



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาระบบเฝ้าระวังมลพิษอากาศด้วยก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด
Development of air pollution monitoring system using an array of
hybrid carbon nanotube sensors

นางสาววินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์
นายสิริพัฒน์ ประโทนเทพ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาระบบเฝ้าระวังมลพิษอากาศด้วยก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด
Development of air pollution monitoring system using an array of
hybrid carbon nanotube sensors

นางสาววินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์
นายสิริพัฒน์ ประโทนเทพ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนาระบบเฝ้าระวังมลพิษทางอากาศด้วยก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด
 แหล่งเงิน ทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ประจำปีงบประมาณ 2555 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 300,000 บาท
 ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2554 ถึง 30 กันยายน 2555
 หัวหน้าโครงการ
 ชื่อ-สกุล นางสาววินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์ สังกัด วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
 ผู้ร่วมโครงการวิจัย นายสิริพัฒน์ ประโทนเทพ สังกัด วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน ปัญหามลพิษทางอากาศเป็นปัญหาที่สำคัญเร่งด่วน เทคโนโลยีก๊าซเซนเซอร์มีบทบาทสำคัญในการเฝ้าระวังมลพิษทางอากาศ แต่อย่างไรก็ตามก๊าซเซนเซอร์ที่ใช้ในปัจจุบัน เช่น ก๊าซเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากออกไซด์ของโลหะมีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากประสิทธิภาพการตอบสนองที่ต่ำ ในปัจจุบันวัสดุท่อนาโนคาร์บอนได้รับความสนใจว่าเป็นวัสดุนาโนที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ตรวจวัดก๊าซ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยม เช่น มีพื้นที่ผิวมาก และคุณสมบัติเส้นลวดควอนตัมที่ขึ้นกับลักษณะการม้วนตัวของท่อนาโนนั้นๆ ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบก๊าซเซนเซอร์อาร์เรย์ที่มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดสูงและสามารถระบุชนิดของก๊าซได้ โดยระบบก๊าซเซนเซอร์อาร์เรย์ประกอบไปด้วยเซนเซอร์หลายตัวซึ่งประดิษฐ์จากท่อนาโนคาร์บอนและท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดที่ได้จากการตกแต่งท่อนาโนคาร์บอนด้วยพอลิเมอร์และอนุภาคนาโน พอลิเมอร์ที่ใช้มี 4 ชนิด ได้แก่ พอลิเมทรีนเมตาอะคริเลต พอลิไวนิลอะซีเตต โพลีอิมิด และ ไทโอฟิน ส่วนอนุภาคนาโนที่ใช้มี 4 ชนิด ได้แก่ ทอง พลาเดียม แพลตินัม และซิงค์ออกไซด์ ก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนไฮบริดชนิดต่างๆที่สร้างขึ้นมานี้ถูกนำไปทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดก๊าซกับไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ (ไดคลอโรมีเทน คลอโรฟอร์ม อะซีโตน เอทานอล และเมทานอล) โดยวัดจากคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป คุณสมบัติการตอบสนองต่อก๊าซของก๊าซเซนเซอร์แต่ละตัวถูกบันทึกและนำไปประมวลผลต่อโดยใช้การวิเคราะห์เพื่อแยกแฉกแฉกลักษณะรูปแบบเพื่อให้สามารถระบุชนิดของก๊าซได้

คำสำคัญ : ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด ก๊าซเซนเซอร์อาร์เรย์ สารอินทรีย์ระเหยง่าย พอลิเมอร์ อนุภาคนาโน การวิเคราะห์เพื่อแยกแฉกแฉกลักษณะรูปแบบ

Research Title: Development of air pollution monitoring system using an array of hybrid carbon nanotube sensors

Researcher: Miss Winadda Wongwiriyan, Mr. Sirapat Pratontep

Faculty: College of Nanotechnology

ABSTRACT

Nowadays, air pollution became more serious problem. Gas sensing technology plays an important role in monitoring air pollutants. However, for monitoring such gas pollutants, conventional gas sensors such as metal oxide thin-film sensor has serious limitations due to their poor sensitivity and slow response. In recent years, carbon nanotube (CNT) has been considered as a promising excellent sensing nanomaterial due to its unique properties; a large effective surface area and a semiconducting quantum wire depending its chirality. In this research, gas sensor array system for gas detection and identification was developed. Gas sensor array was composed of various sensing elements based on CNTs and its hybrid structures (polymer and nanoparticle-functionalized CNTs). Four polymers were employed in this research, poly(methyl methacrylate), polyvinyl acetate, polyimide and thiophene. Four nanoparticles were employed in this research, gold, palladium, platinum and zinc oxide. The fabricated hybrid CNT sensors were exposed to vapours of volatile organic compounds (dichloromethane, chloroform, acetone, ethanol and methanol). Conductance of sensor changed upon gas exposure. Gas sensor responses of all sensors were recorded and the sensor array data were analyzed using pattern-recognition analysis tools for gas identification.

Keywords : hybrid carbon nanotube, gas sensor array, volatile organic compounds, polymer, nanoparticle, pattern-recognition analysis

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินงบประมาณประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยความร่วมมือของผู้ที่เกี่ยวข้องหลายฝ่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว, ดร.ศุภนิจ พรธีระภัทร และ ดร.วิรัตน์ เจริญบุญ ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะและแก้ปัญหาเกี่ยวกับงานวิจัยทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ นายรุ่งโรจน์ เมาลานนท์ นักวิจัยศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ นายวรวุฒิ เมืองรัตน์ นายฐานวีร์ โชติจารุสวัสดิ์ และนางสาวปวีณา ดุลยเสรี นักศึกษาปริญญาเอก ที่เป็นกำลังสำคัญในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีทุกคน สำหรับความสำเร็จของงานวิจัยนี้

นางสาววินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์ หัวหน้าโครงการ
นายสิรพัฒน์ ประโทนเทพ ผู้ร่วมโครงการ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.1.1 มลพิษทางอากาศ.....	1
1.1.2 การแผ่รังสีมลพิษทางอากาศ.....	2
1.1.3 ก๊าซเซนเซอร์จากวัสดุนาโน.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.2.1 การเคลือบท่อนาโนคาร์บอนด้วยพอลิเมอร์.....	6
2.2.2 การตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนของโลหะคะตะลิส.....	6
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	8
3.1 การออกแบบ sensor platform.....	8
3.2 การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนลงบน sensor platform.....	8
3.2.1 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนลงบน sensor platform โดยตรง (direct growth) ด้วยวิธี chemical vapor deposition (CVD).....	8
3.2.2 การเตรียมจากสารละลายท่อนาโนคาร์บอนและนำไปเรียงตัวบน sensor platform	10
3.3 การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด.....	10
3.3.1 การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์	10
3.3.2 การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน.....	12
3.3.3 การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์และตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน.....	12
3.4 การศึกษาสมบัติการวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด.....	13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 การวิเคราะห์สมบัติการวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ท่อานาโนคาร์บอนไฮบริดแต่ละประเภทเพื่อหา รูปแบบการตอบสนองต่อก๊าซแต่ละชนิด.....	14
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	16
4.1 Sensor platform.....	16
4.2 ท่อานาโนคาร์บอนบน sensor platform.....	18
4.2.1 ท่อานาโนคาร์บอนลงบน sensor platform โดยตรง (direct growth) ด้วยวิธี chemical vapor deposition (CVD).....	18
4.2.2 ท่อานาโนคาร์บอนในสารละลายและนำไปเรียงตัวบน sensor platform	20
4.3 ท่อานาโนคาร์บอนไฮบริดที่เคลือบด้วยโพลิเมอร์และตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน.....	21
4.3.1 ท่อานาโนคาร์บอนไฮบริดที่เคลือบด้วยโพลิเมอร์	18
4.3.2 ท่อานาโนคาร์บอนไฮบริดที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน.....	25
4.3.3 ท่อานาโนคาร์บอนไฮบริดที่เคลือบด้วยโพลิเมอร์และตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน	28
4.4 สมบัติการวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ท่อานาโนคาร์บอนไฮบริด.....	29
4.4.1 สมบัติการวัดก๊าซของท่อานาโนคาร์บอนไฮบริดที่เคลือบด้วยโพลิเมอร์	29
4.4.2 สมบัติการวัดก๊าซของท่อานาโนคาร์บอนไฮบริดที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน.....	35
4.4.3 สมบัติการวัดก๊าซของท่อานาโนคาร์บอนไฮบริดที่เคลือบด้วยโพลิเมอร์และตกแต่งด้วย อนุภาคนาโน.....	39
4.5 รูปแบบการตอบสนองต่อก๊าซแต่ละชนิด.....	41
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	43
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	43
บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง.....	45
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับจากการทำโครงการวิจัย.....	46
ประวัตินักวิจัย.....	50

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป.....	2
1.2 มาตรฐานค่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 1 ปี.....	2
3.1 เงื่อนไขของ CVD.....	10
3.2 รายละเอียดของพอลิเมอร์แต่ละชนิด.....	11
3.3 เงื่อนไขการทดสอบประสิทธิภาพการวัดก๊าซของเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด.....	14
3.4 สรุปก๊าซเซนเซอร์และไอระเหยที่นำมาใช้วิเคราะห์ PCA.....	15
4.1 ลักษณะของ Sensor platform แต่ละชนิด.....	17
4.2 สรุปข้อมูลลักษณะทางโครงสร้าง ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลาง และค่าความสมบูรณ์ของวัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่เงื่อนไขต่างๆ.....	20
4.3 ความเข้มข้นของไอระเหยที่ใช้ในแต่ละการทดสอบสำหรับ polymer/SWNT.....	29
4.4 ความเข้มข้นของไอระเหยที่ใช้ในแต่ละการทดสอบสำหรับ nanoparticle/SWNT.....	35
4.5 ความเข้มข้นของไอระเหยที่ใช้ในแต่ละการทดสอบสำหรับ polymer/nanoparticle/SWNT.....	39

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
3.1 แผนผังของระบบ CVD ที่ใช้ในงานวิจัย.....	9
3.2 ชั้นของฟิล์มคะตะลิสชนิดต่างๆบนแผ่น Si.....	9
3.3 แผนผังตัวอย่างการเตรียมเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดเคลือบด้วยพอลิเมอร์.....	12
3.4 แผนผังตัวอย่างการเตรียมเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน.....	12
3.5 แผนผังตัวอย่างการเตรียมเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนและเคลือบด้วยพอลิเมอร์.....	13
3.6 แผนผังระบบวัดก๊าซ.....	13
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการไหลของก๊าซ.....	14
4.1 ภาพถ่ายของ Sensor platform (a) Si และ (b) PCB.....	17
4.2 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์จากโลหะคะตะลิสชนิดต่างๆ ได้แก่ Ni ที่ (a) 700, (b) 800, (c) 900 °C , Co ที่ (d) 700, (e) 800, (f) 900 °C และ Fe ที่ (g) 700, (h) 800, (j) 900 °C ตามลำดับ.....	18
4.3 ภาพ TEM ของวัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์จากโลหะคะตะลิสชนิดต่างๆ ได้แก่ Ni ที่ (a) 700, (b) 800, (c) 900 °C , Co ที่ (d) 700, (e) 800, (f) 900 °C และ Fe ที่ (g) 700, (h) 800, (j) 900 °C ตามลำดับ ภาพแทรกคือภาพ TEM ที่กำลังขยายต่ำ	19
4.4 รามานสเปกตรัมของวัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างกัน และสังเคราะห์จากโลหะคะตะลิส (a) Ni, (b) Co และ (c) Fe ตามลำดับ.....	19
4.5 ภาพถ่ายของแผ่น PCB หลังจากหยดสารละลายท่อนาโนคาร์บอน.....	20
4.6 รามานสเปกตรัมของท่อนาโนคาร์บอน.....	21
4.7 ภาพ SEM ของ MWNT/Si ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ.....	22
4.8 (a) ภาพ TEM และ (b) รามานสเปกตรัมของ MWNT/Si ที่เคลือบด้วย PMMA.....	23
4.9 FTIR สเปกตรัมของ MWNTs และ PMMA/MWNTs.....	23
4.10 รามานสเปกตรัมของ SWNT/PCB ที่เคลือบด้วย PMMA, Thiophene เทียบกับ SWNT.....	24
4.11 ภาพ SEM ของ MWNT/Si ที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ (a) Au, (b) Pd, (c) Pt และ (d) ZnO ตามลำดับ.....	25
4.12 ภาพ TEM ของ MWNT/Si ที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ (a) Au, (b) Pd, (c) Pt และ (d) ZnO ตามลำดับ ภาพแทรกคือภาพ TEM ที่กำลังขยายต่ำ.....	26
4.13 รามานสเปกตรัมของ MWNT/Si ที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ (a) Au, (b) Pd, (c) Pt และ (d) ZnO.....	27
4.14 ภาพ TEM ของ SWNT/PCB ที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน (a) Au, (b), Pd, (c) Pt และ (d) ZnO.....	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.15 Sensor response ของ PMMA/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response เทียบกับเวลา (a) dichloromethane, (b) chloroform, (c) acetone, (d) ethanol และ (e) methanol.....	30
4.16 Sensor response ของ PVA/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response เทียบกับเวลา (a) dichloromethane, (b) chloroform, (c) acetone, (d) ethanol และ (e) methanol.....	31
4.17 Sensor response ของ PI/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response เทียบกับเวลา (a) dichloromethane, (b) chloroform, (c) acetone, (d) ethanol และ (e) methanol.....	32
4.18 Sensor response ของ thiophene/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response เทียบกับเวลา (a) dichloromethane, (b) chloroform, (c) acetone, (d) ethanol และ (e) methanol.....	33
4.19 การเปรียบเทียบการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ polymer/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ (a) SWNT, (b) pristine/SWNT, (c) PVA/SWNT, (d) Pt/SWNT and (e) thiophene/SWNT.....	34
4.20 การเปลี่ยนแปลงของ polymer/SWNT เมื่อสัมผัสกับไอระเหย.....	35
4.21 Sensor response ของ Au/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ (a) dichloromethane, (b) chloroform, (c) acetone, (d) ethanol และ (e) methanol.....	36
4.22 Sensor response ของ Pd/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ (a) dichloromethane, (b) chloroform, (c) acetone, (d) ethanol และ (e) methanol.....	36
4.23 Sensor response ของ Pt/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ (a) dichloromethane, (b) chloroform, (c) acetone, (d) ethanol และ (e) methanol.....	37
4.24 Sensor response ของ ZnO/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ (a) dichloromethane, (b) chloroform, (c) acetone, (d) ethanol และ (e) methanol.....	37
4.25 การเปรียบเทียบการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ nanoparticle/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ (a) SWNT, (b) pristine/SWNT, (c) PVA/SWNT, (d) Pt/SWNT and (e) thiophene/SWNT.....	38
4.26 Sensor response ของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด (a), (d) PMMA/Au/SWNT ต่อไอระเหยของ Dichloromethane และ Ethanol (b) , (e) PMMA/SWNTs และ(c),(f) Au/SWNTs.....	39
4.27 Sensor response ของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด (a), (d) PMMA/Pd/SWNT ต่อไอระเหยของ Dichloromethane และ Ethanol (b) , (e) PMMA/SWNTs และ(c),(f) Pd/SWNTs.....	40
4.28 Sensor response ของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด (a), (d) PMMA/ZnO/SWNT ต่อไอระเหยของ Dichloromethane และ Ethanol (b) , (e) PMMA/SWNTs และ(c),(f) ZnO/SWNTs.....	40

4.29 Principal component analysis (PCA) score plot แสดงความแตกต่างของของการตอบสนองของ เซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดต่อก๊าซชนิดต่างๆ (a) Polymer/SWNTs, (b) nanoparticle/SWNTs และ (c) Polymer/SWNTs และ nanoparticle/SWNTs.....	41
--	----

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัยนี้ สืบเนื่องมาจากปัญหามลพิษทางอากาศที่ทวีรุนแรงมากขึ้นและปัญหาขัดจำกัดในการใช้งานของก๊าซเซนเซอร์ที่ใช้ทำงานอยู่ในปัจจุบัน

1.1.1 มลพิษทางอากาศ

มลพิษทางอากาศที่ซึ่งเกิดจากการปนเปื้อนในอากาศอันเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณการใช้สารเคมี และการเพิ่มขึ้นของการผลิตในภาคอุตสาหกรรม ได้ทวีความรุนแรงมากขึ้น ดังจะเห็นจากข่าวตามสื่อต่างๆ ตัวอย่างเช่น ข่าวการรั่วของก๊าซ ณ โรงงานในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ในปลายปี พ.ศ. 2552 นอกจากนี้ จากข้อมูลสถิติปี พ.ศ. 2552 จากกรมควบคุมมลพิษ[1] ยังพบว่าปัญหาด้านมลพิษที่ถูกร้องเรียนมายังกรมควบคุมมลพิษมากที่สุดคือ ปัญหากลิ่นเหม็น คิดเป็นร้อยละ 39.8 ของเรื่องร้องเรียนทั้งหมด โดยการดำเนินการที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษ มากที่สุด คือ กิจการเกี่ยวกับปิโตรเลียม ถ่านหิน สารเคมี จากสถิติการควบคุมคุณภาพอากาศของนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด พบว่า ในปี 2552 ที่ผ่านสามารถควบคุม NO_2 , SO_2 ให้อยู่ภายใต้มาตรฐานสิ่งแวดล้อมได้ แต่ผลการตรวจวัดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds; VOCs) ในบรรยากาศในพื้นที่มาบตาพุด พบว่าสถานการณ์ ณ เดือนพฤษภาคม 2553 มี VOCs ที่มีค่าความเข้มข้นเกินค่ามาตรฐานเฉลี่ยรายปี ได้แก่ สาร 1,3- Butadiene, สาร 1,2-Dichloroethane และสาร Benzene เมื่อระดับความเข้มข้นของไอระเหยหรือก๊าซอยู่ในระดับที่เกินมาตรฐานกำหนด จะเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของพนักงานและประชาชนที่อยู่อาศัยในละแวกนั้น หรืออาจก่อให้เกิดผลกระทบเสียหายต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม และส่งผลกระทบต่อการดำเนินการ ซึ่งจะนำไปสู่ความเสียหายทางเศรษฐกิจได้

นอกจากนี้ VOCs ไม่เพียงแต่พบในเขตโรงงานอุตสาหกรรมเท่านั้น บ้านเรือนที่อยู่อาศัยก็เป็นแหล่งกำเนิดของ VOCs เช่นเดียวกัน ปริมาณ VOCs ที่มากเกินไปในที่อยู่อาศัยเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะเจ็บป่วยจากมลภาวะภายในบ้าน (Sick House Syndrome) ได้ แหล่งกำเนิดหลักของ VOCs ในที่อยู่อาศัย คือ ทินเนอร์ ซึ่ง เป็นสารโทลูอิน หรือ ไซลีน เป็นต้น สาเหตุที่ส่วนประกอบหลักของ VOCs ในห้องคือทินเนอร์นั้น เนื่องมาจากในงานตกแต่งพื้นผิวขั้นสุดท้ายของวัสดุก่อสร้าง มีการทาสี การพินช์ หรือการใช้กาว ซึ่งส่วนใหญ่มีการใช้ทินเนอร์ ดังนั้น การควบคุมระดับก๊าซพิษจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ ระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศเพื่อเฝ้าระวังควรได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพ สามารถตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซได้อย่างถูกต้องแม่นยำ รวดเร็ว และสามารถแจ้งเตือนได้ทันทั่วทั้งที่ เมื่อมีความเข้มข้นของก๊าซถึงระดับที่เป็นอันตราย ซึ่งทางกรมควบคุมมลพิษได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศไว้ดังตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1.1 มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป

สารมลพิษ	ค่ามาตรฐาน/ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นในเวลา 1 ช.ม.
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	ไม่เกิน 30 ppm*
ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO ₂)	ไม่เกิน 0.17 ppm
ก๊าซโอโซน (O ₃)	ไม่เกิน 0.10 ppm
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	ไม่เกิน 0.3 ppm

ppm : parts per million ในล้านส่วน

ตารางที่ 1.2 มาตรฐานค่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 1 ปี

สารมลพิษ	ค่ามาตรฐาน/ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นในเวลา 1 ช.ม.
เบนซีน(Benzene)	ไม่เกิน 1.7 มก./ลบ.ม.*
ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl Chloride)	ไม่เกิน 10 มก./ลบ.ม.
1,2 - ไดคลอโรอีเทน (1,2- Dichloroethane)	ไม่เกิน 0.4 มก./ลบ.ม.
ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	ไม่เกิน 23 มก./ลบ.ม.
ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane)	ไม่เกิน 22 มก./ลบ.ม.
1,2-ไดคลอโรโพรเพน (1,2- Dichloropropane)	ไม่เกิน 4 มก./ลบ.ม.
เตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene)	ไม่เกิน 200 มก./ลบ.ม.
คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	ไม่เกิน 0.43 มก./ลบ.ม.
1,3-บิวทาไดเอน (1,3- Butadiene)	ไม่เกิน 0.33 มก./ลบ.ม.

