

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

เครื่องตรวจจับก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) โดยใช้เซ็นเซอร์

ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์

(Liquefied petroleum gas (LPG) detectors using thin film tin oxide sensors)

ผู้วิจัย

RCH  
TK  
7871.15  
.F5  
ธ 784ค

นายสุริชัย

ชัยสิทธิ์ศักดิ์

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 84479  
วัน,เดือน,ปี..... 13 ต.ค. 2551

โครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ประจำปี 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11992566

## กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ประจำปี 2549 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า  
คุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ได้กล่าวถึงการปลูกฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เจือสารฟลูออรีนด้วยเทคนิคการจุ่ม (dip-coating) วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ การพัฒนาฟิล์มบางดีบุกออกไซด์สำหรับใช้เป็นวัสดุตรวจจับก๊าซแอลพีจี (LPG; Liquefied petroleum gas, ก๊าซปิโตรเลียมเหลวหรือก๊าซหุงต้ม) สารเคมีตั้งต้นที่ใช้คือ  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_4\text{F}$  และ  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$  เป็นแหล่งกำเนิดดีบุก, ฟลูออรีน และตัวทำละลาย ตามลำดับ โดยได้ทำการศึกษาเงื่อนไขการสร้างฟิล์ม เช่น ชนิดของฐานรอง ปริมาณของสารโด้ป และความหนาของฟิล์ม (โดยควบคุมจำนวนครั้งในการจุ่ม) ที่มีต่อประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์ การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าถูกทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ (อุณหภูมิห้อง, 250, 300 and 400°C) และก๊าซแอลพีจีที่เจือจางด้วยก๊าซพาใน โตรเจนที่ความเข้มข้นต่างๆ (1.68, 3.32, 4.90, 6.42%) ในรายงานวิจัยฉบับนี้จะวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มและเซ็นเซอร์ที่ได้จากงานวิจัย ผลงานที่ได้จากงานวิจัยนี้จะช่วยสนับสนุนนวัตกรรมทางด้านวัสดุศาสตร์ และเทคโนโลยีของแอลพีจีเซ็นเซอร์

## ABSTRACT

This report presents the deposition of fluorine doped  $\text{SnO}_2$  thin films by using dip-coating technique. The main purpose of this research is to develop  $\text{SnO}_2$  thin films as a detecting material for LPG (Liquefied petroleum gas).  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_4\text{F}$  and Ethanol have been used as tin, fluorine sources and solvent, respectively. The influence of parameters such as type of substrate, doping amount and film thickness (by varying the number of dipping), on the sensor sensitivity have been investigated. The resistance change has been studied at different temperatures (room temperature, 250, 300 and 400°C) and in the presence of three different concentrations (1.68, 3.32, 4.90, 6.42%) of LPG in  $\text{N}_2$  carrier gas. The material and sensor characterization results obtained in the study are discussed in detail in this report. It is expected that this research will contribute greatly to the progress of innovative materials science and technology of LPG sensors.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)	i
บทคัดย่อ (Abstract)	ii
สารบัญ	iii
สารบัญตาราง	vi
สารบัญรูป	vii
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตและขั้นตอนการทำวิจัย.....	2
1.4 ผลงานที่คาดว่าจะได้รับเมื่อเสร็จสิ้นโครงการ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 ดีบุกออกไซด์ (SnO <sub>2</sub> ).....	4
2.1.1 โครงสร้างของดีบุกออกไซด์.....	4
2.1.2 สมบัติทางไฟฟ้าของดีบุกออกไซด์.....	5
2.1.3 สมบัติทางแสงของดีบุกออกไซด์.....	6
ผลของแสงที่มีต่อสารกึ่งตัวนำ.....	6
2.2 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการจุ่ม [10].....	9
2.2.1 การจุ่มเคลือบแบบกะ (Batch dip coating).....	9
2.2.2 การจุ่มเคลือบแบบต่อเนื่อง (Continuous dip coating).....	9
2.3 ความรู้เกี่ยวกับก๊าซแอลพีจี .....	12
2.3.1 คุณสมบัติและความแตกต่างระหว่างLPG/NGV .....	12
2.3.2 ประโยชน์ของก๊าซ.....	13
2.3.3 ข้อระวังในการใช้ก๊าซ.....	13
2.4 ก๊าซเซินเซอร์ [11].....	13
2.4.1 นิยามของเซ็นเซอร์ .....	13
2.4.2 ชนิดของก๊าซเซ็นเซอร์.....	15
2.4.3 คุณสมบัติของก๊าซเซ็นเซอร์.....	16
2.5 ทินออกไซด์ก๊าซเซ็นเซอร์.....	17
2.5.1 กลไกในการตรวจจับก๊าซของทินออกไซด์.....	18
2.5.1.1 ผลในเนื้อสาร.....	18
2.5.1.2 ผลจากผิวของสารกึ่งตัวนำ.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้วางใจได้จรรยาบรรณด้วย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.3 ผลจากขอบเกรน.....	19
2.5.2 ปฏิกริยาเคมีระหว่างทินออกไซด์กับก๊าซต่างๆ.....	21
2.5.2.1 ปฏิกริยาออกซิเดชัน.....	21
2.5.2.2 ปฏิกริยารีดักชัน.....	22
2.5.3 การปรับปรุงความไวในการตอบสนอง โดยการเติมตัวแกทอะลิสต์.....	22
<b>บทที่ 3 การสร้างเซ็นเซอร์แอลพีจีและการทดสอบก๊าซ.....</b>	<b>24</b>
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเซ็นเซอร์.....	24
3.1.1 ฐานรอง.....	24
3.1.2 สารละลาย.....	24
3.1.3 อุปกรณ์เคลือบจุ่ม.....	25
3.2 ขั้นตอนในการเตรียมสารละลาย.....	27
3.2.1 ชั่งสารและผสมสาร.....	27
3.2.2 คนสารละลาย.....	27
3.3 ขั้นตอนการสร้างฟิล์มบางทินออกไซด์.....	28
3.3.1 ตัดตั้งชิ้นงาน.....	28
3.3.2 จ่ายไฟให้เตาอบ.....	28
3.3.3 การกำหนดสภาวะที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.3.4 กระบวนการทำงานของเครื่องจุ่ม.....	30
3.3.5 ระยะเวลา.....	31
3.4 ขั้นตอนการสร้างลวดลาย โลหะ.....	32
3.5 การทดสอบ.....	33
3.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	34
3.5.2 ขั้นตอนการติดตั้งเซ็นเซอร์ในภาชนะบรรจุเซ็นเซอร์.....	37
3.5.3 การทดสอบเซ็นเซอร์กับก๊าซแอลพีจี.....	38
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง.....</b>	<b>39</b>
4.1 ผลจากการส่อง SEM.....	39
4.2 ผลของเซ็นเซอร์ที่ไม่ได้ป NH <sub>4</sub> F บนฐานรองที่เป็นกระจก.....	41
4.3 ผลของเซ็นเซอร์ที่ไม่ได้ป NH <sub>4</sub> F บนฐานรองที่เป็นอะลูมินา.....	45
4.4 ผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่ทำการ ได้ป NH <sub>4</sub> F.....	49
4.5 ผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่ปรับเปลี่ยนปริมาณ ได้ป NH <sub>4</sub> F.....	53
4.6 ผลของเซ็นเซอร์ต่อก๊าซแอลพีจีคิงที่.....	57
4.6 ผลของความไวในการวัด (Response).....	57
4.7 ค่าเวลาตอบสนอง ( $t_{on}$ ) และ ค่าเวลาคืนกลับสู่สภาพเดิม ( $t_{off}$ ) ของเซ็นเซอร์.....	60
4.8 ต้นแบบชุดการประยุกต์ใช้งานก๊าซเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้น รวมวงจรแสดงผล.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	66
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	66
เอกสารอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก.....	68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ NG กับ LPG .....	12
ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างชนิดของเซ็นเซอร์และวัสดุที่ใช้ทำเซ็นเซอร์ .....	15
ตารางที่ 2.3 ก๊าซเซ็นเซอร์ชนิดต่างๆ .....	16
ตารางที่ 2.4 ชนิดของตัวแคทตะลิสต์ที่ใช้เติมในการทดสอบก๊าซชนิดต่างๆ.....	23
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนฐานรองที่เป็นกระจก) โดย $R = 5.25 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส.....	41
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนฐานรองที่เป็นกระจก) โดย $R = 900 \Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส .....	42
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนฐานรองที่เป็นกระจก) โดย $R = 867 \Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส .....	42
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนฐานรองที่เป็นกระจก) โดย $R = 105 \text{ K}\Omega$ ที่ 400 องศาเซลเซียส.....	43
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนฐานรองที่เป็นกระจก) $R = 28.25 \text{ K}\Omega$ ที่ 400 องศาเซลเซียส .....	43
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนฐานรองที่เป็นกระจก) $R = 4.67 \text{ K}\Omega$ ที่ 400 องศาเซลเซียส .....	44
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนอะลูมิน่า) $R = 3.87 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส .....	45
ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนอะลูมิน่า) $R = 14.90 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส .....	46
ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนอะลูมิน่า) $R = 0.71 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส .....	46
ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนอะลูมิน่า) $R = 3.27 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส .....	47
ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนอะลูมิน่า) $R = 5.85 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส .....	47
ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนอะลูมิน่า) $R = 0.26 \text{ K}\Omega$ ที่ 400 องศาเซลเซียส .....	48
ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% (บนกระจก) $R = 4 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส .....	49
ตารางที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง ได้ปี $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% (บนกระจก) $R = 5 \text{ K}\Omega$ ที่ 400 องศาเซลเซียส .....	50
ตารางที่ 4.15 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (บนกระจก) $R = 6.34 \text{ K}\Omega$ ที่ 250 องศาเซลเซียส .....	50
ตารางที่ 4.16 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (บนกระจก) $R = 21.58 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส .....	51
ตารางที่ 4.17 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (บนกระจก) $R = 11.56 \text{ K}\Omega$ ที่ 400 องศาเซลเซียส .....	51
ตารางที่ 4.18 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง (บนกระจก) $R = 2.04 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส .....	52
ตารางที่ 4.19 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง (บนกระจก) $R = 1.50 \text{ K}\Omega$ ที่ 400 องศาเซลเซียส .....	52
ตารางที่ 4.20 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (บนกระจก) $R = 5.0 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส .....	53
ตารางที่ 4.21 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (บนกระจก) $R = 18.86 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส .....	54
ตารางที่ 4.22 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (บนกระจก) $R = 20.0 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส .....	55
ตารางที่ 4.23 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (บนกระจก) $R = 8.45 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส .....	55
ตารางที่ 4.24 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (บนกระจก) $R = 3.20 \text{ K}\Omega$ ที่ 300 องศาเซลเซียส .....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 โครงสร้างอะตอมของดีบุกออกไซด์ (SnO <sub>2</sub> ) [http://webmineral.com/data/cassiterite.shtml].....	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกแบบ tetragonal rutile ของผลึกดีบุกออกไซด์ [http://www.ill.fr/dif/3D-crystals/salt.] .....	5
รูปที่ 2.3 แถบพลังงานสารกึ่งตัวชนิดอื่น .....	6
รูปที่ 2.4 ลำแสงตกลงบนวัสดุสารกึ่งตัวนำ [9].....	6
รูปที่ 2.5 การดูดกลืนแสง (Absorption) และการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission) ระหว่างชั้นพลังงาน E <sub>1</sub> และ E <sub>2</sub> .....	7
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์พลังงานโฟตอนและความยาวคลื่น.....	8
รูปที่ 2.7 การส่งผ่านแสงของวัสดุดีบุกออกไซด์.....	8
รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการจุ่มเคลือบแบบกะ [10].....	9
รูปที่ 2.9 (ก) การจุ่มเคลือบแบบต่อเนื่อง และ (ข) ชั้นขอบเขตของของเหลวที่บริเวณที่ 3 ในรูป (ก) [10] .....	10
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของฟิล์มและความหนืดของสารละลายที่ความเร็วในการดึงขึ้นงานต่างๆกันที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง (From Strawbridge and James).....	11
รูปที่ 2.11 ผลจากการทดลองของ Brinker และ Ashley ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) log h และ log U (ข) log (h x refractive index) และ log U.....	12
รูปที่ 2.12 แสดงการจัดกลุ่มของทรานสดิวเซอร์ (Transducers).....	14
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของก๊าซเซ็นเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำ .....	17
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 800 ถึง 200 องศาเซลเซียสกับปริมาตร O <sub>2</sub> ที่ถูกดูดกลืน.....	18
รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของทินออกไซด์ต่ออุณหภูมิที่บรรยากาศของก๊าซต่างๆ .....	19
รูปที่ 2.16 โครงสร้างแถบพลังงานของทินออกไซด์.....	20
รูปที่ 2.17 โครงสร้างและแบบจำลองของสารกึ่งตัวนำ (กำแพงศักย์ที่เกิดจากการดูดกลืนออกซิเจน) (ก) แบบจำลองทางฟิสิกส์ (ข) แบบจำลองแถบพลังงาน.....	20
รูปที่ 2.18 แบบจำลองกำแพงศักย์ที่ขอบเกรน .....	20
รูปที่ 2.19 กำแพงศักย์ตามทางเดินกระแสในทินออกไซด์กึ่งตัวนำ (ผลึกมีขนาดน้อยกว่า สองเท่าของ Debye length).....	21
รูปที่ 2.20 การตรวจจับ C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH ของทินออกไซด์ จะได้ CH <sub>3</sub> COOH และ H <sub>2</sub> O.....	21
รูปที่ 2.21 การตรวจจับ O <sub>3</sub> ของทินออกไซด์ จะได้ O <sub>2</sub> .....	22
รูปที่ 2.22 การตรวจจับ NO <sub>2</sub> ของทินออกไซด์ จะได้ NO.....	22
รูปที่ 2.23 ปรากฏการณ์ที่ผิวสัมผัสเมื่อเติมตัวแคทอะลิสต์ .....	23
รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายอะลูมินากับกระจกที่นำมาใช้เป็นฐานรอง.....	24
รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายของเครื่องจุ่มอัตโนมัติสั่งงานผ่านคอมพิวเตอร์.....	25
รูปที่ 3.3 วงจรเชื่อมต่อระหว่างพอร์ตปริ้นเตอร์และสเต็ปมอเตอร์ .....	25
รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายเตาอบความร้อน.....	26
รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางการทำงานของเครื่องจุ่มอัตโนมัติ.....	26

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 หน้าจอควบคุมการทำงาน .....	27
รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายแสดงการคนสารละลาย .....	27
รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายแสดงการอัลตรา โซนิก.....	28
รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายการติดตั้งชิ้นงานกับเครื่องจุ่ม .....	28
รูปที่ 3.10 การต่อเครื่องจ่ายไฟให้กับเตาอบ .....	29
รูปที่ 3.11 เตาอบมีอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	29
รูปที่ 3.12 กำหนดสภาวะจาก โปรแกรมในคอมพิวเตอร์ .....	30
รูปที่ 3.13 ภาพถ่ายเครื่องเคลือบจุ่มในตู้ดูดอากาศ.....	31
รูปที่ 3.14 ภาพถ่ายชิ้นงานที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์.....	31
รูปที่ 3.15 ภาพถ่ายเครื่อง Evaporation.....	32
รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ทำการเคลือบด้วยอะลูมิเนียม .....	33
รูปที่ 3.17 ภาพถ่ายเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแอลพีจี.....	33
รูปที่ 3.18 ภาพถ่ายโดยรวมของระบบที่จะทำการทดสอบ .....	34
รูปที่ 3.19 ภาพถ่ายของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ .....	34
รูปที่ 3.20 ภาพถ่ายเครื่องวัดและจ่ายแรงดัน/กระแสไฟฟ้า.....	35
รูปที่ 3.21 ภาพถ่ายภาชนะที่บรรจุเซ็นเซอร์.....	35
รูปที่ 3.22 ภาพถ่ายปั๊มดูดก๊าซและเครื่องแปลงไฟฟ้า.....	35
รูปที่ 3.23 ภาพ โปรแกรม Lab View .....	36
รูปที่ 3.24 ภาพถ่ายถังบรรจุก๊าซแอลพีจีที่ถูกเก็บไว้ในที่ปลอดภัย.....	37
รูปที่ 3.25 ภาพถ่ายการทากาวเงินก่อนวางเซนเซอร์.....	37
รูปที่ 3.26 ภาพถ่ายการวางเซนเซอร์ที่แทนพร้อมทั้งทากาวเงินที่ขั้วเซนเซอร์ทั้ง 2 ข้าง.....	37
รูปที่ 3.27 ภาพถ่ายเซนเซอร์พร้อมที่จะทดสอบ .....	38
รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SnO <sub>2</sub> ฐานรองที่เป็นกระจก .....	39
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SnO <sub>2</sub> บนกระจก โด๊ป NH <sub>4</sub> F 4.5% .....	39
รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SnO <sub>2</sub> บนกระจก โด๊ป NH <sub>4</sub> F 10%.....	39
รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SnO <sub>2</sub> บนฐานรองอะลูมินา.....	40
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง (ไม่โด๊ป บนฐานรองที่เป็นกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	41
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง (ไม่โด๊ป บนฐานรองที่เป็นกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	42
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง (ไม่โด๊ป บนฐานรองที่เป็นกระจก) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	42
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง (ไม่โด๊ป บนฐานรองที่เป็นกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	43
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง (ไม่โด๊ป บนฐานรองที่เป็นกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	43
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง (ไม่โด๊ป บนฐานรองที่เป็นกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	44
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง (ไม่โด๊ป บนอะลูมินา) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	45
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง (ไม่โด๊ป บนอะลูมินา) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	46
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง (ไม่โด๊ป บนอะลูมินา) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง (ไม่ได้อัด) บนอะลูมิเนียม ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	47
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง (ไม่ได้อัด) บนอะลูมิเนียม ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	47
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง (ไม่ได้อัด) บนอะลูมิเนียม ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	48
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% (บนกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส .....	49
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% (บนกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส .....	50
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% (บนกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส .....	50
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% (บนกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส .....	51
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% (บนกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส .....	51
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% (บนกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส .....	52
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% (บนกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส .....	52
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ 1.0% (บนกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส .....	53
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ 3.5% (บนกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส .....	54
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ 5.5% (บนกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส .....	55
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ 7.5% (บนกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส .....	55
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ 10% (บนกระจก) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส .....	56
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% ทดสอบก๊าซแอลพีจีความเข้มข้น 20% ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส .....	57
รูปที่ 4.30 ความไวในการวัดของเซ็นเซอร์แบบไม่ได้อัด สร้างขึ้นที่จำนวนครั้งในการจุ่มและชนิดฐานรองต่างกัน ทดสอบที่ 300 องศาเซลเซียส.....	58
รูปที่ 4.31 ความไวในการวัดของเซ็นเซอร์แบบไม่ได้อัด สร้างขึ้นที่จำนวนครั้งในการจุ่มและชนิดฐานรองต่างกัน ทดสอบที่ 400°C.....	59
รูปที่ 4.32 ความไวในการวัดของเซ็นเซอร์แบบกระจกจุ่ม 15 ครั้งที่ได้ด้วย $\text{NH}_4\text{F}$ ปริมาณต่างๆ ทดสอบที่ 300 องศาเซลเซียส .....	59
รูปที่ 4.33 ความไวในการวัดของเซ็นเซอร์แบบกระจกจุ่ม 15 ครั้งที่ได้ด้วย $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% ที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ.....	60
รูปที่ 4.34 ความต้านทาน” ของเซ็นเซอร์: ค่าเวลาตอบสนอง และค่าเวลาค้นกลับสู่สภาพเดิมของเซ็นเซอร์.....	61
รูปที่ 4.35 แผนภูมิแท่งแสดง $t_{on}$ และ $t_{off}$ บนกระจกไม่ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ และ ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส .....	62
รูปที่ 4.36 แผนภูมิแท่งแสดง $t_{on}$ และ $t_{off}$ บนกระจกไม่ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ และ ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ 4.5% ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส .....	62
รูปที่ 4.37 แผนภูมิแท่งแสดง $t_{on}$ และ $t_{off}$ บนกระจกและอะลูมิเนียมที่ไม่ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส .....	63
รูปที่ 4.38 แผนภูมิแท่งแสดง $t_{on}$ และ $t_{off}$ บนกระจกและอะลูมิเนียมที่ไม่ได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส .....	63
รูปที่ 4.39 แผนภูมิแท่งแสดง $t_{on}$ และ $t_{off}$ บนกระจกได้อัด $\text{NH}_4\text{F}$ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส .....	64
รูปที่ 4.40 ต้นแบบชุดการประยุกต์ใช้งานก๊าซเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้น (ก) วงจรภายใน (ข) หน้าจอแสดงโหมดที่สามารถทำงานได้: สามารถเปลี่ยนโหมดได้โดยการกดปุ่ม (ค) ตัวอย่างการค่าที่วัดได้ด้วยโหมดต่างๆ (ซ้าย) โหมด 1 (กลาง) โหมด 2 (ขวา) โหมด 3.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1 บทนำ

## 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบัน ก๊าซปิโตรเลียมเหลวหรือก๊าซหุงต้ม (liquefied petroleum gas; LPG) ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงตั้งแต่ในระดับครัวเรือน จนกระทั่งระดับอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยบรรจุเป็นของเหลวใส่ถังที่ทนความดันเพื่อให้ขนถ่ายง่าย นอกจากนี้ ยังนิยมใช้แทนน้ำมันเบนซินในรถยนต์ เช่น แท็กซี่ เนื่องจากราคาถูกกว่า และมีค่าออกเทนสูงถึง 105 RON (Research Octane Number) LPG เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีองค์ประกอบของก๊าซโพรเพน (Propane;  $C_3H_8$ ) เป็นส่วนใหญ่ (บางกรณีจะผสมบิวเทน ( $C_4H_{10}$ ) ซึ่งจะเป็นส่วนสัดส่วนจะเป็นเท่าใดนั้น ขึ้นกับผู้ผลิต) โดยตัว LPG เองไม่มีสี ไม่มีกลิ่นเช่นเดียวกับก๊าซธรรมชาติ แต่เนื่องจากเป็นก๊าซที่หนักกว่าอากาศจึงมีการสะสมและลุกไหม้ได้ง่าย ดังนั้น จึงมีข้อกำหนดให้เติมสารมีกลิ่น เพื่อเป็นการเตือนภัยหากเกิดการรั่วไหล อย่างไรก็ตาม ภายใต้สภาวะแวดล้อมบางกรณีที่ทำให้ไม่ได้กลิ่นจากก๊าซรั่ว หรือกรณีที่เกิดการรั่วไหลเพียงเล็กน้อย ก็อาจจะไม่สามารถทราบได้ว่าการรั่วเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดเป็นอันตรายได้ ดังนั้นการใช้อุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ LPG จึงเป็นสิ่งสำคัญ ในการป้องกันการอันตรายจากก๊าซรั่ว นอกจากนี้ ยังสามารถใช้อุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ LPG ในเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซ หรือในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องการควบคุมระดับของก๊าซในขบวนการต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพ ได้อีกด้วย

โลหะออกไซด์เป็นวัสดุที่รู้จักกันมานานกว่าศตวรรษ เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติหลากหลาย มีทั้งที่เป็น โลหะ สารกึ่งตัวนำ ฉนวน หรือแม้กระทั่งเป็นตัวนำยิ่งยวด และก็เป็นวัสดุที่รู้จักกันมานานว่าโลหะออกไซด์สามารถนำมาเป็นตัวตรวจจับก๊าซได้ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะอากาศที่ประกอบด้วยก๊าซต่างๆกัน ซึ่งคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปนี้จะเป็นตัวบอกระดับของก๊าซต่างๆที่อยู่รอบๆ โลหะออกไซด์หลายๆตัวที่สามารถนำมาประดิษฐ์เป็นก๊าซเซ็นเซอร์ได้ ก็อย่างเช่น  $Cr_2O_3$ ,  $Mn_2O_3$ ,  $Co_3O_4$ ,  $NiO$ ,  $CuO$ ,  $CdO$ ,  $MgO$ ,  $SrO$ ,  $BaO$ ,  $In_2O_3$ ,  $WO_3$ ,  $TiO_2$ ,  $V_2O_5$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $GeO_2$ ,  $Nb_2O_5$ ,  $MoO_3$ ,  $Ta_2O_5$ ,  $La_2O_3$ ,  $CeO_2$ ,  $Nd_2O_3$  อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบัน โลหะออกไซด์ที่ได้รับความนิยมในการนำมาประดิษฐ์เป็นก๊าซเซ็นเซอร์มีอยู่สองตัว ได้แก่  $ZnO$  และ  $SnO_2$  [1]

ข้อดีของ  $SnO_2$  คือ

- 1) มีราคาต้นทุนที่ต่ำ ไม่ว่าจะเป็นสารตั้งต้นหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์
- 2) ตัววัสดุไม่เป็นอันตรายและไม่เป็นพิษ
- 3) มีความเสถียรภาพต่อสารเคมีดีมาก และ
- 4) มีความเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี เนื่องจากปลูกที่อุณหภูมิสูง

นอกจากนี้แล้ว  $SnO_2$  ยังสามารถนำไปใช้ในงานอื่นๆได้อีก เช่น กระจกกรองความร้อน ขั้วโปรงแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง เป็นต้น ก๊าซเซ็นเซอร์  $SnO_2$  สามารถตรวจสอบก๊าซได้หลายชนิด เช่น carbon monoxide (CO), methane ( $CH_4$ ) [2] และสารออกแทนนิกส์ เช่น แอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) [3, 4]

ประสิทธิภาพการตรวจจับก๊าซของก๊าซเซ็นเซอร์  $SnO_2$  ไม่ว่าจะเป็น ความไว (sensitivity) ความสามารถในการแยกแยะชนิด (selectivity) และความสามารถในการตรวจซ้ำ (reproducibility) นั้น ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่นขนาดของผลึกและความหนาแน่นของพื้นผิวผลึก เป็นต้น โดยทั่วไป หลักการตรวจจับก๊าซของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์จะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ โมกุลของออกซิเจนในอากาศจะถูกดูดซับทางเคมีในรูปของ  $O_2^-$ ,  $O^-$  หรือ  $O_2^{2-}$  ที่ผิวของผลึก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอิเล็กตรอนที่ผิวผลึกของวัสดุที่ใช้เป็นตัวตรวจจับ ถ้านำวัสดุที่ใช้เป็นตัวตรวจจับไปวางในสภาวะที่มีก๊าซประเภทที่ติดกันหรือออกซิเจนออกไซด์เป็นเอกสารที่ส่งผ่านไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เอนดูมูทเตนาไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดชั่น ก็จะทำให้การนำไฟฟ้าของวัสดุเปลี่ยนไป ดังนั้นโครงสร้างระดับไมโครของ SnO<sub>2</sub> จึงสำคัญต่อประสิทธิภาพการตรวจจับของ เซ็นเซอร์ โครงสร้างระดับไมโครของ SnO<sub>2</sub> สามารถควบคุมได้จากขบวนการสังเคราะห์ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิการปลูกหรืออุณหภูมิการทิตเมนต์ หรือการโคป โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าสามารถปลูกผลึกขนาดเล็กมากๆของ SnO<sub>2</sub> ให้เป็นระดับนาโนเมตรได้ ก็สามารถเพิ่ม ประสิทธิภาพการตรวจจับของก๊าซเซ็นเซอร์ได้ และยังสามารถลดอุณหภูมิการทำงาน of เซ็นเซอร์ได้อีกด้วย [5-6]

ในขั้นตอนของการสร้างฟิล์ม SnO<sub>2</sub> นั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสารเคมีที่นำมาใช้แล้ว ยังขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้ในการสร้างด้วยเช่นกัน กระบวนการในการสร้าง SnO<sub>2</sub> นั้นก็มีหลายวิธี เช่น sputtering, evaporation, pulsed laser deposition, sol-gel, chemical bath deposition, electroplating ซึ่งแต่ละวิธีก็จะใช้สารได้แตกต่างกันและก็จะมียุทธวิธีที่แตกต่างกันไป ในบรรดาวิธีข้างต้น วิธี sputtering ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการปลูกฟิล์มบาง เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงดี อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ต้องใช้ต้นทุนที่สูง เนื่องจากต้องเป็นระบบสุญญากาศ ทำให้ต้นทุนการผลิตมีค่าสูง ทำให้นักวิจัยในปัจจุบันหันมาใช้วิธีทางเคมี เพื่อให้ได้ผลึกระดับนาโนเมตร โดยใช้ต้นทุนต่ำมากขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขสภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ดีบุกออกไซด์ด้วยวิธี dip coating เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีความสม่ำเสมอ มีประสิทธิภาพในการผลิตซ้ำสูง และมีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ที่สูง
- 2) เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องตรวจจับก๊าซ LPG จากเซ็นเซอร์ฟิล์มหนาดีบุกออกไซด์ที่สร้างขึ้น ที่สามารถใช้งานในภาคครัวเรือนหรือในอุตสาหกรรมได้จริง
- 3) เพื่อพัฒนาเครื่องมือที่มีอยู่และจัดหาใหม่ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมทั้งพัฒนาความรู้ความสามารถในการประดิษฐ์ก๊าซ เซ็นเซอร์ เครื่องมือการสังเคราะห์ฟิล์ม อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้กับนักศึกษาและบุคคลทั่วไป

## 1.3 ขอบเขตและขั้นตอนการทำวิจัย

เมื่อเปรียบเทียบวิธีต่างๆ ในการปลูกฟิล์ม SnO<sub>2</sub> วิธีการวิธี dip coating [6-7] เป็นวิธีเหมาะสมวิธีหนึ่งเนื่องจากมีข้อดี คือ 1) ค่าใช้จ่ายต่ำ เนื่องจากสามารถสร้างได้ในบรรยากาศห้อง ไม่ต้องใช้สุญญากาศ 2) ใช้วัสดุดิบ (สารเคมี) ได้เต็มประสิทธิภาพ ไม่สูญเสียเปล่า 3) สามารถปลูกบนพื้นที่กว้างได้ เหมาะกับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม และ 4) ฟิล์มที่ได้มีความสม่ำเสมอและครอบคลุมได้ แม้กระทั่งผิวที่ไม่เรียบของฐานรอง ดังนั้น ในโครงการวิจัยนี้จึงเลือกวิธีนี้

งานวิจัยนี้จะเป็นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆคือ 1) การออกแบบและสร้างระบบปลูกฟิล์ม และหาเงื่อนไขสภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ SnO<sub>2</sub> ด้วยวิธี dip coating เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีความสม่ำเสมอ มีประสิทธิภาพในการผลิตซ้ำสูง และมีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ที่สูง และ 2) เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องตรวจจับก๊าซ LPG จากเซ็นเซอร์ฟิล์มหนาดีบุกออกไซด์ที่สร้างขึ้น ที่สามารถใช้งานในภาคครัวเรือนหรือในอุตสาหกรรมได้จริง

