

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**เซนเซอร์ก๊าซแอลพีจี จากฟิล์มบางทินออกไซด์**

**LPG SENSORS BASED ON SnO<sub>2</sub> THIN FILMS**

โดย  
นายอดิศักดิ์ อูบแสน  
นายสุรภัทร นาคอนอม

รฟ.  
๑/๒๓ ๗  
๑๕๕๐

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 82462  
วัน,เดือน,ปี... 11 ก.ค. 2551

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550**

b. 11946258  
i. ....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**เซนเซอร์ก๊าซแอลพีจี จากฟิล์มบางทินออกไซด์**  
**LPG SENSORS BASED ON SnO<sub>2</sub> THIN FILMS**



**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**  
**สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เซนเซอร์ก๊าซแอลพี จากฟิล์มบางทินออกไซด์

ผู้จัดทำ

1. นายอดิศักดิ์ อุปแสน รหัส 48015277

2. นายสุรภัทร นาคถนอม รหัส 48015276



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เซนเซอร์ก๊าซแอลพีจี จากฟิล์มบางทินออกไซด์

นายอดิศักดิ์ อุปแสน รหัส 48015277

นายสุรภัทร นาคถนอม รหัส 48015276

ผศ.ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2550

### บทคัดย่อ

การเคลือบจุ่ม เป็นวิธีที่น่าสนใจอย่างมาก ในการสร้างฟิล์มบางประเภทวัสดุออกไซด์ ฟิล์มบางทินออกไซด์ได้ถูกสร้างลงบนฐานรอง โดยใช้วิธีการเคลือบจุ่มซึ่งใช้สารละลาย  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{NH}_4\text{F}$  ฟิล์มที่สร้างขึ้น ได้ถูกนำมาศึกษาเพื่อประเมินการนำไปใช้เป็นเซนเซอร์ก๊าซแอลพีจี ผลที่ดีที่สุดหาได้ โดยการเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ เช่น ความหนาของฟิล์ม และชนิดของฐานรอง(กระจก/อะลูมิน่า) การวัดความต้านทานทางไฟฟ้าแสดงให้เห็นการลดค่าความต้านทานอย่างรวดเร็วเมื่อฟิล์มถูกสัมผัสด้วยแอลพีจี การตอบสนองทางไฟฟ้าของฟิล์มบางทินออกไซด์ได้ถูกศึกษาที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## LPG SENSOR FROM THIN FILM SnO<sub>2</sub>

Mr. Adisak Uppasan ID.48015277

Mr. Suraput Naktanom ID.48015276

Professor Assistant Dr.Sutichai Chaisitsak Advisor

Educational Year 2007

### Abstract

Dip-coating is a very interesting method of depositing thin-films of several materials such as oxides. Thin oxide (SnO<sub>2</sub>) thin films have been deposited on a substrate by dip-coating technique using SnCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O and NH<sub>4</sub>F solution. The deposited films have been studied to evaluate their use as LPG gas sensors. The best performance has been found by varying some parameters, such as film thickness and substrate type(glass/alumina substrate). Electrical resistivity measurements show a sharp decrease when the film are exposed to LPG. The electrical response of SnO<sub>2</sub> thin films are studied at various temperatures.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรเล่มนี้ สำเร็จลุล่วงสมบูรณ์ได้ ต้องขอขอบคุณความกรุณาและความเอาใจใส่ของ ผศ.ดร.สุริชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ เป็นอย่างมากที่ให้คำปรึกษา ให้ความรู้ และ ความอนุเคราะห์เครื่องมือในห้องวิจัย วัสดุและอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nano Electronic Material and Device : NEMD Lab) ขอขอบคุณ พี่ปุก, พี่บอย, พี่โอ และเพื่อนๆในห้องแล็บนาโนอิเล็กทรอนิกส์ที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

บทที่ 1	ความมุ่งหมายของรายงาน	
1.1	บทนำ	1
1.2	ขอบเขตและความสำคัญของงาน	1
1.3	วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2	ทฤษฎีและเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแอลพีจี	
2.1	ความรู้เกี่ยวกับก๊าซแอลพีจี	3
2.2	เซ็นเซอร์ก๊าซ	5
2.3	การตรวจวัดปริมาณสาร	9
2.4	ความเป็นมาของการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ	9
2.5	นิยามของก๊าซเซ็นเซอร์	10
2.6	ทินออกไซด์ก๊าซเซ็นเซอร์	13
2.7	ปฏิกิริยาของการดูดซับก๊าซที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ	14
2.8	กลไกในการตรวจจับก๊าซของทินออกไซด์	21
2.9	ปฏิกิริยาเคมีระหว่างทินออกไซด์กับก๊าซต่างๆ	26
2.10	การปรับปรุงความไวในการตอบสนองโดยการเติมตัวแคตะลิสต์	28
บทที่ 3	การสร้างเซ็นเซอร์แอลพีจี	
3.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างฟิล์มบางทินออกไซด์	30
3.2	ขั้นตอนในการเตรียมสารละลาย	34
3.3	ขั้นตอนการสร้างฟิล์มบางทินออกไซด์	34
3.4	ขั้นตอนการสร้างลวดลายโลหะ	37
บทที่ 4	การทดลองและผลการทดลอง	
4.1	การทดลอง	39
4.2	ผลการทดลอง	43
บทที่ 5	สรุปผลการทดสอบ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของเซนเซอร์ก๊าซ	5
รูปที่ 2.2 แสดงการจัดกลุ่มของทรานสดิวเซอร์ (Transducers)	11
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของก๊าซเซนเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำ	14
รูปที่ 2.4 แบบจำลองการเกิดประจุที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ	15
รูปที่ 2.5 Surface double layers แบบต่างๆ	18
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างใน unit cell และ supercell ของ Rutile SnO <sub>2</sub>	19
รูปที่ 2.7 แถบพลังงานของ SnO <sub>2</sub>	20
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเซนเซอร์	22
รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของทินออกไซด์ต่ออุณหภูมิ ที่บรรยากาศของก๊าซต่างๆ	23
รูปที่ 2.10 โครงสร้างแถบพลังงานของทินออกไซด์	24
รูปที่ 2.11 โครงสร้างและแบบจำลองของสารกึ่งตัวนำ	25
รูปที่ 2.12 แบบจำลองกำแพงศักย์ที่ขอบเกรน	25
รูปที่ 2.13 กำแพงศักย์ตามทางเดินกระแสในทินออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์	26
รูปที่ 2.14 การตรวจจับ C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH ของทินออกไซด์ จะได้ CH <sub>3</sub> COOH และ H <sub>2</sub> O	26
รูปที่ 2.15 การตรวจจับ O <sub>3</sub> ของทินออกไซด์ จะได้ O <sub>2</sub>	27
รูปที่ 2.16 การตรวจจับ NO <sub>2</sub> ของทินออกไซด์ จะได้ NO	28
รูปที่ 2.17 ปรากฏการณ์ที่ผิวสัมผัสเมื่อเติมตัวแคทลิสต์	28
รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายอะลูมินากับกระจกที่นำมาใช้เป็นฐานรอง	30
รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายของเครื่องจุ่มอัตโนมัติสั่งงานผ่านคอมพิวเตอร์	31
รูปที่ 3.3 วงจรเชื่อมต่อระหว่างพอร์ตปริ้นเตอร์และสเต็ปมอเตอร์	31
รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายเตาอบความร้อน	32
รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางการทำงานของเครื่องจุ่มอัตโนมัติ	32
รูปที่ 3.6 หน้าจอควบคุมการทำงาน	33
รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายแสดงการคนสารละลาย	34
รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายแสดงการอัลตราโซนิก	34
รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายการติดตั้งชิ้นงานกับเครื่องจุ่ม	34
รูปที่ 3.10 การถ่ายต่อเครื่องจ่ายไฟให้กับเตาอบ	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.11	เตาอบมีอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	35
รูปที่ 3.12	กำหนดสภาวะจากโปรแกรมในคอมพิวเตอร์	36
รูปที่ 3.13	ภาพถ่ายเครื่องเคลือบจุ่มในตู้คูลอากาศ	36
รูปที่ 3.14	ภาพถ่ายชิ้นงานที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub>	37
รูปที่ 3.15	ภาพถ่ายเครื่อง Evaporation	38
รูปที่ 3.15	ภาพถ่ายชิ้นงานที่ทำการเคลือบด้วยอะลูมิเนียม	38
รูปที่ 3.16	ภาพถ่ายเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแอลพีจี	38
รูปที่ 4.1	ภาพถ่ายโดยรวมของระบบที่จะทำการทดสอบ	39
รูปที่ 4.2	ภาพถ่ายของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	39
รูปที่ 4.3	ภาพถ่ายเครื่องวัดและจ่ายแรงดัน/กระแสไฟฟ้า	40
รูปที่ 4.4	ภาพถ่ายภาชนะที่บรรจุเซ็นเซอร์	40
รูปที่ 4.5	ภาพถ่ายปั๊มสุญญากาศและเครื่องแปลงไฟฟ้า	40
รูปที่ 4.6	ภาพโปรแกรม Lab View	41
รูปที่ 4.7	ภาพถ่ายถังบรรจุก๊าซแอลพีจีที่ถูกเก็บไว้ในที่ปลอดภัย	41
รูปที่ 4.8	ภาพถ่ายการทากาวเงินก่อนวางเซนเซอร์	41
รูปที่ 4.9	ภาพถ่ายการวางเซนเซอร์ที่แทนพร้อมทั้งทากาวเงินที่ขั้วเซนเซอร์ทั้ง 2 ข้าง	41
รูปที่ 4.10	ภาพถ่ายเซนเซอร์พร้อมที่จะทดสอบ	42
รูปที่ 4.11	ภาพถ่าย SnO <sub>2</sub> บนฐานรองที่เป็นกระจก	43
รูปที่ 4.12	ภาพถ่าย SnO <sub>2</sub> บนกระจก ใด้ปี NH <sub>4</sub> F 4.5%	43
รูปที่ 4.13	ภาพถ่าย SnO <sub>2</sub> บนกระจกใด้ปี NH <sub>4</sub> F 10%	43
รูปที่ 4.14	ภาพถ่าย SnO <sub>2</sub> บนฐานรองอะลูมินา	43
รูปที่ 4.15	กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	44
รูปที่ 4.16	กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	45
รูปที่ 4.17	กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	46
รูปที่ 4.18	กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	47
รูปที่ 4.19	กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	48
รูปที่ 4.20	กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	49
รูปที่ 4.21	กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	50
รูปที่ 4.22	กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	51
รูปที่ 4.23	กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่4.24 กราฟแสดงผลการจุ่ม10 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	53
รูปที่4.25 กราฟแสดงผลการจุ่ม15 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	54
รูปที่4.26 กราฟแสดงผลการจุ่ม20 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	55
รูปที่4.27 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	56
รูปที่4.28 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	57
รูปที่4.29 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส	58
รูปที่4.30 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	59
รูปที่4.31 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	60
รูปที่4.32 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	61
รูปที่4.33 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	62
รูปที่4.34 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 1.0% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	63
รูปที่4.35 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 3.5% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	64
รูปที่4.36 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 5.5% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	65
รูปที่4.37 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 7.5% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	66
รูปที่4.38 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 10% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	67
รูปที่4.39กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% ก๊าซแอลพีจีความเข้มข้น 6.42%	68
รูปที่4.40 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% ทดสอบก๊าซใน โครเจน	69
รูปที่4.41 การตอบสนองของเซนเซอร์แบบไม่ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ เปรียบเทียบระหว่าง กระจกกับอะลูมินาที่300 องศาเซลเซียส	70
รูปที่4.42 การตอบสนองของเซนเซอร์แบบ ไม่ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ เปรียบเทียบระหว่าง กระจกกับอะลูมินาที่ 400 องศาเซลเซียส	71
รูปที่4.43 การตอบสนองของเซนเซอร์แบบกระจกแบบไม่ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ เปรียบเทียบกับกระจกที่ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% ที่ 300 องศาเซลเซียส	72
รูปที่4.44 การตอบสนองของเซนเซอร์แบบกระจกแบบไม่ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ เปรียบเทียบกับกระจกที่ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% ที่ 400 องศาเซลเซียส	72
รูปที่4.45 การตอบสนองของเซนเซอร์แบบกระจกจุ่ม15 ครั้งที่ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 1%,3.5%,4.5%,5.5%,7.5%และ 10% ที่ 300 องศาเซลเซียส	73
รูปที่4.46 การตอบสนองของเซนเซอร์แบบกระจกจุ่ม15 ครั้งที่ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% ทดสอบที่อุณหภูมิ 250, 300,และ 400 องศาเซลเซียส	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.47 แผนภูมิแท่งแสดง $t_{on}$ และ $t_{off}$ บนกระจกไม่ได้ปี $NH_4F$ และ ได้ปี $NH_4F$ 4.5% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	74
รูปที่ 4.48 แผนภูมิแท่งแสดง $t_{on}$ และ $t_{off}$ บนกระจกไม่ได้ปี $NH_4F$ และ ได้ปี $NH_4F$ 4.5% 75 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	
รูปที่ 4.49 แผนภูมิแท่งแสดง $t_{on}$ และ $t_{off}$ บนกระจกและอะลูมิเนียมที่ได้ปี $NH_4F$ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	75
รูปที่ 4.50 แผนภูมิแท่งแสดง $t_{on}$ และ $t_{off}$ บนกระจกและอะลูมิเนียมที่ได้ปี $NH_4F$ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	76
รูปที่ 4.51 แผนภูมิแท่งแสดง $t_{on}$ และ $t_{off}$ บนกระจกได้ปี $NH_4F$ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	76



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติNGกับLPG	4
ตารางที่ 2.2 แสดงชนิดของก๊าซต่างๆ	8
ตารางที่ 2.3 แสดงตัวอย่างชนิดของเซนเซอร์และวัสดุที่ใช้ทำเซนเซอร์	12
ตารางที่ 2.4 ชนิดของตัวแก๊สที่ที่ใช้เติมในการทดสอบก๊าซชนิดต่างๆ	29
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง โดย $R = 5.25 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส	44
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง โดย $R = 900 \Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส	45
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง โดย $R = 867 \Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส	46
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง โดย $R = 105 \text{ K}\Omega$ ที่ 400 องศาเซลเซียส	47
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง $R = 28.25 \text{ K}\Omega$ ที่ 400 องศาเซลเซียส	48
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง $R = 4.67 \text{ K}\Omega$ ที่ 400 องศาเซลเซียส	49
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง $R = 3.87 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส	50
ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง $R = 14.90 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส	51
ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง $R = 0.71 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส	52
ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง $R = 3.27 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส	53
ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง $R = 5.85 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส	54
ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง $R = 0.26 \text{ K}\Omega$ ที่ 400 องศาเซลเซียส	55
ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง $R = 4 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส	56
ตารางที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง $R = 5 \text{ K}\Omega$ ที่ 400 องศาเซลเซียส	57
ตารางที่ 4.15 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง $R = 6.34 \text{ K}\Omega$ ที่ 250 องศาเซลเซียส	58
ตารางที่ 4.16 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง $R = 21.58 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส	59
ตารางที่ 4.17 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง $R = 11.56 \text{ K}\Omega$ ที่ 400 องศาเซลเซียส	60
ตารางที่ 4.18 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง $R = 2.04 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส	61
ตารางที่ 4.19 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง $R = 1.50 \text{ K}\Omega$ ที่ 400 องศาเซลเซียส	62
ตารางที่ 4.20 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง $R = 5.0 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส	63
ตารางที่ 4.21 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง $R = 18.86 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส	64
ตารางที่ 4.22 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง $R = 20.0 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส	65
ตารางที่ 4.23 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง $R = 8.45 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส	66
ตารางที่ 4.24 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง $R = 3.20 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### ความมุ่งหมายของรายงาน

#### 1.1 บทนำ

ในปัจจุบันนี้ก๊าซแอลพีจี ได้เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตประจำวันของเรามากขึ้น เพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหุงต้มในครัวเรือนใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์รวมไปถึงใช้เป็นแหล่งพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น เนื่องจากน้ำมันมีราคาสูงขึ้นนั่นเอง จะเห็นได้ว่าก๊าซแอลพีจี มีความสำคัญอย่างมากในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ดังนั้นแล้วหากว่าก๊าซเกิดการรั่วไหลขึ้นก็จะเป็นอันตรายต่อชีวิตได้ ดังนั้นแล้วเซ็นเซอร์ก๊าซจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก เพื่อนำมาตรวจจับปริมาณก๊าซแอลพีจี

#### 1.2 ขอบเขตและความสำคัญของงาน

จากการศึกษาเซ็นเซอร์ก๊าซพบว่าทินออกไซด์ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อมีโมเลกุลของก๊าซเข้ามาติดเกาะที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ มีผลทำให้ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไป คุณสมบัติเด่นของทินออกไซด์ ก็คือมีความสามารถในการตอบสนองต่อก๊าซได้ดี สามารถตรวจวัดก๊าซที่มีความเข้มข้นต่ำได้ และนำมาใช้ตรวจจับก๊าซต่างๆ ได้ เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์(CO) แอลกอฮอล์( $C_2H_5OH$ ), แอมโมเนีย( $NH_3$ ), ก๊าซไฮโดรเจน( $H_2$ )และไฮโดรเจนซัลไฟด์( $H_2S$ ) เป็นต้น ในรายงานเล่มนี้เราได้ศึกษาก๊าซเซ็นเซอร์เพื่อตรวจจับก๊าซแอลพีจีเท่านั้น โดยใช้เทคนิคการ dip-coating โดยทำการศึกษาเงื่อนไขต่างๆ เช่น อุณหภูมิ จำนวนครั้งที่ใช้ในการ dip-coating และส่วนผสมของสารตั้งต้น ที่มีผลต่อความต้านทานของฟิล์ม จากนั้นนำมาทำเป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแอลพีจี เซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นจะถูกนำมาทดสอบ ที่ความเข้มข้น และที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ

#### 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการงาน

- 1.3.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของทินออกไซด์ที่จะนำมาสร้างเป็นเซ็นเซอร์
- 1.3.2 เพื่อศึกษาการตอบสนองของทินออกไซด์ต่อก๊าซแอลพีจี
- 1.3.3 เพื่อพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแอลพีจีให้สามารถนำมาใช้งานได้จริง

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ทราบถึงความสำคัญและความจำเป็นของก๊าซเซเนเซอร์
- 1.4.2 สร้างเซเนเซอร์ก๊าซแอลพีจีได้
- 1.4.3 รู้จักวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบการวัดเซเนเซอร์กับก๊าซแอลพีจี
- 1.4.4 รู้จักปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น และหาวิธีการแก้ไขปัญหาได้
- 1.4.5 เรียนรู้การทำงานเป็นกลุ่ม เพื่อต่อไปจะสามารถทำงานร่วมกับบุคคลคนอื่นได้

#### 1.5 แนวโน้มและการประยุกต์ใช้เซเนเซอร์ตรวจจับทางเคมีในอนาคต

เนื่องจากความจำเป็นที่ต้องมีเซเนเซอร์ตรวจจับก๊าซในสถานที่ต่างๆ เช่น ในโรงงาน อุตสาหกรรมขนาดใหญ่, โรงเก็บสารเคมี, ห้องปฏิบัติการ, แหล่งชุมชน, โรงพยาบาล, ปั๊มน้ำมัน, เรือ, รถยนต์, ที่ใกล้ตัวที่สุดคือบ้านที่อยู่อาศัย จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีเครื่องตรวจจับทางเคมี เพื่อวัดระดับสารเคมีสูงสุดที่มนุษย์ทนได้ เห็นได้ว่าได้มีการออกกฎหมายคุ้มครองและควบคุมสารเคมีที่เป็นอันตราย โดยโครงการนี้เราได้สร้างเซเนเซอร์ตรวจจับก๊าซแอลพีจี โดยมีโครงสร้างอย่างง่าย ด้วยวิธีการ dip-coating ซึ่งเป็นวิธีการสร้างเซเนเซอร์ที่ประหยัดค่าใช้จ่าย เมื่อสร้างเป็นเซเนเซอร์แล้วราคาเซเนเซอร์ที่สร้างด้วยวิธีนี้จะถูกมาก ดังนั้นแล้วหากมีการนำมาใช้งานได้จริงก็จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรม หรือในแหล่งต่างๆที่มีก๊าซแอลพีจี

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแอลพีจี

#### 2.1 ความรู้เกี่ยวกับก๊าซแอลพีจี

##### 2.1.1 คุณสมบัติและความแตกต่างระหว่างLPG/NGV

ก๊าซธรรมชาติ (NGV : Natural Gas for Vehicles) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน (Methane) เป็นส่วนใหญ่ จึงเป็นก๊าซที่มีน้ำหนักเบากว่าอากาศ การขนส่งไปยังผู้ใช้จะขนส่งผ่านทางท่อในรูปก๊าซภายใต้ความดันสูง จึงไม่เหมาะสำหรับการขนส่งไกลๆ หรืออาจบรรจุใส่ถังในรูปก๊าซธรรมชาติอัดโดยใช้ความดันสูง หรือที่เรียกว่า CNG แต่ปัจจุบันมีการส่งก๊าซธรรมชาติในรูปของเหลวโดยทำก๊าซให้เย็นลงถึง  $-160$  องศาเซลเซียส จะได้ของเหลวที่เรียกว่า Liquefied Natural Gas หรือ LNG ซึ่งสามารถขนส่งทางเรือไปที่ไกลๆ ได้ และเมื่อถึงปลายทางก่อนนำมาใช้ก็จะทำให้ของเหลวเปลี่ยนสถานะกลับเป็นก๊าซอย่างเดิม ก๊าซธรรมชาติมีค่าออกเทนสูงถึง 120RONจึงสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในยานยนต์ได้

ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG: Liquefied Petroleum Gas) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีองค์ประกอบของก๊าซโพรเพน (Propane) เป็นส่วนใหญ่ จึงเป็นก๊าซที่หนักกว่าอากาศ โดยตัว LPG เองไม่มีสี ไม่มีกลิ่นเช่นเดียวกับก๊าซธรรมชาติ แต่เนื่องจากเป็นก๊าซที่หนักกว่าอากาศจึงมีการสะสมและลุกไหม้ได้ง่าย ดังนั้น จึงมีข้อกำหนดให้เติมสารมีกลิ่น เพื่อเป็นการเตือนภัยหากเกิดการรั่วไหล LPG ส่วนใหญ่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือนและกิจการอุตสาหกรรม โดยบรรจุเป็นของเหลวใส่ถังที่ทนความดันเพื่อให้ขนถ่ายง่าย นอกจากนี้ยังนิยมใช้แทนน้ำมันเบนซินในรถยนต์เนื่องจากราคาถูกกว่าและมีค่าออกเทนสูงถึง 105RON (Research Octane Number = เป็นค่าออกเทนที่มีประสิทธิภาพต่อต้านการน็อคในเครื่องยนต์หลายสูบที่ทำงานอยู่ในรอบของช่วงหมุนต่ำ โดยใช้เครื่องยนต์ทดสอบมาตรฐานภายใต้สภาวะมาตรฐาน 600 รอบ ต่อ นาที ) ก๊าซแอลพีจีนั้นสามารถจุดระเบิดในอากาศที่อุณหภูมิ 400 และต้องค่าความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจีในอากาศเกิน 2000 ppm

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ NG กับ LPG

คุณสมบัติ		NG	LPG
สถานะปกติ		ก๊าซ (เบากว่าอากาศ)	ก๊าซ (หนักกว่าอากาศ)
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)		-162	-50-0
อุณหภูมิจุดระเบิดในอากาศ (องศาเซลเซียส)		540	400
ช่วงตัดไฟในอากาศ (ร้อยละโดยปริมาตร)	ค่าสูง	15	15
	ค่าต่ำ	5	1.5
ค่าออกเทน 1/	RON2/	120	105
	MON3/	120	97

### 2.1.2 ประโยชน์ของก๊าซ

- ใช้เป็นเชื้อเพลิง เราสามารถใช้ก๊าซธรรมชาติได้โดยตรง ด้วยการใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า หรือในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมสุบักซ์ ฯลฯ และเมื่อนำไปอัดใส่ถังด้วยความดันสูงก็สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ได้ เรียกว่า ก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ (Natural Gas for Vehicles - NGV)

- นำไปผ่านกระบวนการแยกในโรงแยกก๊าซ เพราะในตัวเนื้อก๊าซธรรมชาติ มีสารประกอบที่เป็นประโยชน์อยู่มากมาย เมื่อนำมาผ่านกระบวนการแยกที่โรงแยกก๊าซแล้ว ก็จะได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ มาใช้ประโยชน์ได้ดังนี้ ก๊าซมีเทน (C1) : ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ในโรงงานอุตสาหกรรม และนำไปอัดใส่ถังด้วยความดันสูง เรียกว่าก๊าซธรรมชาติอัด สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ รู้จักกันในชื่อว่า "ก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์" (Natural Gas for Vehicles : NGV) เช่นเดียวกัน และหากนำเอาก๊าซโพรเพนกับก๊าซบิวเทนมาผสมกัน อัดใส่ถังเป็น ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas - LPG) หรือที่เรียกว่าก๊าซหุงต้ม สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ และใช้ในการเชื่อม โลหะได้ รวมทั้งยังนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 ข้อระวังในการใช้ก๊าซ

อันตรายเนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวคือ ความไม่มีพิษ โดยทั่วไปก๊าซธรรมชาติ จะไม่เป็นพิษต่อร่างกาย แต่ในกรณีที่ก๊าซธรรมชาติมีก๊าซไข่เน่า (ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์) เจือปนอยู่มาก อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ที่ได้สัมผัสหรือสูดหายใจเอาก๊าซนั้นได้ เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำลายเนื้อเยื่ออ่อน เช่น เยื่อตา เนื้อเยื่อระบบทางเดินหายใจและปอด หากเกิดไฟไหม้/ระเบิด (fire / explosion) ก๊าซธรรมชาติเป็นก๊าซติดไฟ กรณีที่มีก๊าซรั่วไหลผสมกับอากาศ อาจก่อให้เกิดการลุกไหม้ได้ ถ้าอัตราส่วนผสมของก๊าซและอากาศพอเหมาะจะติดไฟ และมีแหล่งความร้อนหรือเปลวไฟหรือประกายไฟในบริเวณนั้น นอกจากนี้ อาจก่อให้เกิดการระเบิดได้ ถ้าเกิดการสะสมของก๊าซธรรมชาติในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง โดยเฉพาะที่อับต่างๆ เช่น ภายในอาคารสถานที่ที่ไม่มีการระบายอากาศที่ดีพอ

## 2.2 เซนเซอร์ก๊าซ

### 2.2.1 ส่วนประกอบของเซนเซอร์ก๊าซ

เซนเซอร์ก๊าซ ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.1 คือ



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของเซนเซอร์ก๊าซ

1. Sensing Membrane เป็นส่วนที่ทำหน้าที่จับหรือทำปฏิกิริยาเคมีกับก๊าซที่ต้องการวัด
- 2 Transducer ทำหน้าที่วัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ sensing membrane เมื่อ membrane จับหรือทำปฏิกิริยากับก๊าซ ( sensing Membrane กับ Transducer อาจจะเป็นตัวเดียวกันก็ได้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 คุณสมบัติของเซนเซอร์ก๊าซ

เราสามารถแบ่งคุณสมบัติของก๊าซเซนเซอร์ ออกเป็น 5 อย่างที่สำคัญคือ

1. ความไวการตอบสนอง ( Response )
2. ความไวในการวัด ( Sensitivity )
3. ความจำเพาะ ( Selectivity )
4. ความเสถียรภาพ ( Stability )
5. พิสัยการวัด ( Dynamic Range )

1. ความไวการตอบสนอง ( Response ) คือ ความสามารถในการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ในทันทีเมื่อก๊าซที่เราทำการวัดมาสัมผัสกับเซนเซอร์ก๊าซ คุณสมบัติข้อนี้มีความสำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อก๊าซ ที่เราทำการวัดเป็นก๊าซพิษหรือก๊าซไวไฟ เพื่อเราจะได้หลีกเลี่ยงและแก้ไขได้ทันที ก่อนที่จะได้รับอันตรายหรือเกิดเหตุร้ายแรงในบริเวณที่ทำการวัดก๊าซ หากก๊าซรั่วไหลออกมา

2. ความไวในการวัด ( Sensitivity ) คือ ความสามารถของเซนเซอร์ก๊าซ ที่จะบอกความแตกต่างของปริมาณก๊าซที่จะทำการวัด เช่น เซนเซอร์ก๊าซบางชนิดไม่สามารถบอกความแตกต่างของ ก๊าซ ปริมาณน้อย ๆ เช่น 10 ppm กับ 11 ppm ได้ ดังนั้นเมื่อเรานำไปวัด ก๊าซ 2 บริเวณที่มี ก๊าซ แตกต่างกันน้อย ๆ ก็จะทำให้เราเข้าใจผิดคิดว่าบริเวณทั้ง 2 มีก๊าซในปริมาณเท่ากัน คุณสมบัติชนิดนี้ จะสำคัญเฉพาะกรณีก๊าซที่เราวัดมีปริมาณน้อย ๆ หรือต้องการความถูกต้องในการวัดสูงเท่านั้น