มก./ลบ.ม.: ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

1.1.2 การเฝ้าระวังมลพิษทางอากาศ

ในปัจจุบันการตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซทำได้หลายวิธี เช่น วิธีโครมาโตกราฟี สเปกโตรกราฟี เป็นต้น แต่วิธีเหล่านี้ จะประกอบด้วยขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่างก่อน แล้วจึงไปวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งเทคนิคเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายสูง ใช้เวลานาน และต้องใช้เครื่องมือที่ซับซ้อน นอกจากนี้ วิธีก๊าซเซนเซอร์เคมี ก็ใช้ในระบบเฝ้าระวังมลพิษทางอากาศเช่นเดียวกัน เป็นระบบการตรวจวัดที่แตกต่างจากข้างต้นสามารถตรวจวัดได้ ณ สถานที่จริง แต่ก็ประสบกับปัญหาอีก นั่นคือ อุณหภูมิการทำงานที่สูง (โดยเฉพาะก๊าซเซนเซอร์จากโลหะออกไซด์) ขาดการประสิทธิภาพในการเลือกตรวจวัดชนิดก๊าซ การตอบสนองต่อก๊าซต่ำ (ไม่สามารถตรวจเมื่อก๊าซมีความเข้มข้นต่ำได้)

1.1.3 ก๊าซเซนเซอร์จากวัสดุนาโน

เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้ วัสดุนาโนได้รับการพัฒนาให้เป็นเซนเซอร์ชนิดใหม่ แต่ถึงแม้เซนเซอร์จากวัสดุนาโนจะแสดงถึงศักยภาพในการตรวจวัดที่ละเอียด (high sensitivity) แต่คุณสมบัติบางอย่าง เช่น ความสามารถในการเลือกตรวจวัดก๊าซ ก็ยังไม่สามารถระบุได้อย่างแน่ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำไปใช้ในการ

ตรวจวัดก๊าซจริง หนึ่งในวัสดุนาโนที่ได้รับการพัฒนามาสร้างเป็นก๊าซเซนเซอร์คือ ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes; CNTs) เป็นวัสดุนาโนที่มีคุณสมบัติเยี่ยมทั้งทางไฟฟ้า และทางกลศาสตร์ ได้มีรายงานหลายฉบับได้กล่าวว่า CNTs สามารถตรวจวัดก๊าซได้ดี แม้ก๊าซจะมีความเข้มข้นต่ำมาก และสามารถตอบสนองได้รวดเร็ว และสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตาม CNTs นั้น ตอบสนองต่อก๊าซได้หลายชนิด จึงเป็นข้อเสียก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs ที่ยังไม่ได้รับการตกแต่งทางเคมีนั้น ไม่สามารถเลือกตรวจวัดก๊าซชนิดใดชนิดหนึ่งได้ เช่น หากต้องการตรวจวัด NO_2 และ SO_2 ซึ่งเป็นก๊าซที่ต้องควบคุมในเขตอุตสาหกรรม จะพบว่า CNTs สามารถตรวจวัดได้ทั้ง NO_2 และ SO_2 และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกัน คือ ทำให้ค่าความต้านทานของ CNTs ลดลง การตกแต่ง CNTs ทางเคมีเพื่อเป็นตัวรับก๊าซพิเศษ เป็นวิธีหนึ่งที่จะแก้ปัญหาเรื่องการเลือกตรวจชนิดก๊าซได้ แต่ก็ยังไม่ได้รับการวิจัยและพัฒนาอย่างเต็มที่ ดังนั้น การศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการเลือกตรวจวัดก๊าซ และก๊าซรบกวน (Interfere) จากก๊าซชนิดอื่น จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อนำไปใช้งานจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนาเทคนิคการสังเคราะห์และการตกแต่งท่อนาโนคาร์บอนให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการด้วยเทคนิคการเคลือบด้วยพอลิเมอร์และการตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน
- 2) เพื่อสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์ จากท่อนาโนคาร์บอนที่มีการตอบสนองต่อก๊าซสูง สามารถเลือกตรวจวัดก๊าซ และระบุชนิดก๊าซได้
- 3) เพื่อพัฒนา เสริมสร้าง และสะสมองค์ความรู้ด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์จากท่อนาโนคาร์บอน เพื่อนำไปพัฒนาอุปกรณ์ด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ และประยุกต์ในการใช้งานต่างๆได้
- 4) เพื่อการวิจัยพัฒนาสิ่งประดิษฐ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์จากท่อนาโนคาร์บอน และการถ่ายทอดเทคโนโลยีด้านนี้ไปสู่การใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมและภาคเอกชน
- 5) เพื่อสร้างบุคลากรที่มีความสามารถในการวิจัย และพัฒนาสาขานาโนอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเป็นกำลังสำคัญในการพัฒนานาโนเทคโนโลยีภายในประเทศและนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อสังคม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติระหว่างชนิดโพลิเมอร์และชนิดของอนุภาคนาโนต่อปฏิกิริยากับก๊าซหรือไอระเหยชนิดต่างๆ
- 2) การตกแต่งท่อนาโนคาร์บอนด้วยโพลิเมอร์และอนุภาคนาโน โดยศึกษาลักษณะโครงสร้างคุณสมบัติการนำไฟฟ้า
- 3) การศึกษาประสิทธิภาพการตรวจวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด โดยจะศึกษาในเรื่อง
 - คุณสมบัติในการตรวจวัดก๊าซชนิดต่างๆ
 - ศึกษาประสิทธิภาพในการตรวจเลือกตรวจวัดก๊าซ
 - ศึกษาคุณสมบัติของก๊าซเซนเซอร์ เมื่อมีก๊าซอื่นมารบกวน

- สรุปรูปแบบการตรวจวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ชนิดต่างๆ เพื่อนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลในการวิเคราะห์เพื่อระบุชนิดของก๊าซหรือไอระเหยนั้นๆ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

มีการแบ่งการวิจัยออกเป็นทั้งหมด 5 ขั้นตอน

- 1) การออกแบบ sensor platform
- 2) การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนลงบนแผ่น sensor platform ซึ่งจะมีสองวิธีคือ
 - การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนเองด้วยวิธี chemical vapor deposition (CVD)
 - การใช้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีจำหน่ายอยู่แล้ว
- 3) การเลือกชนิดของพอลิเมอร์และชนิดอนุภาคนาโนคะตะลิสที่จะนำมาใช้ตกแต่งกับท่อนาโนคาร์บอน และดำเนินการเคลือบและตกแต่ง โดยเตรียมท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด 3 ประเภทได้แก่
 - ท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์
 - ท่อนาโนคาร์บอนที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน
 - ท่อนาโนคาร์บอนที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนและตกแต่งด้วยพอลิเมอร์
- 4) การศึกษาคุณสมบัติการวัดก๊าซของเซนเซอร์แต่ละประเภทด้วยระบบตรวจวัดก๊าซเซนเซอร์ที่ทำขึ้นมาเอง
- 5) การวิเคราะห์สมบัติการวัดก๊าซของแต่ละเซนเซอร์เพื่อหารูปแบบการตอบสนองต่อก๊าซแต่ละชนิด เพื่อนำไปเป็นฐานข้อมูลในการประมวลผลเพื่อบอกชนิดก๊าซ โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธี principal component analysis (PCA)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เกิดองค์ความรู้ด้านเทคนิคการสังเคราะห์และการตกแต่งท่อนาโนคาร์บอนให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการด้วยเทคนิคการเคลือบด้วยพอลิเมอร์และการตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน
- 2) สามารถสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์ จากท่อนาโนคาร์บอนที่มีการตอบสนองต่อก๊าซสูง สามารถเลือกตรวจวัดก๊าซ และระบุชนิดก๊าซได้
- 3) พัฒนา เสริมสร้าง และสะสมองค์ความรู้ด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์จากท่อนาโนคาร์บอน เพื่อนำไปพัฒนาอุปกรณ์ด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ และประยุกต์ในการใช้งานต่างๆได้
- 4) เกิดการวิจัยพัฒนาสิ่งประดิษฐ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์จากท่อนาโนคาร์บอน และการถ่ายทอดเทคโนโลยีด้านนี้ไปสู่การใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมและภาคเอกชน
- 5) สร้างบุคลากรที่มีความสามารถในการวิจัย และพัฒนาสาขานาโนอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเป็นกำลังสำคัญในการพัฒนานาโนเทคโนโลยีภายในประเทศและนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อสังคม

- 6) มีหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ เช่น ภาควิชาอุตสาหกรรมการผลิตก๊าซเซเนสเซอร์, กรมควบคุมมลพิษ โรงงานอุตสาหกรรมที่มีความเสี่ยงในการปล่อยก๊าซพิษ องค์การที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของอาคารที่อยู่อาศัย โดยสามารถนำเทคโนโลยีตั้งแต่การประดิษฐ์หัววัดก๊าซเซเนสเซอร์ และเทคโนโลยีการวัดและวิเคราะห์การตรวจวัดก๊าซไปประยุกต์ใช้เพื่อเฝ้าระวังมลพิษอากาศ
- 7) สามารถตีพิมพ์ผลงานวิชาการได้

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม

2.1 แนวคิด ทฤษฎีหลักตามประเด็นให้ครอบคลุมเรื่องที่วิจัย

หลักการทำงานก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes; CNTs) คือ การวัดค่าความต้านที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีโมเลกุลของก๊าซเข้ามาจับเกาะ สาเหตุที่ค่าความต้านทานเปลี่ยนมีอยู่ 2 อย่าง ซึ่งก็ยังเป็นข้อถกเถียงกันอยู่ อันได้แก่

1) การเกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า (Charge transfer)

การแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าระหว่าง CNTs กับก๊าซโมเลกุลหรือกับโมเลกุลของไอระเหย ทำให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นหรือน้อยลงขึ้นกับชนิดของก๊าซนั้นๆ

2) การเปลี่ยนแปลงความสูงของ Schottky barrier ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับ CNTs

เมื่อก๊าซโมเลกุลหรือไอระเหยเมื่อเข้ามาจับเกาะแล้วจะทำให้ความสูงของ Schottky barrier เปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้ค่าความต้านทานของ CNTs เปลี่ยนแปลงไปด้วย

ดังนั้น หากต้องการให้ก๊าซเซนเซอร์ CNTs มีความสามารถในการตรวจวัดหลากหลายมากขึ้น และมีความสามารถในการตอบสนองต่อก๊าซได้สูงขึ้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มฟังก์ชัน (Function) ให้กับ CNTs เช่น การเคลือบด้วยพอลิเมอร์หรือการตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม

เทคโนโลยีก๊าซเซนเซอร์มีบทบาทสำคัญในการดูแลและมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม การปล่อยก๊าซพิษออกมาในปริมาณที่มากเกินไปกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้จะเป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์และทำลายสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจและสังคมอีกด้วย ดังนั้นความเข้มข้นของก๊าซ จึงควรได้รับการตรวจ วัดอย่างแม่นยำ และสามารถแจ้งให้ทราบได้อย่างทันท่วงที เมื่อก๊าซมีความเข้มข้นในระดับที่เป็นอันตราย เช่น กองควบคุมมลพิษของประเทศไทย ได้กำหนดความเข้มข้นของ NO₂ ให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่า 17 ในพันล้านส่วน (parts per billion)¹⁾ เป็นต้น

เพื่อพัฒนาก๊าซเซนเซอร์ให้มีประสิทธิภาพตามมาตรฐานสิ่งแวดล้อม ได้มีการพัฒนาเซนเซอร์โดยใช้วัสดุนาโน เป็นวัสดุสำหรับหัววัดก๊าซ เช่น ลวดนาโนของโลหะออกไซด์²⁾ ท่อนาโนคาร์บอน^{3,4)} เป็นต้น ซึ่งมีข้อดีกว่าก๊าซเซนเซอร์ในปัจจุบันที่ผลิตมาจากฟิล์มของโลหะออกไซด์ ในด้านอุณหภูมิทำงาน สามารถตรวจวัดก๊าซที่มีความเข้มข้นน้อยได้ ซึ่งสามารถตรวจวัดความเข้มข้น NO₂ ได้ถึงระดับ 1 ใน ล้านล้านส่วน (parts per trillion)⁵⁾ สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งสามารถลดความเสี่ยงของการระเบิดเมื่อมีก๊าซเผาไหม้ ซึ่งในบรรดาวัสดุเหล่านั้น วัสดุที่ได้รับการจับตามองและทำการวิจัยเป็นอย่างมาก คือ ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon naotubes; CNTs) แต่อย่างไรก็ตาม การนำก๊าซเซนเซอร์ไปใช้งานจริงนั้น ไม่เพียงแต่ต้องมีคุณสมบัติในการตรวจวัดที่ดีแล้ว ยังต้องมีความสามารถในการเลือกตรวจวัดชนิดก๊าซ สามารถระบุชนิดก๊าซ สามารถทำงานได้ท่ามกลางสภาวะที่มีก๊าซอื่นมารบกวน ได้ด้วย

ในปัจจุบัน การพัฒนาความสามารถในการเลือกวัดให้มีการตอบสนองที่ดีขึ้นและการเลือกตรวจวัดชนิดก๊าซที่ดีขึ้นนั้น ทำได้โดยการเพิ่มฟังก์ชันให้กับ CNTs โดย มีวิธีหลัก 2 วิธี คือ

2.2.1. การเคลือบ CNTs ด้วยพอลิเมอร์⁵⁻⁸⁾

ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ เช่น poly(m-aminobenzene sulfonic acid); PABS, Poly (methyl methacrylate); PMMA, Poly(ethylene imine); PEI, Nafion (polymeric perfluorinated sulfonic acid ionomer) เป็นต้น พบว่า CNTs ที่เคลือบด้วย PABS, PMMA, PEI จะมีการตอบสนองต่อ NO_2 ได้เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ การเคลือบด้วย Nafion จะทำให้สามารถเลือกตรวจสอบ NH_3 ได้ โดยจะไม่ตอบสนองต่อ NO_2

2.2.2. การตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนของโลหะคะตะลิสต์⁹⁻¹¹⁾

ตัวอย่างของอนุภาคนาโนของโลหะคะตะลิสต์ เช่น Pd, Pt ทำให้สามารถวัด CH_4 , H_2 ได้ โดย CNTs เกล่านั้นจะไม่สามารถวัดก๊าซเหล่านี้ได้

ถึงแม้ก๊าซเซนเซอร์จะสามารถตรวจวัดก๊าซได้หลายประเภท แต่การนำไปใช้งานจริงนั้น จะต้องสามารถระบุชนิดก๊าซได้ จึงได้มีการนำก๊าซเซนเซอร์ซึ่งได้รับการเคลือบหรือตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนหลายๆ ชนิด มาประกอบเข้าเป็นชุดเซนเซอร์ และอาศัยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis) มาช่วยวิเคราะห์¹²⁾ แต่อย่างไรก็ตาม ผลที่นำไปใช้นี้ เป็นผลจากการที่วัดก๊าซแต่ละชนิด ไม่ได้มีการวัดในลักษณะที่ก๊าซผสมกัน ดังนั้น เพื่อนำไปใช้จริง ต้องมีการวิเคราะห์ผลกระทบจากก๊าซรบกวนด้วย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

แบ่งการวิจัยออกเป็นทั้งหมด 5 ขั้นตอน ได้แก่

- (1) การออกแบบ sensor platform
- (2) การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนลงบน sensor platform
- (3) การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดที่เคลือบด้วยโพลิเมอร์และตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน (polymer/SWNTs, nanoparticle/SWNTs)
- (4) การศึกษาคุณสมบัติการวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดแต่ละประเภท
- (5) การวิเคราะห์สมบัติการวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดแต่ละประเภทเพื่อหารูปแบบการตอบสนองต่อก๊าซแต่ละชนิด

3.1 การออกแบบ sensor platform

ออกแบบแผ่นรองสำหรับทำหน้าที่เป็น sensor platform โดยกำหนดลักษณะ (specification) ของ sensor platform ในหัวข้อดังต่อไปนี้ในงานวิจัยนี้

- (1) ชนิดวัสดุของแผ่นรอง
- (2) ชนิดวัสดุของขั้วไฟฟ้า
- (3) ความห่าง (gap) ของขั้วไฟฟ้า
- (4) ลักษณะลวดลายของขั้วไฟฟ้า
- (5) พื้นที่วัสดุสำหรับตรวจวัดก๊าซ (sensing area)

3.2 การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนลงบน sensor platform

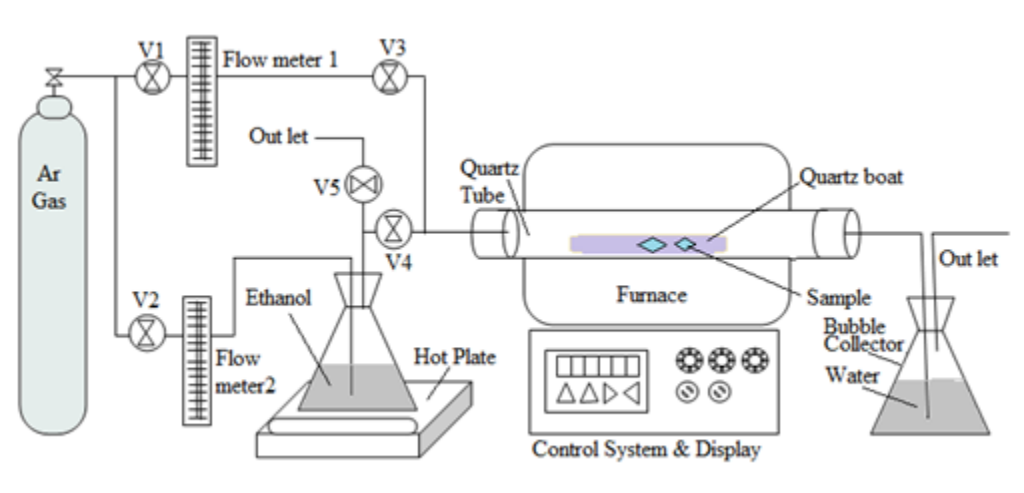
โดยทั่วไปการเตรียมท่อนาโนคาร์บอนลงบน sensor platform สามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ (1) การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนลงบน sensor platform โดยตรง (direct growth) ด้วยวิธีสังเคราะห์เช่น chemical vapor deposition (CVD) และ (2) การเตรียมจากสารละลายท่อนาโนคาร์บอนและนำไปเรียงตัวบน sensor platform (dispersion) ด้วยวิธีต่างๆ เช่น dip coating, spin coating, printing, drop casting เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองเตรียมท่อนาโนคาร์บอนลงบน sensor platform ทั้ง 2 วิธีการ

3.2.1 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนลงบน sensor platform โดยตรง (direct growth) ด้วยวิธี chemical vapor deposition (CVD)

วิธี chemical vapor deposition (CVD) เป็นวิธีหนึ่งในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนแผ่นซิลิกอนโดยใช้เอทานอลเป็นแหล่งคาร์บอน โดยได้ศึกษาผลกระทบของชนิดของคละลีสต่อลักษณะของท่อนาโนคาร์บอน ชนิดของคละลีสที่เลือกมาใช้มี 3

ชนิด ได้แก่ เหล็ก (Fe), นิกเกิล (Ni) และโคบอลต์ (Co) โดยมีชั้นโครเมียมและนิกเกิล (Cr/Ni) ทำหน้าที่เป็นชั้นบัฟเฟอร์ (buffer layer) फिल्मของโลหะคตะลีสชนิดต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้เตรียมขึ้นโดยวิธี electron beam evaporation และใช้ซิลิกอน (Si) เป็นแผ่นรองรับสำหรับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนหลังจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธี CVD แล้ว ได้นำท่อนาโนคาร์บอนไปวิเคราะห์ด้วย scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM) และ Raman spectroscopy ภาพที่ 3.1 แสดงแผนผังของระบบ CVD ที่ใช้ในงานวิจัย ภาพที่ 3.2 แสดงชั้นของฟิล์มคตะลีสชนิดต่างๆบนแผ่นซิลิกอน และตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขของ CVD



ภาพที่ 3.1 แผนผังของระบบ CVD

Ni = 5nm	Co = 5nm	Fe = 5nm
Al = 5nm	Al = 5nm	Al = 5nm
Cr = 2nm	Cr = 2nm	Cr = 2nm
Si	Si	Si

ภาพที่ 3.2 ชั้นของฟิล์มคตะลีสชนิดต่างๆบนแผ่น Si

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขของ CVD

Substrate	:Si
Catalyst	:Ni, Co, Fe
Pressure	1 atm
Growth temperature	700, 800, 900°C
Growth time	20 min
Carbon source	Ethanol
Ar flow rate for ethanol vapor carrier	800 sccm