- 1) เครื่องสังเคราะห์ต้นแบบที่จะสร้างขึ้นนั้น จะเป็นเครื่องปลูกอัตโนมัติสำหรับชิ้นงานขนาดไม่เกิน 10 cm x 10 cm โดยสามารถที่จะควบคุมอัตราการปลูก ความหนาและความสม่ำเสมอของฟิล์มได้ ระบบจะประกอบไปด้วย หัวฉีด มอเตอร์สำหรับควบคุมการขึ้นลงของชิ้นงาน Flow Meter สำหรับปรับอัตราการไหลของก๊าซ บีกเกอร์สำหรับใส่สารเคมี ระบบจ่ายกระแสสูง มิเตอร์กระแส เต้าทำความร้อนมากกว่า 400°C ชุดวัดและควบคุมอุณหภูมิ หลังจากสร้างเครื่องเสร็จ จะทำการทดสอบการทำงานโดยศึกษาผลการวิเคราะห์ฟิล์ม SnO<sub>2</sub> ที่สร้างขึ้น แล้วทำการปรับเปลี่ยนหรือแก้ไขโครงสร้างของระบบใหม่ เพื่อให้เครื่องทำงานมีประสิทธิภาพมากที่สุด จากนั้นจะเป็นการหาเงื่อนไขของสภาวะของระบบที่เหมาะสม ซึ่งถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก ระบบที่สร้างขึ้นจะใช้คลอไรด์ของดีบุก เช่น SnCl<sub>4</sub>·nH<sub>2</sub>O เป็นสารหลัก และใช้แอลกอฮอล์ (Alcohol) แอซิโตน (Acetone) หรือน้ำ เป็นสารทำละลาย โดยจะทำการศึกษาความเร็วในการหุบ อุณหภูมิในการอบ และอัตราส่วนสารเคมี ที่มีต่อการปลูกฟิล์มบาง SnO<sub>2</sub> เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทำการวิเคราะห์โครงสร้าง ทางไฟฟ้า และการตอบสนองต่อก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG)

- 2) หลังจากทำการตรวจสอบตอบสนองต่อก๊าซ LPG ก็จะนำไปประกอบลงในตัวถัง จากนั้นก็จะทำการออกแบบวงจรให้เหมาะกับตัวเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้น โดยให้แสดงผลเป็นตัวเลขแสดงความเข้มข้นเป็นระดับ 0-100%

#### 1.4 ผลงานที่คาดว่าจะได้รับเมื่อเสร็จสิ้นโครงการ

ผลงานจากการวิจัยนี้ นอกจากจะได้ต้นแบบเครื่องตรวจจับก๊าซ LPG จากเซ็นเซอร์ฟิล์มหนาดีบุกออกไซด์ ที่สามารถใช้งานในภาคครัวเรือนหรือในอุตสาหกรรมได้จริง โดยแสดงผลเป็นตัวเลขแสดงความเข้มข้นในระดับ 0-100% แล้ว คณะผู้วิจัยยังได้เรียนรู้เทคนิคในการออกแบบระบบสร้างฟิล์ม วิธีการและปัจจัยที่มีผลต่อการปลูกฟิล์ม  $\text{SnO}_2$  ด้วยวิธี dip coating รวมทั้งเรียนรู้วิธีการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์ม  $\text{SnO}_2$  เรียนรู้เทคนิคในการออกแบบก๊าซเซ็นเซอร์ที่ประกอบจากฟิล์ม  $\text{SnO}_2$  และเรียนรู้วิธีการสร้างและเข้าใจปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของก๊าซเซ็นเซอร์ ซึ่งสิ่งต่างเหล่านี้เป็นความรู้ความเข้าใจที่สามารถถ่ายทอดไม่ว่าจะเป็น การออกแบบ การทดลอง และการสร้าง ให้กับผู้ที่สนใจและต้องการที่จะพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ  $\text{SnO}_2$  เซ็นเซอร์ และในสาขาที่เกี่ยวข้องได้ ซึ่งถ้าผลงานวิจัยและพัฒนานี้ได้รับการเผยแพร่อย่างกว้างขวางแล้ว เชื่อว่าจะมีส่วนช่วยสร้างองค์ความรู้ทางด้านเซ็นเซอร์ขึ้นในประเทศให้มากขึ้นทั้งทางด้านคุณภาพและปริมาณ เมื่อเสร็จสิ้นโครงการแล้ว สามารถที่จะนำผลงานที่ได้ไปใช้เป็นเซ็นเซอร์ต้นแบบในการตรวจจับก๊าซแอมโมเนียได้ และที่สำคัญสามารถใช้เป็นต้นแบบในการต่อยอดในเชิงพาณิชย์ เพื่อลดการนำเข้าจากต่างประเทศ รวมทั้งเป็นการผลิตและพัฒนาบุคลากรผู้เชี่ยวชาญทางด้านนาโนเทคโนโลยี ป้อนสู่ภาครัฐและเอกชน เพื่อเสริมสร้างศักยภาพในการแข่งขันทางวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและเศรษฐกิจของประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

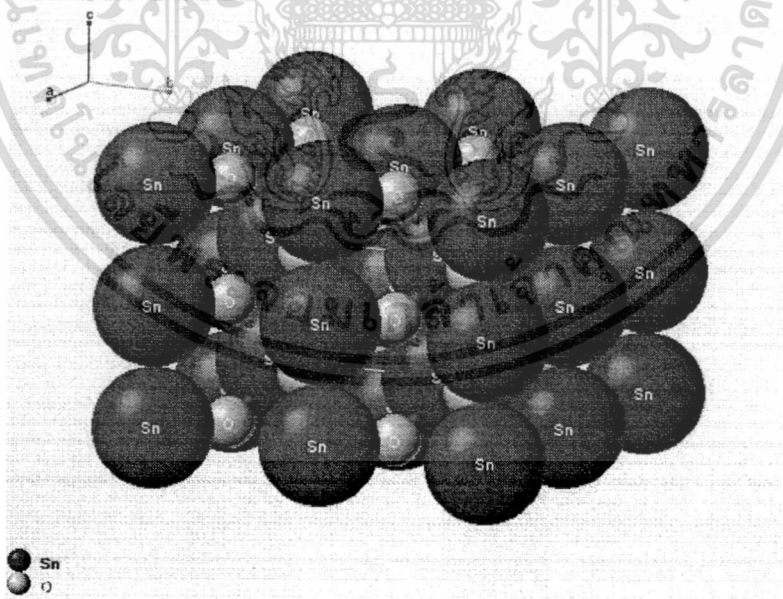
## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ )

ดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เป็นวัสดุหนึ่งในหลายวัสดุในประเภทโลหะออกไซด์ที่ถูกเลือกใช้เป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีราคาถูก ทนต่อสารเคมี มีความแข็งแรง และเมื่อทำการเจือสารเพื่อเพิ่มพหุจะสามารถนำไฟฟ้าได้ดี อีกทั้ง ยังคงสภาพการส่งผ่านแสงที่สูง จึงเหมาะต่อการนำไปใช้งานในด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้แล้ว ดีบุกออกไซด์ยังถูกนำมาใช้เป็นตัวอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซหรือก๊าซเซ็นเซอร์ (gas sensor) ที่ดี เนื่องจากตัววัสดุเองนั้นมีเสถียรภาพทางเคมีและโครงสร้างที่สูง ทำให้มีความคงทนในระยะยาวและไม่เกิดปฏิกิริยาต่อก๊าซที่ทำการตรวจวัด โดยก๊าซที่เข้ามาในระบบที่ทำการตรวจจับนั้นจะมีการแตกตัวและแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนที่พื้นผิวของดีบุกออกไซด์ ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าความนำไฟฟ้าของฟิล์มเปลี่ยนแปลงไป

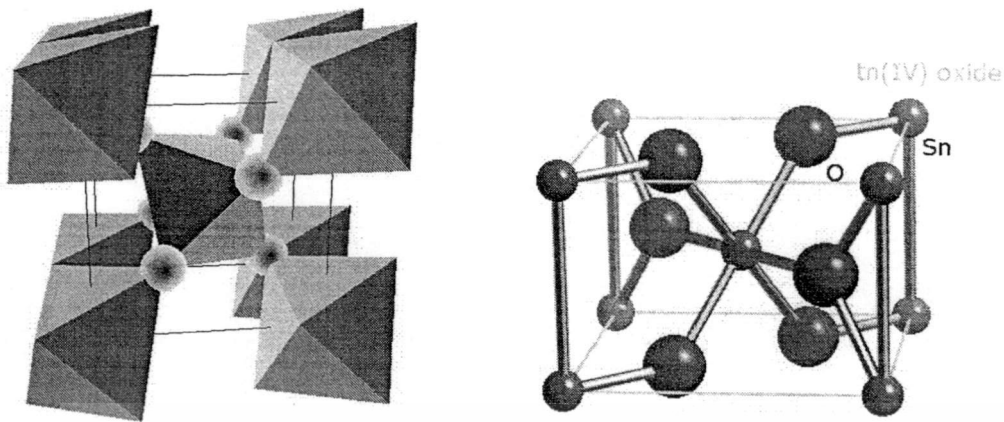
#### 2.1.1 โครงสร้างของดีบุกออกไซด์

ดีบุกออกไซด์ (รูปที่ 2.1) มีชื่อเรียกว่า คาสสิเทอไรท์ (Cassiterite) โครงสร้างผลึกของดีบุกออกไซด์อยู่ในกลุ่มโครงสร้างแบบรูไทล์ (rutile) เช่นเดียวกับโลหะออกไซด์อย่างอื่น เช่น  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{RuO}_2$ ,  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{VO}_2$ ,  $\text{IrO}_2$  และ  $\text{CrO}_2$  โครงสร้างรูไทล์นั้นมีหน่วยเซลล์ (unit cell) เป็นแบบเตตระโกนอล (tetragonal unit) (รูปที่ 2.2) ที่อยู่ใน space group แบบสมมาตรของ  $P42/mnm$  มีค่าคงที่ผลึก (lattice constants) คือ  $a = b = 4.7374 \text{ \AA}$  และ  $c = 3.1864 \text{ \AA}$  เมื่อมีการเรียงตัวกัน อะตอมของดีบุก (Sn) จะมีการเชื่อมต่อกันแบบ sixfold อะตอมของออกซิเจน (O) จะมีการเชื่อมต่อกันแบบ threefold



รูปที่ 2.1 โครงสร้างอะตอมของดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) [<http://webmineral.com/data/cassiterite.shtml>]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



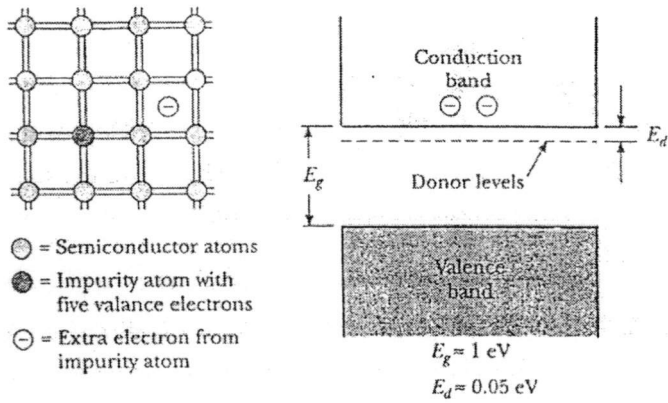
รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกแบบ tetragonal rutile ของผลึกดีบุกออกไซด์ [<http://www.ill.fr/dif/3D-crystals/salt.>]

### 2.1.2 สมบัติทางไฟฟ้าของดีบุกออกไซด์

การนำไฟฟ้าของดีบุกออกไซด์นั้นเกิดขึ้นได้จาก 2 กรณี คือ เกิดจากการเกิดตำแหน่งว่างของอะตอมออกซิเจนในโครงสร้าง (oxygen vacancy) ซึ่งจะส่งผลให้อะตอมของดีบุกมีอิเล็กตรอนเหลือจากการจับพันธะกับอะตอมออกซิเจน จึงทำให้มีอิเล็กตรอนเหลือเกิดเป็นพาหะนำไฟฟ้าได้ (กล่าวคือ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n โดยที่ไม่จำเป็นต้องทำการโด๊ป) อีกกรณีหนึ่งคือการเติมสารเจือ (impurity element) เพื่อเพิ่มพาหะนำไฟฟ้า โดยทั่วไปวัสดุดีบุกออกไซด์จะมีการเจือด้วยอะตอมธาตุหลักอยู่ 2 ธาตุคือฟลูออรีน(F) และ แอนติโมนี (Sb) โดยที่อะตอมของฟลูออรีน ( $F^-: 0.136 \text{ nm}$ ) ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับอะตอมออกซิเจน ( $O^{2-}: 0.140 \text{ nm}$ ) จะเข้าไปแทนที่อะตอมของออกซิเจน เมื่ออะตอมดีบุกจับพันธะกับอะตอมของฟลูออรีนแทนออกซิเจนแล้วจะเหลืออิเล็กตรอนอยู่ 1 ตัวซึ่งจะเป็นพาหะหลักในการนำไฟฟ้าแทน ในขณะที่อะตอมของแอนติโมนี ( $Sb^{5+}: 0.062 \text{ nm}$ ) ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับอะตอมของดีบุก ( $Sn^{4+}: 0.071 \text{ nm}$ ) จะเข้าแทนที่อะตอมของดีบุก เมื่อจับพันธะกับอะตอมของออกซิเจนแทนดีบุกแล้วจะเหลืออิเล็กตรอนอยู่ 1 ตัว ซึ่งจะเป็นพาหะหลักในการนำไฟฟ้าต่อไป

เมื่ออธิบายในรูปแบบของแถบพลังงานซึ่งดีบุกออกไซด์มีช่องว่างพลังงาน (energy gap) ประมาณ 3.6 eV จากการนำไฟฟ้าได้ของทั้งสองกรณีนั้นไม่ว่าจะเป็นการนำไฟฟ้าด้วยการเกิดตำแหน่งว่างของอะตอมหรือการเติมสารเจือ ก็จะมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะหลักในการนำไฟฟ้า ดังนั้นวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสจึงมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีผลเหมือนเป็นการเติมสารเจือในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำให้ระดับชั้นต่ำสุดของแถบนำลดลงมาเป็นระยะ  $E_d$  จะเรียกระดับนี้ว่าระดับผู้ให้ (donor level) แสดงในรูปที่ 2.3 โดยอิเล็กตรอนที่เป็นพาหะหลักที่ใส่เข้าไปให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นของการนำไฟฟ้าทั้งสองกรณีเรียกว่าธาตุผู้ให้ (donor) ในกรณีนี้ค่าการนำไฟฟ้ามาจากประจุลบเคลื่อนที่จึงเรียกวัดคุณสมบัติว่า “สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น” (N-type semiconductor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



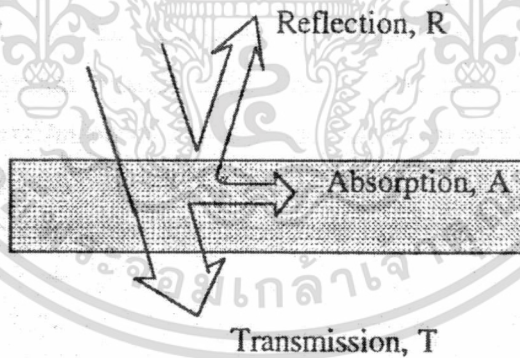
รูปที่ 2.3 แถบพลังงานสารกึ่งตัวชนิดเอ็น

### 2.1.3 สมบัติทางแสงของดีบุกออกไซด์

วัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส มีคุณสมบัติทางแสงที่จำเป็นต้องศึกษาอย่าง การดูดกลืน (Absorption), การส่งผ่าน (Transmission), การสะท้อน (Reflection) โดยคุณสมบัติทางแสงที่กล่าวมานั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักอยู่ 2 อย่างคือ 1) ช่องว่างพลังงาน (energy gap,  $E_g$ ) และ 2) การเจือสารในวัสดุ (impurity doping)

ผลของแสงที่มีต่อสารกึ่งตัวนำ

ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางแสงในวัสดุและแสงตกลงบนวัสดุแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลำแสงตกลงบนวัสดุสารกึ่งตัวนำ [9]

ในทางควอนตัมแมคานิกส์ ระบบของโมเลกุลหรืออะตอมจะประกอบไปด้วยชั้นพลังงานต่างๆตามโครงสร้างของโมเลกุลและอะตอมนั้นๆ ขอยกตัวอย่างกรณีชั้นพลังงานของอะตอม เช่น  $E_1$  และ  $E_2$  ในรูปที่ 2.5 อิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจาก  $E_1$  ขึ้นไปสู่  $E_2$  ก็ต้องมีการดูดกลืนพลังงาน และถ้าอิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจาก  $E_2$  ลงไปสู่  $E_1$  ก็ต้องมีการคายพลังงาน พลังงานที่อิเล็กตรอนต้องดูดกลืนหรือคายออกนี้จะมีขนาดตามผลต่างระหว่าง  $E_1$  และ  $E_2$  หากพลังงานที่ต้องดูดกลืนหรือคายออกนี้เป็นพลังงานแสง ก็จะเกิดการดูดกลืนแสง (Light Absorption) หรือการเปล่งแสง (Light Emission) ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) และ (ข) พลังงานแสงหรือโฟตอน (photon)

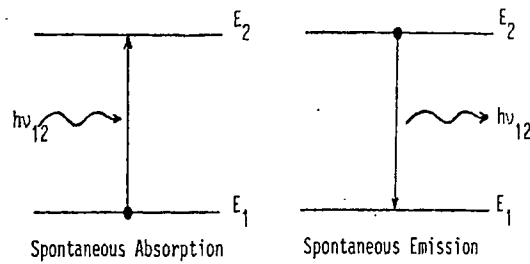
จึงมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h\nu_{12} = E_2 - E_1$$

(2.3)



รูปที่ 2.5 การดูดกลืนแสง (Absorption) และการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission) ระหว่างชั้นพลังงาน  $E_1$  และ  $E_2$

ช่องว่างพลังงานแสงของสารกึ่งตัวนำจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญของการดูดกลืนและการส่งผ่านแสง เนื่องจากช่องว่างพลังงานแสงในสารกึ่งตัวนำก็คือผลต่างของพลังงานแถบนำและแถบวาเลนซ์ การเปลี่ยนแปลงจากการสารกึ่งตัวนำโปร่งใสไปเป็นสารกึ่งตัวนำโปร่งแสงนั้นก็เกิดจากการดูดกลืนของพลังงานโฟตอนที่ทำให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำและได้ทิ้งโฮล (hole) ไว้ยังแถบวาเลนซ์ ในการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง (direct band gap semiconductor) จะมีการเปลี่ยนแปลงของสถานะพลังงานอยู่สองสถานะคือสถานะพลังงานเริ่มต้น (initial state :  $E_1$ ) และสถานะพลังงานสิ้นสุด (final state :  $E_2$ ) ซึ่งความผลต่างของสองสถานะพลังงานนี้ก็คือพลังงาน โฟตอนที่สมการเหมือนกับสมการที่ 2.3

$$E_f - E_i = hf, E_p = E_f - E_i$$

$$E_p = h\nu$$

(2.4)

โดยที่  $h$  = ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant),  $\nu = 1/\lambda$

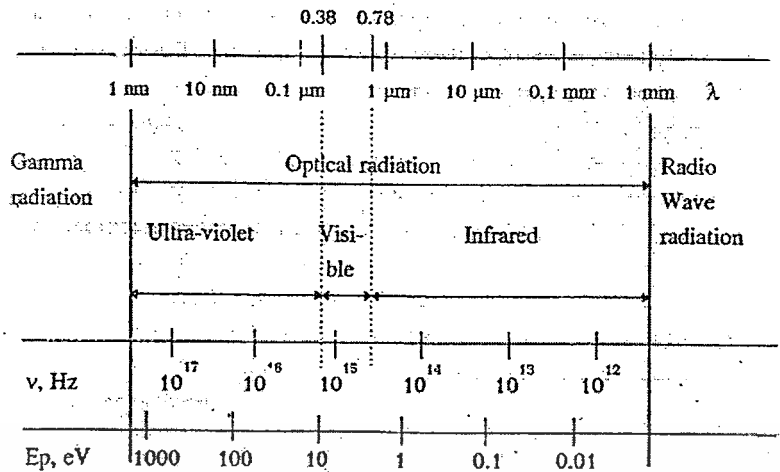
พลังงานโฟตอน ( $E_p$ ) ที่ความยาวคลื่นต่างๆแสดงในรูปที่ 2.6 และความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับช่องว่างพลังงานนั้นแสดงได้ในสมการที่ 2.5

$$\lambda(\mu m) = \frac{1.23}{E_g(eV)}$$

(2.5)

พลังงานโฟตอนที่มากกว่าช่องว่างพลังงานอิเล็กตรอนจะเกิดการดูดกลืนพลังงานและถูกกระตุ้นจากสถานะพลังงานเริ่มต้นที่แถบวาเลนซ์ไปยังสถานะพลังงานสิ้นสุดที่แถบนำ ในขณะที่พลังงานโฟตอนที่น้อยกว่าช่องว่างพลังงานนั้นอิเล็กตรอนจะไม่สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนได้ แสงจึงสามารถผ่านวัสดุสารกึ่งตัวนำไป ดังนั้นที่ความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวความยาวคลื่นขีดเริ่ม (threshold wavelength,  $\lambda$ ) พลังงานโฟตอนก็จะมียมากกว่าช่องว่างพลังงานและถูกดูดกลืน อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นไปยังแถบนำและทิ้งโฮลไว้ยังแถบวาเลนซ์ ส่วนความถี่ที่ความยาวคลื่นมากกว่าความยาวคลื่นขีดเริ่ม ก็จะทะลุผ่านสารกึ่งตัวนำไปได้ ซึ่งเงื่อนไขเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญของการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

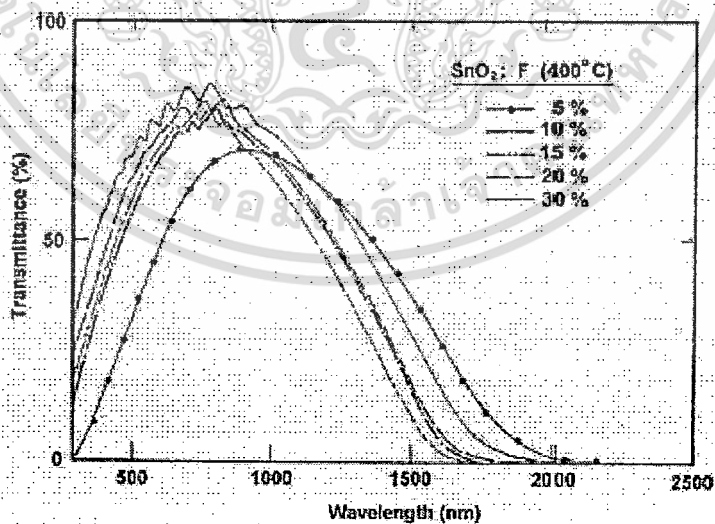
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์พลังงานโฟตอนและความยาวคลื่น

สำหรับช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีค่าน้อยกว่า 1.6 eV นั้นจะมีความยาวคลื่นขีดเริ่มที่ 0.76  $\mu\text{m}$  สารกึ่งตัวนำจะมีสถานะเป็นสารกึ่งตัวนำทึบแสง เพราะที่พลังงานน้อยกว่า 1.6 eV ความยาวคลื่นที่สั้นกว่า 0.76  $\mu\text{m}$ . จะถูกดูดกลืนไว้หมด (รวมถึงแสงช่วงที่ตามองเห็น) สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานมากกว่า 3 eV จะมีความยาวคลื่นขีดเริ่มที่ 0.4  $\mu\text{m}$ . ความยาวคลื่นที่สั้นกว่า 0.4  $\mu\text{m}$ . เท่านั้นที่ถูกดูดกลืน ดังนั้นแสงในช่วงที่ตามองเห็นจะไม่ถูกดูดกลืนไปด้วย สารกึ่งตัวนำจึงแสดงสถานะเป็นสารกึ่งตัวนำโปร่งใสนั่นเอง

สารกึ่งตัวนำโปร่งใสโดยทั่วไปจะมีรูปแบบการส่งผ่านแสงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะมีการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นในช่วงรังสีเหนือม่วง (ultra-violet) และรังสีใต้แดง (infrared) ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจากความยาวคลื่นในช่วงอินฟราเรดจะถูกดูดกลืนไว้ในตัววัสดุ ทำให้ความร้อนที่เกิดจากความยาวคลื่นในช่วงนี้ไม่สามารถผ่านไปได้ จึงมีการนำเอาปรากฏการณ์นี้ไปใช้ประโยชน์ในกระจกป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารได้



รูปที่ 2.7 การส่งผ่านแสงของวัสดุดีบุกออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการจุ่ม [10]

กระบวนการจุ่มเคลือบนั้นมี 2 แบบคือ

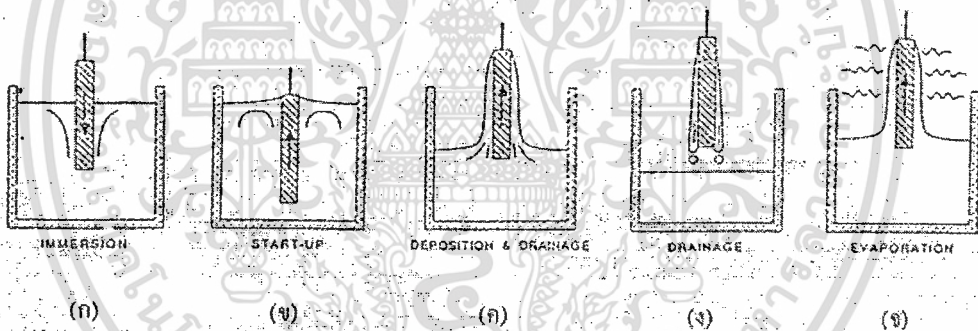
- การจุ่มเคลือบแบบกะ (Batch dip coating)
- การจุ่มเคลือบแบบต่อเนื่อง (Continuous dip coating)

### 2.2.1 การจุ่มเคลือบแบบกะ (Batch dip coating)

ในการจุ่มเคลือบแบบกะนั้นสามารถแบ่งขั้นตอนในขณะที่เคลือบได้ 5 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ก) ถึง (จ) ดังนี้

- (ก) ขั้นตอนการจุ่มชิ้นงาน (Immersion)
- (ข) ขั้นตอนการเริ่มต้นดึงชิ้นงานขึ้น (Start up)
- (ค) ขั้นตอนที่สารละลายเกาะที่ผิวชิ้นงานและเริ่มไหลย้อนกลับ (Deposition & Drainage)
- (ง) ขั้นตอนที่สารละลายไหลแยกออกจากชิ้นงาน (Drainage)
- (จ) ขั้นตอนที่สารละลายระเหย (Evaporation)

สำหรับตัวทำละลายที่ระเหยง่าย เช่น แอลกอฮอล์ ขั้นตอนระเหยมักจะเกิดขึ้นพร้อมกับขั้นที่ (ข), (ค) และ (ง)



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการจุ่มเคลือบแบบกะ [10]

### 2.2.2 การจุ่มเคลือบแบบต่อเนื่อง (Continuous dip coating)

การจุ่มเคลือบแบบต่อเนื่องแตกต่างกับการจุ่มเคลือบแบบกะตรงที่จะไม่มีการแยกขั้นตอนที่ (ข) และ (จ) ของการจุ่มเคลือบแบบกะออกจากกัน แต่จะแยกขั้นตอนการจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายออกจากขั้นตอนอื่น โดยชิ้นงานจะถูกดึงผ่านสารละลาย และทำให้เกิดชั้นขอบเขตของของเหลว ที่บริเวณระหว่างฟิล์มของสารละลายที่เกาะชิ้นงานกับผิวหน้าของสารละลายในอ่างเคลือบ (บริเวณที่ 3 ในรูป 2.9 (ก)) ซึ่งชั้นขอบเขตนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ชั้นขอบเขตด้านในและชั้นขอบเขตด้านนอก ชั้นขอบเขตด้านในจะเกาะติดอยู่กับชิ้นงานและเคลื่อนที่ขึ้นไปพร้อมชิ้นงาน ส่วนขอบเขตชั้นนอกจะเคลื่อนที่กลับลงมา ความหนาของฟิล์มที่เคลือบอยู่บนชิ้นงานนั้นจะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของจุดที่แบ่งระหว่างชั้นขอบเขตด้านนอกและชั้นขอบเขตด้านใน โดยที่บริเวณเหล่านี้จะมีแรงกระทำเกิดขึ้นอยู่ 6 แรงคือ

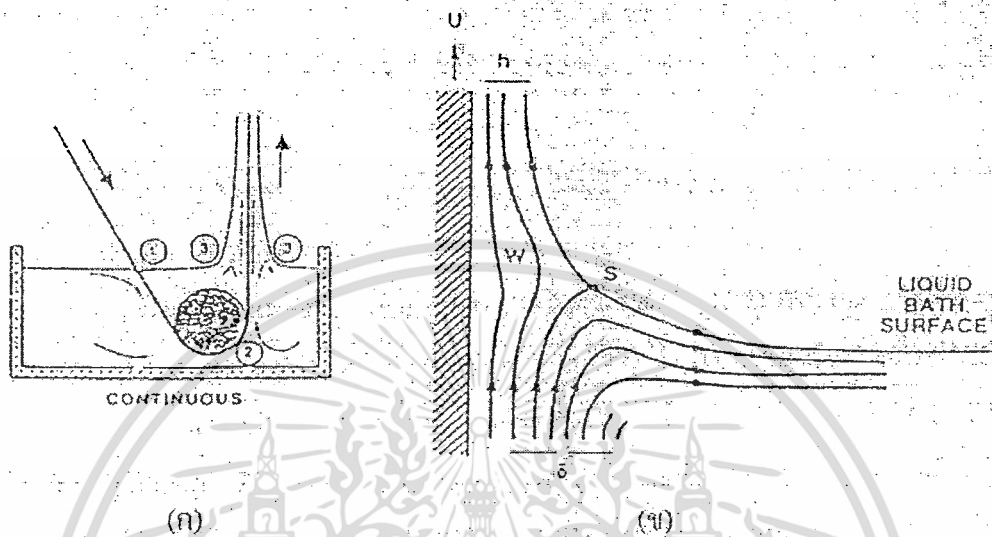
1. แรงดึงที่เกิดจากความหนืดที่ดึงของเหลวขึ้น เมื่อชิ้นงานเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน

