร์มีการแตกร้าว ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และได้นำไปวิเคราะห์ด้วย EDS เพื่อดูองค์ประกอบของธาตุในชั้นตรวจจับแก๊ส โดยเปรียบเทียบกันระหว่าง  $\text{CeO}_x\text{-SnO}_2$  particles และ  $\text{CeO}_x\text{-SnO}_2$  ที่ถูกผสมในสารยึดเหนี่ยว แล้วนำไปเผาที่ 350 องศาเซลเซียส จึงสรุปได้ว่าที่อนุภาคนิว 350 องศาเซลเซียส เป็นอนุภาคนิวที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดสารยึดเหนี่ยว



ภาพที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวเซิร์นเซอร์ที่ใช้อุณหภูมิ 400 และ 450 องศาเซลเซียสในการเผา



ก.

ข.

ภาพที่ 4.9 EDS ของ ก.  $CeO_x-SnO_2$  particles และ

ข.  $CeO_x-SnO_2$  ที่ถูกผสมในสารยึดเหนี่ยวแล้วนำไปเผาที่ 350 องศาเซลเซียส

#### 4.5 ผลการศึกษาความสามารถในการตรวจจับแก๊สเอทิลีน

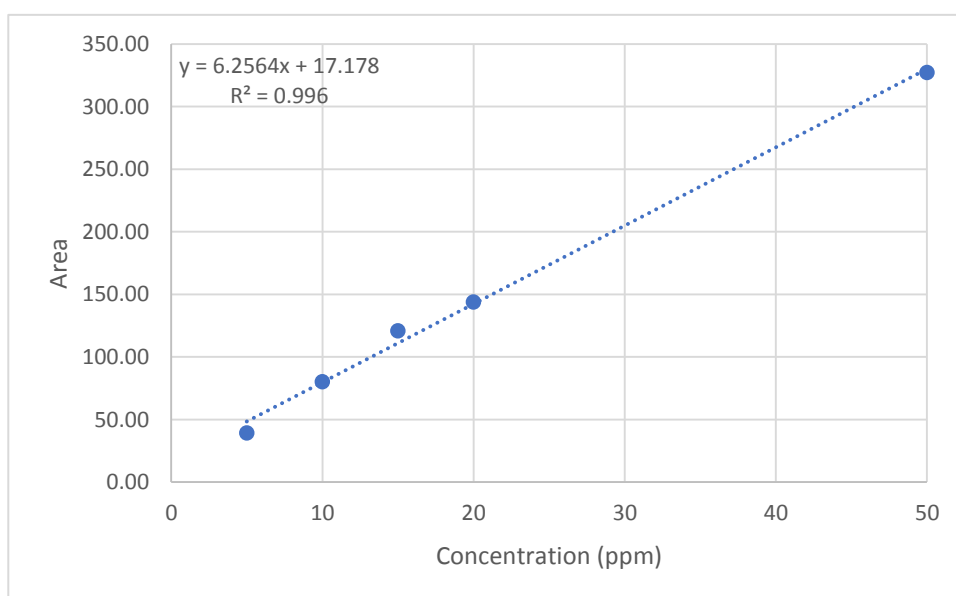
##### 4.5.1 ผลการทดสอบแก๊สเอทิลีนด้วยเครื่อง SRI 310C Gas chromatography

ทำการตรวจวัดแก๊สเอทิลีนที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยเครื่อง SRI 310C Gas Chromatograph ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการจุลินทรีย์ดินประยุกต์ สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบไปด้วย อุณหภูมิของคอลัมน์เริ่มต้น 80 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นที่อัตรา 30 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 200 องศาเซลเซียส จากนั้นข้อมูลที่ได้ดังตารางที่ 1 จะนำมาทำกราฟมาตรฐานของแก๊สเอทิลีน

