

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

ในการทดลองแบ่งเป็นสองส่วนได้แก่ส่วนการทดลองและผลการทดลองที่เกี่ยวกับระบบจุมูกอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งอยู่ในตอนที่ 1 และตอนที่ 2 ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับคาร์บอนนาโนทิวป์เซนเซอร์ซึ่งอยู่ในตอนที่ 3

ตอนที่ 1 ระบบจุมูกอิเล็กทรอนิกส์

5.1.1 คำนำ

จุมูกอิเล็กทรอนิกส์คือการเลียนแบบการรับรู้กลิ่นของสิ่งมีชีวิต จมูกของสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติจะรับรู้กลิ่นได้โดยเมื่อมีอนุภาคของกลิ่นฟุ้งไปในอากาศ เมื่อไปกระทบกับ ต่อมรับรับรู้กลิ่นในโพรงจมูก ต่อมรับรับรู้กลิ่นจะมีอยู่จำนวนมากซึ่งแต่ละชนิดจะมีการตอบสนองต่อกลิ่นแต่ละแบบที่แตกต่างกันไปเมื่อต่อมรับรับรู้กลิ่นตอบสนองต่อกลิ่นต่าง ๆ นั้นแล้วก็จะส่งสัญญาณไฟฟ้าเคมีไปยังสมองสมองจะทำการประมวลผลโดยการเปรียบเทียบกับกลิ่นที่เคยจดจำได้ในอดีตจากความทรงจำนำมาประมวลผลเทียบเคียง จึงแยกแยะได้ออกว่าเป็นกลิ่นอะไรจำนวนของต่อมรับกลิ่นในโพรงจมูกนั้นมีจำนวนมหาศาลเทียบกับเซนเซอร์ที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นได้ในปัจจุบัน การที่จะเลียนแบบการทำงานของจมูกจริงๆ จึงเป็นการยากที่จะทำได้ละเอียดอ่อนเท่ากับจมูกและสมองของสิ่งมีชีวิตอีกทั้งเซลล์สมองของสิ่งมีชีวิตก็มีจำนวนมากมายมหาศาลที่จะใช้ประมวลผลในการแยกแยะกลิ่นต่างๆ จมูกอิเล็กทรอนิกส์จึงยังอยู่ในขั้นเริ่มต้นที่จะต้องพัฒนาอีกต่อไป โดยประโยชน์ของจุมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาใช้กันก็จะมี การตรวจสอบคุณภาพอาหาร การจำแนกผลิตภัณฑ์เปียร์ การจำแนกกลิ่นน้ำหอมว่าแท้หรือไม่ผลิตมาจากแหล่งใด การจำแนกไขมันหรือเนื้อสัตว์เพื่อดูว่ามาจากแหล่งการผลิตจากที่ใด ใช้จำแนกผู้ป่วยโรคมะเร็งปอดจากลมหายใจ และใช้ตรวจหาวัตถุระเบิดในสนามรบ เป็นต้น เนื่องจากการค้นคว้าวิจัยโดยใช้ และจำแนกด้วยจุมูกอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีเซนเซอร์รับกลิ่นเป็นแก๊สเซนเซอร์ชนิดโลหะออกไซด์หลายตัวต่อรวมกัน ควบคู่กับการวิเคราะห์ข้อมูลหลังการตรวจวัดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในเรื่องการพัฒนาจุมูกอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ที่มีการดำเนินการดังนี้

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยจุมูกอิเล็กทรอนิกส์แบบต่าง ๆ และวิธีการนำไปใช้งาน
2. ศึกษางานวิจัยจุมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เซนเซอร์ชนิด สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์
3. ศึกษางานวิจัยที่ใช้จุมูกอิเล็กทรอนิกส์ในการวัดเครื่องตีมีประเภที่มีแอลกอฮอล์เป็นส่วนผสม

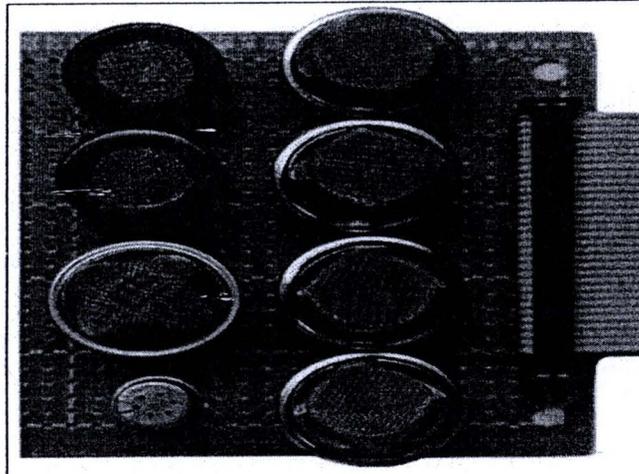
4. ศึกษาองค์ประกอบของสารต่างที่มีอยู่ในเครื่องต้มแอลกอฮอล์
5. ศึกษาวิธีวิเคราะห์ข้อมูลแบบต่างๆ ที่ใช้กันในงานจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์
6. ออกแบบระบบจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์แบบใช้เซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์มาต่อร่วมกัน (Array sensor)
7. ทดลองใช้จุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์ลงวัดเครื่องต้มแอลกอฮอล์
8. หาค่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ตอบสนองสูงสุดของแต่ละเซนเซอร์
9. นำสัญญาณที่ได้มาอยู่ในรูปของเมตริกซ์
10. นำเมตริกซ์การตอบสนองของเซนเซอร์มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis :PCA)
11. สรุปผลการทดลอง

5.1.2 การออกแบบจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์

จากการศึกษาเซนเซอร์โลหะออกไซด์ชนิดต่างทำที่มีจำหน่ายในท้องตลาดทั้งหมดพบว่าชนิดที่นำมาใช้งานในจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์มีเพียงเซนเซอร์ที่ตอบสนองต่อก๊าซได้ดีได้เพียงบางกลุ่มเท่านั้นโดยเราเลือกมาใช้งานดังตารางที่ 5.1.1

ตารางที่ 5.1.1 เซนเซอร์ก๊าซที่นำมาใช้และชนิดของก๊าซ

ตัวที่	รุ่น	ชนิดก๊าซที่ตรวจจับ
1	MQ 2	General Combustible
2	MQ 3	Alcohol
3	MQ 4	Natural, Methane
4	MQ 6	LPG, Propane
5	MQ 7	Carbon Monoxide
6	TGS2600	Air Contaminants
7	TGS2602	Air Contaminants

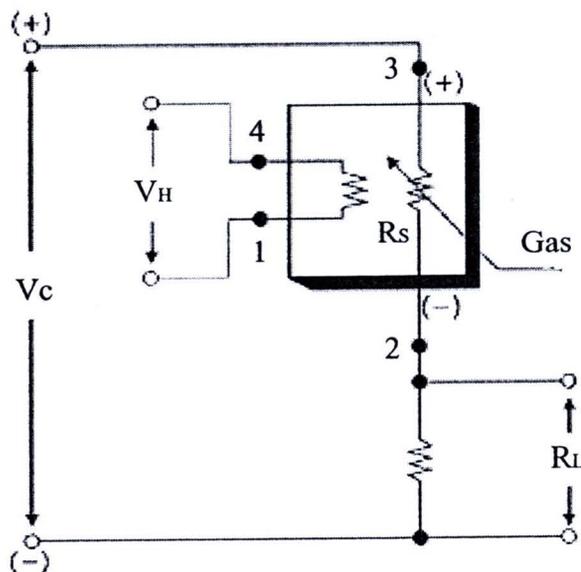


รูปที่ 5.1.1 เซนเซอร์จุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการตรวจวัดเครื่องต้มแอลกอฮอล์

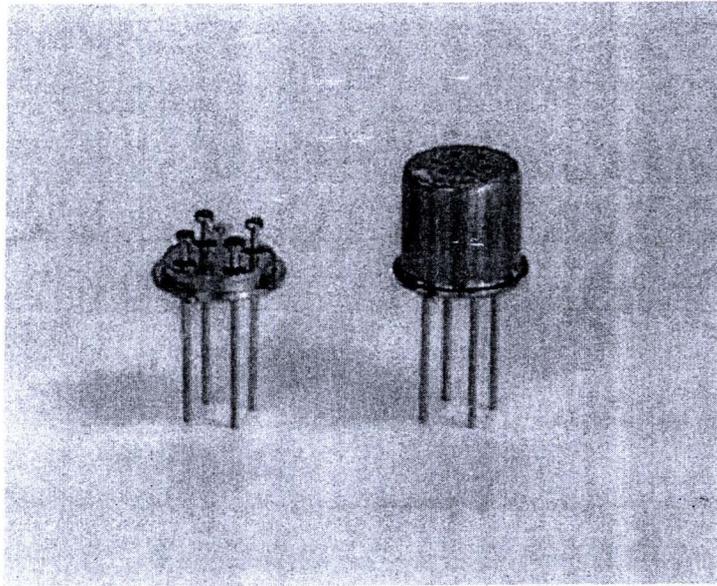
จากนั้นนำจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์ไปทดสอบวัดเครื่องต้มแอลกอฮอล์ จากนั้นจะทำการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่เอาต์พุตของทุกเซนเซอร์และนำค่าที่ได้จัดเรียงในรูปเมตริกซ์ เนื่องจากวัดเครื่องต้มแอลกอฮอล์เบียร์สด 3 ชนิด ทำการวัดซ้ำ 5 ครั้งและตรวจวัดโดยใช้เซนเซอร์ 7 ตัว ทำให้ได้เมตริกซ์ข้อมูลขนาด 15×7 หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก เพื่อดูผลการจำแนก ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

5.1.2.1 การออกแบบก๊าซเซนเซอร์อาร์เรย์

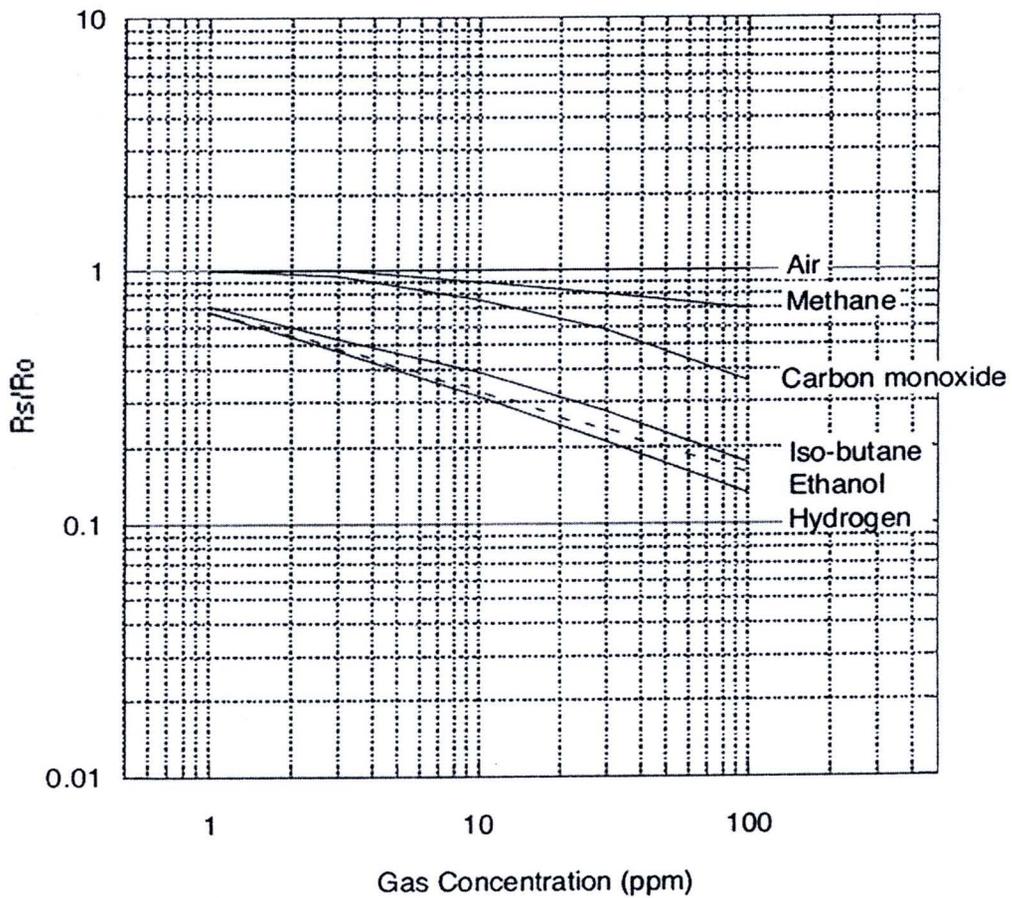
โดยทั่วไปแก๊สเซนเซอร์แบบโลหะออกไซด์จะมีการต่อวงจรใช้งานที่มีลักษณะคล้ายกัน คือ มีแรงดันไฟจ่ายให้กับวงจร VC เป็นแรงดันไปกระแสตรงค่าไม่เกิน 5V และ แรงดันที่จ่ายกับ Heater (VH) เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) หรือไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) แรงดัน 5.0 V



รูปที่ 5.1.2 วงจรของแก๊สเซนเซอร์ที่พร้อมใช้งาน



รูปที่ 5.1.3 ตัวอย่างก๊าซเซ็นเซอร์แบบโลหะออกไซด์ รุ่น TGS 2600



รูปที่ 5.1.4 ความต้านทานตอบสนองต่อไอสารเคมีต่างๆต่อความต้านทานในอากาศ R_s/R_o ของเซ็นเซอร์ TGS 2600

ค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์สามารถหาได้จากสมการที่ (5.1.1)

$$R_S = \left(\frac{V_C}{V_{RL}} - 1 \right) \times R_L \quad (5.1.1)$$

จากสมการที่ (5.1.1) เราจะนำไปใช้คำนวณหาค่าความต้านทานโหลด (RL) ที่จะนำไปใช้ต่อในวงจรและกำลังงานไฟฟ้าที่เซ็นเซอร์ใช้ไปสามารถหาได้จากสมการที่ (5.1.2)

$$P_S = \frac{V_C^2 \times R_S}{(R_S + R_L)^2} \quad (5.1.2)$$

ซึ่งเราจะได้รุ่นของแก๊สเซ็นเซอร์ที่จะใช้สร้างเป็นจุ่มกือเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น แรงดันที่จ่ายให้วงจร (VC), แรงดันที่จ่ายให้กับ Heater (VH), ค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ (RS), ค่าความต้านทานของ Heater (RH), กำลังที่ใช้ของ Heater (PH) ของเซ็นเซอร์ทั้ง 7 ตัว ดังตารางที่ 5.1.3

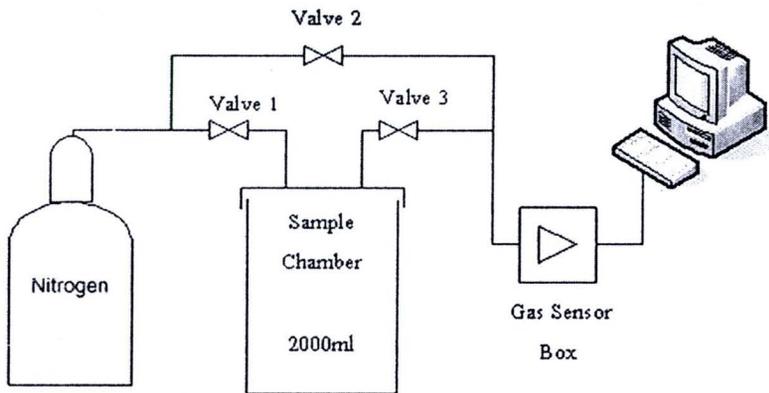
ตารางที่ 5.1.3 ค่าแรงดันไฟฟ้าและความต้านทานของแก๊สเซ็นเซอร์ต่างๆ ที่ใช้งาน

รุ่น	แรงดัน VC (V)	แรงดัน VH (V)	RS (KΩ)	RH (Ω)	PH (mW)
TGS 2602	5.0 ± 0.2	5.0 ± 0.2	10-100	59.0	280
TGS 2600	5.0 ± 0.2	5.0 ± 0.2	10-90	83.0	210
MQ 2	5.0 ± 0.1	5.0 ± 0.1	3-30	33.0 ± 3.0	800
MQ 3	5.0 ± 0.1	5.0 ± 0.1	1-8	33.0 ± 3.0	750
MQ 4	5.0 ± 0.1	5.0 ± 0.1	10-60	33.0 ± 3.0	750
MQ 6	5.0 ± 0.1	5.0 ± 0.1	2-20	33.0 ± 3.0	900
MQ 7	5.0 ± 0.1	5.0 ± 0.1	2-20	33.0 ± 3.0	350

ทำการทดสอบการทำงานของวงจรและต่อสายสัญญาณเอาต์พุตของเซ็นเซอร์ทุกตัวเพื่อนำสัญญาณบันทึกผลการวัด ลงคอมพิวเตอร์โดยใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล ด้วยอุปกรณ์บันทึกสัญญาณ USB Multifunction รุ่น NI USB-6211 ของบริษัท National Instrument

5.1.2.2 การออกแบบระบบการทำงาน

ระบบการตรวจวัดของจุ่มกือเล็กทรอนิกส์ มีหลักการทำงานคล้ายๆ กับการทำงานจริงของจุ่มกุ่มนุษย์ คือ จะต้องมีการนำกลิ่นหรือไอระเหยจากสารชนิดต่างๆ มาสัมผัสอวัยวะรับรู้กลิ่นในที่นี้เราจะใช้การพัดพาของก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวพาที่กลิ่นหรือสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่อยู่ในเครื่องต้มแอลกอฮอล์เข้าสู่เซ็นเซอร์รับกลิ่นทั้ง 7 ตัว ซึ่งไดอะแกรมการทำงานของระบบตรวจวัดเป็นดังรูปที่ 5.1.5



รูปที่ 5.1.5 ไดอะแกรมการทำงานของจุ่มกือเล็กทรอนิกส์

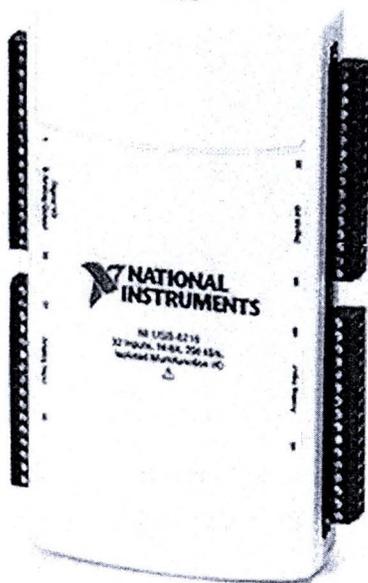
จากไดอะแกรมการทำงานของระบบจุ่มกือเล็กทรอนิกส์ในรูปที่ 5.1.5 จะเห็นว่าประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ ระบบการควบคุมการไหลของก๊าซซึ่งมีไนโตรเจนเป็นก๊าซพาห้, ชุดแก๊สเซ็นเซอร์ชนิดโลหะออกไซด์ต่อพร้อมกันแบบอาร์เรย์และระบบการบันทึกสัญญาณ ซึ่งมีตารางการควบคุมการไหลของก๊าซดังตารางที่ 5.1.2

ตารางที่ 5.1.2 วิธีควบคุมการปิดเปิด

วาล์วตัวที่ 1	วาล์วตัวที่ 2	วาล์วตัวที่ 3	การทำงาน
ปิด	เปิด	ปิด	ไล่สารตกค้าง
เปิด	ปิด	เปิด	ตรวจวัดสารตัวอย่าง

5.1.2.3 การบันทึกผลการทดลอง

ส่วนระบบการบันทึกสัญญาณพัฒนาบนโปรแกรม NI LabVIEW โดยทำงานร่วมกับ Multifunction I/O รุ่น NI USB-6211 ของ National Instrument ทำหน้าที่เป็น Data acquisition และควบคุมการเปิด-ปิดวาล์ว ดังรูปที่ 5.1.6



รูปที่ 5.1.6 อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ NI USB Multifunction รุ่น NI USB-6211

โดยการสุ่มตัวอย่างหรือ Sampling ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่องหรือดิจิตอล $x(n)$ จากสัญญาณต่อเนื่อง $x(t)$ โดยอาศัยความถี่ในการซึก (Sampling rate หรือ Sampling frequency) ซึ่งจะได้สัญญาณ $x(n)$ เป็น