เอกสรนี้แรงโน้มถ่วงที่สวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2. แรงโน้มถ่วง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แรงลัพธ์ที่เกิดจากผลรวมของแรงตึงผิวในบริเวณที่เป็นรอยต่อของฟิล์มที่เกาะกับชิ้นงานกับสารละลายในอ่างเคลือบซึ่งมีผิวหน้าเว้าเข้า (Concavely curve meniscus)
4. แรงเฉื่อยของชั้นขอบเขตของของเหลวในบริเวณที่ของเหลวเกาะกับชิ้นงาน
5. แรงที่เกิดจากผลต่างของแรงตึงผิว
6. แรงที่เกิดจากความดันที่ไม่สม่ำเสมอ (สำหรับฟิล์มที่มีความหนาดำกว่า 1  $\mu\text{m}$ )



รูปที่ 2.9 (ก) การจุ่มเคลือบแบบต่อเนื่อง และ (ข) ชั้นขอบเขตของของเหลวที่บริเวณที่ 3 ในรูป (ก) [10]

เมื่อความหนืดของของเหลว ( $\eta$ ) และความเร็วของชิ้นงาน ( $U$ ) มีค่ามากพอ จะทำให้ความเว้าของ Concavely curve meniscus ลดลง และสามารถหาความหนาของฟิล์ม ( $h$ ) ได้จากการทำสมดุลของแรงดึงจากความหนืดและแรงโน้มถ่วงดังนี้

$$h = C_1 (\eta U / \rho g)^{1/2} \quad (2.6)$$

สำหรับ Newtonian liquid ค่า  $C_1 \approx 0.8$  และเมื่อความหนืดของของเหลวและความเร็วของชิ้นงานไม่มากพอ (ในกรณีของกระบวนการ Sol-gel) จะต้องปรับปรุงสมดุลแรง ด้วยอัตราส่วนของแรงดึงจากความหนืดต่อแรงตึงผิวของของเหลว ( $\gamma_{LV}$ ) ดังนี้

$$h = 0.94 (\eta U / \gamma_{LV})^{1/6} (\eta U / \rho g)^{1/2} \quad (2.7)$$

เมื่อจัดรูปจะได้

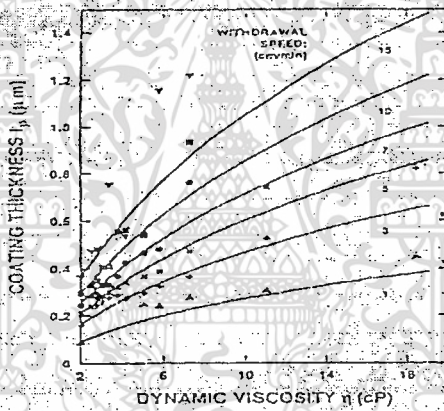
$$h = 0.94 \frac{(\eta U)^{2/3}}{\gamma_{LV}^{1/6} (\rho g)^{1/2}} \quad (2.8)$$

จากความสัมพันธ์ทั้ง 3 สมการที่ผ่านมาได้มีผู้ทำการทดลองเพื่อตรวจสอบว่าความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีความถูกต้องหรือไม่ดังนี้

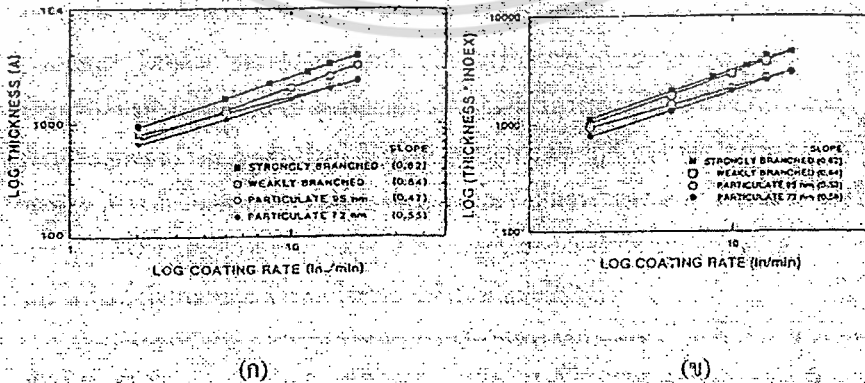
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Strawbridge and James หาคความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของผิวเคลือบและความหนืดของสารละลาย Acid catalyzed silicate ( $r = 1.74$ ) โดยทำการเคลือบบนผิวแก้ว ด้วยความเร็ว (U) ในช่วง 1-15 cm/min ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งได้เปรียบเทียบกับค่าจากการทำนาย (จากการคำนวณด้วยสมการที่ (2.6) กับผลจากการทดลอง พบว่าเมื่อความเร็วในการดึงชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นความหนาของฟิล์มจากผลการทดลองและจากการคำนวณจะมีความแตกต่างกันมากขึ้น
- Brinker และ Ashley ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มและความเร็วในการดึงชิ้นงาน โดยปรับเปลี่ยนสารตั้งต้นของสารละลายซิลิเกตจากที่มีโครงสร้างเป็นโพลิเมอร์แบบโซ่กิ่งหลวมๆ ไปจนกระทั่งเป็นอนุภาคที่มีความหนาแน่นสูงๆ ได้ผลดังที่แสดงในรูปที่ 2.11 (ก) ซึ่งจะเห็นว่าในระบบที่มีสารตั้งต้นเป็นโพลิเมอร์ ความหนาของฟิล์มจะแปรผันตาม  $U^{2/3}$  ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (2.7) และ (2.8) และเมื่อพลอตกราฟระหว่าง  $\log(h \times \text{refractive index})$  กับ  $\log U$  (ดังรูปที่ 2.11 (ข)) จะเห็นว่ามีความสอดคล้องกับสมการที่ (2.7) และ (2.8) มากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปริมาณของฟิล์มต่อพื้นที่ผิว (mass of film/unit area) จะขึ้นอยู่กับ  $U^{2/3}$

สำหรับระบบที่สารละลายประกอบด้วยอนุภาคเดี่ยวซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่านั้น ความสัมพันธ์จะไม่เป็นไปตามสมการที่ (2.7) และ (2.8) เนื่องจากเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น อนุภาคเดี่ยวจะถูกขับออกจากฟิล์มมากขึ้น จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลจากการทดลองคลาดเคลื่อนไปจากการทำนายโดยคำนวณ



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของฟิล์มและความหนืดของสารละลายที่ความเร็วในการดึงชิ้นงานต่างๆกันที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง (From Strawbridge and James)



รูปที่ 2.11 ผลจากการทดลองของ Brinker และ Ashley ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก)  $\log h$  และ  $\log U$  (ข)  $\log (h \times \text{refractive index})$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ  $\log U$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเบี่ยงเบนของความหนาของฟิล์มไปจากการทำนายนั้น อาจจะมีผลจากปัจจัยอื่นๆ เช่น ค่า pH, ความหนืด โดยสมการที่ (2.6) ถึง (2.8) นั้นจะสมมติให้ของเหลวเป็น Newtonian fluid ซึ่งมีความหนืดคงที่ และถือว่าไม่มีผลของการระเหยต่อความหนาฟิล์ม แต่อย่างไรก็ดี การระเหยจะมีผลทำให้ความเข้มข้นสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการฟอรัมตัวเป็น โครงสร้างตาข่าย และพฤติกรรมที่ไม่เป็น Newtonian fluid ของสารละลาย

ในกระบวนการเคลือบด้วย sol-gel นั้น การระเหยมักจะขึ้นอยู่กับ การแข็งตัวของฟิล์มที่เคลือบ โดยปัจจัยที่สำคัญที่สุดของอัตราการระเหยนั้น คืออัตราการแพร่ของไอที่แพร่ออกจากผิวหน้าของฟิล์ม ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ การเคลื่อนที่ของ gas ที่ชั้นขอบเขตบางๆ ที่อยู่ติดกับผิวหน้าของฟิล์ม เนื่องจากการพามวลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของ gas เพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้การแพร่เพิ่มขึ้นได้อย่างมาก

## 2.3 ความรู้เกี่ยวกับก๊าซแอลพีจี

### 2.3.1 คุณสมบัติและความแตกต่างระหว่างLPG/NGV

ก๊าซธรรมชาติ (NG, NGV : Natural Gas for Vehicles) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน (Methane) เป็นส่วนใหญ่ จึงเป็นก๊าซที่มีน้ำหนักเบากว่าอากาศ การขนส่งไปยังผู้ใช้จะขนส่งผ่านทางท่อในรูปก๊าซภายใต้ ความดันสูง จึงไม่เหมาะสำหรับการขนส่งไกลๆ หรืออาจบรรจุใส่ถังในรูปก๊าซธรรมชาติอัดโดยใช้ความดันสูง หรือที่เรียกว่า CNG แต่ปัจจุบันมีการส่งก๊าซธรรมชาติในรูปของเหลวโดยทำก๊าซให้เย็นลงถึง  $-160$  องศาเซลเซียส จะได้ของเหลวที่เรียกว่า Liquefied Natural Gas หรือ LNG ซึ่งสามารถขนส่งทางเรือไปที่ไกลๆ ได้ และเมื่อถึงปลายทางก่อนนำมาใช้ก็จะทำให้ของเหลวเปลี่ยนสถานะกลับเป็นก๊าซอย่างเดิม ก๊าซธรรมชาติมีค่า ออกเทนสูงถึง 120RON จึงสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในยานยนต์ได้

ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG: Liquefied Petroleum Gas) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีองค์ประกอบของก๊าซโพรเพน (Propane;  $C_3H_8$ ) และบิวเทน ( $C_4H_{10}$ ) เป็นส่วนใหญ่ แต่อาจเป็นก๊าซโพรเพน 100% หรือ ก๊าซบิวเทน 100% หรือส่วนผสมของก๊าซทั้งสองชนิดรวมกันในอัตราที่พอเหมาะกับการใช้งานก็ได้ จึงเป็นก๊าซที่หนักกว่าอากาศ โดยตัว LPG เองไม่มีสี ไม่มีกลิ่นเช่นเดียวกับก๊าซธรรมชาติ แต่เนื่องจากเป็นก๊าซที่หนักกว่าอากาศจึงมีการผสมและถูกใหม่ได้ง่าย ดังนั้น จึงมีข้อกำหนดให้เติมสารมีกลิ่น (เช่น Ethyl Mercaptan หรือ Thiophane) เพื่อเป็นการเตือนภัยหากเกิดการรั่วไหล LPG ส่วนใหญ่จะใช้เป็นเชื้อเพลิง ในครัวเรือนและกิจการอุตสาหกรรม โดยบรรจุเป็นของเหลวใส่ถังที่ทนความดันเพื่อให้ขนถ่ายง่าย นอกจากนี้ยังนิยมใช้แทนน้ำมันเบนซินในรถยนต์ เนื่องจากราคาถูกกว่าและมีค่าออกเทนสูงถึง 105RON (Research Octane Number = เป็นค่าออกเทนที่มีประสิทธิภาพต่อต้านการน็อกในเครื่องยนต์หลายสูบที่ทำงานอยู่ในรอบของช่วงหมุนต่ำ โดยใช้เครื่องยนต์ทดสอบมาตรฐานภายใต้สภาวะมาตรฐาน 600 รอบ ต่อนาที) 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
ช่วงติดไฟในอากาศ (ร้อยละโดยปริมาตร)	ค่าสูง	15	15
	ค่าต่ำ	5	1.5
ค่าออกเทน 1/	RON2/	120	105
	MON3/	120	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 ประโยชน์ของก๊าซ

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

- นำไปผ่านกระบวนการแยกในโรงแยกก๊าซ เพราะในตัวเนื้อก๊าซธรรมชาติ มีสารประกอบที่เป็นประโยชน์อยู่มากมาย เมื่อนำมาผ่านกระบวนการแยกที่โรงแยกก๊าซแล้ว ก็จะได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ มาใช้ประโยชน์ได้ดังนี้ ก๊าซมีเทน (C1) : ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ในโรงงานอุตสาหกรรม และนำไปอัดใส่ถังด้วยความดันสูง เรียกว่าก๊าซธรรมชาติอัด สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์รู้จักกันในชื่อว่า "ก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์" (Natural Gas for Vehicles : NGV) เช่นเดียวกัน และหากนำเอาก๊าซโพรเพนกับก๊าซบิวเทนมาผสมกัน อัดใส่ถังเป็นก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas - LPG) หรือที่เรียกว่าก๊าซหุงต้ม สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ และใช้ในการเชื่อมโลหะได้ รวมทั้งยังนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทได้อีกด้วย

### 2.3.3 ข้อระวังในการใช้ก๊าซ

โดยทั่วไปก๊าซธรรมชาติจะไม่เป็นพิษต่อร่างกาย แต่ในกรณีที่ก๊าซธรรมชาติมีก๊าซโซโครเจนไฮไดรด์ (ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์) เจือปนอยู่มาก อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ที่สัมผัสหรือสูดหายใจเอาก๊าซนั้นได้ เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำลายเนื้อเยื่ออ่อน เช่น เยื่อตา เยื่อเยื่อระบบทางเดินหายใจและปอด หากเกิดไฟไหม้ / ระเบิด (fire / explosion) ก๊าซธรรมชาติเป็นก๊าซติดไฟ กรณีที่มีก๊าซรั่วไหลผสมกับอากาศ อาจจะทำให้เกิดการลุกไหม้ได้ ถ้าอัตราส่วนผสมของก๊าซและอากาศพอเหมาะจะติดไฟ และมีแหล่งความร้อนหรือเปลวไฟหรือประกายไฟในบริเวณนั้น นอกจากนี้ อาจก่อให้เกิดการระเบิดได้ ถ้าเกิดการสะสมของก๊าซธรรมชาติในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง โดยเฉพาะที่อับต่างๆ เช่น ภายในอาคารสถานที่ที่ไม่มีการระบายอากาศที่ดีพอ

## 2.4 ก๊าซเซ็นเซอร์ [11]

### 2.4.1 นิยามของเซ็นเซอร์

เซ็นเซอร์จะเป็นส่วนสำคัญสำหรับระบบการควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถแสดงผลออกมาแทนการตอบสนองของประสาทสัมผัสของมนุษย์ ที่นอกจากเราจะสามารถได้ยินสัมผัส ดมกลิ่น การลิ้มรสและการมองเห็น เราอาจจะได้รับอันตรายจากการสัมผัสหรือได้รับสิ่งเหล่านั้นโดยตรงในปริมาณที่มากเกินไปจนจิตใจที่ร่างกายจะได้รับ เซ็นเซอร์จะสามารถแสดงเป็นทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ค่าที่เท่ากับการตอบสนองของร่างกาย อย่างไรก็ตามอาจกล่าวได้ว่าการพัฒนาเซ็นเซอร์มีการพัฒนาเป็นอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้สัญญาณเป็นดิจิทัลอย่างมาก โดยเฉพาะการทำตัวตรวจจับ ที่สามารถตอบสนองต่อสารเคมี และในกรณีที่มีการทำกล้อง CCD ที่สามารถแยกประสาทในการมองได้สูงมากหรือน้อยแม้แต่การทำไมโครโฟนที่มีความไวในการตอบสนองเสียงได้ดี ซึ่งสิ่งเหล่านี้ยังเป็นขั้นเริ่มต้น

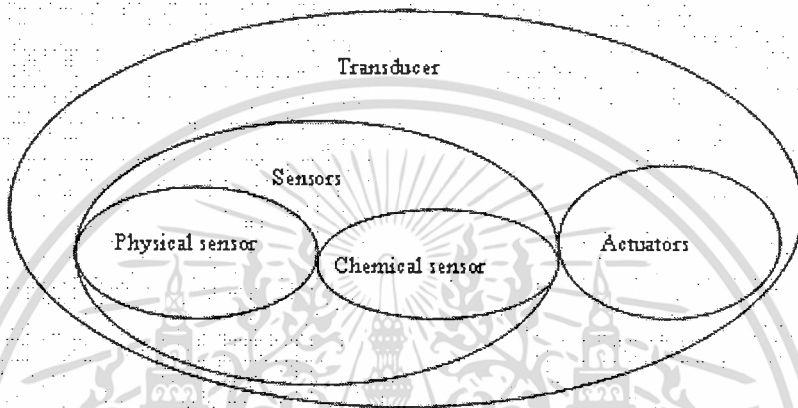
สัญญาณดิจิทัลในทางอิเล็กทรอนิกส์ของตัวตรวจจับทางเคมีซึ่งจะสามารถรู้รสและได้กลิ่นของสิ่งไม่มีชีวิต ถึงแม้แต่ในระบบชีววิทยายังมีระบบภูมิคุ้มกัน และการวัดปริมาณกลูโคส การวัดความเข้มข้นสารเคมีและการควบคุมปริมาณที่ต้องใช้ความถูกต้องสูงเพื่อที่จะแทนที่หรือเป็นตัววัดระบบทางชีววิทยาเหล่านี้จนในที่สุดจะได้ตรวจจับที่มีการตอบสนองและการแยกแยะที่ดี วัสดุตรวจจับทางเคมีในเชิงพาณิชย์จะต้องสามารถปรับค่าเริ่มต้นแต่ยังไม่สามารถแยกแยะและมีความไวในการตอบสนองได้ดีพอ อย่างไรก็ตามถ้ามีสารชีววิทยาที่สามารถเป็นตัวตรวจจับทางเคมีและทางชีววิทยาที่สามารถแยกแยะสารและการตอบสนองที่ดีที่เหมือนระบบชีววิทยานั้นได้รับการยอมรับในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการวิจัยทางนี้อย่างกว้างขวางและจนกระทั่งในปัจจุบัน ได้มีเซ็นเซอร์ออกสู่ตลาดหลายชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเซ็นเซอร์ที่ได้รับการแพร่หลายมากที่สุดคือ กลูโคส เซ็นเซอร์ ในปัจจุบันเซ็นเซอร์ชนิดสามารถสร้างได้ง่าย มีราคาถูก จนสามารถใช้แล้วทิ้งได้ เพื่อให้การตอบสนองที่ดีและมีความถูกต้อง และยังมีการแสดงผลเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อง่ายต่อการใช้

ความหมายของคำว่า ทรานสดิวเซอร์ (Transducers) มีรากศัพท์มาจาก ภาษาลาติน จากคำว่า “transduco-traduco” ซึ่งหมายถึง “การเปลี่ยนสภาพ-การแปลงสภาพ” ดังนั้น อุปกรณ์จะต้องเป็นการเปลี่ยนแปลงหรือการแปลงสภาพ พลังงานจากระบบหนึ่ง ไปเป็นระบบอื่น โดยที่รูปแบบอาจจะเปลี่ยนไปก็ได้ ซึ่งจะเป็นความหมายของทรานสดิวเซอร์ การวัดค่าต่างๆ ในสิ่งแวดล้อมทรานสดิวเซอร์จะเป็นอุปกรณ์ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงสัญญาณจากพลังงานรูปหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูป โดยพลังงานมีอยู่หลายรูป เช่น ทางไฟฟ้า, ทางกลศาสตร์, ทางแสง, ทางความร้อน, ทางแม่เหล็ก และทางการแผ่รังสี



รูปที่ 2.12 แสดงการจัดกลุ่มของทรานสดิวเซอร์ (Transducers)

เซ็นเซอร์ (Sensor) เป็นทรานสดิวเซอร์ที่แปลงสัญญาณในรูปแบบต่างๆ เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ส่วนแอกชูเอเตอร์ (Actuators) จะเป็นทรานสดิวเซอร์ที่แปลงจากสัญญาณทางไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณในรูปแบบอื่น โดยทั่วไปจะเป็นสัญญาณในรูปแบบกลศาสตร์ ตัวอย่างของเซ็นเซอร์ เช่น เซ็นเซอร์วัดความดัน pH เซ็นเซอร์ และ โฟโตรีซิสเตอร์ ตัวอย่างแอกชูเอเตอร์ (Actuators) เช่น โซลินอยด์ อุปกรณ์เพียร์โซอิเล็กทริก และเลเซอร์ไดโอด ส่วนในเคมีคอลแอกชูเอเตอร์ (Actuators) เช่น โซลินอยด์ อุปกรณ์เพียร์โซอิเล็กทริก และเลเซอร์ไดโอด ส่วนในเคมีคอลแอกชูเอเตอร์ (Chemical Actuators) เมื่อป้อนศักดาทางไฟฟ้าจะทำให้เกิด ไฮโดรเจน และออกซิเจน จอภาพจะเป็นทรานสดิวเซอร์ชนิดพิเศษที่แปลงจากสัญญาณทางไฟฟ้าไปเป็นรูปแบบที่มองเห็นเช่น จอภาพ CRT, จอ LCD array ซึ่งจะ เป็นอุปกรณ์แสดงผล ที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไป

โดยทั่วไประบบควบคุมการทำงานของทรานสดิวเซอร์ในทางอิเล็กทรอนิกส์จะประกอบด้วยเซ็นเซอร์ที่อยู่ในส่วนอินพุตต่อไปยังสัญญาณทางไฟฟ้า จากนั้นสัญญาณทางไฟฟ้าจะผ่านการขยายสัญญาณ โดยแอกชูเอเตอร์เพื่อแสดงบนหน้าจอ ส่วนชนิดและวัสดุที่ทำเป็นเซ็นเซอร์ จะแสดงดังตาราง 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างชนิดของเซ็นเซอร์และวัสดุที่ใช้ทำเซ็นเซอร์

ชนิดเซ็นเซอร์	วัสดุเซ็นเซอร์	Sensor Function
อุณหภูมิ	$(\text{Mn,Cu})(\text{Mn,Co,Ni})_2\text{O}_4$ , $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ , $\text{NiAl}_2\text{O}_4$ , $\text{Mg}(\text{Al,Cr,Fe})_4\text{O}_4$ , $\text{SiC}$ , $\text{BaTiO}_3$ , $\text{VO}_2$ , $(\text{Mn,Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4$	NTC/ PTC thermistor, Temperature switch
ความชื้น	$\text{MgCr}_2\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$ , $\text{V}_2\text{O}_5$ - $\text{TiO}_2$ , $\text{ZnCr}_2\text{O}_4$ - $\text{LiZnVO}_4$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)(\text{OH})_2$ , $\text{ZrO}_2$ - $\text{MgO}$	ความนำไฟฟ้า
ก๊าซ	$\text{SnO}_2$ , $\text{ZnO}$ , $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , $\text{TiO}_2$ - $\text{MgO}$ , $\text{CoO}$ - $\text{MgO}$ , $\text{ZrO}_2$ - $\text{CaO}$	ความนำไฟฟ้า
อ็อกซิด	$\text{AgX}(\text{X:Cl,Br,I,CN,SCN})$ , $\text{Pbs-Ag}_2$ , $\text{CdS-AgS}$ , $\text{CuS-Ag}_2\text{S}$	อ็อกซิดที่เปล่งแสง
ระยะทาง-ความเร็ว	$\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$	เพียโซอิเล็กทริก
แสง	$\text{PbTi}_3$ , $\text{LiTaO}_3$ , $\text{LiNbO}_3$ , $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ , $\text{CaF}_2$ , $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$	Pyroelectricity, Thermoluminescence

#### 2.4.2 ชนิดของก๊าซเซ็นเซอร์

แบ่งก๊าซเซ็นเซอร์ตามลักษณะการทำงานออกเป็น 3 ชนิดหลัก ๆ คือ

- 1. Gas Adsorption Gas Sensor** Gas Sensor ในกลุ่มนี้ทำงานโดยวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เมื่อมีโมเลกุลของก๊าซถูกดูดซับเข้าไปบนผิวของวัสดุที่ใช้ทำเซ็นเซอร์ ซึ่งเมื่อผิววัสดุที่ใช้ทำเซ็นเซอร์ถูกดูดซับ โมเลกุลของก๊าซ เข้าไปที่ผิวก็ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง surface potential ทำให้เกิดการนำไฟฟ้า เกิดการเปลี่ยนแปลงมวล ทำให้น้ำหนักของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป เป็นผลให้ความถี่ของระบบที่เปลี่ยนแปลงไป
- 2. Gas Reaction Gas Sensor** Gas Sensor แบบนี้ทำการวัดผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เมื่อก๊าซที่ต้องการวัดเกิดปฏิกิริยา เช่น การจัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเซรามิกที่มีตัวกระตุ้นผสมอยู่ เมื่อเซรามิกสัมผัสกับก๊าซที่เผาไหม้
- 3. Selective Membrane Gas Sensor** ซึ่งทำงานโดยใช้ประโยชน์ของ Sensing membrane ที่ยอมให้ก๊าซบางชนิดเท่านั้นผ่านเข้าไปได้ ก๊าซเซ็นเซอร์ชนิดนี้ที่ใช่วัด Oxygen จะมี แผ่น membrane แบบ solid electrolyte ที่ทำมาจาก  $\text{Y}_2\text{O}_3$  dope  $\text{ZrO}_2$  ส่วนที่ ใช่วัด  $\text{SO}_2$  จะมีแผ่น membrane แบบ Solid electrolyte ที่ทำมาจาก  $\text{K}_2\text{SO}_4$  โดยเมื่อมีก๊าซ ข้างต้นซึมผ่านเข้าไปก็จะทำให้วัสดุดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไป เราที่วัดปริมาณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหากเปลี่ยนแปลงมากก็แสดงว่ามีก๊าซดังกล่าวมาก นอกจากนี้เรายังสามารถแบ่งก๊าซเซ็นเซอร์ชนิดหลักๆ ออกเป็น ก๊าซเซ็นเซอร์ชนิดย่อยๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ก๊าซเซ็นเซอร์ชนิดต่างๆ

Type	Classification	Phenomena	Materials	Gases
Gas adsorption	Sémiconductor	Surface Conductivity	SnO <sub>2</sub> , ZnO	LPG, CO
			$\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	alcohol
		Bulk Conductivity	TiO <sub>2</sub> , CoO, MgO-CoO	O <sub>2</sub>
	Surface potential	Surface potential	Pd-gate FET, Ag <sub>2</sub> O, Pd-TiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CO
	Humidity	Conductivity	Ni <sub>1-x</sub> Fe <sub>2+z</sub> , ZnO, MgCrO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O
	Other	Piezoelectric	Polyimide บน quartz oscillator	H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub>
Gas reaction	Catalytic combustion	combustion heat	Pt wire, Pt, Pd+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Flamable gases
	Potentisotatic	Electrolytic current	gas electrode	CO, NO, NO <sub>2</sub> , S <sub>2</sub>
	Galvanic cell	cell current	noble cathode (Pt, Au) & base anode (Pb)	O <sub>2</sub>
	Others	Fluorescence	Pyrene + silicone membrane	
Selective membrane	Solid electrolyte	EMP	ZrO <sub>2</sub> -CaO, ThO <sub>2</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , PbCl <sub>2</sub> , PbBr <sub>2</sub> , K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>

### 2.4.3 คุณสมบัติของก๊าซเซ็นเซอร์

เราสามารถแบ่งคุณสมบัติของก๊าซเซ็นเซอร์ ออกเป็น 5 อย่างที่สำคัญคือ

- 1. ความไวการตอบสนอง (Response)** คือ ความสามารถในการตอบสนองอย่างรวดเร็วในทันทีเมื่อก๊าซที่เราทำการวัดมาสัมผัสกับก๊าซเซ็นเซอร์คุณสมบัติข้อนี้มีความสำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อก๊าซ ที่เราทำการวัดเป็นก๊าซพิษหรือก๊าซไวไฟ เพื่อเราจะได้หลีกเลี่ยงและแก้ไขได้ทันที ก่อนที่จะได้รับอันตรายหรือเกิดเหตุร้ายแรงในบริเวณที่ทำการวัดก๊าซ หากก๊าซรั่วไหลออกมา
- 2. ความไวในการวัด (Sensitivity)** คือ ความสามารถของก๊าซเซ็นเซอร์ที่จะบอกความแตกต่างของปริมาณก๊าซที่จะทำการวัด เช่น ก๊าซเซ็นเซอร์บางชนิดไม่สามารถบอกความแตกต่างของ ก๊าซ ปริมาณน้อย ๆ เช่น 10 ppm กับ 11 ppm ได้ ดังนั้นเมื่อเรานำไปวัดก๊าซ 2 บริเวณที่มี ก๊าซแตกต่างกันน้อย ๆ ก็จะทำให้เราเข้าใจผิดคิดว่าบริเวณทั้ง 2 มีก๊าซในปริมาณเท่ากัน คุณสมบัติชนิดนี้จะสำคัญเฉพาะกรณีก๊าซที่เราวัดมีปริมาณน้อย ๆ หรือต้องการความถูกต้องในการวัดสูงเท่านั้น
- 3. ความจำเพาะ (Selectivity)** คือ ความสามารถในการแยกแยะความแตกต่างระหว่างก๊าซที่เราต้องการวัดกับก๊าซที่เราไม่ต้องการวัดได้ กล่าวคือ ก๊าซเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่ง ๆ ควรมีความสามารถในการตอบสนองต่อก๊าซชนิดหนึ่งชนิดเดียวที่เราต้องการวัด และไม่ควรที่จะตอบสนองต่อก๊าซชนิดอื่น เพราะจะทำให้สัญญาณรบกวนการวัดได้ ในทางปฏิบัติเราต้องพยายามหาวัสดุที่เหมาะสมที่ไวเฉพาะต่อก๊าซที่เราต้องการวัดมาใช้ทำ Sensing membrane หรืออาจจะเจือสารบางตัวลงไปในวัสดุที่ใช้ทำ membrane เพื่อให้ membrane มีความไวในการตอบสนองก๊าซที่เราต้องการวัดขึ้นมาได้ หรือเมื่อต้องการตอบสนองก๊าซที่เราไม่ต้องการที่จะวัด Selectivity เป็นคุณสมบัติที่สำคัญมาก ซึ่งก๊าซเซ็นเซอร์ที่ดีต้องมีค่า Selectivity สูง

นอกจากนี้ยังเป็นข้อดีสำหรับสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในสิ่งแวดล้อมด้วย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ความเสถียรภาพ (Stability) คือ ผลในการวัดคงที่ไม่เสื่อมสภาพเร็วในการใช้งาน เพื่อให้เซ็นเซอร์สามารถใช้งานได้ต่อเนื่องอย่างไรก็ตาม เซ็นเซอร์แต่ละชนิดจะมีอายุการใช้งานแตกต่างกันไป
5. พิสัยการวัด (Dynamic Range) คือ ช่วงกว้างของการวัดของ Sensor ซึ่ง Sensor บางตัวสามารถวัดก๊าซปริมาณตั้งแต่ 100-10000 ppm แต่บางตัวใช้วัดในระยะ 10-50 ppm

## 2.5 ทินออกไซด์ก๊าซเซ็นเซอร์

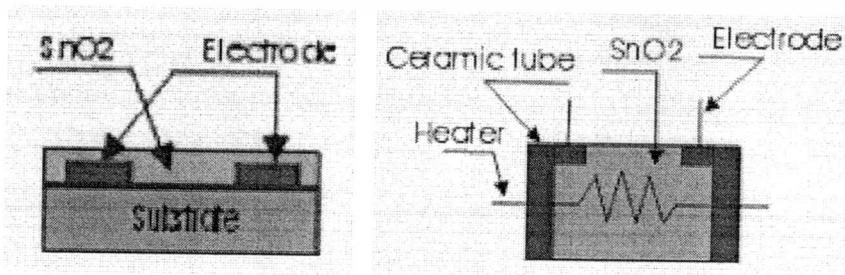
สารกึ่งตัวนำทินออกไซด์เซ็นเซอร์ ( $\text{SnO}_2$ ) เริ่มสร้างขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1968 โดยเซ็นเซอร์ชนิดนี้เริ่มพัฒนาเพื่อใช้ในการตรวจจับก๊าซ LPG ในเวลาต่อมาได้มีการพัฒนาเพื่อที่จะใช้ในการตรวจจับก๊าซชนิดอื่นด้วย เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{CO}$ ) แอลกอฮอล์ ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) แอมโมเนีย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