3.2.2 การเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนและนำไปเรียงตัวบน sensor platform (dispersion)

เตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนและนำไปเรียงตัวบน sensor platform (dispersion) ด้วยวิธี drop casting ขั้นตอนการเตรียมมีดังต่อไปนี้

(1) การเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอน

เตรียมสารละลายของท่อนาโนคาร์บอน โดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว (single-walled carbon nanotube (SWNTs) (Aldrich) ซึ่งมีจำหน่ายทั่วไป ใช้ dichloroethene เป็นตัวทำละลาย โดยเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่ความเข้มข้น 0.3 mg/l หลังจากนั้นนำไปอุลตราโซนิก เป็นเวลาอย่างน้อย 3 hr เพื่อให้ท่อนาโนคาร์บอนละลายใน dichloroethene ได้ดี

(2) การเตรียมฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนบน sensor platform

Sensor platform ที่เลือกใช้ทำมาจาก printed circuit board (PCB) ที่มีขั้วไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว หยดสารละลายของท่อนาโนคาร์บอนลงบนแผ่น PCB จนค่าความต้านทานอยู่ที่ประมาณ 100 k Ω แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 คืนเพื่อให้สารละลายที่ตกค้างอยู่ระเหยออกให้หมด

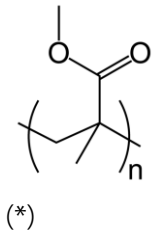
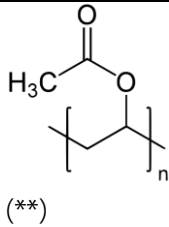
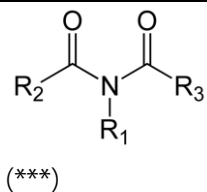
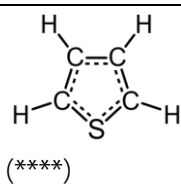
3.3 การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์และตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน (polymer/SWNTs, nanoparticle/SWNTs)

เตรียมท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด 3 ประเภท

3.3.1 การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ พอลิเมทิลเมทาอะคริเลต (poly(methyl methacrylate; PMMA) พอลิไวนิลอะซิเตต (polyvinyl acetate; PVA) พอลิอิมิด (polyimide; PI) และ ไทโอฟิน (thiophene) ซึ่งพอลิเมอร์ทั้ง 4 ชนิดต่างเป็นวัสดุที่เข้ากับเซนเซอร์ประเภทพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Gas sensor based on conducting polymer) ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่ใช้ในการวิจัย

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของพอลิเมอร์แต่ละชนิด

Name	Structure	Molecular structure	Molecular Weight (g/mol)	Maker
Poly(methyl methacrylate; PMMA)	 (*)	$(C_5 H_8 O_2)_n$	97000	Acros Organics
Polyvinyl acetate; PVA	 (**)	$(C_4 H_6 O_2)_n$	140000	Aldrich
Polyimide; PI	 (***)		400000	Aldrich
Thiophene	 (****)	$C_4 H_4 S$	84.14	Aldrich

ที่มา

* [http://en.wikipedia.org/wiki/Poly\(methyl_methacrylate\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Poly(methyl_methacrylate))

** http://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_acetate

*** <http://en.wikipedia.org/wiki/Polyimide>

**** <http://en.wikipedia.org/wiki/Thiophene>

การเตรียมท่อนานาโนคาร์บอนไฮบริดที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนได้แก่

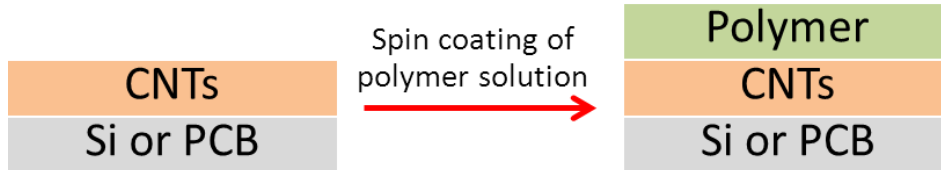
(1) การเตรียมสารละลายของพอลิเมอร์

เริ่มต้นด้วยการเตรียมสารละลายของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 1wt% โดยใช้โทลูอินเป็นตัวทำละลาย และนำไปกวน (stirring) ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 hr

(2) การเคลือบท่อนานาโนคาร์บอนด้วยพอลิเมอร์

นำสารละลายพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่เตรียมได้ในข้อ 3.3.1.1 มาใช้ในการเคลือบท่อนานาโนคาร์บอน โดยใช้สารละลายพอลิเมอร์ปริมาตร 50 ml เคลือบลงบนท่อนานาโนคาร์บอนที่เตรียมไว้ในข้อ 3.2.1 หรือ 3.2.2

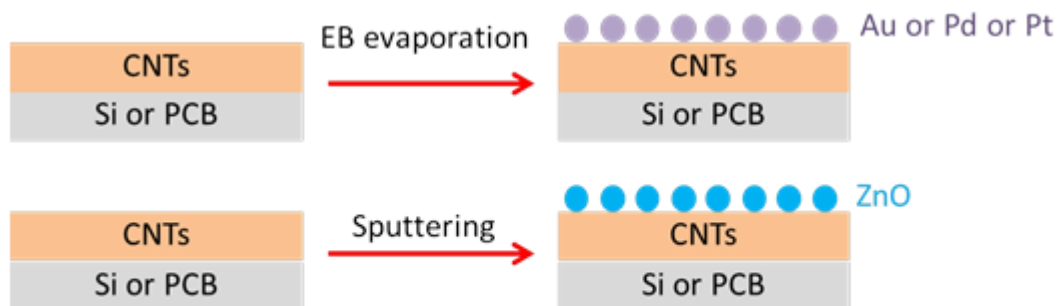
ด้วยวิธี Spin coating ที่เงื่อนไขความเร็ว 3,000 rounds per minute (rpm) เป็นเวลา 5 min แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 hr เพื่อระเหยตัวทำละลายออกไปจากตัวอย่าง ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ PMMA/CNTs, PVA/CNTs, PI/CNTs, Thiophene/CNTs ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM, TEM, Raman spectroscopy และ Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ภาพที่ 3.3 แสดงแผนผังตัวอย่างการเตรียมเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดเคลือบด้วยพอลิเมอร์



ภาพที่ 3.3 แผนผังตัวอย่างการเตรียมเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดเคลือบด้วยพอลิเมอร์

3.3.2 การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน

อนุภาคนาโนที่ใช้ในงานวิจัยมี 4 ชนิด ได้แก่ ทอง (Au) พาลาเดียม (Pd) แพลตินัม (Pt) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยการเตรียมอนุภาคนาโนของ Au, Pd และ Pt เคลือบลงบนท่อนาโนคาร์บอนทำโดยใช้วิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนสูญญากาศ (Electron-beam evaporation) ที่ความหนา 5 nm ส่วนการเตรียมอนุภาคของ ZnO เตรียมโดยใช้วิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering) ที่ความหนา 5 nm ท่อนาโนคาร์บอนที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ ถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM, TEM และ Raman spectroscopy ภาพที่ 3.5 แสดงแผนผังการเตรียมเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ ได้แก่ Au/CNT, Pd/CNT, Pt/CNT, ZnO/CNT

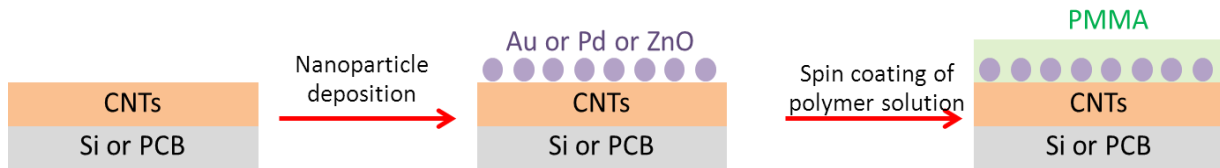


ภาพที่ 3.4 แผนผังตัวอย่างการเตรียมเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน

3.3.3 การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนและตกแต่งด้วยพอลิเมอร์

นำท่อนาโนที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนเรียบร้อยแล้วตามขั้นตอนในข้อ 3.3.2 มาเคลือบด้วย

พอลิเมอร์ PMMA ตามขั้นตอนในข้อ 3.3.1 ตามลำดับ ภาพที่ 3.5 แสดงแผนผังการเตรียมเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนและเคลือบด้วยพอลิเมอร์ ได้แก่ PMMA/Au/CNT, PMMA/Pd/CNT, PMMA/Pt/CNT, PMMA/ZnO/CNT

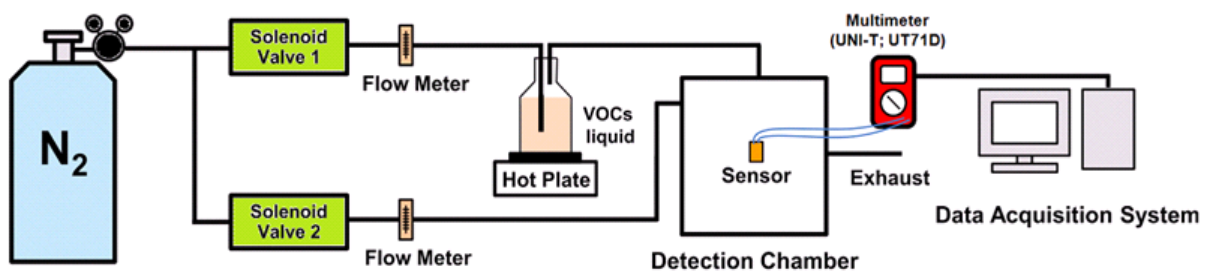


ภาพที่ 3.5 แผนผังตัวอย่างการเตรียมเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนและเคลือบด้วยพอลิเมอร์

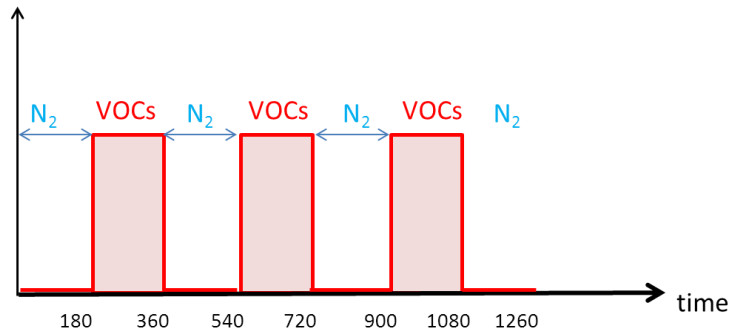
3.4 การศึกษาคุณสมบัติการวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดแต่ละประเภท

สร้างระบบก๊าซเซนเซอร์เพื่อตรวจวัดประสิทธิภาพการวัดก๊าซของท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดแต่ละประเภท นำท่อนาโนไฮบริดทั้ง 3 ประเภท มาทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดก๊าซกับไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ ได้แก่ ไดคลอโรมีเทน (dichloromethane; DCM) คลอโรฟอร์ม (Chloroform) อะซีโตน (Acetone) เอทานอล (Ethanol) และเมทานอล (Methanol)

ในการวัดประสิทธิภาพการตรวจวัดก๊าซ จะทำโดยใช้ไนโตรเจน (N_2) เป็น base line และจะสลับไอระเหยเข้าไปในระบบเป็นจังหวะทุกๆ 180 s โดยทำทั้งหมด 3 ไซเคิล ในการสร้างไอระเหยของสารที่ต้องการวัด จะใช้วิธี bubbling ด้วย N_2 และให้ความร้อนแก่สารที่ต้องการวัดที่อุณหภูมิ 90% ของจุดเดือดของสารนั้นๆ ภาพที่ 3.6 แสดงแผนผังของระบบวัดก๊าซ และภาพที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการไหลของก๊าซในระบบวัดก๊าซ



ภาพที่ 3.6 แผนผังระบบวัดก๊าซ



ภาพที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการไหลของก๊าซ

การวัดประสิทธิภาพการตรวจวัดก๊าซนั้น ทำโดยวัดค่าความต้านทานของก๊าซเซนเซอร์ก่อน และหลังสัมผัสกับไอระเหย โดยกำหนดค่าการตอบสนอง (Sensor response; S) ดังสมการที่ 3.1 และตารางที่ 3.3 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการวัดก๊าซของเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด

$$S = \frac{R_s - R_0}{R_0} \quad (3.1)$$

โดย R_0 : ค่าความต้านทานเริ่มต้นของเซนเซอร์

R_{gas} : ค่าความต้านทานของเซนเซอร์เมื่อสัมผัสกับไอระเหย

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการทดสอบประสิทธิภาพการวัดก๊าซของเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด

Sensors	PMMA/CNTs, PVA/CNTs, PI/CNTs, Thiophene/CNTs
	Au/CNTs, Pd/CNTs, Pt/CNTs, ZnO/CNTs
	PMMA/Au/CNTs, PMMA/Pd/CNTs, PMMA/ZnO/CNTs
VOCs target	dichloromethane, chloroform, acetone, methanol, ethanol
Detection temperature	RT
Temperature of VOCs	90% of its boiling point

3.5 การวิเคราะห์สมบัติการวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดแต่ละประเภท เพื่อหารูปแบบการตอบสนองต่อก๊าซแต่ละชนิด

นำข้อมูลการตอบสนองของก๊าซแต่ละชนิดมาวิเคราะห์เพื่อหารูปแบบการตอบสนองต่อก๊าซแต่ละชนิด เนื่องจากการในการทดลอง ไม่สามารถควบคุมความเข้มข้นของไอระเหยได้อย่างแม่นยำ ดังนั้น กราฟข้อมูลของ Sensor response ต่อเวลาของแต่ละเซนเซอร์ต่อการตอบสนองก๊าซแต่ละชนิดนั้น จะเป็นค่าการตอบสนองต่อก๊าซที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ดังนั้นในการนำผลมาวิเคราะห์จำเป็นต้องตัดความผันผวนจาก

ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ข้อมูล Sensor response ที่นำมาวิเคราะห์จึงทำการ normalized ด้วยค่าความเข้มข้นของไอระเหยก่อน (sensor response/concentration)

นอกจากนี้ เนื่องจากเซนเซอร์แต่ละตัวมีความไม่เสถียร ไม่สามารถทำการทดลองซ้ำได้ ในเบื้องต้น จึงได้เตรียมก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดประเภทละ 3 ตัว และทำการวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อก๊าซ อย่างไรก็ตามพบว่า ยังมีความแตกต่างของ sensor response ระหว่างเซนเซอร์ ดังนั้นในการวิเคราะห์ด้วย PCA จึงได้เลือกข้อมูลเซนเซอร์ 2 ตัวที่มีลักษณะ sensor response คล้ายกันมาใช้ในการวิเคราะห์

ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลสำหรับนำมาวิเคราะห์ PCA

- (1) เตรียมข้อมูลการตอบสนองต่อก๊าซดังตารางที่ 4.10
- (2) คำนวณ normalized sensor response (sensor response/concentration)
- (3) นำค่า normalized sensor response ไปหาค่าเฉลี่ย 10 จุด ซ้ำ 8 จุด เฉลี่ย 10 จุด ไปเรื่อยๆ
- (4) นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วย PCA

ตารางที่ 3.4 สรุปก๊าซเซนเซอร์และไอระเหยที่นำมาใช้วิเคราะห์ PCA

Sensor	PMMA/SWNTs, PVA/SWNTs, PI/SWNTs, Thiophene/SWNTs Au/SWNTs, Pd/SWNTs, Pt/SWNTs, ZnO/SWNTs
VOCs	Dichloromethane, Chloroform, Acetone, Methanol, Ethanol

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ผลการวิจัยออกเป็นทั้งหมด 5 ส่วน ได้แก่

- (1) Sensor platform
 - (2) การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนลงบน sensor platform
 - (3) การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดที่เคลือบด้วยโพลิเมอร์และตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน (polymer/SWNTs, nanoparticle/SWNTs)
 - (4) การศึกษาคุณสมบัติการวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดแต่ละประเภท
 - (5) การวิเคราะห์สมบัติการวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดแต่ละประเภทเพื่อหา
- รูปแบบการตอบสนองต่อก๊าซแต่ละชนิด

4.1 Sensor platform

ในงานวิจัยนี้แผ่นรองสำหรับทำหน้าที่เป็น sensor platform มี 2 ชนิด คือ ซิลิกอน (Si) และ printed circuit board (PCB)

สำหรับ Si sensor platform นั้น สร้างลายขั้วไฟฟ้าโดยวิธี photolithography จึงสามารถสร้างลายขั้วไฟฟ้าที่ละเอียด มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่แคบกว่าแบบ PCB ได้ โดยมีขั้วไฟฟ้าคือ Ti ความห่างระหว่างขั้วประมาณ 50 μm ขั้วมีลักษณะเป็นรูปหวี (Interdigitated electrodes) จำนวน 10 ซี่ (5 คู่)

ส่วน PCB sensor platform นั้นเป็นการทำรูปแบบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธี Direct laser writing (maskless lithography) โดยมีขั้วไฟฟ้าคือ Au/Cu มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าประมาณ 250 μm ขั้วมีลักษณะเป็นรูปหวี (Interdigitated electrodes) จำนวน 10 ซี่ (5 คู่)

ในการเตรียมท่อนาโนคาร์บอนนั้นสำหรับทำก๊าซเซนเซอร์นั้น สามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีที่ 1 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนลงบน sensor platform โดยตรงด้วยวิธี CVD ที่เงื่อนไขความร้อนสูง (700-900°C) และวิธีที่ 2 การเตรียมจากสารละลายท่อนาโนคาร์บอนแล้วสร้างฟิล์มลงบนแผ่นรองด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น drop casting, dip coating, spin coating เป็นต้น ดังนั้น Si sensor platform จึงเหมาะแก่การเตรียมด้วยวิธีที่ 1 เพราะสามารถทนอุณหภูมิได้สูงกว่า ในขณะที่เดียวกัน PCB sensor platform ก็มีข้อได้เปรียบได้แง่ของความง่ายในการเตรียม ลักษณะ (specification) ของ sensor platform แต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของ sensor platform แต่ละชนิด

ตาราง 4.1 ลักษณะของ Sensor platform แต่ละชนิด

ลักษณะ	Sensor platform	
	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2
ชนิดวัสดุของแผ่นรอง	Si	PCB
ชนิดวัสดุของขั้วไฟฟ้า	Ti	Au/Cu
ความห่าง (gap) ของขั้วไฟฟ้า	50 μm	250 μm
ลักษณะลวดลายของขั้วไฟฟ้า	Interdigitated electrode (10 pairs)	Interdigitated electrode (10 pairs)
Patterning technique	Photolithography	Markless lithography
ข้อดี	1. เสถียรต่อความร้อนและความชื้น 2. ทนอุณหภูมิสูงได้ 3. สามารถสร้างลวดลายขั้วไฟฟ้าที่ละเอียดและมีความแม่นยำ	1. ง่ายในการเตรียม
ข้อเสีย	1. เทคนิค Photolithography จำเป็นต้องใช้เครื่องมือขนาดใหญ่และมีราคาแพง	1. ไม่สามารถสร้างลวดลายละเอียดได้ 2. ไม่ทนอุณหภูมิสูง (300 °C)

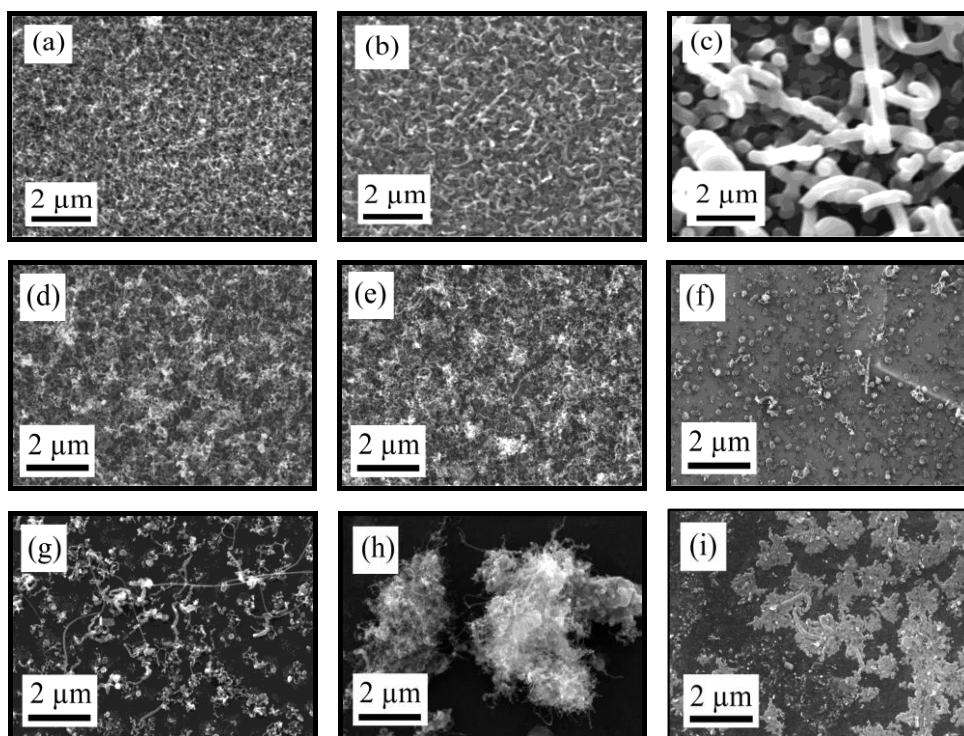


ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายของ Sensor platform (a) Si และ (b) PCB