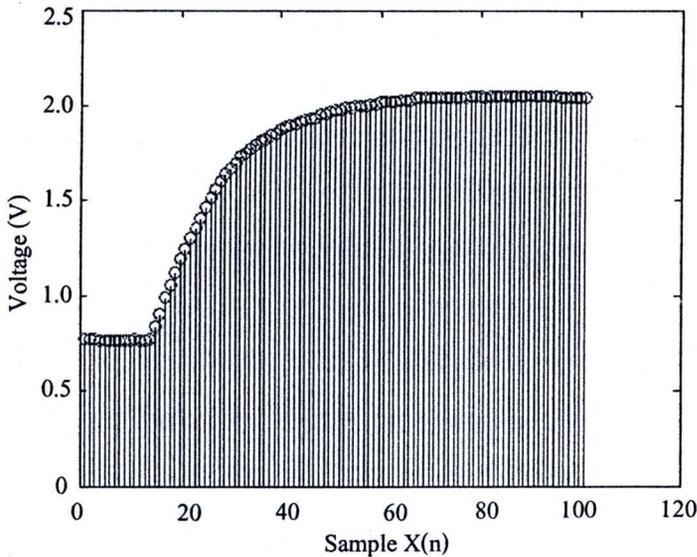
$$x(n) \cong x(nT) \quad (5.1.4)$$

เมื่อ T คือคาบของการสุ่มตัวอย่าง

เมื่อพิจารณาระดับของการ Quantization (Q) ข้อมูลจะได้

$$x(n) \cong Q(x(nT)) \quad (5.1.5)$$

สัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างจะเป็นดังรูปที่ 5.1.7



รูปที่ 5.1.7 สัญญาณจากการสุ่มตัวอย่าง

จากนั้นหาค่าสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณ (Signal) ของเซ็นเซอร์แต่ละตัว ดังสมการที่ (5.1.6) และ (5.1.7)

$$x_{(\max)} = \text{Max}(x(n)) \quad (5.1.6)$$

$$x_{(\min)} = \text{Min}(x(n)) \quad (5.1.7)$$

เมื่อได้ค่าสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณก็จะมาคำนวณหาผลต่าง ดังสมการที่ (5.1.8) ซึ่งจะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของสัญญาณ

$$x_{(\text{dif})} = \text{Max}(x(n)) - \text{Min}(x(n)) \quad (5.1.8)$$

โปรแกรมที่ใช้บันทึกสัญญาณจากการวัด โดยมีช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่างทุก 1 วินาที หรือ มีค่า Sampling rate เท่ากับ 1 Hz

5.1.3 การดำเนินการทดลอง

การทดสอบใช้จุกมิถุนนิกสวัตเครื่องตี้มแอลกอฮอล์เมื่อเราได้ออกแบบและประกอบชุดทดลองเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการเตรียมตัวอย่าง ซึ่งจะใช้เบียร์สด 3 สูตรส่วนการทำงานของจุกมิถุนนิกสวัตก่อนทำการตรวจวัด เมื่อเริ่มเปิดสวิชระบบและเปิดวาล์วถึงแก๊สไนโตรเจนซิเจนจะต้องใช้เวลาเริ่มต้น (Initial) ประมาณ 10 นาที เพื่อให้ตัวทำความร้อน (Heater) ของก๊าซเซ็นเซอร์ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันความชื้นที่เกิดจากตัวอย่างรบกวนการทำงานของระบบเพื่อให้การทำงานคงที่

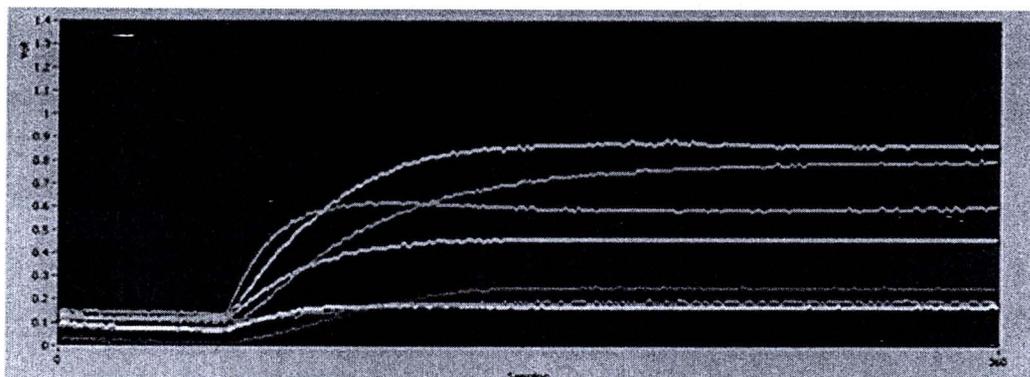
(Stable) และปล่อยก๊าซไนโตรเจนเพื่อไล่สารตกค้างและสิ่งสกปรกต่างๆ ที่มาเกาะตัวเซ็นเซอร์ขณะที่ไม่ได้ใช้งาน

ซึ่งในตอนนี้นี้ระบบพร้อมทำการตรวจวัดตัวอย่างแล้ว เราจึงนำไปในภาชนะขนาด 2000 ml ซึ่งมีการปิดสนิท หลังจากนั้นวาล์วตัวที่ 1, 3 อยู่ในสถานะปิดและวาล์วตัวที่ 2 อยู่ในสถานะเปิด ให้นิโตรเจนไหลผ่านแก๊สเซ็นเซอร์โดยตรงเพื่อดูค่าคงที่ของระดับสัญญาณต่ำสุดขณะก่อนตรวจวัดตัวอย่าง เพื่อจะใช้ในการคำนวณระดับการเปลี่ยนแปลงสัญญาณในการตรวจวัด ซึ่งสัญญาณของแต่ละเซ็นเซอร์ก็จะเคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ สัญญาณของแก๊สเซ็นเซอร์ทุกตัวจะอยู่ใกล้ศูนย์ มีค่าแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของก๊าซเซ็นเซอร์ต่อก๊าซไนโตรเจนของแต่ละตัว และเมื่อเวลาการทดสอบผ่านไป 1 นาที ระบบก็จะปิดวาล์วตัวที่ 2 และเปิดวาล์วตัวที่ 1, 3 เพื่อให้ก๊าซพาหน์นำสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่อยู่ในเปียร์สดีไหลเข้าสู่กล่องเซ็นเซอร์อาร์เรย์ทั้ง 7 ตัว เป็นเวลา 5 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ตัวอย่างไหลเข้าสู่เซ็นเซอร์อาร์เรย์จนมีระดับสัญญาณที่สูงสุดแล้ว จากนั้นเมื่อครบเวลา 6 นาที ของการตรวจวัดตัวอย่างระบบจะทำการปิดวาล์วตัวที่ 1, 3 และเปิดวาล์วตัวที่ 2 เป็นเวลา 2 นาที เพื่อให้ก๊าซไนโตรเจนไล่เอาตัวอย่างที่ตกค้างภายในระบบออกไป ซึ่งจะทำให้ระดับสัญญาณกลับมาคงที่ค่าเดิมเท่ากับก่อนการตรวจวัดตัวอย่างอีกครั้ง โดยสามารถเขียนเป็นตารางการทำงานของระบบและรูปสัญญาณที่ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1.5 ลำดับขั้นตอนและช่วงเวลาในการทดลอง

ลำดับ	ช่วงเวลา (นาที)	เวลาที่ใช้ (นาที)	การทำงาน
1	เริ่มต้น	-	เปิดวาล์วไนโตรเจน
2	0-10	10	ระบบเริ่มต้นการทำงาน
3	10	-	เริ่มบันทึกสัญญาณ
4	10-11	1	ปิดวาล์วตัวที่ 1,3 และเปิดวาล์วตัวที่ 2
5	11-16	5	เปิดวาล์วตัวที่ 1,3 และปิดวาล์วตัวที่ 2
6	16-18	2	ปิดวาล์วตัวที่ 1,3 และเปิดวาล์วตัวที่ 2
7	18 ขึ้นไป	-	ทดสอบตัวอย่างถัดไป
8	จบการทดลอง	2	ปิดวาล์วตัวที่ 1,3 และเปิดวาล์วตัวที่ 2

สัญญาณที่ตรวจวัดได้จากการวัดเรอาน์ทิกโดยใช้โปรแกรม NI LabVIEW ซึ่งเราสามารถดูการเปลี่ยนแปลงสัญญาณตลอดการทดลอง 6 นาที เพื่อการตอบสนองของเซ็นเซอร์แต่ละตัว ซึ่งจะทำให้การผลแตกต่างกันออกไปตามคุณสมบัติของเซ็นเซอร์ตัวนั้น ดังแสดงในรูปที่ 5.1.8



รูปที่ 5.1.8 สัญญาณเอาต์พุตอยู่ในรูปแรงดันต่อเวลาวินาที่ของแก๊สเซ็นเซอร์ทั้ง 7 ตัว

จากรูปที่ 5.1.8 เป็นสัญญาณเอาต์พุตของก๊าซเซ็นเซอร์ทั้ง 7 ตัว โดยเส้นสีขาวจะเป็นสัญญาณเอาต์พุตของ TGS 2602, เส้นสีแดงจะเป็นสัญญาณเอาต์พุตของ TGS 2600, เส้นสีเขียวจะเป็นสัญญาณเอาต์พุตของ MQ 2, เส้นสีฟ้าจะเป็นสัญญาณเอาต์พุตของ MQ 3, เส้นสีเหลืองจะเป็นสัญญาณเอาต์พุตของ MQ 4, เส้นสีม่วงจะเป็นสัญญาณเอาต์พุตของ MQ 6, และเส้นสีส้มจะเป็นสัญญาณเอาต์พุตของ MQ 7 จะเห็นว่าช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นทดสอบจนถึงหนึ่งนาทีที่ระดับสัญญาณของระบบคงที่เข้าใกล้ศูนย์ เนื่องจากในระบบมีเฉพาแก๊สไนโตรเจนและเมื่อเวลาต่อมา ระบบจะทำการเปิดวาล์วให้สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่อยู่ในเบียร์สดไหลเข้าสู่เซ็นเซอร์ โดยการพาห่ของแก๊สไนโตรเจนจะเห็นวาระดับสัญญาณค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นจนเริ่มคงที่ ระบบจะทำการตรวจวัดไปจนครบเวลา 6 นาที จนจบการทดลอง

แล้วหลังจากนั้นจะทำการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของสัญญาณที่เอาต์พุตของเซ็นเซอร์ทั้ง 7 ตัว โดยใช้สมการที่ (5.1.8) ในการหาค่าต่ำสุดซึ่งเกิดในช่วงเวลาที่แรกก่อนมีสารตัวอย่างเข้ามาและค่าสูงสุดของสัญญาณ ซึ่งเกิดขณะในช่วงมีสารตัวอย่างเข้ามาในระบบมากที่สุด จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จัดเป็นรูปเมตริกซ์ โดยเวกเตอร์ของข้อมูลชุดที่ 1 จะเป็นแถวที่ 1 ของเมตริกซ์ เวกเตอร์ของข้อมูลชุดที่ 2 จะเป็นแถวที่ 2 ของเมตริกซ์ จนถึงเวกเตอร์ของข้อมูลชุดที่ n จะเป็นแถวที่ n ของเมตริกซ์

5.1.4 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อได้เมตริกซ์ข้อมูลจากการคำนวณผลการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของก๊าซเซ็นเซอร์แล้ว ขั้นตอนต่อมาจะเป็นการนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเพื่อจำแนกเครื่องดื่มแอลกอฮอล์เบียร์สดแต่ละสูตรซึ่งขั้นตอนแรกเริ่มด้วยการนำข้อมูลมาเรียงให้อยู่ในรูปเมตริกซ์

โดยเราจะให้ผลการวัดเครื่องตีมีแอลกอฮอล์ในแต่ละสุตรอยู่เป็นแถวที่ 1 ถึง แถวที่ n ส่วนคอลัมน์ที่ 1 ถึง คอลัมน์ที่ 7 จะเป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้วัด ซึ่งมีลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

ขั้นตอนการวิเคราะห์การทดลอง

1. คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของเซ็นเซอร์
2. สร้างเมตริกซ์ของข้อมูล
3. วิเคราะห์สัญญาณจากเมตริกซ์ข้อมูลโดยใช้ โปรแกรม MATLAB
4. สร้างกราฟวิเคราะห์ความสัมพันธ์

การวิเคราะห์เราจะเริ่มตั้งแต่การใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีการเรียนรู้แบบไม่มีการสอนดูการจำแนกขั้นต้นว่าสามารถถึงความสัมพันธ์ของเมตริกซ์ข้อมูลของตัวแปร $PCA1$ และ $PCA2$ ได้มากกว่าร้อยละ 80 เพื่อดูว่าการจำแนกดีหรือไม่

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคองค์ประกอบหลัก

ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA เมื่อเราได้สร้างเมตริกซ์ข้อมูลแล้ว จากนั้นหาเมตริกซ์ค่าแปรปรวนร่วม (Covariance matrix) ด้วยสมการที่ (5.1.9), (5.1.10), (5.1.11), (5.1.12) และ (5.1.13) ตามลำดับ

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i^{(k)} \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (5.1.9)$$

$$x^{(j)} \leftarrow x^{(j)} - \bar{x} \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5.1.10)$$

$$x_i^{(k)} \quad k = 1, 2, \dots, n. \text{ and } x_j^{(k)} \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (5.1.11)$$

$$s_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n x_i^{(k)} x_j^{(k)} \quad (5.1.12)$$

โดยที่

\bar{x}_i แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลเมตริกซ์ X ในแต่ละหลัก

$x^{(j)}$ แทน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเมตริกซ์ข้อมูล

s_{ij} แทน เมตริกซ์ของความแปรปรวน

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ลบด้วยค่าเฉลี่ยของทุกคอลัมน์ เมื่อจัดรูปแบบข้อมูลแล้วคำนวณหา Covariance เมตริกซ์ด้วยสมการที่ (5.1.14)

$$S(X) = \frac{1}{n-1} xx^T \quad (5.1.13)$$

$$XX^T = \frac{1}{n-1 \sum_{k=1}^n (x^{(k)} - \bar{x})(x^{(k)} - \bar{x})^T} \quad (5.1.14)$$

ขั้นตอนต่อมาหาค่าไอเกนและเวกเตอร์ไอเกนของเมตริกซ์ความแปรปรวนที่ได้จากสมการที่ (5.1.14) ซึ่งค่าเมตริกซ์เวกเตอร์ไอเกนที่ได้จะนำไปสร้างตัวแปรใหม่ ดังนี้

$$\begin{aligned} PC_1 &= w_1' = w_{11}X_1 + w_{12}X_2 + \dots + w_{1n}X_n \\ PC_2 &= w_2' = w_{21}X_1 + w_{22}X_2 + \dots + w_{2n}X_n \\ PC_n &= w_n' = w_{n1}X_1 + w_{n2}X_2 + \dots + w_{nn}X_n \end{aligned} \quad (5.1.15)$$

เมื่อ เป็นตัวแปรใหม่ที่สร้างขึ้นมีจำนวนสูงสุดเท่ากับจำนวนขนาดของเมตริกซ์ความแปรปรวน โดยจะสามารถดึงความสัมพันธ์ของตัวแปรเดิมเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ซึ่งพิจารณาจากค่าไอเกนที่ได้ของเมตริกซ์ความแปรปรวนซึ่งจะเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยเช่นกัน โดยส่วนใหญ่จะพิจารณาจากร้อยละของค่าไอเกนสะสมของตัวประกอบหลังค่าไอเกนตัวแรกเป็นอย่างต่ำร้อยละ 80 เช่น มีจำนวนตัวแปรใหม่ $n = 7$ ตัว แต่มีสัดส่วนค่าไอเกนสะสม 2 ตัวแรกร้อยละ 84 ในกรณีนี้เราจะสามารถใช้ตัวแปรใหม่และแทนตัวแปรเดิมทั้งหมดได้ ผลลัพธ์จากเทคนิค PCA จะได้ค่าไอเกนและเวกเตอร์ไอเกน โดยข้อมูลทั้งสองมีความสมนัยซึ่งกันและกัน ขั้นตอนสุดท้ายคือการแปลงเพื่อแสดงเป็นภาพฉายโดยจะเลือกแกนจากเวกเตอร์ไอเกนที่มีการกระจายสูงสุดและมีค่าอธิบายความสัมพันธ์ได้มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 80 ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นตัวแปรใหม่ $PCA1$, $PCA2$ และ $PCA3$ ทั้งตัวแปรสามารถแสดงเป็นภาพฉายได้ในรูปแบบ 2 มิติ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับชุดข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์ เพื่อนำไปใช้ต่อไป

ผลการทดลองระบบจุ่มอิเล็กทรอนิกส์ตอนที่ 2

5.2.1 คำนำ

การทำงานของจุ่มอิเล็กทรอนิกส์มีขั้นตอนการทำงานที่สำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ การตรวจวัดสารประกอบที่ระเหยง่าย และการวิเคราะห์หรือประมวลผลการตรวจวัด ซึ่งการตรวจวัดจะได้ผลที่ดีจะขึ้นอยู่กับ การออกแบบและเลือกก๊าซเซ็นเซอร์ที่จะนำมาใช้กับตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัด ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวตัวอย่างและทำการเลือกก๊าซเซ็นเซอร์ที่เหมาะสม เนื่องจากข้อจำกัดของการตอบสนองทางเคมีของก๊าซเซ็นเซอร์มีบางชนิดที่มีการผลิตขึ้นมาจำหน่าย ส่วนในเทคนิคในการวิเคราะห์ผลการทดลองมีหลายเทคนิค ซึ่งแต่ละเทคนิคก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นเทคนิคมีข้อดีที่สามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว

5.2.2 ผลการทดลองจุ่มอิเล็กทรอนิกส์วัดเครื่องตีแม่เหล็กอัลตราโซนิก

ในการทดลองเป็นการนำก๊าซเซ็นเซอร์จำนวน 7 ตัวทำงานร่วมกันทำการตรวจวัดสารประกอบที่ระเหยง่ายที่อยู่ในเครื่องตีแม่เหล็กอัลตราโซนิก ซึ่งหลังจากการตรวจวัดสารตัวอย่างแล้วนำมาทำการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของเซ็นเซอร์แต่ละตัว โดยผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์จากสมการที่ 5.2.1 เมื่อผ่านวงจรจุ่มแรงดันไฟฟ้า (Voltage Dividers) ก็จะกลายมาอยู่ในรูปของแรงดันดังสมการที่ (5.2.2)

$$\Delta R\% = \frac{R_{MAX} - R_{MIN}}{R_{MIN}} \times 100 \quad (5.2.1)$$

$$x_{(dif)} = Max(x(n)) - Min(x(n)) \quad (5.2.2)$$

เราจะได้ค่าแรงดันตอบสนองของเซ็นเซอร์แต่ละตัวกับตัวอย่างเครื่องตีแม่เหล็กอัลตราโซนิก ซึ่งหลังจากคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดจะได้ดังตารางที่ 5.2.1

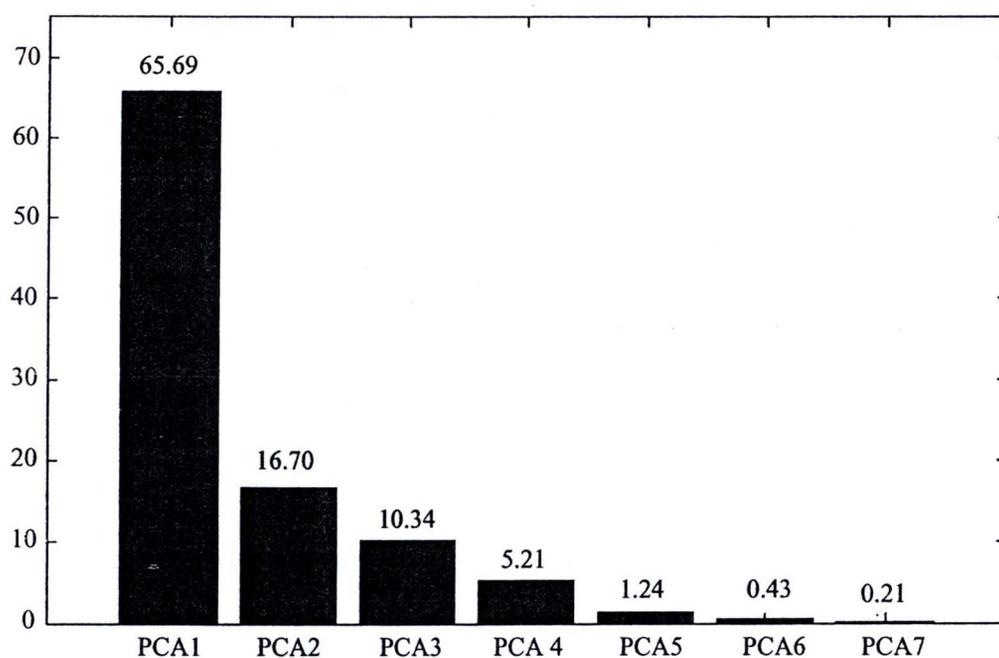
ตารางที่ 5.2.1 แรงดันตอบสนองของเซ็นเซอร์แต่ละตัวต่อเครื่องต้มแอลกอฮอล์เบียร์สดในจุ่มกอิเล็กทรอนิกส์