ความสำเร็จดังกล่าวนี้ ได้มีการศึกษาอย่างละเอียดถึงความแตกต่างของชนิดวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้สร้างเซ็นเซอร์ พบว่ามีเพียงทินออกไซด์ก๊าซเซ็นเซอร์เพียงชนิดเดียวเท่านั้นที่สามารถตรวจจับก๊าซจากท่อไอเสียรถยนต์ได้ดี รวมทั้งในการตรวจจับก๊าซชนิดอื่นด้วย

การเริ่มวิจัยข้อในการหาวัสดุที่มาสสร้างเป็นก๊าซเซ็นเซอร์นั้น ในเริ่มแรกทินออกไซด์ไม่ได้รับการยอมรับเท่าที่ควร เพราะเนื่องจากปัญหาในเรื่องคุณสมบัติของทินออกไซด์เอง เช่น ความไว ในการตรวจจับก๊าซที่อุณหภูมิห้อง ความจำเพาะในการตรวจจับก๊าซและผลของความชื้นซึ่งปัญหาเหล่านี้ จะส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือ ความน่าเชื่อถือของก๊าซเซ็นเซอร์จะมีความสำคัญในด้านความถูกต้องของการวัดในอุตสาหกรรมและความปลอดภัยต่อร่างกายของมนุษย์ ดังนั้น จึงมีการพัฒนาทินไดออกไซด์ในเงื่อนไขต่างและเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางประการจนทำให้ทินออกไซด์มีคุณสมบัติที่เหมาะสม และมีความไวในการตรวจจับก๊าซได้เร็ว ซึ่งจะแสดงว่า ทินออกไซด์ก๊าซเซ็นเซอร์สามารถตรวจจับก๊าซที่มีปริมาณของสารที่มีความเข้มข้นต่ำได้

ตัวตรวจจับก๊าซแบบสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor gas sensor) คือก๊าซเซ็นเซอร์ที่อาศัยประโยชน์จากลักษณะสมบัติของสารกึ่งตัวนำกล่าวคือเมื่อมีโมเลกุลของก๊าซเข้ามาดูดเกาะ (adsorb) ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับสารกึ่งตัวนำนั้นขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นโดยการวัดการนำ จะทำให้เราทราบความเข้มข้นของก๊าซได้

ลักษณะการนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ 1) การเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าที่ผิว และ 2) การเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าในบัลค์ (Bulk) แบบแรกนั้นส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็น ฟิล์มบางหรือฟิล์มหนา ส่วนแบบหลังนั้นจะมีความหนามาก โดยมีลักษณะเป็นก้อนเซรามิก (sintered block) ลักษณะการตอบสนองของก๊าซเซ็นเซอร์ ต่อชนิดของก๊าซนั้นจะขึ้นกับชนิดขององค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์และอุณหภูมิการทำงาน ตัวอย่างของวัสดุ ที่ใช้ทำก๊าซเซ็นเซอร์แบบนี้ได้แก่  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  เป็นต้น สารเหล่านี้สามารถนำมาใช้ประดิษฐ์ก๊าซเซ็นเซอร์สำหรับวัดก๊าซ  $\text{Nox}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{H}_2$ , alcohol และอื่น ๆ อีกมากมาย โครงสร้างของก๊าซเซ็นเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำ แสดงได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของก๊าซเซ็นเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 กลไกในการตรวจจับก๊าซของทินออกไซด์

ทินออกไซด์ มีการจัดเรียงผลึกแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า ซึ่งมีความกว้างของแถบ พลังงาน 3.5-3.8 อิเล็กตรอนโวลต์ จุดบกพร่องจำนวนมากในเนื้อทินออกไซด์จะอยู่ในรูปที่ว่างในอะตอมออกซิเจน ซึ่งจะแสดงตัวเป็นผู้ให้อิออน แต่ส่วนที่มีผลต่อการแสดงตัวเป็นอะตอมผู้ให้ก็คือที่ว่างในอะตอมออกซิเจน โดยกระบวนการที่มีผลต่อค่าความนำไฟฟ้าของทินออกไซด์ต่างๆ มีดังนี้

#### 2.5.1.1 ผลในเนื้อสาร

จุดบกพร่องในเนื้อทินออกไซด์ปกติจะเป็นที่ว่างในอะตอมออกซิเจน 1 และ 2 ไอออน จากแบบจำลองจุดบกพร่องสำหรับผลึกทินออกไซด์บริสุทธิ์กับช่องว่างออกซิเจนสองประจุลบจะมีสมการที่อุณหภูมิสูงๆ ดังนี้

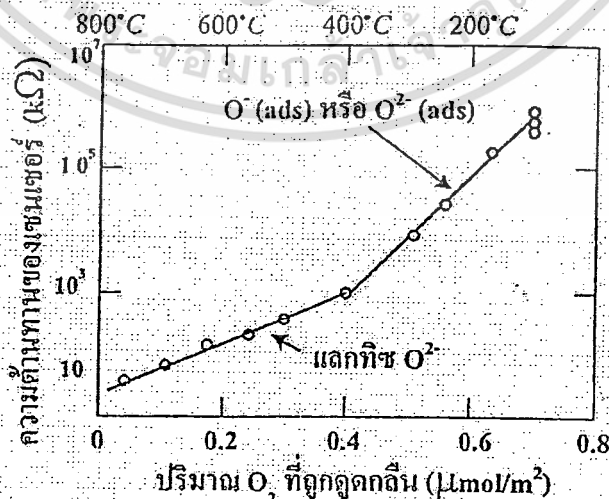


ที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ของการดูดกลืนออกซิเจนจะเป็นส่วนสำคัญว่าดังรูปที่ 2.14 ช่องว่างเหล่านี้จะเพิ่มอะตอมผู้ให้ในแถบพลังงาน แสดงว่าจะมีระดับของอะตอมผู้ให้อยู่ 2 ระดับที่ทำให้เกิดช่องว่างของออกซิเจน

#### 2.5.1.2 ผลจากผิวของสารกึ่งตัวนำ

ในบรรยากาศปกติออกซิเจนจะถูกดูดกลืนที่ผิวของ โลหะออกไซด์และเกิดการดึงอิเล็กตรอนจากแถบความนำทำให้ค่าสภาพความต้านทานเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีออกซิเจนอยู่ 3 แบบ  $O_2^{-}$ ,  $O^{-}$  และ  $O^{2-}$  โดยแบบแรกจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ในขณะที่รูปแบบอื่นจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ยังพบว่า การดูดกลืนออกซิเจนจากช่วง 200 ถึง 250 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าความต้านทานลดลงตามปริมาณ  $O^{-}$  ทำให้รู้ว่าไอออนลบจะยังคงดูดกลืนที่ผิวซึ่งทำให้ความต้านทานสูงที่ 400 องศาเซลเซียส ค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของทินออกไซด์กับอุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซต่างๆ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 800 ถึง 200 องศาเซลเซียสกับปริมาณ  $O_2$  ที่ถูกดูดกลืน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

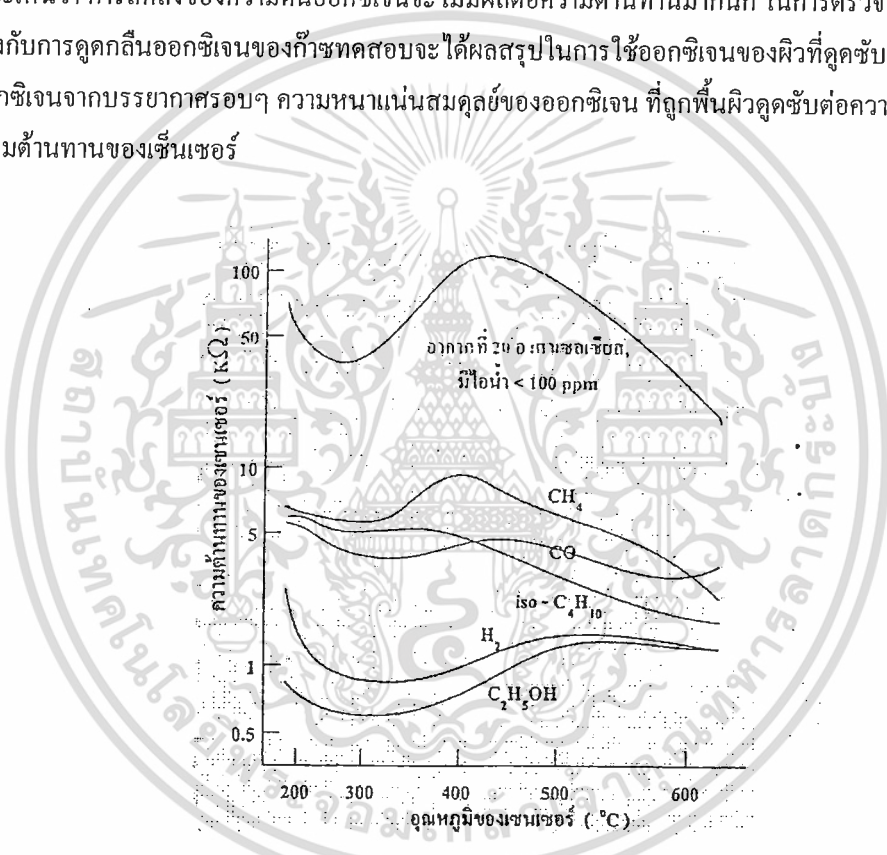
การลดลงของความต้านทานในช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิจาก 0 ถึงประมาณ 250 องศาเซลเซียสเป็นคุณสมบัติปกติของสารกึ่งตัวนำ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพิ่มจนถึงจุดที่ความต้านทานเพิ่ม คือ เริ่มเกิดการฟอร์มตัวของ  $O^-$  และ  $O^{2-}$  เมื่อถึงอุณหภูมิค่าหนึ่งจะเกิดการแตกสลายของไอออนเหล่านี้ทำให้ค่าความต้านทานของทินออกไซด์ลดลงอีกครั้ง

การลดลงของความต้านทานก๊าซเซ็นเซอร์เมื่ออยู่ในบรรยากาศของก๊าซเผาไหม้สามารถอธิบายได้คือ ปริมาณไอออนของออกซิเจนบนผิวลดลงเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับก๊าซ  $O^-$  ทำให้เกิดอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในเนื้อสาร

ตัวอย่าง  $RH_2$  คือก๊าซติดไฟใดๆ จะเกิดปฏิกิริยากับ  $O^-$  ดังนี้



จากปฏิกิริยาจะเห็นว่า การลดลงของความต้านทานออกซิเจนจะไม่มีผลต่อความต้านทานมากนัก ในการตรวจจับก๊าซ กลไกอื่นที่สามารถอธิบายจะเกี่ยวข้องกับการดูดกลืนออกซิเจนของก๊าซทดสอบจะได้ผลสรุปในการใช้ออกซิเจนของผิวที่ดูดซับ นั่นคือเกิดการเคลื่อนย้ายของออกซิเจนจากบรรยากาศรอบๆ ความหนาแน่นสมดุลย์ของออกซิเจน ที่ถูกพื้นผิวดูดซับต่อความเข้มข้นของก๊าซรอบๆ จะเป็นตัวกำหนดความต้านทานของเซ็นเซอร์



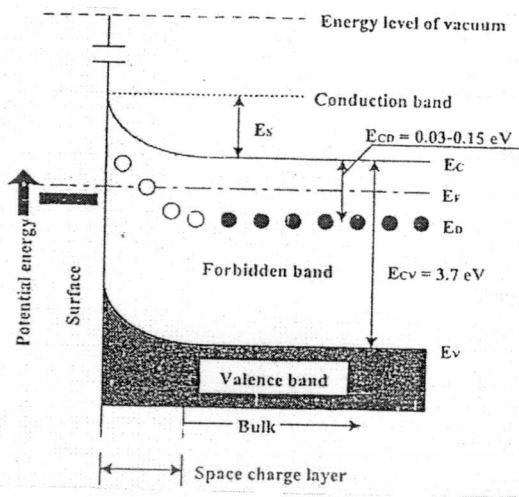
รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของทินออกไซด์ต่ออุณหภูมิที่บรรยากาศของก๊าซต่างๆ

### 2.5.1.3 ผลจากขอบเกรน

การเปลี่ยนแปลงที่ผิวซึ่งเกิดจากการดูดกลืนหรือคายไอออนจะมีค่าไม่มากพอที่อธิบายถึงการที่ความต้านทานเพิ่มขึ้นมากๆ ส่วนที่มีผลต่อความต้านทานมากกว่าก็คือ ขอบเกรน

ผลึกทินออกไซด์จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ประกอบด้วยแลกทิจบกร่องของออกซิเจนซึ่งแสดงตัวเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน เมื่ออะตอมของออกซิเจนหลุดออกอิเล็กตรอนจากอะตอมผู้ให้บริเวณพื้นผิวจะถูกดูดกลืนเป็นไอออนลบ เกิดการฟอร์มตัวของชั้นปลอดประจุมีค่าขึ้นอยู่กับกำแพงศักย์ โดยแถบพลังงานจะเป็นดังรูป 2.16 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

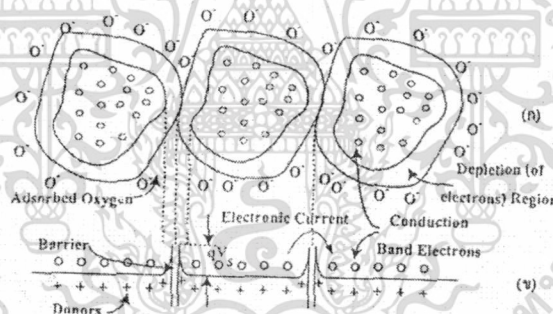
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- (■) คือ ออกซิเจนประจุลบที่ถูกดูดกลืน คือ ศักย์ที่ผิว  
เกิดจากการดูดซับ  $O_2^-$  หรือ  $O^-$   
 $(O_2 + e \rightleftharpoons O_2^- \text{ ad หรือ } \frac{1}{2} O_2 + e \rightleftharpoons O^- \text{ ad})$
- $E_s$  คือ กำแพงศักย์
- $E_r$  คือ ระดับเฟอร์มี
- $E_d$  คือ ระดับผู้ให้
- $E_c$  คือ ระดับต่ำสุดของแถบความนำ
- $E_v$  คือ ระดับสูงสุดของแถบวาเลนซ์
- $E_{cd}$  คือ ความลึกของระดับผู้ให้
- $E_{cv}$  คือ ช่องว่างพลังงานระหว่าง  $E_c$  และ  $E_v$

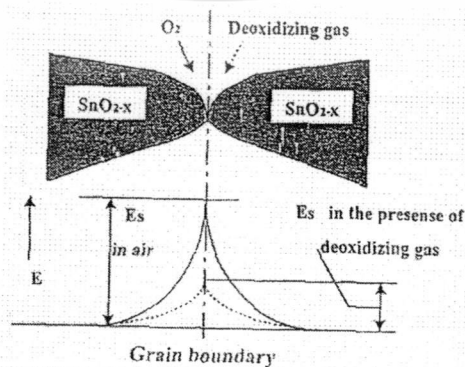
รูปที่ 2.16 โครงสร้างแถบพลังงานของทินออกไซด์

แบบจำลองทางฟิสิกส์สำหรับการจับคู่ของขอบเกรนแสดงถึงบริเวณปลอดประจุและผลของการไดออกไซด์ซิงก์ก๊าซ ดังรูปที่ 2.17-18 กรณีผลึกมีขนาดน้อยกว่าสองเท่าของ Debye length ดังรูปที่ 2.19 แต่ละผลึกจะแสดงตัวเหมือนช่องทางเดินกระแสในเฟตและประจุลบที่ผิวของออกซิเจนลบจะแสดงตัวคล้ายแรงดันเกตในเฟต ทำให้มีผลต่อระดับศักย์  $E_c$  ภายในผลึก



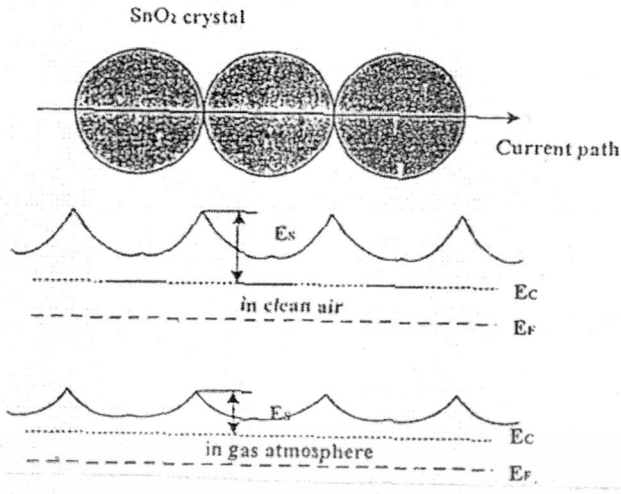
รูปที่ 2.17 โครงสร้างและแบบจำลองของสารกึ่งตัวนำ (ถ้าแก๊งศักย์ที่เกิดจากการดูดกลืนออกซิเจน) (ก) แบบจำลองทางฟิสิกส์ (ข)

แบบจำลองแถบพลังงาน



รูปที่ 2.18 แบบจำลองกำแพงศักย์ที่ขอบเกรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 กำแพงศักย์ตามทางเดินกระแสในทिनออกไซด์ก๊าซเซ็นเซอร์ (ผลึกมีขนาดน้อยกว่า สองเท่าของ Debye length)

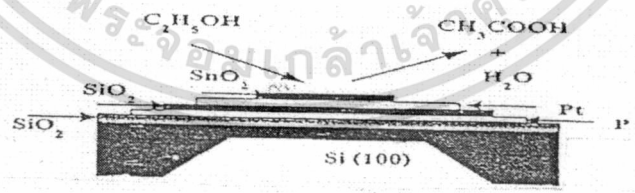
### 2.5.2 ปฏิกริยาเคมีระหว่างทिनออกไซด์กับก๊าซต่างๆ

เราจะแบ่งปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นได้ 2 แบบ โดยดูได้จากว่าความต้านทานของทिनออกไซด์ลดลงหรือเพิ่มขึ้น

#### 2.5.2.1 ปฏิกริยาออกซิเดชัน

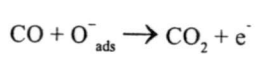
ในปฏิกริยาออกซิเดชัน ก๊าซทดสอบจะถูกออกซิไดซ์ (ให้อิเล็กตรอนแก่ทिनออกไซด์) และทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ ซึ่งจะมีผลทำให้ความต้านทานของทिनออกไซด์ลดลง ตัวอย่างของก๊าซและปฏิกริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นจะเป็นดังสมการที่ (2.4), (2.5) และ (2.6)

- เอทิลแอลกอฮอล์ C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH



รูปที่ 2.20 การตรวจจับ C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH ของทिनออกไซด์ จะได้ CH<sub>3</sub>COOH และ H<sub>2</sub>O

- คาร์บอนมอนอกไซด์ CO



(2.9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

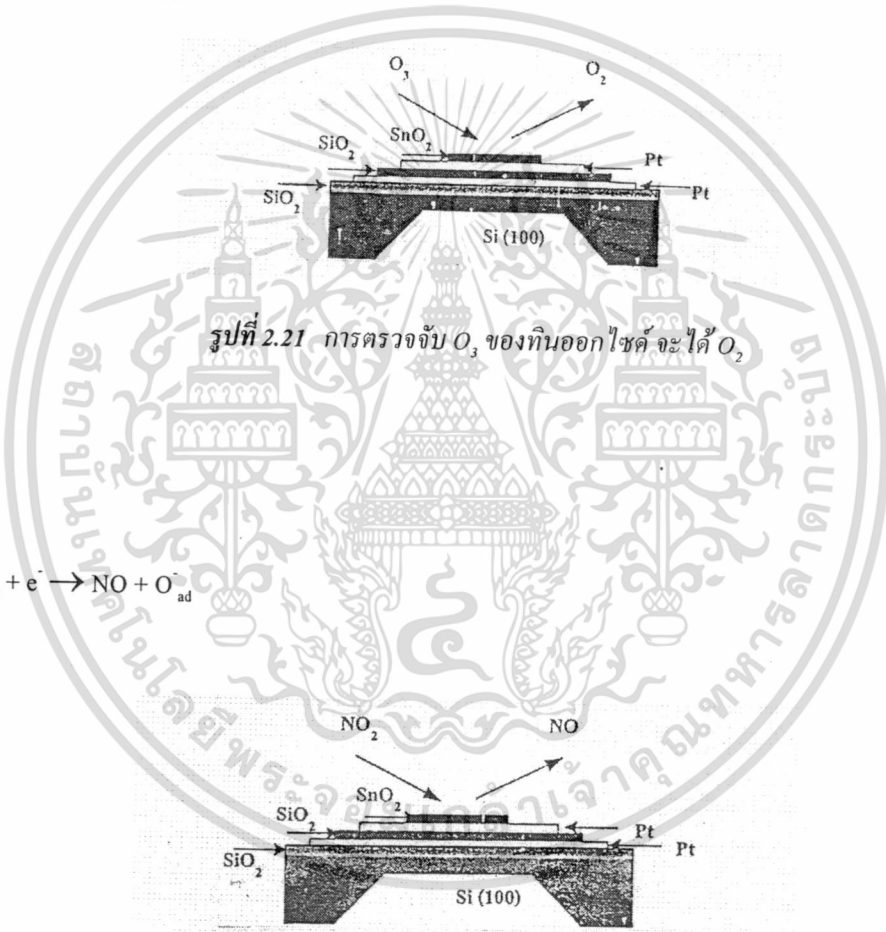
- มีเทน CH<sub>4</sub>



### 2.5.2.2 ปฏิกริยารีดักชัน

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

- โอโซน O<sub>3</sub>



รูปที่ 2.21 การตรวจจับ O<sub>3</sub> ของทินออกไซด์ จะได้ O<sub>2</sub>

- ไนตรัส NO<sub>2</sub>



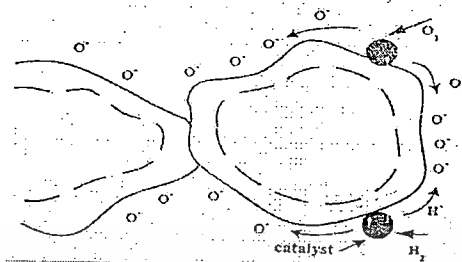
รูปที่ 2.22 การตรวจจับ NO<sub>2</sub> ของทินออกไซด์ จะได้ NO

### 2.5.3 การปรับปรุงความไวในการตอบสนองโดยการเติมตัวแคตตาลิสต์

ตัวแคตตาลิสต์ (Catalyst) คือ สารที่ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกริยาเคมี โดยที่ตัวเองไม่เปลี่ยนแปลง และไม่ได้เปลี่ยนพลังงานอิสระของปฏิกริยา แต่ทำให้พลังงานกระตุ้นมีค่าต่ำลง โดยรูปที่ 2.23 จะแสดงปรากฏการณ์ที่ผิวสัมผัสเมื่อเติมตัวแคตตาลิสต์

จุดประสงค์โดยทั่วไปของการเติมตัวแคตตาลิสต์ ก็เพื่อเพิ่มความไวในการตอบสนองต่อก๊าซ ลดเวลาในการตอบสนองและการฟื้นไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัว ตัวแคทตะลิสต์ที่นิยมใช้ทั่วๆ ไปก็จะเป็นสารพวกโลหะมีตระกูล เช่น แพลเลเดียม (Pd) และ แพลทินัม (Pt) เป็นต้น โดยตารางที่ 2.4 จะเป็นตัวอย่างชนิดของตัวแคทตะลิสต์กับก๊าซที่ตรวจสอบ



รูปที่ 2.23 ปรากฏการณ์ที่ผิวสัมผัสเมื่อเติมตัวแคทตะลิสต์

ตารางที่ 2.4 ชนิดของตัวแคทตะลิสต์ที่ใช้เติมในการทดสอบก๊าซชนิดต่างๆ

ชนิดสารตั้งต้น	ตัวแคทตะลิสต์	ก๊าซที่ทดสอบ
SnO <sub>2</sub>	Pd, ThO <sub>2</sub> , Pt	CO
	Sb	CO ที่อุณหภูมิต่ำ
	Pt	R-OH
	Pt	CH <sub>4</sub> ที่อุณหภูมิต่ำ
	Au	H <sub>2</sub> S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

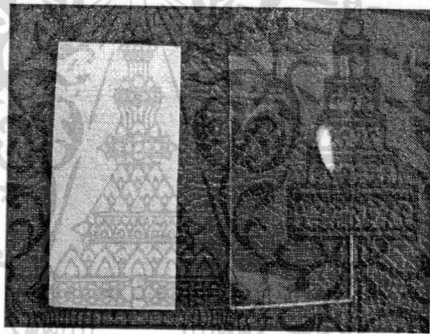
# บทที่ 3 การสร้างเซ็นเซอร์แอลพีจีและการทดสอบก๊าซ

## 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเซ็นเซอร์

### 3.1.1 ฐานรอง

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

- 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
- พร้อมทั้งจะนำมาใช้งาน



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายอะลูมินากับกระจกที่นำมาใช้เป็นฐานรอง

### 3.1.2. สารละลาย

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

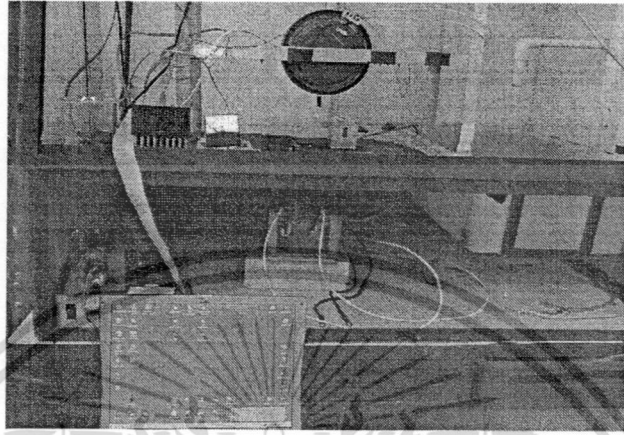
- ได้  $\text{NH}_4\text{F}$  0% ปริมาณ 0 กรัม :  $\text{SnCl}_2$  ปริมาณ 5.640 กรัม
- ได้  $\text{NH}_4\text{F}$  1% ปริมาณ 0.056 กรัม :  $\text{SnCl}_2$  ปริมาณ 5.640 กรัม
- ได้  $\text{NH}_4\text{F}$  3.5% ปริมาณ 0.197 กรัม :  $\text{SnCl}_2$  ปริมาณ 5.640 กรัม
- ได้  $\text{NH}_4\text{F}$  4.5% ปริมาณ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

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

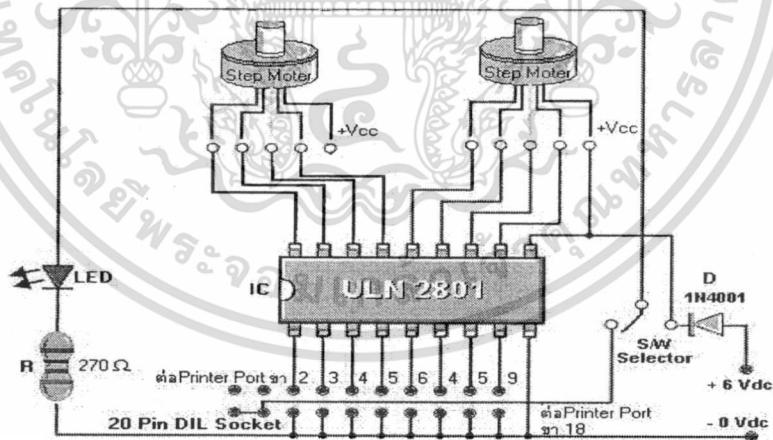
### 3.1.3 อุปกรณ์เคลื่อนจุ่ม

เครื่องจุ่มที่ใช้ในการทดลองนั้นเป็นเครื่องจุ่มที่รุ่นที่ปริญาโทได้ออกแบบไว้ มีโครงสร้างและภาพการทำงานดังรูปที่ 3.2 โดยการทำงานของเครื่องจุ่มนั้นเป็นการควบคุมสเต็ปมอเตอร์ด้วยคอมพิวเตอร์ ผ่านพริ้นเตอร์พอร์ต (printer port) ซึ่งมีวงจรไฟฟ้าชุดหนึ่งเพื่อรับสัญญาณจากคอมพิวเตอร์แล้วเพิ่มแรงดันส่งต่อไปขับสเต็ปมอเตอร์อีกทีหนึ่ง



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายของเครื่องจุ่มอัตโนมัติสั่งงานผ่านคอมพิวเตอร์

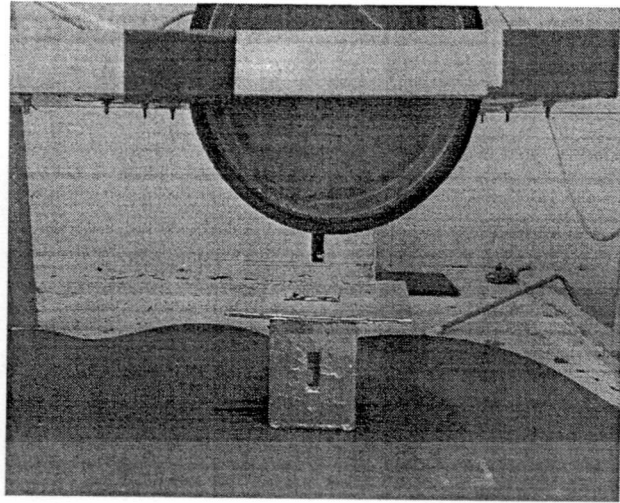
วงจรเชื่อมต่อระหว่างพอร์ตพริ้นเตอร์และสเต็ปมอเตอร์โดยใช้ไฟดิซีเล็ยวงจร 6 โวลต์จากแหล่งจ่ายไฟตรง ซึ่งการทำงานก็จะรับสัญญาณจากคอมพิวเตอร์และส่งข้อมูลไปขับสเต็ป มอเตอร์ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรเชื่อมต่อระหว่างพอร์ตพริ้นเตอร์และสเต็ปมอเตอร์