3. ความจำเพาะ ( Selectivity ) คือ ความสามารถในการแยกแยะความแตกต่างระหว่างก๊าซ ที่เราต้องการวัดกับก๊าซที่เราไม่ต้องการ วัดได้ กล่าวคือ เซนเซอร์ก๊าซ ชนิดหนึ่ง ๆ ควรมีความสามารถในการตอบสนองต่อก๊าซชนิดหนึ่งชนิดเดียวที่เราต้องการวัด และไม่ควรที่จะตอบสนองต่อก๊าซชนิดอื่น เพราะจะทำให้สัญญาณรบกวนการวัดได้ ในทางปฏิบัติเราต้องพยายามหาวัสดุที่เหมาะสมที่ไวเฉพาะต่อก๊าซที่เราต้องการวัดมาใช้ทำ Sensing membrane หรืออาจจะเจือสารบางตัวลงไปในวัสดุที่ใช้ทำ membrane เพื่อให้ membrane มีความไวในการตอบสนอง ก๊าซที่เราต้องการวัดขึ้นมาได้ หรือเมื่อต้องการตอบสนองก๊าซที่เราไม่ต้องการที่จะวัด Selectivity เป็นคุณสมบัติที่สำคัญมาก ซึ่งเซนเซอร์ก๊าซที่ดีต้องมีค่า Selectivity สูง

4. ความเสถียรภาพ ( Stability ) คือ ผลในการวัดคงที่ไม่เสื่อมสภาพเร็วในการใช้งาน เพื่อให้เซนเซอร์ สามารถใช้วัดได้อย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไป Sensing Membrane ทำจาก Polymer มักมีปัญหาในการใช้งาน

5. พิสัยการวัด ( Dynamic Range ) คือ ช่วงกว้างของการวัดของ Sensor ซึ่ง Sensor บางตัว สามารถวัดก๊าซปริมาณตั้งแต่ 100-10000 ppm แต่บางตัวใช้วัดในระยะ 10-50 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 ชนิดหลัก ๆ ของเซนเซอร์ก๊าซ

แบ่งเซนเซอร์ก๊าซ ตามลักษณะการทำงานออกเป็น 3 ชนิดหลัก ๆ คือ

1. Gas Adsorption Gas Sensor
2. Gas Reaction Gas Sensor
3. Selective Membrane Gas Sensor

**1. Gas Adsorption Gas Sensor Gas Sensor** ในกลุ่มนี้ทำงานโดยวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อมีโมเลกุลของก๊าซถูกดูดซับเข้าไปบนผิวของวัสดุที่ใช้ทำเซนเซอร์ ซึ่งเมื่อผิววัสดุที่ใช้ทำเซนเซอร์ ถูกดูดซับโมเลกุลของก๊าซ เข้าไปที่ผิวก็ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง

- surface potential ทำให้เกิดการนำไฟฟ้า
- เกิดการเปลี่ยนแปลงมวล ทำให้น้ำหนักของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป เป็นผลให้ความถี่รีโซแนนซ์ของระบบที่เปลี่ยนแปลงไป

**2. Gas Reaction Gas Sensor Gas Sensor** แบบนี้ทำการวัดผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เมื่อก๊าซที่ต้องการวัดเกิดปฏิกิริยา เช่น การจัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเซรามิกที่มีตัวคะตะลิสต์ผสมอยู่ เมื่อเซรามิกสัมผัสกับก๊าซที่เผาไหม้

**3. Selective Membrane Gas Sensor** ซึ่งทำงานโดยใช้ประโยชน์ของ Sensing membrane ที่ยอมให้ก๊าซบางชนิดเท่านั้นผ่านเข้าไปได้ เซนเซอร์ก๊าซ ชนิดนี้ที่ใช้วัด Oxygen จะมีแผ่น membrane แบบ solid electrolyte ที่ทำมาจาก  $Y_2O_3$  dope  $ZrO_2$  ส่วนที่ใช้วัด  $SO_2$  จะมีแผ่น membrane แบบ Solid electrolyte ที่ทำมาจาก  $K_2 SO_4$  โดยเมื่อมีก๊าซ ข้างต้นซึมผ่านเข้าไปก็จะทำให้วัสดุดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไป เราก็วัดปริมาณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหากเปลี่ยนแปลงมากก็แสดงว่ามีก๊าซดังกล่าวมาก นอกจากนี้เรายังสามารถแบ่งเซนเซอร์ก๊าซ ชนิดหลักๆ ออกเป็น เซนเซอร์ก๊าซ ชนิดย่อย ๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงแสดงชนิดของก๊าซต่างๆ

Type	Classification	Phenomena	Materials	Gases
Gas adsorption	Semiconductor	Surface	$\text{SnO}_2$ , $\text{ZnO}$	LPG, CO
		Conductivity	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , $\text{V}_2\text{O}_5$	alcohol
		Bulk Conductivity	$\text{TiO}_2$ , $\text{CoO}$ , $\text{MgO-CoO}$	$\text{O}_2$
	Surface potential	Surface potential	Pd-gate FET, $\text{Ag}_2\text{O}$ , Pd- $\text{TiO}_2$	$\text{H}_2$ , CO
	Humidity	Conductivity	$\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_x$ , $\text{ZnO}$ , $\text{MgCrO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{H}_2\text{O}$
	Other	Piezoelectric	Polyimide 111 quartz oscillator	$\text{H}_2\text{S}$ , $\text{NH}_3$
Gas reaction	Catalytic combustion	combustion heat	Pt wire, Pt, Pd+ $\text{Al}_2\text{O}_3$	Flamable gases
	Potentiostatic	electrolytic current	gas electrode	CO, NO $\text{NO}_2$ , $\text{S}_2$
	Galvanic cell	cell current	noble cathode (Pt, Au) & base anode (Pb)	$\text{O}_2$
	Others	Fluorescence	Pyrene + silicone membrane	
Selective membrane	Solid electrolyte	EMP	$\text{ZrO}_2\text{-CaO}$ , $\text{ThO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ , $\text{PbCl}_2$ , $\text{PbBr}_2$ , $\text{K}_2\text{SO}_4$	$\text{O}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 การตรวจวัดปริมาณสาร

การตรวจวัดปริมาณสารมีจุดมุ่งหมายสำคัญเพื่อการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์หรือตัวแปรต่างๆ ทั้งในระหว่างกระบวนการผลิตและเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ รูปแบบและวิธีการวัดมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะเป็นการวัดตัวแปรทางกายภาพและทางเคมี ตัวอย่างการวัดทางกายภาพ เช่น การวัดปริมาตร, มวล, ความหนาแน่น, อัตรากาไหล, ความดันและอุณหภูมิ เป็นต้น ในการวัดตัวแปรทางเคมี ในปัจจุบัน มีเครื่องมือต่างๆ เช่น ก๊าซและลิควิดโครมาโตกราฟี (Gas-Liquid chromatography) พีเอชมิเตอร์ (pH meter) อีออนซีเล็คทีฟอิเล็กโทรด (Ion-selective electrode) และสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectro photo meter) เป็นต้น เครื่องมือวัดเหล่านี้ทำงานได้ดี ทั้งการวัดตัวแปร หรือสารตัวอย่าง โดยตรงหรือมีการทำตัวอย่างเปลี่ยนสภาพที่ทำให้เครื่องมือวัดหรือเซนเซอร์ตอบสนอง

การใช้วัสดุในการวิเคราะห์ปริมาณสารที่เรียกว่า Chemical assay มักใช้เวลาในการวิเคราะห์ เช่น TGS sensors ของ Figaro Engineering company ที่ใช้เนื้อสารของดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เป็นตัวเพื่อวิเคราะห์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{CO}$ ) จากท่อไอเสียรถ ปัจจุบันมีการใช้หัววัดทางเคมีไปติดเข้ากับเครื่องมือทางไฟฟ้าในการหาปริมาณสารตัวอย่างได้ภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว เครื่องมือวัดแบบนี้ เรียกว่า เคมีเซนเซอร์ (chemsensors)

### 2.4 ความเป็นมาของการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ

หลายปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาในการวิเคราะห์ด้านเคมียังไม่ได้สร้างบนฐานรองซิลิกอนเป็นจำนวนมาก เช่น ใช้โลหะออกไซด์, สารประกอบเชิงซ้อน, เซรามิก, โพลีเมอร์ และ ion-selective electrode เป็นต้น แต่แน่นอนที่เดียวการสร้างก๊าซเซนเซอร์ บนเทคโนโลยีซิลิกอนย่อมเป็นที่น่าสนใจมากกว่าเพราะตัวอุปกรณ์ที่สามารถสร้างได้เล็กซึ่งจะทำให้สามารถผลิตได้จำนวนมาก ซึ่งจะทำให้ราคาต่อตัวอุปกรณ์มีราคาถูกลงและยังสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้อีกด้วย

ในปี ค.ศ. 1970 มีอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ 2 ชนิด ที่มีความโดดเด่นมากก็คือ ISFET ที่สร้างโดย Piet Bergveld หัวหน้ากลุ่มไบโอเซนเซอร์ (Biosensor) ที่ Twente University ประเทศเนเธอร์แลนด์ และ Palladium gate MOSFET ซึ่งสร้างในปี 1975 โดย Lund strom หัวหน้ากลุ่ม Chemical sensor ที่ Linkoping University ประเทศสวีเดน ISFET เป็นรูปแบบของมอดเฟสที่ไม่มี gate contact เมื่อ ISFET ถูกจุ่มลงในอิเล็กโทรไลต์ จะเกิดการกระแสตรง ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นอีออนของ  $\text{H}_2$ , Na หรือ K ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

Pd gate MOSFET เป็นมอสเฟต โดยที่ส่วนของเกตจะถูกเปลี่ยนจากอลูมิเนียม (Al) เป็นพลาเดียม (Pd) แทน ซึ่งพลาเดียมเป็น Highly catalytic active metal ที่สามารถแยกโมเลกุลของไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ออกเป็นไฮโดรเจนอะตอม ( $H^+$ ) ซึ่งอะตอมเหล่านี้จะแพร่เข้าไปยังรอยต่อ Pd-SiO<sub>2</sub> ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสทรานในมอสเฟต

ปัจจุบันนี้ มีความต้องการ การพัฒนาการใช้อุปกรณ์ตรวจจับทางเคมีกันมาก เพื่อที่จะทำการวิเคราะห์ทางเคมีภายนอกห้องปฏิบัติการ Zemel ได้รวบรวมความต้องการที่จะได้อุปกรณ์ตรวจจับทางเคมีในอุดมคติดังนี้ ราคาไม่แพง ตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็ก output สามารถแสดงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า มีอัตราส่วน signal/noise ที่ดี รูปทรงแข็งแรง สร้างได้ง่าย สามารถผลิตได้ในจำนวนมากครั้งมากๆ มีความน่าเชื่อถือ มีการแยกแยะสารเคมี มีการตอบสนองที่ดีและไม่มีการตอบสนองต่ออุณหภูมิและรังสีต่างๆ

แน่นอนความต้องการที่กล่าวมานี้ย่อมเป็นไปได้ แต่มีการวิจัยมากมายที่แสดงให้เห็นว่าการสร้างก๊าซเซนเซอร์บนฐานรองซิลิกอนจะสามารถสนองความต้องการ ที่ได้กล่าวมาแล้วมากที่สุด

## 2.5 นิยามของก๊าซเซนเซอร์

เซนเซอร์จะเป็นส่วนสำคัญสำหรับระบบการควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถแสดงผลออกมาแทนการตอบสนองของประสาทสัมผัสของมนุษย์ ที่นอกจากเราจะสามารถได้ยินสัมผัสคมกลิ่น การลิ้มรสและการมองเห็น เราอาจจะได้รับอันตรายจากการสัมผัสหรือได้รับสิ่งเหล่านั้นโดยตรงในปริมาณที่มากเกินไปจนขีดจำกัดที่ร่างกายจะได้รับ เซนเซอร์จะสามารถแสดงเป็นทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ค่าที่เท่ากับการตอบสนองของร่างกาย อย่างไรก็ตามอาจกล่าวได้ว่าการพัฒนาเซนเซอร์มีการพัฒนาเป็นอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้สัญญาณเป็นดิจิทัลอย่างมาก โดยเฉพาะการทำตัวตรวจจับ ที่สามารถตอบสนองต่อสารเคมี และในกรณีที่มีการทำกล้อง CCD ที่สามารถแยกประสาทในการมองได้สูงมากหรือน้อยแม้แต่การทำไมโครโฟนที่มีความไวในการตอบสนองเสียงได้ดี ซึ่งสิ่งเหล่านี้ยังเป็นขั้นเริ่มต้น

สัญญาณดิจิทัลในทางอิเล็กทรอนิกส์ของตัวตรวจจับทางเคมีซึ่งจะสามารถรู้สและได้กลิ่นของสิ่งไม่มีชีวิต ถึงแม้แต่ในระบบชีววิทยายังมีระบบภูมิคุ้มกัน และการวัดปริมาณกลูโคส การวัดความเข้มข้นสารเคมีและการควบคุมปริมาณที่ต้องใช้ความถูกต้องสูง เพื่อที่จะแทนที่หรือเป็นตัววัดระบบทางชีววิทยาเหล่านี้จนในที่สุดจะได้ตรวจจับที่มีการตอบสนองและการแยกแยะที่ดี

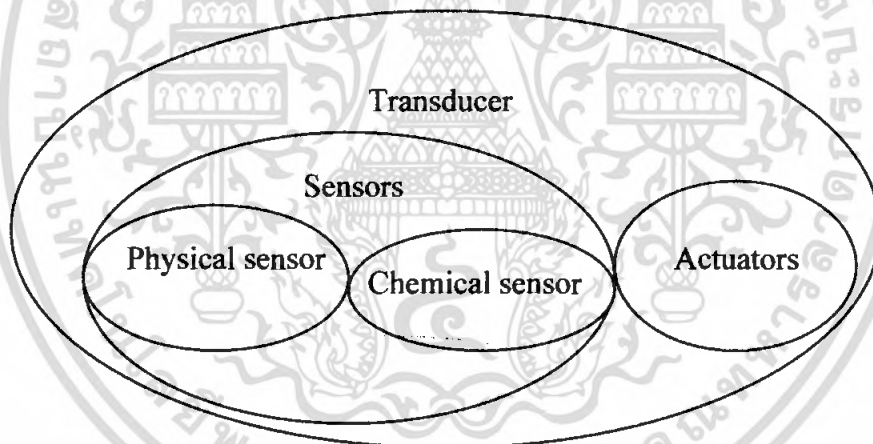
วัสดุตรวจจับทางเคมีในเชิงพาณิชย์จะต้องสามารถปรับค่าเริ่มต้นแต่ยังไม่สามารถแยกแยะและมีความไวในการตอบสนองได้ดีพอ อย่างไรก็ตามถ้ามีสารชีววิทยาที่สามารถเป็นตัวตรวจจับทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทางชีววิทยาที่สามารถแยกแยะสารและการตอบสนองที่ดีที่เหมือนระบบชีววิทยานั้นได้รับการยอมรับในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการวิจัยทางนี้อย่างกว้างขวางและจนกระทั่งในปัจจุบันได้มีเซนเซอร์ออกสู่ตลาดหลายชนิด

ตัวอย่างเซนเซอร์ที่ได้รับการแพร่หลายมากที่สุดก็คือ กลูโคส เซนเซอร์ ในปัจจุบันเซนเซอร์ชนิดสามารถสร้างได้ง่าย มีราคาถูก จนสามารถใช้แล้วทิ้งได้ เพื่อให้การตอบสนองที่ดีและมีความถูกต้อง และยังมีการแสดงผลเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อง่ายต่อการใช้

ความหมายของคำว่า ทรานสดิวเซอร์ (Transducers) มีรากศัพท์มาจาก ภาษาละติน จากคำว่า “transduco-traduco” ซึ่งหมายถึง “การเปลี่ยนสภาพ-การแปลงสภาพ” ดังนั้น อุปกรณ์จะต้องเป็นการเปลี่ยนแปลงหรือการแปลงสภาพ พลังงานจากระบบหนึ่งไปเป็นระบบอื่นโดยที่รูปแบบอาจจะเปลี่ยนไปได้ ซึ่งจะเป็นความหมายของทรานสดิวเซอร์ การวัดค่าต่างๆ ในสิ่งแวดล้อม ทรานสดิวเซอร์จะเป็นอุปกรณ์ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงสัญญาณจากพลังงานรูปหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูป โดยพลังงานมีอยู่หลายรูป เช่น ทางไฟฟ้า, ทางกลศาสตร์, ทางแสง, ทางความร้อน, ทางแม่เหล็ก และทางการแผ่รังสี



รูปที่ 2.2 แสดงการจัดกลุ่มของทรานสดิวเซอร์ (Transducers)

เซนเซอร์ (Sensor) เป็นทรานสดิวเซอร์ที่แปลงสัญญาณในรูปแบบต่างๆ เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ส่วนแอกชูเอเตอร์ (Actuators) จะเป็นทรานสดิวเซอร์ที่แปลงจากสัญญาณทางไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณในรูปอื่น โดยทั่วไปจะเป็นสัญญาณในรูปกลศาสตร์ ตัวอย่างของเซนเซอร์ เช่น เซนเซอร์วัดความดัน pH เซนเซอร์ และโฟโต้ทรานซิลเลเตอร์ ตัวอย่างของแอกชูเอเตอร์ (Actuators) เช่น โซลินอยด์ อุปกรณ์เพียร์โซอิเล็กทริก และเลเซอร์ไดโอด ส่วนในเคมีคอลแอกชูเอเตอร์ (Chemical Actuators) เมื่อป้อนศักดาทางไฟฟ้าจะทำให้เกิด ไฮโดรเจน และออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จอภาพจะเป็นทรานสดิวเซอร์ชนิดพิเศษที่แปลงจากสัญญาณทางไฟฟ้าไปเป็นรูปแบบที่มองเห็น เช่น จอภาพ CRT, จอ LCD array ซึ่งจะเป็นอุปกรณ์แสดงผลที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไป

โดยทั่วไประบบควบคุมการทำงานของทรานสดิวเซอร์ในทางอิเล็กทรอนิกส์จะประกอบด้วยเซนเซอร์ที่อยู่ในส่วนอินพุตต่อไปยังสัญญาณทางไฟฟ้า จากนั้นสัญญาณทางไฟฟ้าจะผ่านการขยายสัญญาณ โดยแอมพลิฟายเออร์เพื่อแสดงบนหน้าจอ ส่วนชนิดและวัสดุที่ใช้ทำเซนเซอร์ จะแสดงดังตาราง 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงตัวอย่างชนิดของเซนเซอร์และวัสดุที่ใช้ทำเซนเซอร์

ชนิดเซนเซอร์	วัสดุเซนเซอร์	Sensor Function
อุณหภูมิ	(Mn,Cu)(Mn,Co,Ni) <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , CoAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , NiAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Mg(Al,Cr,Fe) <sub>4</sub> O <sub>4</sub> SiC, BaTiO <sub>3</sub> , VO <sub>2</sub> , (Mn,Zn)Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	NTC thermistor PTC thermistor Temperature switch
ความชื้น	MgCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -TiO <sub>2</sub> , V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -TiO <sub>2</sub> , ZnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -LiZnVo <sub>4</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ca <sub>10</sub> (PO <sub>4</sub> )(OH) <sub>2</sub> ZrO <sub>2</sub> -MgO	ความนำไฟฟ้า
ก๊าซ	SnO <sub>2</sub> , ZnO, γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , MgO CoO-MgO, ZrO <sub>2</sub> -CaO	ความนำไฟฟ้า
อ็อกซิเจน	AgX(X:Cl,Br,I,CN,SCN) Pbs-Ag <sub>2</sub> , CdS-AgS CuS-Ag <sub>2</sub> S	อ็อกซิเจน ซีเล็คทีฟ อิเล็กโตรด
ระยะทาง-ความเร็ว	Pb(Zr,Ti)O <sub>3</sub>	เพียโซ โซอิเล็กทริก (Piezoelectricity)
แสง	PbTi <sub>3</sub> , LiTaO <sub>3</sub> LiNbO <sub>3</sub> , Pb(Zr,Ti)O <sub>3</sub> CaF <sub>2</sub> , Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Pyroelectricity (Infrared detection) Thermoluminescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 ทินออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์

สารกึ่งตัวนำทินออกไซด์เซนเซอร์ ( $\text{SnO}_2$ ) เริ่มสร้างขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1968 โดยเซนเซอร์ชนิดนี้เริ่มพัฒนาเพื่อใช้ในการตรวจจับก๊าซ LPG ในเวลาต่อมาได้มีการพัฒนาเพื่อที่จะใช้ในการตรวจจับก๊าซชนิดอื่นด้วย เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แอลกอฮอล์ ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) แอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) และก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) เป็นต้น

ความสำเร็จดังกล่าวนี้ ได้มีการศึกษาอย่างละเอียดถึงความแตกต่างของชนิดวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้สร้างเซนเซอร์ พบว่ามีเพียงทินออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์เพียงชนิดเดียวเท่านั้นที่สามารถตรวจจับก๊าซจากท่อไอเสียรถยนต์ได้ดี รวมทั้งในการตรวจจับก๊าซชนิดอื่นด้วย

การเริ่มวิจัยในการหาวัสดุที่มาสสร้างเป็นก๊าซเซนเซอร์นั้น ในเริ่มแรกทินออกไซด์ไม่ได้รับการยอมรับเท่าที่ควร เพราะเนื่องจากปัญหาในเรื่องคุณสมบัติของทินออกไซด์เอง เช่น ความไวในการตรวจจับก๊าซที่อุณหภูมิห้อง ความจำเพาะในการตรวจจับก๊าซและผลของความชื้นซึ่งปัญหาเหล่านี้ จะส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือ ความน่าเชื่อถือของก๊าซเซนเซอร์จะมีความสำคัญในด้านความถูกต้องของการวัดในอุตสาหกรรมและความปลอดภัยต่อร่างกายของมนุษย์ ดังนั้น จึงมีการพัฒนาทินไดออกไซด์ในเงื่อนไขต่างและเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางประการจนทำให้ทินออกไซด์มีคุณสมบัติที่เหมาะสม และมีความไวในการตรวจจับก๊าซได้เร็ว ซึ่งจะแสดงว่า ทินออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์สามารถตรวจจับก๊าซที่มีปริมาณของสารที่ความเข้มข้นต่ำได้

ตัวตรวจจับก๊าซแบบสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor gas sensor) คือ เซ็นเซอร์ก๊าซที่อาศัยประโยชน์จากลักษณะสมบัติของสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือเมื่อมีโมเลกุลของก๊าซเข้ามาดูดเกาะ (adsorb) ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับสารกึ่งตัวนำนั้นขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น โดยการวัดการนำ จะทำให้เราทราบความเข้มข้นของก๊าซได้

ลักษณะการนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ 1) การเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าที่ผิว และ 2) การเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าในบัลค์ (Bulk) แบบแรกนั้นส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นฟิล์มบางหรือฟิล์มหนา ส่วนแบบหลังนั้นจะมีความหนามาก โดยมีลักษณะเป็นก้อนเซรามิก (sintered block) ลักษณะการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ ต่อชนิดของก๊าซนั้นจะขึ้นกับชนิดขององค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์และอุณหภูมิการทำงาน ตัวอย่างของวัสดุที่ใช้ทำก๊าซเซนเซอร์แบบนี้ได้แก่  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  เป็นต้น สารเหล่านี้สามารถนำมาใช้ประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์สำหรับวัดก๊าซ  $\text{Nox}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{H}_2$ , alcohol และอื่น ๆ อีกมากมาย โครงสร้างของก๊าซเซนเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำ แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของก๊าซเซนเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำ

## 2.7 ปฏิกริยาของการดูดซับก๊าซที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ

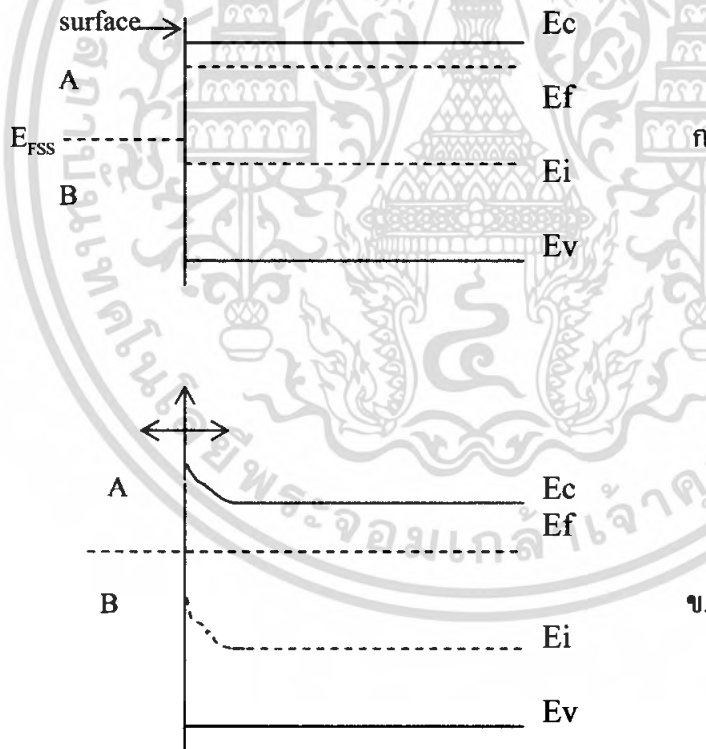
### 2.7.1 สถานะพื้นผิว (Surface state) ในการตรวจจับทางเคมี

โลหะเซนเซอร์ส่วนใหญ่จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เราจะเน้นถึงสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนผิวสัมผัสของสาร สารกึ่งตัวนำชนิดพีจะไม่ค่อยเสถียรเท่าชนิดเอ็นเพราะเมื่อเกิด ปฏิกิริยากับก๊าซรอบๆ ทำให้คุณสมบัติของสารเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็ว

ที่ผิวสัมผัสของเนื้อสาร อะตอมจะมีพันธะขาดไป 1 หรือ 2 อะตอม ทำให้เกิดเป็นพันธะอย่างหลวมๆ ประจุบวกของ  $\text{Sn}^{2+}$  ไอออนจะมีประจุลบ  $\text{O}^{-}$  ไอออนล้อมรอบอยู่ เมื่อมีปริมาณ ไอออน ลบรอบๆ ตัวมันน้อย ไอออนบวกจะสามารถเกิดปฏิกิริยากับอิเล็กตรอน ดังนั้นการจัดเรียงของแถบ นำในกรณีนี้ จะมีพลังงานต่ำกว่าแถบความนำจริงและสามารถดึงอิเล็กตรอนจากเนื้อสารได้ อีกทั้งยังสามารถสร้างพันธะกับค่าที่มีอนุมูล  $\text{OH}^{-}$  ซึ่งมีอิเล็กตรอนอิสระมาให้เกิดพันธะ ทำให้ เหมือนกับว่าที่ผิวมีเฉพาะ ไอออนลบ มีผลให้แถบพลังงานของประจุลบมีค่าสูงกว่าแถบวาเลนซ์ที่ เป็นจริง ไอออนเหล่านี้มันสามารถ ดึงโฮล หรือให้อิเล็กตรอนแก่เนื้อสาร แต่ในกรณีโมเลกุลของ กรดที่มีอนุมูล  $\text{H}^{+}$  อิเล็กตรอนอิสระจะไม่สามารถอยู่ในชั้นสถานะผิวได้ ลักษณะการจัดเรียงตัวถูก อธิบายโดยแบบจำลองของ Madelung เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิต่ำ เนื้อสารจะถูกปกคลุมด้วยไอน้ำที่มี อนุมูล  $\text{OH}^{-}$  จับกับไอออนบวกที่พื้นผิว และ  $\text{H}^{+}$  จะอยู่บริเวณที่มีไอออนลบ อิทธิพลของน้ำในการ จับก๊าซทำให้เกิดความไม่ชัดเจน ถึงแม้เราได้ตั้งข้อสังเกตว่าโลหะออกไซด์เซนเซอร์ต่างๆ ตอบสนองในความชื้นสูงๆ ในขณะที่อุณหภูมิสูง น้ำที่ถูกดูดซับสามารถถูกขับออกจากบริเวณที่ เกิดปฏิกิริยากับก๊าซเบสหรือกรดกับอะตอมผู้ให้หรือผู้รับก็ได้