ครั้งที่	MQ 2 (V)	MQ 3 (V)	MQ 4 (V)	MQ 6 (V)	MQ 7 (V)	TGS2600 (V)	TGS2602 (V)
สูตรที่ 1							
1	0.589	0.241	0.112	0.184	0.071	1.019	0.246
2	0.548	0.225	0.092	0.204	0.071	1.101	0.224
3	0.618	0.24	0.095	0.235	0.075	1.03	0.235
4	0.589	0.26	0.112	0.184	0.081	0.953	0.26
5	0.674	0.245	0.102	0.306	0.082	1.19	0.275
สูตรที่ 2							
1	0.245	0.113	0.061	0.152	0.041	0.459	0.072
2	0.296	0.133	0.061	0.041	0.071	0.52	0.113
3	0.286	0.113	0.061	0.092	0.062	0.469	0.102
4	0.183	0.113	0.071	0.041	0.051	0.449	0.082
5	0.215	0.123	0.081	0.031	0.051	0.439	0.143
สูตรที่ 3							
1	0.143	0.082	0.061	0.011	0.03	0.51	0.377
2	0.133	0.062	0.071	0.011	0.03	0.61	0.377
3	0.174	0.097	0.056	0.021	0.046	0.68	0.398
4	0.183	0.113	0.071	0.041	0.051	0.449	0.382
5	0.23	0.133	0.081	0.035	0.057	0.474	0.302

จากตารางที่ 5.2.1 จะนำข้อมูลที่ได้อ่านมาเขียนในรูปเมตริกซ์ขนาด 15×7 เพื่อนำไปวิเคราะห์การจำแนกด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อถึงความสัมพันธ์ของเซ็นเซอร์ทั้ง 7 ตัวมาที่มีเป็นตัวแปรใหม่ คือ ตัวแปร $PCA1-PCA7$ ซึ่งแต่ละตัวก็จะมีความสามารถดึงเอาความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แตกต่างกัน คือ ตัวแปร $PCA1$ จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงความสัมพันธ์มากที่สุดและจะลดลงเรื่อยๆ จนตัวแปร $PCA7$ ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงความสัมพันธ์น้อยที่สุดตารางที่ 5.2.2 และรูปที่ 5.2.1

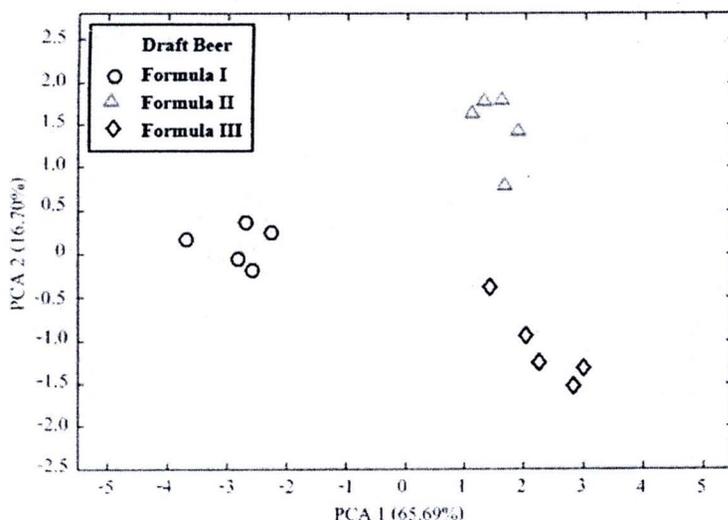
ตารางที่ 5.2.2 เปอร์เซ็นต์ของตัวแปรใหม่ที่สกัดจากจุมกอเล็กทรอนิกส์

ตัวแปรใหม่	เปอร์เซ็นต์การดึงความสัมพันธ์	เปอร์เซ็นต์สะสม
PCA1	65.69	65.69
PCA2	16.70	82.39
PCA3	10.34	92.73
PCA4	5.21	97.94
PCA5	1.42	99.36
PCA6	0.43	99.79
PCA7	0.21	100



รูปที่ 5.2.1 เปอร์เซ็นต์การดึงความสัมพันธ์ข้อมูลจุมกอเล็กทรอนิกส์ของตัวแปรใหม่

ซึ่งจากตารางที่ 5.2.2 จะเห็นว่า ตัวแปร *PCA1* มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงความสัมพันธ์ของเมตริกซ์ข้อมูลเท่ากับ 65.69 ส่วนตัวแปร *PCA2* มีค่าเท่ากับ 16.70 ซึ่งทั้งสองตัวแปรให้ผลรวมการดึงความสัมพันธ์เท่ากับ 82.39 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าร้อยละ 80 ดังนั้นเราสามารถถือเอาตัวแปร *PCA1* และ *PCA2* เป็นตัวแทนของทั้ง 7 ตัวแปรได้ ตามหลักการพิจารณาตัวประกอบหลักที่เหมาะสม เราสามารถดูความสัมพันธ์ของทั้งสองตัวแปรโดยการนำไปพล็อตกราฟเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา ดังรูปที่ 5.2.2



รูปที่ 5.2.2 การจำแนกของจมูกอิเล็กทรอนิกส์หลังการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA

5.2.3 สรุปผลการทดลองจมูกอิเล็กทรอนิกส์วัดเครื่องตีแอลกอฮอล์เบียร์สด

การวิจัยจมูกอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ในการแยกแยะเครื่องตีแอลกอฮอล์เบียร์สดเราได้ทดลองนำก๊าซเซ็นเซอร์ชนิดโลหะออกไซด์จำนวน 7 ตัว มาต่อร่วมกัน และนำไปตรวจวัดสารตัวอย่างเบียร์สด หลังจากนั้นนำผลที่ได้มาสร้างเป็นเมตริกซ์ข้อมูลและใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเพื่อดูการจำแนกข้อมูลพบว่า สามารถแบ่งกลุ่มข้อมูลเป็น 3 กลุ่มได้อย่างชัดเจน โดยข้อที่ควรพิจารณาในการคัดเลือกก๊าซเซ็นเซอร์ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้วัดสารประกอบต่าง ๆ นั้นนอกจากการศึกษาสารตัวอย่างว่ามีองค์ประกอบอะไรบ้างแล้ว ก็ต้องหาเซ็นเซอร์ที่ตอบสนองต่อสารนั้นให้เหมาะสม และก็ยังต้องนำมาใช้ทดสอบกับสารนั้นจริง ๆ ว่าเหมาะสมในการแยกแยะได้จริงหรือไม่ เพราะสารตัวอย่างที่นำมาวัดมักมีสารประกอบต่าง ๆ จำนวนมากหลายชนิด อาจจะทำให้เซ็นเซอร์ตอบสนองเท่า ๆ กันซึ่งทำให้ไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างได้

ตอนที่ 3 การทดลองและผลการทดลองคาร์บอนนาโนทิวบ์เซนเซอร์

ในตอนนี้จะกล่าวถึงผลของการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกัน 2 วิธี คือการสังเคราะห์แบบกระบวนการตกสะสมไอเคมีแบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition) และการสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical Vapor Deposition) ซึ่งทั้งสองวิธีนี้จะสังเคราะห์ด้วยเงื่อนไขที่เหมือนกัน คือ อุณหภูมิความร้อนที่แผ่นฐานรองเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ และอัตราการไหลของแก๊สเฉื่อยที่นำพาไอระเหยของสารตั้งต้นของคาร์บอนเข้ามายังห้องปฏิกิริยาในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ผลที่ได้จากการสังเคราะห์ทั้งสองวิธีจะนำมาทำการเปรียบเทียบถึงลักษณะของผิวหน้าของการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางความหนาในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ รวมไปถึงการเรียงตัวหรือการจัดระเบียบของท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) จากนั้นจะนำมาทำการต่อวงจรใช้งานเพื่อทดสอบการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์มาเป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์ โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์เมื่อมีการดูดซับแอลกอฮอล์เพื่อทดสอบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์จากกระบวนการใดให้คุณสมบัติในการเป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์ที่ดี ซึ่งแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทดลองคือ เอทานอลและเมทานอล เซนเซอร์ที่ดีที่ได้จากการเปรียบเทียบจะนำไปทดสอบตรวจวัดแอลกอฮอล์ชนิดอื่นๆ เพื่อดูถึงผลการตอบสนองของเซนเซอร์ที่มีต่อแอลกอฮอล์แต่ละชนิดด้วย

นอกจากนี้ได้มีการศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในขณะที่ใช้งานเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยของแอลกอฮอล์ ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดลองวัดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศา อุณหภูมิห้อง 25 องศา และที่อุณหภูมิ 85 องศา เพื่อที่จะหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการนำเซนเซอร์มาใช้งานให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

5.3.1 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

5.3.1.1 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition)

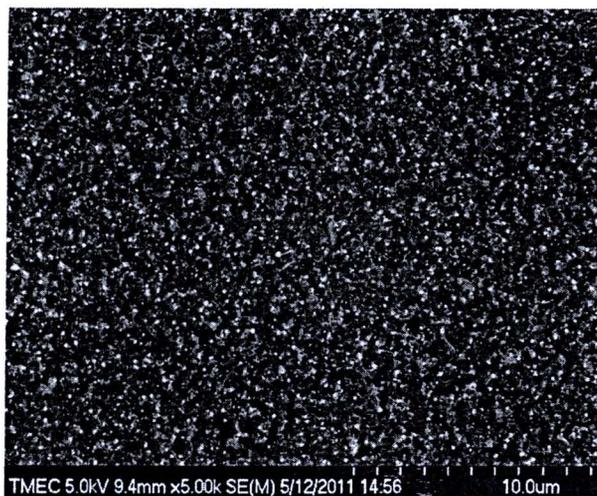
การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์จะสังเคราะห์ลงบนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีการเคลือบโลหะคะตะไลต์ไว้แล้ว ซึ่งในทดลองนี้ใช้โลหะนิกเกิลเป็นโลหะคะตะไลต์ การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน เตาความร้อนที่ใช้งานจะเป็นแบบเตาความร้อนสามโซน การใช้งานจะอยู่ที่กลางเตาหรือช่วงแพลตฟอร์ม เพื่อที่จะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่แม่นยำในการใช้งาน อุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์มีด้วยกัน 3 อุณหภูมิคือ 600, 650 และ 750 °C ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 5 นาที และใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้นของคาร์บอนในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยมีอัตราการไหล

ของแก๊สเฉื่อยในการนำพาไอระเหยของเอทานอลเป็น 0.3 และ 0.5 cc/min เพื่อศึกษาถึงลักษณะการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ความหนาแน่น การจัดระเบียบของท่อคาร์บอน รวมไปถึงภาพรวมของโครงสร้างทั่วไปของการกระจายตัวของท่อคาร์บอนที่ได้ก่อนจะนำมาประยุกต์เป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์ ซึ่งเงื่อนไขและสัญลักษณ์ในการสังเคราะห์ได้นำเสนอไว้แล้วในตารางที่ 5.3.1 ดังนี้

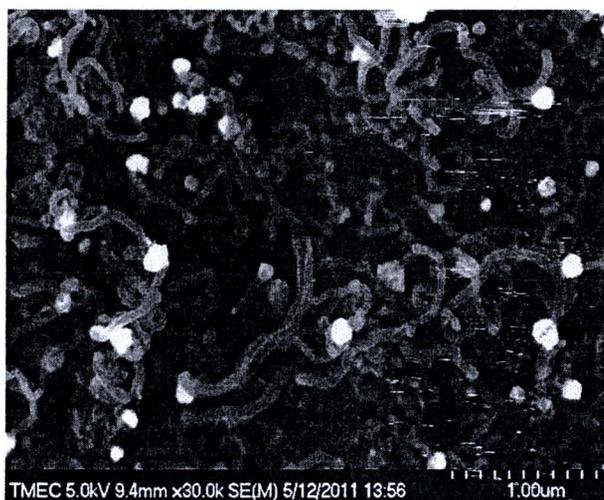
ตารางที่ 5.3.1 เงื่อนไขการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (cc/min)	สัญลักษณ์ (T-t-cc/min)
5	600	0.3	T600-5-0.3
		0.5	T600-5-0.5
	650	0.3	T650-5-0.3
		0.5	T650-5-0.5
	700	0.3	T700-5-0.3
		0.5	T700-5-0.5

เงื่อนไข อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการไหล: T600-5-0.3



(ก)



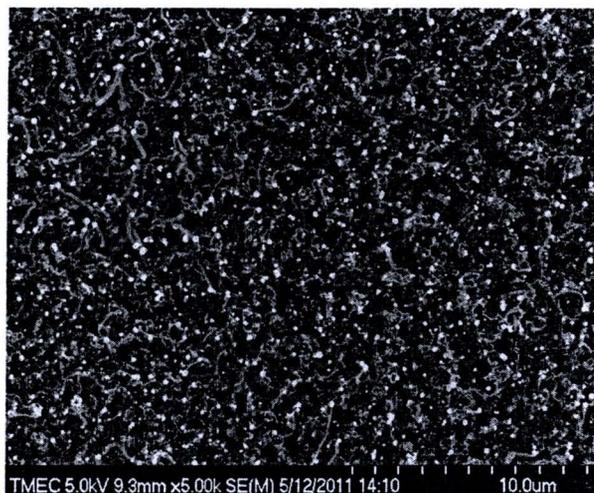
(ข)

รูปที่ 5.3.1 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข

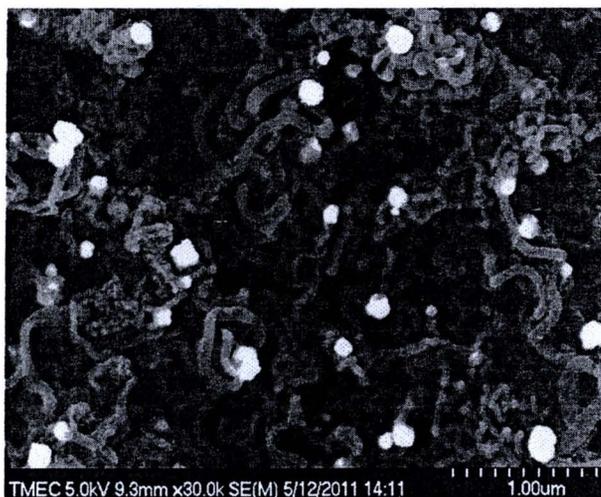
T600-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 5.3.1(ก) เป็นภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบนจะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.1(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่าเพื่อดูโครงสร้างภายในพบว่า ท่อคาร์บอนไม่ได้มีการจัดระเบียบเป็นเส้นตรง แต่มีการเกิดท่อคาร์บอนที่มีเส้นโค้งงอและจับตัวกันเป็นกระจุกหรือกลุ่มก้อนในบางพื้นที่ และบางพื้นที่ก็เกิดเป็นช่องว่างเป็นโพรงสามารถมองเห็นได้ชัดเจน

เงื่อนไข อุณหภูมิ-เวลา-อัตราไหล: T600-5-0.5



(ก)

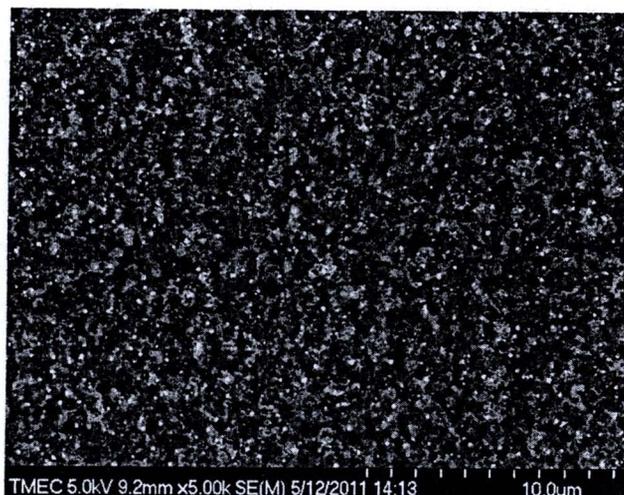


(ข)

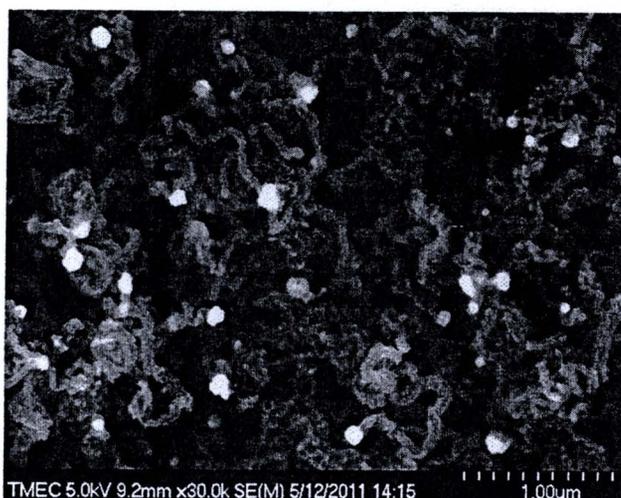
รูปที่ 5.3.2 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข T600-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 5.3.2(ก) เป็นภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบนจะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.2(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่าเพื่อดูโครงสร้างภายในพบว่า ท่อคาร์บอนไม่ได้มีการจัดระเบียบเป็นเส้นตรง แต่มีการเกิดท่อคาร์บอนที่มีเส้นโค้งงอและจับตัวกันเป็นกระจุกหรือกลุ่มก้อนในบางพื้นที่ และบางพื้นที่ก็เกิดเป็นช่องว่างเป็นโพลกคล้ายกับรูปที่ 5.3.1 แต่การกระจุกตัวจะมีความหนาแน่นกว่า

เงื่อนไซ อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการไหล: T650-5-0.3



(ก)

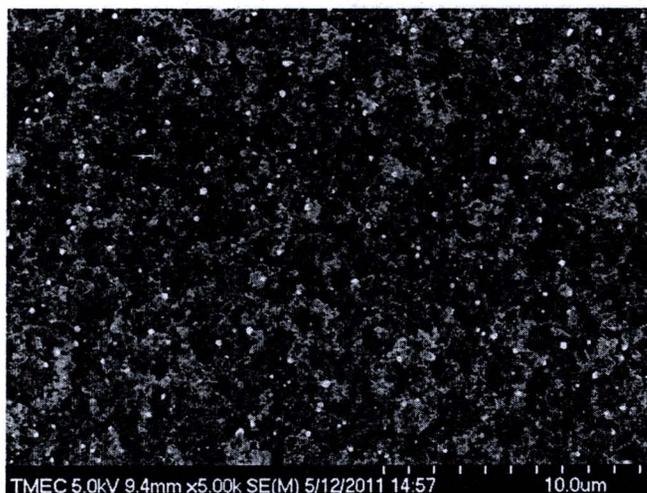


(ข)

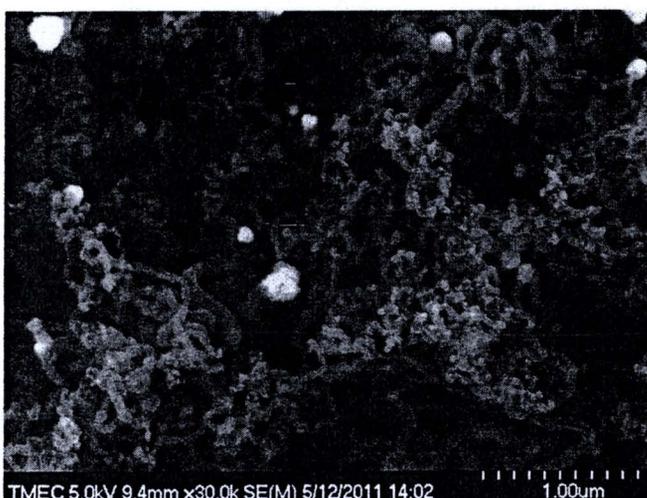
รูปที่ 5.3.3 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไซ T650-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 5.3.3(ก) เป็นภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบน จะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.3(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่าเพื่อดูโครงสร้างภายในพบว่า ท่อคาร์บอนจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งงอและจับตัวกันเป็นกระจุกหรือกลุ่มก้อนอย่างหนาแน่น โฟงหรือช่องว่างจะมีขนาดแคบกว่าการสังเคราะห์ของการทดลองที่ผ่านมา ความยาวของท่อในการยึดตรงซ้อนค่างน้อย

เงื่อนไข อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการใช้: T650-5-0.5



(ก)

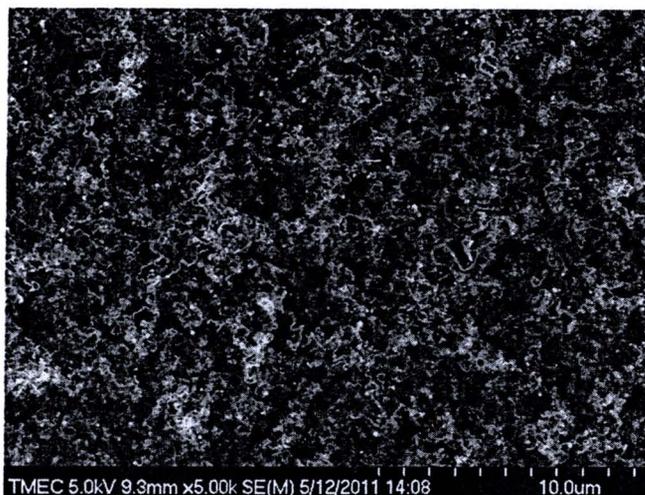


(ข)