เครื่องจุ่ม ประกอบด้วยเตาอบความร้อนซึ่งได้ใช้จากเหล็กให้ความร้อน 2 จานมาประกบกันเว้นช่องว่างระหว่างกลาง โดยได้ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลไว้ตรงกลางระหว่างเตา มีเส้นลวดยึดระหว่างกระจกกับโซ่เพื่อดึงขึ้นลง มีพาชนะใส่สารละลายและกล่องฉนวนกันความร้อน เพื่อให้สารละลายระเหยน้อยที่สุดในระหว่างการจุ่มดังรูปที่ 3.4 และภาพตัดขวางเครื่องจุ่มดังแสดงในรูปที่ 3.4

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายเตาอบความร้อน

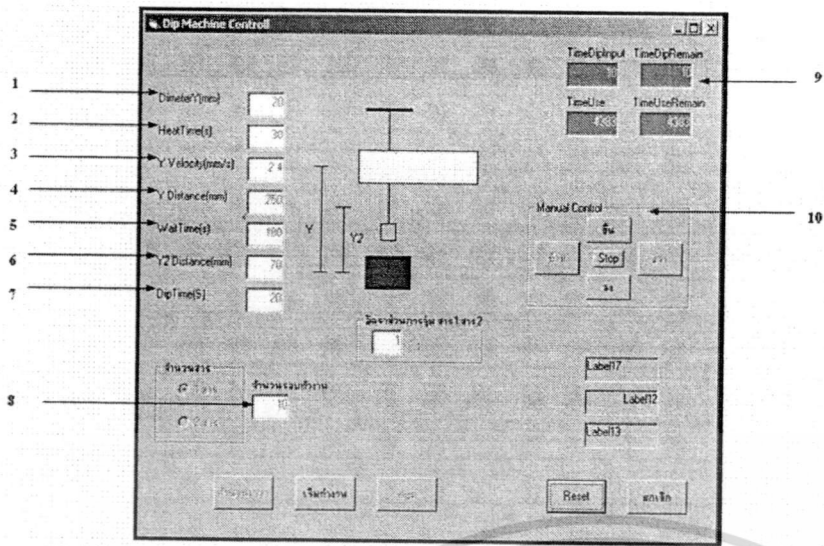


รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางการทำงานของเครื่องจุ่มอัตโนมัติ

หน้าจอหลักของโปรแกรมควบคุมการทำงานนั้นจะมีการใส่ค่าเพื่อควบคุมการทำงานต่างๆและจะมีการแสดงค่าต่างๆดังรูปที่ 3.6 ซึ่งแสดงรายละเอียดการใส่ค่าดังต่อไปนี้

การทำงานโดยการใส่ ค่าต่างๆที่กล่าวมาลงในช่องที่กำหนด หลังจากใส่ค่าตามที่กำหนดครบแล้ว กดคำนวณเวลา ซึ่งก็จะแสดงระยะเวลาในการทั้งหมดและแสดงจำนวนรอบการทำงานทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

รูปที่ 3.6 หน้าจอควบคุมการทำงาน

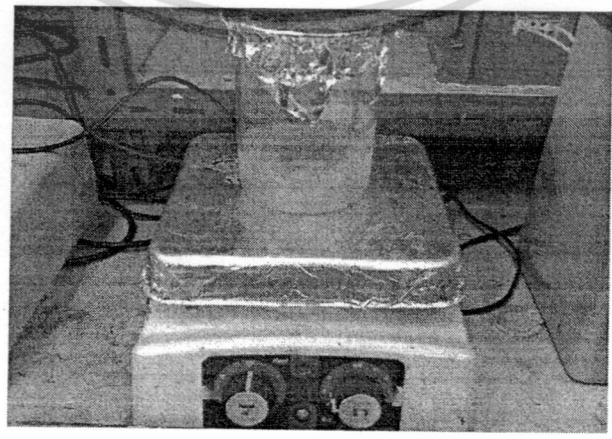
### 3.2 ขั้นตอนในการเตรียมสารละลาย

#### 3.2.1 ชั่งสารและผสมสาร

นำสาร SnCl<sub>2</sub> และ NH<sub>4</sub>F ไปชั่งตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 3.2.2 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของ NH<sub>4</sub>F ต่อ SnCl<sub>2</sub> เป็น 0%, 1%, 3.5, 5.5% แล้วนำสาร SnCl<sub>2</sub> และ NH<sub>4</sub>F ที่ชั่งได้มาใส่ไว้ในบีกเกอร์ นำเอทานอล 100 มิลลิลิตร มาเทในบีกเกอร์ที่มีสาร SnCl<sub>2</sub> และ NH<sub>4</sub>F ซึ่งเอทานอลเป็นตัวทำละลาย

#### 3.2.2 คนสารละลาย

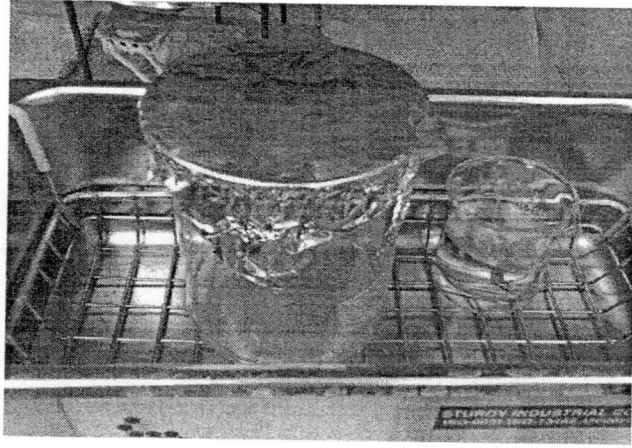
จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมได้มาคนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ดังรูปที่ 3.7 หลังจากทีสารละลายเข้ากันดีแล้ว นำสารละลายที่ได้มาอัลตราโซนิคเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายแสดงการคนสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

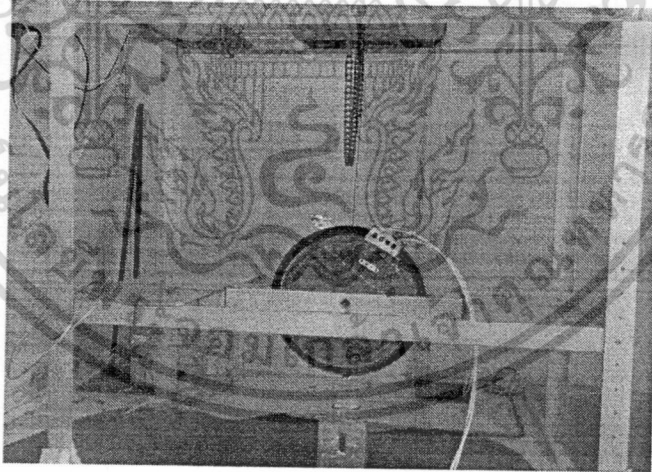


รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายแสดงการอัดรีดรีโซนิค

### 3.3 ขั้นตอนการสร้างฟิล์มบางทินออกไซด์

#### 3.3.1 ติดตั้งชิ้นงาน

นำฐานรองที่ตัดได้ขนาด 2.5 ซม. x 5 ซม. มายึดกับเส้นลวดโดยใช้ตัวหนีบช่วยจับฐานรอง โดยเส้นลวดนั้นก็นำไปต่อกับ โขและ แกนหมุนของสเต็ปมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.9

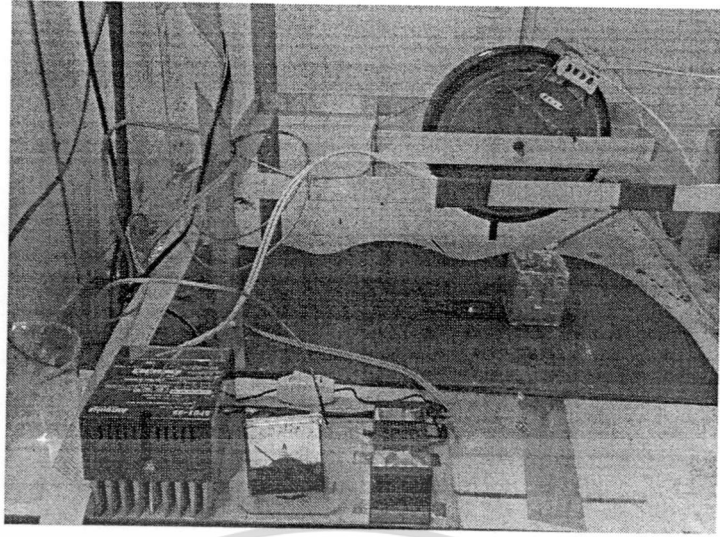


รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายการติดตั้งชิ้นงานกับเครื่องจุ่ม

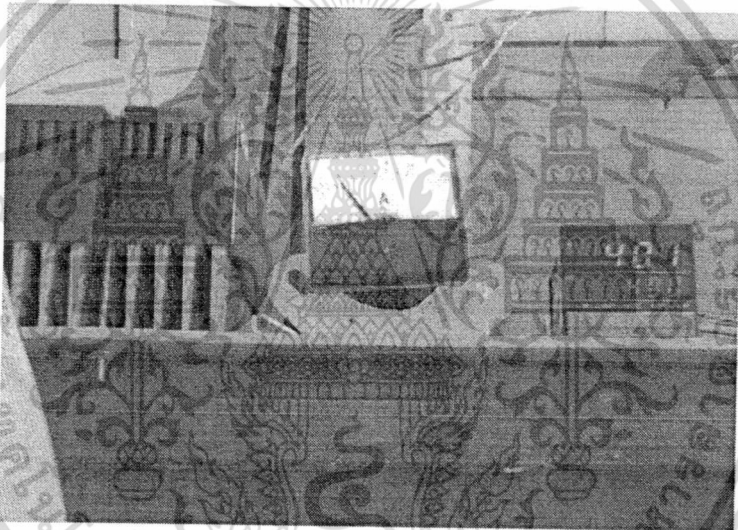
#### 3.3.2 จ่ายไฟให้เตาอบ

จ่ายกระแสไฟสลับให้เตาอบจนกระทั่งเตาอบมีอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เนื่องจากเราใช้อุณหภูมินี้ในการสร้างฟิล์มบางทินออกไซด์ เราจะต่อสายเทอร์โมคัปเปิล และสายไฟจากเครื่องจ่ายไฟสลับให้กับเตาอบดังรูปที่ 3.10 จนกระทั่งเตาอบมีอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 3.11

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 การต่อเครื่องจ่ายไฟให้กับเตาอบ



รูปที่ 3.11 เตาอบมีอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

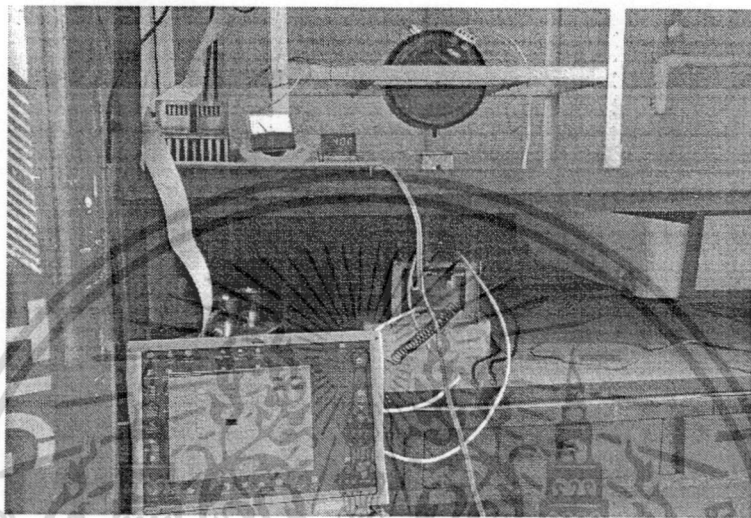
### 3.3.3 การกำหนดสภาวะที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจากในเบื้องต้นนั้นเรายังไม่ทราบว่าควรจะกำหนดสภาวะต่างๆในการทดลองเท่าใดจึงจะเหมาะสมในการเคลือบฟิล์มบางทินออกไซด์ ดังนั้นเราจึงอ้างอิงจากรุ่นที่ปริญญาโทที่ทดลองปลูกฟิล์มด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ เช่นกัน พบว่ามีตัวแปรมากกว่าหนึ่งตัวแปรที่มีผลต่อฟิล์มในการจุ่มเคลือบ จึงจำเป็นต้องมีการกำหนดค่าตัวแปรไว้ที่ค่าใดค่าหนึ่งเพื่อที่จะสามารถศึกษาสมบัติที่ต้องการได้ การควบคุมการทำงานของสเต็ปมอเตอร์นั้นเราใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมโดยผ่านพอร์ต ปริ้นเตอร์ ในการทดลองนี้ได้ทำการกำหนดค่าของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังนี้

เอทิลแอลกอฮอล์เป็นเอทิลแอลกอฮอล์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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



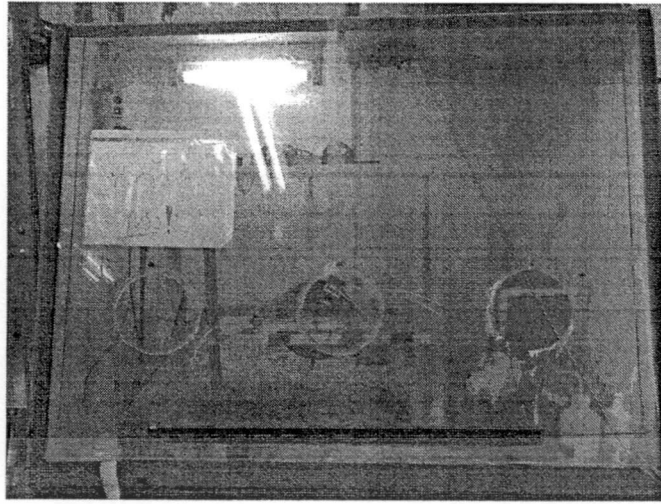
รูปที่ 3.12 กำหนดสภาวะจากโปรแกรมในคอมพิวเตอร์

เมื่อกำหนดสภาวะการทำงานต่างๆตามที่ได้กำหนดไว้แล้ว และตรวจสอบว่าชิ้นงานอยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของเตาอบแล้ว จากนั้นก็กดปุ่มเริ่มทำงานอัตโนมัติ สเต็ปมอเตอร์ก็จะหมุนตาม โปรแกรมที่ได้กำหนดไว้

### 3.3.4 กระบวนการทำงานของเครื่องจุ่ม

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



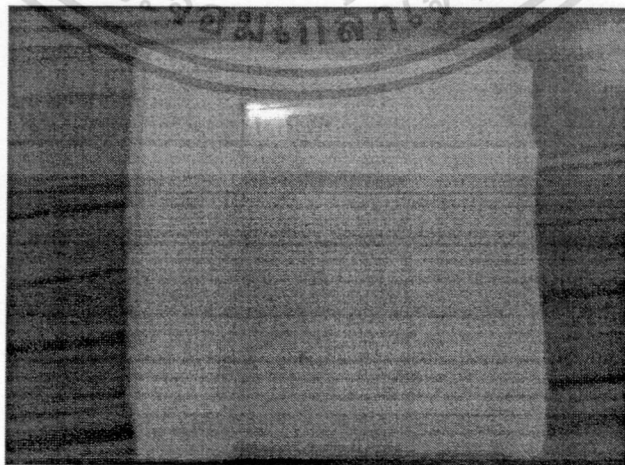
รูปที่ 3.13 ภาพถ่ายเครื่องเคลือบจุ่มในตู้ดูดอากาศ

### 3.3.5 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



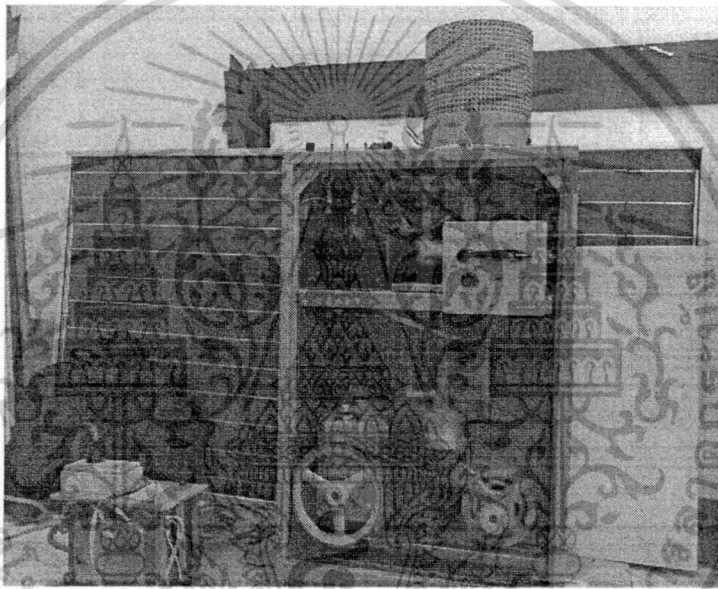
รูปที่ 3.14 ภาพถ่ายชิ้นงานที่เคลือบด้วยฟิล์มบางทินออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ขั้นตอนการสร้างลวดลายโลหะ

เราสร้างขั้วอิเล็กทรอนิกส์บนฐานรองที่เคลือบด้วยฟิล์มบางด้วยอะลูมิเนียม เทคนิคที่ใช้เคลือบโลหะเป็นแบบการเคลือบในระบบสุญญากาศ โดยใช้เครื่อง Evaporation ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดไม่มีผลของการแพร่กระจายไอออน แต่ปัญหาที่พบบ่อยคือได้ความร้อนซึ่งใช้ลวดทั้งสแตนท์นั้นขาดง่าย หลังจากผ่านการใช้งานแล้ว 1 ครั้ง

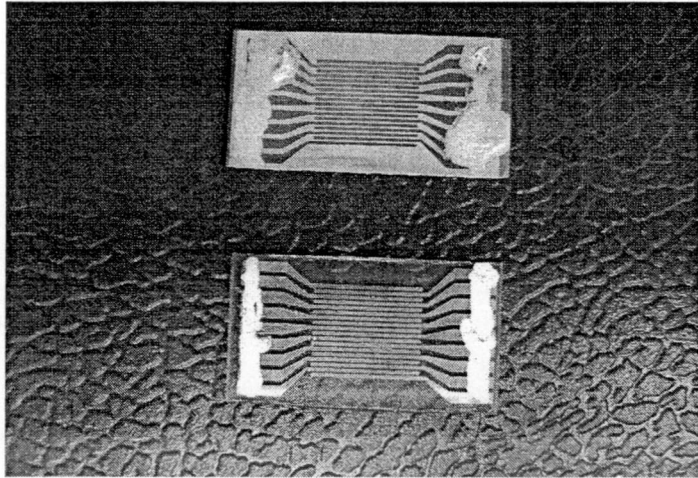
สำหรับการเคลือบโลหะอะลูมิเนียมก็คือการทำให้อะลูมิเนียมเกิดความร้อนจากไส้ทั้งสแตนท์จนอะลูมิเนียมถึงจุดหลอมเหลวคือ 660 องศาเซลเซียส ไส้ทั้งสแตนท์ให้ความร้อนโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน ขณะที่เคลือบนั้นก็ต้องคอยควบคุมกระแสให้เพิ่มขึ้นทีละน้อย จนกระทั่งอะลูมิเนียมที่วางอยู่ในไส้ขดลวดทั้งสแตนท์หลอมตัวเป็นของเหลวติดอยู่กับไส้ก็จะระเหยเป็นไอพุ่งกระจายเคลือบชิ้นงาน สำหรับวิธีนี้เราจำเป็นต้องใช้ขนาดของอะลูมิเนียมให้มีขนาดเท่าเดิมทุกครั้งที่จะทำการเคลือบ (เราใช้อะลูมิเนียมขนาด 1.5 เซนติเมตร) เพื่อให้ความหนาที่ติดกับชิ้นงานมีความหนาเท่าเดิม ไม่เช่นนั้นแล้วผลของความต้านทานก็จะไม่เท่ากัน (โดยอะลูมิเนียมมีสภาพต้านทาน 2.7 โอห์มต่อเซนติเมตร)



รูปที่ 3.15 ภาพถ่ายเครื่อง Evaporation

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ทำการเคลือบด้วยอะลูมิเนียม

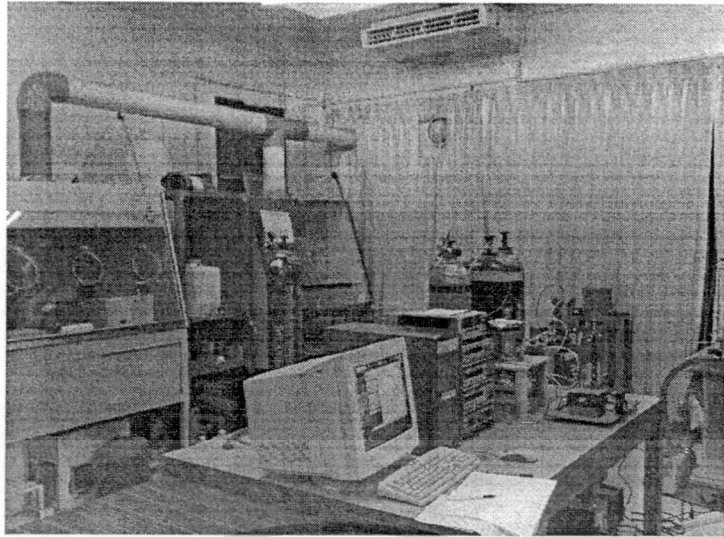
หลังจากที่ชิ้นงานถูกด้วยเคลือบอะลูมิเนียมแล้ว เราจะนำไปทดสอบกับก๊าซแอลพีจีต่อไป จะพบว่าขนาดของเซนเซอร์ตรวจจับก๊าซแอลพีจีมีขนาดเพียง 1 ซม.×1 ซม. เท่านั้น ที่เหลือเป็นขั้วที่ใช้ต่อเพื่อวัดความดันทาน ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.17 ภาพถ่ายเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซแอลพีจี

### 3.5 การทดสอบ

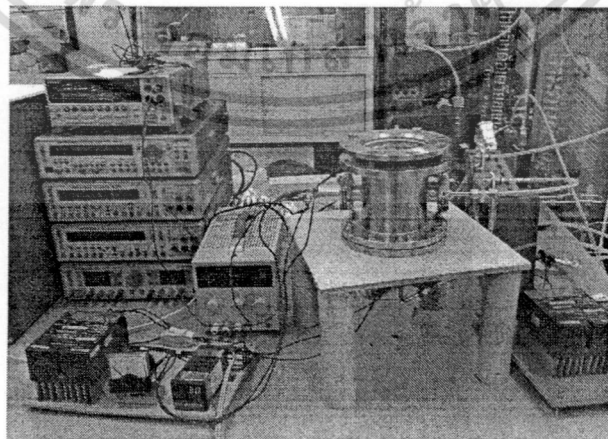
การทดสอบนี้เราใช้ก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) และก๊าซแอลพีจี ในการทดสอบเซ็นเซอร์อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนและความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจี ถูกควบคุมโดย Mass flow controllers ซึ่งใช้โปรแกรม Lab View ในการควบคุมการวัดทดสอบและบันทึกผลที่ได้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ภาพถ่ายโดยรวมของระบบที่จะทำการทดสอบ

### 3.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- ก๊าซไนโตรเจน ทำหน้าที่เป็นก๊าซพาก๊าซแอลพีจีเข้ามาเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจีตามที่ต้องการ
- DAQ board (Data acquisition board) เป็นบอร์ดที่ใช้เชื่อมต่อสัญญาณการควบคุม 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



รูปที่ 3.19 ภาพถ่ายของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

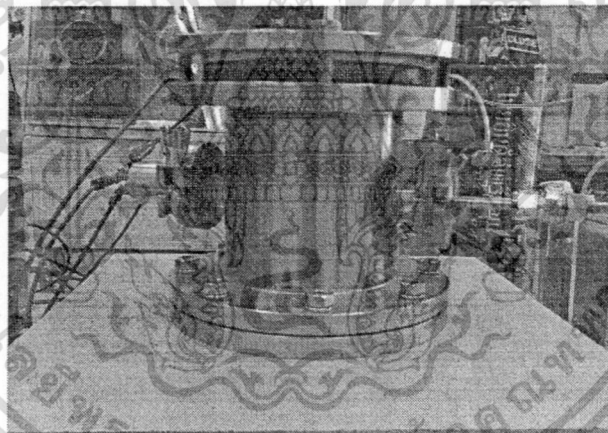
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องมือวัดและจ่ายแรงดัน/กระแสไฟฟ้าของบริษัท Keithley รุ่น 2400 ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ภาพถ่ายเครื่องวัดและจ่ายแรงดัน/กระแสไฟฟ้า

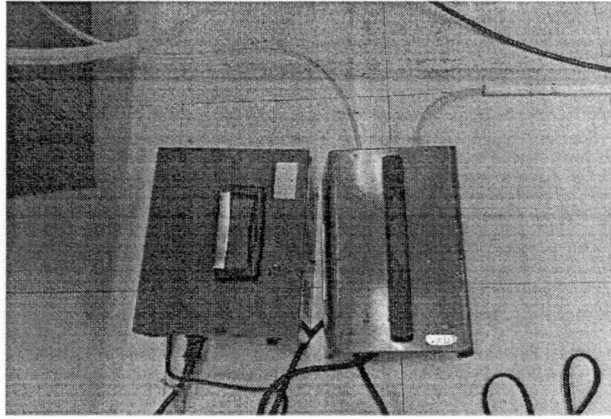
- ภาชนะที่ใช้บรรจุเซ็นเซอร์ ซึ่งมีปริมาตร 886 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยภาชนะประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าสำหรับต่อเชื่อมเซ็นเซอร์กับเครื่องมือวัด Keithley รุ่น 2400 ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ภาพถ่ายภาชนะที่บรรจุเซ็นเซอร์

- เครื่องคอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่ติดต่อเครื่อง มือวัด Keithley รุ่น 2400 และ DAQ board ด้วย โปรแกรม LabView Version 7.1 ในเพื่อบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวเซ็นเซอร์เมื่อทดสอบด้วยก๊าซแอลพีจี
- เครื่องจ่ายกระแสให้ฮีตเตอร์ 2 เครื่อง
- ปุ่มดูดก๊าซและเครื่องแปลง ไฟฟ้าสลับจาก 220 โวลต์ เป็น 110 โวลต์ ซึ่งทำหน้าที่ดูดก๊าซแอลพีจีและก๊าซไนโตรเจนออก ดังรูปที่ 3.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 ภาพถ่ายบับดูคิก๊าซและเครื่องแปลงไฟฟ้า

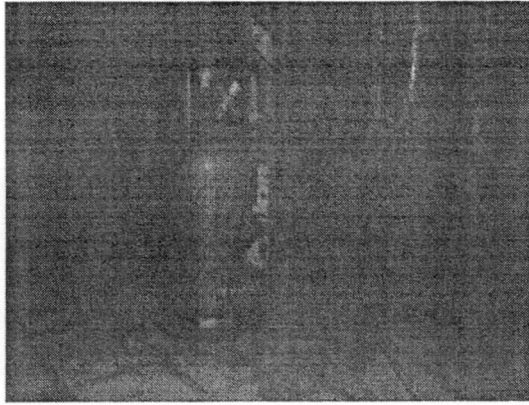
- โปรแกรมทดสอบ ในที่นี้ใช้ โปรแกรม Lab View Version 7.1 เป็นตัวควบคุมการเปิดปิดและปริมาณของก๊าซไนโตรเจน และก๊าซแอลพีจี



รูปที่ 3.23 ภาพโปรแกรม Lab View

- ถึงบรรจุก๊าซแอลพีจี เนื่องจากว่าก๊าซชนิดนี้สามารถติดไฟได้ตั้งนั้นแล้วควรเก็บไว้ให้ห่างจากบริเวณที่จะทำการทดสอบ เพราะว่าในบริเวณที่ทดสอบเช่นเซอร์นั้นต้องให้ความร้อนกับฮีตเตอร์ อาจจะมีประกายไฟจากการที่ต่อขั้วไฟฟ้าไม่ดี ทำให้เกิดไฟติดขึ้น อาจเป็นอันตรายต่อชีวิตได้

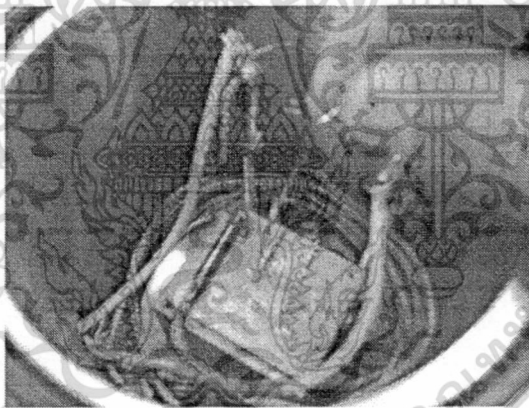
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



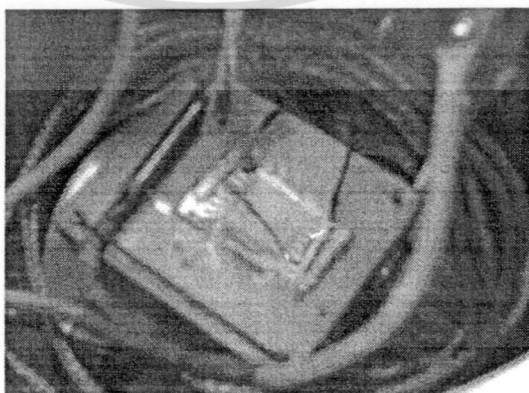
รูปที่ 3.24 ภาพถ่ายถึงบรรจุภัณฑ์แอลพีจีที่ถูกเก็บไว้ในที่ปลอดภัย

### 3.5.2 ขั้นตอนการติดตั้งเซนเซอร์ในภาชนะบรรจุเชื้อเพลิง

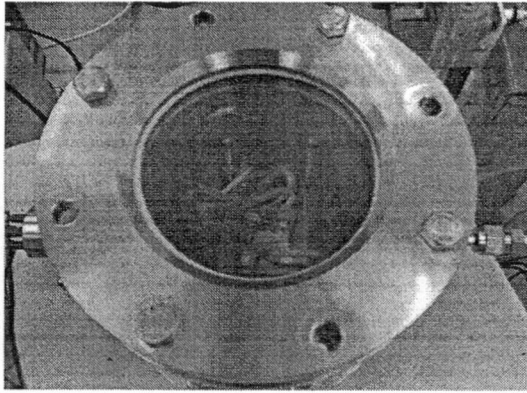
ก่อนที่จะทำการนำเซนเซอร์ไปใส่ในภาชนะที่จะทำการทดสอบเราจะต้องทำการทากาวเงินก่อน เพื่อให้เซนเซอร์แนบสนิทกับแท่น ความร้อนก็จะถูกส่งผ่านจากแท่นไปสู่เซนเซอร์ให้เซนเซอร์มีอุณหภูมิที่แท้จริงในการทดสอบ ดังรูปที่ 3.25 จากนั้นก็นำเซนเซอร์มาวางโดยต่อขั้วสองข้างของเซนเซอร์ด้วยสายไฟแล้วทากาวเงินที่ขั้วอีกที ดังรูปที่ 3.26-27