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดเอทิลีนที่ความเข้มข้นต่างๆ

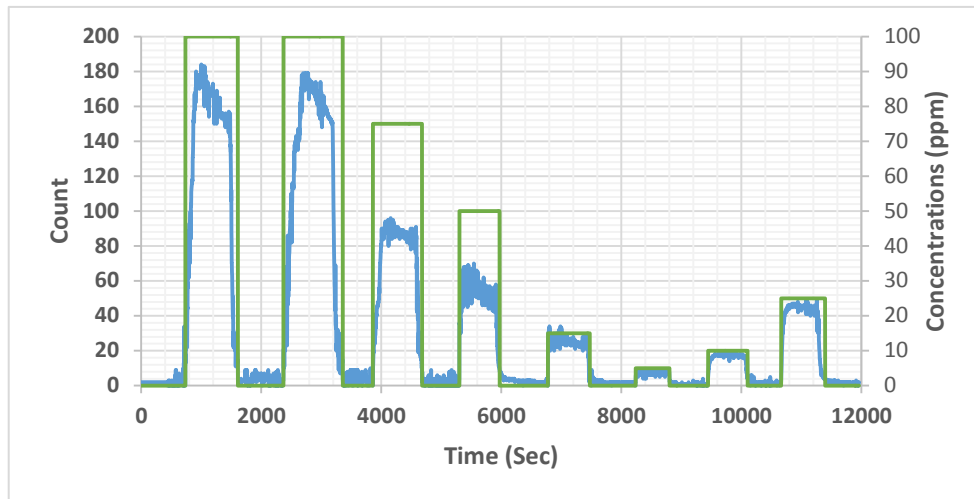
Rep.	concentration	RT	area	height	area%
1	1000	2.49	5598.904	410.317	100
2	1000	2.496	5216.844	384.938	100
3	1000	2.333	4946.706	321.658	100
4	1000	2.492	5310.424	392.74	100
5	1000	2.48	5293.421	389.23	100
avg	1000	2.4582	5273.26	379.7766	100
1	50	2.556	331.5219	25.456	100
2	50	2.48	327.8394	24.048	100
3	50	2.456	351.1198	28.18	100
4	50	2.416	322.1796	22.508	100
5	50	2.42	317.6856	22.452	100
avg	50	2.4656	330.0693	24.5288	100
1	20	2.523	142.7018	11.651	100
2	20	2.24	143.3392	9.828	100
3	20	2.296	143.4618	9.887	100
4	20	2.28	142.2332	9.929	100
5	20	2.406	154.9754	10.586	100
6	20	2.336	137.3213	9.572	100
avg	20	2.346833	144.0055	10.24217	100
1	15	2.53	120.4455	9.526	100
2	15	2.413	121.9662	8.658	100
3	15	2.243	120.7264	8.037	100
4	15	2.283	116.3142	8.016	100
5	15	2.43	125.1556	8.698	100
avg	15	2.3798	120.9216	8.587	100
1	10	2.546	81.144	6.367	100
2	10	2.483	86.4578	6.381	100
3	10	2.36	77.4679	5.479	100
4	10	2.413	77.1602	5.521	100

5	10	2.416	78.7742	5.516	100
avg	10	2.4436	80.20082	5.8528	100
1	5	2.523	37.408	3.008	100
2	5	2.426	36.615	2.77	100
3	5	2.496	43.9152	3.226	100
4	5	2.506	41.7554	3.134	100
5	5	2.44	36.4072	2.718	100
avg	5	2.4782	39.22016	2.9712	100



ภาพที่ 4.10 กราฟมาตรฐานของแก๊สเอทิลีนที่ความเข้มข้นต่างๆ

#### 4.5.2 ผลทดสอบแก๊สเอทิลีนด้วยเซ็นเซอร์ รุ่น C2H4/CA-10 (Commercial sensor)



ภาพที่ 4.11 แก๊สเอทิลีนที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อวัดด้วย เซนเซอร์ รุ่น C2H4/CA-10