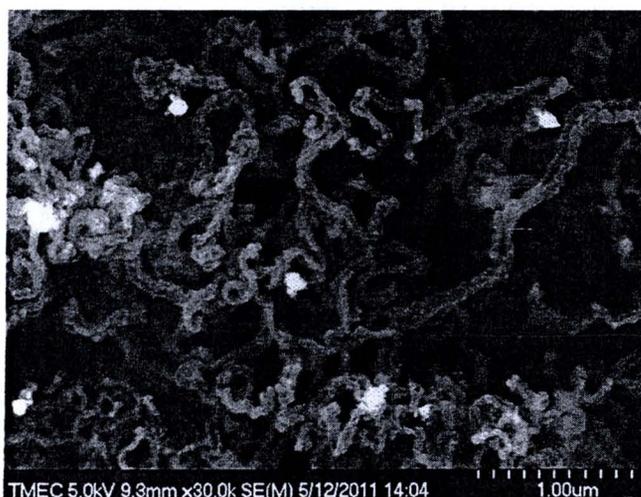
รูปที่ 5.3.4 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข T650-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 5.3.4(ก) เป็นภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบนจะมีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนซ้อนทับกันอย่างหนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.4(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่าเพื่อดูโครงสร้างภายในพบว่าลักษณะการเกิดท่อคาร์บอนคล้ายกับรูปที่ 5.3.1 คือแต่ละเส้นของท่อคาร์บอนจะมีการกระจุกตัวเกาะกลุ่มเป็นกลุ่มก้อนที่หนาแน่นมาก ทำให้โพรงหรือช่องว่างภายในจะมีขนาดเล็ก แต่ช่องว่างนี้จะมีขนาดที่เล็กกว่ารูปที่ 5.3.1

เงื่อนไข อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการไหล: T700-5-0.3



(ก)



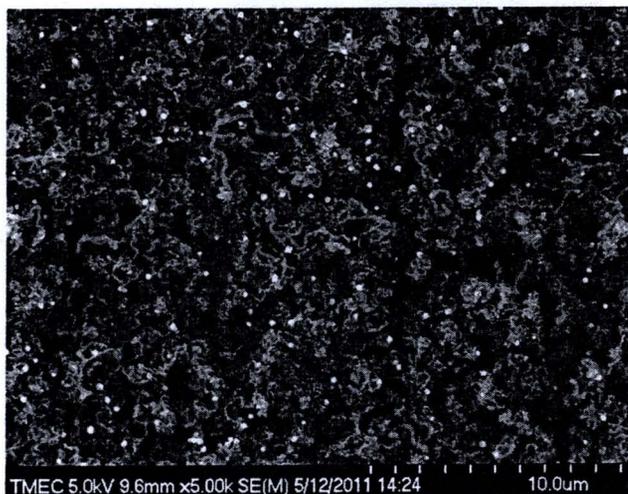
(ข)

รูปที่ 5.3.5 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข

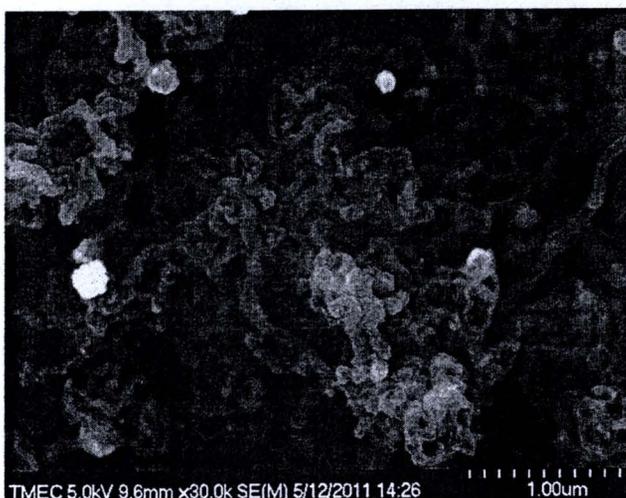
T700-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 5.3.5(ก) เป็นภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบนจะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.5(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่าเพื่อดูโครงสร้างภายในพบว่า ท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้นมีการขดตัวไปมาไม่ได้เป็นเส้นตรง การวางตัวแต่ละเส้นซ้อนข้างที่จะมีระยะห่างที่ใกล้เคียงกันไม่กระจุกตัวเป็นกลุ่มก้อน ช่องว่างหรือโพรงจึงมีน้อยและมีขนาดใกล้เคียงกัน ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางแต่ละเส้นเมื่อมองด้วยตาเปล่ามีขนาดที่ใกล้เคียงกัน

เงื่อนไข อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการไหล: T700-5-0.5



(ก)

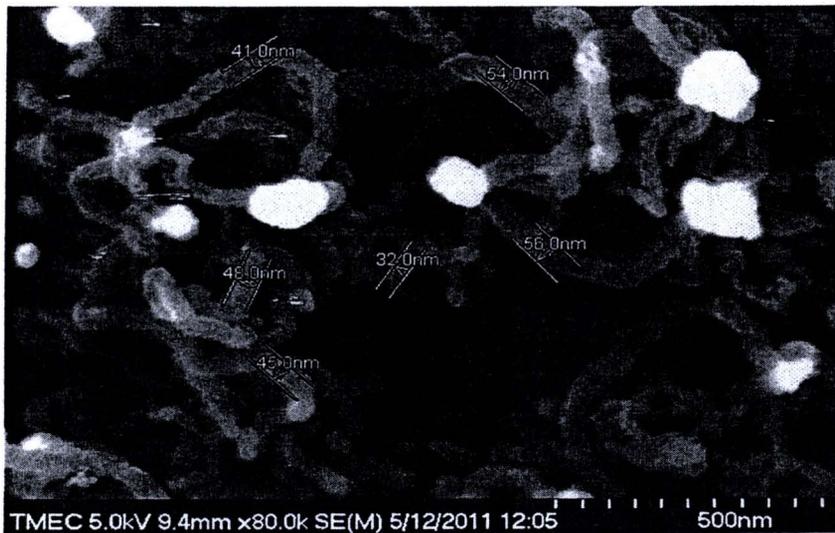


(ข)

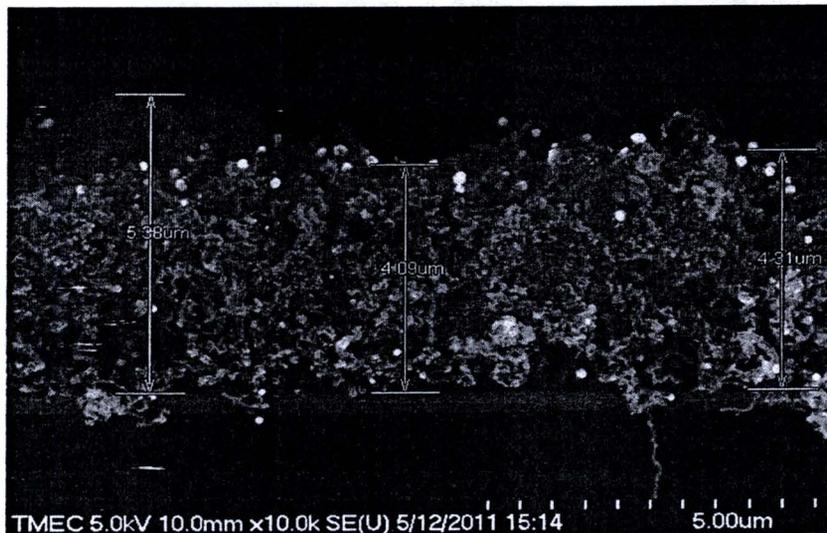
รูปที่ 5.3.6 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข

T700-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 5.3.6(ก) เป็นภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบน จะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.6(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่าเพื่อดูโครงสร้างภายในพบว่า การเกิดท่อคาร์บอนจะมีการขดหรือการกระจุกตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ว่างตัวไปมาคล้ายกับรูปที่ 5.3.4 แต่จะมีขนาดของกลุ่มก้อนที่ใหญ่กว่าเล็กน้อย ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางแต่ละเส้นก็ใกล้เคียงกันเมื่อมองด้วยตาเปล่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.3.7 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้
(ก) ขนาดของคาร์บอนนาโนทิวที่สังเคราะห์ได้ (ข) ภาพถ่ายตัดขวางของคาร์บอนนาโนทิว

จากรูปที่ 5.3.7(ก) เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 80,000 เท่าพบว่า ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดที่ไม่เท่ากันวางตัวกระจายซ้อนทับกันจนเต็มพื้นที่ ซึ่งขนาดของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จะอยู่ในช่วง 32.0-56.0 nm การวางตัวที่ไม่เป็นระเบียบทำให้ก่อกองว่างหรือโพรง และจากรูปที่ 5.3.7(ข) เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด (SEM) 80,000 เท่าแบบภาพตัดขวางพบว่า ความหนาของท่อคาร์บอนนาโนทิวที่เกิดจากการซ้อนทับกันจะมีความหนาหรือความสูงที่ไม่เท่ากันทั้งแผ่น ความหนาของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จะอยู่ในช่วง 4.31 um - 5.38 um และที่ปลายของท่อคาร์บอนจะสังเกตเห็นจุดสีขาวของโลหะคะตะไลสต์นิเกิลที่ใช้เป็นตัวดักจับคาร์บอนในการเกิดเป็นท่อคาร์บอน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวในครั้งนี้

นี้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ในลักษณะการเกิดแบบ Tip growth คือ โลหะคะตะไลสต์ที่มีการหลอมเหลว จะทำหน้าที่จับอะตอมคาร์บอน คาร์บอนที่โตนดักจับจะแทรกตัวลงไปด้านล่างแล้วสร้างพันธะต่อกัน เมื่อเกิดการสะสมอะตอมของคาร์บอนนี้มากขึ้นจึงสามารถดันโลหะคะตะไลสต์ขึ้นมาอยู่ด้านบนของปลายท่อ

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition) พบว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์บนพื้นฐานรองที่เคลือบด้วยโลหะคะตะไลต์นิเกิลได้ โดย พื้นผิวด้านบนของคาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่เรียบสม่ำเสมอ แต่จะมีการกระจายตัวซ้อนทับกันเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรอง และทุกเงื่อนไขในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จะไม่มีการเรียงตัวของท่อคาร์บอนเป็นเส้นตรงที่มีระเบียบแต่จะเกิดการโค้งงอขนาดของท่อคาร์บอน และบางส่วนมีการเกาะกลุ่มเป็นกลุ่มก้อนที่แน่นอนวางซ้อนทับกันจนทำให้ในบางจุดเกิดเป็นโพรงหรือช่องว่างตรงกลางซึ่งไม่มีคาร์บอนนาโนทิวบ์อยู่ ซึ่งจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทุกเงื่อนไขซ้อนข้างจะเป็นไปในทางเดียวกัน และจากการทดลองจะเห็นว่าเงื่อนไขการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลไอระเหยของเอทานอล 0.3 cc/min คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จะมีความหนาแน่นมากกว่าเงื่อนไขอื่นดังแสดงดังรูปที่ 4.1 และที่เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการไหลไอระเหยเอทานอลที่ 0.5 cc/min มีขนาดของท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ขนาดใหญ่กว่าเงื่อนไขอื่น

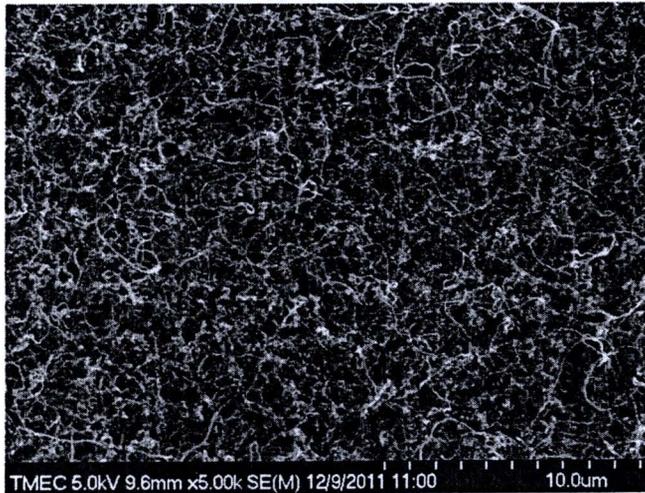
5.3.1.2 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical Vapor Deposition)

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์จะสังเคราะห์ลงบนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีการเคลือบโลหะคะตะไลต์ไว้แล้ว ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้โลหะนิเกิลเป็นโลหะคะตะไลต์ โดยการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อนได้อธิบายไว้อย่างละเอียดแล้วในบทที่ 3 และเพื่อการศึกษาการเปรียบเทียบของการเกิดของท่อคาร์บอน ดังนั้นกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อนจึงมีการสังเคราะห์ที่มีเงื่อนไขที่เหมือนกันกับการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน ซึ่งมีการใช้ความร้อนที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยกัน 3 อุณหภูมิคือ 600, 650 และ 750 °C ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 5 นาที และใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้นของคาร์บอนในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยมีอัตราการไหลของแก๊สเฉื่อยในการนำพาไอระเหยของเอทานอลเป็น 0.3 และ 0.5 cc/min เพื่อศึกษาถึงลักษณะการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ความหนาแน่น การจัดระเบียบของท่อคาร์บอน รวมไปถึงภาพรวมของโครงสร้างทั่วไปของการกระจายตัวของท่อคาร์บอนที่ได้ก่อนจะนำมาประยุกต์เป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์ ซึ่งเงื่อนไขและสัญญาณลักษณะในการสังเคราะห์ได้นำเสนอไว้แล้วในในตารางในในตารางที่ 5.3.2

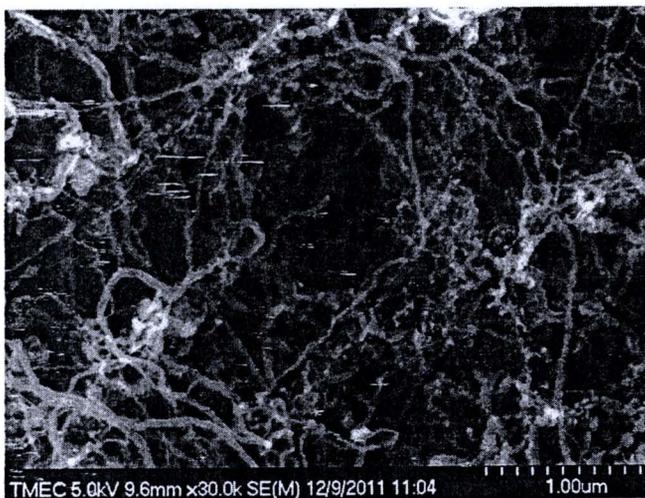
ตารางที่ 5.3.2 เงื่อนไขการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (cc/min)	สัญลักษณ์ (T-t-cc/min)
5	600	0.3	H600-5-0.3
		0.5	H600-5-0.5
	650	0.3	H650-5-0.3
		0.5	H650-5-0.5
	700	0.3	H700-5-0.3
		0.5	H700-5-0.5

เงื่อนไข อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการไหล: H600-5-0.3



(ก)



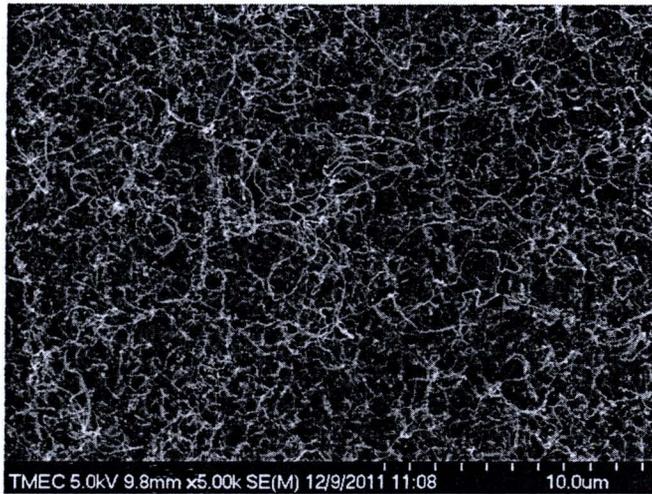
(ข)

รูปที่ 5.3.8 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข

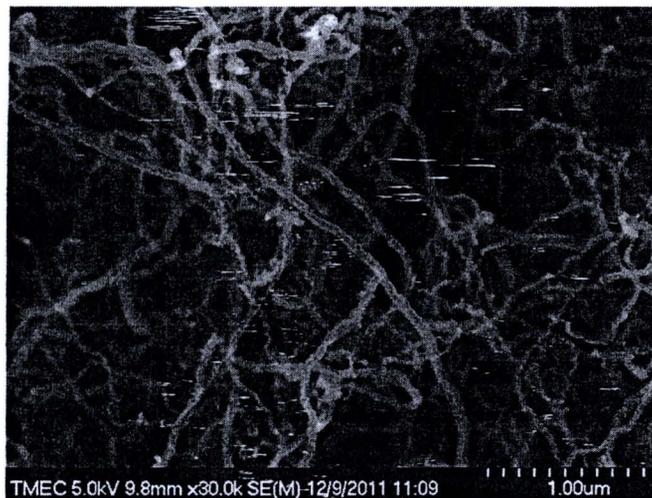
H600-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 5.3.8(ก) เป็นภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบน จะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และ รูปที่ 5.3.8(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่า พบว่าลักษณะของท่อคาร์บอนที่ได้จะมีความยาวและเป็นเส้นตรงที่มีการวางตัวที่เป็นระเบียบมากกว่าการสร้างแบบเตาความร้อน ความยาวของท่อคาร์บอนก็มีการยึดตัวยาวกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน การจับตัวเป็นกลุ่มก้อนเพียงเล็กน้อย แต่มีโพรงหรือช่องว่างบ้างในบางบริเวณ

เงื่อนไข อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการใช้: H650-5-0.5



(ก)



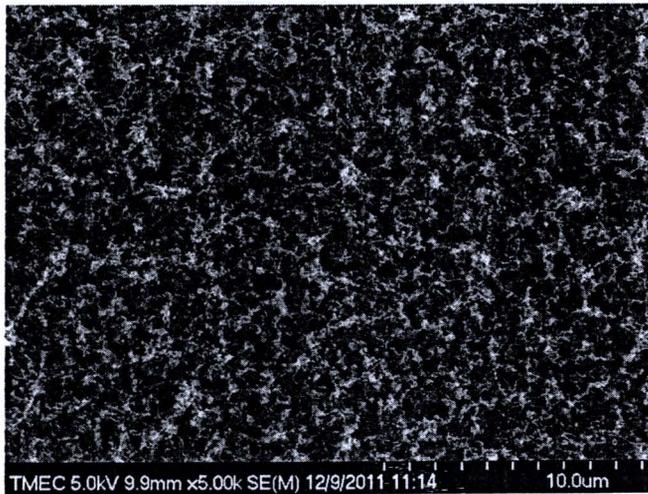
(ข)

รูปที่ 5.3.9 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข

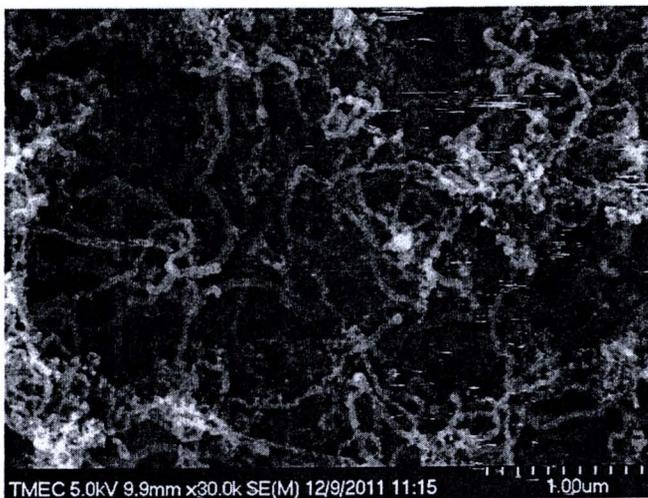
H600-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 5.3.9(ก) ภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบนจะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.9(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่า พบว่าลักษณะของท่อคาร์บอนที่ได้จะมีการวางตัวที่เป็นระเบียบและมีทิศทางซ้อนข้างจะไปในทิศทางเดียวกันมากกว่าการสร้างแบบเตาความร้อน ท่อคาร์บอนที่ได้จะมีความยาวความยาวและซ้อนข้างเป็นเส้นตรง มีช่องว่างระหว่างท่อคาร์บอนเพียงเล็กน้อย ไม่ค่อยมีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน

เจือไนซ์ อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการใช้: H650-5-0.3



(ก)