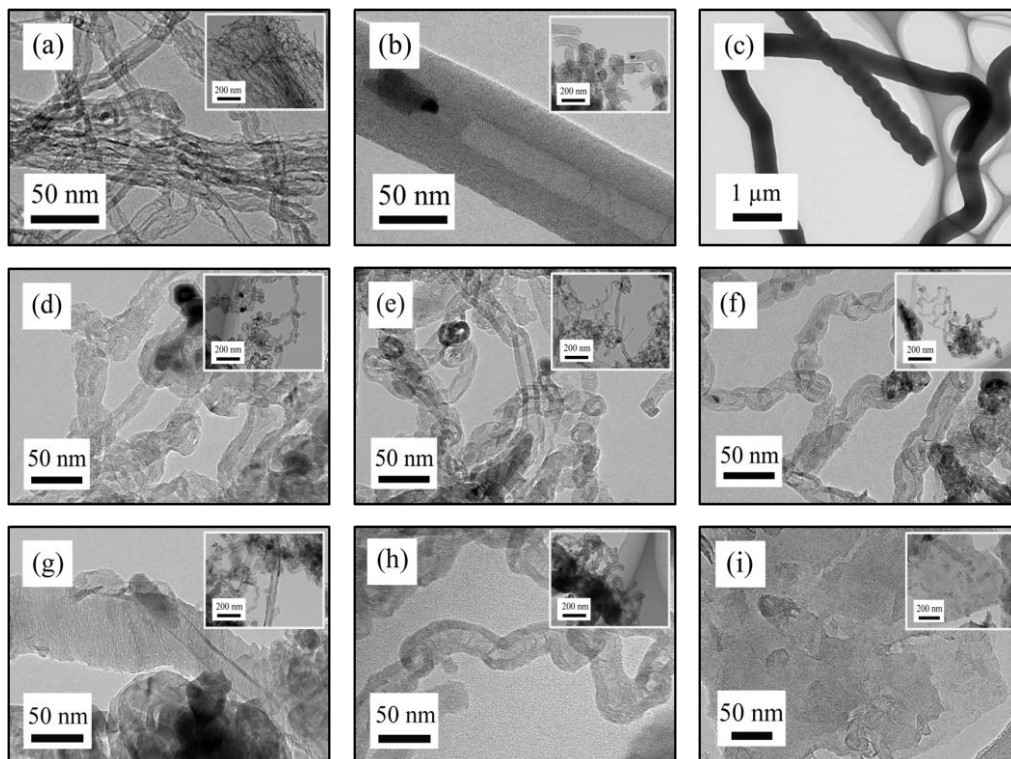
4.2 ท่อนาโนคาร์บอนบน sensor platform

4.2.1 ท่อนาโนคาร์บอนบน sensor platform โดยการสังเคราะห์โดยตรง (direct growth)

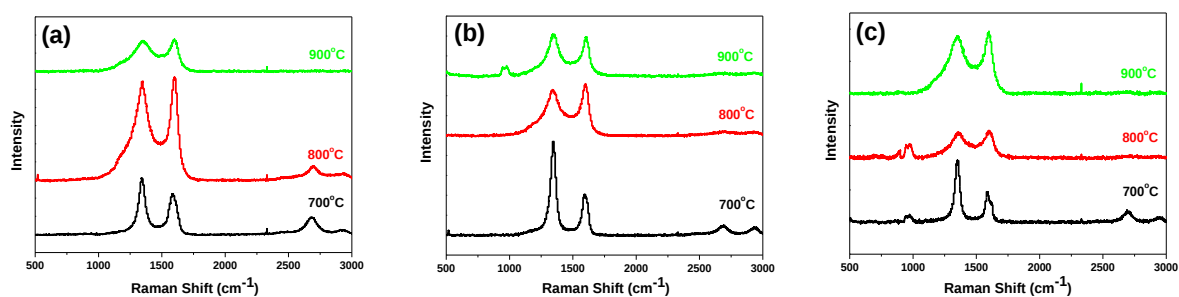
ได้สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนแผ่น Si ด้วยวิธี chemical vapor deposition (CVD) โดยเปรียบเทียบโลหะคตะลีส 3 ชนิดคือ Ni, Co และ Fe ภาพที่ 4.2 และภาพที่ 4.3 แสดงภาพถ่าย SEM และ TEM ของวัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์จากโลหะคตะลีสชนิดต่างๆตามลำดับ โดย (a), (b), (c) คือ วัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ด้วย Ni ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C ตามลำดับ (d), (e), (f) คือ วัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ด้วย Co ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C ตามลำดับ และ (h), (i), (j) คือวัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ด้วย Fe ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C ตามลำดับ ภาพที่ 4.4 รามานสเปกตรัมของวัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างกัน และสังเคราะห์จากโลหะคตะลีส (a) Ni, (b) Co และ (c) Fe ตารางที่ 4.2 สรุปข้อมูลลักษณะทางโครงสร้าง ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลาง และค่าความสมบูรณ์ของวัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่เงื่อนไขต่างๆ



ภาพที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์จากโลหะคตะลีสชนิดต่างๆ ได้แก่ Ni ที่ (a) 700, (b) 800, (c) 900 °C , Co ที่ (d) 700, (e) 800, (f) 900 °C และ Fe ที่ (g) 700, (h) 800, (j) 900 °C ตามลำดับ



ภาพที่ 4.3 ภาพถ่าย TEM ของวัสดุคาร์บอนที่สังเคราะห์จากโลหะคตะลีชนิดต่างๆ ได้แก่ Ni ที่ (a) 700, (b) 800, (c) 900 °C , Co ที่ (d) 700, (e) 800, (f) 900 °C และ Fe ที่ (g) 700, (h) 800, (j) 900 °C ตามลำดับ ภาพแทรกคือภาพ TEM ที่กำลังขยายต่ำ



ภาพที่ 4.4 รามานสเปกตรัมของวัสดุคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างกัน และสังเคราะห์จากโลหะคตะลี (a) Ni. (b) Co และ (c) Fe ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 สรุปข้อมูลลักษณะทางโครงสร้าง ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลาง และค่าความสมบูรณ์ของวัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ที่เงื่อนไขต่างๆ

Sample	Temp. (°C)	Time (sec)	CNFs	Bamboo	MWNTs	$\phi_{Av.}$ (nm)	I(G)/I(D)
Ni/Al/Cr	700	10	-	✓	✓	9.83	0.85
	700	20	-	✓	✓	9.35	0.73
	700	40	-	✓	✓	10.42	0.79
	800	20	-	-	✓	73.71	1.18
	900	20	✓	-	-	~ 470	1.05
Co/Al/Cr	700	20	✓	✓	✓	30.20	0.44
	800	20	✓	-	✓	22.72	1.13
	900	20	✓	-	✓	31.32	0.94
Fe/Al/Cr	700	20	-	-	✓	43.67	0.49
	800	20	✓	-	✓	31.48	1.07
	900	20	-	-	-	-	1.03

*CNF: Carbon nanofiber

Bamboo: Bamboo-like carbon nanotube

MWNT: multi-walled carbon nanotube

จากผลการทดลองข้างต้น พบว่าชนิดของคะตะลิสต์ อุณหภูมิ ทำให้วัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะต่างๆ กัน วัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ มีดังต่อไปนี้ คาร์บอนนาโนไฟเบอร์ (Carbon nanofibers; CNFs) ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes; MWNTs) และ Bamboo-like carbon nanotubes; BCNTs) สำหรับปัจจัยทางด้านชนิดของคะตะลิสต์ อุณหภูมิ ต่อโครงสร้างของวัสดุนาโนคาร์บอนนั้น จำเป็นต้องวิเคราะห์ในเชิงลึกต่อไป

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้เลือกเงื่อนไขโลหะคะตะลิส Ni อุณหภูมิ 700°C เป็นเงื่อนไขในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อนำมาใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการตรวจวัดก๊าซต่อไป

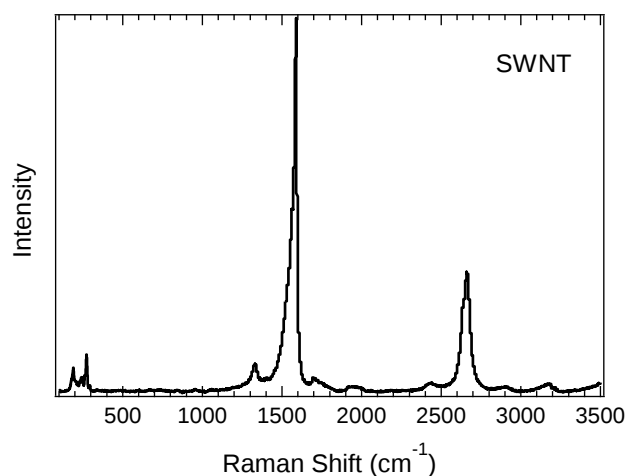
4.2.2 ท่อนาโนคาร์บอนจากสารละลายและนำไปเรียงตัวบน sensor platform

(dispersion)

ภาพที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายของแผ่น PCB หลังจากหยดสารละลายท่อนาโนคาร์บอนแล้ว
ภาพที่ 4.6 แสดงรามานสเปกตรัมของท่อนาโนคาร์บอนบนแผ่น PCB



ภาพที่ 4.5 ภาพถ่ายของแผ่น PCB หลังจากหยดสารละลายท่อนาโนคาร์บอน



ภาพที่ 4.6 รามานสเปกตรัมของท่อนาโนคาร์บอน

จากภาพที่ 4.5 ภาพถ่ายของแผ่น PCB หลังจากหยดสารละลายท่อนาโนคาร์บอนแล้วพบว่าแผ่น PCB จะมีสีดำจางๆ

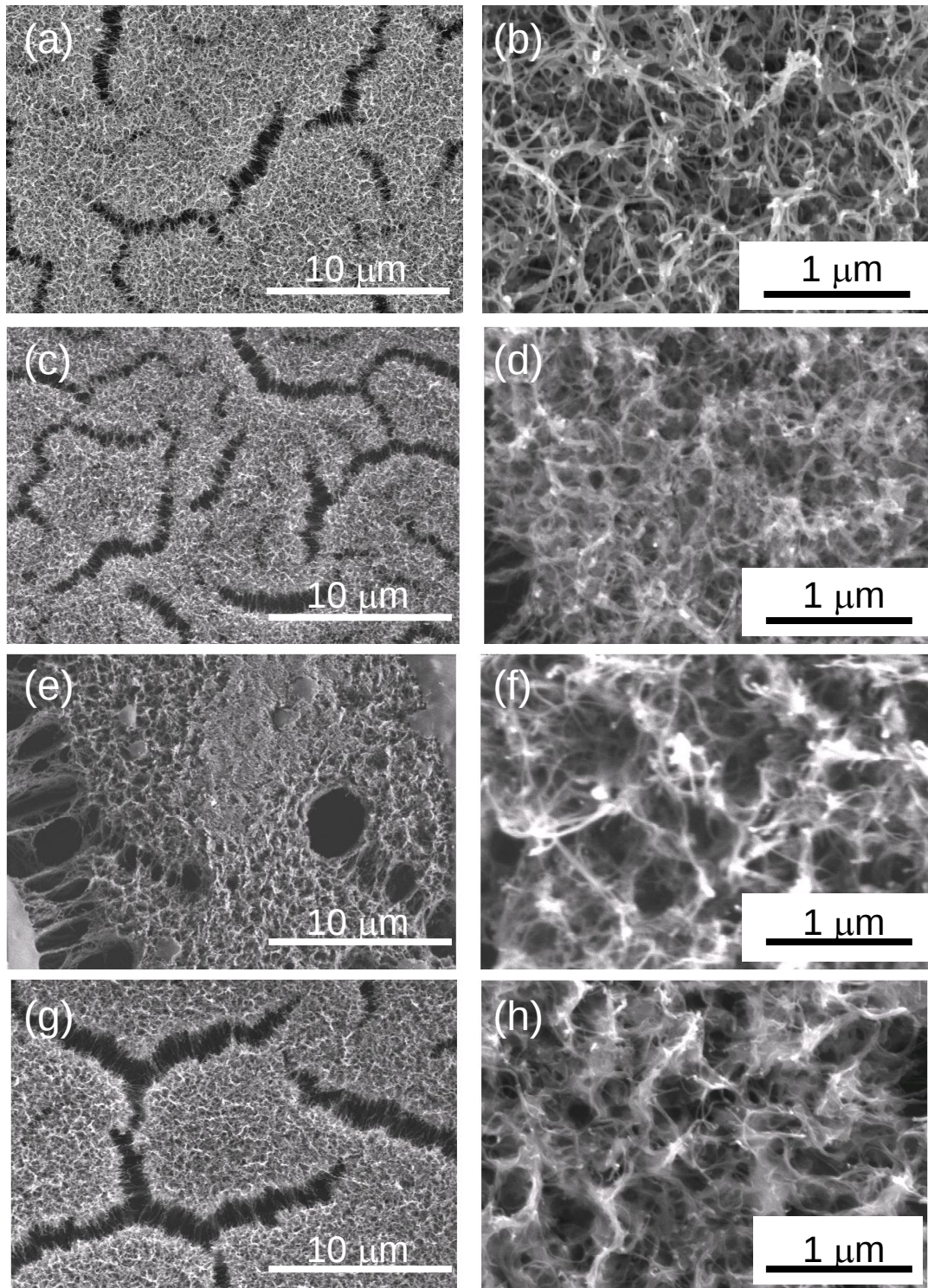
จากภาพที่ 4.6 รามานสเปกตรัม พบว่าพีกที่ประมาณ 1350 และ 1590 cm^{-1} และมี RBM peaks ที่ประมาณ $100 - 300\text{ cm}^{-1}$ แสดงให้เห็นว่ามีท่อนาโนคาร์บอนติดอยู่บนแผ่น PCB และท่อนาโนคาร์บอนนั้นคือ ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว (single-walled carbon nanotube; SWNT)

4.3 การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดที่เคลือบด้วยโพลิเมอร์และตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน (polymer/CNTs, nanoparticle/CNTs)

4.3.1 ท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ (Polymer/CNTs)

4.3.1.1 ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นสังเคราะห์บนแผ่น Si เคลือบด้วยพอลิเมอร์ (Polymer/MWNT/Si)

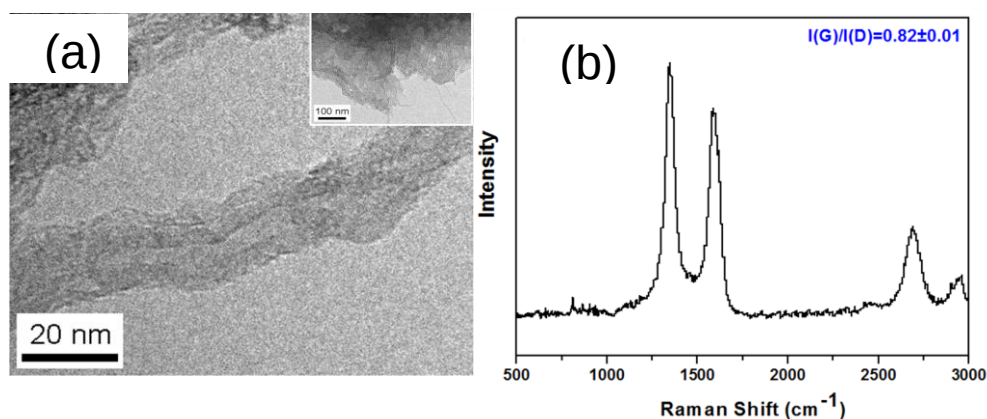
นำท่อนาโนคาร์บอนหลายผนัง (multi-walled carbon nanotube; MWNT) ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD ไปเคลือบด้วยพอลิเมอร์ ได้แก่ PMMA, PVA, PI และ Thiophene ภาพ 4.7 แสดงภาพถ่าย SEM ของ MWNT/Si ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ



ภาพที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของ MWNT/Si ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ(a), (b) PMMA, (c), (d) PVA, (e), (f) PI, และ (g), (h) Thiophene

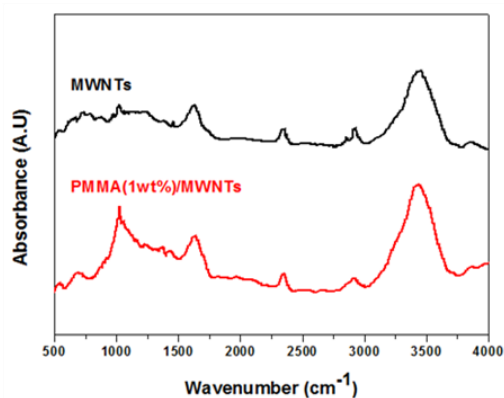
จากภาพถ่าย SEM จะเห็นว่ายังเห็นโครงสร้างลักษณะท่อของท่อนาโนคาร์บอนอยู่ จึงสันนิษฐานได้สองอย่างคือ (1) พอลิเมอร์แทรกเข้าไปตามช่องว่างระหว่างท่อนาโนคาร์บอน หรือ (2) พอลิเมอร์เคลือบบนท่อนาโนคาร์บอนด้วยความหนาที่บางมากๆ

นอกจากนี้ เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วย TEM แล้วยังเห็นโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนอยู่อย่างชัดเจน แสดงท่อนาโนคาร์บอนไม่ได้ถูกทำลายเนื่องจากการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ แต่ทั้งนี้ภาพจาก TEM ไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างชั้นของพอลิเมอร์ที่เคลือบบนท่อนาโนคาร์บอนได้ และจากผลรามานสเปกตรัมพบว่าหลังจากเคลือบด้วยพอลิเมอร์แล้ว พบพีคที่ประมาณ 1350 และ 1590 cm^{-1} แสดงว่าท่อนาโนคาร์บอนไม่ได้ถูกทำลายเนื่องจากการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามการศึกษาระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์มี interaction เกิดขึ้นหรือไม่นั้น จำเป็นต้องทำการศึกษาในเชิงลึกต่อไป ภาพที่ 4.8 แสดงตัวอย่างภาพ TEM และรามานสเปกตรัมของ PMMA/MWNTs



ภาพที่ 4.8 (a) ภาพถ่าย TEM และ (b) รามานสเปกตรัมของ MWNT/Si ที่เคลือบด้วย PMMA

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR เบื้องต้น ได้เลือก PMMA/MWNT/Si เพียงชนิดเดียวไปทำการวิเคราะห์ โดยภาพที่ 4.9 แสดง FTIR สเปกตรัมของ PMMA/MWNT/Si



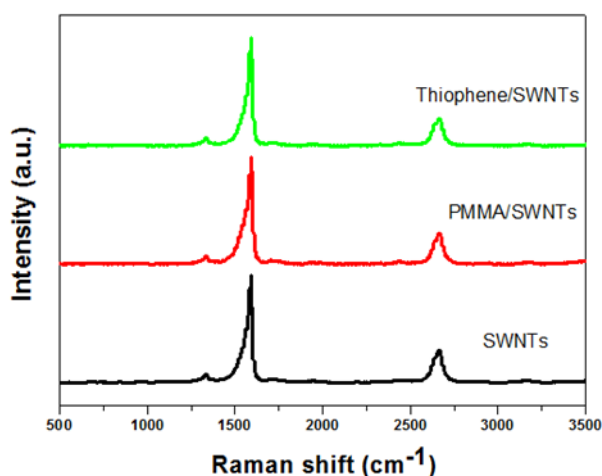
ภาพที่ 4.9 FTIR สเปกตรัมของท่อนาโนคาร์บอน (MWNTs) และท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบด้วย PMMA (PMMA/MWNTs)