รูปที่ 3.25 ภาพถ่ายการทากาวเงินก่อนวางเซนเซอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 3.26 ภาพถ่ายการวางเซนเซอร์ที่แท่นพร้อมทั้งทากาวเงินที่ขั้วเซนเซอร์ทั้ง 2 ข้าง ด้านการดำเนินงานด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 ภาพถ่ายเซนเซอร์พร้อมที่จะทดสอบ

### 3.5.3 การทดสอบเซนเซอร์กับก๊าซแอลพีจี

การทดสอบเซนเซอร์ก๊าซแอลพีจีนี้ ก็เพื่อศึกษาผลของความดันทานที่เปลี่ยนไปของเซนเซอร์ เนื่องมาจากผลของตัวแปรที่ใช้ทดสอบเช่น ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซแอลพีจี อุณหภูมิ เป็นต้น

ในการทดสอบเซนเซอร์ก๊าซแอลพีจีนี้เราจะใช้ปริมาณของก๊าซไนโตรเจนคงที่ 1000 sccm เพื่อจะได้ใช้เป็นค่ามาตรฐานสำหรับเซนเซอร์ตัวอื่นๆที่จะนำมาเปรียบเทียบ โดยเราจะทำการทดสอบก๊าซแอลพีจีที่ความปริมาตรความเข้มข้นที่ 1.68%, 3.32%, 4.90%, 6.42% ตามลำดับ

ก่อนที่จะทำการทดสอบเซนเซอร์กับก๊าซแอลพีจี เราจำเป็นต้องล้างท่อของก๊าซแอลพีจีก่อน โดยการไล่ก๊าซแอลพีจีที่ค้างในท่อออกให้หมด แล้วทำการเปิดวาล์วของก๊าซแล้วปิดทันที จากนั้นก็ไล่ก๊าซแอลพีจีออกให้หมดอีกครั้ง เราก็จะได้ก๊าซแอลพีจีที่บริสุทธิ์มาทำการทดสอบกับเซนเซอร์

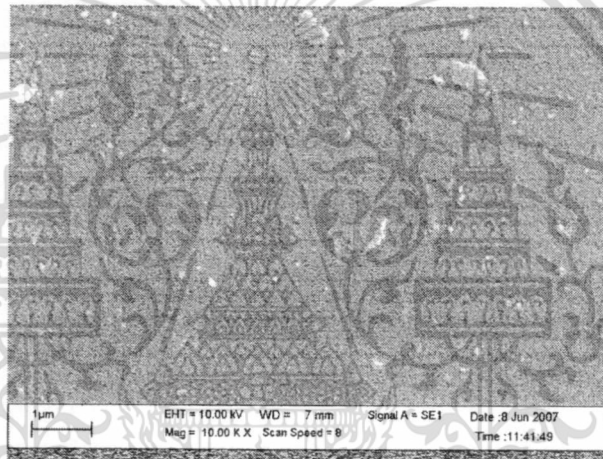
## บทที่ 4 ผลการทดลอง

การทดสอบเซ็นเซอร์เราจะทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง, 250 องศาเซลเซียส, 300 องศาเซลเซียส และ 400 องศาเซลเซียส โดยจะแบ่งผลการทดสอบเป็น 2 แบบ คือแบบไม่โด๊ป  $\text{NH}_4\text{F}$  และแบบ โด๊ป  $\text{NH}_4\text{F}$  บนฐานรองที่เป็นกระຈกและอะลูมิน่า

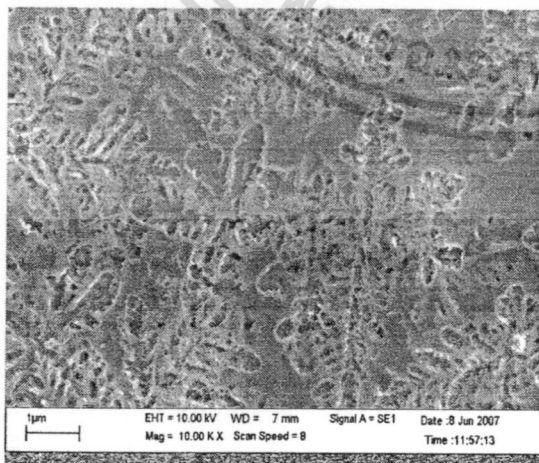
### 4.1 ผลจากการส่อง SEM

#### 4.1.1 บนฐานรองที่เป็นกระຈก

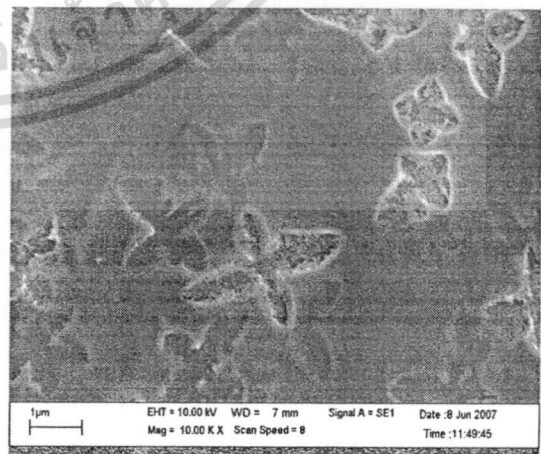
รูปที่ 4.1 เป็นภาพ  $\text{SnO}_2$  บนกระຈก การเกิด  $\text{SnO}_2$  จะสม่ำเสมอทั้งแผ่นกระຈก ถ้าหากเราทำการโด๊ป  $\text{NH}_4\text{F}$  จะทำให้พื้นผิวของฟิล์มไม่เรียบ แต่เหมือนปริ้วแตกออก ดังผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.2 และถ้าเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ  $\text{NH}_4\text{F}$  ขึ้นอีกจะทำให้ผิวที่แตกออกลดน้อยลงแต่ลึกขึ้น ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย  $\text{SnO}_2$  ฐานรองที่เป็นกระຈก



รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย  $\text{SnO}_2$  บนกระຈก โด๊ป  $\text{NH}_4\text{F}$  4.5%

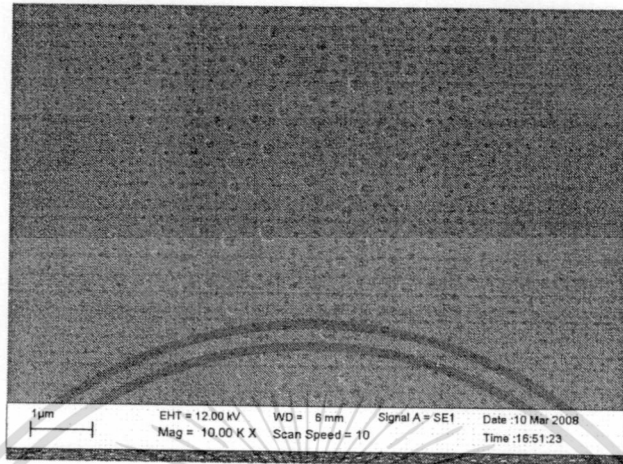


รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย  $\text{SnO}_2$  บนกระຈก โด๊ป  $\text{NH}_4\text{F}$  10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 บนฐานรองอะลูมินา

รูปที่ 4.4 เป็นฟิล์ม  $\text{SnO}_2$  ที่เกิดขึ้นบนฐานรองอะลูมินาโดยการไม่ไดโป ฟิล์มทินออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเรียบกว่าฟิล์มที่ปลูกขึ้นบนฐานรองกระจก (รูปที่ 4.1) แต่บางบริเวณก็จะมีลักษณะเป็นหลุมกลมขนาดไม่เกิน 300 nm



รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย  $\text{SnO}_2$  บนฐานรองอะลูมินา



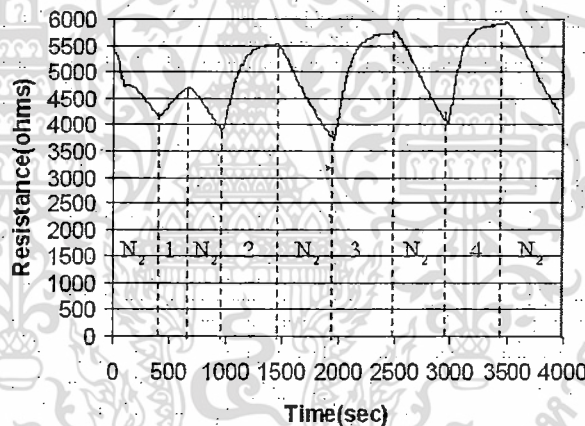
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลของเซ็นเซอร์ที่ไม่ได้ปี $NH_4F$ บนฐานรองที่เป็นกระจก

รูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 เป็นผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่ได้ทำการจุ่ม 10 ครั้ง, 15 ครั้ง และ 20 ครั้ง ตามลำดับ โดยที่ไม่ทำการได้ปีด้วย  $NH_4F$  ซึ่งการทดสอบนี้เราทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และใช้ในโตรเจนคงที่ 1000 sccm ซึ่งอธิบายได้ดังตารางที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าความต้านทานของฟิล์มทินออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่สภาวะของก๊าซแอลพีจี แต่ความต้านทานจะลดกลับเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจนอีกครั้ง ซึ่งการตอบสนองดังกล่าวเป็นการตอบสนองปกติของก๊าซเซ็นเซอร์ที่สร้างจากฟิล์มทินออกไซด์ นอกจากนี้ พบว่า เซ็นเซอร์ที่ได้ทำการจุ่ม 15 ครั้ง มีค่าความไวการตอบสนองดีที่สุด ในขณะที่ เซ็นเซอร์ที่ทำการจุ่ม 20 ครั้ง มีค่าความไวการตอบสนองใกล้เคียงกันทุกความเข้มข้นของก๊าซที่ทดสอบ กล่าวคือ มีความไวในการวัดที่ต่ำนั่นเอง

รูปที่ 4.8 4.9 และ 4.10 เป็นผลการทดสอบเซ็นเซอร์ข้างต้น (ที่ได้ทำการจุ่ม 10, 15 ครั้ง และ 20 ครั้ง ตามลำดับ) โดยทำการทดสอบนี้เราทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4.4 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ) จากรูปจะเห็นได้ชัดเจนว่าการตอบสนองและการคืนกลับสู่สภาพเดิมของเซ็นเซอร์จะดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิทดสอบเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติทั่วไปของก๊าซเซ็นเซอร์ที่สร้างจากฟิล์มของออกไซด์โลหะ โดยที่ เซ็นเซอร์ที่ได้ทำการจุ่ม 10 ครั้ง มีค่าความไวการตอบสนองและค่าความไวในการวัดอยู่ในเกณฑ์ที่สูง และยังคงคืนกลับสู่สภาพเดิมได้ดีที่สุดอีกด้วย ในขณะที่ เซ็นเซอร์ที่สร้างจากฟิล์มที่หนาขึ้น (จุ่ม 20 ครั้ง) กลับมีความไวในการวัดที่ต่ำกว่า

(หมายเหตุ: เซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นทุกตัวไม่สามารถตอบสนองต่อก๊าซแอลพีจีได้ ถ้าอุณหภูมิทดสอบต่ำกว่า  $250^{\circ}C$ ):

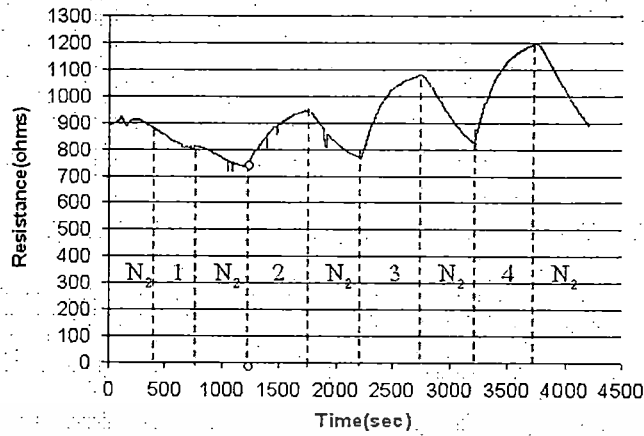


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนฐานรองที่เป็นกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนฐานรองที่เป็นกระจก) โดย  $R = 5.25 K\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลาทดสอบ(sec)	R ก่อน ( $K\Omega$ )	R หลัง ( $K\Omega$ )	$\Delta R(K\Omega)$	$S = \Delta R/R_{ก่อน}$
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

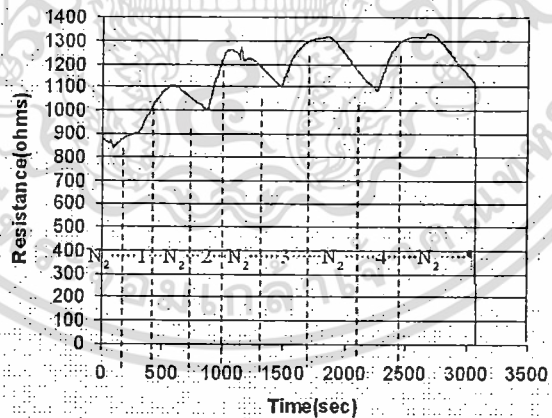
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนฐานรองที่เป็นกระบอก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนฐานรองที่เป็นกระบอก) โดย  $R = 900 \Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาดูดซับ(sec)	R ก่อน (K $\Omega$ )	R หลัง (K $\Omega$ )	$\Delta R$ (K $\Omega$ )	$S = \Delta R/R$ ก่อน
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

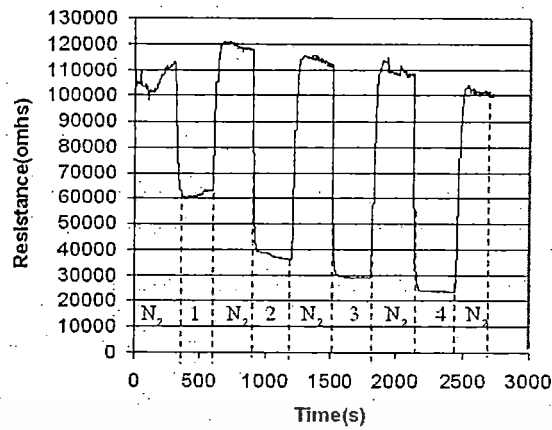


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนฐานรองที่เป็นกระบอก) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนฐานรองที่เป็นกระบอก) โดย  $R = 867 \Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาดูดซับ(sec)	R ก่อน (K $\Omega$ )	R หลัง (K $\Omega$ )	$\Delta R$ (K $\Omega$ )	$S = \Delta R/R$ ก่อน
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

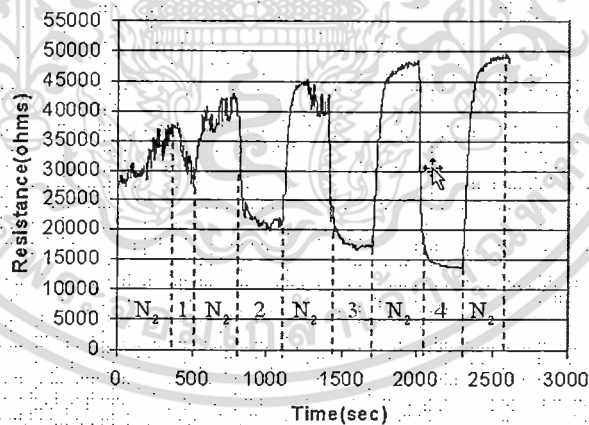
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนฐานรองที่เป็นกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

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

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาดูดซับ(sec)	R ก่อน ( $\text{K}\Omega$ )	R หลัง ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R(\text{K}\Omega)$	$S = \Delta R/R$ ก่อน
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



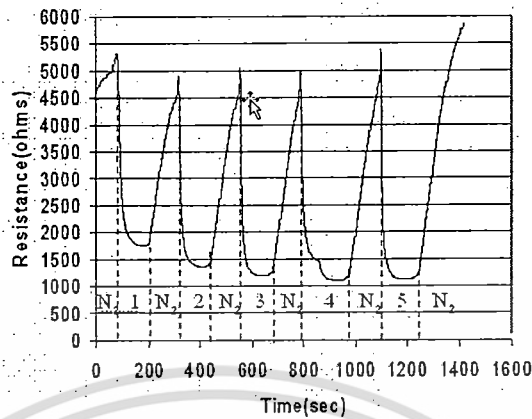
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนฐานรองที่เป็นกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

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

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาดูดซับ(sec)	R ก่อน ( $\text{K}\Omega$ )	R หลัง ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R(\text{K}\Omega)$	$S = \Delta R/R$ ก่อน
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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง (ไม่ได้ป้ บนฐานรองที่เป็นกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง (ไม่ได้ป้ บนฐานรองที่เป็นกระจก)  $R = 4.67 \text{ K}\Omega$  ที่ 400 องศาเซลเซียส

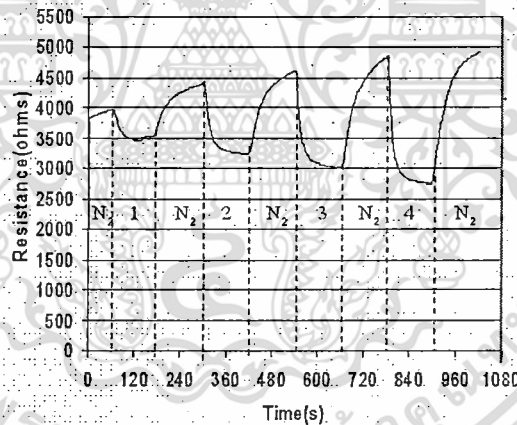
ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาดทดสอบ(sec)	R ก่อน ( $\text{K}\Omega$ )	R หลัง ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R(\text{K}\Omega)$	$S = \Delta R/R_{\text{ก่อน}}$
1	LPG	1.68%	120	5.23	1.83	3.40	0.65
2	LPG	3.32%	120	4.87	1.48	3.39	0.69
3	LPG	4.90%	120	5.03	1.33	3.70	0.73
4	LPG	6.42%	120	5.01	1.16	3.85	0.76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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลของเซ็นเซอร์ที่ไม่ได้ป้ $NH_4F$ บนฐานรองที่เป็นอะลูมิน่า

รูปที่ 4.11 4.12 และ 4.13 เป็นผลการทดสอบเซ็นเซอร์ไม่ทำการได้ป้ที่สร้างขึ้นบนฐานรองอะลูมิน่า โดยทำการจุ่ม 10 ครั้ง, 15 ครั้ง และ 20 ครั้ง ตามลำดับ ซึ่งการทดสอบนี้เราทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และใช้ในโตรเจนคงที่ 1000 sccm ซึ่งอธิบายได้ดังตารางที่ 4.7 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าความต้านทานของฟิล์มทินออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่สภาวะของก๊าซแอลพีจี แต่ความต้านทานจะลดลงเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจนอีกครั้ง เช่นเดียวกับเซ็นเซอร์ไม่ทำการได้ป้ที่สร้างขึ้นบนฐานรองกระจก เซ็นเซอร์ที่ได้ทำการจุ่ม 15 ครั้ง มีค่าความไวการตอบสนองดีที่สุด อย่างไรก็ตามค่าความไวในการวัดต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเซ็นเซอร์ที่ได้ทำการจุ่ม 10 ครั้ง ในขณะที่ เซ็นเซอร์ที่ทำการจุ่ม 20 ครั้ง มีประสิทธิภาพการคืนกลับสู่ค่าเดิมที่ต่ำมากๆ ทำให้ค่าความไวการตอบสนองลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซที่ทดสอบ

รูปที่ 4.14 4.15 และ 4.16 เป็นผลการทดสอบเซ็นเซอร์ข้างต้น (ที่ได้ทำการจุ่ม 10, 15 ครั้ง และ 20 ครั้ง ตามลำดับ) โดยทำการทดสอบนี้เราทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4.10 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ) จากรูปจะเห็นได้ชัดเจนว่าการตอบสนองและการคืนกลับสู่สภาพเดิมของเซ็นเซอร์จะดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิทดสอบเพิ่มสูงขึ้น ยกเว้นเซ็นเซอร์ที่ทำการจุ่ม 20 ครั้ง อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับเซ็นเซอร์ไม่ทำการได้ป้ที่สร้างขึ้นบนฐานกระจกจะพบว่า เซ็นเซอร์ไม่ทำการได้ป้ที่สร้างขึ้นบนฐานรองอะลูมิน่าจะมีค่าเวลาตอบสนองและค่าเวลาคืนกลับสู่สภาพเดิมมากกว่า

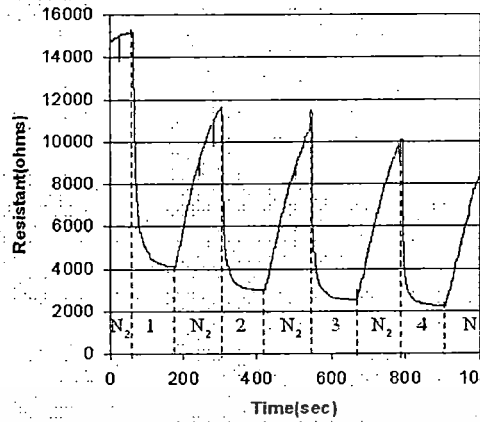


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง (ไม่ได้ป้ บนอะลูมิน่า) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง (ไม่ได้ป้ บนอะลูมิน่า)  $R = 3.87 K\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาทดสอบ(sec)	R ก่อน ( $K\Omega$ )	R หลัง ( $K\Omega$ )	$\Delta R(K\Omega)$	$S = \Delta R/R$ ก่อน
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

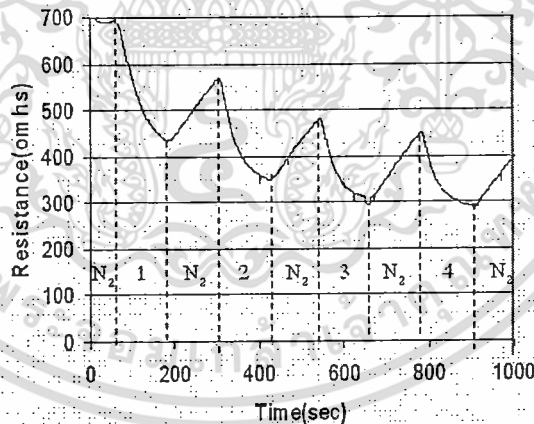
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนอะลูมิเนียม) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

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

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาดูดซับ(sec)	R ก่อน ( $\text{K}\Omega$ )	R หลัง ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R(\text{K}\Omega)$	$S = \Delta R/R_{\text{ก่อน}}$
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

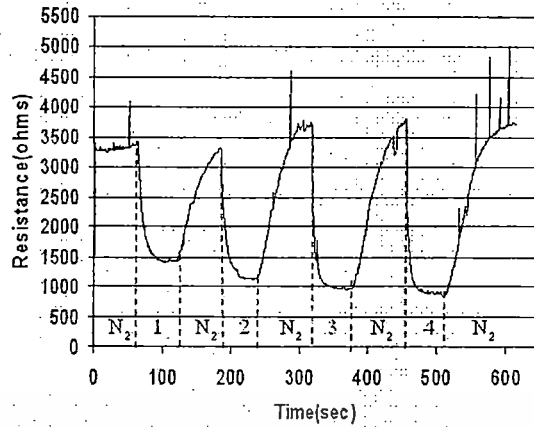


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนอะลูมิเนียม) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

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

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาดูดซับ(sec)	R ก่อน ( $\text{K}\Omega$ )	R หลัง ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R(\text{K}\Omega)$	$S = \Delta R/R_{\text{ก่อน}}$
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

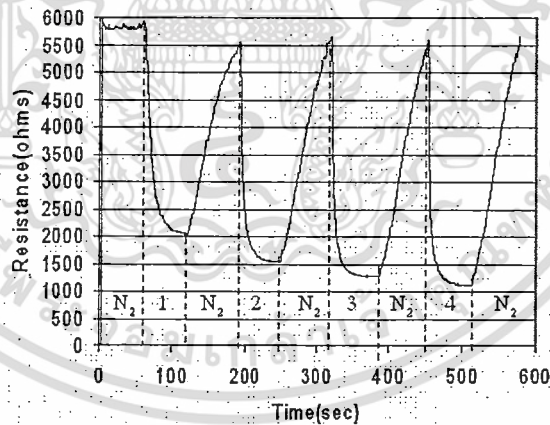
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนอะลูมิเนียม) ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

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

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาทดสอบ(sec)	R ก่อน ( $\text{K}\Omega$ )	R หลัง ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R(\text{K}\Omega)$	$S = \Delta R/R$ ก่อน
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

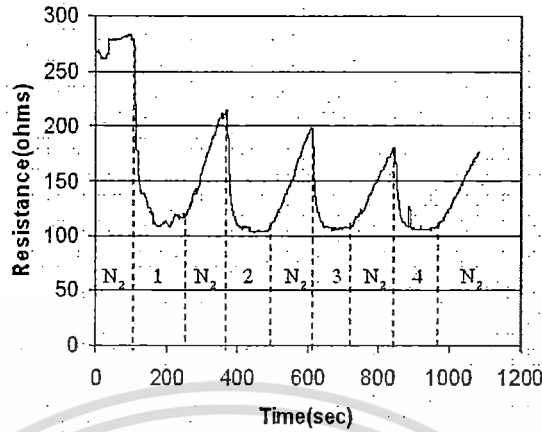


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง (ไม่ได้ปี บนอะลูมิเนียม) ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

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

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาทดสอบ(sec)	R ก่อน ( $\text{K}\Omega$ )	R หลัง ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R(\text{K}\Omega)$	$S = \Delta R/R$ ก่อน
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

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง (ไม่ได้เป่า บนอะลูมินา) ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง (ไม่ได้เป่า บนอะลูมินา)  $R = 0.26 \text{ K}\Omega$  ที่ 400 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลาดูดซับ(sec)	R ก่อน ( $\text{K}\Omega$ )	R หลัง ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R (\text{K}\Omega)$	$S = \Delta R / R_{\text{ก่อน}}$
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  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

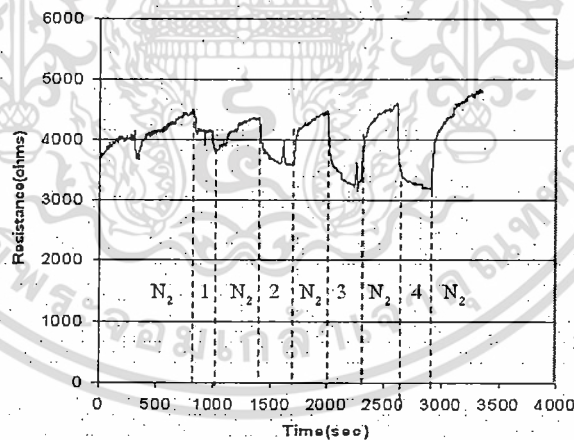
#### 4.4 ผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่ทำจากโด้ป $NH_4F$

ในการทดลองนี้จะใช้กระจกเป็นฐานรอง ทำการควบคุมปริมาณที่โด้ปให้คงที่ที่ 4.5% แต่จะปรับเปลี่ยนจำนวนครั้งในการจุ่ม และในการทดสอบ เราใช้เงื่อนไขเดียวกันกับการทดสอบเซ็นเซอร์แบบไม่โด้ป โดยทดสอบที่อุณหภูมิห้อง, 250 องศาเซลเซียส, 300 องศาเซลเซียส, 400 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซไนโตรเจนคงที่ 1000 sccm , ก๊าซแอลพีจีที่ใช้ทดสอบจะเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น 1.68%, 3.32%, 4.90% และ 6.42%

รูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นที่การจุ่ม 10 ครั้ง ที่อุณหภูมิทดสอบที่ 300 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ตารางที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ) รูปที่ 4.19 4.20 และ 4.21 แสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นที่การจุ่ม 15 ครั้ง ที่อุณหภูมิทดสอบที่ 250 300 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ตารางที่ 4.15 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ) รูปที่ 4.22 และ 4.23 แสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นที่การจุ่ม 10 ครั้ง ที่อุณหภูมิทดสอบที่ 300 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ตารางที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ)

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่า เซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นที่การจุ่มน้อยครั้ง หรือเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นจากฟิล์มทินออกไซด์ที่บาง จะมีอุณหภูมิที่เซ็นเซอร์สามารถทำงานได้ ที่ต่ำกว่า เซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นที่การจุ่มมากครั้ง หรือเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นจากฟิล์มที่หนา ยกตัวอย่างเช่น เซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นที่การจุ่ม 15 ครั้ง เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จะมีประสิทธิภาพการคืนกลับสู่สภาพเดิมที่ไม่ดีนัก แต่เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส ก็ดีขึ้น ในขณะที่ เซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นที่การจุ่ม 20 ครั้ง แม้ทดสอบที่อุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส ก็ไม่สามารถคืนกลับสู่สภาพเดิมได้ดีเท่าที่ควร

การผลการทดลองนี้ สามารถสรุปได้ว่า เซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นที่การจุ่ม 15 ครั้ง มีประสิทธิภาพดีที่สุด กล่าวคือ มีค่าความไวการตอบสนองและค่าความไวในการวัดอยู่ในเกณฑ์ที่สูง และยังคืนกลับสู่สภาพเดิมได้ดี ยิ่งไปกว่านั้น ยังสามารถทำงานอย่างเสถียรได้ที่อุณหภูมิค่า ประมาณ 300-400 องศาเซลเซียส

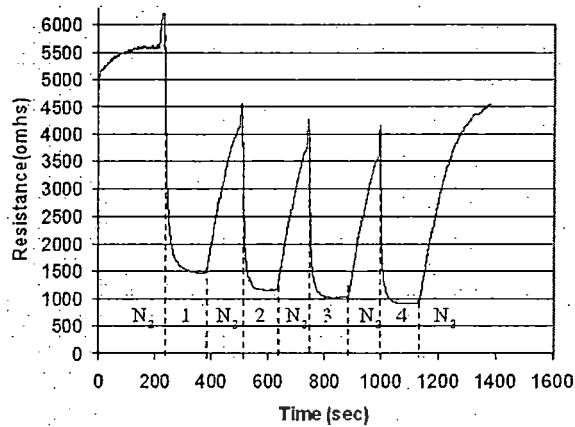


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง โด้ป  $NH_4F$  4.5% (บนกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง โด้ป  $NH_4F$  4.5% (บนกระจก)  $R = 4 K\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาทดสอบ(sec)	R ก่อน ( $K\Omega$ )	R หลัง ( $K\Omega$ )	$\Delta R(K\Omega)$	$S = \Delta R/R$ ก่อน
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