เหตุผลดังกล่าวจะสามารถอธิบายได้จากแถบพลังงานที่อยู่ในเทอมของสถานะผิว "Surface states" ซึ่งจะมีทั้งสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับของอะตอมที่ผิวดังรูปที่ 2.1 แบบจำลองแถบพลังงาน ที่ผิว  $E_c$  คือ พลังงานที่แถบความนำ  $E_v$  คือ พลังงานที่แถบวาเลนซ์  $E_f$  เป็นพลังงานที่ระดับครึ่งของ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า แถบ พลังงานและ  $E_f$  คือ แถบพลังงานที่ระดับเฟอร์มิที่สถานะผิว สามารถเขียนได้ว่า ความ ไม่วากกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นของแถบพลังงาน  $N(E)$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $E$  มีเหตุผลหลายข้อที่สนับสนุน เช่น ที่ชั้นของผิวที่มีอยู่หลายชั้นที่แสงสามารถทะลุผ่านผลึกได้ โดยที่แต่ละชั้นจะมีระดับพลังงานไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงแสดงแถบ พลังงาน 2 ระดับที่อยู่ภายในสถานะผู้รับในเทอมของ A ที่เชื่อมโยงกับไอออน โดยรูปที่ 2.4(ก) เป็นแบบจำลองของแถบพลังงาน ถ้าไม่มีการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสถานะพื้นผิวและสารกึ่งตัวนำ “flat bands” เราสังเกตว่าอย่างไรก็ตาม ในกรณีนี้พลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำไม่มีความจำเป็น จะมีความสัมพันธ์ต่องานเฟอร์มิของสถานะพื้นผิว (เราใช้  $E_{FSS}$  เพื่ออธิบายการกระทำของพลังงานเฟอร์มิ) ในรูปที่ 2.4 (ข) เราแสดงถึงกรณีสมมูล อิเล็กตรอนถูกเคลื่อนย้ายจากบริเวณ  $E_F$  สูงใกล้บริเวณพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำไปสู่บริเวณ  $E_F$  ต่ำ ในสถานะพื้นผิว การแบ่งแยกประจุนำไปสู่ความต่างศักย์ของ 2 ชั้น ในตัวอย่างนี้ การเพิ่มของระดับพลังงานที่พื้นผิว (รวมระดับ  $E_{CS}$  และ  $E_{VS}$  ที่ผิว) เมื่อความต่างศักย์ของ 2 ชั้นมีประสิทธิภาพทำให้  $E_F$  คงที่ตลอดระบบ เรามีความสมดุล (ฟังก์ชันเฟอร์มิอธิบายถึงการ ไม่ว่างของทุกระดับพลังงาน) การเคลื่อนย้ายของแถบ ใกล้พื้นผิว เรียกว่า “การหักเหของแถบ”



รูปที่ 2.4 แบบจำลองการเกิดประจุที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ อะตอมผู้ให้ (D) และ อะตอมผู้รับ (A) สถานะผิวจะแสดงที่ความหนาแน่นของระดับพลังงาน  $N(E)$

ก. ในกรณีที่ไม่มีแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารกึ่งตัวนำและสถานะผิว

ข. ในกรณีที่อิเล็กตรอนจากผิวของสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ไปยังสถานะผิวจนถึงสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบของฟังก์ชันการกระจายเฟอร์มิเป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งขึ้นอยู่กับ การพยายามให้เกิดความไม่ว่างของ  $E_F$  พลังงานเฟอร์มิจะถูกประมาณที่ครึ่งหนึ่งระหว่างกลุ่มผู้ให้และกลุ่มผู้รับคั้งแสดงในรูปที่ 2.4 ถ้ามีเพียง 1 ระดับพลังงาน ในทำนองเดียวกันพลังงานเฟอร์มิจะเข้าสู่ระดับที่สมดุล อาจกล่าวได้ว่า เมื่อเข้าสู่สมดุลจะเกิดการ โค้งงอของแถบพลังงาน (band bending)

ที่น่าสนใจสำหรับเราคือ การวิเคราะห์สารที่สามารถถูกดูดซับและแบ่งแยกสถานะผิว มันจะนิคิอิเล็กตรอนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ (ลคออกซิเจน) หรือรับอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ (เพิ่มออกซิเจน) เช่น ไฮโดรเจนเมื่อถูกดูดกลืนจะนิคิอิเล็กตรอนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำและจะได้เป็น  $H^+$  ส่วนออกซิเจนเมื่อถูกดูดกลืนจะจับอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำและได้เป็น  $O^-$  การอธิบายทางคณิตศาสตร์จะอธิบายได้เหมือนกรณีของสถานะผิว เราใช้เทอมของสถานะผิวเพื่ออธิบายระดับพลังงานพื้นผิวต่อชนิดของการดูดกลืน ตัวอย่างของการพิจารณาที่คือ CO เคลื่อนเข้าสู่ผิวทำปฏิกิริยากับ โลหะออกไซด์คั้งสมการ (2.1) เมื่อ  $O^{2-}$  เปลี่ยนไปเป็นสถานะก๊าซ



ไอออนบวกโลหะ M ทางด้านซ้ายเป็นสารที่ไม่สามารถระเหยได้โดยง่ายหรือไม่แพร่เข้าไปในเนื้อสาร มันจะมีประจุเกิดขึ้นและถูกส่งไปยังสารกึ่งตัวนำและเกิดพฤติกรรมที่สถานะผิวอีกครั้ง

กระแสไฟฟ้าในรูปแบบชั้นคู่ (Double layer) มีรูปแบบคั้งแสดงในรูป 2.4(ข) มีอยู่ 3 แบบ เราจะอธิบายกรณีเหล่านี้ด้วยรูปแบบง่ายๆ ของการดูดซับของสถานะพื้นผิว สมมุติให้มีเพียง 1 ระดับชั้นพลังงาน

แบบที่ 1 ถ้าอิเล็กตรอนถูกนิคิเข้าไปในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเกิดชั้นสะสมประจุคั้งรูปที่ 2.5(ก) เกิดชั้นคู่ระหว่างสถานะผิวที่เป็นประจุบวกและอิเล็กตรอนที่ถูกนิคิเข้าไป เพราะว่าอิเล็กตรอนที่ถูกนิคิมีการเคลื่อนที่จนมาปิดทับผิวและผลทางไฟฟ้าจากชั้นคู่จะไม่ลึก จะมีขนาดเพียงไม่กี่อังสตรอมเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ ระดับพลังงานเฟอร์มิที่พื้นผิวเปลี่ยนไปเป็น  $d\psi$  โดย  $\psi$  คือความต่างศักย์ของชั้นคู่ ในรูปที่ 2.5(ก) ระยะห่างระหว่างชั้นประจุ  $d$  มีความสัมพันธ์กับค่าเก็บประจุ (C) ของชั้นคู่ (Faradays/unit area) คั้งสมการ (2.2)

$$C = q(dN) / (d\psi) = \epsilon_r \epsilon_0 / d \quad (2.2)$$

N คือ ความหนาแน่นประจุที่สถานะผิวต่อพื้นที่

$\epsilon_r$  คือ ค่าคั้งที่ไดอิเล็กตริก

$\epsilon_0$  คือ permittivity ของสุญญากาศ

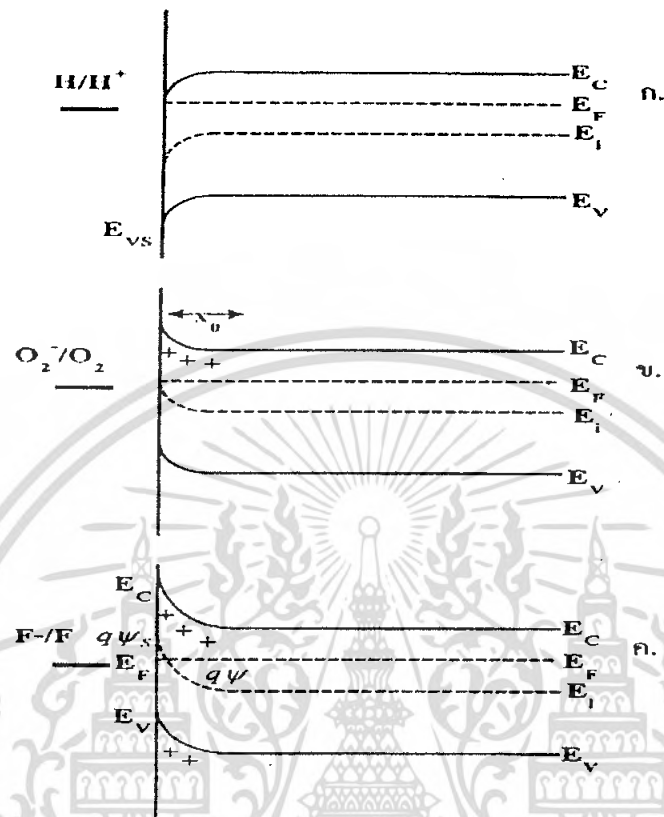
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีชั้นสะสมค่า D จะมีค่าน้อย จากสมการจะได้ค่า N ที่มีค่ามาก การเคลื่อนย้ายประจุเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อธิบายการว่างของสถานะผิว ชั้นสะสมจะเกิดบนสารกึ่งตัวนำชนิด P เมื่อโฮล ถูกฉีดเข้าไปในแถบวาเลนซ์ (อิเล็กตรอนถูกดึงจากชั้นแถบวาเลนซ์โดยผู้ให้ที่มีค่าสูง) ชั้นสะสมจะเกิดขึ้นจากสถานะผิวที่มีประจุลบกับประจุโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์

แบบที่ 2 ถ้าอิเล็กตรอนถูกดึงจากแถบความนำของสารกึ่งตัวนำชนิด N โดยสถานะผิวที่เป็นตัวรับประจุที่ไม่แข็งแรงมากนักบริเวณปอดประจุที่จะเกิดขึ้นที่พื้นผิว โดยแสดงคังรูป 2.5 ข โดยชั้นคู่ที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นผิวที่ประจุลบและไอออนของผู้ให้ประจุบวก (เคลื่อนที่ไม่ได้) ในสารกึ่งตัวนำชนิด N การดึงอิเล็กตรอนจะดำเนิน ไปจนกระทั่งถึงพลังเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นสถานะผิวของวัสดุตรวจจับ โดยทั่วไปประจุนี้จะมีค่าๆหนึ่งในชั้นคู่ อย่างไรก็ตามในสารกึ่งตัวนำประจุจะมาจากไอออนตัวให้ ซึ่งมีปริมาณจำกัด การกำหนดจำนวนประจุจะแสดงถึงความหนาของชั้นคู่ที่ขยายเข้าไปในสารกึ่งตัวนำในขณะที่เดียวกันจากสมการที่ 2.2 ค่า  $d$  จะมีค่ามากกรณีในเขตปลอดประจุ ความหนาแน่นของประจุของสถานะผิวจะค่าอยู่ในช่วง 0.001 ของชั้นเดี่ยว สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี บริเวณปลอดประจุเพิ่มขึ้น เมื่อโฮล ถูกดึงมาจากแถบวาเลนซ์ โดยอะตอมสถานะผิวผู้ให้ออกจากชั้นคู่ระหว่างประจุลบของไอออนผู้รับใกล้ๆผิวและประจุบวกที่สถานะผิว

แบบที่ 3 งานFET-based คือชั้นกลับในสารกึ่งตัวนำชนิด N ชั้นเปลี่ยนถูกสร้างออกซิไดซ์อย่างรุนแรงที่ผิว รูปที่ 2.5 ค เราให้ฟูลออรินเป็นตัวออกซิไดซ์ ถ้าสถานะผิวมีระดับพลังงานใกล้กับแถบวาเลนซ์จะทำให้พลังงานเฟอร์มิเข้าใกล้ระดับพลังงานของสถานะผิวเพื่อให้เกิดความสมดุล ถ้าพลังงานเฟอร์มิอยู่ใกล้แถบวาเลนซ์มากกว่าแถบความนำความเข้มข้นของโฮลจะปรากฏออกมาขณะที่อะตอมตัวรับที่สถานะผิวจะมีค่าในแบบจำลอง ซึ่งแสดงว่าเกิดการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นวาเลนซ์ แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 ค ที่ผิวจะเกิดการเปลี่ยนวัสดุชนิดเอ็นจะเป็นพี

ส่วนที่สำคัญที่สุดของพื้นผิวในก๊าซเซ็นเซอร์คือ ชั้นปลอดประจุ ส่วนของการวิเคราะห์ในกรณีใช้สถานะผิวต่างๆตัวอย่างเช่น โมเลกุลของออกซิเจนจะเป็นตัวรับบนสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ซึ่งสมการที่ 2.1 หลักเกี่ยวกับการแตกตัวที่ยุ่งยากของออกซิเจน เราสมมุติเพียง 1 ระดับพลังงานสำหรับสถานะผิวและสมมุติความเข้มข้นของสารเจือไม่ขึ้นกับระยะทาง พิจารณาเฉพาะผลของการดูดกลืนก๊าซต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของสารกึ่งตัวนำโดย  $\psi$  แสดงถึงศักดาที่สัมพันธ์กับพลังงานศักย์ในเนื้อสาร สถานะผิวที่แสดง โดยรูปแบบที่ง่ายๆ เพียง 1 ชั้น ถ้ามีการยึดเหนี่ยวที่ชั้นนี้ว่าจะเกิดReducing agent เช่น  $O_2$  แต่ถ้าไม่มีการยึดเหนี่ยวในชั้นนี้ บริเวณที่ว่างเกิด Reducing agent



รูปที่ 2.5 Surface double layers แบบต่างๆ

ก. ชั้นสะสม เมื่อที่ผิวมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก อิเล็กตรอนจะถูกดึงดูดเข้าไปในแถบความนำโดยปล่อยให้บริเวณผิวที่มีประจุบวกและเนื้อสารกึ่งตัวนำจะมีประจุลบ

ข. ชั้นปลอดประจุพาหะ เมื่ออิเล็กตรอนที่แถบความนำถูกยึดไว้ที่ผิว ถูกชดเชยด้วยประจุบวกบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ

ค. ชั้นกลับ เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนถูกยึดไว้ในปริมาณมากๆ ซึ่งแสดงว่ามีการดึงอิเล็กตรอนจากทั้งแถบความนำและแถบวาเลนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.2 Defect in Tin Oxide ( $\text{SnO}_2$ )

$\text{SnO}_2$  เป็น metal oxide ซึ่งมีคุณสมบัติที่น่าสนใจคือ เมื่อมี defect เกิดขึ้นแล้วมันจะมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n โดยที่ไม่จำเป็นต้องทำการ โด๊ป โคร่งงานนี้เป็นการศึกษาและคำนวณหาแถบพลังงานของ bulk  $\text{SnO}_2$  ในกรณีที่มันเป็น perfect crystal และกรณีที่เกิด defect แบบ oxygen vacancy ขึ้น โดยอาศัยทฤษฎี Density Functional Theory จากการเปรียบเทียบแถบพลังงานของทั้งสองกรณีจะทำให้เข้าใจถึงผลกระทบของออกซิเจนที่หลุดออกไปที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ  $\text{SnO}_2$  ได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการนำ  $\text{SnO}_2$  ไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ต่อไป โครงสร้างของ  $\text{SnO}_2$  จะมีโครงสร้างของผลึกเป็นแบบ Rutile (space group =  $P42/mnm$ ) ซึ่งมีค่า lattice constant a และ c เป็น 4.60 และ 3.0 ตามลำดับ ในการจำลองการเกิด oxygen vacancy จะใช้ supercell ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น  $2 \times 2 \times 3$  เท่าของ unit cell (ดังรูปที่ 2.6) และทำการลบอะตอมของออกซิเจนออกไปหนึ่งตัว

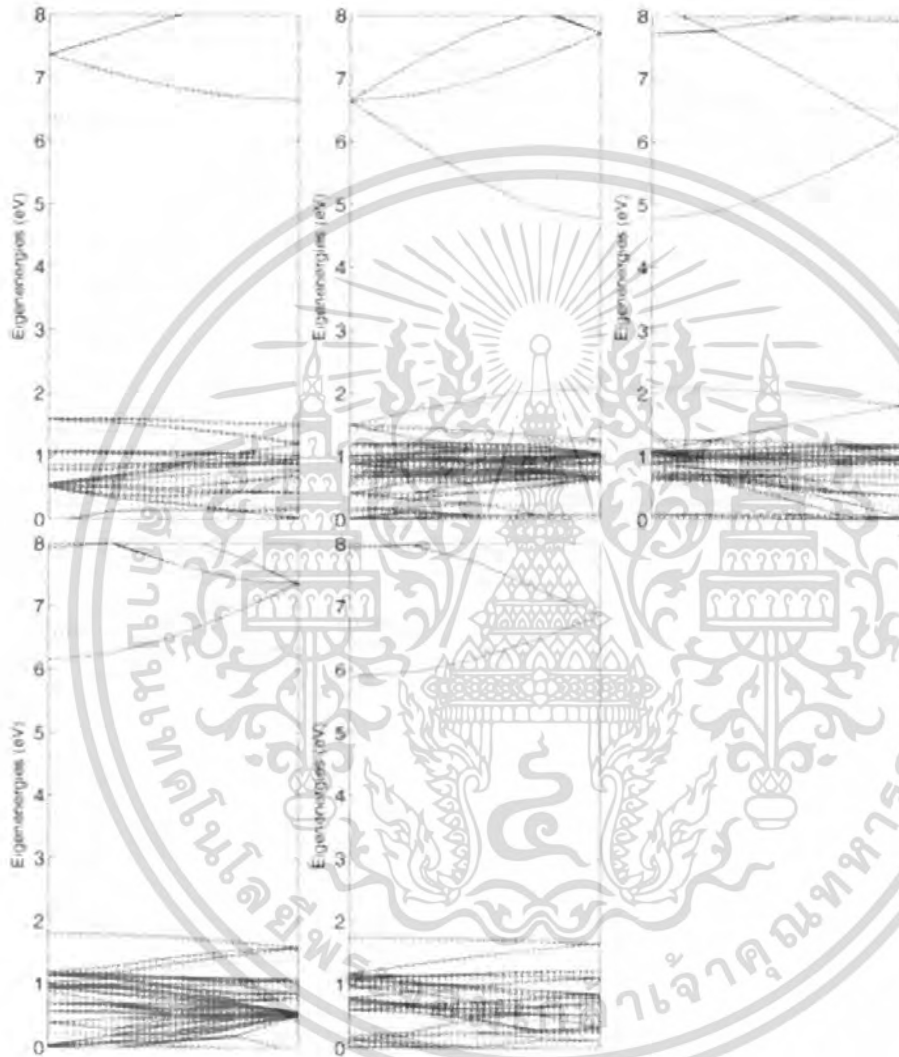


รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างใน unit cell และ supercell ของ Rutile  $\text{SnO}_2$

การคำนวณหาแถบพลังงานในที่นี้คำนวณโดยใช้โปรแกรม ABINIT ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎี Density Functional การประมาณค่าของ Exchange-Correlation energy ใช้เป็นแบบ LDA โดยใช้ฟังก์ชันนอลของ Ceperley/Alder Perdew/Wang (1992) pseudopotential ที่ใช้อธิบายศักย์ของอะตอมใช้ของ Troullier-Martins โดยมี configuration เป็น  $[\text{Kr}4d10]5s25p2$  และ  $[1s2]2s22p4$  สำหรับ Sn และ O ตามลำดับ basis set ในการกระจาย wave function จะเป็น plane wave ซึ่งกำหนดค่าของ cutoff energy เท่ากับ 41 Hartree เซ็ตของ special k-point มาจากวิธีการของ Monkhorst-Pack ซึ่งมีค่าเป็น  $4 \times 4 \times 4$  สำหรับกรณีของ unit cell และ  $1 \times 1 \times 1$  สำหรับกรณีของ supercell เอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการคำนวณ

เปรียบเทียบแถบพลังงานของ bulk  $\text{SnO}_2$  ที่เป็นผลึกสมบูรณ์และที่มี oxygen vacancy เกิดขึ้น



รูปที่ 2.7 แถบพลังงานของ  $\text{SnO}_2$  ตามเส้นสมมาตรต่างๆ ของ Brillouin Zone (A --> M --> G --> Z --> A --> X --> R) เส้นที่บดคือ กรณีที่เป็นผลึกสมบูรณ์ ส่วนเส้นประคือ กรณีที่มี oxygen vacancy เกิดขึ้น

จากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่ากรณีที่อะตอมของออกซิเจนใน  $\text{SnO}_2$  หาดูหายไปนั้นจะทำให้เกิดระดับพลังงานใหม่ขึ้นมาที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงานเดิม

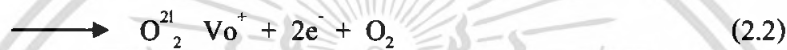
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 กลไกในการตรวจจับก๊าซของทินออกไซด์

ทินออกไซด์ มีการจัดเรียงผลึกแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า ซึ่งมีความกว้างของแถบ พลังงาน 3.5-3.8 อิเล็กตรอน โวลต์ จุดบกพร่องจำนวนมากในเนื้อทินออกไซด์จะอยู่ในรูปที่ว่างในอะตอมออกซิเจนซึ่งจะแสดงตัวเป็นผู้ให้อิออน แต่ส่วนที่มีผลต่อการแสดงตัวเป็นอะตอมผู้ให้ก็คือที่ว่างในอะตอมออกซิเจน โดยกระบวนการที่มีผลต่อค่าความนำไฟฟ้าของทินออกไซด์ต่างๆมีดังนี้

### 2.8.1 ผลในเนื้อสาร

จุดบกพร่องในเนื้อทินออกไซด์ปกติจะเป็นที่ว่างในอะตอมออกซิเจน 1 และ 2 อิออน จากแบบจำลองจุดบกพร่องสำหรับผลึกทินออกไซด์บริสุทธิ์กับช่องว่างออกซิเจนสองประจุลบจะมีสมการที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้

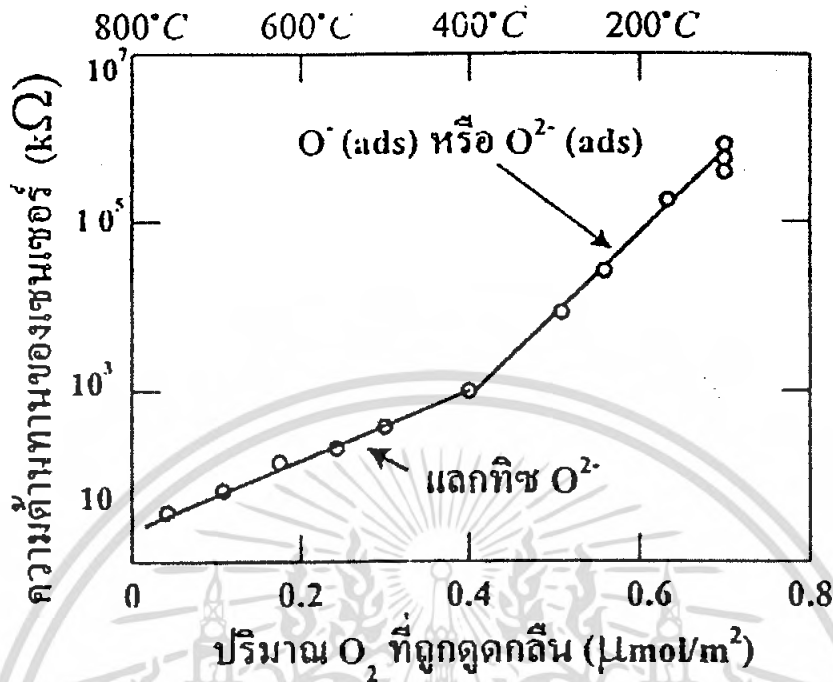


ที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ของการเคลื่อนออกซิเจนจะเป็นส่วนสำคัญกว่าดังรูปที่ 2.8 ช่องว่างเหล่านี้จะเพิ่มอะตอมผู้ให้อิออนในแถบพลังงาน แสดงว่าจะมีระดับของอะตอมผู้ให้อิออนอยู่ 2 ระดับที่ทำให้เกิดช่องว่างของออกซิเจน

### 2.8.2 ผลจากผิวของสารกึ่งตัวนำ

ในบรรยากาศปกติออกซิเจนจะถูกเคลื่อนที่ผิวของโลหะออกไซด์และเกิดการดึงอิเล็กตรอนจากแถบความนำทำให้ค่าสภาพความต้านทานเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีออกซิเจนอยู่ 3 แบบ  $\text{O}_2^-$ ,  $\text{O}^-$  และ  $\text{O}^{2-}$  โดยแบบแรกจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ในขณะที่รูปแบบอื่นจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ยังพบว่า การเคลื่อนออกซิเจนจากช่วง 200 ถึง 250 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าความต้านทานลดลงตามปริมาณ  $\text{O}^-$  ทำให้รู้ว่าไอออนลบจะยังคงเคลื่อนที่ผิวซึ่งทำให้ความต้านทานสูงที่ 400 องศาเซลเซียส ค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของทินออกไซด์กับอุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซต่างๆ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



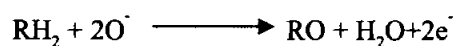
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 800 ถึง 200 องศาเซลเซียส กับปริมาณ O<sub>2</sub> ที่ถูกดูดกลืน



การลดลงของความต้านทานในช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิจาก 0 ถึงประมาณ 250 องศาเซลเซียสเป็นคุณสมบัติปกติของสารกึ่งตัวนำ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพิ่มจนถึงจุดที่ความต้านทานเพิ่มคือ เริ่มเกิดการฟอร์มตัวของ O<sup>·</sup> และ O<sup>2-</sup> เมื่อถึงอุณหภูมิค่าหนึ่งจะเกิดการแตกสลายของไอออนเหล่านี้ทำให้ค่าความต้านทานของทินออกไซด์ลดลงอีกครั้ง

การลดลงของความต้านทานก๊าซเซ็นเซอร์เมื่ออยู่ในบรรยากาศของก๊าซเผาไหม้สามารถอธิบายได้คือ ปริมาณไอออนของออกซิเจนบนผิวลดลงเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับก๊าซ O<sup>·</sup> ทำให้เกิดอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในเนื้อสาร

ตัวอย่าง RH<sub>2</sub> คือก๊าซติดไฟใดๆ จะเกิดปฏิกิริยากับ O<sup>·</sup> ดังนี้

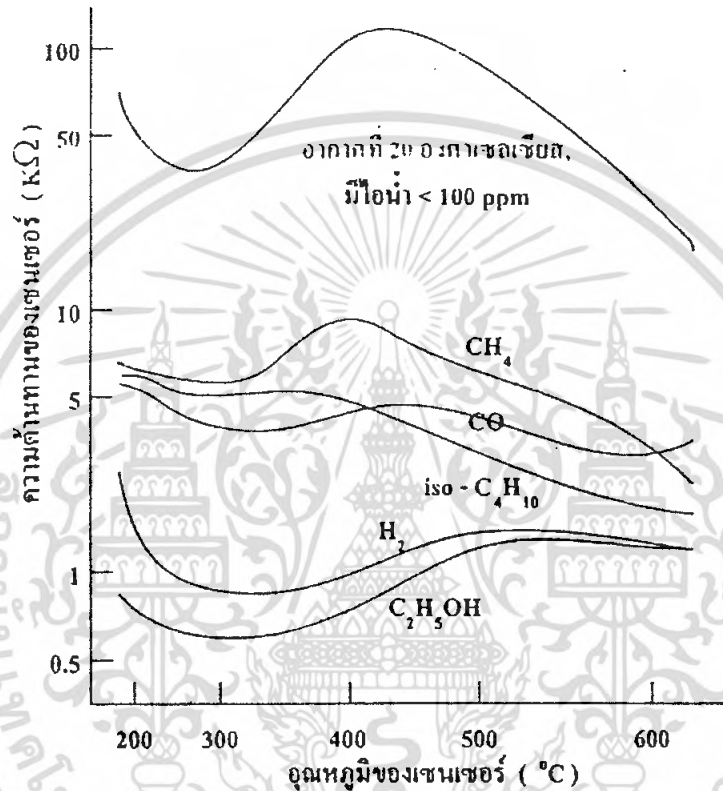


จากปฏิกิริยาจะเห็นว่า การลดลงของความดันออกซิเจนจะไม่มีผลต่อความต้านทานมากนัก

ในการตรวจจับก๊าซ กลไกอื่นที่สามารถอธิบายจะเกี่ยวข้องกับการดูดกลืนออกซิเจนของก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบจะได้ผลสรุปในการใช้ออกซิเจนของผิวที่ดูดซับ นั่นคือการเกิดการเคลื่อนย้ายของออกซิเจนจากบรรยากาศรอบๆ ความหนาแน่นสมดุลย์ของออกซิเจน ที่ถูกพื้นผิวดูดซับต่อความเข้มข้นของก๊าซรอบๆ จะเป็นตัวกำหนดความต้านทานของเซ็นเซอร์



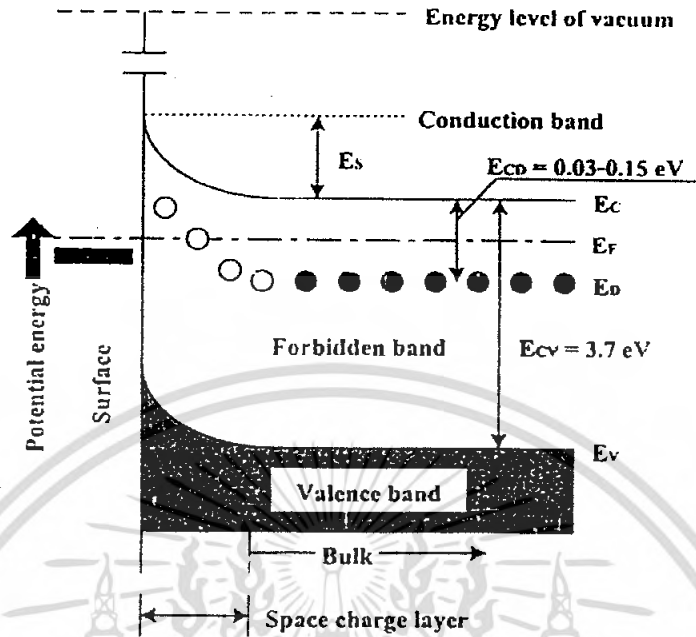
รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของทินออกไซด์ต่ออุณหภูมิที่บรรยากาศของก๊าซต่างๆ