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ของท่อนาโนคาร์บอนและท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบด้วย PMMA 1wt% พบว่าสเปกตรัมของท่อนาโนคาร์บอนก่อนและหลังเคลือบด้วย PMMA นั้น มีลักษณะของพีคที่ไม่แตกต่างกัน จากผลดังกล่าวคาดว่าจะมีสาเหตุมาจาก (1) วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ลงบนท่อนาโนคาร์บอน ด้วยวิธีที่กล่าวไว้ในส่วนของการทดลองข้างต้น ไม่สามารถทำให้ท่อนาโนคาร์บอนและ PMMA เกิดการสร้างพันธะระหว่างกัน จึงทำให้ไม่พบว่ามีพีคใหม่เกิดขึ้น (2) เกิดจากการเตรียมตัวอย่างที่นำไปวิเคราะห์ เนื่องจากการเตรียม PMMA ลงบนท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี spin coating นั้น เป็นไปได้ว่า PMMA ส่วนใหญ่ได้เคลือบลงเฉพาะบริเวณด้านบนของท่อนาโนคาร์บอนที่เตรียมลงบนแผ่นซิลิกอนเท่านั้น และเมื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วย FTIR ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ จะใช้ปริมาณตัวอย่างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อาจจะเป็นไปได้ว่าตัวอย่างที่ถูกนำไปวิเคราะห์ เป็นกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้มี PMMA เคลือบลงบนท่อนาโนคาร์บอน

4.3.1.2 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวบนแผ่น PCB เคลือบด้วยพอลิเมอร์ (Polymer/SWNT/PCB)

ภาพถ่าย SEM ของ SWNT/Si ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ นั้นไม่สามารถบันทึกได้ เนื่องมาจากเกิดการ charge up เป็นอย่างมากที่พื้นผิวของแผ่น PCB ซึ่งเป็นฉนวน ดังนั้นจึงไม่มีข้อมูลมาแสดงในรายงาน อย่างไรก็ตามวิธีการปรับปรุงแก้ไขในอนาคตคือสำหรับภาพถ่าย SEM จะเตรียมท่อนาโนคาร์บอนบนแผ่นนำไฟฟ้าแล้วจึงนำไปวิเคราะห์ หรือการลองใช้ท่อทองหรือแพลตินัมด้วยความหนาที่หนาขึ้น

ภาพที่ 4.10 แสดงตัวอย่างรามานสเปกตรัมของ SWNT/PCB ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ PMMA, Thiophene เทียบกับ SWNT



ภาพที่ 4.10 รามานสเปกตรัมของ SWNT/PCB ที่เคลือบด้วย PMMA, Thiophene เทียบกับ SWNT

ผลจากการวิเคราะห์ พบว่ารามานสเปกตรัมมีพีคที่ประมาณ 1350 และ 1590 cm^{-1} และมี RBM peaks ที่ประมาณ 100 -300 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่ามีท่อนาโนคาร์บอนยังติดอยู่บนแผ่น PCB และท่อนาโน

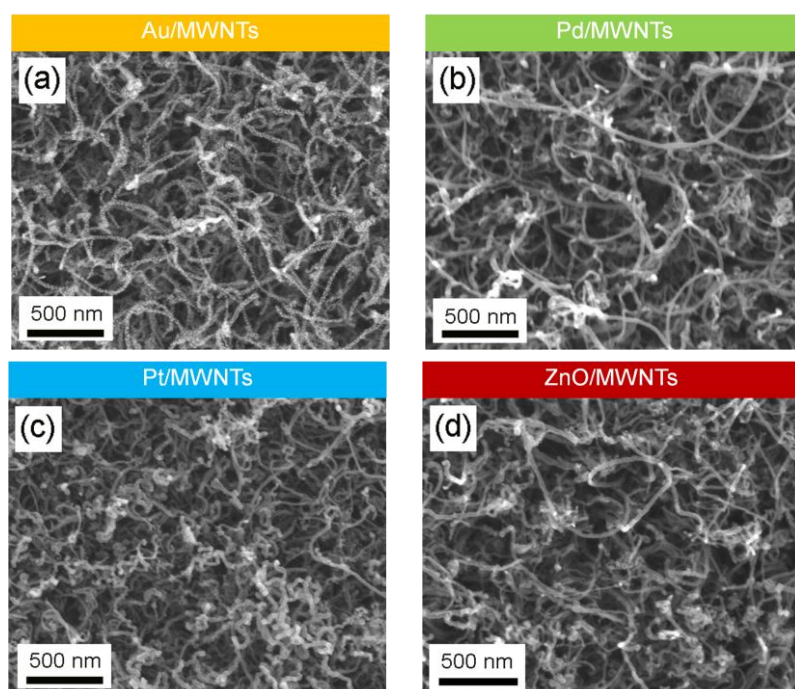
คาร์บอนไม่ได้ถูกทำลายเนื่องจากการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามการศึกษาว่าระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์มี interaction เกิดขึ้นหรือไม่นั้น จำเป็นต้องทำการศึกษาในเชิงลึกต่อไป

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR เบื้องต้น ได้เลือก PMMA/SWNT/PCB เพียงชนิดเดียวไปทำการวิเคราะห์ เช่นเดียวกับกรณีของ PMMA/MWNT นั่นคือ สเปกตรัมของท่อนาโนคาร์บอนก่อนและหลังเคลือบด้วย PMMA นั้น มีลักษณะของพีคที่ไม่แตกต่างกัน จากผลดังกล่าวคาดว่าจะมีสาเหตุมาจากวิธีการเตรียมพอลิเมอร์ลงบนท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการ spin coating ซึ่งไม่สามารถทำให้ท่อนาโนคาร์บอนและ PMMA เกิดการสร้างพันธะระหว่างกัน จึงทำให้ไม่พบว่ามีพีคใหม่เกิดขึ้น

4.3.2 ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน (Nanoparticle/CNTs)

4.3.2.1 ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นสังเคราะห์บนแผ่น Si ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน (Nanoparticle/MWNT/Si)

ภาพ 4.11 แสดงภาพถ่าย SEM ของ MWNT/Si ที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ (a) Au, (b) Pd, (c) Pt และ (d) ZnO ตามลำดับ

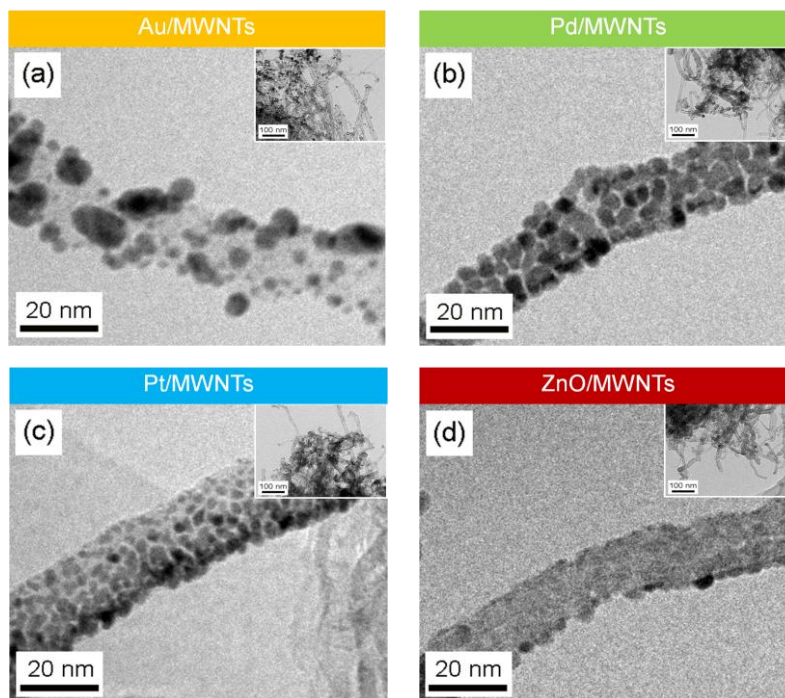


ภาพที่ 4.11 ภาพถ่าย SEM ของ MWNT/Si ที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ

(a) Au, (b) Pd, (c) Pt และ (d) ZnO ตามลำดับ

จากภาพ SEM จะเห็นว่าโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนหลังจากตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนแล้วยังคงลักษณะโครงสร้างท่อเช่นเดิม สำหรับ Au/MWNT จะสังเกตเห็นอนุภาคนาโนของ Au ติดอยู่ที่ผนังของ MWNT อย่างชัดเจนและอนุภาคนาโนของ Au เกาะติดอยู่อย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวของ MWNT

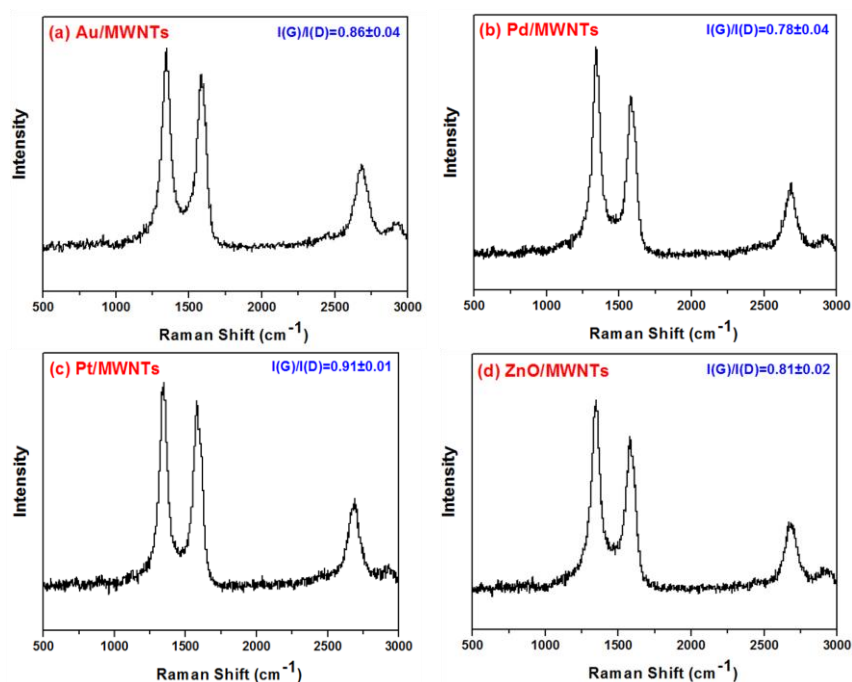
ภาพที่ 4.12 แสดงภาพถ่าย TEM ของ MWNT/Si ที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ (a) Au, (b) Pd, (c) Pt และ (d) ZnO ตามลำดับ



ภาพที่ 4.12 ภาพถ่าย TEM ของ MWNT/Si ที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ (a) Au, (b) Pd, (c) Pt และ (d) ZnO ตามลำดับ ภาพแทรกคือภาพ TEM ที่กำลังขยายต่ำ

จากภาพ TEM จะเห็นว่าโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนหลังจากตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนแล้วยังคงลักษณะโครงสร้างท่อเช่นเดิม และที่ผนังมีอนุภาคนาโนติดอยู่ พบว่าขนาดอนุภาคของ Pd, Pt มีขนาดที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ มีขนาดประมาณ 4.35 ± 1.07 nm และ 3.34 ± 1.07 nm ตามลำดับ ส่วนอนุภาค Au นั้นมีทั้งอนุภาคขนาดใหญ่ประมาณ 10 nm ปนกับอนุภาคเล็กขนาดระดับ 2-3 nm ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่สามารถสังเกตเห็นอนุภาคของ Au ได้อย่างชัดเจนจากภาพ SEM ส่วน ZnO นั้นเห็นไม่ชัดเท่ากับอนุภาคนาโนชนิดอื่นๆ เนื่องจากเกิดการ Charge up บนอนุภาคของ ZnO ขนาดอนุภาค ZnO ประมาณ 3.49 ± 0.07 nm

ภาพที่ 4.13 แสดงรามานสเปกตรัมของ SWNT/PCB ที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ (a) Au, (b) Pd, (c) Pt และ (d) ZnO ตามลำดับ

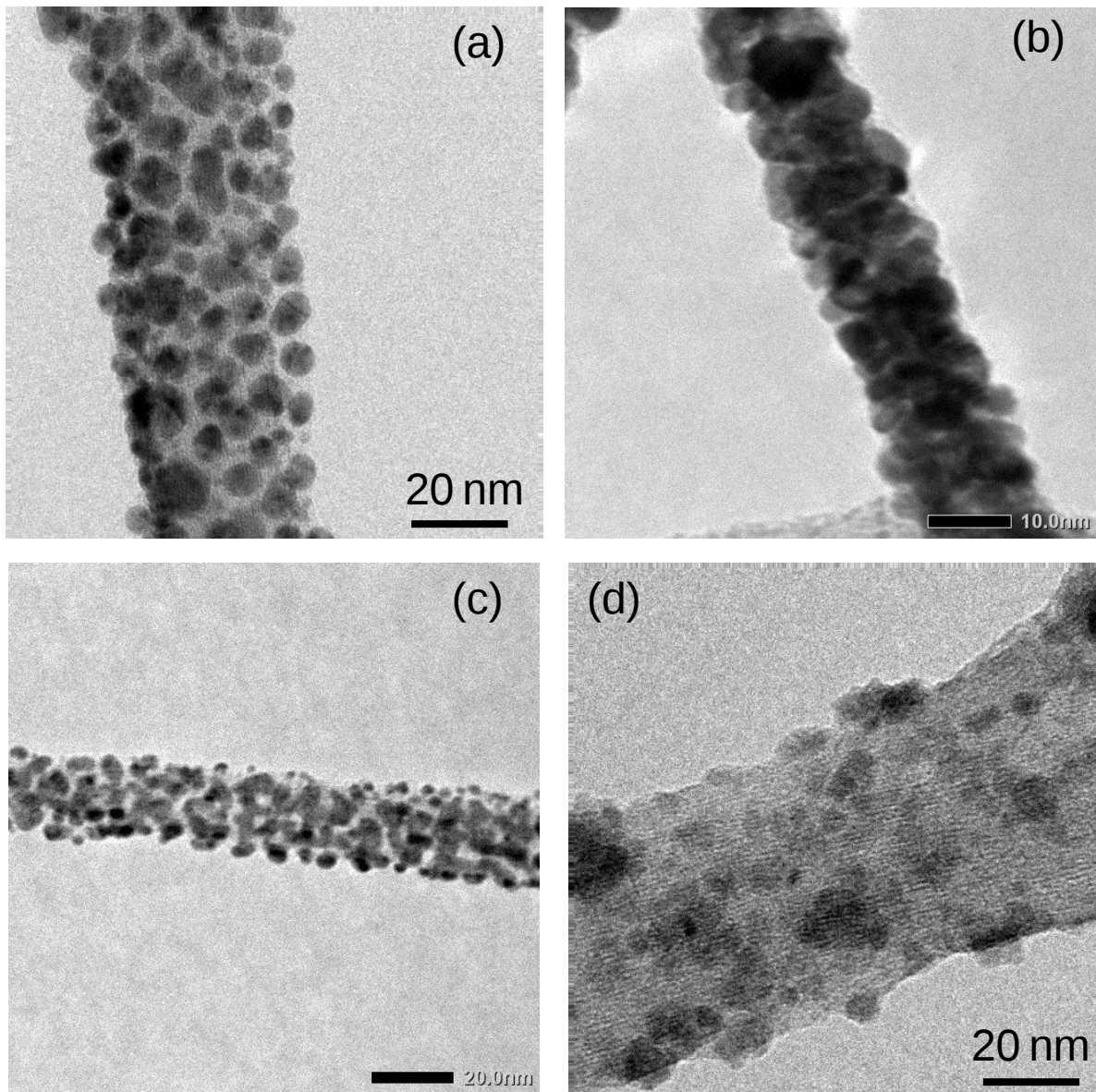


ภาพที่ 4.13 รามานสเปกตรัมของ MWNT/Si ที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ (a) Au, (b) Pd, (c) Pt และ (d) ZnO ตามลำดับ

ผลจากการวิเคราะห์ พบว่ารามานสเปกตรัมมีพีคที่ประมาณ 1350 และ 1590 cm^{-1} และมี RBM peaks ที่ประมาณ $100 - 300\text{ cm}^{-1}$ แสดงให้เห็นว่าท่อนาโนคาร์บอนไม่ได้ถูกทำลายเนื่องจากการตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน

4.3.2.2 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวบนแผ่น PCB ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน (Nanoparticle/SWNT/PCB)

ภาพ 4.14 แสดงภาพถ่าย TEM ของ SWNTi ที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ (a) Au, (b) Pd, (c) Pt และ (d) ZnO ตามลำดับ จากภาพ TEM จะเห็นว่าโครงสร้างของ SWNT หลังจากตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนแล้วยังคงลักษณะโครงสร้างท่อเช่นเดิม และที่ผนังมีอนุภาคนาโนติดอยู่ พบว่าขนาดอนุภาคของ Au, Pd, Pt มีขนาดที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ส่วน ZnO นั้นมีปริมาณอนุภาคที่เกาะบนผนัง SWNT น้อยกว่าอนุภาคนาโนชนิดอื่นๆ และอนุภาค ZnO นั้นเห็นไม่ชัดเท่ากับอนุภาคนาโนชนิดอื่นๆ เนื่องจากเกิดการ Charge up บนอนุภาคของ ZnO



ภาพที่ 4.14 ภาพ TEM ของ SWNT/PCB ที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน (a) Au, (b), Pd, (c) Pt และ (d) ZnO

4.3.3 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวบนแผ่น PCB เคลือบด้วยพอลิเมอร์และตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน(Polymer/Nanoparticle/SWNT/PCB)

ได้เตรียม PMMA/Au/SWNT, PMMA/Pd/SWNT และ PMMA/ZnO/SWNT

4.4 สมบัติการวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดแต่ละประเภท

เนื่องจากประสบปัญหาในการเตรียมฟิล์มโลหะคะตะลิสสำหรับท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี CVD ในการศึกษาคุณสมบัติการวัดก๊าซ จึงนำเฉพาะก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด SWNT/PCB มาใช้ทดสอบเพียงอย่างเดียว ได้แก่

(1) Polymer/SWNT: PMMA/SWNT, PVA/SWNT, PI/SWNT, Thiophene/SWNT

(2) Nanoparticle/SWNT: Au/SWNT, Pd/SWNT, Pt/SWNT, ZnO/SWNT

(3) polymer/nanoparticle/SWNT: PMMA/Au/SWNT, PMMA/Pd/SWNT, PMMA/ZnO/SWNT

จากผลการทดสอบเบื้องต้นพบว่า polymer/SWNT นั้นไม่เสถียร เมื่อนำมาทำการทดลองครั้งหนึ่งแล้ว เซนเซอร์ไม่สามารถฟื้นตัว ซึ่งถือเป็นหัวข้อที่ต้องทำการแก้ไขในอนาคต ในงานวิจัยนี้เพื่อทดสอบเบื้องต้นเกี่ยวกับคุณสมบัติการวัดก๊าซ จึงได้เตรียมก๊าซเซนเซอร์ไฮบริดแต่ละประเภทอย่างละ 3 ตัว เพื่อใช้ในการทดลอง

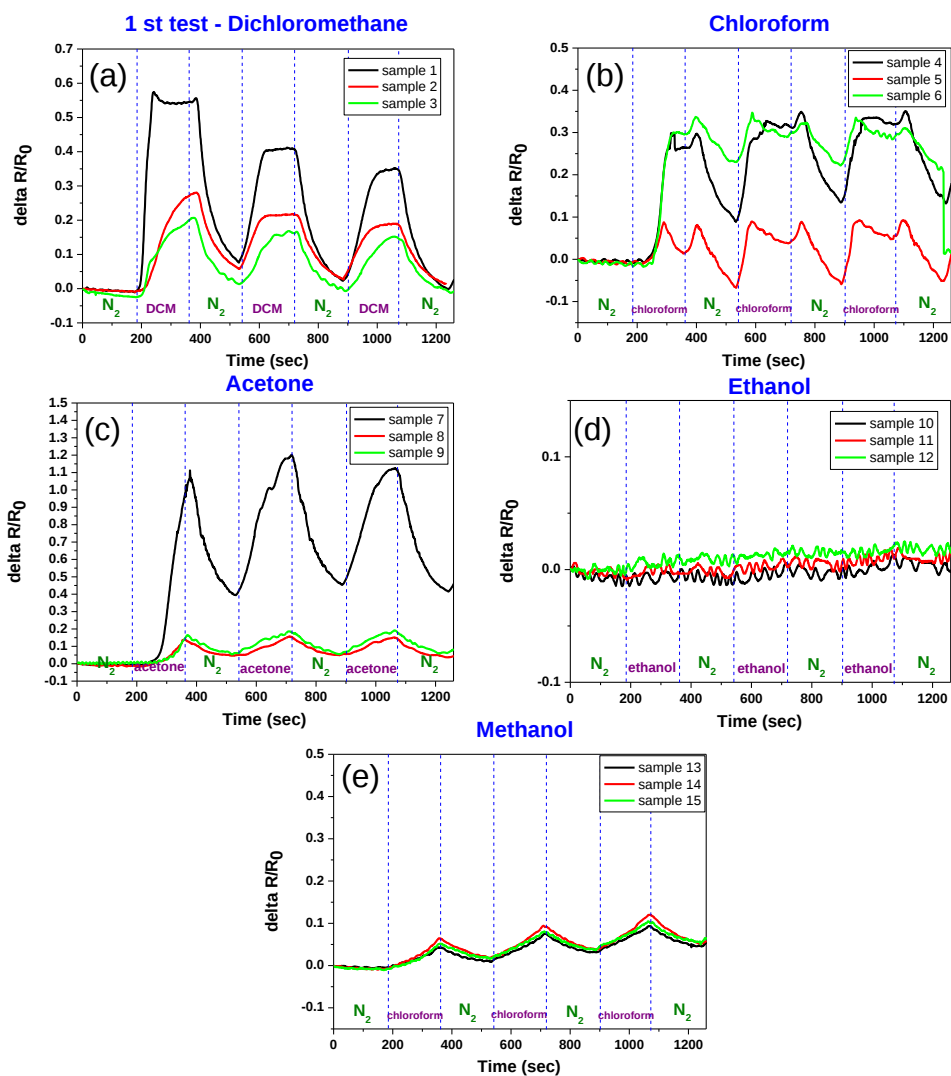
4.4.1 Sensor response ของ polymer/SWNT

ตารางที่ 4.3 แสดงตารางสรุปความเข้มข้นของไอระเหยในแต่ละการทดสอบ ภาพที่ 4.15 แสดง sensor response ของ PMMA/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response ต่อเวลา ใน 1 กราฟ แสดงค่า sensor response ของเซนเซอร์ 3 ตัว (sample1, 2, 3) ภาพที่ 4.16 แสดง sensor response ของ PVA/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response ต่อเวลา ภาพที่ 4.17 แสดง sensor response ของ PI/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response ต่อเวลา และภาพที่ 4.18 แสดง sensor response ของ Thiophene/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response ต่อเวลา