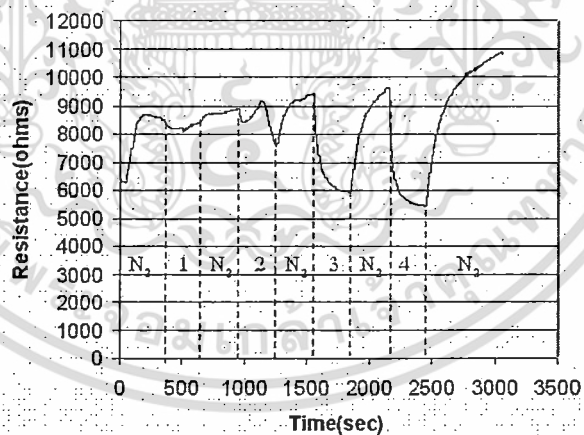
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลการจุ่ม 10 ครั้ง ได้  $NH_4F$  4.5% (เบนระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 10 ครั้ง ได้  $NH_4F$  4.5% (เบนระจก)  $R = 5 K\Omega$  ที่ 400 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาดูดซับ(sec)	R ก่อน ( $K\Omega$ )	R หลัง ( $K\Omega$ )	$\Delta R(K\Omega)$	$S = \Delta R/R$ ก่อน
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



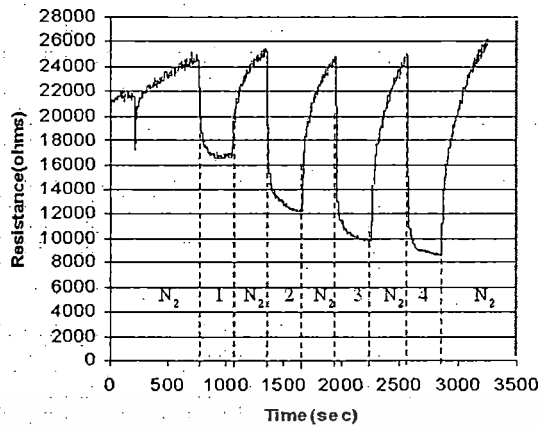
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้  $NH_4F$  4.5% (เบนระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (เบนระจก)  $R = 6.34 K\Omega$  ที่ 250 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาดูดซับ(sec)	R ก่อน ( $K\Omega$ )	R หลัง ( $K\Omega$ )	$\Delta R(K\Omega)$	$S = \Delta R/R$ ก่อน
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

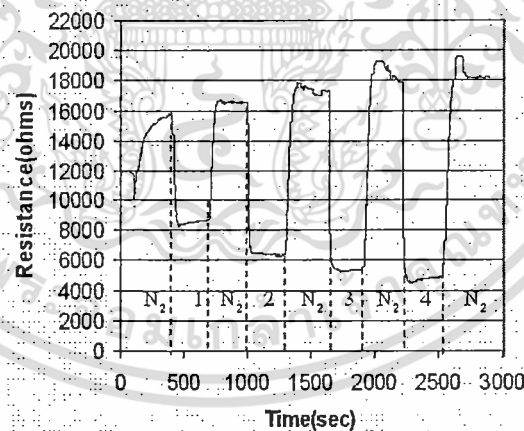
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้  $NH_4F$  4.5% (เบนระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.16 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (เบนระจก)  $R = 21.58 K\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาดทดสอบ(sec)	R ก่อน ( $K\Omega$ )	R หลัง ( $K\Omega$ )	$\Delta R(K\Omega)$	$S = \Delta R/R$ ก่อน
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



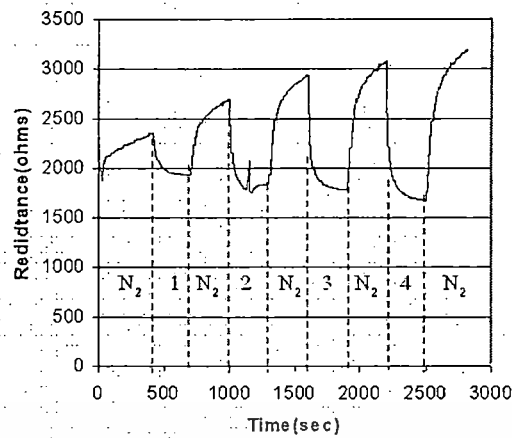
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้  $NH_4F$  4.5% (เบนระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.17 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (เบนระจก)  $R = 11.56 K\Omega$  ที่ 400 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาดทดสอบ(sec)	R ก่อน ( $K\Omega$ )	R หลัง ( $K\Omega$ )	$\Delta R(K\Omega)$	$S = \Delta R/R$ ก่อน
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของกรมการช่างเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

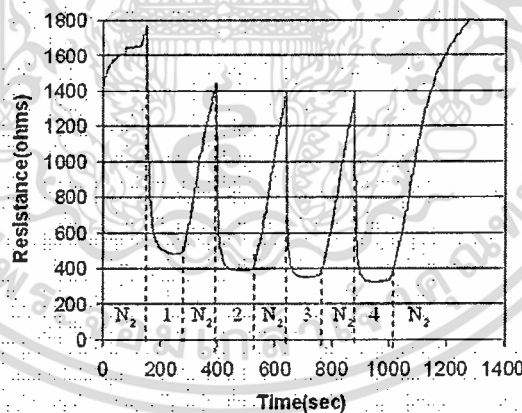
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง ได้ปี  $NH_4F$  4.5% (บนกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.18 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง (บนกระจก)  $R = 2.04 K\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาดูดซับ(sec)	R ก่อน ( $K\Omega$ )	R หลัง ( $K\Omega$ )	$\Delta R(K\Omega)$	$S = \Delta R/R$ ก่อน
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



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง ได้ปี  $NH_4F$  4.5% (บนกระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.19 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 20 ครั้ง (บนกระจก)  $R = 1.50 K\Omega$  ที่ 400 องศาเซลเซียส

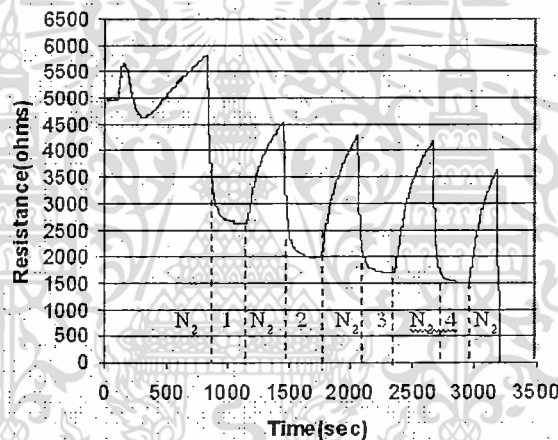
ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาดูดซับ(sec)	R ก่อน ( $K\Omega$ )	R หลัง ( $K\Omega$ )	$\Delta R(K\Omega)$	$S = \Delta R/R$ ก่อน
1	LPG	1.68%	120	1.75	0.50	1.25	0.71
2	LPG	3.32%	120	1.44	0.42	1.02	0.71
3	LPG	4.90%	120	1.40	0.40	1.00	0.71
4	LPG	6.42%	120	1.40	0.35	1.05	0.75

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 ผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่ปรับเปลี่ยนปริมาณโด๊ป $NH_4F$

เนื่องจากพบว่าเซ็นเซอร์ที่ทำการทดสอบกับก๊าซแอลพีจี ที่จุ่ม 15 ครั้ง โด๊ป 4.5 % ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส คีสุดเราจึงได้สร้างเซ็นเซอร์ที่จุ่ม 15 ครั้งเช่นกัน แต่เปลี่ยนการโด๊ปสาร  $NH_4F$  เป็น 1%, 3.5%, 4.5 %, 5.5 %, 7.5% และ 10% เพื่อนำมาทดสอบกับก๊าซแอลพีจีที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ดังกราฟรูปที่ 4.24-2.28 (ตารางที่ 4.20 - 4.24)

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.24-2.28 พบว่า ทั้งค่าความไวการตอบสนองและค่าความไวในการวัดขึ้นอยู่กับปริมาณของสารโด๊ป  $NH_4F$  ค่าความไวการตอบสนองจะมีค่าสูงเมื่อปริมาณสารโด๊ปต่ำ (1%-5.5 %) แต่เมื่อไรที่ปริมาณสารโด๊ปมากกว่า 5.5% จะทำให้ค่าความไวการตอบสนองลดลงอย่างมาก (รูปที่ 2.27-2.28) นอกจากนี้ยังพบว่า เซ็นเซอร์ที่สร้างจากปริมาณสารโด๊ปต่ำที่ 1%-3.5% จะมีค่าความไวในการวัดที่ไม่สูงมากนัก แต่ถ้าเพิ่มปริมาณสารโด๊ปให้สูงขึ้นเป็น 4.5%-5.5% จะทำให้ค่าความไวในการวัดสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณสารโด๊ปที่สูงเกินไป  $>7.5\%$  จะทำให้ค่าความไวในการวัดลดต่ำลงอย่างมาก (รูปที่ 2.27-2.28) นอกจากนี้แล้ว เซ็นเซอร์ที่สร้างจากปริมาณสารโด๊ปที่มากกว่า 7.5% มักจะมีเวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนกลับที่นานขึ้นอย่างมาก

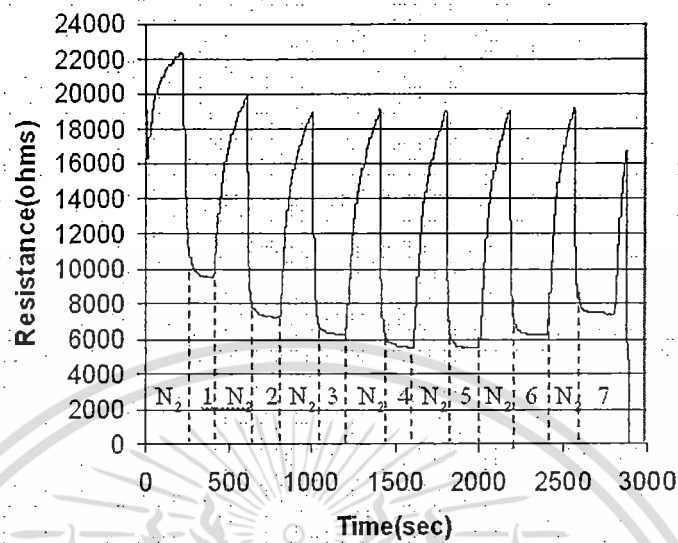


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง โด๊ป  $NH_4F$  1.0% (บนกระดาษก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.20 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (บนกระดาษก)  $R = 5.0 K\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณ LPG	เวลาทดสอบ(sec)	R ก่อน ( $K\Omega$ )	R หลัง ( $K\Omega$ )	$\Delta R(K\Omega)$	$S = \Delta R/R$ ก่อน
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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

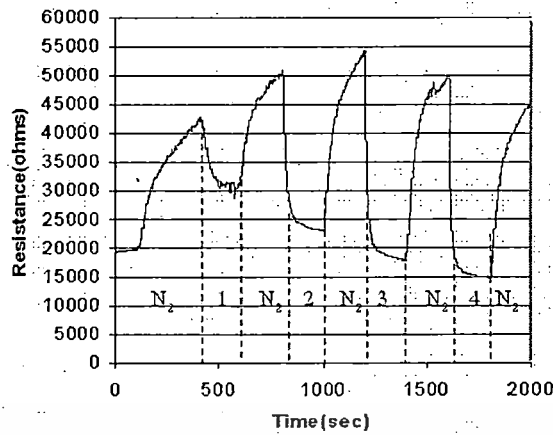


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้  $NH_3$  3.5% (บนกระฉก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.21 แสดงผลการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (บนกระฉก)  $R = 18.86 \text{ K}\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาทดสอบ(sec)	R ก่อน ( $\text{K}\Omega$ )	R หลัง ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R(\text{K}\Omega)$	$S = \Delta R/R_{\text{ก่อน}}$
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

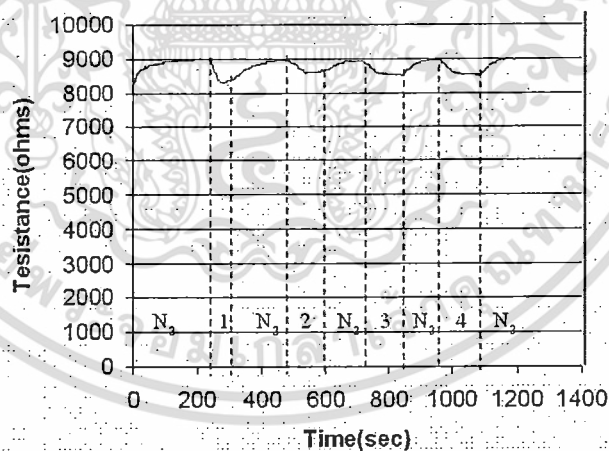
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้  $NH_4F$  5.5% (เบนระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.22 แสดงผลการการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (เบนระจก)  $R = 20.0 K\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาทดสอบ(sec)	R ก่อน ( $K\Omega$ )	R หลัง ( $K\Omega$ )	$\Delta R(K\Omega)$	$S = \Delta R/R$ ก่อน
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

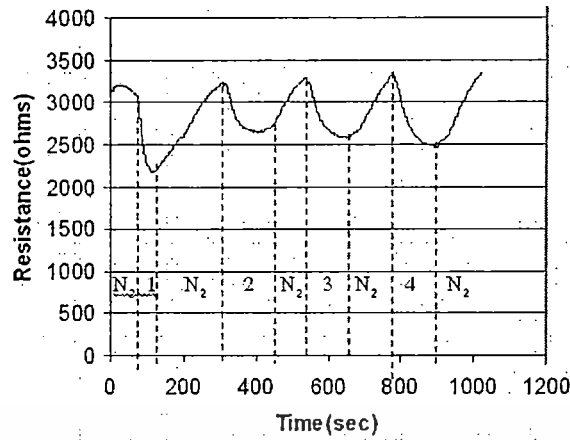


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้  $NH_4F$  7.5% (เบนระจก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.23 แสดงผลการการทดสอบจุ่ม 15 ครั้ง (เบนระจก)  $R = 8.45 K\Omega$  ที่ 300 องศาเซลเซียส

ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาทดสอบ(sec)	R ก่อน ( $K\Omega$ )	R หลัง ( $K\Omega$ )	$\Delta R(K\Omega)$	$S = \Delta R/R$ ก่อน
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงผลการจุ่ม 15 ครั้ง ได้  $NH_3$  10% (บนกระชก) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

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

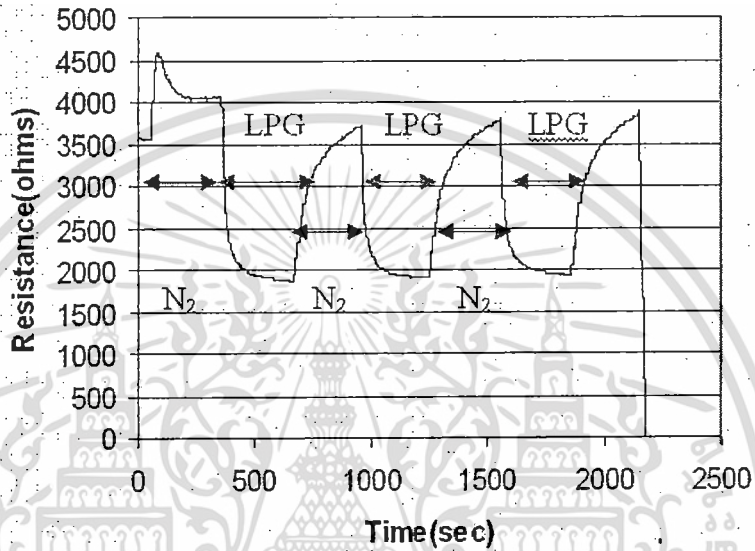
ช่วงที่	ก๊าซทดสอบ	ปริมาณLPG	เวลาทดสอบ(sec)	R ก่อน ( $\text{K}\Omega$ )	R หลัง ( $\text{K}\Omega$ )	$\Delta R$ ( $\text{K}\Omega$ )	$S = \Delta R/R$ ก่อน
1	LPG	1.68%	120	3.02	2.20	0.82	0.27
2	LPG	3.32%	120	3.14	2.70	0.44	0.14
3	LPG	4.90%	120	3.21	2.61	0.60	0.18
4	LPG	6.42%	120	3.27	2.51	0.76	0.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 ผลของเซ็นเซอร์ต่อก๊าซแอลพีจีคิงที่

เนื่องจากเราต้องการศึกษาผลความเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทาน ที่ทดสอบกับก๊าซแอลพีจีในปริมาณความเข้มข้น 20% 3 ครั้ง เราจึงนำเซ็นเซอร์ที่ทำการจุ่ม 20 ครั้ง และ โด๊ป  $NH_4F$  4.5% มาทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ได้ผลดังรูปที่ 4.29

ผลการทดลองที่ได้เป็นการยืนยันว่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงยังคงเท่าเดิมแม้ทดสอบ อย่างต่อเนื่อง 3 ครั้งก็ตาม แสดงให้เห็นว่า เซ็นเซอร์ที่สร้างจากฟิล์มทินออกไซด์มีประสิทธิภาพในการวัดซ้ำที่ดี



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงผลการจุ่ม 20 ครั้ง โด๊ป  $NH_4F$  4.5% ทดสอบก๊าซแอลพีจีความเข้มข้น 20% ทดสอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

#### 4.6 ผลของความไวในการวัด (Response)

ความไวการตอบสนอง (Response) คือ ความสามารถในการตอบสนองอย่างรวดเร็วในทันทีเมื่อก๊าซที่เราทำการวัดมาสัมผัสกับก๊าซ เซ็นเซอร์คุณสมบัติข้อนี้มีความสำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อก๊าซ ที่เราทำการวัดเป็นก๊าซพิษหรือก๊าซไวไฟ เพื่อเราจะได้หลีกเลี่ยง และแก้ไขได้ทันที ก่อนที่จะได้รับอันตรายหรือเกิดเหตุร้ายแรงในบริเวณที่ทำการวัดก๊าซ หากก๊าซรั่วไหลออกมา

$$\text{จาก Response (S)} = \frac{\Delta R}{R_{\text{ก่อน}}}$$

โดยที่

$\Delta R$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความต้านทาน ( $R_{\text{ก่อน}} - R_{\text{หลัง}}$ )

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

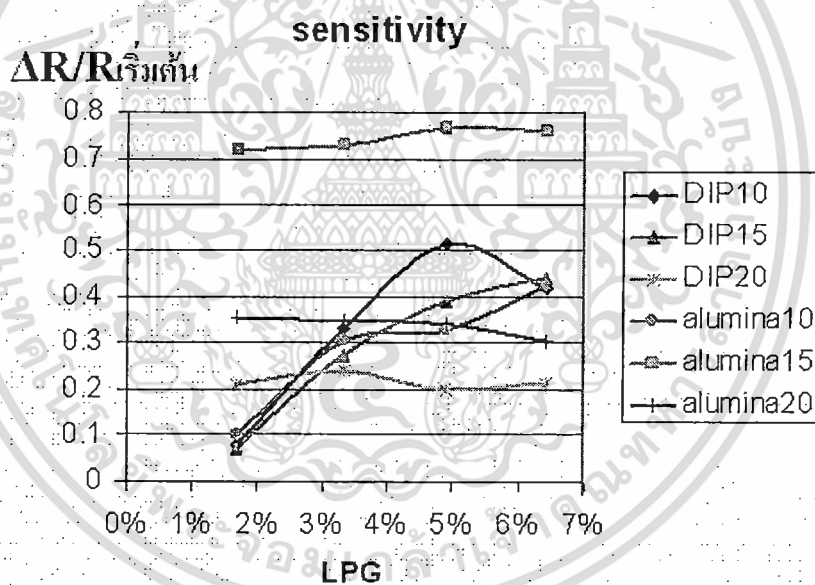
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรานำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเซ็นเซอร์ก่อนหน้านี้มาสร้างกราฟเพื่อจะได้อ้างอิงถึงความไวของเซ็นเซอร์ในการตรวจจับก๊าซแอลพีจีที่ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งเปรียบเทียบผลระหว่างเซ็นเซอร์แบบที่ใช้ฐานรองเป็นกระจกและฐานรองเป็นอะลูมินา ที่ไม่ได้ปี NH<sub>4</sub>F และที่อุณหภูมิทดสอบต่างกัน (300 องศาเซลเซียส และ 400 องศาเซลเซียส)

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.30 เป็นการยืนยันว่า ที่อุณหภูมิทดสอบต่ำ เซ็นเซอร์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางหรือที่เคลือบด้วยจำนวนครั้งที่น้อยครั้ง ไม่ว่าจะบนกระจกและหรือบนเคลือบบนอลูมินา จะมีค่าความไวในการวัดหรือ Sensitivity ที่ดีกว่าที่เคลือบด้วยฟิล์มหนาหรือที่เคลือบด้วยจำนวนครั้งมากครั้ง

กรณีพื้นฐานรองเป็นกระจก: จุ่มที่ 10-15 ครั้งนั้นมีค่าความไวในการวัดที่ดี กล่าวคือ สามารถแยกปริมาณความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจีได้ดีกว่าที่จุ่มที่ 20 ครั้ง อย่างไรก็ตาม จุ่มที่ 10 ครั้งจะไม่สามารถแยกปริมาณความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจีที่มีความเข้มข้นสูงๆ ได้ ดังนั้นในกรณีของฐานรองกระจก จุ่มที่ 15 ครั้งดีที่สุด

กรณีพื้นฐานรองเป็นอะลูมินา: จุ่ม 10 ครั้งจะมีค่าความไวในการวัดหรือ Sensitivity ที่ดีที่สุดในกรณีที่จำนวนครั้งน้อยกว่าหรือมากกว่านั้น (10 และ 20 ครั้ง) ค่าความไวการตอบสนองจะไม่ค่อยขึ้นกับความเข้มข้นของก๊าซ ทำให้ค่าความไวในการวัดลดลง



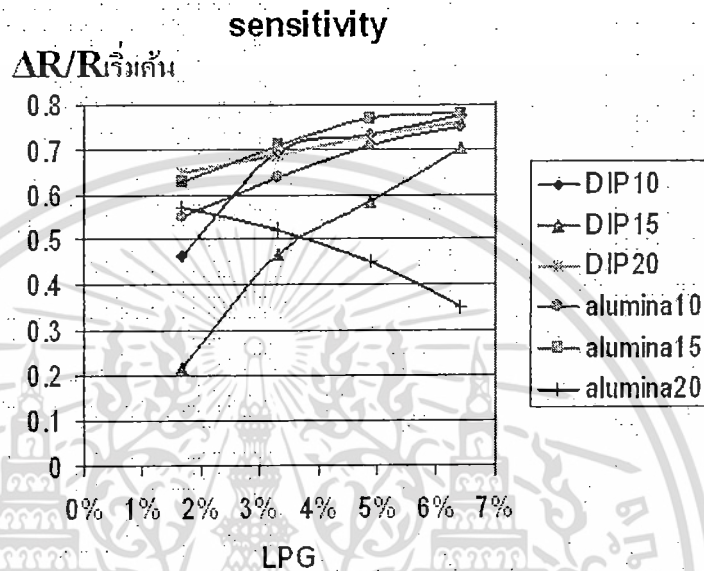
รูปที่ 4.30 ความไวในการวัดของเซ็นเซอร์แบบไม่ได้ปี สร้างขึ้นที่จำนวนครั้งในการจุ่มและชนิดฐานรองต่างกัน ทดสอบที่ 300 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.31 แสดงการประเมินความไวในการวัดของของเซ็นเซอร์ข้างต้น (แบบไม่ไดป์  $NH_4F$  บนกระจกและอะลูมิน่า) ที่อุณหภูมิทดสอบที่ 400 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพของความไวในการวัดหรือ Sensitivity จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิทำงานของเซ็นเซอร์เพิ่มมากขึ้น

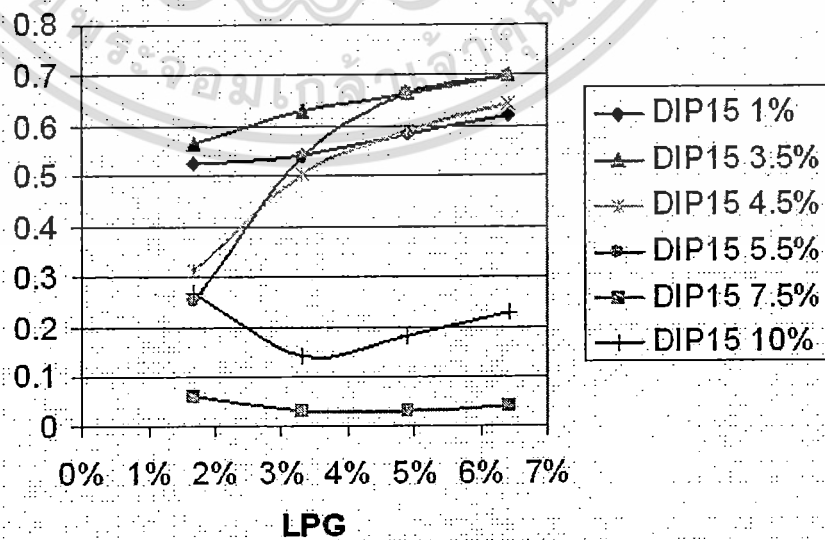
กรณีพื้นฐานรองเป็นฐานรองกระจก: การจุ่ม 10 และ 15 ครั้ง สามารถแยกปริมาณความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจีได้ดีกว่าที่จุ่ม 20 ครั้ง

กรณีพื้นฐานรองเป็นฐานรองอะลูมิน่า: การจุ่ม 10 ครั้ง และ 15 ครั้ง สามารถแยกปริมาณความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจีได้ดี ในขณะที่การจุ่ม 20 นั้นไม่ดีขึ้นแม้อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นก็ตาม



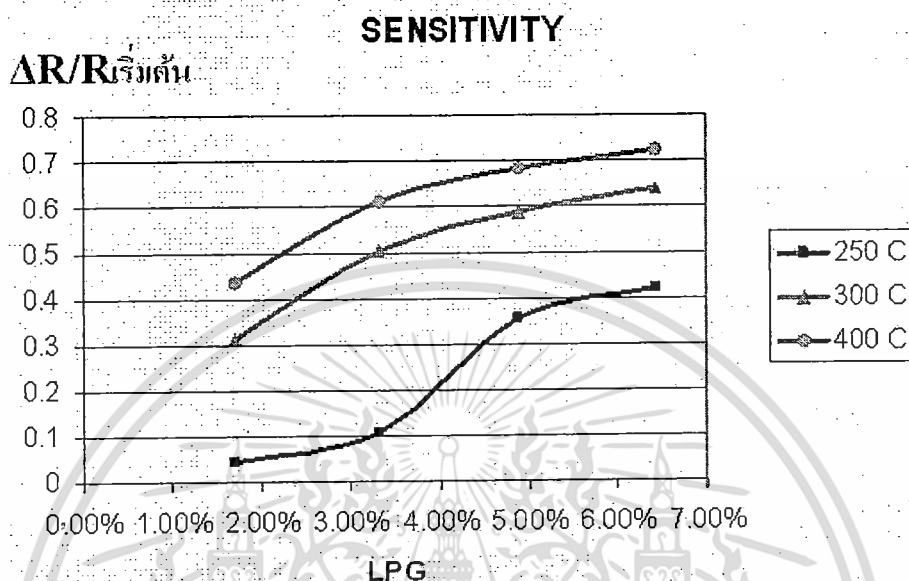
รูปที่ 4.31 ความไวในการวัดของเซ็นเซอร์แบบไม่ไดป์ สร้างขึ้นที่จำนวนครั้งในการจุ่มและชนิดฐานรองต่างกัน ทดสอบที่ 400°C

และจากการเปรียบเทียบค่าความไวในการวัดหรือ Sensitivity ของเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นจากปริมาณ ไดป์ต่างๆในรูปที่ 4.32 พบว่า ปริมาณ ไดป์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 4.5%-5.5%



เอกรูปที่ 4.32 ความไวในการวัดของเซ็นเซอร์แบบกระจกจุ่ม 15 ครั้งที่ได้ด้วย  $NH_4F$  ปริมาณต่างๆ ทดสอบที่ 300 องศาเซลเซียส ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.33 แสดงความไวในการวัดของเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นบนกระจกโดยการจุ่ม 15 ครั้ง โด๊ป  $NH_4F$  4.5% ทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ จากผลการทดลอง อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานของเซ็นเซอร์อยู่ระหว่าง 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิดังกล่าวจะให้ค่าความไวในการวัด หรือ Sensitivity ดีที่สุด



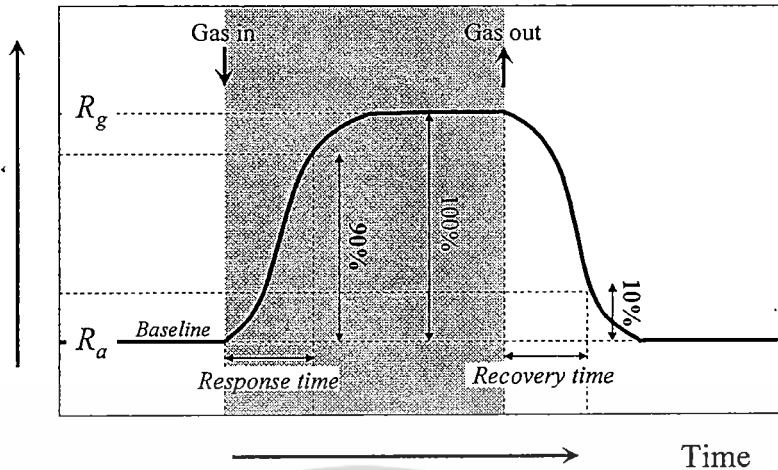
รูปที่ 4.33 ความไวในการวัดของเซ็นเซอร์แบบกระจกจุ่ม 15 ครั้ง โด๊ป  $NH_4F$  4.5% ที่อุณหภูมิตดสอบต่างๆ

#### 4.7 ค่าเวลาตอบสนอง ( $t_{on}$ ) และ ค่าเวลาดิ้นกลับสู่สภาพเดิม ( $t_{off}$ ) ของเซ็นเซอร์

ค่าเวลาตอบสนอง (Response time,  $t_{on}$ ) คือเวลาที่เซ็นเซอร์ใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจากสถานะที่ไม่มีก๊าซทดสอบ (สถานะ baseline) ไปสู่สถานะที่มีก๊าซทดสอบ โดยทั่วไป ค่าเวลาตอบสนองมักจะนิยามจากเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่ 90% ของค่าความต้านทานสุดท้าย (ณ สถานะความเข้มข้นก๊าซค่าหนึ่ง, รูปที่ 4.34) เซ็นเซอร์ที่ดีจะต้องมีค่าเวลาตอบสนองที่ต่ำ ซึ่งแสดงถึงเซ็นเซอร์นั้นๆ สามารถตอบสนองต่อก๊าซที่ทดสอบได้อย่างรวดเร็ว