### 2.8.3 ผลจากขอบเกรน

การเปลี่ยนแปลงที่ผิวซึ่งเกิดจากการดูดกลืนหรือคายไอออนจะมีค่าไม่มากพอที่อธิบายถึงการที่ความต้านทานเพิ่มขึ้นมากๆ ส่วนที่มีผลต่อความต้านทานมากกว่าก็คือ ขอบเกรน

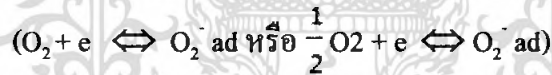
ผลึกทินออกไซด์จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ประกอบด้วยแลกทิจบกร่องของออกซิเจนซึ่งแสดงตัวเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน เมื่ออะตอมของออกซิเจนหลุดออกอิเล็กตรอนจากอะตอมผู้ให้บริเวณพื้นผิวจะถูกดูดกลืนเป็นไอออนลบ เกิดการฟอร์มตัวของชั้นปลดประจุมีค่าขึ้นอยู่กับกำแพงศักย์ โดยแถบพลังงานจะเป็นดังรูป 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 โครงสร้างแถบพลังงานของทินออกไซด์

( ) คือ ออกซิเจนประจุลบที่ถูกดูดกลืน คือ ศักย์ที่ผิวเกิดจากการดูดซับ  $O_2$  หรือ  $O^-$ ,



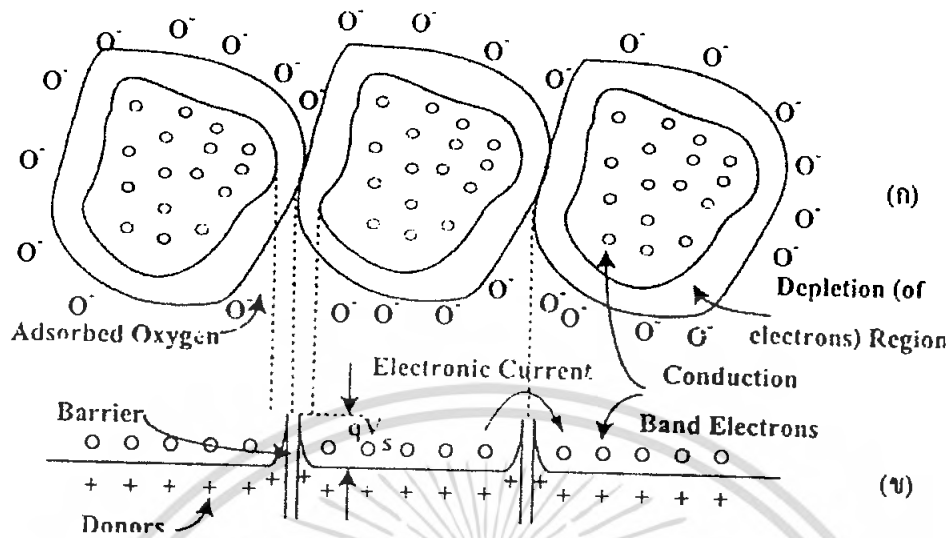
- $E_S$  คือ กำแพงศักย์
- $E_F$  คือ ระดับเฟอร์มิ
- $E_D$  คือ ระดับผู้ให้
- $E_C$  คือ ระดับต่ำสุดของแถบความนำ
- $E_V$  คือ ระดับสูงสุดของแถบวาเลนซ์
- $E_{CD}$  คือ ความลึกของระดับผู้ให้
- $E_{CV}$  คือ ช่องว่างพลังงานระหว่าง  $E_C$  และ  $E_V$

แบบจำลองทางฟิสิกส์สำหรับการจับคู่ของขอบแถบแสดงถึงบริเวณปลอดประจุและผลของการไดออกไซด์ซิงค์ก๊าซ ดังรูปที่ 2.11

กรณีผลึกมีขนาดน้อยกว่าสองเท่าของ Debye length ดังรูปที่ 2.12 แต่ละผลึกจะแสดงตัวเหมือนช่องทางเดินกระแสในเฟตและประจุลบที่ผิวของออกซิเจนลบจะแสดงตัวคล้ายแรงดันเกต

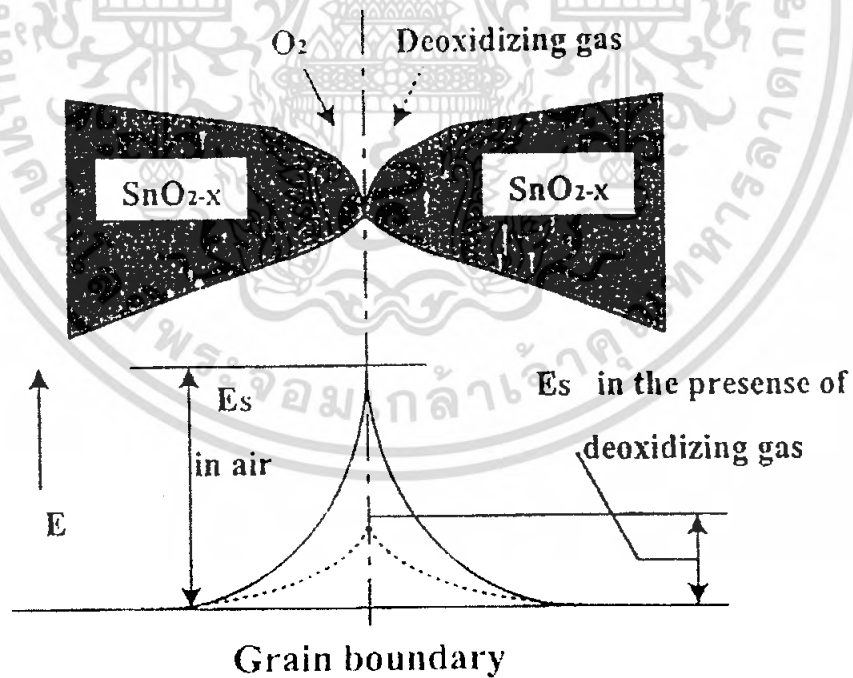
ในเฟต ทำให้มีผลต่อระดับศักย์  $E_C$  ภายในผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



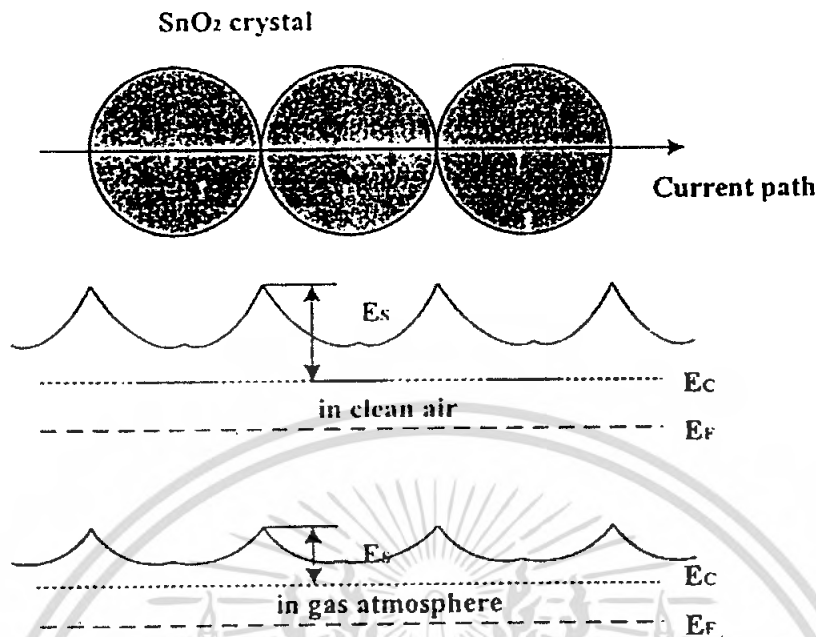
รูปที่ 2.11 โครงสร้างและแบบจำลองของสารกึ่งตัวนำ (ค่าแรงศักย์ที่เกิดจากการดูดกลืนออกซิเจน)

- (ก) แบบจำลองทางฟิสิกส์
- (ข) แบบจำลองแถบพลังงาน



รูปที่ 2.12 แบบจำลองค่าแรงศักย์ที่ขอบเกรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 กำแพงศักย์ตามทางเดินกระแสในทินออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์ (ผลึกมีขนาดน้อยกว่า สองเท่าของ Debye length)

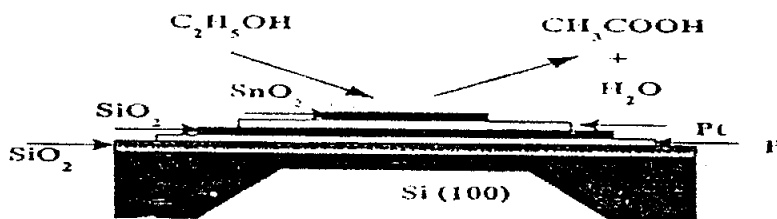
2.9 ปฏิกริยาเคมีระหว่างทินออกไซด์กับก๊าซต่างๆ

เราจะแบ่งปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นได้ 2 แบบ โดยดูได้จากว่าความต้านทานของทินออกไซด์ลดลงหรือเพิ่มขึ้น

2.9.1 ปฏิกริยาออกซิเดชัน

ในปฏิกริยาออกซิเดชัน ก๊าซทดสอบจะถูกออกซิไดซ์ (ให้อิเล็กตรอนแก่ทินออกไซด์) และทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ ซึ่งจะมีผลทำให้ความต้านทานของทินออกไซด์ลดลง ตัวอย่างของก๊าซและปฏิกริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นจะเป็นดังสมการที่ (2.4),(2.5) และ (2.6)

- เอทิลแอลกอฮอล์  $C_2H_5OH$



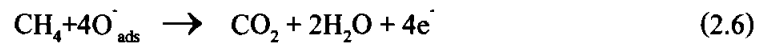
รูปที่ 2.14 การตรวจจับ  $C_2H_5OH$  ของทินออกไซด์ จะได้  $CH_3COOH$  และ  $H_2O$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คาร์บอนมอนอกไซด์ CO



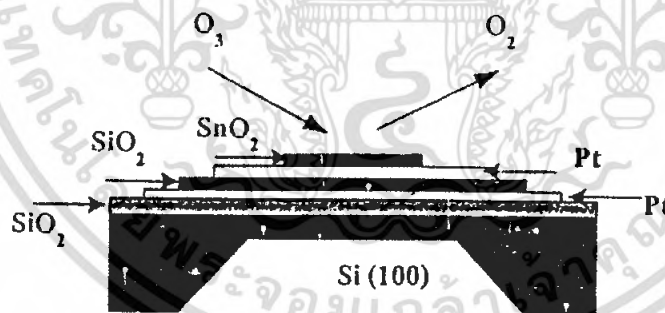
- มีเทน CH<sub>4</sub>



### 2.9.2 ปฏิกริยารีดักชัน

ในปฏิกริยารีดักชัน ก๊าซทดสอบจะถูกรีดิวซ์ (ดึงอิเล็กตรอนจากทินออกไซด์) และทำหน้าที่เป็นตัวออกไซด์ ซึ่งจะมีผลทำให้ความต้านทานของทินออกไซด์เพิ่มขึ้น ตัวอย่างของก๊าซและปฏิกริยาออกซิเดชันที่เกิดจะเป็นดังสมการที่ (2.7) และ (2.8)

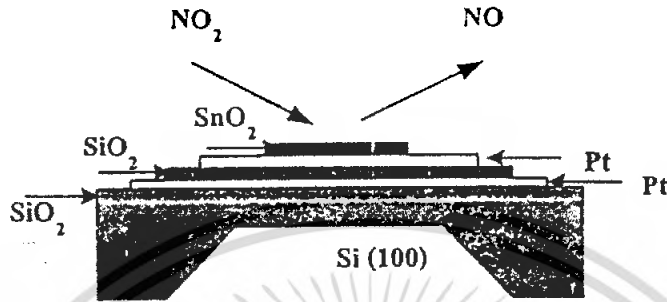
- โอโซน O<sub>3</sub>



รูปที่ 2.15 การตรวจจับ O<sub>3</sub> ของทินออกไซด์ จะได้ O<sub>2</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ไนตรัส NO<sub>2</sub>

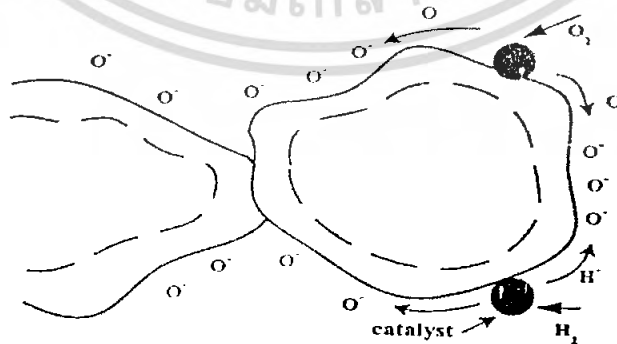


รูปที่ 2.16 การตรวจจับ NO<sub>2</sub> ของทินออกไซด์ จะได้ NO

### 2.10 การปรับปรุงความไวในการตอบสนองโดยการเติมตัวเร่งตะกั่ว

ตัวเร่งตะกั่ว (Catalyst) คือ สารที่ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยที่ตัวเองไม่เปลี่ยนแปลง และไม่ได้เปลี่ยนพลังงานอิสระของปฏิกิริยา แต่ทำให้พลังงานกระตุ้นมีค่าต่ำลง โดยรูปที่ 2.17 จะแสดงปรากฏการณ์ที่ผิวสัมผัสเมื่อเติมตัวเร่งตะกั่ว

จุดประสงค์โดยทั่วไปของการเติมตัวเร่งตะกั่ว ก็เพื่อเพิ่มความไวในการตอบสนองต่อก๊าซ ลดเวลาในการตอบสนองและการฟื้นตัว ตัวเร่งตะกั่วที่นิยมใช้ทั่วไป ก็จะเป็นสารพวกโลหะมีตระกูล เช่น แพลเลเดียม (Pd) และ แพลทินัม (Pt) เป็นต้น โดยตารางที่ 2.4 จะเป็นตัวอย่างชนิดของตัวเร่งตะกั่วกับก๊าซที่ตรวจสอบ



รูปที่ 2.17 ปรากฏการณ์ที่ผิวสัมผัสเมื่อเติมตัวเร่งตะกั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ชนิดของตัวเร่งตะกั่วที่ใช้เดิมในการทดสอบก๊าซชนิดต่างๆ

ชนิดสารกึ่งตัวนำ	ตัวเร่งตะกั่ว	ก๊าซที่ทดสอบ
$\text{SnO}_2$	Pd, $\text{ThO}_2$ , Pt	CO
	Sb	CO ที่อุณหภูมิต่ำ
	Pt	R-OH
	Pt	$\text{CH}_4$ ที่อุณหภูมิต่ำ
	Au	$\text{H}_2\text{S}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การสร้างเซ็นเซอร์แอลพีจี

##### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเซ็นเซอร์

###### 3.1.1 ฐานรอง

ฐานรองที่ใช้ในการทดลองเป็นกระจกใส(Clear Glass) กับอะลูมินา(Alumina) ขนาด 10 ซม. × 10 ซม. จากนั้นนำมาตัดให้มีขนาด 2.5 ซม. × 5 ซม. จากนั้นก็นำกระจกมาทำความสะอาด ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- นำฐานรองขนาด 2.5 ซม. × 5 ซม. มาอัลตราโซนิกในอะซิโตน 15 นาที
- นำฐานรองขนาด 2.5 ซม. × 5 ซม. มาอัลตราโซนิกในแอลกอฮอล์ 15 นาที
- นำฐานรองขนาด 2.5 ซม. × 5 ซม. มาอัลตราโซนิกในน้ำ DI 15 นาที
- เป่าลมให้กระจกแห้ง
- พร้อมที่จะนำมาใช้งาน



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายอะลูมินากับกระจกที่นำมาใช้เป็นฐานรอง

###### 3.1.2. สารละลาย

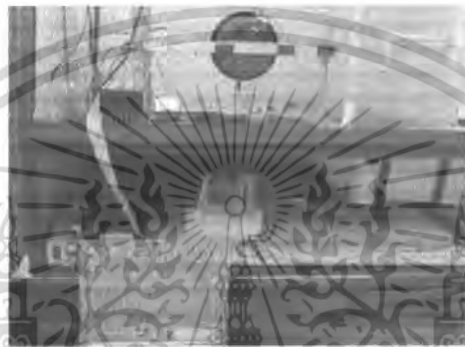
การเตรียมสารเคมีนั้นต้องระวังอย่างมากเพราะว่าสารเคมีที่ใช้นั้นมีอันตรายต่อผิวหนัง ควรใส่ถุงมือทุกครั้งขณะที่ทำการผสมสาร ในการทดลองนี้สารตั้งต้นที่ใช้คือ  $\text{SnCl}_2, \text{NH}_4\text{F}, \text{ethanol}$  โดยเราได้ใช้เอทานอล 100 มิลลิลิตรคงที่ ส่วนอัตราส่วนระหว่าง  $\text{NH}_4\text{F} : \text{SnCl}_2$  มีดังนี้

- ได้ไป  $\text{NH}_4\text{F}$  0% :  $\text{SnCl}_2$  ปริมาณ 5.640 กรัม
- ได้ไป  $\text{NH}_4\text{F}$  1% ปริมาณ 0.056 กรัม :  $\text{SnCl}_2$  ปริมาณ 5.640 กรัม
- ได้ไป  $\text{NH}_4\text{F}$  3.5% ปริมาณ 0.197 กรัม :  $\text{SnCl}_2$  ปริมาณ 5.640 กรัม
- ได้ไป  $\text{NH}_4\text{F}$  4.5% ปริมาณ 0.250 กรัม :  $\text{SnCl}_2$  ปริมาณ 5.640 กรัม
- ได้ไป  $\text{NH}_4\text{F}$  5.5% ปริมาณ 0.310 กรัม :  $\text{SnCl}_2$  ปริมาณ 5.64 0 กรัม
- ได้ไป  $\text{NH}_4\text{F}$  7.5% ปริมาณ 0.423 กรัม :  $\text{SnCl}_2$  ปริมาณ 5.64 0 กรัม
- ได้ไป  $\text{NH}_4\text{F}$  10% ปริมาณ 0.564 กรัม :  $\text{SnCl}_2$  ปริมาณ 5.64 0 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

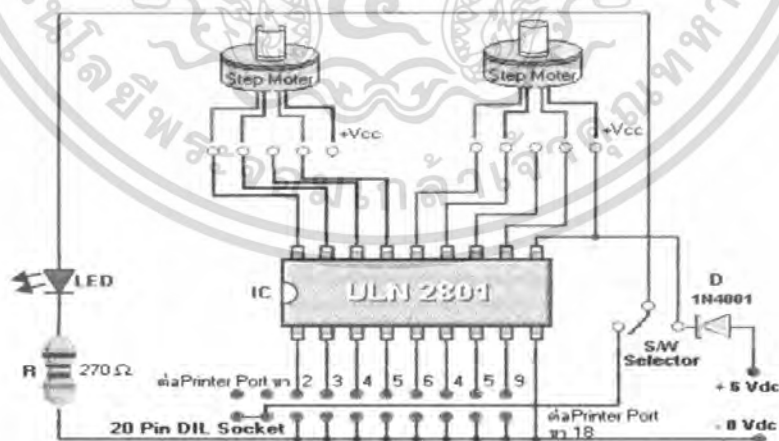
### 3.1.3 อุปกรณ์เคลื่อนที่

เครื่องจุ่มที่ใช้ในการทดลองนั้นเป็นเครื่องจุ่มที่รุ่นพีปริญาโทได้ออกแบบไว้ มีโครงสร้างและภาพการทำงานดังรูปที่ 3.2 โดยการทำงานของเครื่องจุ่มนั้นเป็นการควบคุมสเต็ปมอเตอร์ด้วยคอมพิวเตอร์ ผ่านพริ้นเตอร์พอร์ต (printer port) ซึ่งมีวงจรไฟฟ้าชุดหนึ่งเพื่อรับสัญญาณจากคอมพิวเตอร์แล้วเพิ่มแรงดันส่งต่อไปขับสเต็ปมอเตอร์อีกทีหนึ่ง



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายของเครื่องจุ่มอัตโนมัติสั่งงานผ่านคอมพิวเตอร์

วงจรเชื่อมต่อระหว่างพริ้นซ์เคอร์และสเต็ปมอเตอร์ โดยใช้ไฟซีดีเพียงวงจร 6 โวลต์ จากแหล่งจ่ายไฟตรง ซึ่งการทำงานก็จะรับสัญญาณจากคอมพิวเตอร์และส่งข้อมูลไปขับสเต็ปมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรเชื่อมต่อระหว่างพริ้นซ์เคอร์และสเต็ปมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องจุ่ม ประกอบด้วยเตาอบความร้อนซึ่งได้ใช้จากเหล็กให้ความร้อน 2 จานมาประกบกันเว้นช่องว่างระหว่างกลาง โดยได้ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลไว้ตรงกลางระหว่างเตา มีเส้นลวดยึดระหว่างกระจกกับโซ่เพื่อดึงขึ้นลง มีพาชนะใส่สารละลายและกล่องฉนวนกันความร้อน เพื่อให้สารละลายระเหยน้อยที่สุดในระหว่างการจุ่มดังรูปที่ 3.4 และภาพตัดขวางเครื่องจุ่มดังแสดงในรูปที่ 3.5

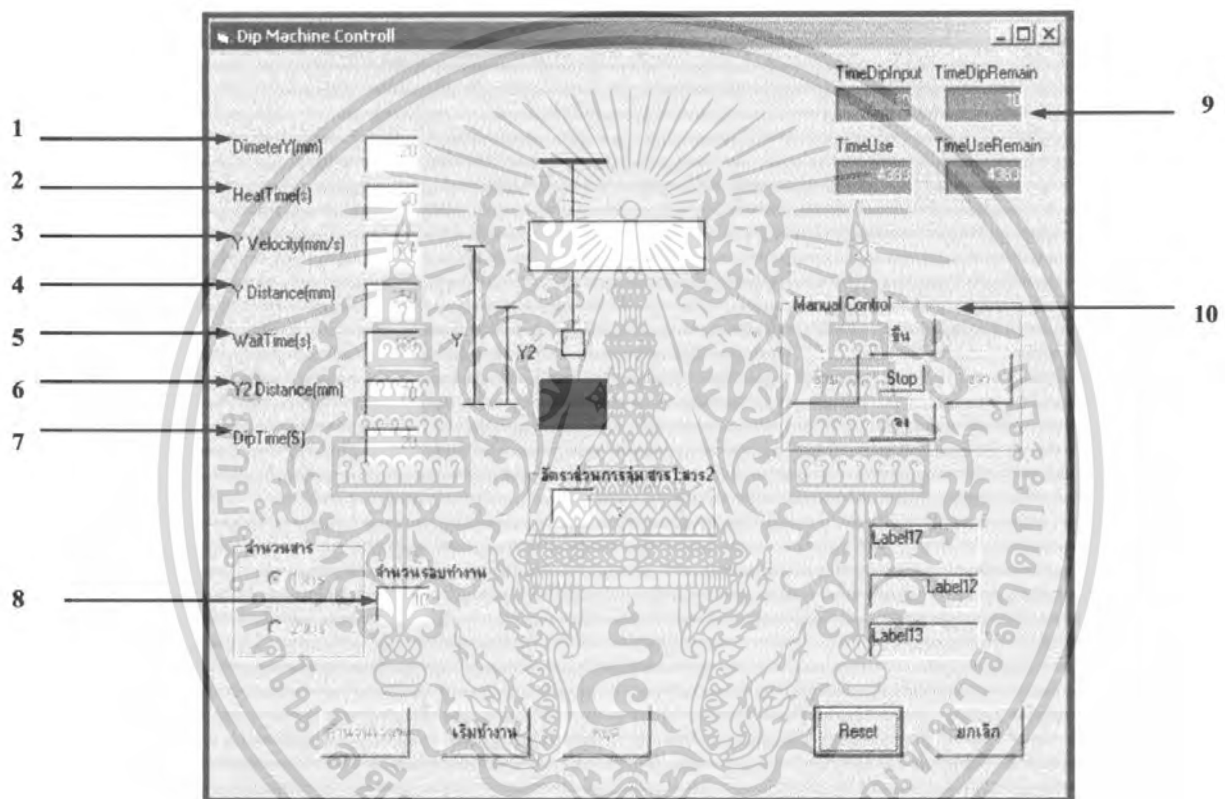


รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางการทำงานของเครื่องจุ่มอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าจอหลักของโปรแกรมควบคุมการทำงานนั้นจะมีการใส่ค่าเพื่อควบคุมการทำงานต่างๆ และจะมีการแสดงค่าต่างๆ ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งแสดงรายละเอียดการใส่ค่าดังต่อไปนี้

การทำงาน โดยการใส่ ค่าต่างๆ ที่กล่าวมาลงในช่องที่กำหนด หลังจากใส่ค่าตามที่กำหนดครบแล้ว กดคำนวณเวลา ซึ่งก็จะแสดงระยะเวลาในการทั้งหมดและแสดงจำนวนรอบการทำงานทั้งหมด



รูปที่ 3.6 หน้าจอควบคุมการทำงาน

- |                         |                               |
|-------------------------|-------------------------------|
| (1) เวลาในการอบ         | (6) ตำแหน่งรอรูานรองเย็น      |
| (2) เวลาที่ใช้ในการอบ   | (7) เวลาที่ใช้จุ่ม            |
| (3) ความเร็วในการจุ่ม   | (8) จำนวนครั้งที่ใช้ในการจุ่ม |
| (4) ระยะทางขึ้นลง       | (9) แสดงเวลาที่ใช้ในการจุ่ม   |
| (5) เวลารอให้ฐานรองเย็น | (10) ควบคุมการทำงานด้วยตัวเอง |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ขั้นตอนในการเตรียมสารละลาย

3.2.1 ชั่งสารและผสมสาร นำสาร  $\text{SnCl}_2$  และ  $\text{NH}_4\text{F}$  ไปชั่งตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 3.1.2 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของ  $\text{NH}_4\text{F}$  ต่อ  $\text{SnCl}_2$  เป็น 0%, 1%, 3.5, 5.5%, 7.5% และ 10% แล้วนำสาร  $\text{SnCl}_2$  และ  $\text{NH}_4\text{F}$  ที่ชั่งได้มาใส่ไว้ในบีกเกอร์ นำเอทานอล 100 มิลลิลิตร มาเทในบีกเกอร์ที่มีสาร  $\text{SnCl}_2$  และ  $\text{NH}_4\text{F}$  ซึ่งเอทานอลเป็นตัวทำละลาย

3.2.2 คนสารละลาย จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมได้มาคนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ดังรูปที่ 3.7 หลังจากทีสารละลายเข้ากันดีแล้ว นำสารละลายที่ได้มาอัลตราโซนิกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายแสดงการคนสารละลาย

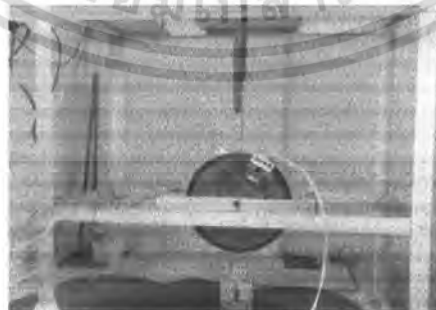


รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายแสดงการอัลตราโซนิก

### 3.3 ขั้นตอนการสร้างฟิล์มบางทินออกไซด์

#### 3.3.1 ติดตั้งชิ้นงาน

นำฐานรองที่ตัดได้ขนาด 2.5 ซม. × 5 ซม. มายึดกับเส้นลวดโดยใช้ตัวหนีบช่วยจับฐานรอง โดยเส้นลวดนั้นก็นำไปต่อกับ โข่งและแกนหมุนของสเต็ปมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายการติดตั้งชิ้นงานกับเครื่องจุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 จ่ายไฟให้เตาอบ

จ่ายกระแสไฟสลับให้เตาอบจนกระทั่งเตาอบมีอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เนื่องจากเราใช้อุณหภูมินี้ในการสร้างฟิล์มบางทินออกไซด์ เราจะต่อสายเทอร์โมคัปเปิล และสายไฟจากเครื่องจ่ายไฟสลับให้กับเตาอบดังรูปที่ 3.10 จนกระทั่งเตาอบมีอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 การต่อเครื่องจ่ายไฟให้กับเตาอบ