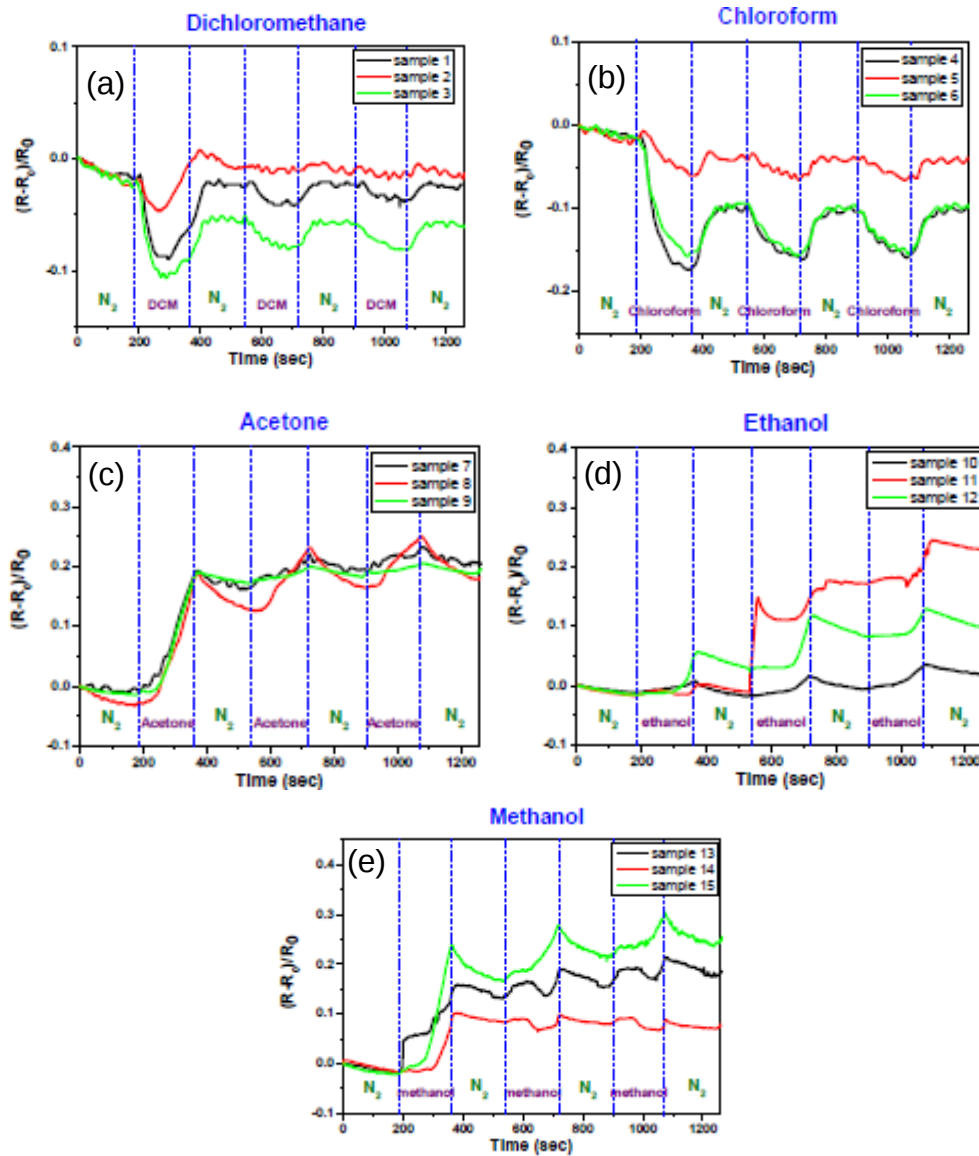
ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นของไอระเหยที่ใช้ในแต่ละการทดสอบ หน่วย ppm*

	PMMA/SWNT	PVA/SWNT	PI/SWNT	Thiophene/SWNT
Dichloromethane	2038-2895	2315-2438	2298-2316	2057-2192
Chloroform	2004-2102	2221-2328	2232-2270	1988-2264
Acetone	1102-1301	1075-1174	1176-1201	983-1155
Methanol	309-448	333-357	340-377	354-397
Ethanol	204-267	238-256	230-236	173-211

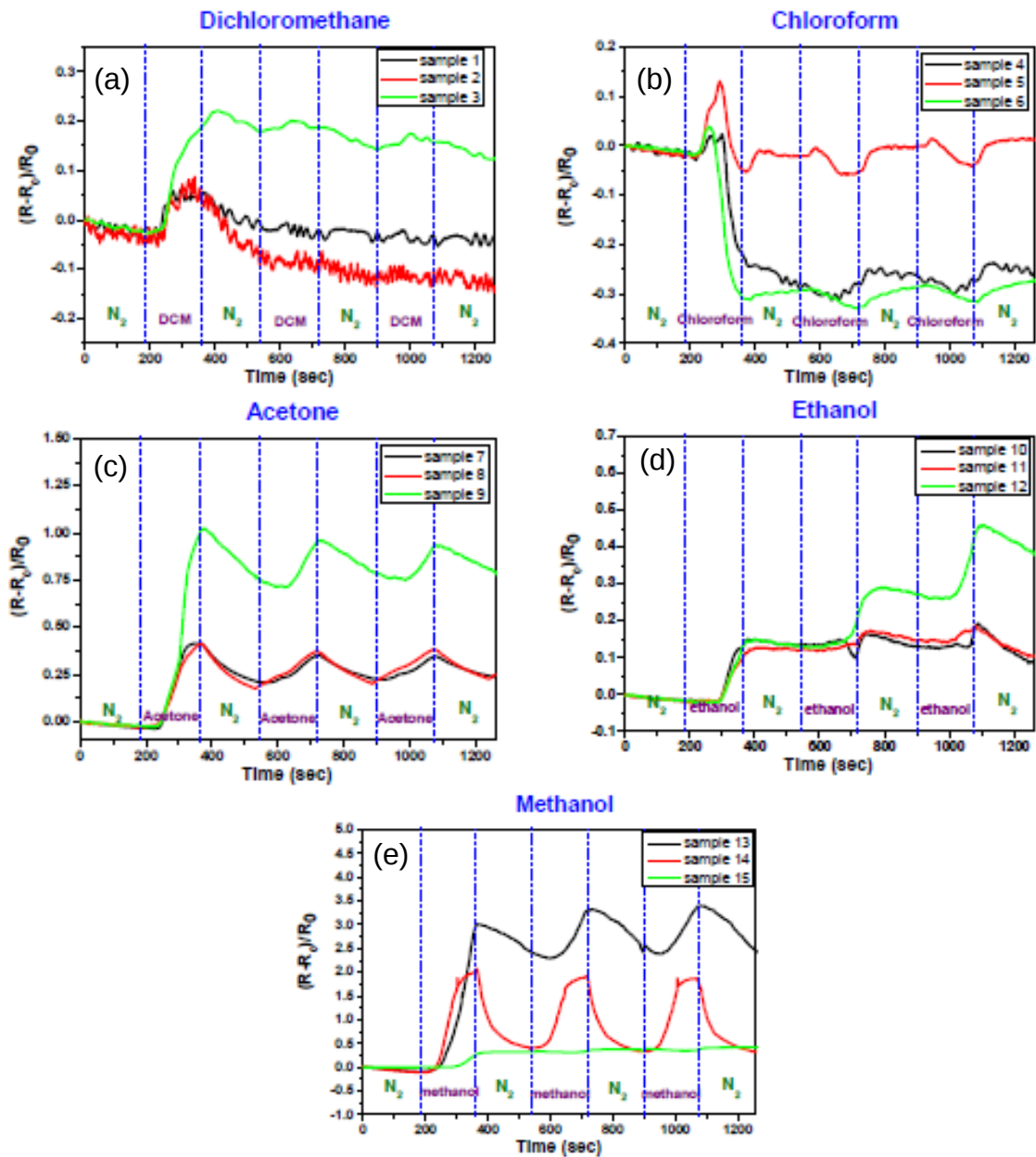
*ppm: parts per million



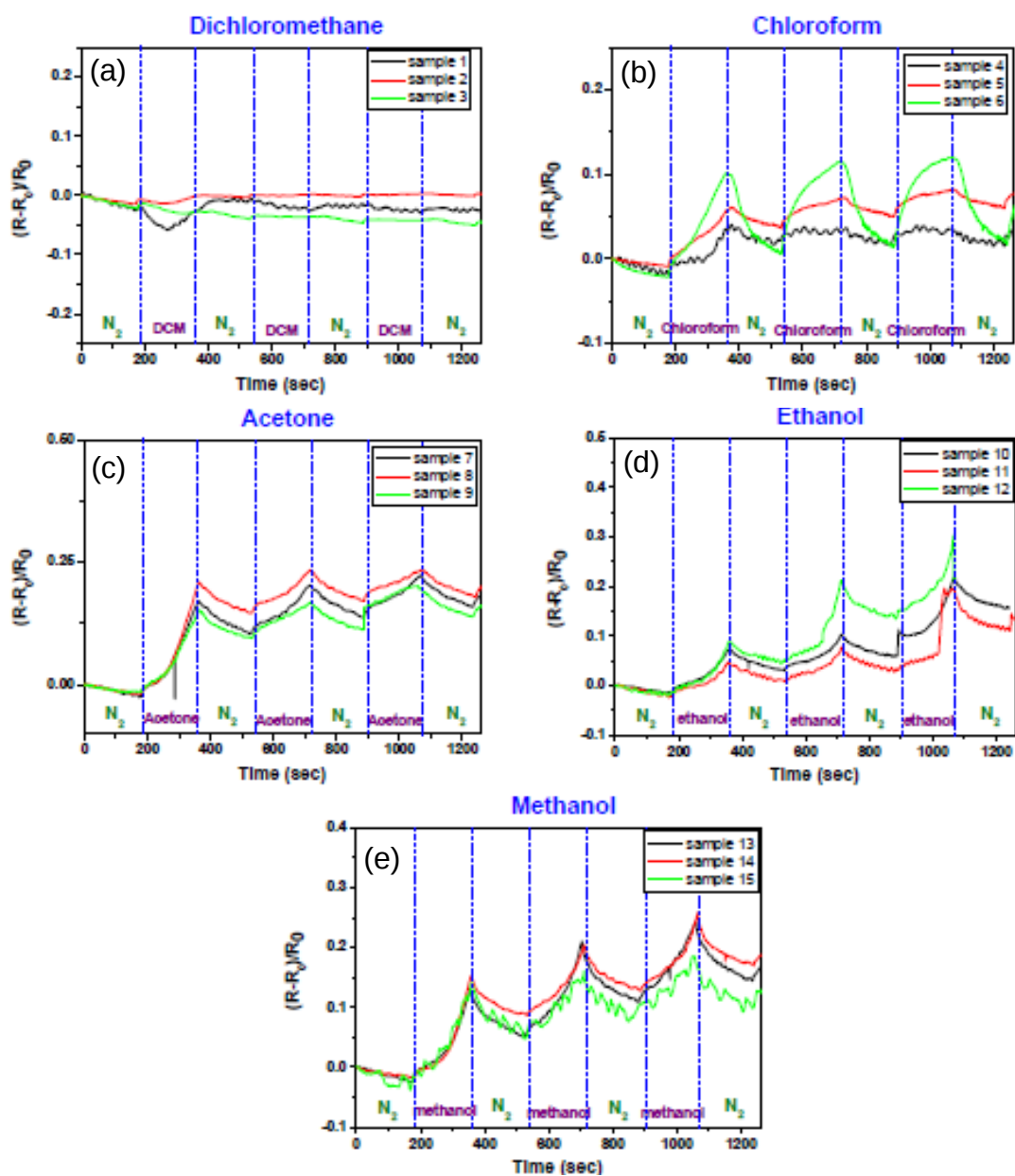
ภาพที่ 4.15 Sensor response ของ PMMA/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response เทียบกับเวลา (a) dichloromethane, (b) chloroform, (c) acetone, (d) ethanol และ (e) methanol



ภาพที่ 4.16 Sensor response ของ PVA/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response เทียบกับเวลา (a) dichloromethane, (b) chloroform, (c) acetone, (d) ethanol และ (e) methanol

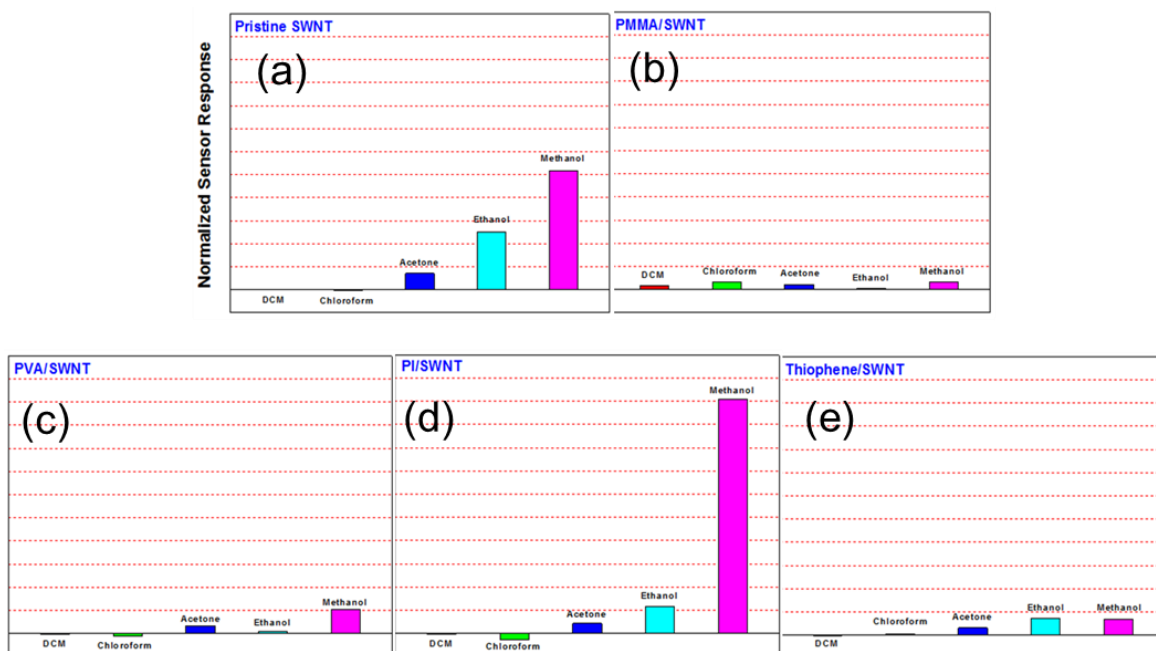


ภาพที่ 4.17 Sensor response ของ PI/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response เทียบกับเวลา (a) dichloromethane, (b) chloroform, (c) acetone, (d) ethanol และ (e) methanol



ภาพที่ 4.18 Sensor response ของ thiophene/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response เทียบกับเวลา (a) dichloromethane, (b) chloroform, (c) acetone, (d) ethanol และ (e) methanol

จากผลการทดลอง เมื่อเซนเซอร์สัมผัสกับไอระเหยแล้ว ค่าความต้านทานจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ปริมาณการเพิ่มขึ้นนั้นแล้วแต่ชนิดของเซนเซอร์และชนิดของไอระเหย และจะเห็นว่าเมื่อมีการเคลือบด้วยพอลิเมอร์แล้ว การตอบสนองต่อไอระเหยแต่ละชนิดเปลี่ยนไป แต่เนื่องจากในการทดลองไม่สามารถควบคุมความเข้มข้นของไอระเหยได้อย่างแม่นยำ จะเห็นว่าในการทดลองแต่ละครั้ง ความเข้มข้นของไอระเหยไม่เท่ากัน ดังสังเกตได้จากตารางที่ 4.3 ดังนั้นเพื่อจะเปรียบเทียบความสามารถในการตรวจวัดก๊าซแต่ละชนิด ได้ตั้งสมมติฐานว่า sensor response แปรผันตรงกับความเข้มข้นของก๊าซ ($\text{sensor response} \propto \text{concentration}$) ดังนั้นจึงได้ normalized ค่า sensor response แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน ภาพที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ polymer/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ



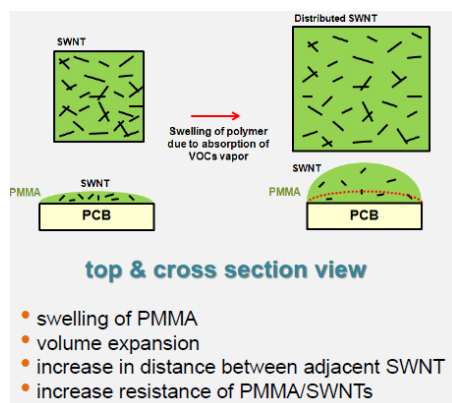
ภาพที่ 4.19 การเปรียบเทียบการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ polymer/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ
(a) SWNT, (b) pristine/SWNT, (c) PVA/SWNT, (d) Pt/SWNT and (e) thiophene/SWNT

จากภาพที่ 4.19 สามารถสรุปผลหลักๆได้ดังต่อไปนี้

- (1) การเคลือบด้วยพอลิเมอร์ทำให้การตอบสนองต่อก๊าซแต่ละชนิดเปลี่ยนไป
- (2) PMMA/SWNT ทำให้การตอบสนองต่อ dichloromethane และ chloroform ดีขึ้น
- (3) polymer/SWNT ทำให้การตอบสนองต่อ ethanol และ methanol ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ยกเว้นกรณี PI/SWNT ที่กระตุ้นการตอบสนองต่อ methanol เกือบ 1.5 เท่า

สำหรับ mechanism ในการตอบสนองต่อไอระเหยแต่ละชนิดนั้น ยังไม่ทราบชัดเจน แต่สันนิษฐานว่าการสัมผัสกับไอระเหยของก๊าซน่าจะมีผลทำให้พอลิเมอร์เกิดการขยายหรือการหดตัว ซึ่งจะมีผลทำให้การนำไฟฟ้านั้นดีขึ้นหรือลดลง ในขณะที่บางกรณีที่ไม่สามารถตอบสนองต่อไอระเหยได้นั้น อาจจะมีสาเหตุว่าชั้นพอลิเมอร์หนาเกินไป

สำหรับกรณี PMMA/SWNT หรือ PI/SWNT ที่มีการตอบสนองต่อไอระเหยดีขึ้นนั้น สันนิษฐานว่าเมื่อไอระเหยไปสัมผัสกับชั้นพอลิเมอร์แล้ว พอลิเมอร์เกิดการพองตัว ทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นห่างกันมากขึ้น นอกจากนี้ก็ทำให้ SWNT ที่ที่อยู่ใต้พอลิเมอร์ห่างกันเพิ่มมากขึ้นด้วย จึงทำให้ค่าความต้านทานของเซนเซอร์เพิ่มมากขึ้น และการตอบสนองเพิ่มมากขึ้น ภาพที่ 4.20 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ polymer/SWNT เมื่อสัมผัสกับไอระเหย



ภาพที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงของ polymer/SWNT เมื่อสัมผัสกับไอระเหย