#### 4.5.3 ทดสอบแก๊สเอทิลีนด้วยเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

เนื่องจากในระบบลำแสงที่ 6 Deep X-Ray Lithography หรือ DXL ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ยังไม่มีระบบทดสอบแก๊ส เราจึงขอความร่วมมือไปยังศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) แล้วพบว่าวันที่เราได้รับการอนุมัติให้ไปทดสอบ ระบบทดสอบแก๊สเกิดมีปัญหาก็ทำให้ไม่สามารถไปทดสอบแก๊สได้ จึงเป็นปัญหาที่เราไม่สามารถควบคุมและแก้ไขได้ เราจึงได้สร้างระบบทดสอบแก๊สขึ้นมา แต่ยังมีปัญหาคือไม่สามารถติดตั้งระบบทดสอบแก๊สได้ตามแผนที่วางไว้ เราจึงได้ผลการทดลองแค่การทดสอบแก๊สเอทิลีนด้วยเครื่อง SRI 310C Gas chromatography และทดสอบแก๊สเอทิลีนด้วยเซ็นเซอร์ รุ่น C2H4/CA-10 ทำให้วิจัยฉบับนี้ยังไม่สมบูรณ์ ในการดำเนินงานครั้งต่อไปจึงเหลือขั้นตอนการตรวจวัดแก๊สเอทิลีนด้วยเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้นมา



## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแก๊สเซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สเอทิลีนชนิดยึดหยุ่นที่ประดิษฐ์จากอนุภาคนาโนทินออกไซด์เจือด้วยซีเรียมออกไซด์ ทำการทดสอบไมโครฮีตเตอร์พบว่าสามารถทำงานได้ถึงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และศึกษาอัตราส่วนอัตราส่วนระหว่างเอทิลเซลลูโลสต่อแอลฟา-เทอไพนิออลที่ใช้เป็นตัวยึดเกาะ โดยอัตราส่วนที่ดีที่สุดเหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นตัวยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุและอิเล็กทรอนิกส์คือ 0.2 g : 18 mL นำสารยึดเหนี่ยวมาผสมกับอนุภาคนาโนในอัตราส่วน 0.2 mL : 0.03 g ใช้การสปินโคตติงด้วยเงื่อนไข Step 1; 500 rpm 10 sec Step 2; 2,000 rpm 30 sec ได้ผลดีที่สุด เนื้อผิวของฟิล์มเซ็นเซอร์ไม่แตกร้าว มีความหนา 10  $\mu\text{m}$  ซึ่งเพียงพอต่อการตรวจจับแก๊สเอทิลีน และจากนั้นได้นำมาทำการศึกษารูขุมภูมิที่ใช้ในการเผาสารยึดเหนี่ยวศึกษาที่อุณหภูมิ 300, 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสสามารถกำจัดสารยึดเหนี่ยวได้หมด และพื้นผิวของเซ็นเซอร์ไม่แตกร้าว มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ในการทดสอบแก๊สเอทิลีนจากเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้นมายังไม่ได้ทำการทดสอบในระยะเวลาที่กำหนด ทำให้เล่มวิจัยฉบับนี้ไม่ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ เนื่องจากระยะเวลาไม่เพียงพอในการทำการศึกษา แผนการดำเนินงานครั้งต่อไปจึงเหลือการทดสอบกับแก๊สจากเซ็นเซอร์ที่ได้สร้างขึ้นมา

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาหาวิธีการอื่นๆในการเตรียมชั้นตรวจจับแก๊สแทนการสปินโคตติง เพื่อลดเวลาในการเตรียมเซ็นเซอร์

5.2.2 ศึกษาหาอนุภาคนาโนชนิดอื่นๆที่ใช้เป็นตัวตรวจจับแก๊สเอทิลีน และอัตราส่วนของสารยึดเหนี่ยวที่ใช้เป็นตัวยึดเกาะระหว่างอนุภาคนาโนและวัสดุฐานรองรับ

#### 5.3 ปัญหาที่พบ

5.3.1 ในการเตรียมตัวตรวจจับแก๊สด้วยวิธีการสปินโคตติงหลายๆชั้น ทำให้เสียเวลาเป็นอย่างมาก