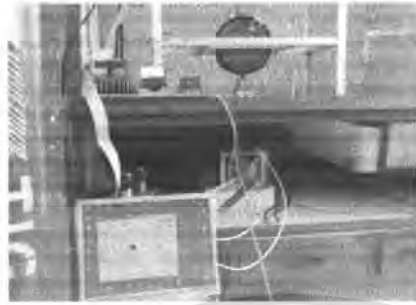
รูปที่ 3.11 เตาอบมีอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

### 3.3.3 การกำหนดสถานะที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจากในเบื้องต้นนั้นเรายังไม่ทราบว่าควรที่จะกำหนดสถานะต่างๆ ในการทดลองเท่าใด จึงจะเหมาะสมในการเคลือบฟิล์มบางทินออกไซด์ ดังนั้นเราจึงอ้างอิงจากรุ่นที่ปริญญาโทที่ทดลองปลูกฟิล์มด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ เช่นกัน พบว่ามีตัวแปรมากกว่าหนึ่งตัวแปรที่มีผลต่อฟิล์มในการจุ่มเคลือบ จึงจำเป็นต้องมีการกำหนดค่าตัวแปรไว้ที่ค่าใดค่าหนึ่งเพื่อที่จะสามารถศึกษาสมบัติที่ต้องการได้ การควบคุมการทำงานของสเต็ปมอเตอร์นั้นเราใช้คอนพิวเตอร์ควบคุมโดยผ่านพอร์ตปริ้นเตอร์ ในการทดลองนี้ได้ทำการกำหนดค่าของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังนี้

- 1) อุณหภูมิในการให้ความร้อนคงที่ 400 องศาเซลเซียส
- 2) ระยะเวลาในการให้ความร้อน 30 วินาที
- 3) จำนวนครั้งที่ใช้ในการจุ่ม 10 ครั้ง, 15 ครั้ง และ 20 ครั้ง
- 4) ความเร็วในการดึงกระจกขึ้นลงคงที่ 2.4 มิลลิเมตรต่อวินาที
- 5) ระยะเวลาหยุดรอกระจกเย็นก่อนลงแช่ในสารละลาย 180 วินาที
- 6) ระยะเวลาที่ฐานรองแช่อยู่ในสารละลาย 20 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.12** กำหนดสภาวะจาก โปรแกรมในคอมพิวเตอร์

เมื่อกำหนดสภาวะการทำงานต่างๆตามที่ได้กำหนดไว้แล้ว และตรวจสอบว่าชิ้นงานอยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของเตาอบแล้ว จากนั้นก็กดปุ่มเริ่มทำงานอัตโนมัติ สเต็ปมอเตอร์ก็จะหมุนตามโปรแกรมที่ได้กำหนดไว้

### 3.3.4 กระบวนการทำงานของเครื่องจุ่ม

กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มบางต่อการจุ่ม 1 ครั้ง ทำงานดังต่อไปนี้ คือ เริ่มต้นจากฐานรองอยู่ที่ตำแหน่งจากจุดกึ่งกลางเตาที่ให้ความร้อน 400 องศาเซลเซียส มายังจุดรองฐานรองเย็นที่อุณหภูมิบรรยากาศห้องด้วยความเร็ว 2.4 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นฐานรองจะหยุดเป็นเวลา 180 วินาทีเพื่อให้อุณหภูมิฐานรองเย็นตัวลง จากนั้นจึงเลื่อนลงจุ่มในสถานะใส่สารละลายด้วยความเร็ว 2.4 มิลลิเมตรต่อวินาที เมื่อจุ่มในสารละลายครบ 20 วินาที ฐานรองจะเลื่อนตัวขึ้นด้วยความเร็ว 2.4 มิลลิเมตรต่อวินาที ไปยังจุดกึ่งกลางเตาให้ความร้อนที่บรรยากาศ แล้วจึงหยุดเป็นเวลา 30 วินาที เป็นอันครบรอบ 1 การทำงาน จากนั้นจะจุ่มครั้งต่อไปจนครบจำนวน 10 ครั้ง ,15 ครั้ง หรือ 20 ครั้ง ขึ้นอยู่กับความต้องการในการจุ่ม ในขณะที่ทำการสร้างฟิล์มบางควรสร้างในตู้ที่มีที่ดูดอากาศ เพื่อจะได้ดูดกลิ่นจากสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อเราดังรูปที่ 3.13



**รูปที่ 3.13** ภาพถ่ายเครื่องเคลือบจุ่มในตู้ดูดอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 ระยะเวลา

ระยะเวลาจะถูกกำหนดโดยโปรแกรมตามจำนวนครั้งที่เราจะทำการจุ่มซึ่ง ดังนี้

- การจุ่ม 10 ครั้ง ใช้เวลารวม 1 ชั่วโมง
- การจุ่ม 15 ครั้ง ใช้เวลารวม 1 ชั่วโมง 30 นาที
- การจุ่ม 20 ครั้ง ใช้เวลารวม 2 ชั่วโมง

เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้วก็จะได้กระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์ ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ภาพถ่ายชิ้นงานที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์

### 3.4 ขั้นตอนการสร้างลวดลายโลหะ

เราสร้างขั้วอิเล็กโตรดบนฐานรองที่เคลือบด้วยฟิล์มบางด้วยอะลูมิเนียม เทคนิคที่ใช้เคลือบโลหะเป็นแบบการเคลือบในระบบสูญญากาศ โดยใช้เครื่อง Evaporation ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและประหยัด ไม่มีผลของการแพร่กระจายไอออน แต่ปัญหาที่พบบ่อยคือ ไล่ความร้อนซึ่งใช้ลวดทั้งสแตนนั่นขาดง่าย หลังจากผ่านการใช้งานแล้ว 1 ครั้ง

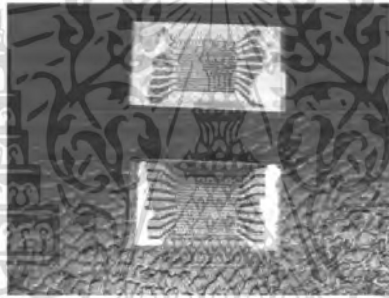
สำหรับการเคลือบโลหะอะลูมิเนียมก็คือการทำให้อะลูมิเนียมเกิดความร้อนจาก ไล่ทั้งสแตนนอะลูมิเนียมถึงจุดหลอมเหลวคือ 660 องศาเซลเซียส ไล่ทั้งสแตนนถูกให้ความร้อน โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน ขณะที่เคลือบนั้นก็ต้องคอยควบคุมกระแสให้เพิ่มขึ้นทีละน้อยจนกระทั่งอะลูมิเนียมที่วางอยู่ใน ไล่ขดลวดทั้งสแตนนหลอมตัวเป็นของเหลวติดอยู่กับ ไล่ก็จะระเหยเป็นไอพุ่งกระจาย เคลือบชิ้นงาน สำหรับวิธีนี้เราจำเป็นต้องใช้ขนาดของอะลูมิเนียมให้มีขนาดเท่าเดิมทุกครั้งที่จะทำการเคลือบ (เราใช้อะลูมิเนียมขนาด 1.5 เซนติเมตร) เพื่อให้ความหนาที่ติดกับชิ้นงานมีความหนาเท่าเดิม ไม่เช่นนั้นแล้วผลของความต้านทานก็จะไม่เท่ากัน (โดยอะลูมิเนียมมีสภาพต้านทาน 2.7 โอห์มต่อเซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.15 ภาพถ่ายเครื่อง Evaporation

ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบอะลูมิเนียมแสดงรูปที่ 3.15 เราได้ทำการตัดฐานรองจากที่มีขนาด 2.5 ซม. × 5 ซม. ให้มีขนาดเป็น 1.5 ซม. × 2.5 ซม. ส่วนที่เหลือจะนำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่3.15 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ทำการเคลือบด้วยอะลูมิเนียม

หลังจากที่ชิ้นงานถูกเคลือบด้วยอะลูมิเนียมแล้วเราก็จะนำไปทดสอบกับก๊าซแอลพีจีต่อไป จะพบว่าขนาดของเซนเซอร์ตรวจจับก๊าซแอลพีจีมีขนาดเพียง 1 ซม. × 1 ซม. เท่านั้น ที่เหลือเป็นขั้วที่ใช้ต่อเพื่อวัดความต้านทาน ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่3.16 ภาพถ่ายเซนเซอร์ตรวจจับก๊าซแอลพีจี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 การทดลอง

การทดสอบนี้เราใช้ก๊าซไนโตรเจน( $N_2$ )และก๊าซแอลพีจี ในการทดสอบเซ็นเซอร์อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนและความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจี ถูกควบคุมโดย Mass flow controllers ซึ่งใช้โปรแกรม Lab View ในการควบคุมการวัดทดสอบและบันทึกผลที่ได้



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายโดยรวมของระบบที่จะทำการทดสอบ

#### 4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- ก๊าซไนโตรเจน ทำหน้าที่เป็นก๊าซพาหุแก๊สแอลพีจีเข้ามาเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจีตามที่ต้องการ
- DAQ board (Data acquisition board) เป็นบอร์ดที่ใช้เชื่อมสัญญาณการควบคุม Mass-Flow controller กับเครื่องคอมพิวเตอร์
- Mass-Flow controller ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน โดยมีการควบคุมอัตราการไหลมากที่สุดคือ 5000 sccm และ 200 sccm ('standard cubic centimeter per minute: ลูกบาศก์เซนติเมตรมาตรฐาน')
- เครื่องมือวัดอัตราการไหล (flow meter) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีเข้าไปในสถานะที่ใช้บรรจุเซ็นเซอร์ โดยมีอัตราการไหล 800 ลิตรต่อนาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 4.2** ภาพถ่ายของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องมือวัดและจ่ายแรงดัน/กระแสไฟฟ้าของบริษัท Keithley รุ่น 2400 ดังรูปที่4.3



รูปที่4.3 ภาพถ่ายเครื่องวัดและจ่ายแรงดัน/กระแสไฟฟ้า

- ภาชนะที่ใช้บรรจุเซ็นเซอร์ ซึ่งมีปริมาตร 886 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยภาชนะประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าสำหรับต่อเชื่อมเซ็นเซอร์กับเครื่องมือวัด Keithley รุ่น 2400 ดังรูปที่4.4



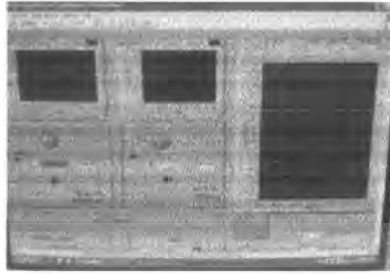
รูปที่4.4 ภาพถ่ายภาชนะที่บรรจุเซ็นเซอร์

- เครื่องคอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่ติดต่อเครื่อง มือวัด Keithley รุ่น 2400 และ DAQ board ด้วย โปรแกรม LabView Version 7.1 ในเพื่อบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวเซ็นเซอร์เมื่อทดสอบด้วยก๊าซแอลพีจี
- เครื่องจ่ายกระแสให้ฮีตเตอร์ 2 เครื่อง
- บั้มคูค้ำชและเครื่องแปลงไฟฟ้าสลับจาก 220 โวลต์ เป็น 110 โวลต์ ซึ่งทำหน้าที่คูค้ำชแอลพีจีและก๊าซในโตรเจนออก ดังรูปที่ 4.5



รูปที่4.5 ภาพถ่ายบั้มคูค้ำชและเครื่องแปลงไฟฟ้า

- โปรแกรมทดสอบ ในที่นี้ใช้ โปรแกรม Lab View Version 7.1 เป็นตัวควบคุมการเปิดปิดและปริมาณของก๊าซในโตรเจนและก๊าซแอลพีจี
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ภาพ โปรแกรม Lab View

- ถึงบรรจุก๊าซแอลพีจี เนื่องจากว่าก๊าซชนิดนี้สามารถติดไฟได้ดังนั้นแล้วควรเก็บไว้ให้ห่างจากบริเวณที่จะทำการทดสอบ เพราะว่าในบริเวณที่ทดสอบเช่นเซอร์นั้นต้องให้ความร้อนกับฮีตเตอร์ อาจจะมีประกายไฟจากการที่ต่อขั้วไฟฟ้าไม่ดี ทำให้เกิดไฟติดขึ้น อาจเป็นอันตรายต่อชีวิตได้



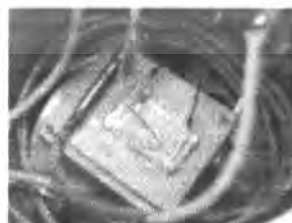
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายถังบรรจุก๊าซแอลพีจีที่ถูกเก็บไว้ในที่ปลอดภัย

#### 4.1.2 ขั้นตอนการติดตั้งเซนเซอร์ในภาชนะบรรจุเซ็นเซอร์

ก่อนที่จะทำการนำเซ็นเซอร์ไปใส่ในภาชนะที่จะทำการทดสอบเราจะทากาวเงินก่อน เพื่อให้เซนเซอร์แนบสนิทกับแท่น ความร้อนก็จะถูกส่งผ่านจากแท่น ไปสู่เซนเซอร์ให้เซนเซอร์มีอุณหภูมิที่แท้จริงในการทดสอบ ดังรูปที่ 4.8 จากนั้นก็นำเซ็นเซอร์มาวาง โดยต่อขั้วสองข้างของเซนเซอร์ด้วยสายไฟแล้วทากาวเงินที่ขั้วอีกที ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายทากาวเงิน



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายการวางเซนเซอร์ที่แท่น

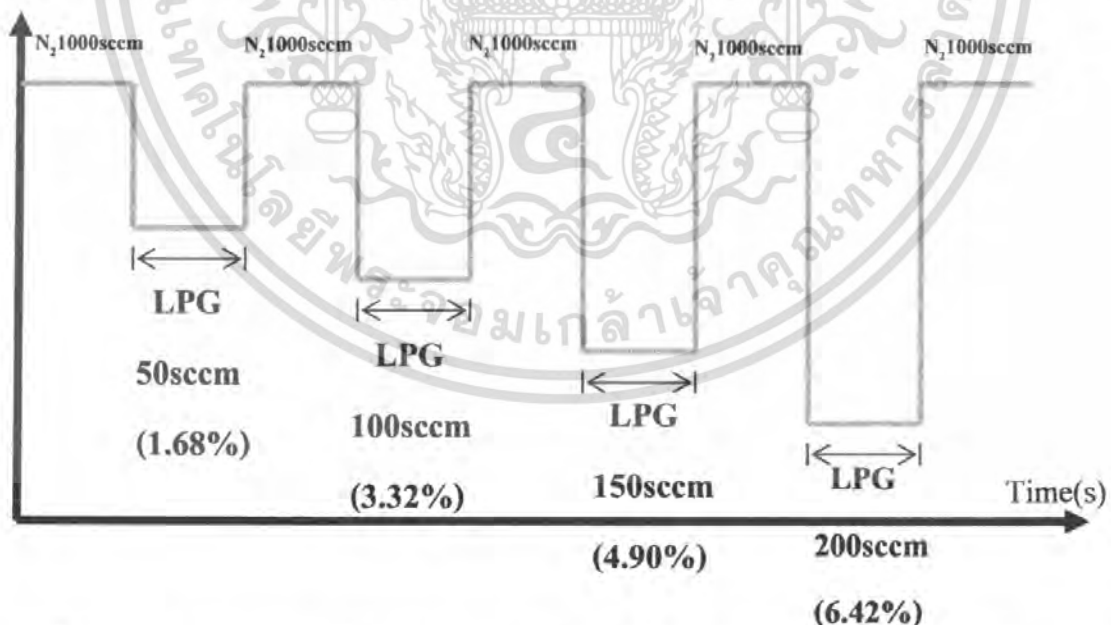
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายเซนเซอร์พร้อมที่จะทดสอบ

#### 4.1.3 การทดสอบเซนเซอร์กับก๊าซแอลพีจี

การทดสอบเซนเซอร์ก๊าซแอลพีจีนี้ ก็เพื่อศึกษาผลของความต้านทานที่เปลี่ยนไปของเซนเซอร์ เนื่องจากผลของตัวแปรที่ใช้ทดสอบเช่น ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซแอลพีจี อุณหภูมิ เป็นต้น ในการทดสอบเซนเซอร์ก๊าซแอลพีจีนี้เราจะใช้ปริมาณของก๊าซไนโตรเจนคงที่ 1000 sccm เพื่อจะได้ใช้เป็นค่ามาตรฐานสำหรับเซนเซอร์ตัวอื่นๆที่จะนำมาเปรียบเทียบ โดยเราจะทำการทดสอบก๊าซแอลพีจีที่ความเข้มข้นที่ 1.68%, 3.32%, 4.90% , 6.42% ตามลำดับ ดังรูปที่แสดง



ก่อนที่จะทำการทดสอบเซนเซอร์กับก๊าซแอลพีจี เราจำเป็นต้องล้างท่อของก๊าซแอลพีจีก่อน โดยการไล่ก๊าซแอลพีจีที่ค้างในท่อออกให้หมด แล้วทำการเปิดวาล์วของก๊าซแล้วปิดทันที จากนั้นก็ไล่ก๊าซแอลพีจีออกให้หมดอีกครั้ง เราก็จะได้ก๊าซแอลพีจีที่บริสุทธิ์มาทำการทดสอบกับเซนเซอร์

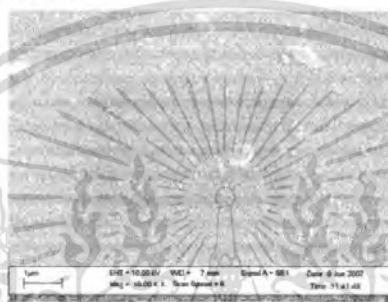
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการทดลอง

การทดสอบเซนเซอร์เราจะทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง, 250 องศาเซลเซียส, 300 องศาเซลเซียส และ 400 องศาเซลเซียส โดยจะแบ่งผลการทดสอบเป็น 2 แบบ คือแบบไม่ได้ปี  $\text{NH}_4\text{F}$  และแบบได้ปี  $\text{NH}_4\text{F}$  บนฐานรองที่เป็นกระจกและอะลูมินา

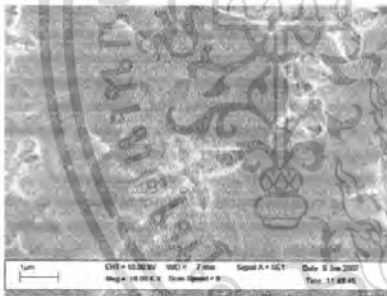
### 4.2.1 ผลจากการส่อง SEM

บนฐานรองที่เป็นกระจก

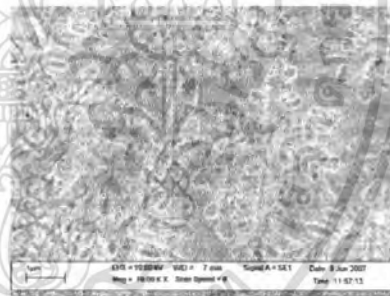


รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย  $\text{SnO}_2$  บนฐานรองที่เป็นกระจก

(ภาพจากวิทยานิพนธ์การพัฒนาฟิล์มบางตัวนำโปร่งแสงดีบุกออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีการจุ่ม)



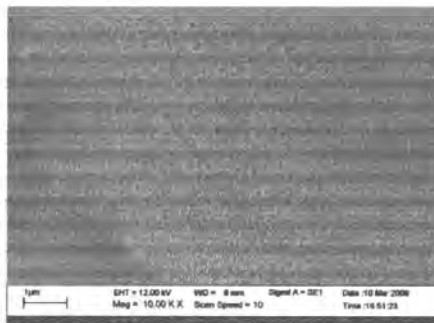
รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย  $\text{SnO}_2$  บนกระจก ได้ปี  $\text{NH}_4\text{F}$  4.5%



รูปที่ 4.13 ภาพถ่าย  $\text{SnO}_2$  บนกระจกได้ปี  $\text{NH}_4\text{F}$  10%

(ภาพจากวิทยานิพนธ์การพัฒนาฟิล์มบางตัวนำโปร่งแสงดีบุกออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีการจุ่ม)

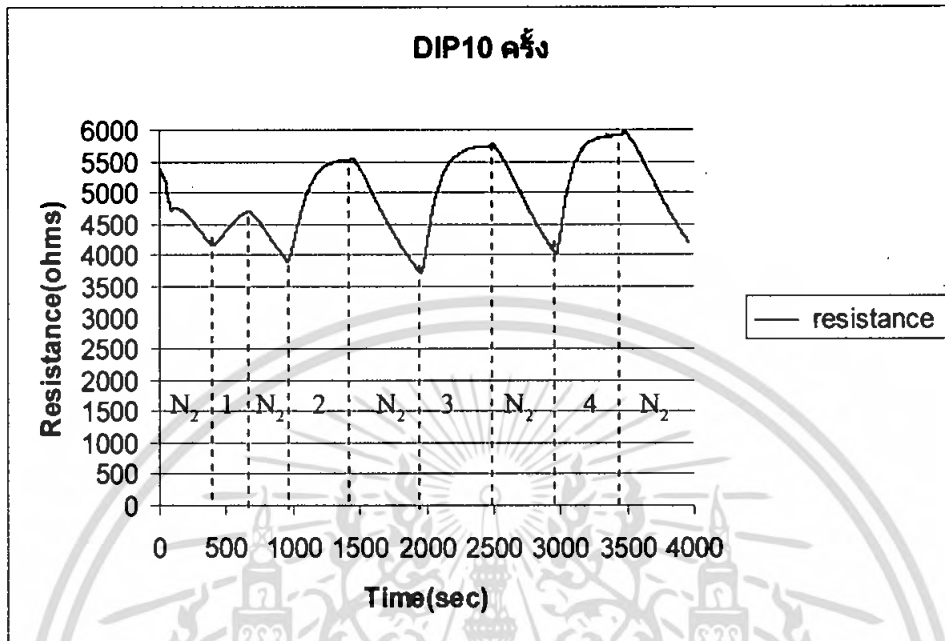
บนฐานรองอะลูมินา



รูปที่ 4.14 ภาพถ่าย  $\text{SnO}_2$  บนฐานรองอะลูมินา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลของเซนเซอร์ที่ไม่ได้ป NH<sub>4</sub>F บนฐานรองที่เป็นกระจก



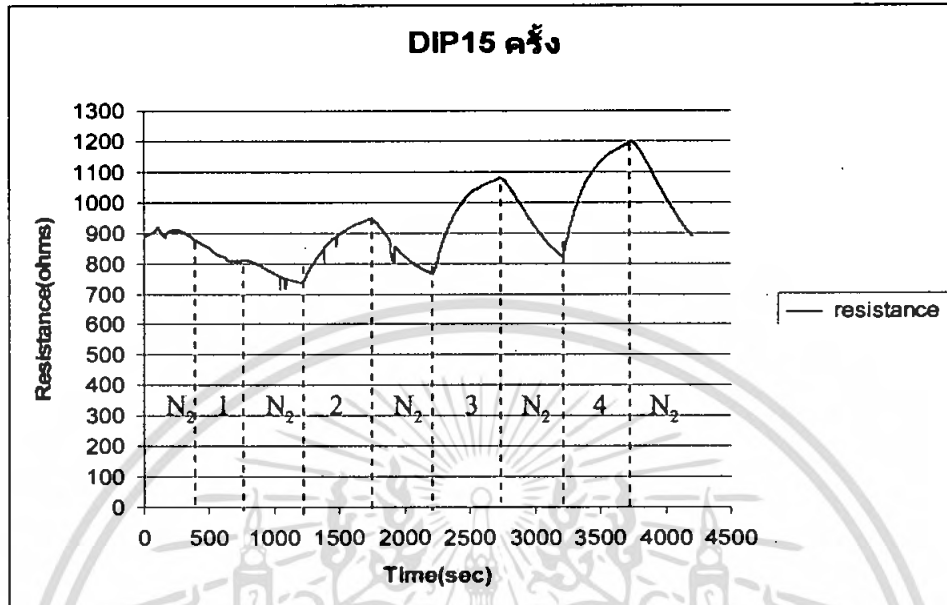
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.15 เป็นการทดสอบเซนเซอร์ที่ได้ทำการจุ่ม 10 ครั้ง โดยที่ไม่ทำการ ได้ป NH<sub>4</sub>F ซึ่ง การทดสอบนี้เราทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และใช้ ไนโตรเจนคงที่ 1000 sccm ซึ่ง อธิบายได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง โดย R = 5.25 kΩ ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซ ทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลา ทดสอบ (sec)	R ก่อน (kΩ)	R หลัง (kΩ)	ΔR (kΩ)	Response ΔR/
1	LPG	1.68%	300	4.25	4.58	0.33	0.077
2	LPG	3.32%	300	4.03	5.36	1.33	0.330
3	LPG	4.90%	300	3.80	5.75	1.95	0.513
4	LPG	6.42%	300	4.17	5.91	1.74	0.417

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

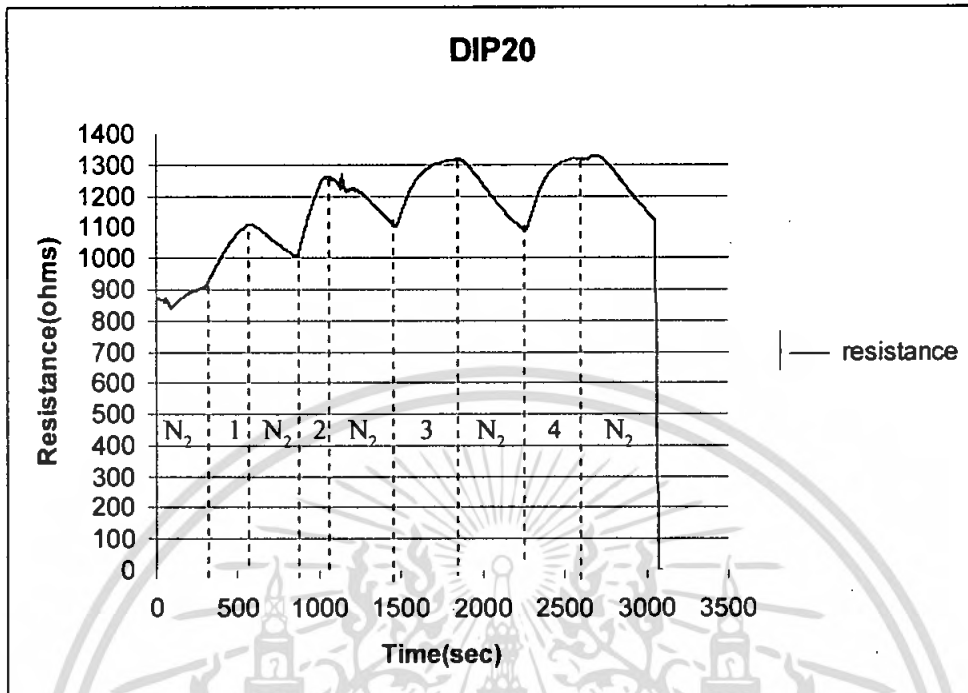


รูปที่4.16 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่4.2 แสดงผลการทดสอบจุ่ม15 ครั้ง โดย R = 900  $\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซ ทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลา ทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $K\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $K\Omega$ )	$\Delta R$ ( $K\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	500	0.86	0.80	0.06	0.069
2	LPG	3.32%	500	0.73	0.93	0.20	0.273
3	LPG	4.90%	500	0.77	1.07	0.30	0.389
4	LPG	6.42%	500	0.82	1.18	0.36	0.439

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

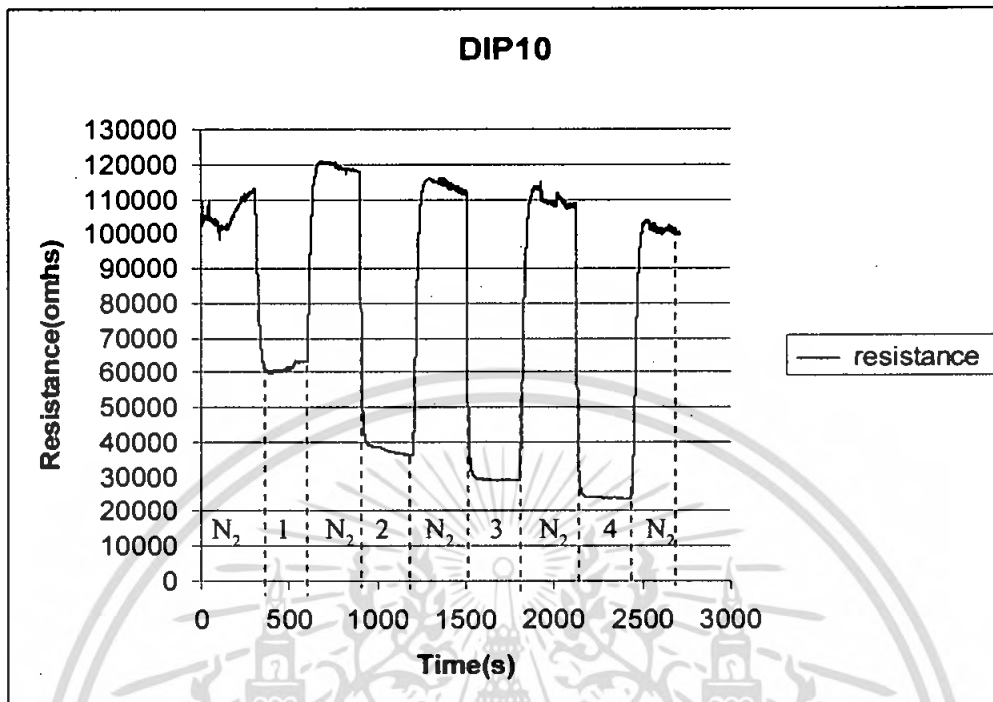


ป้ที่4.17 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง ที่อุณหภูมื 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่4.3 แสดงผลการการทดสอบจุ่ม20 ครั้ง โดย  $R = 867 \Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซ ทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลา ทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $K\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $K\Omega$ )	$\Delta R$ ( $K\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	300	0.91	1.10	0.19	0.208
2	LPG	3.32%	300	1.01	1.25	0.24	0.237
3	LPG	4.90%	400	1.10	1.32	0.22	0.200
4	LPG	6.42%	400	1.09	1.32	0.23	0.211