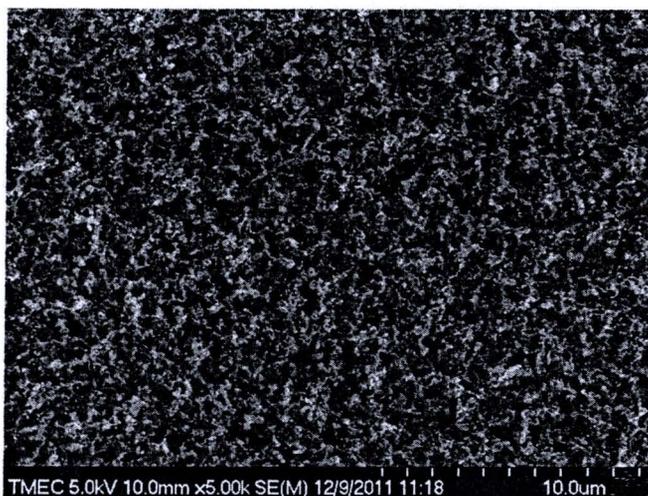


(ข)

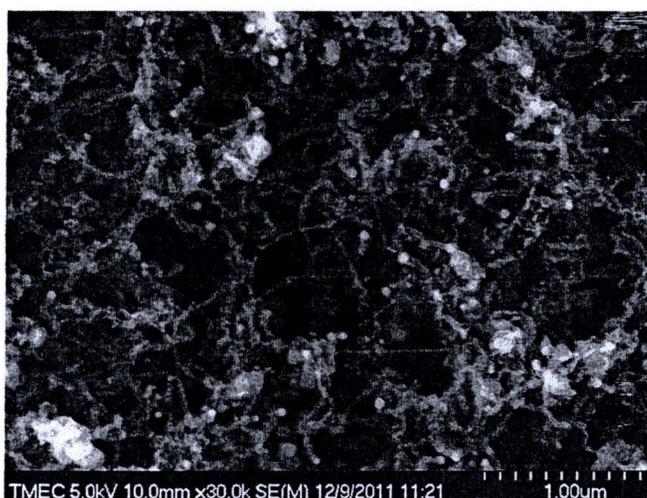
รูปที่ 5.3.10 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเจือไนซ์ H650-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 5.3.10(ก) ภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบนจะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.10(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่า พบว่าลักษณะของท่อคาร์บอนที่ได้ไม่มีการวางตัวอย่างเป็นระเบียบและมีการขดกระจุกตัวกันเป็นแบบกลุ่มก้อนอย่างหนาแน่น มีขนาดความยาวของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้สั้นมาก บางพื้นที่ก็เป็นช่องว่างที่ไม่มีท่อคาร์บอนอยู่ เนื่องจากการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่เป็นแบบกลุ่มก้อน

เงื่อนไข อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการใช้: H650-5-0.5



(ก)

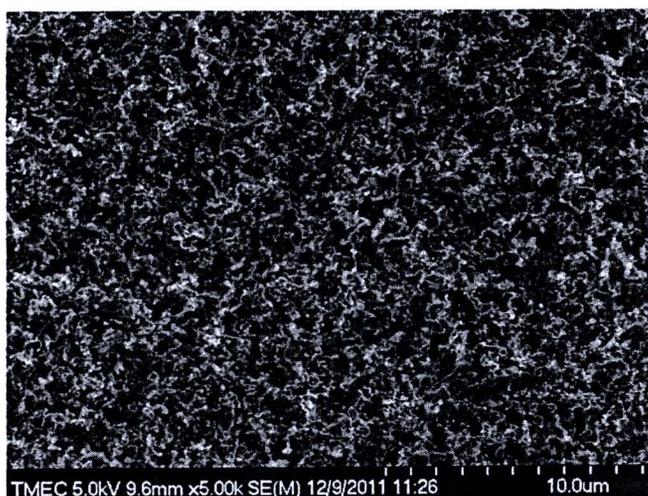


(ข)

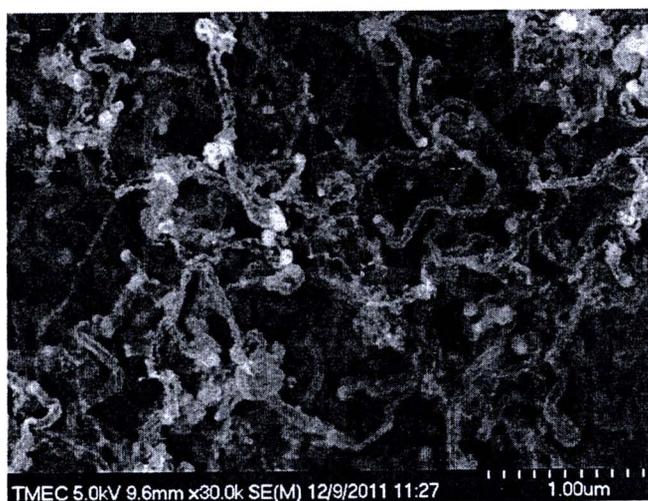
รูปที่ 5.3.11 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข H650-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 5.3.2(ก) ภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบนจะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.2(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่า เพื่อดูโครงสร้างภายในพบว่า ท่อคาร์บอนไม่ได้มีการจัดระเบียบเป็นเส้นตรง มีการขดตัวกันเป็นกระจุกกลุ่มก้อนเล็ก ๆ อย่างหนาแน่นเต็มพื้นที่แทบไม่มีช่องว่าง และระหว่างกลุ่มก้อนของคาร์บอนจะมีท่อคาร์บอนเชื่อมต่อกันระหว่างกลุ่มก้อนนั้น ขนาดของท่อคาร์บอนที่เชื่อมต่อกันจะมีขนาดที่เล็กมาก

เงื่อนไข อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการไหล: H700-5-0.3



(ก)

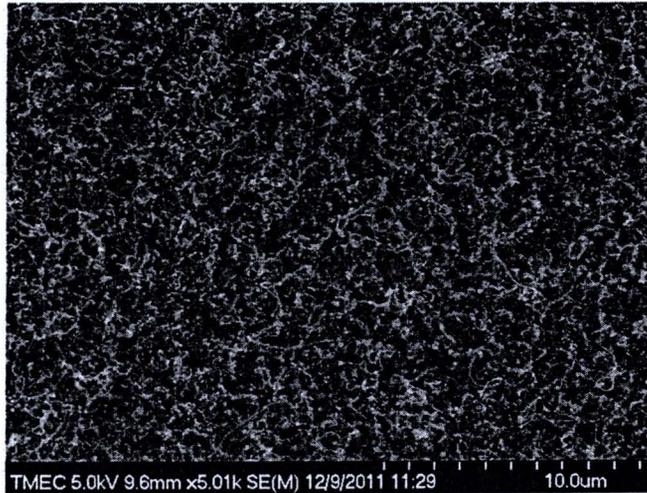


(ข)

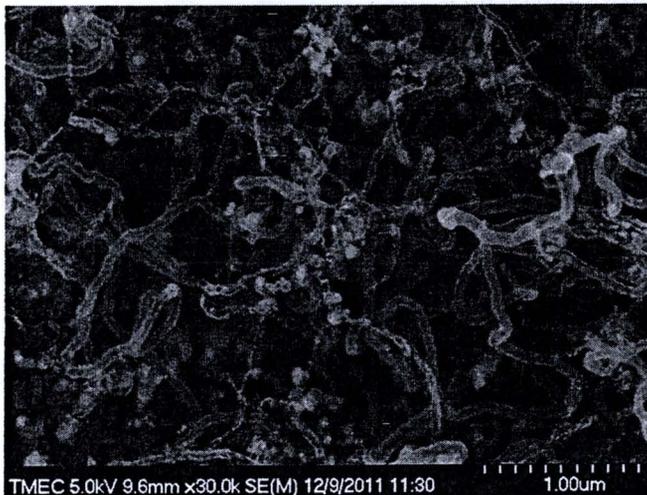
รูปที่ 5.3.12 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ จากเงื่อนไข 700-5-0.3 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูป 5.3.2(ก) ภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบนจะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.2(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่าเพื่อดูโครงสร้างภายในพบว่า ท่อคาร์บอนไม่ได้มีการจัดระเบียบเป็นเส้นตรง แต่มีการเกิดท่อคาร์บอนที่มีลักษณะที่เป็นเส้นโค้งงอ มีการจับตัวกันเป็นกระจุกหรือกลุ่มก้อนซ้อนซ้อนข้างน้อย แต่จะมีการกระจายตัวแบบไร้ทิศทาง มีช่องว่างน้อยเพราะการกระจายตัวของท่อคาร์บอนที่สม่ำเสมอ

เงื่อนไข อุณหภูมิ- เวลา-อัตราการไหล: H700-5-0.5



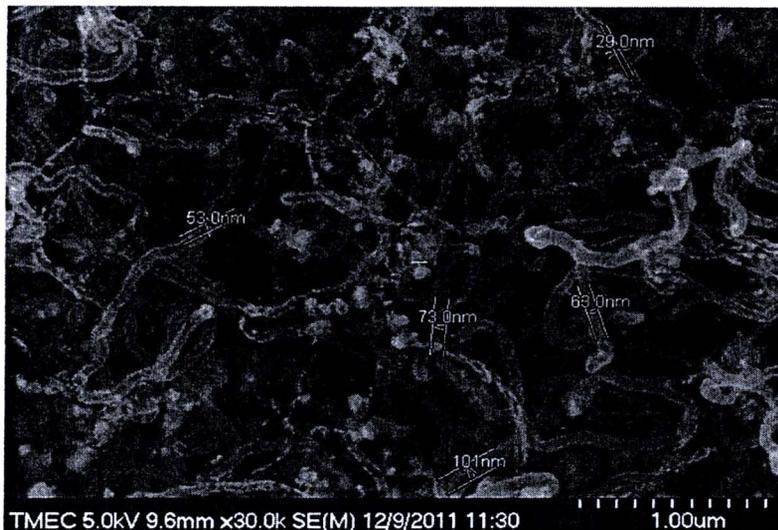
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.3.13 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไข H700-5-0.5 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

จากรูปที่ 5.3.2(ก) ภาพถ่าย SEM เพื่อดูพื้นผิวด้านบนของฟิล์มคาร์บอน ซึ่งพื้นผิวด้านบนจะมีการซ้อนทับกันของท่อคาร์บอนที่หนาแน่นและเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ และรูปที่ 5.3.2(ข) เป็นการขยายภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่าเพื่อดูโครงสร้างภายในพบว่า ท่อคาร์บอนไม่ได้มีการจัดระเบียบเป็นเส้นตรง การวางตัวจะกระจัดกระจายแต่ระยะห่างของแต่ละเส้นของท่อคาร์บอนค่อนข้างจะมีความห่างที่เท่าๆกัน ไม่มีการจับกันเป็นกลุ่มก้อน ช่องว่างภายในพื้นที่มีน้อยมากเกิดจากการกระจายตัวที่สม่ำเสมอของท่อคาร์บอนนั่นเอง



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.3.14 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้
(ก) ขนาดของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ (ข) ภาพถ่ายตัดขวางของท่อนาโนคาร์บอน

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองที่เคลือบด้วยโลหะคะตะไลต์นิเกิลได้ และจากภาพถ่าย SEM ที่ 5,000 เท่า พื้นผิวด้านบนของคาร์บอนนาโนทิวป์ไม่เรียบ แต่มีการกระจายตัวของท่อคาร์บอนเต็มพื้นที่ของแผ่นฐานรอง และจากภาพถ่าย SEM ที่ 30,000 เท่าจะเห็นได้ว่าทุกเงื่อนไขในการสังเคราะห์ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้มีการเรียงตัวไม่เป็นเส้นตรงมีการโค้งงอ แต่ท่อคาร์บอนที่ได้จะมีขนาดความยาวของท่อมากกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน จะมีช่วงของการยึดตัวให้เป็นเส้นตรงค่อนข้างเป็นเส้นตรงมากกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน จะมีการกระจายตัวมากกว่าการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน และจากการทดลองจะเห็นว่าทุกๆเงื่อนไขการสังเคราะห์จะได้ขนาดของเส้นผ่าน

ศูนย์กลางมีขนาดเล็กกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน ซึ่งดูได้จากรูปที่ 5.3.14(ก) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อคาร์บอนที่ได้จะมีขนาดที่ไม่เท่ากันซึ่งอยู่ในช่วง 29.0-104 nm และจากรูป 5.3.14(ข) เป็นภาพถ่าย SEM ภาพตัดขวาง พบว่าความสูงของท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เกิดการซ้อนทับกันอยู่ในช่วง 4.17-5.99 μm และที่ปลายของท่อคาร์บอนที่ได้จะสังเกตเห็นจุดสีขาวที่ปรากฏนั้นคือ โลหะคะตะไลต์นิเกิล ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบขดลวดความร้อนทุกเงื่อนไข เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ในลักษณะการเกิดแบบ Tip growth คือ โลหะคะตะไลต์ที่มีการหลอมเหลวจะทำหน้าที่จับอะตอมคาร์บอน คาร์บอนที่โดนดักจับจะแทรกตัวลงไปตามด้านล่างแล้วสร้างพันธะต่อกัน เมื่อเกิดการสะสมอะตอมของคาร์บอนนี้มากขึ้นจึงสามารถดันโลหะคะตะไลต์ขึ้นมาอยู่ด้านบนของปลายท่อแบบเดียวกันกับการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน

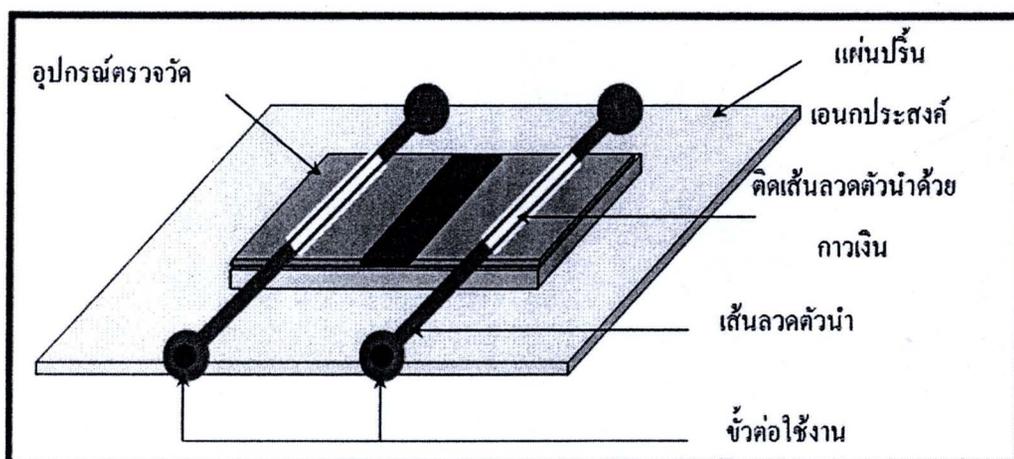
สรุปผลการเปรียบเทียบจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้งสองแบบ

ภาพโดยรวมของการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้งสองแบบผลที่ได้จะมีความแตกต่างกันในลักษณะของท่อคาร์บอน โดยการสังเคราะห์แบบขดลวดความร้อนท่อคาร์บอนที่ได้จะมีการยึดตัวตรงกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน รวมไปถึงการกระจายตัวของท่อคาร์บอนที่มีการกระจายตัวได้สม่ำเสมอ เพราะมีการเกาะกลุ่มหรือการขดตัวเป็นกระจุกที่น้อยกว่าการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน ขนาดของท่อคาร์บอนที่ได้โดยภาพรวม ท่อคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเตาความร้อนจะมีขนาดที่โตกว่าแบบขดลวดความร้อน แต่ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้งสองแบบนี้จะมีการเกิดท่อคาร์บอนที่เหมือนกันทั้ง 2 แบบคือการเกิดแบบ Tip growth โดยมีโลหะคะตะไลต์เกาะอยู่ตรงส่วนปลายของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้

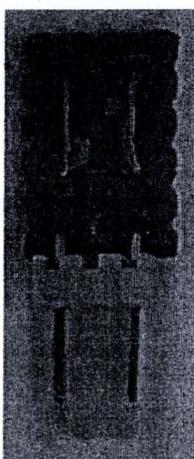
5.3.2 การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปใช้เป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์

5.3.2.1 การต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อใช้วัดความต้านทาน

การใช้งานคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซนเซอร์แอลกอฮอล์นั้น จะใช้คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเคมีของคาร์บอนนาโนทิวบ์เมื่อมีการดูดซับแอลกอฮอล์ จึงจำเป็นต้องมีขั้วต่อออกมาใช้งาน 2 ขั้วและควรมีความแข็งแรงพอในการใช้งาน ดังนั้นแผ่นฐานรองที่มีคาร์บอนนาโนทิวบ์จะประกอบติดกับแผ่นปรินเอนกประสงค์เพื่อความแข็งแรงและสะดวกในการใช้งาน ส่วนขั้วใช้งานจะใช้การ Bonding ลวดตัวนำกับขั้วทองแดงด้วยกาวเงิน ดังรูปที่ 5.3.15 และเซนเซอร์ที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยพร้อมใช้งานจะแสดงในรูปที่ 5.3.16



รูปที่ 5.3.15 แสดงรายละเอียดการต่อขั้วออกไปใช้งาน

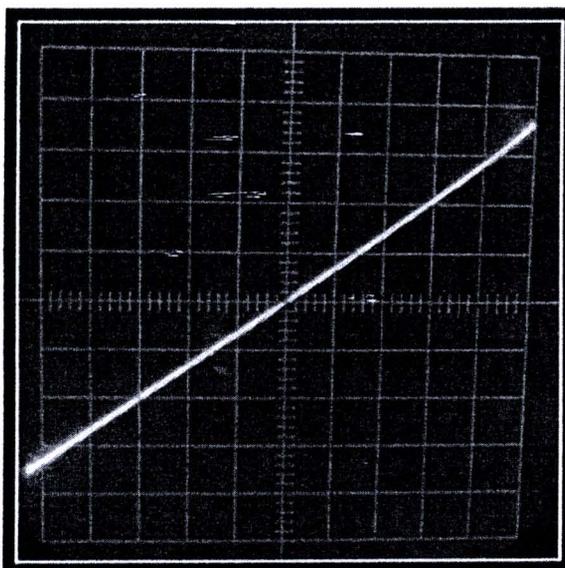


รูปที่ 5.3.16 คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ต่อขั้วใช้งานแล้ว

5.3.2.2 ความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับโลหะ

คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ประกอบเป็นเซนเซอร์เรียบร้อยแล้วจะทำการตรวจวัดความเป็นโอห์มมิกของรอยสัมผัสระหว่างขั้วใช้งานกับฟิล์มคาร์บอนที่เราสังเคราะห์ได้ การใช้งานของเซนเซอร์จะใช้ลักษณะเดียวกันกับการตัวต้านทานหรือตัว Resistance โดยค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงไปตามคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าเคมีเมื่อคาร์บอนดูดซับแอลกอฮอล์ ดังนั้นจึงมีจำเป็นความจำเป็นอย่างมากที่จะให้รอยสัมผัสเป็นแบบโอห์มมิกคอนแทคมากกว่าการเป็นแบบเรกติไฟร์เพื่อให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเซนเซอร์ได้สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน

ในการพิจารณาว่ารอยสัมผัสเป็นแบบโอห์มมิกหรือเรกติไฟร์นั้น ผู้จัดทำได้ตรวจวัดรอยสัมผัสของเซนเซอร์ทั้งที่ไม่ได้ต่อขั้วใช้งานและหลังจากที่มีการต่อขั้วเสร็จสมบูรณ์แล้วมาวัดกราฟคุณลักษณะ $I - V$ ด้วยเครื่อง Curve Tracer ผลที่ได้พบว่าเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกทั้งก่อนการต่อขั้วใช้งานและหลังต่อขั้วใช้งาน และผลการวัดเซนเซอร์ทุกๆตัวที่สังเคราะห์ได้เป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกทั้งสิ้น โดยมีความชันหรือความต้านทานแตกต่างกันออกไป ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานเดิมของคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ และอาจรวมกับค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นหลังจากมีการต่อขั้วใช้งาน