5.3.2 ในการทดสอบไมโครฮีตเตอร์ด้วยเทคนิคพัลส์วิตท์มอดูเลชัน ที่ใช้ใช้กล่องอินฟราเรดวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ สามารถจับความร้อนได้ถึงแค่อุณหภูมิ 281 องศาเซลเซียส

5.3.3 ในระบบลำแสงที่ 6 DXL ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ยังไม่มีระบบทดสอบแก๊ส ทำให้มีระยะเวลาไม่เพียงพอสำหรับการศึกษาในครั้งนี้

## บรรณานุกรม

- D. Briand. et. al. (2008). *Integration of MOX gas sensors on polyimide hotplates*. (Online). Available URL : <https://sci-hub.se>.
- J. Courbat. et. al. (2011). *Design and fabrication of micro-hotplates made on a polyimide foil: electrothermal simulation and characterization to achieve power consumption in the low mW range*. (Online). Available URL : <https://sci-hub.se>.
- J. Courbat. et. al. (2012). *Drop-coated metal-oxide gas sensor on polyimide foil with reduced power consumption for wireless applications*. (Online). Available URL : <https://sci-hub.se>.
- M. Rieu. et. al. (2015). *Inkjet printed SnO<sub>2</sub> gas sensor on plastic substrate*. (Online). Available URL : <https://sci-hub.se>.
- P. Leangtanom. et. al. (2020). *Highly sensitive and selective ethylene gas sensors based on CeO<sub>x</sub>-SnO<sub>2</sub> nanocomposites prepared by a Co-precipitation method*. (Online). Available URL : <https://sci-hub.se>.
- จักรี ศรีนนท์ฉัตร และชนะ จันทศรี. (2559). การเพิ่มประสิทธิภาพการจำแนกกลิ่นของจมูกอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม. (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <http://www.ecard.rmutt.ac.th>.
- ธีระพงษ์ แสนทวีสุข. (2561). เทคโนโลยีหัตถ์แก๊สชนิดสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์. (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <https://www.researchgate.net>. (4 เมษายน 2561)
- พัฒนพงศ์ จันทพงษ์ และพิมพ์ชนก เหลือสูงเนิน. (2563). การพัฒนาเซ็นเซอร์ด้วยเทคนิคโฟโตรีโกราฟี. (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <https://www.slri.or.th>. (9 กันยายน 2563)
- รัฐวรรณ โคกทอง แอละคณะ. (2560). เครื่องบอกระยะการสุกของมะม่วงโดยแก๊สเซ็นเซอร์โลหะออกไซด์. แหล่งที่มา : <https://www.psu.ac.th>.
- วิรัชชา เครือฟู. (2562). เพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับเอทิลีนของเซ็นเซอร์ผสมซีเรียมออกไซด์กับทินออกไซด์สำหรับประยุกต์ใช้ตรวจสอบความสุกแก่ของผลไม้. แหล่งที่มา : <https://erp.mju.ac.th>. (31 ธันวาคม 2562)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วัสดุและสารเคมี