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

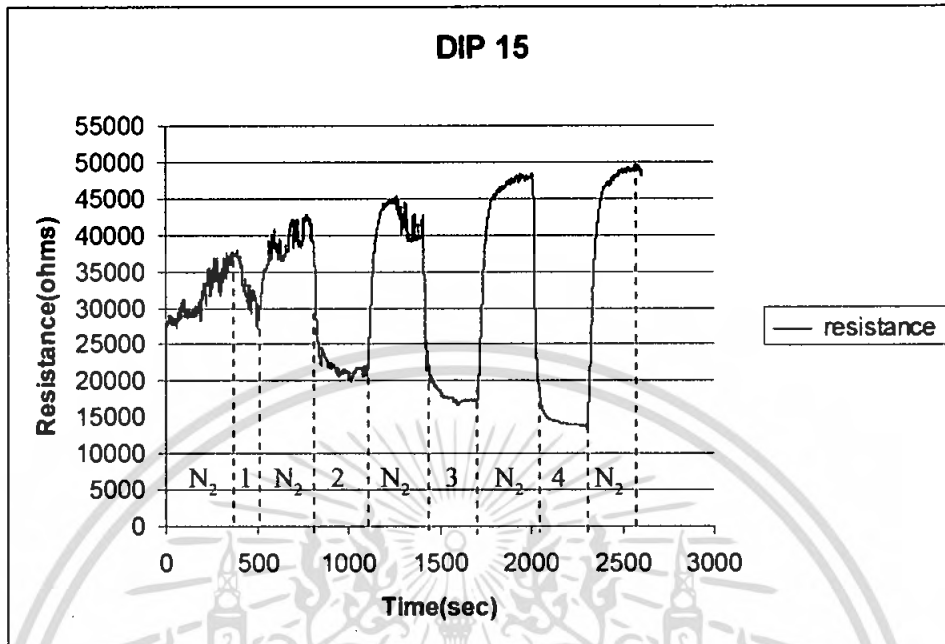


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง โดย  $R = 105 \text{ K}\Omega$  ที่ 400 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซ ทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลา ทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	300	111.92	59.85	52.07	0.465
2	LPG	3.32%	300	120.70	36.79	83.91	0.695
3	LPG	4.90%	300	111.36	29.54	81.82	0.734
4	LPG	6.42%	300	107.61	24.16	83.45	0.775

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

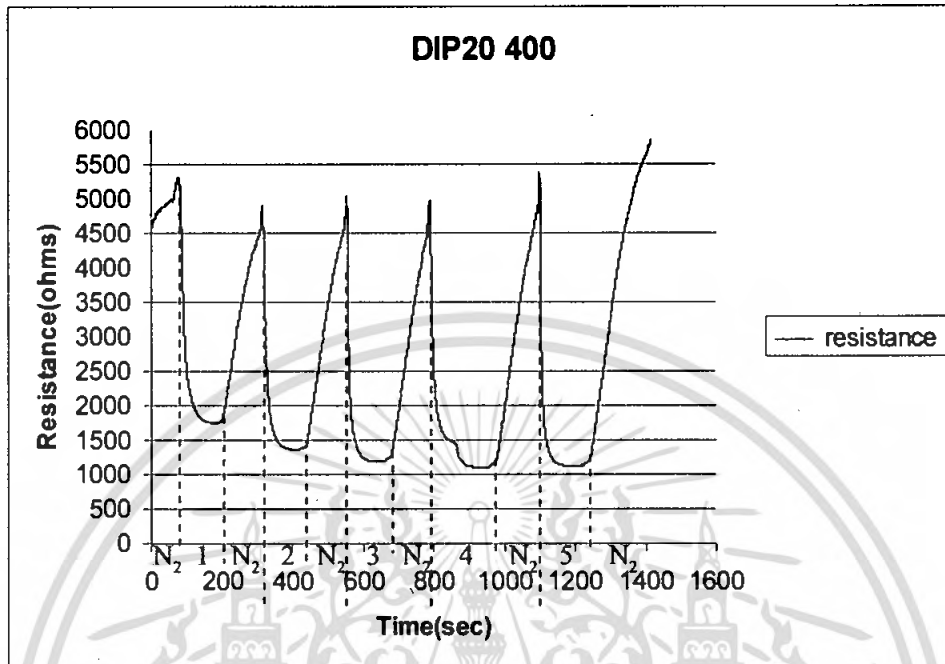


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง  $R = 28.25 \text{ K}\Omega$  ที่ 400 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซ ทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลา ทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	300	35.88	28.20	7.68	0.214
2	LPG	3.32%	300	41.85	22.26	19.59	0.468
3	LPG	4.90%	300	42.38	17.58	24.80	0.585
4	LPG	6.42%	300	47.68	14.08	33.6	0.704

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



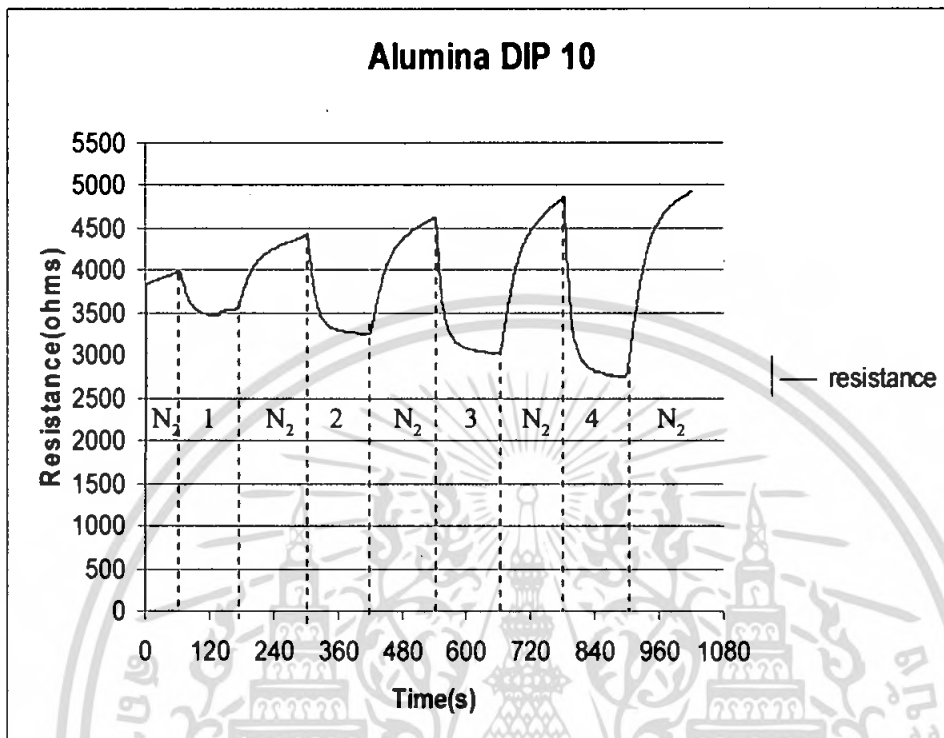
รูปที่4.20 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ตารางที่4.6 แสดงผลการทดสอบจุ่ม20 ครั้ง  $R = 4.67 \text{ K}\Omega$  ที่ 400 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซ ทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลา ทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	120	5.23	1.83	3.40	0.65
2	LPG	3.32%	120	4.87	1.48	3.39	0.69
3	LPG	4.90%	120	5.03	1.33	3.70	0.73
4	LPG	6.42%	120	5.01	1.16	3.85	0.76
5	LPG	6.42%	120	5.38	1.18	4.20	0.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 ผลของเซนเซอร์ที่ไม่ได้ป $NH_3$ บนฐานรองที่เป็นอะลูมิน่า

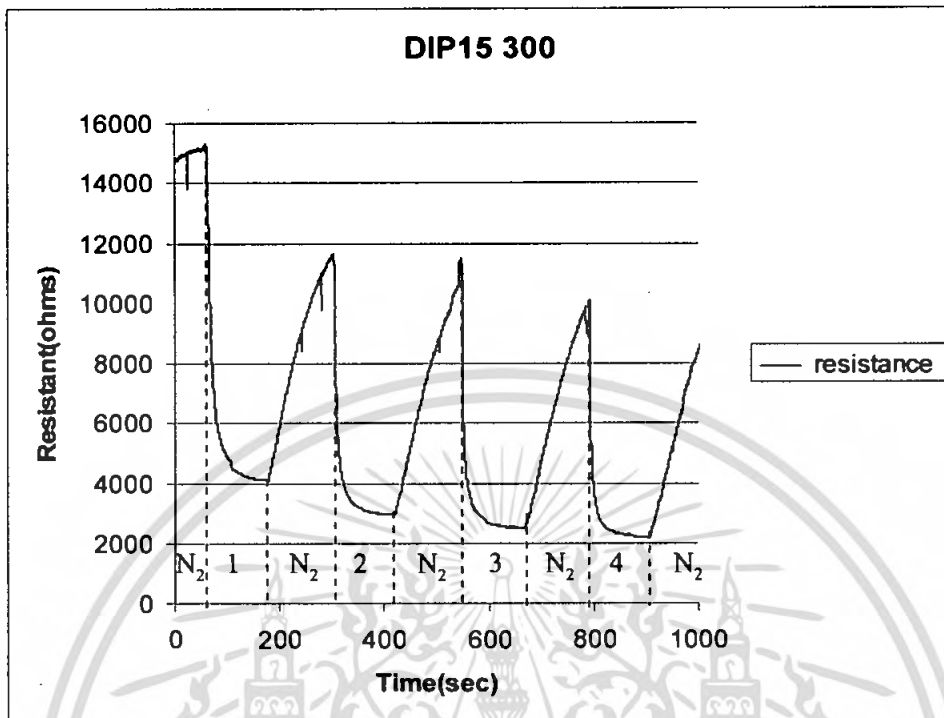


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง  $R = 3.87 \text{ K}\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลาทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	120	3.93	3.54	0.39	0.100
2	LPG	3.32%	120	4.34	3.30	1.31	0.301
3	LPG	4.90%	120	4.58	3.09	1.49	0.325
4	LPG	6.42%	120	4.85	2.80	2.05	0.422

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

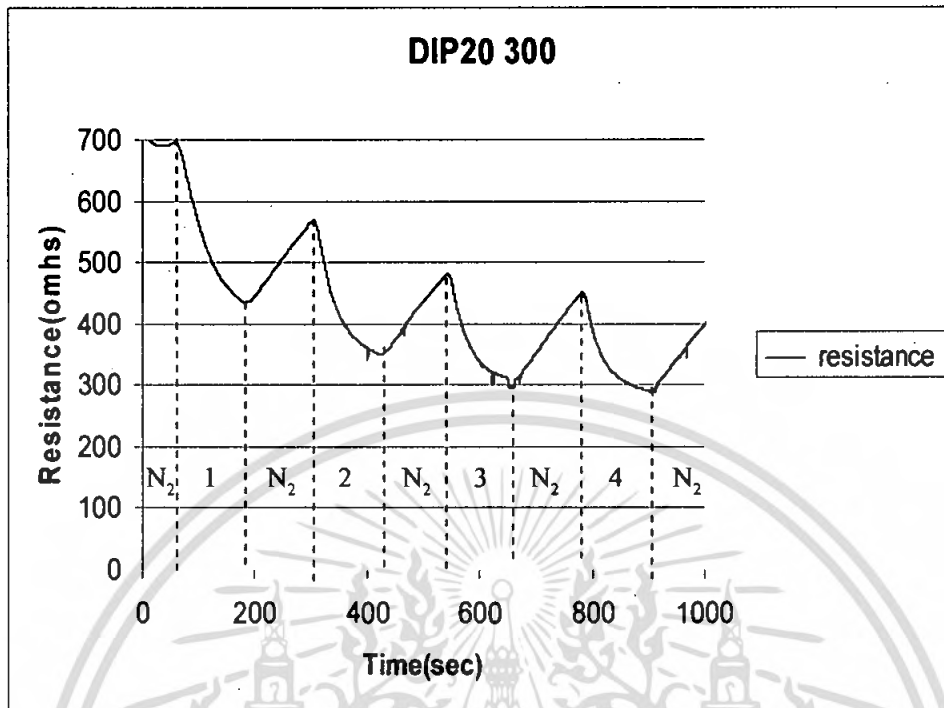


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง  $R = 14.90 \text{ K}\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซ ทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลา ทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	120	15.20	4.28	10.92	0.718
2	LPG	3.32%	120	11.62	3.14	8.48	0.730
3	LPG	4.90%	120	11.51	2.68	8.83	0.767
4	LPG	6.42%	120	10.06	2.40	7.66	0.761

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

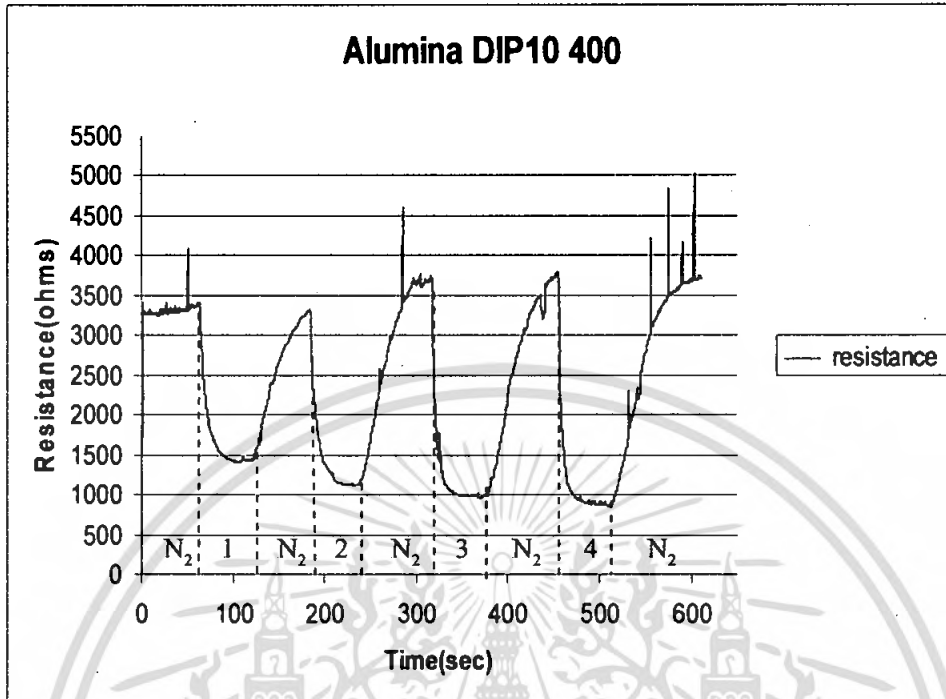


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง  $R = 0.71 \text{ K}\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซ ทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลา ทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $R/R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	120	0.68	0.44	0.24	0.353
2	LPG	3.32%	120	0.55	0.36	0.19	0.345
3	LPG	4.90%	120	0.47	0.31	0.16	0.340
4	LPG	6.42%	120	0.43	0.30	0.13	0.302

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

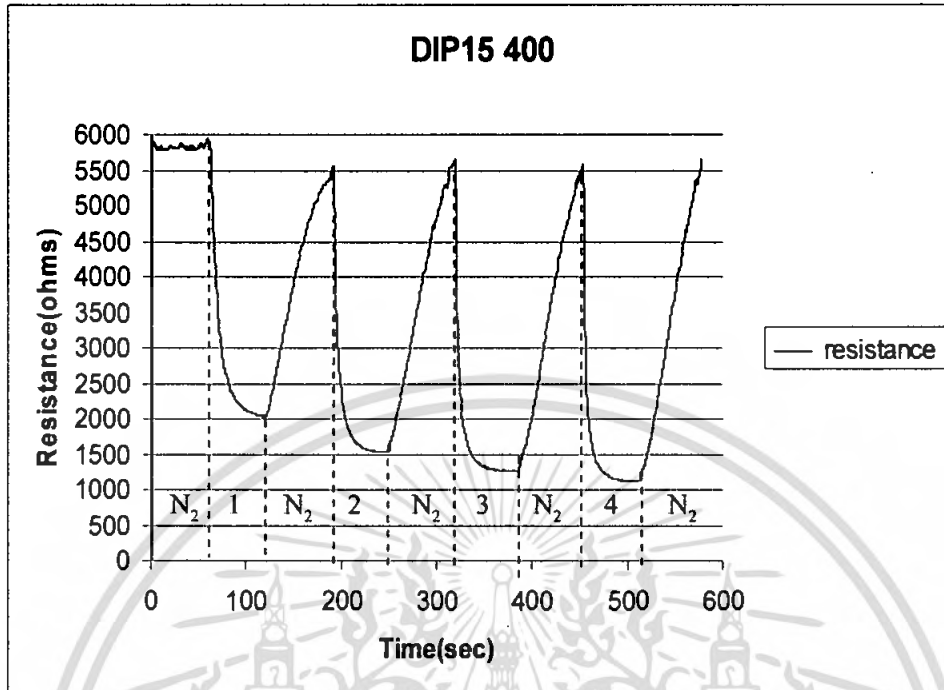


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง  $R = 3.27 \text{ K}\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซ ทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลา ทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{ใหม่}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	120	3.37	1.50	1.87	0.55
2	LPG	3.32%	120	3.37	1.20	2.17	0.64
3	LPG	4.90%	120	3.70	1.08	2.62	0.71
4	LPG	6.42%	120	3.77	0.92	2.85	0.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

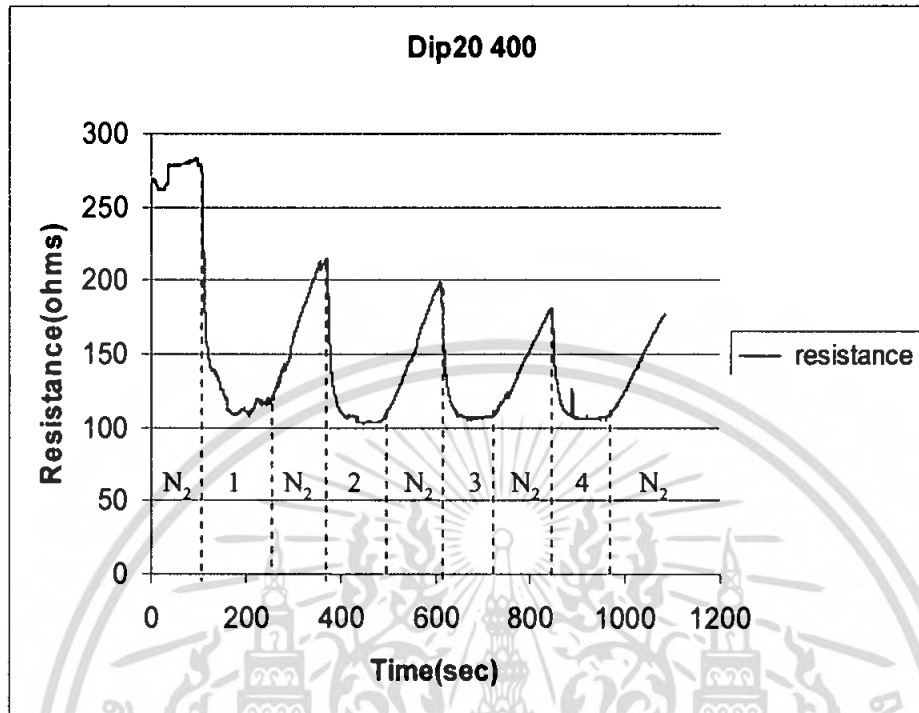


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง  $R = 5.85 \text{ K}\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซ ทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลา ทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	120	5.85	2.15	3.70	0.63
2	LPG	3.32%	120	5.56	1.60	3.96	0.71
3	LPG	4.90%	120	5.62	1.30	4.32	0.77
4	LPG	6.42%	120	5.53	1.20	4.33	0.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.26 กราฟแสดงผลการจุ่ม20 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

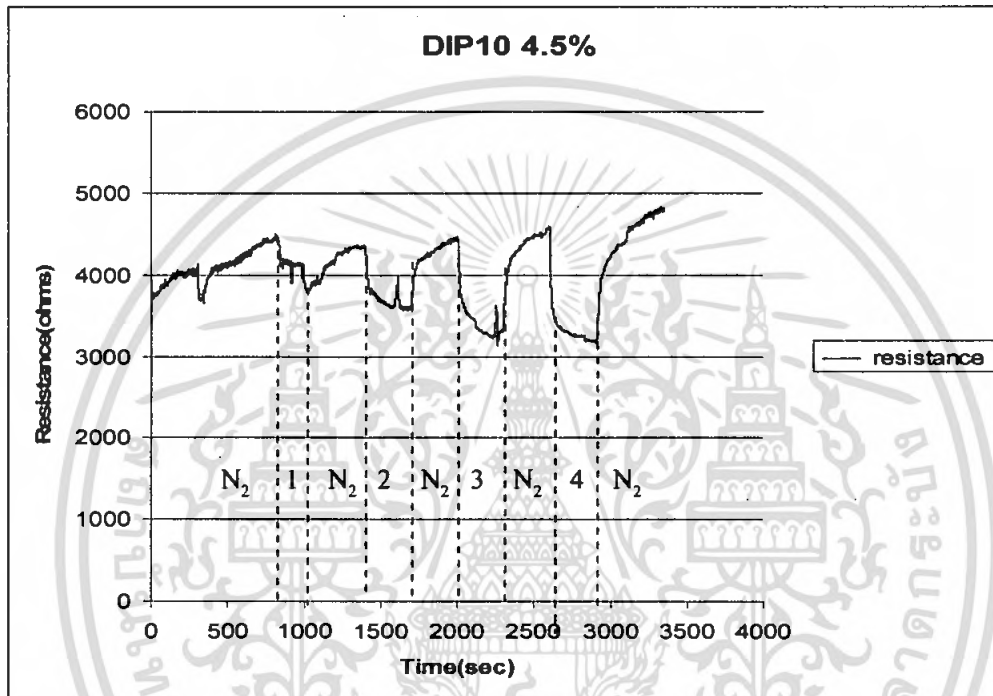
ตารางที่4.12 แสดงผลการทดสอบจุ่ม20 ครั้ง  $R = 0.26 \text{ K}\Omega$  ที่ 400 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซ ทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลา ทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	120	0.28	0.12	0.16	0.57
2	LPG	3.32%	120	0.21	0.10	0.11	0.52
3	LPG	4.90%	120	0.20	0.11	0.09	0.45
4	LPG	6.42%	120	0.17	0.11	0.06	0.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 ผลการทดสอบเซนเซอร์ที่ทำการได้ป $\text{NH}_4\text{F}$

ในการทดสอบเซนเซอร์ที่มีการได้ป  $\text{NH}_4\text{F}$  เราใช้เงื่อนไขเดียวกันกับการทดสอบเซนเซอร์แบบไม่ได้ป โดยใช้อุณหภูมิห้อง, 250 องศาเซลเซียส, 300 องศาเซลเซียส, 400 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซในโตรเจนคงที่ 1000 sccm , ก๊าซแอลทีจีเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น 1.68%, 3.32%, 4.90%, 6.42%

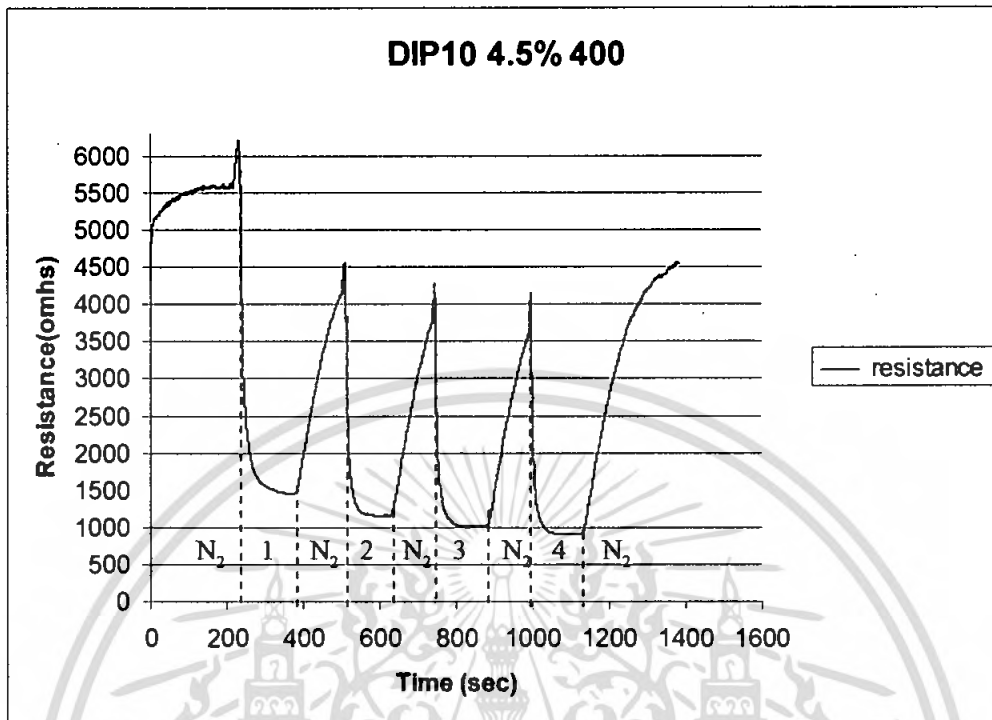


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง ได้ป  $\text{NH}_4\text{F}$  4.5% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง  $R = 4 \text{ K}\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลาทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	300	4.40	3.80	0.60	0.136
2	LPG	3.32%	300	4.32	3.68	0.64	0.148
3	LPG	4.90%	300	4.43	3.31	1.12	0.252
4	LPG	6.42%	300	4.55	3.22	1.33	0.292

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

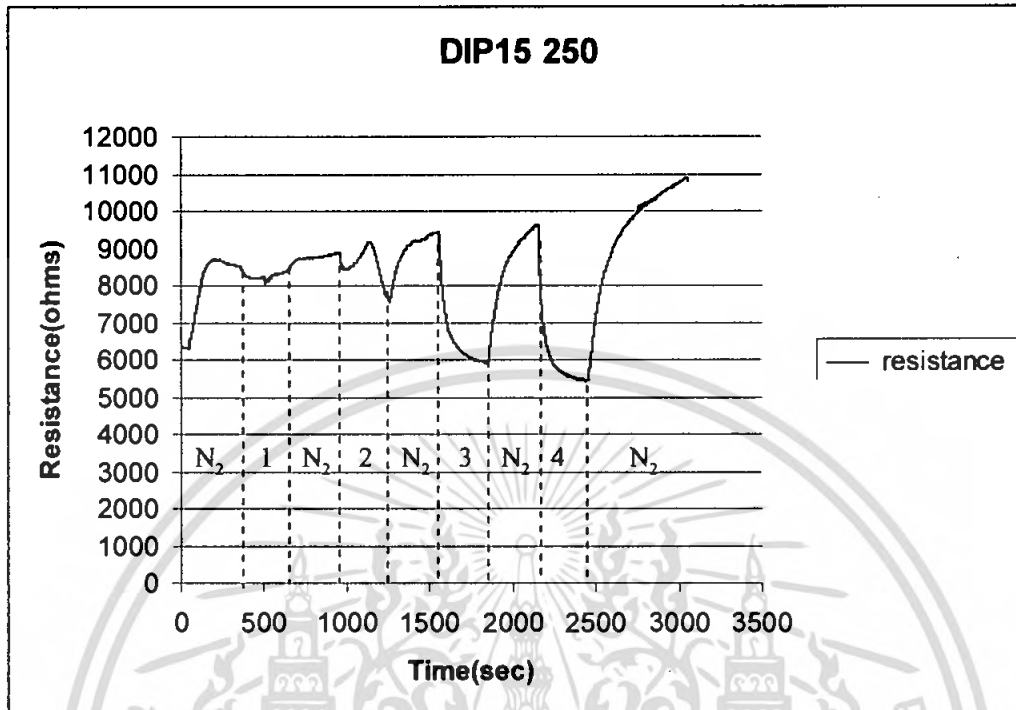


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง ไดโปก  $\text{NH}_4\text{F}$  4.5% ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง  $R = 5 \text{ K}\Omega$  ที่ 400 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซ ทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลา ทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	120	6.20	1.50	4.70	0.75
2	LPG	3.32%	120	4.54	1.24	3.30	0.73
3	LPG	4.90%	120	4.20	1.04	3.16	0.75
4	LPG	6.42%	120	4.12	0.95	3.17	0.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