ค่าเวลาดิ้นกลับสู่สภาพเดิม (Recovery time,  $t_{off}$ ) คือเวลาที่เซ็นเซอร์ใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานให้กลับมายังสถานะที่ไม่มีก๊าซทดสอบ หลังจากตอบสนองต่อก๊าซที่ทดสอบ โดยทั่วไป ค่าเวลาดิ้นกลับสู่สภาพเดิม มักจะนิยามจากเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่ 10% ของค่าความต้านทานเริ่มต้นของเซ็นเซอร์ (รูปที่ 4.34) เซ็นเซอร์ที่ดีจะต้องมีค่าเวลาดิ้นกลับสู่สภาพเดิมที่ต่ำ ซึ่งแสดงถึงเซ็นเซอร์นั้นๆ สามารถคืนกลับสู่สภาพเดิมหลังทดสอบได้อย่างรวดเร็ว

Resistance



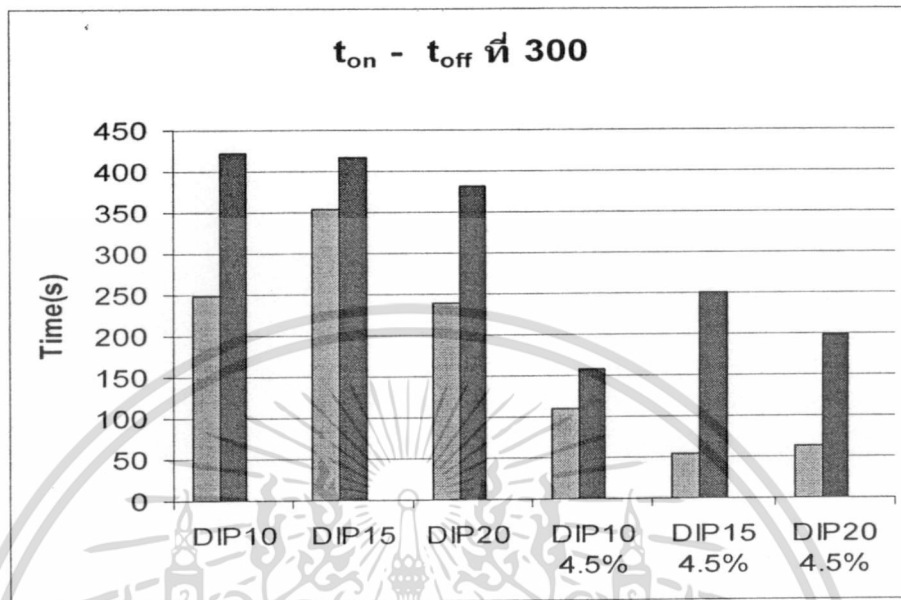
รูปที่ 4.34 ความต้านทาน” ของเซ็นเซอร์: ค่าเวลาตอบสนอง และค่าเวลาคืนกลับสู่สภาพเดิมของเซ็นเซอร์

เราได้นำผลการทดสอบของเซ็นเซอร์ต่อก๊าซแอลพีจี มาหาค่าเวลาในการตอบสนองและเวลาการคืนกลับของเซ็นเซอร์ โดยเป็นการคิดที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแอลพีจีที่ 4.90% ซึ่งเป็นช่วงกลางๆของความเข้มข้นก๊าซแอลพีจีที่เราทำการทดลอง ผลที่ได้แสดงเป็นแผนภูมิแท่งได้ดังรูปที่ 4.35-4.39

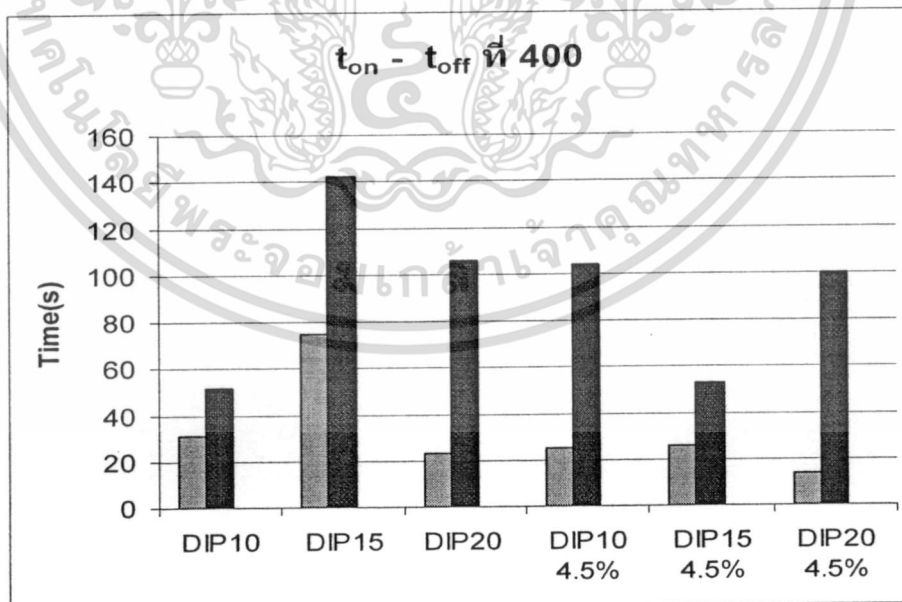
จากรูปที่ 4.35-4.36 และ รูปที่ 4.37-4.38 สามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิทดสอบที่สูงขึ้นจะทำให้เวลาในการตอบสนองและเวลาการคืนกลับของเซ็นเซอร์ลดลง 2-3 เท่า รูปที่ 4.37-4.38 แสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิทดสอบ 300 องศาเซลเซียส เซ็นเซอร์ที่สร้างบนฐานรองอลูมิน่าจะมีเวลาในการตอบสนองและเวลาการคืนกลับของเซ็นเซอร์น้อยกว่าที่สร้างบนฐานรองกระจก อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างดังกล่าวจะน้อยลงเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น (400 องศาเซลเซียส) จากรูปที่ 4.39 พบว่า เวลาในการตอบสนองและเวลาการคืนกลับของเซ็นเซอร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการไต่ป้เพิ่มมากขึ้น ทั้งเวลาในการตอบสนองและเวลาการคืนกลับจะมีค่าน้อยสุดเมื่อ ปริมาณการไต่ป้เป็น 5.5%-7.5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบระหว่างฐานรองที่เป็นกระจกโดยไม้ได้ปี  $NH_4F$  และได้ปี  $NH_4F$  4.5%



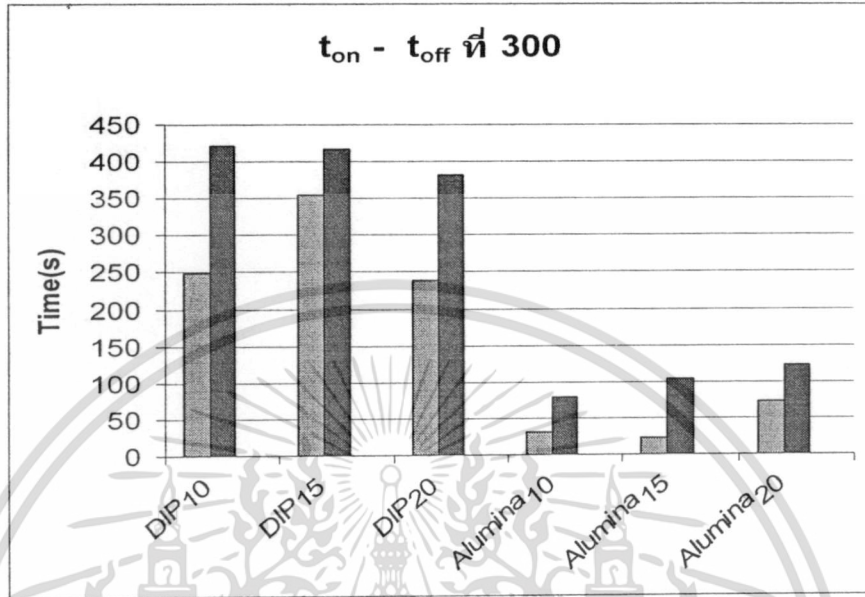
รูปที่ 4.35 แผนภูมิแท่งแสดง  $t_{on}$  และ  $t_{off}$  บนกระจกไม้ได้ปี  $NH_4F$  และได้ปี  $NH_4F$  4.5% ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



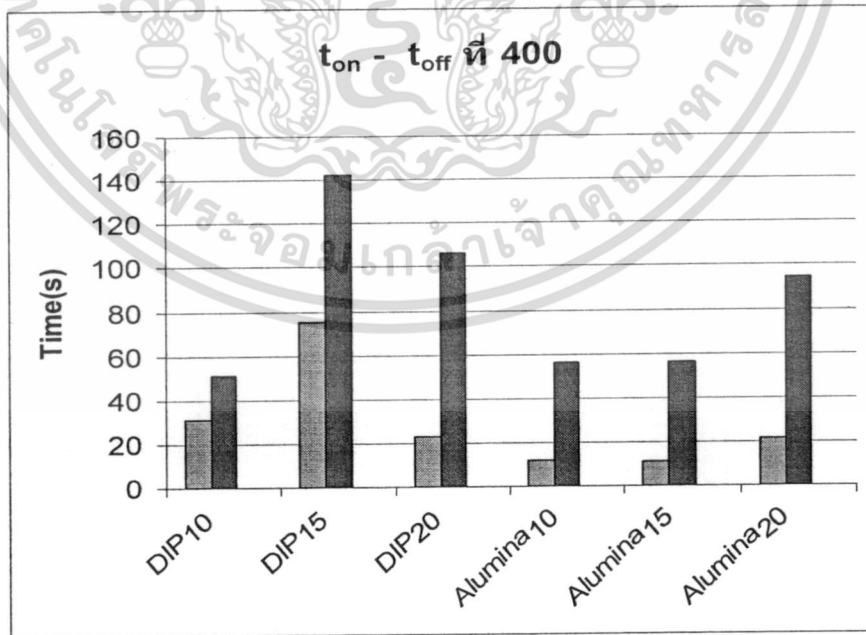
รูปที่ 4.36 แผนภูมิแท่งแสดง  $t_{on}$  และ  $t_{off}$  บนกระจกไม้ได้ปี  $NH_4F$  และได้ปี  $NH_4F$  4.5% ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบระหว่างกระจกกับอะลูมินาที่ไม่ได้ปี  $NH_4F$



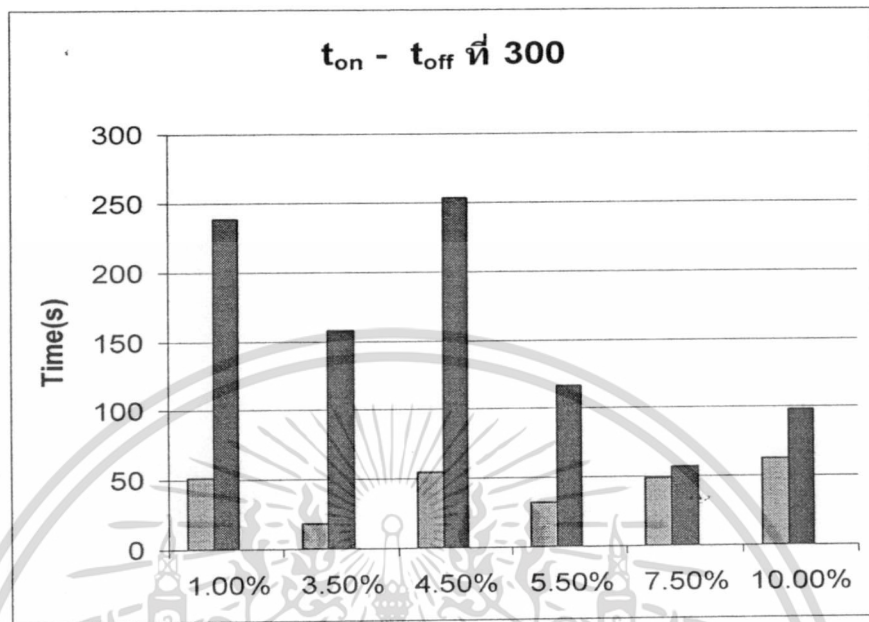
รูปที่ 4.37 แผนภูมิแท่งแสดง  $t_{on}$  และ  $t_{off}$  บนกระจกและอะลูมินาที่ไม่ได้ปี  $NH_4F$  ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.38 แผนภูมิแท่งแสดง  $t_{on}$  และ  $t_{off}$  บนกระจกและอะลูมินาที่ไม่ได้ปี  $NH_4F$  ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุ่ม 15 ครั้ง โดยได้  $NH_4F$  1%, 3.5%, 4.5%, 5.5%, 7.5% และ 10%



รูปที่ 4.39 แผนภูมิแท่งแสดง  $t_{on}$  และ  $t_{off}$  บนกระจกได้  $NH_4F$  ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

#### 4.8 ต้นแบบชุดการประยุกต์ใช้งานก๊าซเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้น รวมวงจรแสดงผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการการออกแบบวงจรสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซแอลพีจีจากฟิล์มทินออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.39 (ก) (รายละเอียดของวงจรดูได้ในภาคผนวก) โดยใช้ ADC 20 BIT (CS5526) ในการแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล แสดงผลด้วย LCD 16x2 และการประมวลผลสัญญาณด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (AT89C52) นอกจากนี้ยังมีเสียงและหลอดไฟเตือนสามารถทำงานได้ 3 โหมด (ดูในรูปที่ 4.39 (ข)) ดังนี้

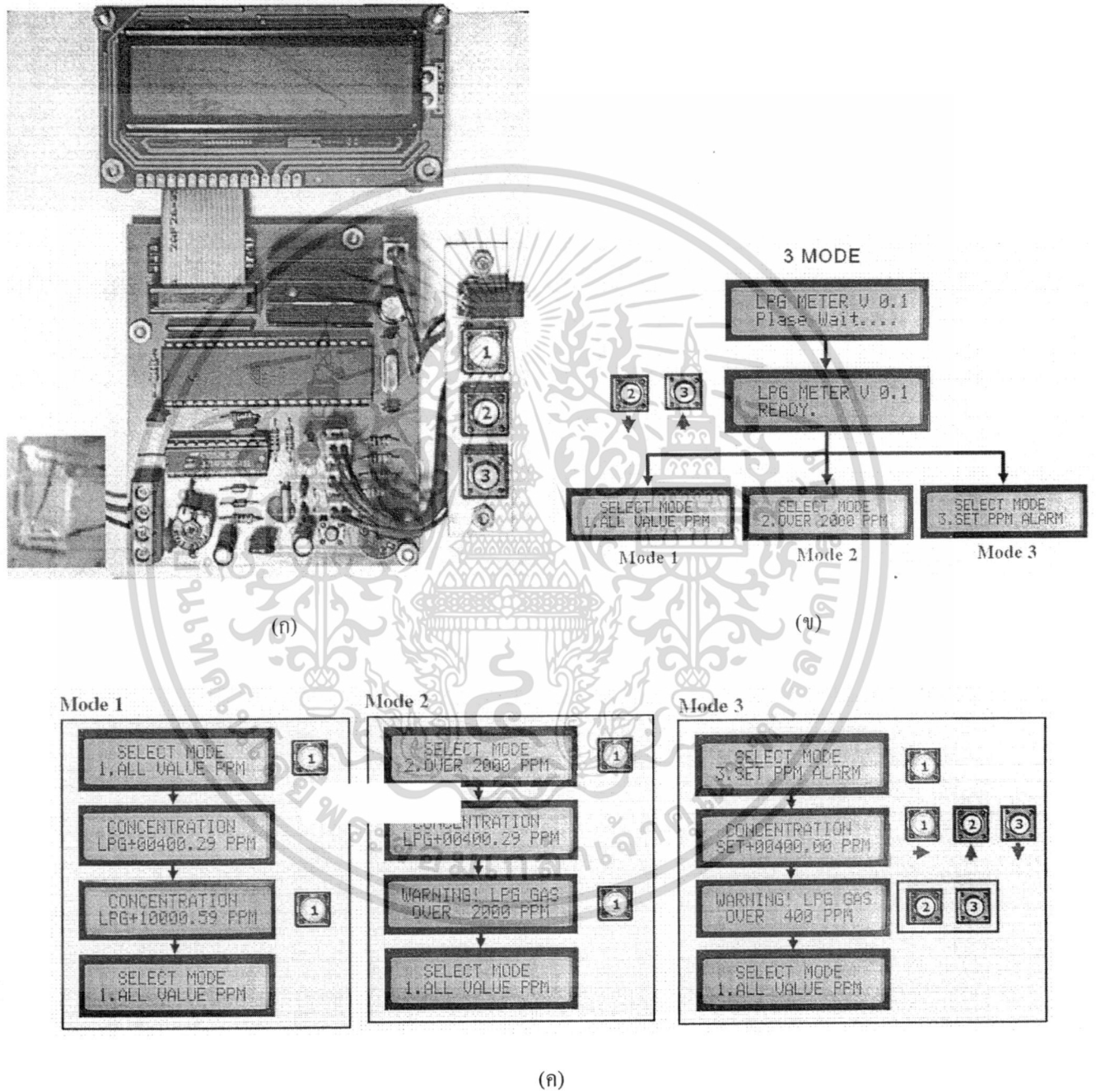
- โหมด 1 = สามารถวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจีได้ทุกช่วง โดยไม่มีการร้องเตือน ใช้สำหรับวัดความเข้มข้นทั่วไป
- โหมด 2 = ถ้าค่าความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจีที่วัดได้เกินกว่า 2,000 ppm จะมีการเสียงร้องเตือนและสัญญาณไฟเตือนปรากฏขึ้น เหมาะสำหรับการใช้ตรวจเช็คว่ามีก๊าซรั่วหรือไม่ (ณ ปัจจุบัน โหมดนี้ยังไม่สามารถทำงานได้ เนื่องจากประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์)
- โหมด 3 = เหมือนโหมด 2 แต่สามารถตั้งค่าความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจีที่จะทำการร้องเตือนได้ โดยถ้าค่าความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจีที่วัดได้เกินค่าที่ได้ตั้งเอาไว้ จะมีการเสียงร้องเตือนและสัญญาณไฟเตือนปรากฏขึ้น

จากการทดลองใช้เบื้องต้นพบว่า อุปกรณ์ตรวจจับแอลพีจีที่สร้างขึ้นสามารถวัดค่าความเข้มข้นของแอลพีจีภายใต้ระบบที่เจือจางด้วยก๊าซไนโตรเจนได้ดี (ดังผลการทดลองข้างต้น) แต่เมื่อนำมาทดสอบภายใต้อากาศปรกติ ค่าความต้านทานเริ่มต้นของเซ็นเซอร์มักจะไม่ค่อยเสถียร โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นต่ำๆ ทั้งนี้อาจเกิดจากเซ็นเซอร์ได้รับความร้อนไม่เพียงพอ เนื่องจากต้นแบบที่สร้างขึ้นนี้ยังไม่มีระบบฮีตเตอร์สำหรับให้ความร้อนแก่เซ็นเซอร์โดยตรง จึงทำให้ต้องวางลงบนฮีตเตอร์ในการใช้งานจริง อย่างไรก็ตาม ปัญหานี้สามารถ

แก้ไขได้โดยการเพิ่มฮีตเตอร์ลงในแผง PCB ที่เซ็นเซอร์ติดตั้งอยู่ เช่นเดียวกับฮีตเตอร์ที่ติดอยู่บนแผง PCB ของเซ็นเซอร์ตัวอื่น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก้ไขโดยการประดิษฐ์ไมโครฮาร์ดแวร์ลงบนด้านหลังของแผ่นฐานรองของเซ็นเซอร์ (วงจรต้นแบบที่คิดขึ้นนี้ได้เตรียมไฟคงที่สำหรับเลี้ยงฮาร์ดแวร์ไว้แล้ว) นอกจากนี้ เนื่องจากค่าสัญญาณเอาพุตที่ได้จากภาคแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลมีสัญญาณรบกวนปนอยู่มากทำให้ค่าที่อ่านได้มีค่าไม่คงที่ ซึ่งปัญหาต่างๆที่เหล่านี้ต้องได้รับการแก้ไขและปรับปรุงต่อไป



รูปที่ 4.40 ต้นแบบชุดการประยุกต์ใช้งานก๊าซเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้น (ก) วงจรภายใน (ข) หน้าจอแสดงโหมดที่สามารถทำงานได้: สามารถเปลี่ยนโหมดได้โดยการกดปุ่ม (ค) ตัวอย่างการค่าที่วัดได้ด้วยโหมดต่างๆ (ซ้าย) โหมด 1 (กลาง) โหมด 2 (ขวา) โหมด 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

รายงานฉบับนี้ได้กล่าวถึงการสร้างฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เจือสารฟลูออรีนด้วยวิธีการจุ่ม (dip-coating) โดยมีสารเคมีตั้งต้นที่ใช้คือ  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_4\text{F}$  และ  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$  เป็นแหล่งกำเนิดดีบุก, ฟลูออรีน และเป็นตัวทำละลาย ตามลำดับ โดยได้ทำการศึกษาเงื่อนไขการสร้างฟิล์ม เช่น ชนิดของฐานรอง การได้ปและไม่ได้ป จำนวนครั้งในการจุ่ม (ความหนาของฟิล์ม) ที่มีต่อประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์ โดยวัดความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจีที่ใช้ทดสอบคือ 1.68%–6.42% ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบต่างๆ (อุณหภูมิห้อง, 250, 300 และ 400 องศาเซลเซียส)

จากผลการทดลองพบว่า เซ็นเซอร์ที่สร้างจากฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่สร้างขึ้นมีลักษณะการตอบสนองแบบความต้านทานเพิ่ม กล่าวคือ ความต้านทานของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่สภาวะของก๊าซแอลพีจี แต่ความต้านทานจะลดลงเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจนอีกครั้ง เซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นจากฟิล์มทินออกไซด์ที่บาง (จุ่มน้อยครั้ง) จะมีอุณหภูมิที่เซ็นเซอร์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต่ำกว่าที่สร้างขึ้นจากฟิล์มที่หนา (จุ่มมากครั้ง) นอกจากนี้ ประสิทธิภาพการทำงานของเซ็นเซอร์จะดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิทำงานเพิ่มสูงขึ้น ทั้งในแง่ของความไวการตอบสนอง ความไวในการวัด เวลาในการตอบสนอง และเวลาในการคืนกลับสู่สภาพเดิม นอกจากนี้ยังพบว่า ประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์ยังขึ้นกับปริมาณ  $\text{NH}_4\text{F}$  ที่ได้ป เซ็นเซอร์ที่ได้ปในปริมาณต่ำจะมีความไวการตอบสนองที่สูงแต่ค่าความไวในการวัดต่ำ ในขณะที่ เซ็นเซอร์ที่ได้ปในปริมาณที่สูงเกินไปจะมีความไวการตอบสนองและความไวในการวัดที่ต่ำ จากการทดลองพบว่า ปริมาณได้ปที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 4.5%–5.5% บนฐานรองกระจก โดยจำนวนครั้งในการจุ่มคือ 15 ครั้ง ภายใต้การสร้างฟิล์มทินออกไซด์ที่เหมาะสม เซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพในการวัดค่าที่ดี ที่อุณหภูมิประมาณต่ำประมาณ 300–400 องศาเซลเซียส สามารถตอบสนองต่อก๊าซแอลพีจีในช่วงประมาณ 1–10% ได้ มีเวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนกลับสู่สภาพเดิมประมาณ 50–100 วินาที

จากผลการทดลองที่ได้ เซ็นเซอร์จากฟิล์มทินออกไซด์ที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้งานในการตรวจจับก๊าซแอลพีจีได้ อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องศึกษาและวิจัยเพิ่มเติมในเรื่องของ ความจำเพาะและความเสถียรของเซ็นเซอร์ เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงต่อไป

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) สำหรับผู้ที่สนใจที่จะพัฒนาระบบการชูดด้วยสารเคมีสำหรับการปลูกฟิล์มบางให้มีประสิทธิภาพนั้น สามารถนำเอาหลักการ รูปแบบของระบบ รวมทั้งขั้นตอนต่างๆที่ได้กล่าวไว้ในโครงการวิจัยในครั้งนี้ไปประยุกต์ใช้ได้ อย่างไรก็ตาม สิ่ง que ผู้วิจัยจะขาดไม่ได้เลย คือ ควรมีความรู้พื้นฐานและทักษะในการเขียนแบบ การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบ ความร้อน และต้องมีความรู้ทางด้านเคมีและไฟฟ้าพอสมควร
- 2) สำหรับผู้ที่สนใจที่จะศึกษาการประยุกต์ทินออกไซด์สำหรับใช้งานเป็นก๊าซเซ็นเซอร์ก็สามารถนำเอาหลักการ รูปแบบโครงสร้างของเซ็นเซอร์ รวมทั้งขั้นตอนต่างๆที่ได้กล่าวไว้ในโครงการวิจัยในครั้งนี้ไปประยุกต์ใช้ได้ อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยจะต้องมีความรู้และความเข้าใจในการใช้ก๊าซแอลพีจีอย่างถูกต้องด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

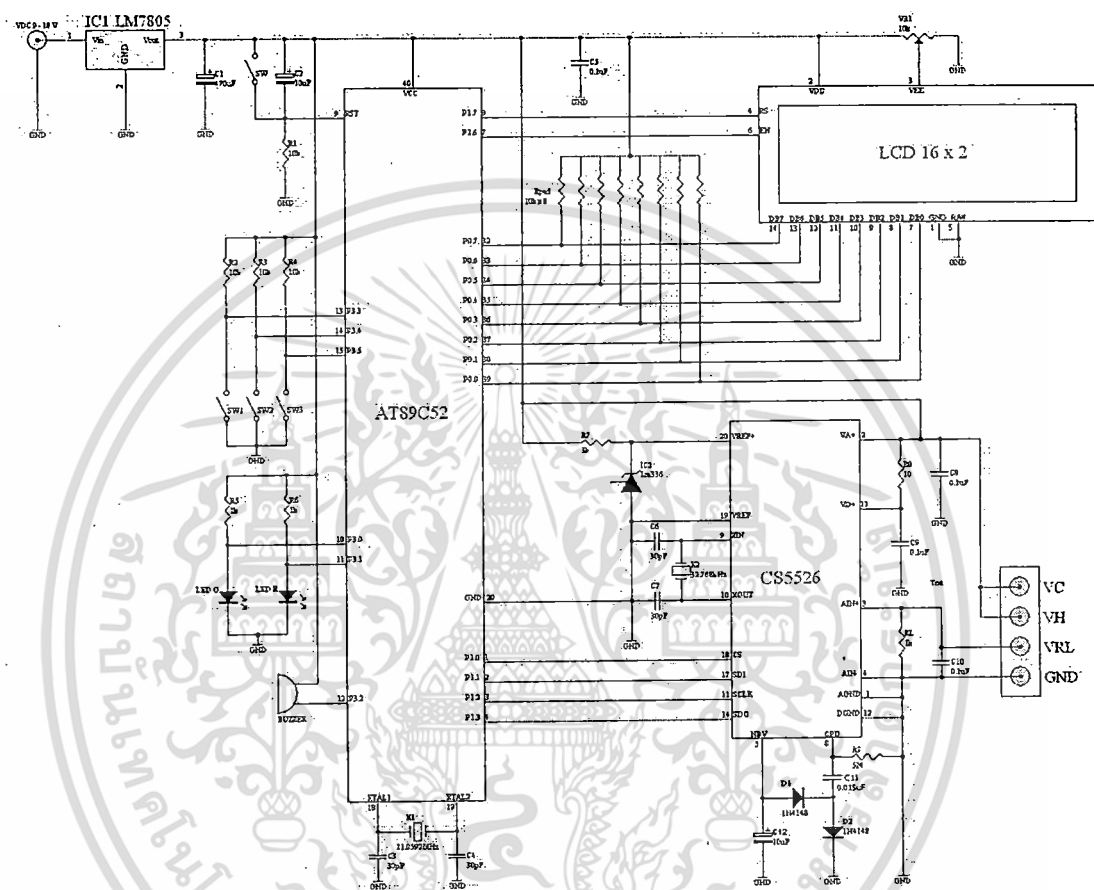
## เอกสารอ้างอิง

- [1] "The surface and materials science of tin oxide", M. Batzill, U. Diebold, *Progress in Surface Science* **79** (2005) 47-154 →  
Chemical sensors, in: T. Seiyama, K. Fueki, J. Shiokawa, S. Suzuki (Jpn Eds.), *Proceedings of the International Meeting on Chemical Sensors*, held in Fukuoka, Published by Kodansha, Tokyo and Elsevier, Amsterdam, 1983.
- [2] D.D. Lee, B.K. Sohn and D.S. Ma, Low power thick film gas sensors, *Sens. Actuators* **12** (1987), pp. 441-447.
- [3] M. Kaneyasu, H. Aikegami, S. Arima and Iwanaga, Smell identification using thick film gas sensor, *IEEE Trans. Components Hybr. Manuf. Technol. CHMT-10* (1987) (2), pp. 267-273.
- [4] J.R. Stetter, M.W. Findlay, G.J. Maclay, J. Zhang, S. Vaihinger and W. Goper, Sensor array and catalytic filament for chemical analysis of vapours and mixtures, *Sens. Actuators B1* (1990), pp. 43-47
- [5] P.T. Moseley, Materials selection for semiconductor gas sensors, *Sens. Actuators B* **6** (1992), pp. 149-156.
- [6] "Indium tin-oxide thin films prepared by dip-coating of indium diacetate monohydroxide and tin dichloride", Shigeyuki Seki, Yutaka Sawada, Toshikazu Nishide, *Thin Solid Films* **388** (2001), pp. 22-26.
- [7] "Low-temperature growth of highly crystallized transparent conductive fluorine-doped tin oxide films by intermittent spray pyrolysis deposition", T. Fukano and T. Motohiro, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **82** (2004), pp. 567-575.
- [8] "Low-temperature growth of highly crystallized transparent conductive fluorine-doped tin oxide films by intermittent spray pyrolysis deposition", T. Fukano and T. Motohiro, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **82** (2004), pp. 567-575.
- [9] Smas S. "Development of a Spray Pyrolysis Coating Process for Tin Oxide Film Heat Mirrors" Degree of Master of Engineering Thesis of Energy Technology Program, School of Energy and Material, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi. 1996
- [10] วณิดา คำดี. "การศึกษาการเคลือบผิวด้วยฟิล์มซิงก์ที่เคลือบโดยกระบวนการโซล-เจลโดยใช้เทคนิคการจุ่มเคลือบ". วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2544.
- [11] [http://www.geocities.com/thaikeramos/product/advance\\_product/gas\\_senser/gas\\_sensors.html](http://www.geocities.com/thaikeramos/product/advance_product/gas_senser/gas_sensors.html) (1.รศ.ดร. มานะ ศรียุทธศักดิ์, ก๊าซเซนเซอร์ : ชนิดและหลักการทำงาน ( แจกในการสัมมนาเรื่อง The Development and Application of Sensors for Environmental Monitoring 18-19 พฤษภาคม 2541 ณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะวัสดุแห่งชาติ) 2.Dr.Heikki Torvela, Gas Sensor (แจกในการสัมมนาเรื่อง The Development and Application of Sensors for Environmental Monitoring 18-19 พฤษภาคม 2541 ณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะวัสดุแห่งชาติ))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก

## รูปวงจรเครื่องวัดปริมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้