## วัสดุและสารเคมี



ภาพที่ ก.1 AZ4620



ภาพที่ ก.2 แคลเทคไพนิคอลล



ภาพที่ ก.3 เอทิลเซลลูโลส



ภาพที่ ก.4 ทिनออกไซด์  
เจือด้วยซีเรียมออกไซด์



ภาพที่ ก.5 Boric acid



ภาพที่ ก.6 KOH



ภาพที่ ก.7 Acetone



ภาพที่ ก.8 IPA



ภาพที่ ก.9 น้ำ RO

ภาคผนวก ข  
เครื่องมือและอุปกรณ์

## เครื่องมือและอุปกรณ์



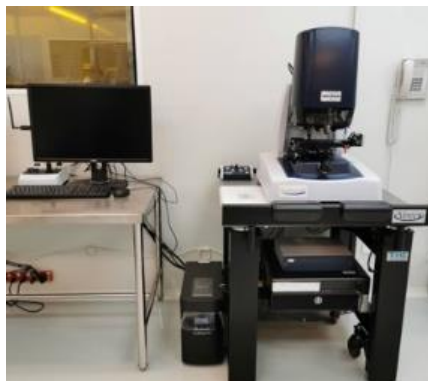
ภาพที่ ข.1 Electron Beam  
Evaporator



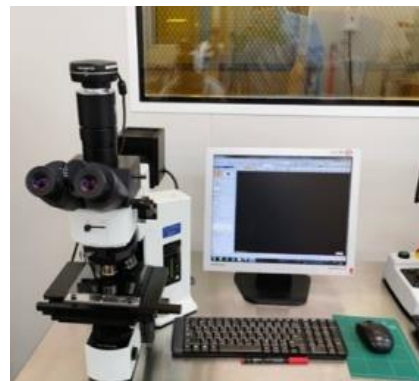
ภาพที่ ข.2 เครื่อง Sputtering



ภาพที่ ข.3 เครื่อง Spin  
coator



ภาพที่ ข.4 เครื่อง Bruker



ภาพที่ ข.5 Olympus



ภาพที่ ข.6 เครื่อง EVG610  
UV Mask Alignment



ภาพที่ ข.7 เครื่อง  
Plasma



ภาพที่ ข.8 เตาเผา



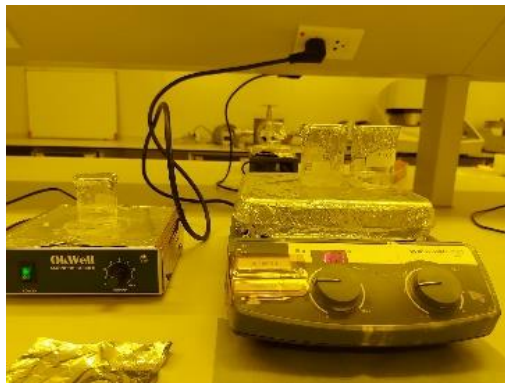
ภาพที่ ข.9 hot plate



ภาพที่ ข.10 เทอโมคัปเปิล,  
เทอร์โมมิเตอร์



ภาพที่ ข.11 เตาอบ



ภาพที่ ข.12  
เครื่องกวนแม่เหล็ก



ภาพที่ ข.13  
ดรอปปเปอร์พลาสติก



ภาพที่ ข.14  
เครื่องชั่งสาร



ภาพที่ ข.15  
แคปตันเทป



ภาพที่ ข.16  
บีกเกอร์



## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ นามสกุล	นางสาวณัฐพร รัตน์วิชัย
ตำแหน่ง	นักศึกษา
วันเดือนปีเกิด	16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2541
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลภูมิพลอดุลยเดช กรมแพทย์ทหารอากาศ ถ.พหลโยธิน แขวงคลองถนน เขตสายไหม กรุงเทพฯ
วุฒิการศึกษา	มัธยมต้น โรงเรียนสีดาวิทยา มัธยมปลาย โรงเรียนสีดาวิทยา
สถานศึกษา	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2563
สถานที่ที่ติดต่อได้	บ้านเลขที่ 14 หมู่ 10 ตำบลวังหิน อำเภอโนนแดง จังหวัดนครราชสีมา 30360

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ นามสกุล	นางสาวพิจิตรา องอาจ
ตำแหน่ง	นักศึกษา
วันเดือนปีเกิด	31 ธันวาคม พ.ศ. 2541
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลมหาราชนครราชสีมา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา
วุฒิการศึกษา	มัธยมต้น โรงเรียนนครบุรี มัธยมปลาย โรงเรียนนครบุรี
สถานศึกษา	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2563
สถานที่ที่ติดต่อได้	บ้านเลขที่ 189 หมู่ 6 ตำบลลำเพี้ยก อำเภอนครบุรี จังหวัดนครราชสีมา 30250