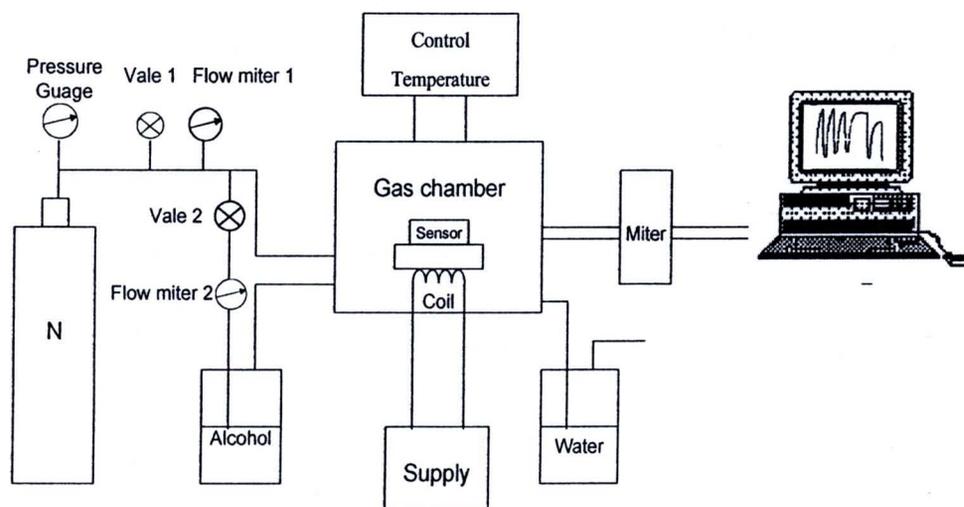


รูปที่ 5.3.17 กราฟคุณลักษณะ I - V เซนเซอร์แอลกอฮอล์ที่ทำการต่อขั้วเรียบร้อยแล้ว

5.3.3 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ของเซนเซอร์จากคาร์บอนนาโนทิวป์

ระบบการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์แสดงได้ดังรูปที่ 5.3.18 ซึ่งการวัดไอระเหยแอลกอฮอล์จะกระทำในระบบปิดภายในห้องปฏิบัติการหรือ Chamber ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิจากตัวควบคุมอุณหภูมิระหว่าง -5- 100 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิห้องปฏิกริยานี้จะเป็นอุณหภูมิแวดล้อมในการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ ในห้องปฏิกริยาจะมีที่ยึดหัวเซนเซอร์อยู่ภายในสำหรับยึดอุปกรณ์ขณะทำการวัด ส่วนด้านล่างของที่ยึดเซนเซอร์จะมีขดลวดทั้งสแตนเลสสำหรับให้ความร้อนแก่แผ่นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ในกรณีที่ต้องการไล่ความชื้นที่ผิวฟิล์มหลังการดูดซับไอแอลกอฮอล์ขณะทำการวัด โดยความร้อนที่ให้เกิดจะมีการควบคุมจากค่ากระแสที่ป้อนให้ขดลวดจากแหล่งจ่ายพลังงานภายนอกห้องปฏิกริยา

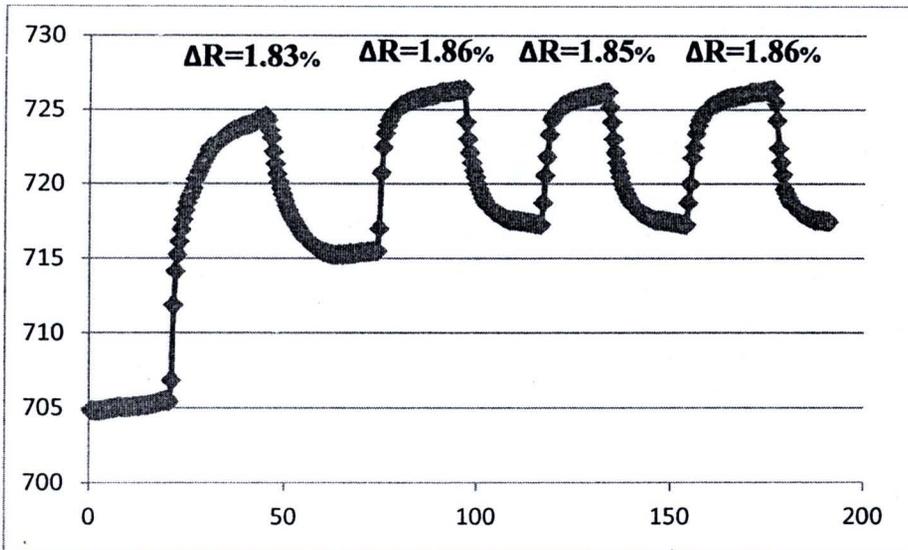
ก่อนทำการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์จะทำการไล่อากาศในห้องปฏิกริยาด้วยแก๊สไนโตรเจนผ่านวาล์ว V1 และมีเตอร์ควบคุมการไหลของแก๊ส F1 แก๊สไนโตรเจนจะเข้าแทนที่อากาศในห้องปฏิกริยา Chamber ไล่อากาศออกมาภายนอกโดยมีน้ำดักอยู่ โดยน้ำจะทำหน้าที่เป็นวาล์วปิดกั้นอากาศภายนอกไม่ให้เข้าไปภายในและทำหน้าที่เจือจางแก๊สที่เหลือจากห้องปฏิกริยาให้ละลายในน้ำก่อนที่จะออกสู่บรรยากาศภายนอก เมื่อต้องการวัดการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ทำการปิดวาล์ว V1 และเปิดวาล์ว V2 ให้แก๊สไนโตรเจนโดยควบคุมปริมาณแก๊สผ่านมิเตอร์ควบคุมการไหลแก๊ส F2 ลงไปยังสารละลายแอลกอฮอล์ ไนโตรเจนจะนำพาไอระเหยแอลกอฮอล์ผ่านฟองแก๊สไนโตรเจนไปยังห้องปฏิกริยาหรือ Chamber โดยจะทำสลับกันเป็นวงรอบการวัด ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงถูกแสดงผ่านจอมอนิเตอร์ที่เวลาจริงและบันทึกเก็บไว้เป็นข้อมูลอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 5.3.18 แสดงแผนภาพระบบการวัดแอลกอฮอล์

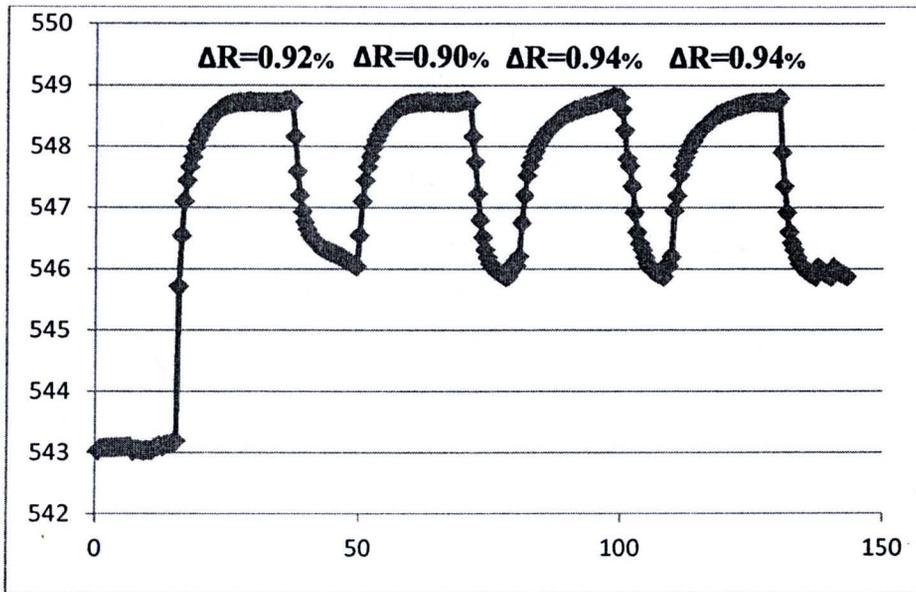
5.3.3.1 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition)

จากรูปที่ 5.3.19 เป็นการทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล โดยการทดลองใช้เซนเซอร์ที่สร้างจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบเตาความร้อน การตรวจวัดจะกระทำตามหัวข้อที่ 5.3.3 จากรูปที่ 5.3.18 เวลา 0-15 นาที เป็นการไล่อากาศภายในห้องปฏิกิริยาโดยใช้แก๊สเฉื่อยไนโตรเจน เพื่อไล่อากาศภายในออกจากห้องปฏิกิริยา พบว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ช่วงเวลา 15-50 นาที เป็นการนำพาไอระเหยของเอทานอลเข้ามาภายในห้องปฏิกิริยา พบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์มีการดูดซับไอแอลกอฮอล์อย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการจ่ายไอแอลกอฮอล์ก่อนที่จะดูดซับได้ช้าลงเมื่อเข้าใกล้จุดอิ่มตัว หลังจากเกิดการอิ่มตัวในนาทีที่ 50 จึงหยุดจ่ายไปแอลกอฮอล์ โดยมีการใช้แก๊สไนโตรเจนช่วยไล่ไอแอลกอฮอล์พบว่า คาร์บอนที่ดูดซับไอแอลกอฮอล์อยู่นั้นได้ปล่อยไอแอลกอฮอล์ออกมาบางส่วน ค่าความต้านทานจึงไม่กลับมาที่ค่าเริ่มต้น เมื่อทำการทดลองซ้ำในไซเคิลที่ 2-4 พบว่าการทำงานของเซนเซอร์ก็สามารถทำงานได้เช่นเดิมจากการทดลองได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่า 1.83 %, 1.86%, 1.85% และ 1.86 % ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน

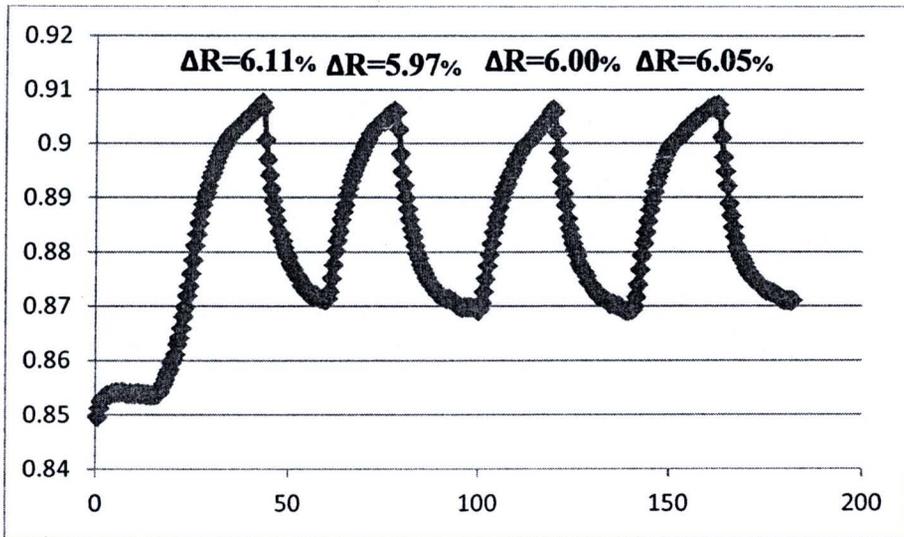
จากรูปที่ 5.3.20 เป็นการทดลองแบบเดียวกับรูปที่ 5.3.19 แต่เป็นการทดลองตรวจวัดไอระเหยของเมทานอล โดยการทดลองใช้เซนเซอร์ที่สร้างจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบเตาความร้อน จากรูป ที่เวลา 0-15 นาที เป็นการไล่อากาศภายในห้องปฏิบัติการโดยใช้แก๊สเฉื่อยไนโตรเจนเพื่อไล่อากาศภายในออก พบว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ช่วงเวลา 15-25 นาที เป็นการนำพาไอระเหยของเอทานอลเข้ามาภายในห้องปฏิบัติการ พบว่าคาร์บอนนาโนทิวป์มีการดูดซับไอแอลกอฮอล์อย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการจ่ายไอแอลกอฮอล์ก่อนที่จะดูดซับได้ช้าลงเมื่อเข้าใกล้จุดอิ่มตัว หลังจากเกิดการอิ่มตัวในนาที่ที่ 25 จึงหยุดจ่ายไปแอลกอฮอล์ โดยมีการใช้แก๊สไนโตรเจนช่วยไล่ไอแอลกอฮอล์พบว่า คาร์บอนที่ดูดซับไปแอลกอฮอล์ได้ปล่อยไอแอลกอฮอล์ออกมาบางส่วน ค่าความต้านทานจึงไม่กลับมาที่ค่าเดิม แล้วทำการการทดลองซ้ำในไซเคิลที่ 2-4 พบว่าการทำงานของเซนเซอร์ก็สามารถทำงานได้เช่นเดิม ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาบอนนาโนทิวป์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของ เมทานอล เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้ อยู่ในช่วง 0.92%, 0.90%, 0.94% และ 0.94 % ของการตรวจวัดเมทานอล



รูปที่ 5.3.20 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเมทานอลที่ได้จากการสังเคราะห์แบบเตาความร้อน

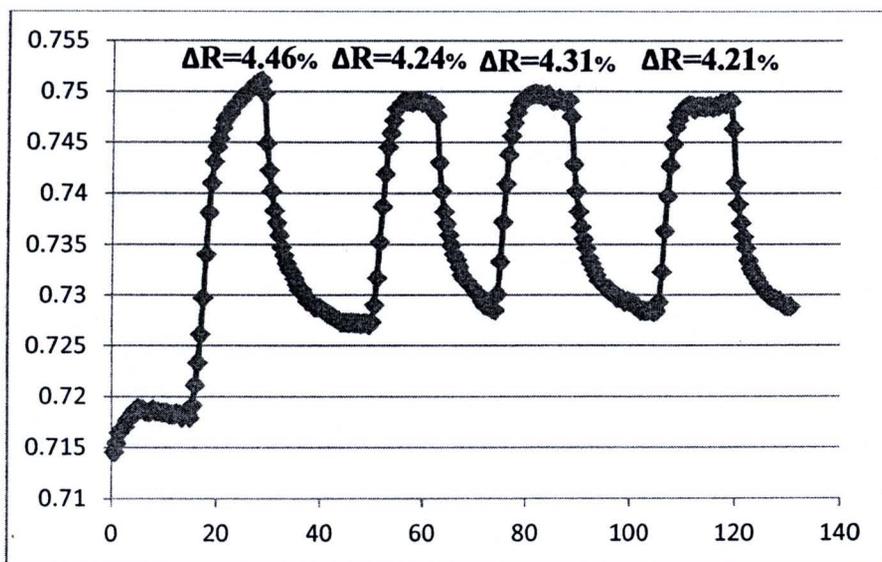
5.3.3.2 ผลการทดลองการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์และแบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical Vapor Deposition)

การทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล โดยการทดลองใช้เซนเซอร์ที่สร้างจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบขดลวดความร้อน การตรวจวัดจะกระทำตามหัวข้อที่ 5.3.3 จากรูปที่ 4.19 เวลา 0-15 นาที เป็นการไล่อากาศภายในห้องปฏิบัติการโดยใช้แก๊สเฉื่อยไนโตรเจน เพื่อไล่อากาศภายในออก พบว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ช่วงเวลา 15-40 นาที เป็นการนำพาไอระเหยของเอทานอลเข้ามาภายในห้องปฏิบัติการ พบว่าคาร์บอนนาโนทิวป์มีการดูดซับไอแอลกอฮอล์อย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการจ่ายไอแอลกอฮอล์ก่อนที่จะดูดซับได้ช้าลงเมื่อเข้าใกล้จุดอิ่มตัว หลังจากเกิดการอิ่มตัวในนาที่ที่ 40 จึงหยุดจ่ายไปแอลกอฮอล์ โดยมีการใช้แก๊สไนโตรเจนช่วยไล่ไอแอลกอฮอล์พบว่า คาร์บอนที่ดูดซับไปแอลกอฮอล์ได้ปล่อยไอแอลกอฮอล์ออกมาบางส่วน ค่าความต้านทานจึงไม่กลับมาที่ค่าเดิม แล้วทำการการทดลองซ้ำในไซเคิลที่ 2-4 พบว่าการทำงานของเซนเซอร์ก็สามารถทำงานได้เช่นเดิม ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของ เอทานอลได้ดีโดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้ อยู่ในช่วง 6.11 % 5.97 % , 6% และ 6.05% ของการตรวจวัดเอทานอล



รูปที่ 5.3.21 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลมี
สังเคราะห์แบบขดลวดความร้อน

ผลทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลจากรูปที่ 5.3.21 โดยการทดลองใช้เซนเซอร์ที่สร้างจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบขดลวดความร้อน การตรวจวัดจะกระทำตามหัวข้อที่ 5.3.3 จากรูปเห็นได้ว่าช่วงของการไล่อากาศออกจะมีการปรับตัวของคาร์บอนเล็กน้อยก่อนเข้าสู่จุดพร้อมใช้งาน เมื่อทำการจ่ายไอแอลกอฮอล์เข้ามา คาร์บอนก็สามารถดูดซับไปของแอลกอฮอล์แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าของความต้านทานตามทดลองข้างต้น และเมื่อหยุดจ่ายไปแอลกอฮอล์คาร์บอนที่ทำการดูดซับไปแอลกอฮอล์ ก็จะปล่อยไอแอลกอฮอล์ออกเพื่อกลับไปยังสภาพเดิม แต่การกลับคืนสภาพเดิมนั้นไม่สามารถกลับไปสู่ค่าเดิมได้ เนื่องจากการฝังตัวของแอลกอฮอล์บางส่วนในตัวของคาร์บอน ดังเช่นการทดลองที่ผ่านมา และเมื่อทำการทดลองซ้ำในไซเคิลถัดไปคาร์บอนก็สามารถทำงานได้ตามปกติเหมือนการทดลองข้างต้นด้วย ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาบอนนาโนทิวป์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของเมทานอล เปรี่เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้อยู่ในช่วง 4.46 % 4.24%, 4.31% และ 4.21% ของการตรวจวัดเมทานอล



รูปที่ 5.3.22 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเมทานอลมี
สังเคราะห์แบบขดลวดความร้อน

จากกราฟที่ได้สามารถอธิบายได้จากสมการไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry) เกิดจากการถ่ายประจุจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง เซลล์ไฟฟ้าเคมีอันหนึ่งจึงต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วจึงเกิดเป็นวงจรปิดได้ ประจุที่ถ่ายเทในขึ้นตัวอย่างอาจเป็นทั้งอิเล็กตรอนหรือโฮลหรือทั้งสองอย่าง แผนกราฟที่ประกอบกันเป็นผนังท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีลักษณะโค้ง อิเล็กตรอนจึงสามารถเปลี่ยนรูป จากที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่รอบๆ C-C backbone เป็นการกระจายตัวอย่างไม่สมดุลทั้งด้านในท่อและนอกท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ทรงกระบอก (cylindrical sheet) เมื่อโมเลกุลของแอลกอฮอล์ที่มีการแพร่สู่พื้นผิวคาร์บอนนาโนทิวบ์ ประจุอิเล็กตรอนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากอะตอมคาร์บอนกับโมเลกุลของแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นแรงของแรงวาเลนซ์ อิเล็กตรอนจะถูกจ่ายหรือดึงจากคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้นจะขึ้นกับค่าของอิเล็กโตรเนกกาติวิตี ถ้าคาร์บอนมีค่ามากกว่าก็จะดึงอิเล็กตรอนให้เองเอียงมาทางด้านคาร์บอน ทำให้มีประจุพาหะ (Carrier) มากขึ้น ทำให้การนำไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ เพิ่มขึ้น แต่ถ้าคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าอิเล็กโตรเนกกาติวิตีน้อยกว่า อิเล็กตรอนก็就会被ดึงไปทางโมเลกุลของแอลกอฮอล์ทำให้การนำไฟฟ้าต่ำลง ซึ่งทำให้มีค่าความต้านทานมากขึ้น ปฏิริยาไฟฟ้าเคมีทั่วไปเขียนได้ดังนี้



เมื่อ δ คือ ตัวเลขแสดงจำนวนประจุที่ถูกจ่ายระหว่างเกิดปฏิกิริยา

จากการเปรียบเทียบการทำงานในการตรวจวัดระหว่างการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สร้างแบบเตาความร้อนกับแบบขดลวดความร้อน จะเห็นได้ว่าเซนเซอร์ที่ได้จากการสร้างแบบขดลวดความร้อนนั้น จะมีการดูดซับไอระเหยของแอลกอฮอล์ได้ดีกว่าการสร้างแบบเตาความร้อนเนื่องจากในการสร้างแบบขดลวดความร้อน อุณหภูมิที่ใช้ในการแตกตัวของสารตั้งต้นในการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์มีอุณหภูมิที่สูงกว่าการสร้างแบบเตาความร้อนทำให้การแตกตัวของสารตั้งต้นได้สมบูรณ์กว่า และเมื่อคาร์บอนที่