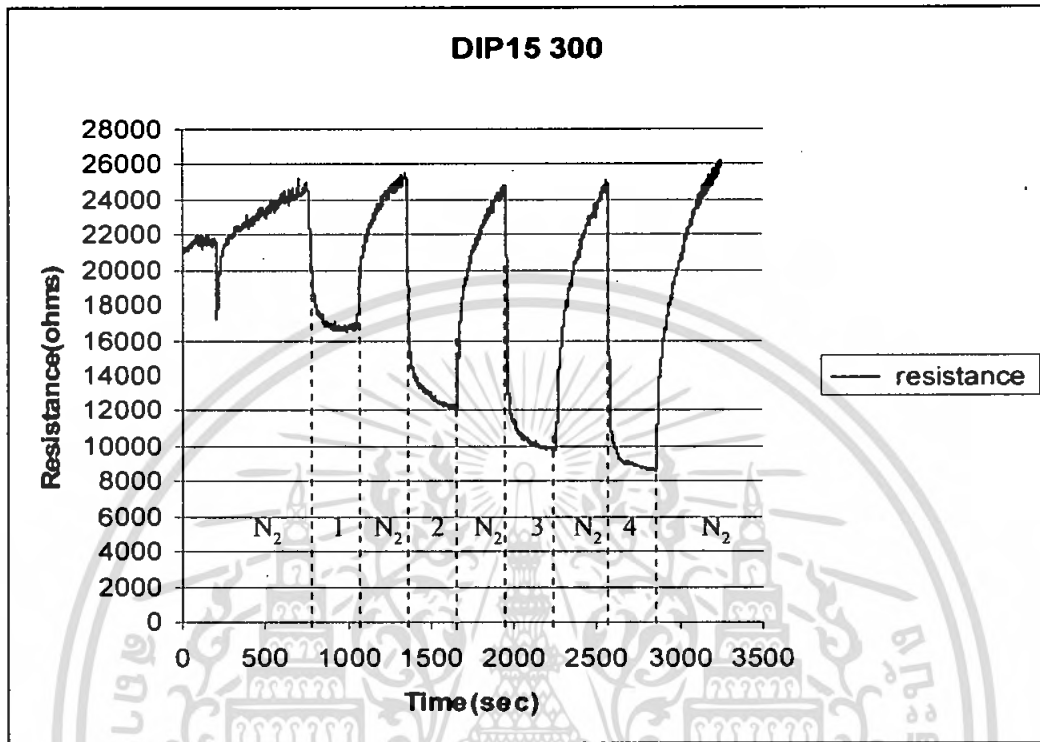


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง โค้ป  $\text{NH}_4\text{F}$  4.5% ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง  $R = 6.34 \text{ K}\Omega$  ที่ 250 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซ ทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลา ทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	300	8.61	8.22	0.39	0.045
2	LPG	3.32%	300	8.56	7.64	0.92	0.107
3	LPG	4.90%	300	9.34	6.00	3.34	0.357
4	LPG	6.42%	300	9.53	5.53	4.00	0.419

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

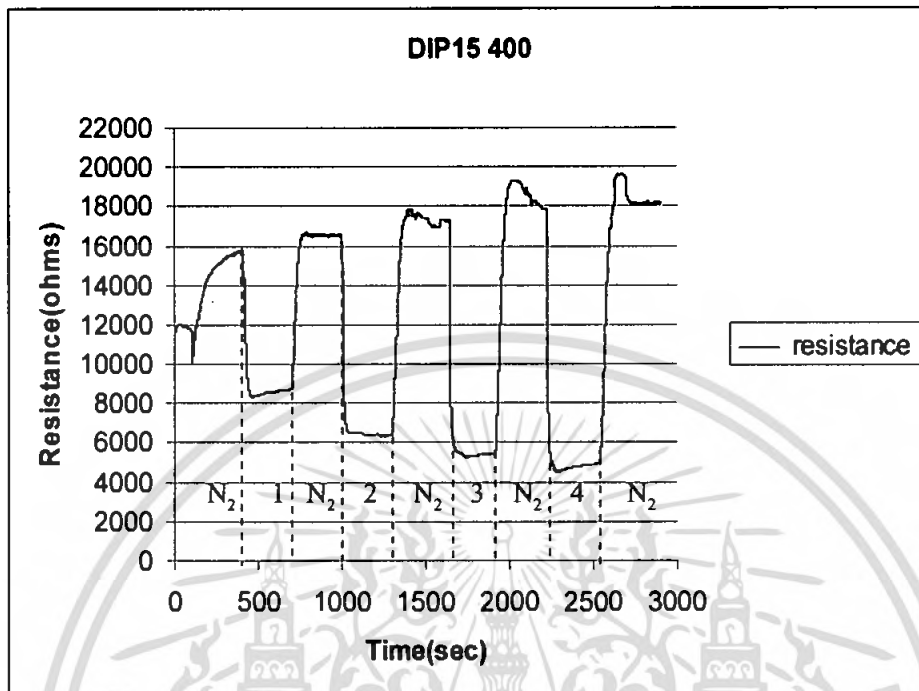


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง โค้ป  $\text{NH}_4\text{F}$  4.5% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.16 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง  $R = 21.58 \text{ K}\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซ ทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลา ทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	300	24.75	17.00	7.75	0.313
2	LPG	3.32%	300	25.03	12.40	12.63	0.504
3	LPG	4.90%	300	24.73	10.20	14.53	0.587
4	LPG	6.42%	300	24.75	8.87	15.88	0.641

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

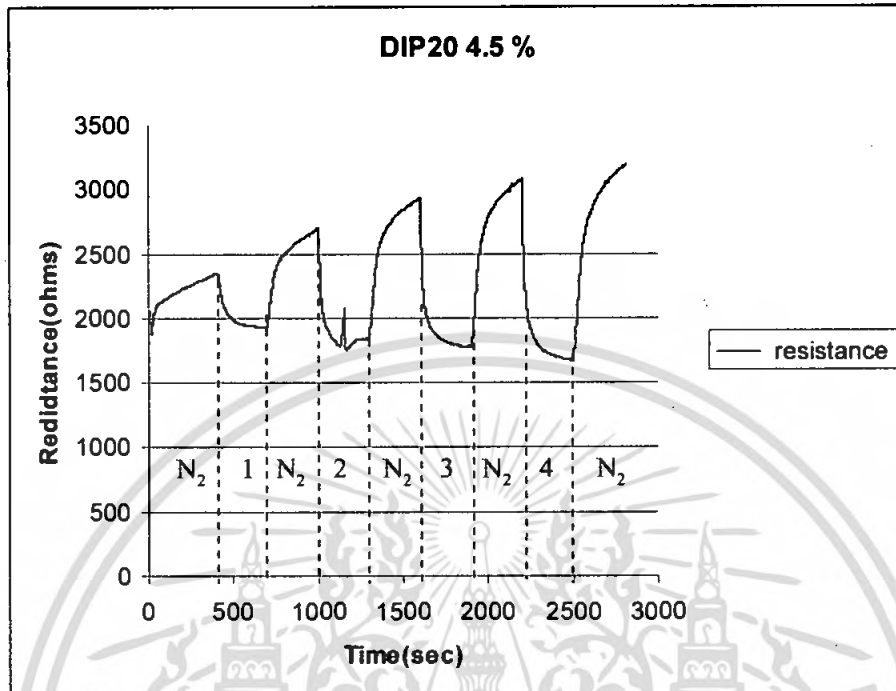


รูปที่4.31 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้  $\text{NH}_4\text{F}$  4.5% ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ตารางที่4.17 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง  $R = 11.56 \text{ K}\Omega$  ที่ 400 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลาทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	300	15.62	8.82	6.80	0.435
2	LPG	3.32%	300	16.45	6.34	10.11	0.614
3	LPG	4.90%	300	17.20	5.44	11.76	0.683
4	LPG	6.42%	300	17.77	4.92	12.85	0.723

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

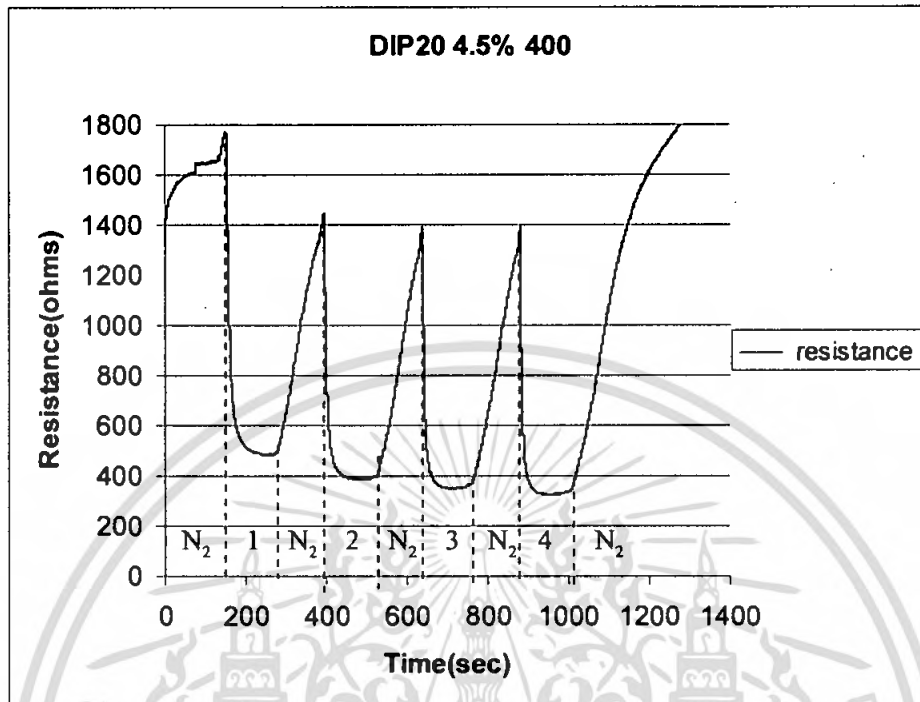


รูปที่ 4.32 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง ได้  $\text{NH}_4\text{F}$  4.5% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.18 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง  $R = 2.04 \text{ K}\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลาทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{ใหม่}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	300	2.30	1.96	0.34	0.147
2	LPG	3.32%	300	2.67	1.86	0.81	0.303
3	LPG	4.90%	300	2.93	1.80	1.13	0.385
4	LPG	6.42%	300	3.06	1.70	1.36	0.444

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



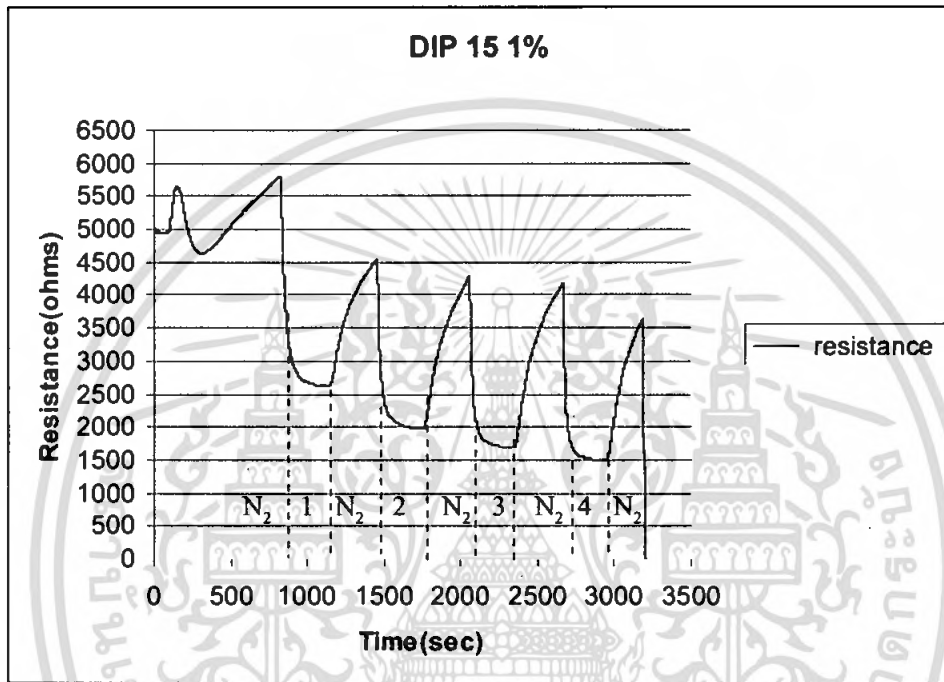
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง ไดป์  $\text{NH}_4\text{F}$  4.5% ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.19 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง  $R = 1.50 \text{ K}\Omega$  ที่ 400 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลาทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	120	1.75	0.50	1.25	0.71
2	LPG	3.32%	120	1.44	0.42	1.02	0.71
3	LPG	4.90%	120	1.40	0.40	1.00	0.71
4	LPG	6.42%	120	1.40	0.35	1.05	0.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากพบว่าเซ็นเซอร์ที่ทำการทดสอบกับก๊าซแอลพีจี ที่จุ่ม 15 ครั้ง ได้ปี 4.5 % ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ดีสุดเราจึงได้สร้างเซ็นเซอร์ที่จุ่ม 15 ครั้งเช่นกัน แต่เปลี่ยนการ ไล่ปสาร  $\text{NH}_4\text{F}$  เป็น 1%, 3.5%, 5.5% ,7.5%และ 10% เพื่อนำมาทดสอบกับก๊าซแอลพีจีที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ดังกราฟต่อไปนี้

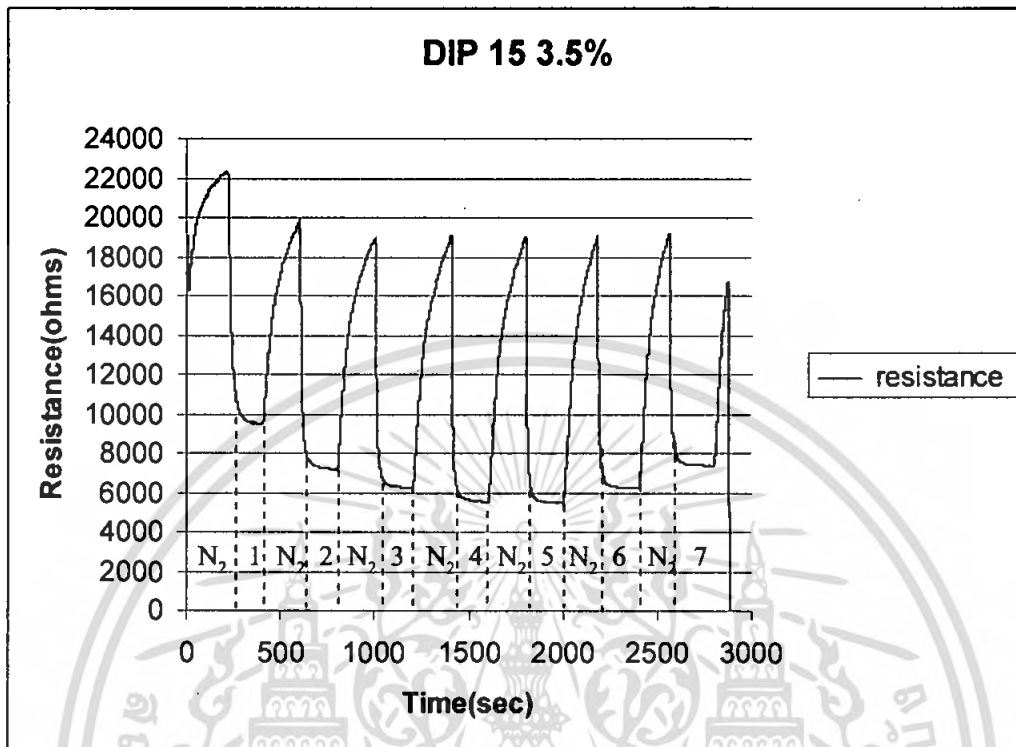


รูปที่ 4.34 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้ปี  $\text{NH}_4\text{F}$  1.0% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.20 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง  $R = 5.0 \text{ K}\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลาทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	300	5.70	2.70	3.00	0.526
2	LPG	3.32%	300	4.48	2.06	2.42	0.540
3	LPG	4.90%	300	4.22	1.76	2.46	0.582
4	LPG	6.42%	300	4.10	1.56	2.54	0.619

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

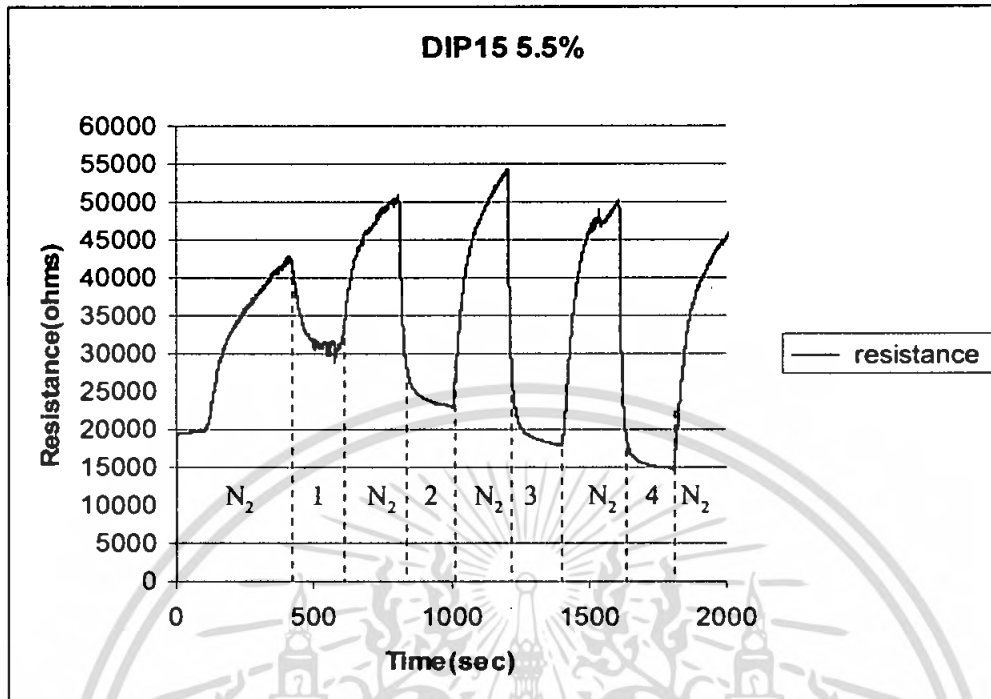


รูปที่4.35 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้  $\text{NH}_4\text{F}$  3.5% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่4.21 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง  $R = 18.86 \text{ K}\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลาทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	200	22.26	9.67	12.59	0.565
2	LPG	3.32%	200	20.00	7.40	12.60	0.630
3	LPG	4.90%	200	18.97	6.43	12.54	0.661
4	LPG	6.42%	200	19.01	5.68	13.30	0.699
5	LPG	1.68%	200	18.97	5.75	13.22	0.696
6	LPG	3.32%	200	18.97	6.45	12.52	0.659
7	LPG	4.90%	200	19.12	7.66	11.46	0.599

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

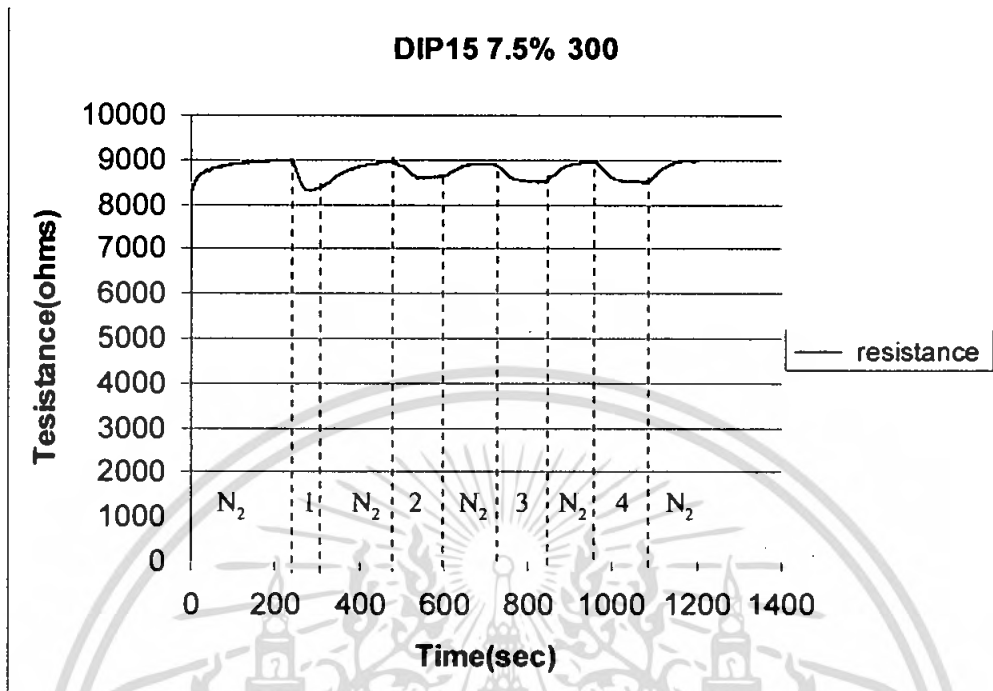


รูปที่ 4.36 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้  $\text{NH}_4\text{F}$  5.5% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.22 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง  $R = 20.0 \text{ K}\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซ ทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลา ทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	200	42.36	31.71	10.65	0.251
2	LPG	3.32%	200	50.90	23.47	27.43	0.538
3	LPG	4.90%	200	54.08	18.18	35.90	0.663
4	LPG	6.42%	200	50.10	15.16	34.94	0.697

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

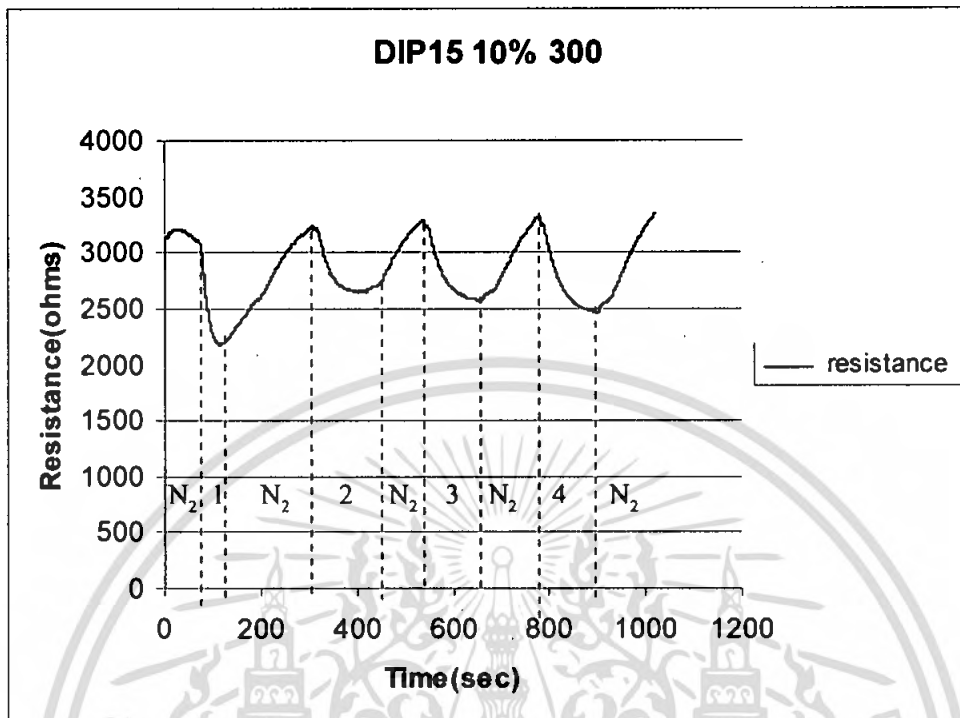


รูปที่ 4.37 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้อิน NH<sub>4</sub>F 7.5% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.23 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง  $R = 8.45 \text{ K}\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซ ทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลา ทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	120	9.00	8.46	0.54	0.06
2	LPG	3.32%	120	9.00	8.70	0.30	0.03
3	LPG	4.90%	120	8.90	8.62	0.28	0.03
4	LPG	6.42%	120	8.95	8.59	0.36	0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้  $\text{NH}_4\text{F}$  10% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

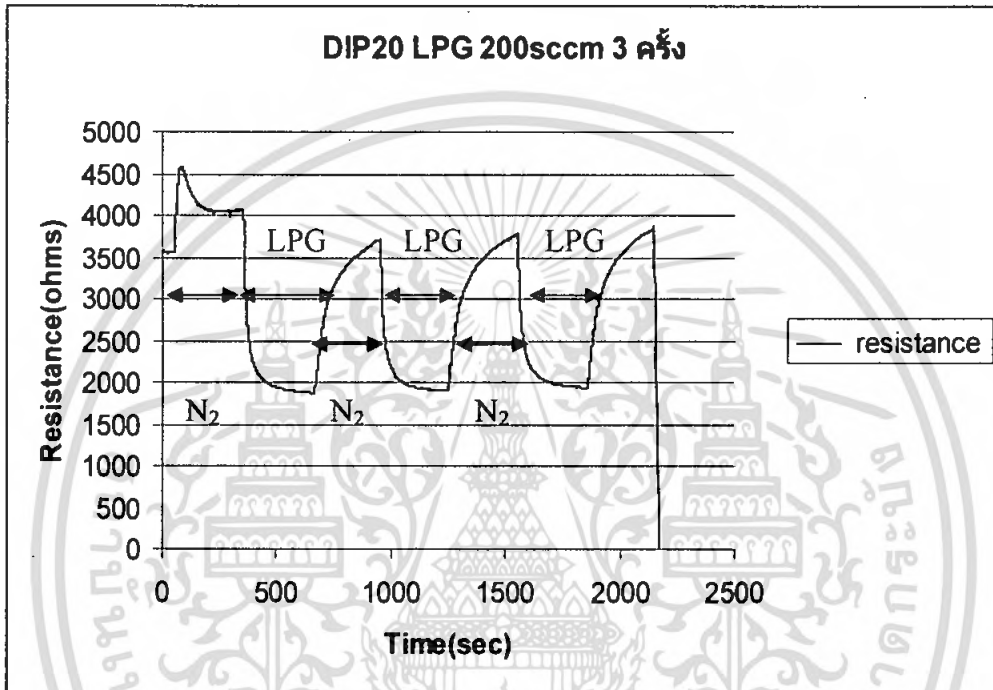
ตารางที่ 4.24 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง  $R = 3.20 \text{ K}\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซ ทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลา ทดสอบ (sec)	$R_{\text{เริ่มต้น}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$R_{\text{หลัง}}$ ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	Response $\Delta R / R_{\text{เริ่มต้น}}$
1	LPG	1.68%	120	3.02	2.20	0.82	0.27
2	LPG	3.32%	120	3.14	2.70	0.44	0.14
3	LPG	4.90%	120	3.21	2.61	0.60	0.18
4	LPG	6.42%	120	3.27	2.51	0.76	0.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.5 ผลของเซนเซอร์ต่อก๊าซแอลพีจีคองที่

เนื่องจากเราต้องการศึกษาผลความเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทาน ที่ทดสอบกับก๊าซแอลพีจีในปริมาณความเข้มข้น 6.42% 3 ครั้ง เราจึงนำเซนเซอร์ที่ทำการจุ่ม 20 ครั้ง ได้เป็  $\text{NH}_4\text{F}$  4.5% มาทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