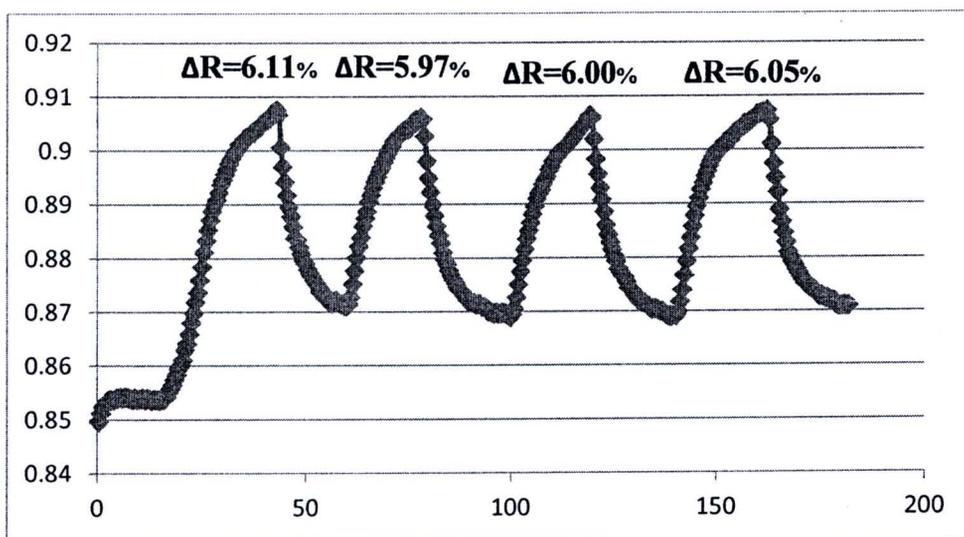
แตกตัวมาเจอกับคะตะไลต์ที่เป็นตัวดักจับอะตอมคาร์บอนในการฟอร์มตัวการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทำให้การเกิดท่อคาร์บอนมีเส้นที่ตรงกว่าและมีการจัดระเบียบที่ดีกว่า การสร้างแบบเตาความร้อนดังนั้น การดูดซับไอระเหยแอลกอฮอล์จะทำได้ดีกว่ารวมทั้งการคืนสภาพเดิมเมื่อหยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์ ด้วย และด้วยเหตุผลนี้จึงนำไปใช้ในการทำลองต่อไป

5.3.3.3 ผลการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆด้วยเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์

เป็นการทดลองวัดไอระเหยของแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆที่มีคุณสมบัติและโครงสร้างภายในที่แตกต่างกันเพื่อจะศึกษาถึงการทำงานของเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นว่าสามารถทำการตรวจวัดแอลกอฮอล์แล้วมีผลทางการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างไร ในการทดลองนี้ได้ทำการตรวจวัดไอแอลกอฮอล์ด้วยกัน 8 ชนิด และกระบวนการทดลองจะกระทำตามข้อที่ 5.3.3 โดยการทดลองวัดแอลกอฮอล์แต่ละชนิดจะใช้เซนเซอร์ตัวเดียวกันทั้งการทดลอง

(1) ผลการตรวจจับเอทานอล

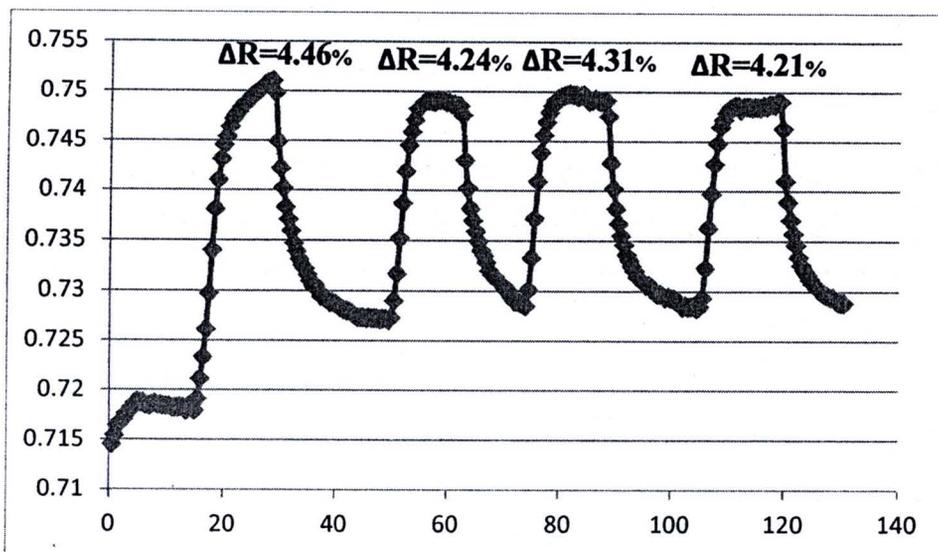
ผลจากการทดลองตรวจวัดไอของเอทานอลพบว่าสามารถตรวจวัดไอของเอทานอลผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาบอนนาโนทิวบ์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของแอลกอฮอล์ได้ทั้งเอทานอลได้ดี โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้ อยู่ในช่วง 6.11 % 5.97 % , 6% และ 6.05% ของการตรวจวัดเอทานอล



รูปที่ 5.3.23 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

(2) ผลการตรวจจับเมทานอล

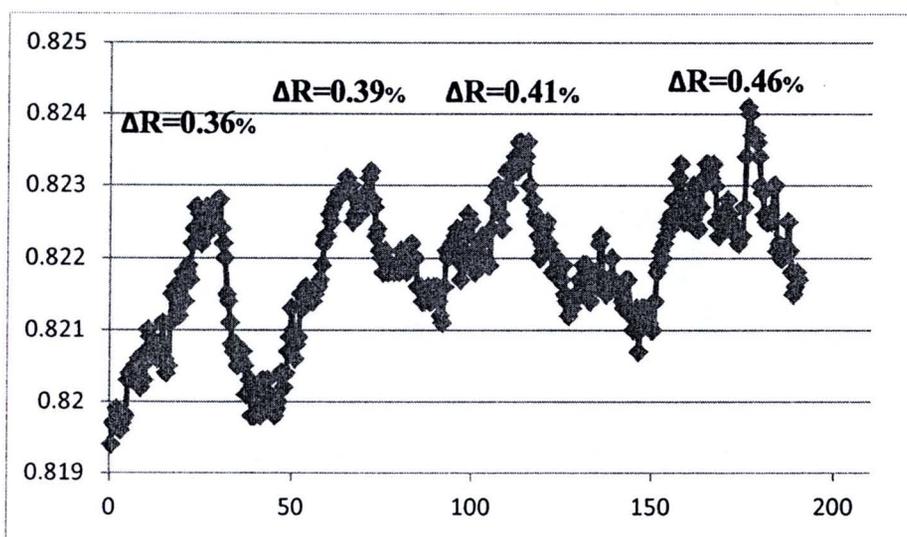
ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาบอนนาโนทิวบ์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของเมทานอล เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้อยู่ในช่วง 4.46 % , 4.24% , 4.31% และ 4.21% ของการตรวจวัดเมทานอล



รูปที่ 5.3.24 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

(3) ผลการตรวจจับเอมมิลแอลกอฮอล์

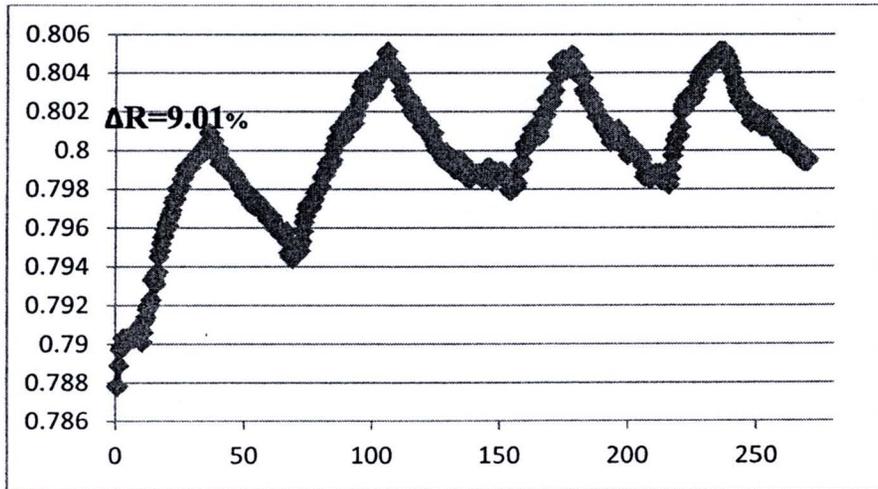
ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของ Amyl alcohol ได้แต่จากรูปจะเห็นได้ว่าการทำงานของคาร์บอนจะไม่มีประสิทธิภาพมากนักเมื่อเทียบกับการวัดเอทานอลหรือเมทานอล แต่กราฟก็ยังคงเป็นรูปของไซเคิลที่มีแนวโน้มว่าสามารถทำงานเป็นเซนเซอร์ได้ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้อยู่ในช่วง 0.36 % , 0.39% , 0.41% และ 0.46% ของการตรวจวัด



รูปที่ 5.3.25 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

(4) ผลการตรวจจับเบรทานอลแอลกอฮอล์

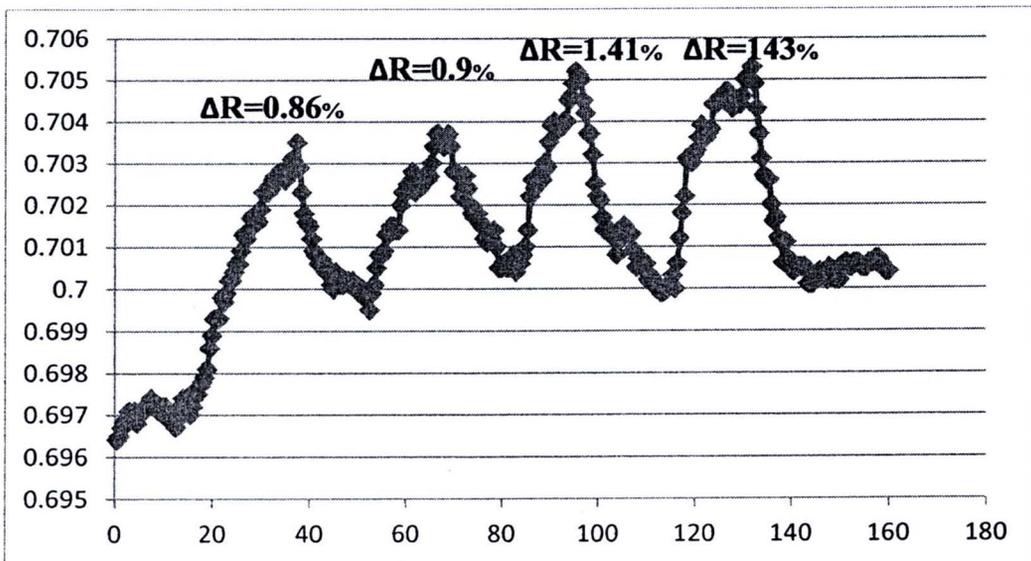
ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาบอนนาโนทิวบ์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของ Bethanal alcohol ลักษณะของกราฟจะคล้ายๆกับเอทานอลและเมทานอล เพราะเป็นแอลกอฮอล์กลุ่มเดียวกันคือ โครงสร้างภายในจะเรียงต่อกันในแบบอนุกรมทำให้คุณสมบัติจึงคล้ายกับเอทานอลและเมทานอล เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้อยู่ในช่วง 9.01 % , 11.11% , 11.08% และ 11.08% ของการตรวจวัดเมทานอล



รูปที่ 5.3.26 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

(5) ผลการตรวจจับTert-batanal

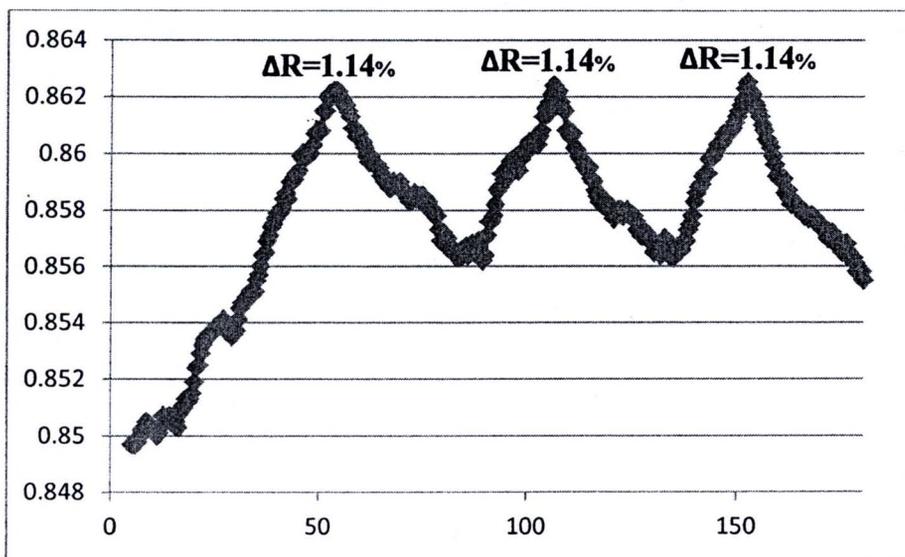
ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาบอนนาโนทิวบ์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของTerbatanal การทำงานของคาร์บอนก็สามารถทำงานได้ลักษณะของกราฟค่อนข้างจะไม่เสถียรภาพมากนัก ซึ่งจะมีการฟอตจุดซ้ำของกราฟแต่ก็มีแนวโน้มไปในทางที่ดี เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้อยู่ในช่วง 0.86 % , 0.9% , 1.41% และ 1.43%



รูปที่ 5.3.27 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

(6) ผลการตรวจจับSec-betanal

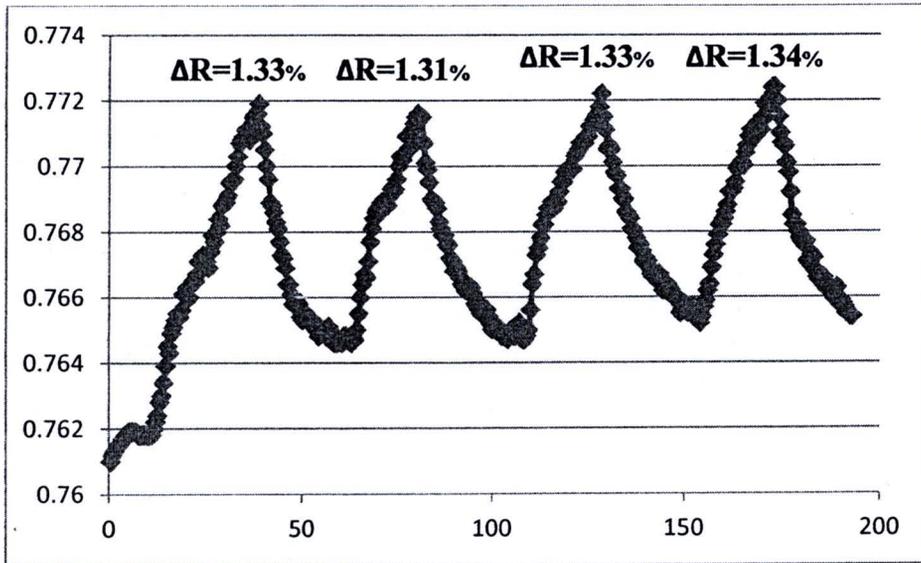
ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของ Sec-betanal ได้ แต่กลับไม่มีการอึดตัวหรืออึดตัวช้ามาก ในการทดลองจึงหยุดจ่ายไอของ Ses-betanal แล้วดูผลการคืนสภาพเดิมซึ่งคาร์บอนก็สามารถทำงานได้เช่นเดียวกับการทดลองข้างต้น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้อยู่ในช่วง 4.46 % , 4.24% , 4.31% และ 4.21%



รูปที่ 5.3.28 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

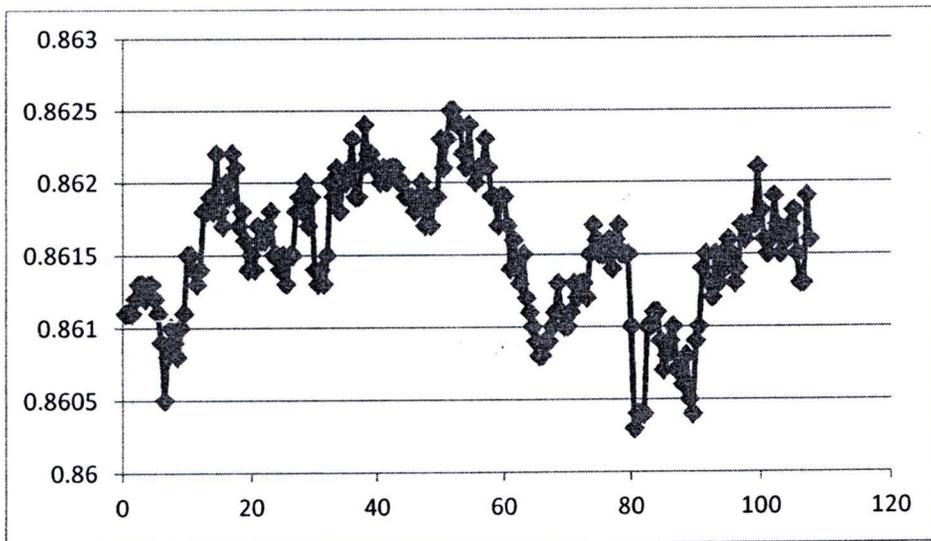
(7) ผลการตรวจจับ2-propanal, iso propyl alcohol

ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดไอระเหยของ 2-propanal, iso propyl alcohol ลักษณะของกราฟจะคล้ายๆกับเอทานอลและเมทานอล เพราะเป็น แอลกอฮอล์กลุ่มเดียวกันคือ โครงสร้างภายในจะเรียงต่อกันในแบบอนุกรมทำให้คุณสมบัติจึงคล้ายกับเอทานอลและเมทานอล เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ได้อยู่ในช่วง 1.33 % , 1.31% , 1.33% และ 1.34% ของการตรวจวัดเมทานอล



รูปที่ 5.3.29 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

(8) ผลการตรวจจับCyclohexanal



รูปที่ 5.3.30 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

ผลจากการทดลองพบว่าเซนเซอร์คาบอนนาโนทิวป์ที่สร้างขึ้นไม่สามารถตรวจวัดไอระเหยของ Cyclohexanal เหมือนกับการทดลองข้างต้น จากกราฟคาร์บอนจะมีการจับและปล่อยไอของ Cyclohexanal อย่างรวดเร็วทำให้ลักษณะของกราฟไม่เป็นไซเคิลตามที่ต้องการ

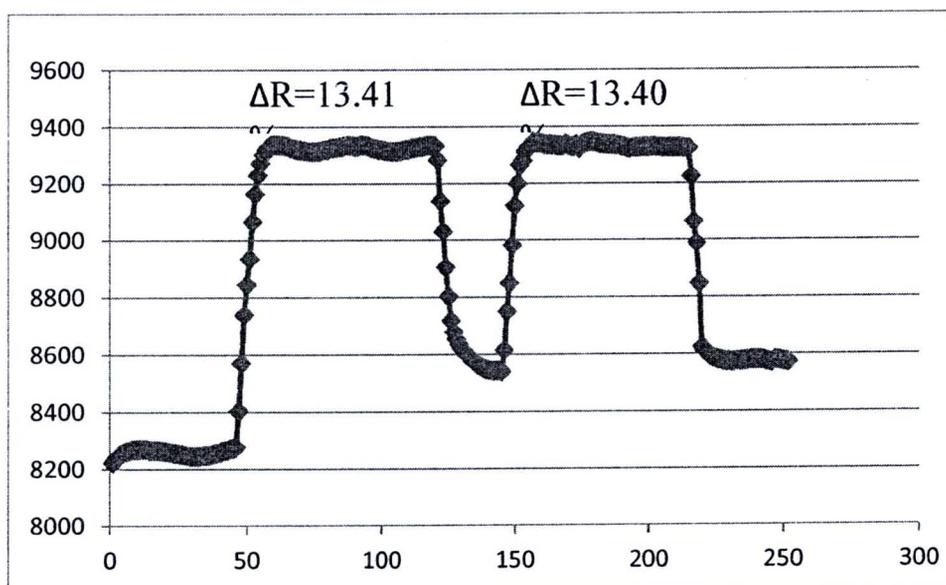
ผลจากการทดลองการวัดไอระเหยของแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆพบว่า เซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถตรวจจับไอระเหยได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่ได้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างหรือพันธะของแอลกอฮอล์ตัวนั้นๆ โครงสร้างที่ง่ายเช่น methyl alcohol, ethyl alcohol, n-propyl alcohol สามารถที่จะแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้ง่ายเพราะเป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน เหมือนกับ sec-betanal alcohol, tert-batanal alcohol, Bethanal alcohol, Amyl alcohol ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าการแลกเปลี่ยนจึง

เกิดได้ยากกว่า ส่วน cyclohexanal alcohol, โครงสร้างจะต่างไปจากทุกตัว โครงสร้างจะอยู่ในรูปร่างแหวนและมีความเสถียรภาพในตัวเองสูงมาก คาร์บอนนาโนทิวบ์จึงไม่สามารถตรวจจับได้หรือตรวจจับได้น้อยมากซึ่งดูได้จากรูปที่ 5.3.30

5.3.3.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซนเซอร์

5.3.3.4.1 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้อง 25°C

การทดลองเริ่มจากปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิบัติการ Chamber เพื่อไล่อากาศประมาณ 50 นาที จะสังเกตเห็นว่าช่วงนี้ค่าความต้านทานมีค่าคงที่ ค่าความต้านทานนี้จะเป็นค่าความต้านทานเริ่มต้นของการทดลอง R_{MIN} หลังจากนั้นจะเริ่มรอบการวัดโดยปล่อยให้ไอระเหยแอลกอฮอล์เข้าไปในห้องปฏิบัติการ Chamber จะสังเกตค่าความต้านทานจะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นและอิมิตัวที่ค่า R_{MAX} จากนั้นก็จะหยุดจ่ายไอระเหยของแอลกอฮอล์และปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้ามาเพื่อไล่อากาศในห้องปฏิบัติการออกไป ซึ่งค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะลดลงเข้าสู่ R_{MIN} อีกครั้งเรียกว่าหนึ่งรอบการวัด และจะเริ่มการวัดในรอบต่อไปในลักษณะเดิม ผลจากการทดลองตรวจวัดเมื่อเซนเซอร์อิมิตัวได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็น 13.41% และ 13.40%



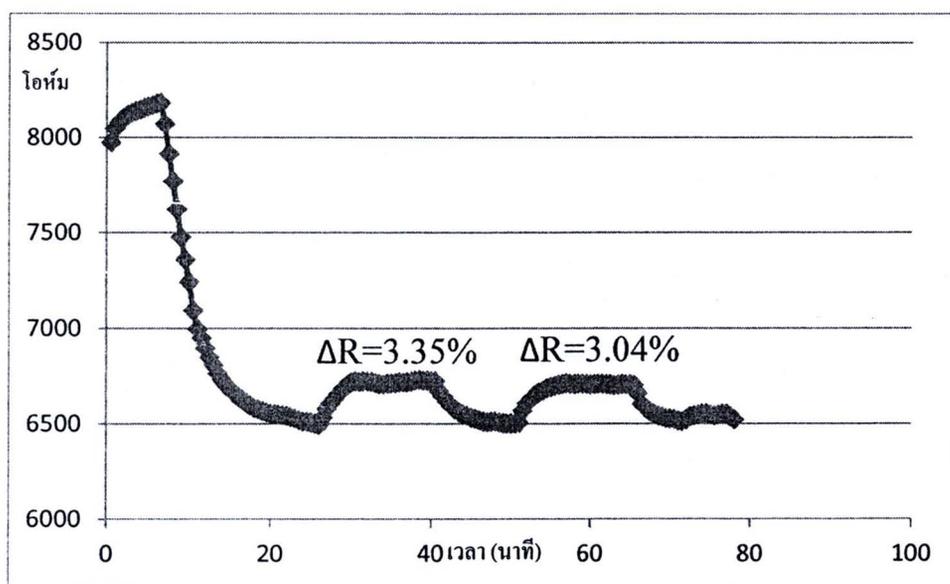
รูปที่ 5.3.31 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ 25°C

5.3.3.4.2 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ 85°C

การทดลองเริ่มจากปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิบัติการ Chamber เพื่อไล่อากาศประมาณ 10 นาที จะสังเกตเห็นว่าช่วงนี้ค่าความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นเข้าสู่ค่าอิมิตัวค่าหนึ่ง หลังจากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ 85 °C ค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะเริ่มลดลงซึ่ง

เป็นคุณสมบัติของสารประเภทสารกึ่งตัวนำที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งจะตรงข้ามกับโลหะแสดงว่าฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้แสดงคุณสมบัติไปทางสารกึ่งตัวนำมากกว่าโลหะ ค่าความต้านทานจะลดลงและเริ่มอิมิตัวซึ่งเราจะให้ค่าต่ำสุดเริ่มต้นเป็น R_{MIN} หลังจากนั้นจะเริ่มรอบการวัดโดยปล่อยให้ไอระเหยแอลกอฮอล์เข้าไปในห้องปฏิบัติการ Chamber จะสังเกตค่าความต้านทานจะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นและอิมิตัวที่ค่า R_{MAX} จากนั้นก็จะหยุดจ่ายไอระเหยของแอลกอฮอล์และปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้ามาเพื่อไล่อากาศในห้องปฏิบัติการออกไป ซึ่งค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะลดลงเข้าสู่ R_{MIN} อีกครั้งเรียกว่าหนึ่งรอบการวัด และจะเริ่มการวัดในรอบต่อไปในลักษณะเดิม

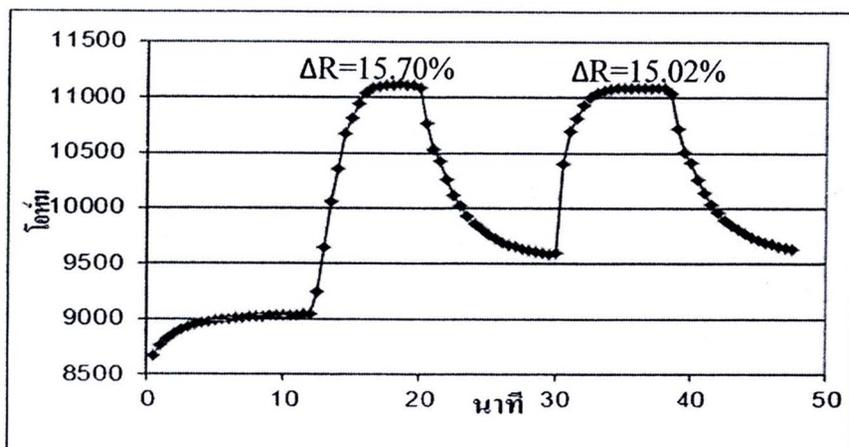
ผลจากการทดลองแสดงค่าความต้านทานของคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่อไอระเหยแอลกอฮอล์กับเวลาจากการทดลองได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่า 3.35% และ 3.04% ในรอบการวัดที่หนึ่งและสองตามลำดับ ค่าของ R_{MIN} ที่ได้จากการทดลองก็กลับมาค่าเดิม



รูปที่ 5.3.32 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ 85°C

5.3.3.4.3 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ -5 °C

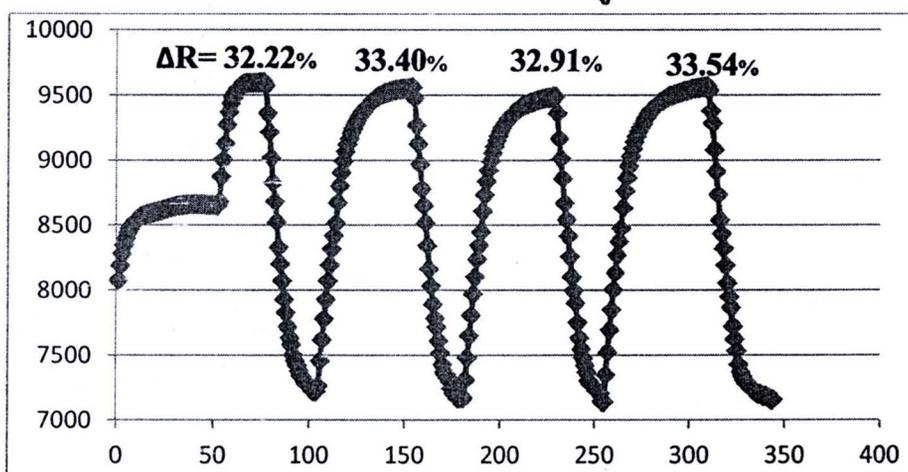
ทำการทดลองในทำนองเดียวกับหัวข้อ 5.3.4.2 โดยเปลี่ยนค่าอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber เป็น -5°C ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.3.33 ในช่วงประมาณ 12 นาทีแรกเป็นช่วงที่ให้แก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ถูกควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ -5 °C หลังจากนั้นเริ่มรอบการวัดโดยให้ไอระเหยแอลกอฮอล์เข้าไป ค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์จะมีค่ามากขึ้นเข้าสู่ค่าอิมิตัวการสูงสุด R_{MAX} ต่อไปหยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์และปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ ช่วงนี้ค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าอิมิตัว ให้ค่าต่ำสุดของรอบการวัดนี้เป็น R_{MIN} และทำ



รูปที่ 5.3.33 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวกับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber ที่ -5°C

เริ่มวัดรอบการวัดต่อไปอย่างต่อเนื่อง จากการทดลองได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่า 15.70% และ 15.02% ในรอบการวัดที่หนึ่งและที่สองตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ 5.3.1 พบว่าที่อุณหภูมิแวดล้อมต่ำ (-5°C) แอลกอฮอล์ถูกดูดซับได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง (85°C) สังเกตจากค่า $\Delta R\%$ เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษของคาร์บอน เมื่อตัวของคาร์บอนมีอุณหภูมิที่ต่ำ คาร์บอนจะสามารถดูดซับไอระเหยของแอลกอฮอล์ได้ดีกว่าตอนที่ตัวของคาร์บอนมีอุณหภูมิที่สูง ดังนั้นเมื่อคาร์บอนสามารถดูดซับไอระเหยแอลกอฮอล์ได้ดีหรือมากกว่า การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานจึงมีมากกว่าการทดลองที่อุณหภูมิสูง

5.3.3.4.4 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ 25°C และมีการให้ความร้อนแก่อิเล็กโทรดคาร์บอนนาโนทิวในการคืนสภาพหลังการดูดซับแอลกอฮอล์

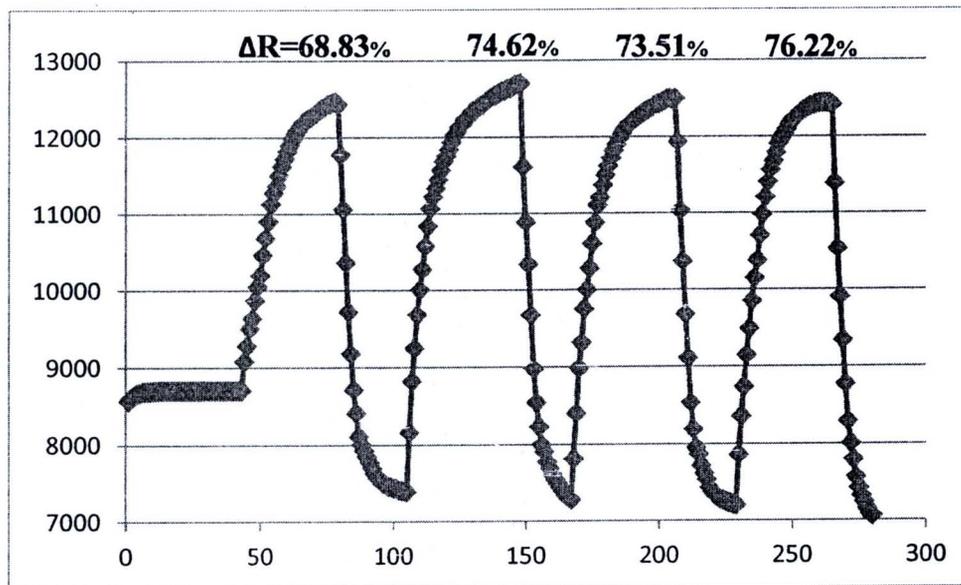


รูปที่ 4.34 ผลการตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวกับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber 25°C และให้ความร้อนอุณหภูมิที่ 85°C แก่คาร์บอนนาโนทิวในการคืนสภาพความต้านทาน

ในการทดลองตอนนี้จะทำการทดลองคล้ายกับตอนที่ 5.3.4.2 และ 5.3.4.3 แต่ให้อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber อยู่ที่อุณหภูมิห้อง 25 °C และเพิ่มขั้นตอนการให้ความร้อนแก่เซนเซอร์เฉพาะในครึ่งหลังของรอบการวัดในขณะที่หยุดการให้ไอระเหยแอลกอฮอล์และปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิบัติการ การให้ความร้อนถูกควบคุมจากหลอดความร้อนด้านล่างที่ยึดเซนเซอร์ในห้องปฏิบัติการโดยให้แหล่งจ่ายพลังงานภายนอกแก่ขดลวด ในการทดลองนี้ความร้อนที่มีค่าอุณหภูมิประมาณ 85 °C ผลการทดลองที่ได้แสดงได้ในรูปที่ 5.3.34

จากผลการทดลองเมื่อคาร์บอนมีการดูดซับไอแอลกอฮอล์ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่า 32.22% 33.40 %, 32.91 % และ 33.54 % ในรอบการวัดหนึ่งถึงสี่ตามลำดับ จะเห็นว่าการให้ความร้อนช่วยไล่ความชื้นในช่วงการคืนสภาพจะทำให้คาร์บอนสามารถมีพื้นที่ในการดูดซับไอระเหยแอลกอฮอล์ได้มากขึ้นและส่งผลให้ค่าความไวของอุปกรณ์(Sensitivity) ในการทดลองมีค่าสูงขึ้นด้วย และจากการทดลองเมื่อใช้ความร้อนช่วยไล่ความชื้นในการคืนสภาพให้หมดไปแล้วยังทำให้คาร์บอนสามารถดูดซับไอระเหยแอลกอฮอล์ได้มากขึ้นด้วย

5.3.3.4.5 ผลการตรวจวัดไอระเหยแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ -5°C และมีการให้ความร้อนแก่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในการคืนสภาพหลังการดูดซับแอลกอฮอล์



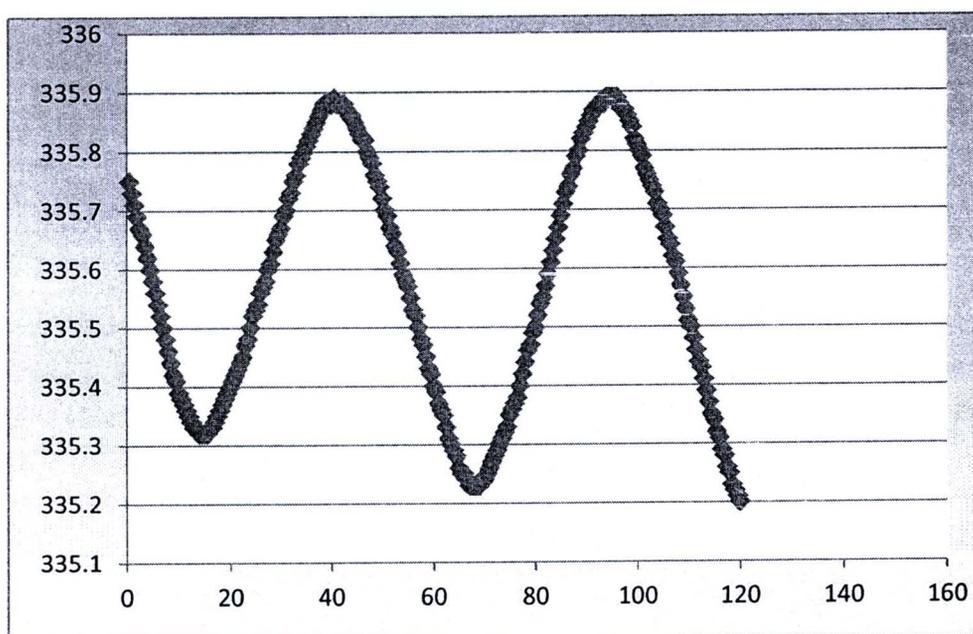
รูปที่ 5.3.35 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวบ์กับเวลาที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ Chamber -5°C และให้ความร้อนอุณหภูมิที่ 85°C แก่คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการคืนสภาพความต้านทาน

การทดลองตอนนี้จะมีการทดลองเหมือนกับการทดลองที่ 5.3.4.2 และ 5.3.4.3 คือให้อุณหภูมิแวดล้อมห้องปฏิบัติการเป็น -5°C และให้ความร้อนแก่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่อุณหภูมิ 85°C เฉพาะใน

ครึ่งหลังของรอบการวัดในขณะที่หยุดการให้ไอระเหยแอลกอฮอล์และปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องปฏิบัติการ ความเย็นจะช่วยให้การดูดซับแอลกอฮอล์ดีขึ้นและความร้อนจากหลอดความร้อนที่ให้กับเซนเซอร์จะช่วยให้ไอระเหยแอลกอฮอล์ที่ถูกดูดซับระเหยออกได้มากขึ้นเพื่อช่วยในการคืนสภาพได้เร็วขึ้นและทำให้ผลต่างระหว่าง R_{MAX} และ R_{MIN} มีค่าเพิ่มมากขึ้น ผลการทดลองจากรูปที่ 5.3.35 ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน $\Delta R\%$ มีค่าเท่ากับ 68.83%, 74.62 %, 73.51 % และ 76.22% ของรอบการวัดที่หนึ่งถึงสี่ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเย็นจะช่วยให้คาร์บอนสามารถดูดซับไอแอลกอฮอล์ได้ดีขึ้น และความร้อนที่ใช้จะช่วยให้ไอแอลกอฮอล์ที่ติดอยู่กับคาร์บอนหลุดไปเมื่อต้องการการวัดซ้ำ เมื่อนำความร้อนและความเย็นมาประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสมจะทำให้การทำงานของเซนเซอร์คาร์บอนทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

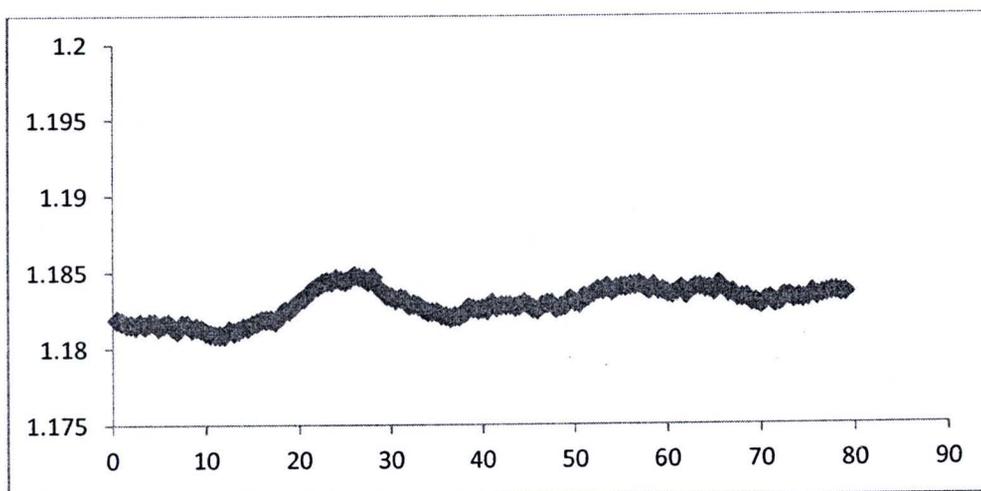
5.3.4 ผลการตอบสนองกับสารประกอบแอลกอฮอล์เปียร์สด

ในตอนนี้จะนำหัวเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ไปทดสอบกับเปียร์สดในห้องตลาด โดยใช้ระบบการวัดและขั้นตอนการวัดเดียวกันกับการวัดสารแอลกอฮอล์ในตอนก่อนหน้านี้ ผลตอบสนองที่ได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3.36 จากรูปเป็นค่าความต้านทานที่ได้รับไอระเหยแอลกอฮอล์ของเปียร์สด ปรากฏว่าค่าความต้านทานไม่มีการตอบสนองหรือแปรค่าตามค่าไอระเหยของสารละลายไม่ว่าในช่วงการวัดที่มีไอระเหยแอลกอฮอล์และในช่วงแก๊สไนโตรเจน ค่าสัญญาณที่แกว่งขึ้นลงไปมาเป็นสัญญาณรบกวนที่ไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณไอระเหยแอลกอฮอล์แต่อย่างใด ซึ่งแตกต่างจากการวัดสารละลายตระกูลแอลกอฮอล์ข้างต้น



รูปที่ 5.3.36 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์กับเปียร์สดในห้องตลาด

ดังนั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบว่าน้ำในเปียร์มีมีผลต่อการตอบสนองของค่าความต้านทานที่ผิวของคาร์บอนนาโนหรือไม่ เราทำการทดลองกับสารเอทิลแอลกอฮอล์ที่มีน้ำเป็นส่วนผสม ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.3.37 จากกราฟค่าความต้านทานไม่มีการเปลี่ยนแปลงกับปริมาณไอระเหยแอลกอฮอล์ ซึ่งมีความแตกต่างกันมากกับการวัดเอทิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์แสดงให้เห็นว่าความชื้นจากน้ำมีผลต่อการตอบสนองค่าความต้านทานฟิล์มบางคาร์บอนนาโนทิวป์เป็นอย่างมาก และจากผลการทดลองที่ได้ทำให้ไม่สามารถที่จะนำเอาหัวเซนเซอร์คาร์บอนนาโนทิวป์ไปใช้งานกับหัวเซนเซอร์อื่นในห้องตลาดได้ ทำให้เป็นข้อจำกัดอย่างยิ่งที่จะนำหัววัดคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้กับสารละลายแอลกอฮอล์ที่มีน้ำเป็นส่วนผสม



รูปที่ 5.3.37 ผลตอบสนองค่าความต้านทานคาร์บอนนาโนทิวป์กับเอทิลแอลกอฮอล์ที่มีน้ำเป็นส่วนผสม