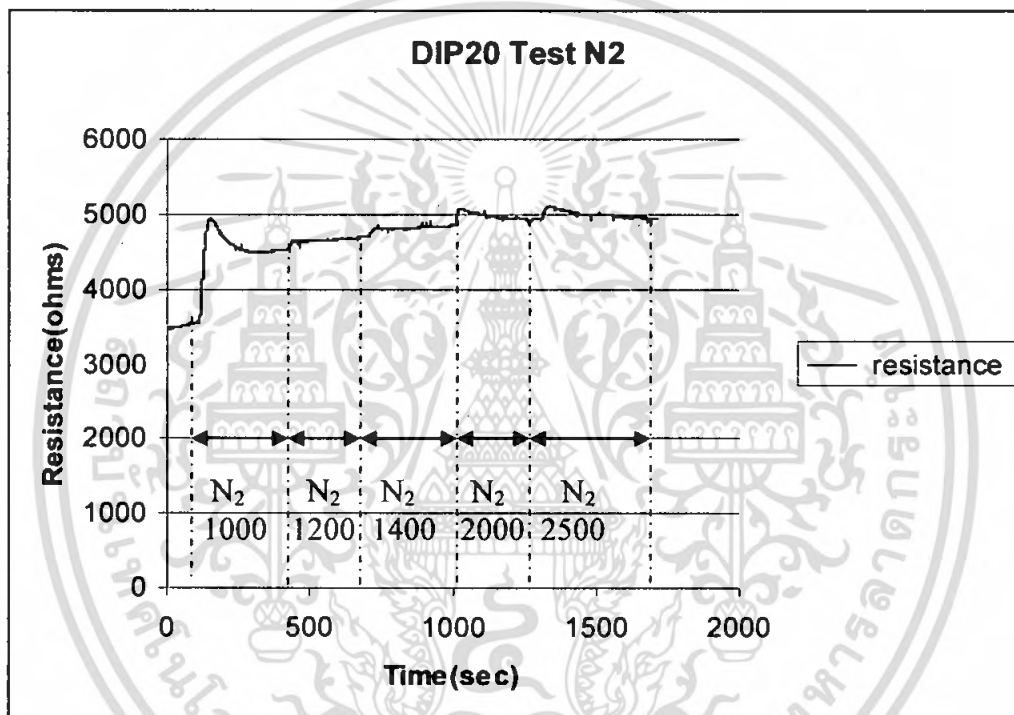


รูปที่ 4.39 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง ได้เป็  $\text{NH}_4\text{F}$  4.5% ทดสอบก๊าซแอลพีจีความเข้มข้น 6.42%

จากรูปที่ 4.40 เราทำการทดสอบปล่อยไนโตรเจนคงที่ 1000 sccm และใช้ก๊าซแอลพีจีคองที่ 20% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ผลที่ได้คือค่าความเปลี่ยนแปลงความต้านทานเท่าเดิม ทั้ง 3 ครั้งการทดสอบ

#### 4.2.6 ผลของเซ็นเซอร์ต่อก๊าซไนโตรเจน

การศึกษานี้เพื่อทดสอบว่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนมีผลอย่างไรต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซ็นเซอร์ที่สร้างจากฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2$  เราทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เซ็นเซอร์ทดสอบคือเซ็นเซอร์ที่ทำการจุ่ม 20 ครั้ง ได้ปี  $\text{NH}_4\text{F}$  4.5% โดยเปลี่ยนปริมาณความเข้มข้นก๊าซไนโตรเจนดังนี้ 1000sccm, 1200sccm, 1400sccm, 2000sccm, และ 2500sccm ตามลำดับ ผลที่ได้แสดง ดังรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.40 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง ได้ปี  $\text{NH}_4\text{F}$  4.5% ทดสอบก๊าซไนโตรเจน

#### 4.2.7 ผลของการตอบสนอง(Response)

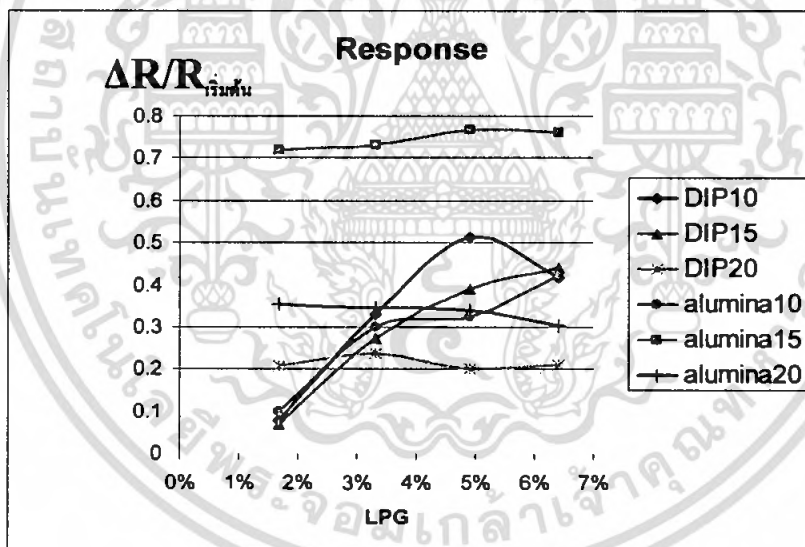
นิยาม Response คือ ค่าที่ระบุความสามารถในการตอบสนองของเซนเซอร์เมื่อมีก๊าซมาสัมผัสกับเซนเซอร์ในการทดลองนี้เราจะนิยามค่าการตอบสนองดังนี้

$$\text{จาก Response} = \frac{\Delta R}{R_{\text{เริ่มต้น}}}$$

$\Delta R$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานก่อนและหลังการปล่อยก๊าซ

$R_{\text{เริ่มต้น}}$  คือ ค่าความต้านทานเริ่มต้นก่อนมีความเปลี่ยนแปลง

เรานำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเซนเซอร์มาสร้างกราฟเพื่อจะได้ แสดงถึงความไวของเซนเซอร์ในการตรวจจับก๊าซแอลพีจีที่ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งเปรียบเทียบผลระหว่างเซนเซอร์แบบที่ใช้ฐานรองเป็นกระจกและฐานรองเป็นอะลูมินาที่ไม่ได้ไป  $\text{NH}_4\text{F}$  และเซนเซอร์ที่ได้ไป  $\text{NH}_4\text{F}$  ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และ 400 องศาเซลเซียส



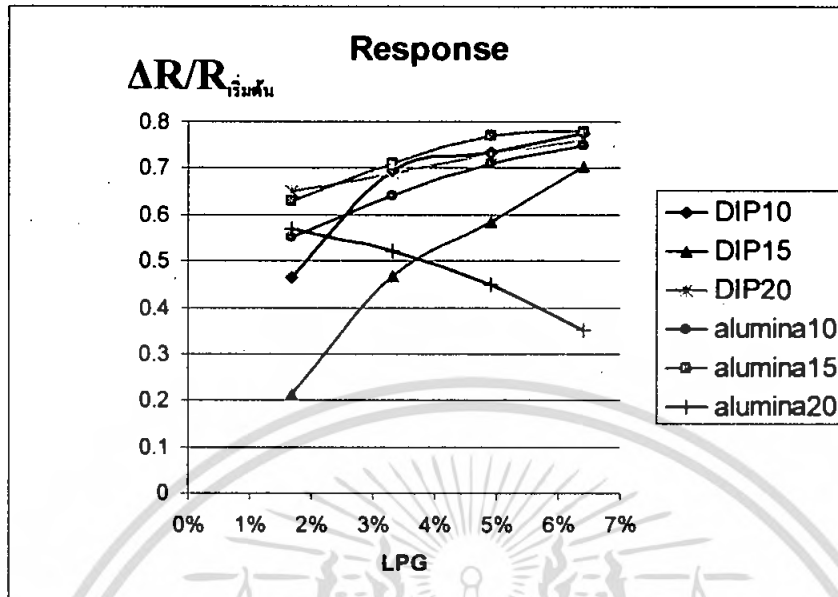
รูปที่ 4.41 การตอบสนองของเซนเซอร์แบบไม่ไดไป  $\text{NH}_4\text{F}$  เปรียบเทียบระหว่างกระจกกับอะลูมินาที่ 300 องศาเซลเซียส

กระจกที่ จุ่ม 15 ครั้งนั้นมี การตอบสนองที่ดี คือสามารถแยกปริมาณความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจีความเข้มข้นต่ำๆ ได้

บนอะลูมินา การจุ่ม 10 ครั้งมีการตอบสนองที่ดี ที่การจุ่ม 20 ครั้ง กราฟมีลักษณะลดลง ผลก็คือเซนเซอร์ที่จุ่ม 20 ครั้งบนฐานรองที่เป็นอะลูมินา นั้นตอบสนองกับก๊าซแอลพีจีไม่ดี

ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

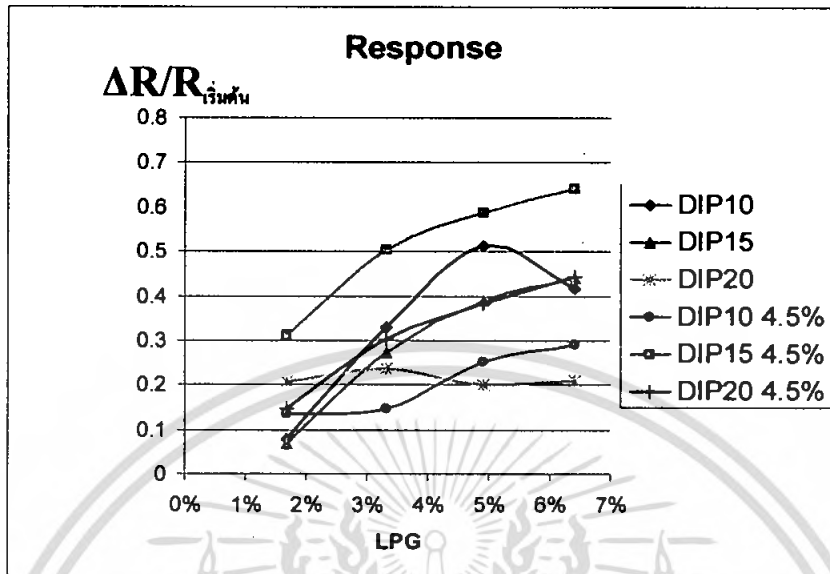
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



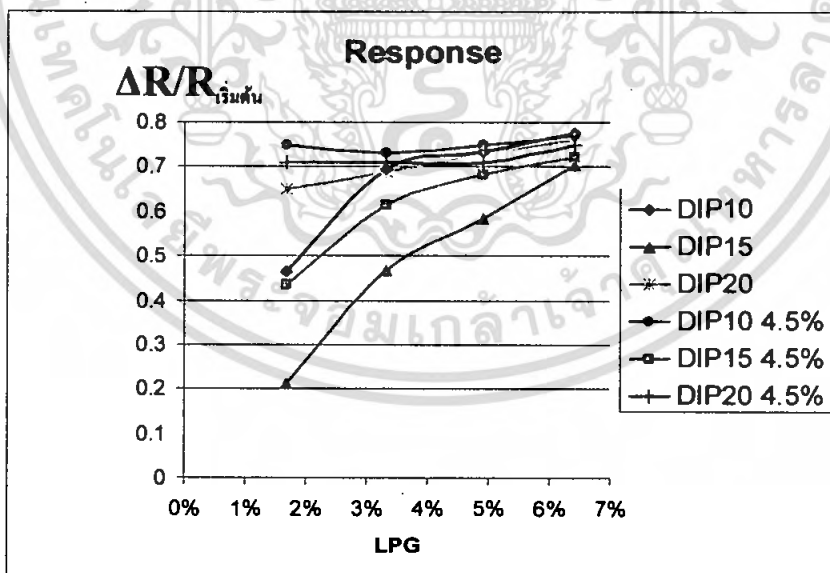
รูปที่ 4.42 การตอบสนองของเซนเซอร์แบบไม่ไดโพล NH<sub>4</sub>F เปรียบเทียบระหว่าง กระบอกกับอะลูมินาที่ 400 องศาเซลเซียส

บนฐานรองที่เป็นกระบอก การจุ่ม 10 ครั้ง และ 15 ครั้ง สามารถแยกปริมาณความเข้มข้นของ ก๊าซแอลพีจี ได้ดี แต่การจุ่ม 20 ครั้งนั้นการตอบสนองต่อก๊าซแอลพีจี ไม่ดี

บนฐานรองอะลูมินา การจุ่ม 10 ครั้ง และ 15 ครั้ง สามารถแยกปริมาณความเข้มข้นของ ก๊าซแอลพีจี ได้ดี การจุ่ม 20 นั้น ตอบสนองต่อก๊าซแอลพีจี ไม่ดีที่อุณหภูมินี้

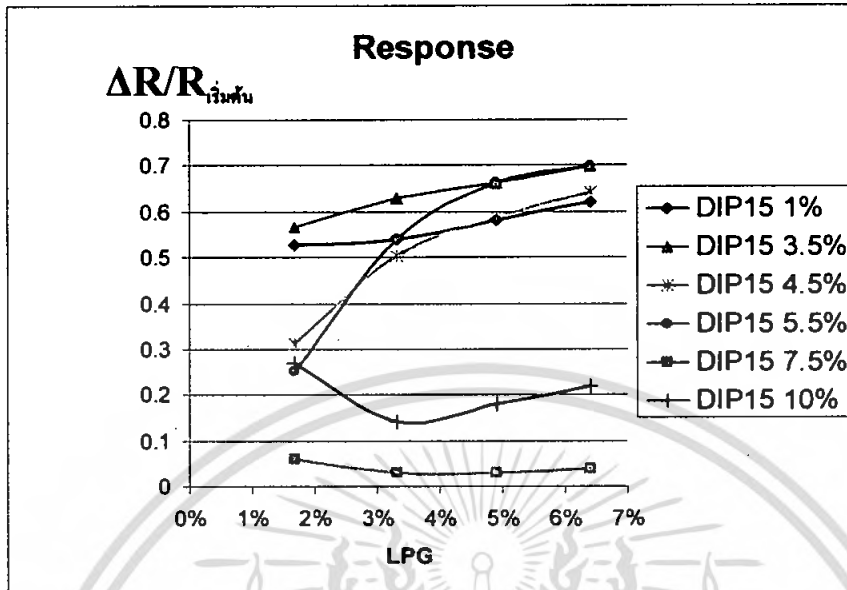


รูปที่ 4.43 การตอบสนองของเซนเซอร์แบบกระจกแบบไม่โด๊ป  $\text{NH}_4\text{F}$  เปรียบเทียบกับกระจกที่โด๊ป  $\text{NH}_4\text{F}$  4.5% ที่ 300 อนุภาคเซลล์



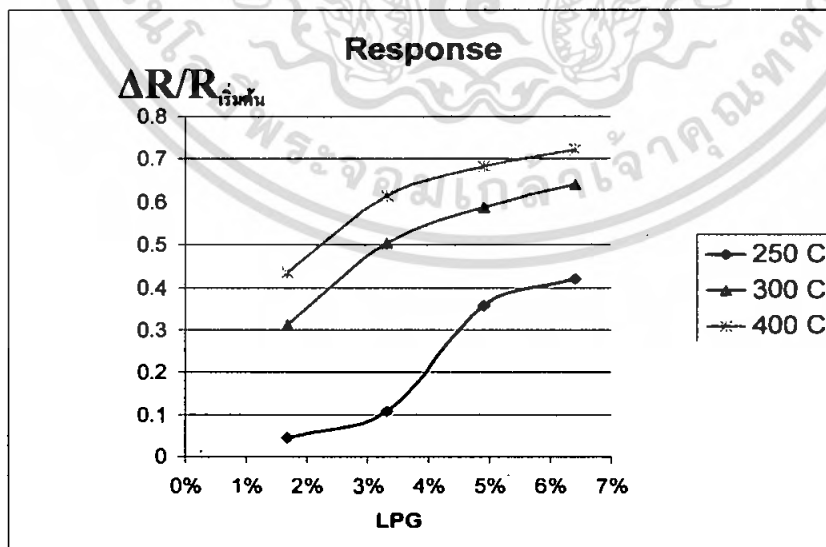
รูปที่ 4.44 การตอบสนองของเซนเซอร์แบบกระจกแบบไม่โด๊ป  $\text{NH}_4\text{F}$  เปรียบเทียบกับกระจกที่โด๊ป  $\text{NH}_4\text{F}$  4.5% ที่ 400 อนุภาคเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 การตอบสนองของเซนเซอร์แบบกระจุกจุ่ม 15 ครั้งที่ได้ไป  $\text{NH}_4\text{F}$  1%, 3.5%, 4.5%, 5.5%, 7.5% และ 10% ที่ 300 องศาเซลเซียส

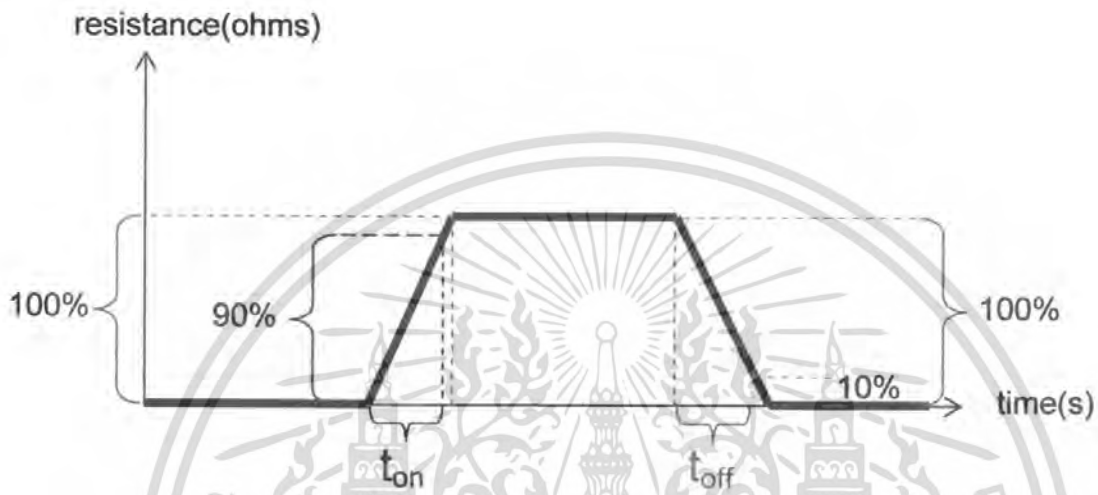
จากกราฟ พบว่าการ ได้ไป  $\text{NH}_4\text{F}$  ที่ความเข้มข้น 4.5% และ 5.5% นั้นมีการตอบสนองที่ดีกว่าเซนเซอร์ตัวอื่นๆ การเพิ่มปริมาณการ ได้ไป เป็น 7.5% และ 10% นั้น มีการตอบสนองคือก๊าซแอลพีจีที่ไม่ดี ถ้าหากมีการเพิ่มปริมาณการ ได้ไป  $\text{NH}_4\text{F}$  มีแนวโน้มว่าการตอบสนองของเซนเซอร์คือก๊าซแอลพีจีจะไม่ดี



รูปที่ 4.46 การตอบสนองของเซนเซอร์แบบกระจุกจุ่ม 15 ครั้งที่ได้ไป  $\text{NH}_4\text{F}$  4.5% ทดสอบที่ อุณหภูมิ 250, 300, และ 400 องศาเซลเซียส 2

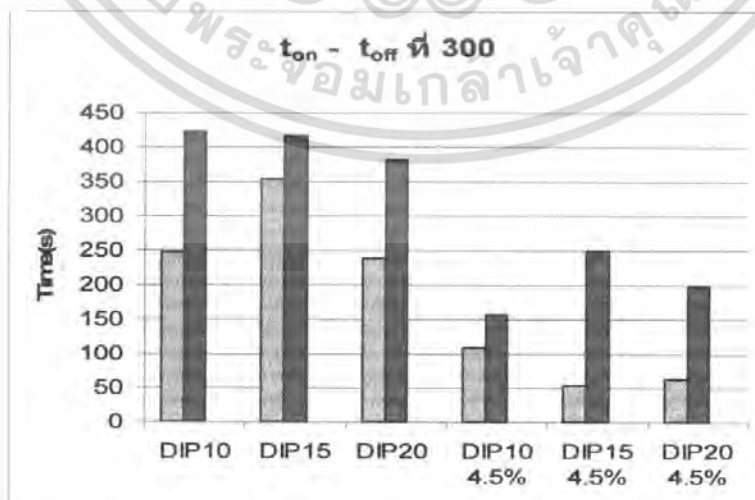
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.8 เวลาตอบสนอง ( $t_{on}$  ; Response time) และเวลาคืนกลับสู่สภาพเดิม ( $t_{off}$  ; Recovery time) สามารถหาได้ดังรูปต่อไปนี้



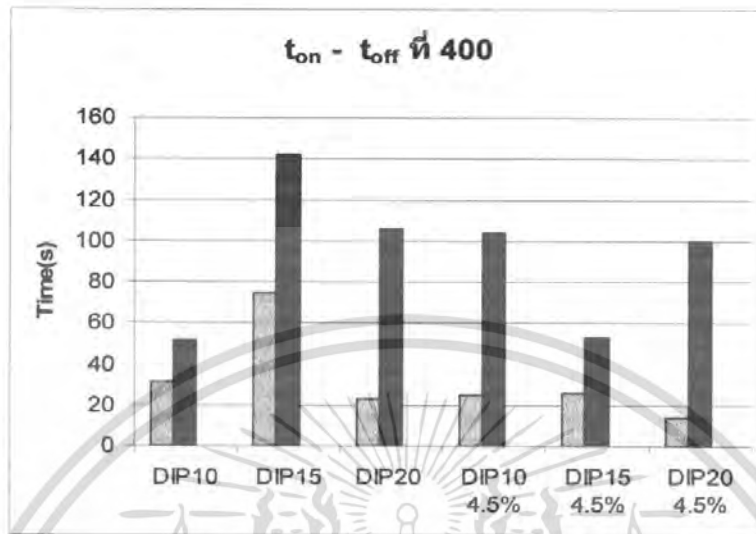
เรานำผลของเซนเซอร์ที่ทดสอบกับก๊าซแอลพีจี มาคิดค่าเวลาในการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อก๊าซแอลพีจีและเวลาการคืนกลับของเซนเซอร์ เราได้คิดที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นแอลพีจีที่ 4.90% ช่วงเป็นช่วงกลางๆของความเข้มข้นก๊าซแอลพีจีที่เราทำการทดลอง ผลที่ได้จะแสดงเป็นแผนภูมิแท่ง

เปรียบเทียบระหว่างฐานรองที่เป็นกระจกโดยไม้ได้ป  $NH_4F$  และได้ป  $NH_4F$  4.5%



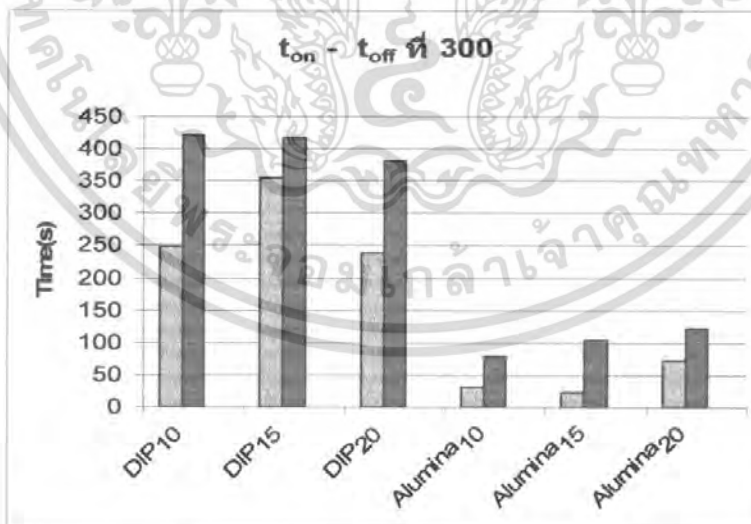
รูปที่ 4.47 แผนภูมิแท่งแสดง  $t_{on}$  และ  $t_{off}$  บนกระจกไม้ได้ป  $NH_4F$  และได้ป  $NH_4F$  4.5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



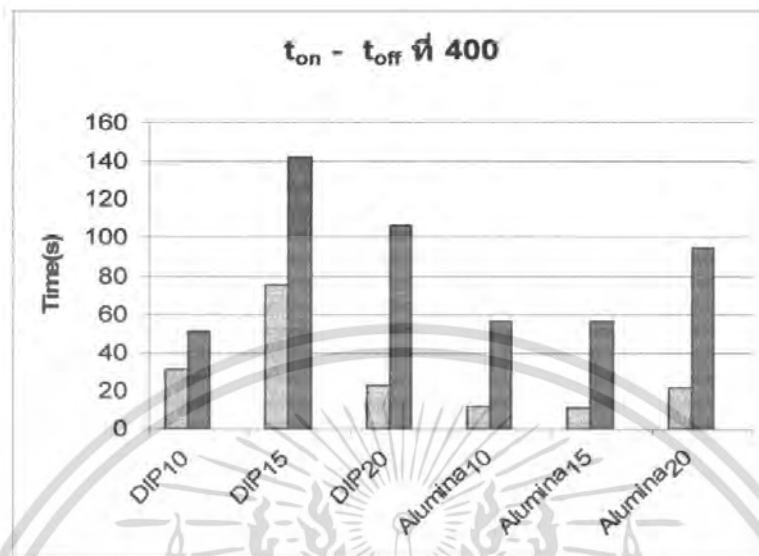
รูปที่ 4.48 แผนภูมิแท่งแสดง  $t_{on}$  และ  $t_{off}$  บนกระจกไม่ได้ป  $NH_4F$  และ ได้ป  $NH_4F$  4.5% ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

เปรียบเทียบระหว่างกระจกกับอะลูมินาโดยไม่ได้ป  $NH_4F$



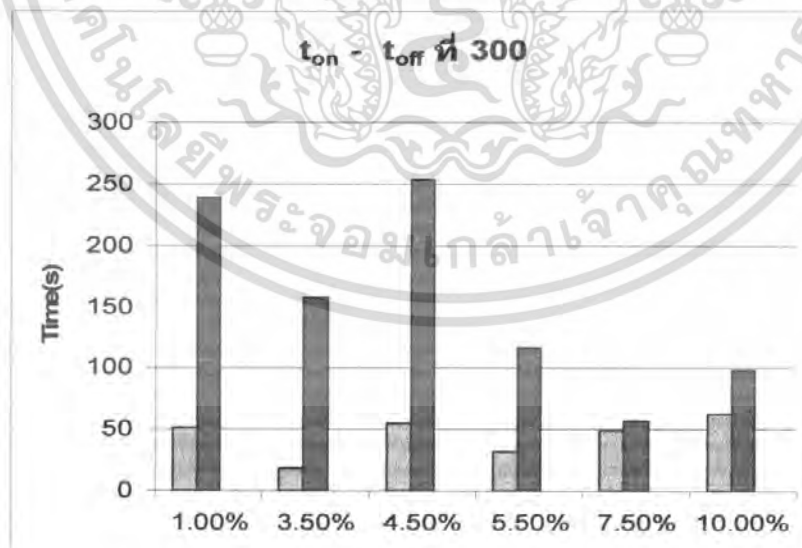
รูปที่ 4.49 แผนภูมิแท่งแสดง  $t_{on}$  และ  $t_{off}$  บนกระจกและอะลูมินาที่ไม่ได้ป  $NH_4F$  ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.50 แผนภูมิแท่งแสดง  $t_{on}$  และ  $t_{off}$  บนกระจกและอะลูมินาที่ไม่ได้ป  $NH_4F$  ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

เปรียบเทียบการจุ่ม 15 ครั้ง โดยได้ป  $NH_4F$  1%, 3.5%, 4.5%, 5.5%, 7.5% และ 10%



รูปที่ 4.51 แผนภูมิแท่งแสดง  $t_{on}$  และ  $t_{off}$  บนกระจกที่ได้ป  $NH_4F$  ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

สร้างเซนเซอร์จากหินออกไซด์ด้วยวิธีการจุ่มโดยไม่ได้ปี NH<sub>4</sub>F และ ได้ปี NH<sub>4</sub>F บน  
ฐานรองที่เป็นกระจกและอะลูมินา จำนวนครั้งในการจุ่ม คือ 10 ครั้ง, 15 ครั้ง และ 20 ครั้ง  
นำเซนเซอร์มาทดสอบกับก๊าซแอลพีจี โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจี  
1.68%, 3.32%, 4.90% และ 6.42% อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบคือ อุณหภูมิห้อง,  
250, 300 และ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ผลดังนี้

1. การ ได้ปี NH<sub>4</sub>F 4.5% และ 5.5 % บนกระจก โดยการจุ่ม 15 ครั้ง เหมาะที่จะนำมาเป็น  
เซนเซอร์
2. ฐานรองที่เป็นอะลูมินา ที่จุ่ม 15 ครั้ง เหมาะที่จะนำมาเป็นเซนเซอร์
3. เซนเซอร์จะใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิ 300 และ 400 องศาเซลเซียส
4. เซนเซอร์มีการตอบสนองคงที่ เมื่อความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจีคงที่  
จากผลการทดลองที่ได้ เซนเซอร์นี้สามารถนำมาใช้งานในการตรวจจับก๊าซแอลพีจีได้  
แต่ยังคงต้องศึกษาและวิจัยเพิ่มเติมต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

เรืองศักดิ์ ภัทรกิจ โสภณ “การพัฒนาฟิล์มบางตัวนำโปร่งแสงดีบุกออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีการจุ่ม”  
วิทยานิพนธ์ปี 2550

อดิศักดิ์ ศรีชุม “การศึกษาคุณสมบัติการตอบสนองต่อก๊าซของทินออกไซด์” วิทยานิพนธ์ปี 2541

[http://www.hpcc.nectec.or.th/wiki/index.php/Defect\\_band\\_structure\\_of\\_SnO2](http://www.hpcc.nectec.or.th/wiki/index.php/Defect_band_structure_of_SnO2)

การปีโตรเลียมแห่งประเทศไทย

[http://www.geocities.com/thaikeramos/product/advance\\_product/gas\\_sensor/gas\\_sensors.html](http://www.geocities.com/thaikeramos/product/advance_product/gas_sensor/gas_sensors.html)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้