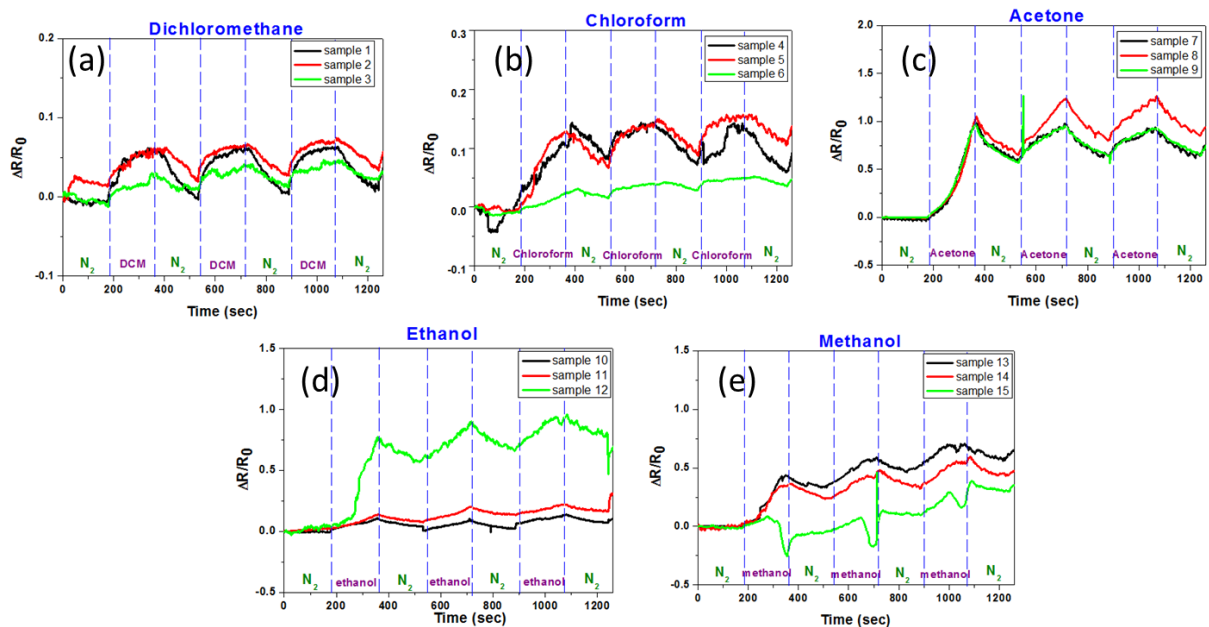
4.4.2 Sensor response of nanoparticle/SWNT

ตารางที่ 4.4 แสดงตารางสรุปความเข้มข้นของไอระเหยในแต่ละการทดสอบ ภาพที่ 4.21 แสดง sensor response ของ Au/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response ต่อเวลา ใน 1 กราฟ แสดงค่า sensor response ของเซนเซอร์ 3 ตัว (sample1, 2, 3) ภาพที่ 4.22 แสดง sensor response ของ Pd/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response ต่อเวลา ภาพที่ 4.23 แสดง sensor response ของ Pd/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response ต่อเวลา และภาพที่ 4.24 แสดง sensor response ของ ZnO/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response ต่อเวลา ภาพที่ 4.25 แสดงการเปรียบเทียบการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ nanoparticle/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ

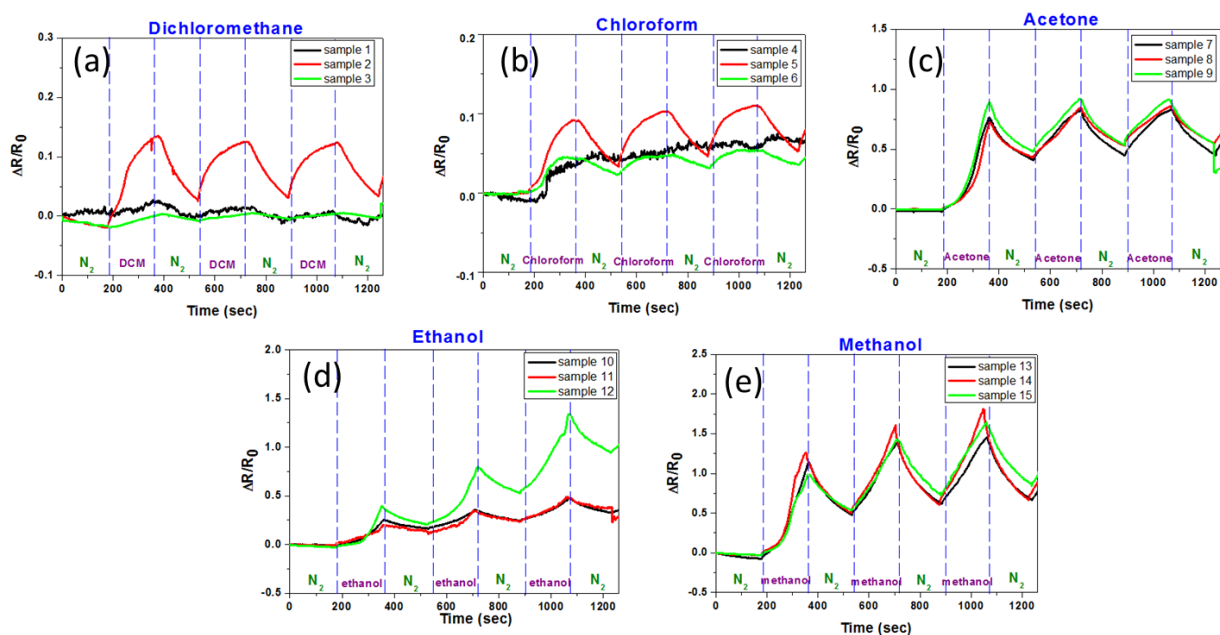
ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของไอระเหยที่ใช้ในแต่ละการทดสอบสำหรับ nanoparticle/SWNT หน่วย ppm*

	Au/SWNT	Pd/SWNT	Pt/SWNT	ZnO/SWNT
Dichloromethane	2194-2303	2001-2207	2001-2203	1663-2242
Chloroform	2198-2219	2126-2211	2160-2306	2153-2297
Acetone	1081-1227	1081-1101	1014-1080	1088-1165
Methanol	349-355	348-357	354-378	352-367
Ethanol	237-264	258-283	227-305	238-329

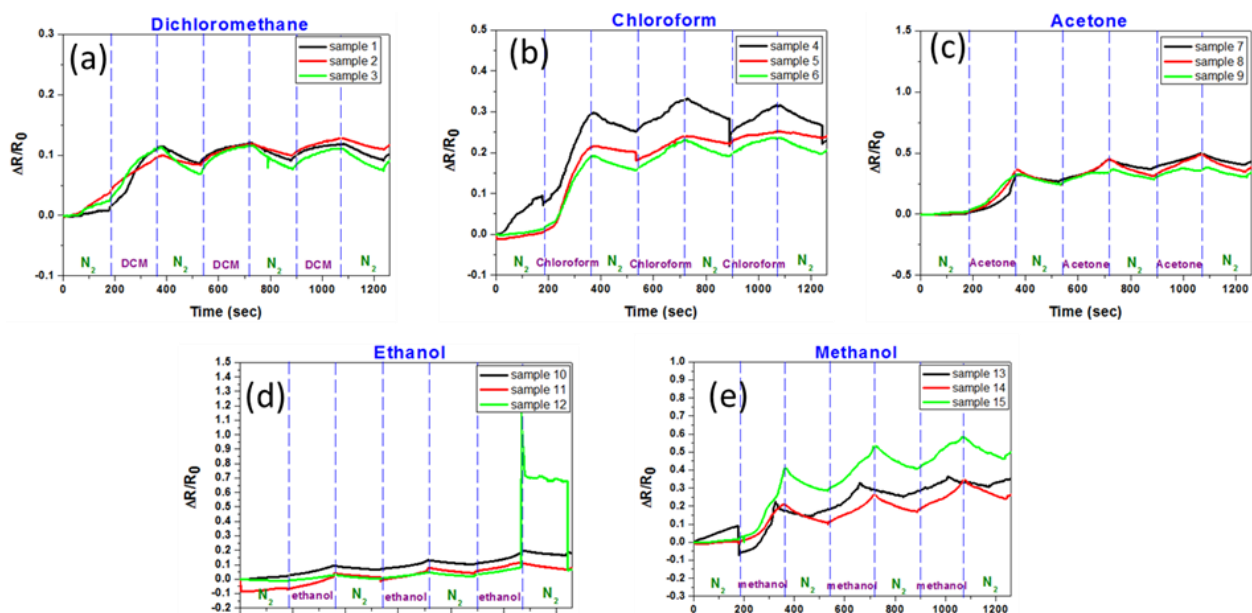
*ppm: parts per million



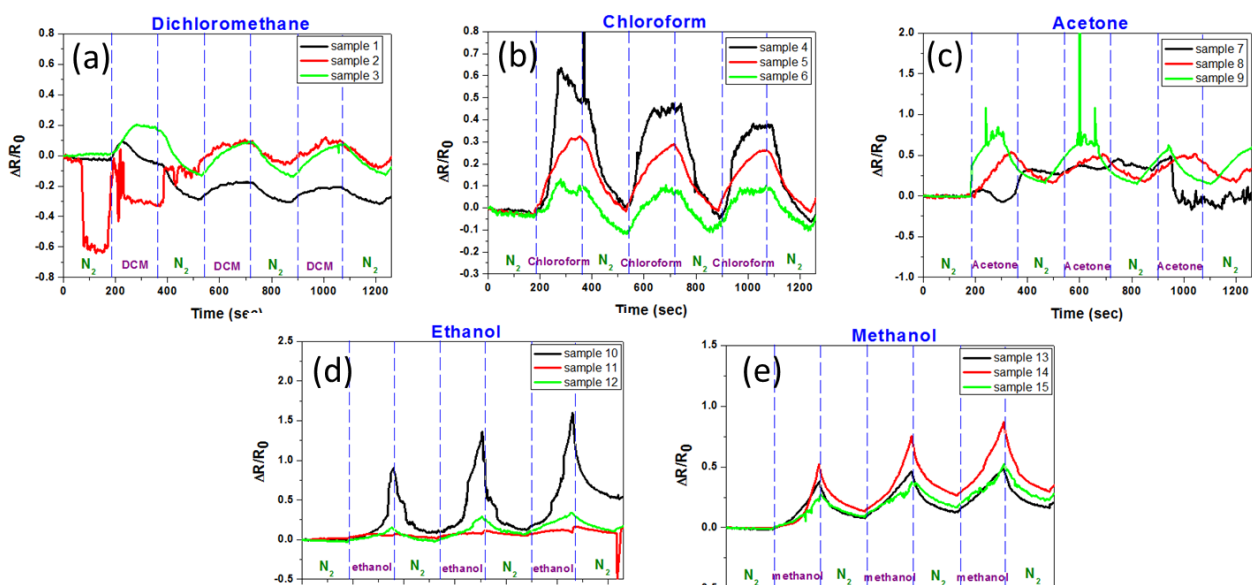
ภาพที่ 4.21 Sensor response ของ Au/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ (a) dichloromethane, (b) chloroform, (c) acetone, (d) ethanol และ (e) methanol



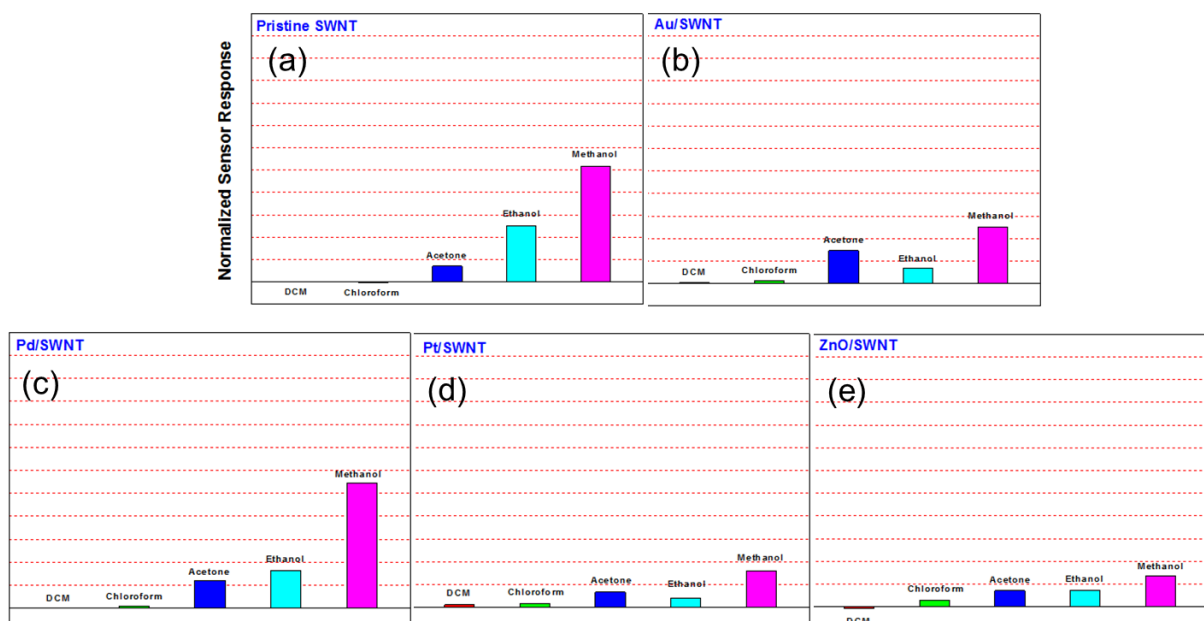
ภาพที่ 4.22 Sensor response ของ Pd/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ (a) dichloromethane, (b) chloroform, (c) acetone, (d) ethanol และ (e) methanol



ภาพที่ 4.23 Sensor response ของ Pt/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ (a) dichloromethane, (b) chloroform, (c) acetone, (d) ethanol และ (e) methanol



ภาพที่ 4.24 Sensor response ของ ZnO/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ (a) dichloromethane, (b) chloroform, (c) acetone, (d) ethanol และ (e) methanol



ภาพที่ 4.25 การเปรียบเทียบการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ nanoparticle/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ (a) SWNT, (b) pristine/SWNT, (c) PVA/SWNT, (d) Pt/SWNT and (e) thiophene/SWNT

จากผลการทดลอง เมื่อเซนเซอร์ nanoparticle/SWNT สัมผัสกับไอระเหยแล้ว ค่าความต้านทานจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกับกรณี polymer/SWNT ปริมาณการเพิ่มขึ้นนั้นแล้วแต่ชนิดของเซนเซอร์และชนิดของไอระเหย และจะเห็นว่าเมื่อมีการตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนแล้ว การตอบสนองต่อไอระเหยแต่ละชนิดเปลี่ยนไป แต่เนื่องจากการทดลองไม่สามารถควบคุมความเข้มข้นของไอระเหยได้อย่างแม่นยำ จะเห็นว่าในการทดลองแต่ละครั้ง ความเข้มข้นของไอระเหยไม่เท่ากัน ดังสังเกตได้จากตารางที่ 4.4 ดังนั้นเพื่อจะเปรียบเทียบความสามารถในการตรวจวัดก๊าซแต่ละชนิด ได้ตั้งสมมติฐานว่า sensor response แปรผันตรงกับความเข้มข้นของก๊าซ ($\text{sensor response} \propto \text{concentration}$) ดังนั้นจึงได้ normalized ค่า sensor response แล้วนำมาเปรียบเทียบกันเช่นเดียวกับกรณี polymer/SWNT ภาพที่ 4.25 แสดงการเปรียบเทียบการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ polymer/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างๆ

จากภาพที่ 4.25 สามารถสรุปผลหลักๆได้ดังต่อไปนี้

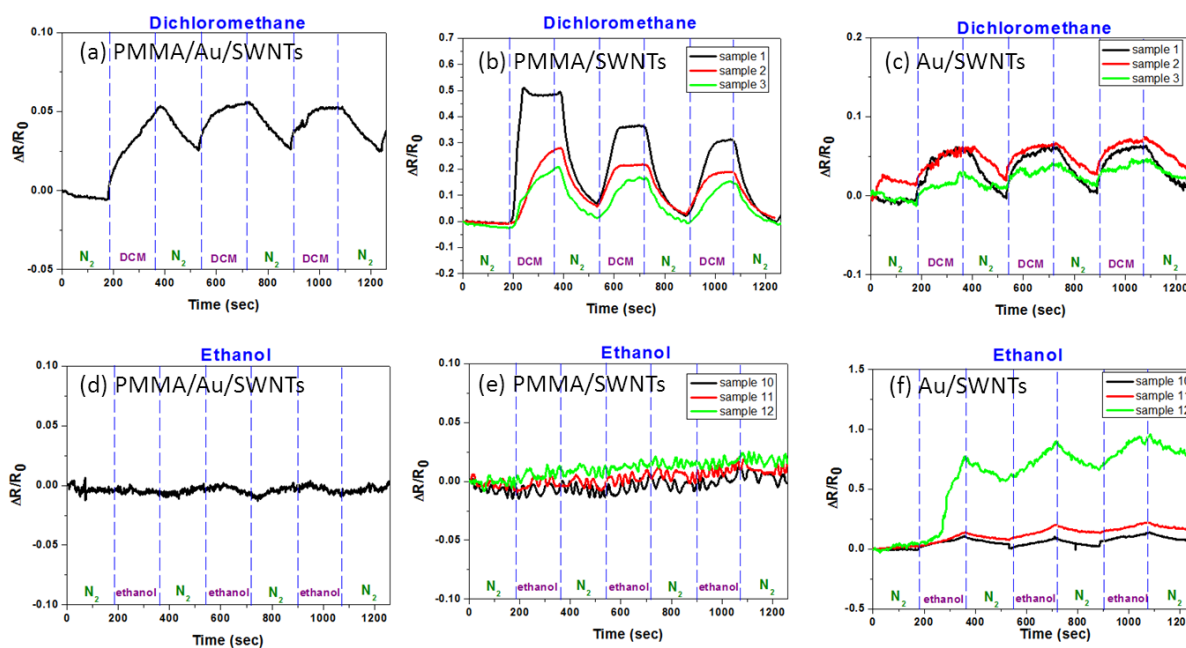
- (1) การตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนทำให้การตอบสนองต่อก๊าซแต่ละชนิดเปลี่ยนไป
- (2) Au/PMMA และ Pd/SWNT ทำให้การตอบสนองต่อ acetone ดีขึ้น
- (3) ในขณะที่ SWNT, Pt/SWNT, ZnO/SWNT สามารถตอบสนองต่อ methanol, ethanol, acetone ได้ดีตามลำดับนั้น Au/SWNT, Pt/SWNT สามารถตอบสนองต่อ methanol, acetone, ethanol ได้ดีตามลำดับ

4.4.3 Sensor response of polymer/nanoparticle/SWNT

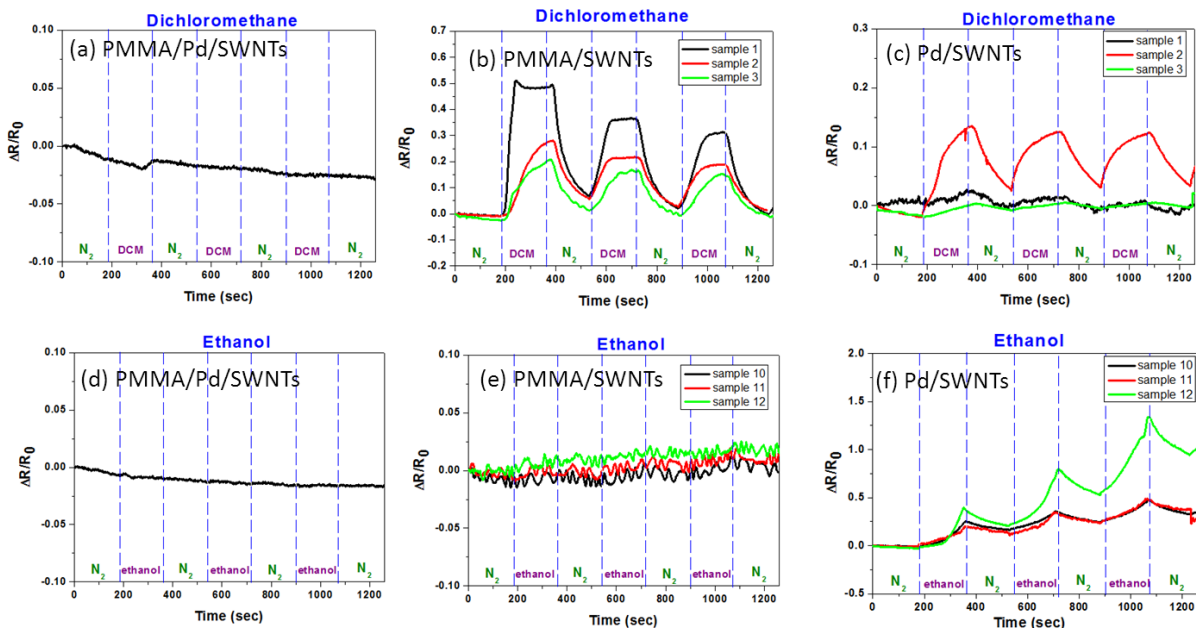
จากผลการทดสอบของ polymer/SWNT และ nanoparticle/SWNT ได้เลือก PMMA และ Au, Pd, ZnO มาใช้สำหรับเตรียมท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด โดยได้เตรียม PMMA/Au/SWNT, PMMA/Pd/SWNT และ PMMA/ZnO/SWNT ตารางที่ 4.5 แสดงตารางสรุปความเข้มข้นของไอระเหยในแต่ละการทดสอบ ภาพที่ 4.26 แสดง sensor response ของ PMMA/Au/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response ต่อเวลา ภาพที่ 4.27 แสดง sensor response PMMA/Pd/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response ต่อเวลา ภาพที่ 4.28 แสดง sensor response ของ PMMA/ZnO/SWNT ต่อไอระเหยชนิดต่างในรูปของ sensor response ต่อเวลา

ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นของไอระเหยที่ใช้ในแต่ละการทดสอบสำหรับ polymer/nanoparticle/SWNT หน่วย ppm*

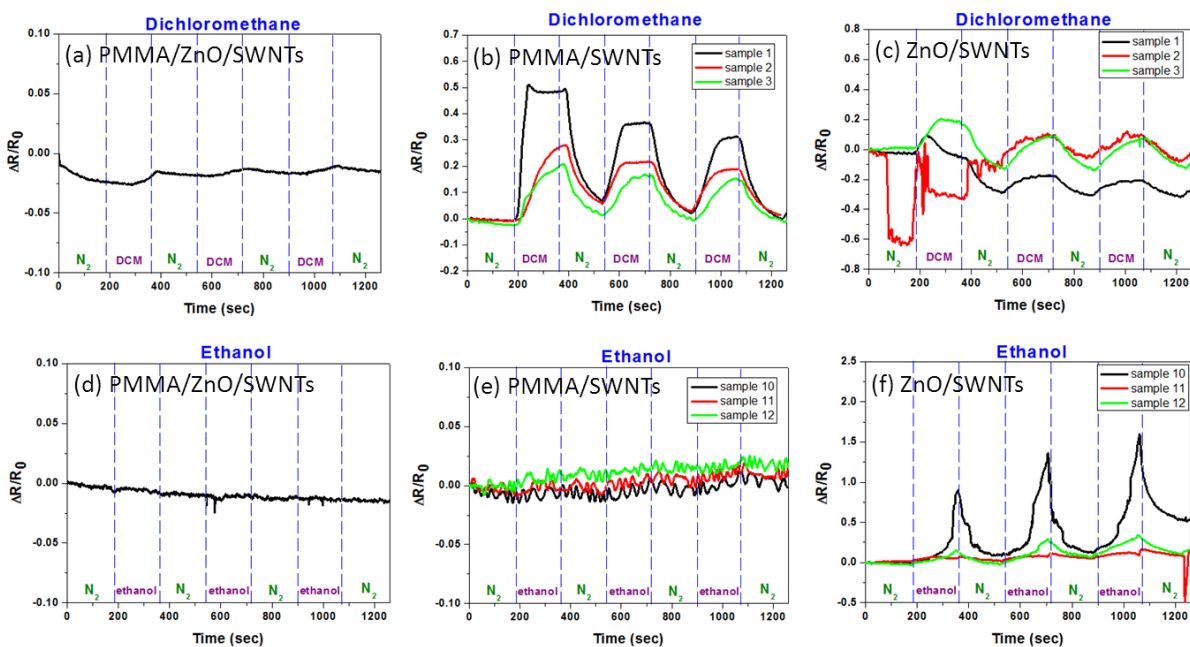
	PMMA/Au/SWNT	PMMA/Pd/SWNT	PMMA/ZnO/SWNT
Dichloromethane	2136	2276	2070
Ethanol	297	258	237



ภาพที่ 4.26 Sensor response ของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด (a), (d) PMMA/Au/SWNT ต่อไอระเหยของ Dichloromethane และ Ethanol (b), (e) PMMA/SWNTs และ(c),(f) Au/SWNTs



ภาพที่ 4.27 Sensor response ของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด (a), (d) PMMA/Pd/SWNT ต่อไอระเหยของ Dichloromethane และ Ethanol แสดงเทียบกับ (b) , (e) PMMA/SWNTs และ(c),(f) Pd/SWNTs



ภาพที่ 4.28 Sensor response ของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด (a), (d) PMMA/ZnO/SWNT ต่อไอระเหยของ Dichloromethane และ Ethanol แสดงเทียบกับ (b) , (e) PMMA/SWNTs และ(c),(f) ZnO/SWNTs

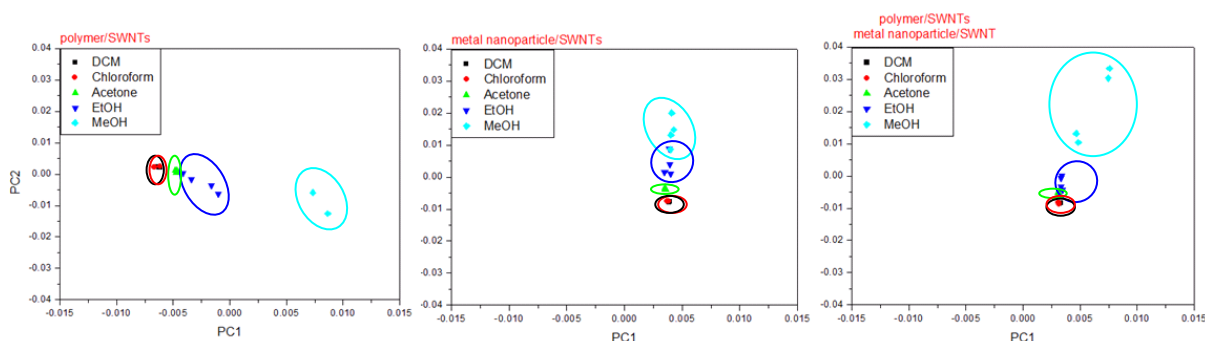
จากผลการทดลอง เมื่อเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด polymer/nanoparticle/SWNT มีการตอบสนองต่อก๊าซที่ต่ำลงเป็นอย่างมาก อาจมีสาเหตุมาจากชั้นพอลิเมอร์ที่หนาเกินไป ในการแก้ไขอาจลดความหนาของชั้นพอลิเมอร์ลง หรือลองเคลือบพอลิเมอร์ก่อนแล้วจึงตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน

4.5 การวิเคราะห์สมบัติการวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดแต่ละประเภท เพื่อหารูปแบบการตอบสนองต่อก๊าซแต่ละชนิด

นำข้อมูลการตอบสนองของก๊าซแต่ละชนิดมาวิเคราะห์เพื่อหารูปแบบการตอบสนองต่อก๊าซแต่ละชนิด เนื่องจากการในการทดลอง ไม่สามารถควบคุมความเข้มข้นของไอระเหยได้อย่างแม่นยำ ดังนั้น กราฟข้อมูลของ Sensor response ต่อเวลาของแต่ละเซนเซอร์ต่อการตอบสนองต่อก๊าซแต่ละชนิดนั้น จะเป็นค่าการตอบสนองต่อก๊าซที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ดังนั้นในการนำผลมาวิเคราะห์จำเป็นต้องตัดความผันผวนจากความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ข้อมูล Sensor response ที่นำมาวิเคราะห์จึงทำการ normalized ด้วยค่าความเข้มข้นของไอระเหยก่อน (sensor response/concentration)

นอกจากนี้ เนื่องจากเซนเซอร์แต่ละตัวมีความไม่เสถียร ไม่สามารถทำการทดลองซ้ำได้ ในเบื้องต้น จึงได้เตรียมก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดประเภทละ 3 ตัว และทำการวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อก๊าซ อย่างไรก็ดีตามพบว่า ยังมีความแตกต่างของ sensor response ระหว่างเซนเซอร์ ดังนั้นในการวิเคราะห์ด้วย PCA จึงได้เลือกข้อมูลเซนเซอร์ 2 ตัวที่มีลักษณะ sensor response คล้ายกันมาใช้ในการวิเคราะห์

ภาพที่ 4.29 แสดง Principal component analysis (PCA) score plot แสดงความแตกต่างของการตอบสนองของเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดต่อก๊าซชนิดต่างๆ (a) Polymer/SWNTs, (b) nanoparticle/SWNTs and (c) Polymer/SWNTs และ nanoparticle/SWNTs ตามลำดับ



ภาพที่ 4.29 Principal component analysis (PCA) score plot แสดงความแตกต่างของการตอบสนองของเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดต่อก๊าซชนิดต่างๆ (a) Polymer/SWNTs, (b) nanoparticle/SWNTs and (c) Polymer/SWNTs และ nanoparticle/SWNTs

จากข้อมูล PCA score plot จะเห็นว่าก๊าซท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดสามารถแยกแยะระหว่าง

Methanol, ethanol, acetone, dichloromethane ได้ แต่ระหว่าง dichloromethane และ chloroform นั้น ข้อมูลมีการซ้อนทับกันอยู่ อย่างไรก็ตามในอนาคตต้องมีการปรับปรุงขั้นตอนการเก็บข้อมูล และวิธีการเลือกข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ เพื่อให้ผลวิเคราะห์มีความถูกต้องมากขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

สำหรับงานวิจัยการพัฒนาระบบเฝ้าระวังมลพิษอากาศด้วยก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดได้ผลสรุปงานวิจัยดังต่อไปนี้

5.1.1 การออกแบบแผ่น sensor platform

มีทั้งแบบแผ่น Si และแผ่น PCB โดยทำขั้วไฟฟ้าเป็นรูปหวี (interdigitated) สำหรับแผ่น Si ใช้ Ti เป็นขั้วไฟฟ้าระยะห่างระหว่างขั้วประมาณ 50 μm ส่วนแผ่น PCB ใช้ Au/Cu เป็นขั้วไฟฟ้าโดยระยะห่างระหว่างขั้วประมาณ 250 μm

5.1.2 การเตรียมก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอน

สามารถเตรียมได้สองวิธี คือ การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube; CNT) ลงบน sensor platform โดยตรง (direct growth) และวิธี Dispersion ลงบน sensor platform ภายใต้อิทธิพลของงานวิจัยนี้ การสังเคราะห์ด้วยวิธี chemical vapor deposition (CVD) ได้ศึกษาปัจจัยของคะตะลิสต์และอุณหภูมิต่อลักษณะของ CNTs พบว่าในงานวิจัยนี้ โลหะคะตะลิสต์ Ni ภายใต้อุณหภูมิ 700C สามารถสังเคราะห์ CNTs ผนังหลายชั้น (multi-walled carbon nanotube) โดยในงานวิจัยนี้มีลักษณะของ CNTs 2 แบบคือ MWNT/Si ซึ่งได้จากการสังเคราะห์โดยตรงบนแผ่น Si และ SWNT/PCB ซึ่งได้จากการ dispersion สารละลายลงบนแผ่น PCB

5.1.3 การเตรียมท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์และตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน (polymer/CNTs, nanoparticle/CNTs)

พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ พอลิเมทิลเมทาอะคริเลต (poly(methyl methacrylate; PMMA) พอลิไวนิลอะซิเตต (polyvinyl acetate; PVA) พอลิอิมิด (polyimide; PI) และไทโอฟิน (thiophene) เคลือบพอลิเมอร์ลงบน CNTs ด้วยวิธี spin coating เซนเซอร์ที่เตรียมได้แก่ PMMA/CNT, PVA/CNT, PI/CNT, thiophen/CNT

สำหรับการตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน อนุภาคนาโนที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่ ทอง (Au) พาลาเดียม (Pd) แพลตินัม (Pt) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยการเตรียมอนุภาคนาโนของ Au, Pd และ Pt ลงบน CNTs ทำโดยใช้วิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนสุญญากาศ (Electron-beam evaporation) ที่ความหนา 5 nm ส่วนการเตรียมอนุภาคของ ZnO เตรียมโดยใช้วิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering) ที่ความหนา 5 nm เซนเซอร์ที่เตรียมได้แก่ Au/CNT, Pd/CNT, Pt/CNT, ZnO/CNT

สำหรับการเตรียม CNTs ไฮบริดที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์และตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนได้เลือก นำท่อนาโนที่ตกแต่งด้วยอนุภาคนาโน Au, Pd, ZnO เรียบร้อยแล้ว มาเคลือบด้วยพอลิเมอร์ PMMA ได้แก่ PMMA/Au/CNT, PMMA/Pd/CNT, PMMA/Pt/CNT, PMMA/ZnO/CNT

5.1.4 การศึกษาคุณสมบัติการวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดแต่ละประเภท

ทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดก๊าซกับไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ชนิดต่างๆ ได้แก่ ไดคลอโรมีเทน (dichloromethane; DCM) คลอโรฟอร์ม (Chloroform) อะซิโตน (Acetone) เอ

ทานอล (Ethanol) และเมทานอล (Methanol) นำเฉพาะก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด SWNT/PCB มาใช้ทดสอบเพียงอย่างเดียว

- (1) การเคลือบด้วยพอลิเมอร์หรืออนุภาคนาโนทำให้การตอบสนองต่อก๊าซแต่ละชนิดเปลี่ยนไป
- (2) PMMA/SWNT ทำให้การตอบสนองต่อ dichloromethane และ chloroform ดีขึ้น
- (3) polymer/SWNT ทำให้การตอบสนองต่อ ethanol และ methanol ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ยกเว้นกรณี PI/SWNT ที่กระตุ้นการตอบสนองต่อ methanol เกือบ 1.5 เท่า
- (4) Au/PMMA และ Pd/SWNT ทำให้การตอบสนองต่อ acetone ดีขึ้น
- (5) ในขณะที่ SWNT, Pt/SWNT, ZnO/SWNT สามารถตอบสนองต่อ methanol, ethanol, acetone ได้ดีตามลำดับนั้น Au/SWNT, Pt/SWNT สามารถตอบสนองต่อ methanol, acetone, ethanol ได้ดีตามลำดับ
- (6) polymer/nanoparticle/SWNT มีการตอบสนองต่อก๊าซที่ต่ำลงเป็นอย่างมาก

5.1.5 การวิเคราะห์สมบัติการวัดก๊าซของก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดแต่ละประเภท เพื่อหารูปแบบการตอบสนองต่อก๊าซแต่ละชนิด

ก๊าซท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดสามารถแยกแยะระหว่าง Methanol, ethanol, acetone, dichloromethane ได้ แต่ระหว่าง dichloromethane และ chloroform นั้น ข้อมูลมีการซ้อนทับกันอยู่

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยการพัฒนาระบบเฝ้าระวังมลพิษอากาศด้วยก๊าซเซนเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริด มีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

- 1) วิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดเป็นวิธีที่ง่ายและสามารถตอบสนองต่อไอระเหยบางชนิดได้ดีขึ้น แต่มีข้อเสียคือไม่เสถียร โดยเฉพาะอย่างยิ่ง polymer/CNTs ดังนั้นหากจะนำไปใช้งานจริงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติความเสถียรของเซนเซอร์ เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนยังไม่เสถียร ในงานวิจัยนี้จึงยังไม่สามารถนำไปวัดที่สภาพแวดล้อมจริงได้
- 2) เมื่อพิจารณาท่อนาโนคาร์บอนไฮบริดแบบ polymer/SWNT กับ nanoparticle/SWNT พบว่าสามารถกระตุ้นการตอบสนองต่อไอระเหยบางชนิดได้ ในขณะที่ polymer/nanoparticle/SWNT ทำให้การตอบสนองแยลงอย่างมาก ซึ่งขณะนี้ยังไม่ทราบกลไกการตอบสนองอย่างชัดเจน น่าศึกษาในเชิงลึกต่อไป
- 3) ควรมีการปรับปรุงระบบวัดก๊าซให้สามารถวัดก๊าซเซนเซอร์หลายๆตัวได้ภายในการทดลองเดียวกัน เพื่อให้สามารถควบคุมตัวแปรระหว่างเซนเซอร์แต่ละตัวได้ และประหยัดเวลาในการทดลอง
- 4) ผลการวิเคราะห์การจำแนกประเภทไอระเหยด้วยวิธี PCA นั้น ผลการแยกกลุ่มยังไม่ชัดเจนนัก ทั้งๆที่จากกราฟเปรียบเทียบ sensor response ของเซนเซอร์แต่ละตัวต่อไอระเหยแล้ว มีรูปแบบที่แตกต่างกัน ต้องมีการปรับปรุงขั้นตอนการเก็บข้อมูล และวิธีการเลือกข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ เพื่อให้ผลวิเคราะห์มีความถูกต้องมากขึ้น

บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง

- 1) มาตรฐานคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ
http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_airsnd01.html
- 2) D. Zhang, Z. Liu, C. Li, T. Tang, X. Liu, S. Han, B. Lei and C. Zhou: *Nano Lett.* **4** (2004) 1919.
- 3) J. Kong, N. R. Franklin, C. Zhou, M. G. Chapline, S. Peng, K. Cho and H. Dai: *Science* **287** (2000) 622.
- 4) P. G. Collins, M. S. Arnold and Ph. Avouris: *Science* **292** (2001) 706.
- 5) P. Qi, O. Vermesh, M. Grecu, A. Javey, Q. Wang and H. Dai: *Nano Lett.* **3** (2003) 347.
- 6) E. Bekyarova, M. Davis, T. Burch, M. E. Itkis, B. Zhao, S. Sunshine, R. C. Haddon: *J. Phys. Chem. B* **108** (2004) 19717.
- 7) Y. Li, H. C. Wang, M. J. Yang: *Sens. Actuators B* **121** (2007) 496.
- 8) T. Zhang, M. B. Nix, B. Y. Yoo, M. A. Deshusses, N. V. Myung: *Electroanalysis* **18** (2006) 1153.
- 9) J. Li, Y. Lu, Q. Ye, M. Cinke, J. Han and M. Meyyappan: *Nano Lett.* **3** (2003) 929.
- 10) J. Kong, M. G. Chapline and H. Dai: *Adv. Mater.* **13** (2001) 1384.
- 11) W. Wongwiriyan, S. Inoue, T. Ito, R. Shimazaki, T. Maekawa, K. Suzuki, H. Ishikawa, S. Honda, K. Oura and M. Katayama: *Appl. Phys. Express* **1** (2008) 014004.
- 12) A. Star, V. Joshi, S. Skarupo, D. Thomas, and J.-C. P. Gabriel: *J. Phys. Chem. B* **110** (2006) 21014.

ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับจากการทำโครงการวิจัย

การนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับชาติ

Worawut Muangrat, Supanit Porntheeraphat, Winadda Wongwiriyan, **Volatile Organic Compounds Sensors Based on Polymethylmethacrylate/Single Walled Carbon Nanotubes**, The 8th Annual Conference of the Thai Physics Society, 21-23 March 2013, Chaing Mai, Thailand (Poster presentation)

บทความวิจัย ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

(1) Worawut Muangrat, Supanit Porntheeraphat, Winadda Wongwiriyan, **Effect of Metal Catalysts on Synthesis of Carbon Nanomaterials by Alcohol Catalytic Chemical Vapor Deposition**, *Engineering Journal* (Submitted)

(2) Worawut Muangrat, Thanawee Chodjarusawad, Rungroj Maolanon, Supanit Porntheeraphat, Sirapat Pratontep and Winadda Wongwiriyan, **Polymer-coated single-walled carbon nanotubes for ethanol and dichloromethane discrimination** (in preparation)

รางวัลที่ได้รับจากผลงานวิจัย/ผลงานวิชาการอื่นๆ

Best Poster Presentation Award, The 8th Annual Conference of the Thai Physics Society, **Volatile Organic Compounds Sensors Based on Polymethylmethacrylate/Single Walled Carbon Nanotubes**, Worawut Muangrat, Supanit Porntheeraphat, Winadda Wongwiriyan

Volatile Organic Compounds Sensors Based on Polymethylmethacrylate/Single Walled Carbon Nanotubes

W. Muangrat^{1*}, S. Porntheeraphat², and W. Wongwiriyan^{1,3}

¹*College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand*

²*National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC), Phahonyothin Rd., Khlong Luang, Phathumthani, 12120 Thailand*

³*Nanotec-KMITL Center of Excellence on Nanoelectronic Device, Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand*

**Corresponding author. E-mail: m.worawut@hotmail.com*

Abstract

Sensor based on poly(methylmethacrylate) decorated single-walled carbon nanotubes (PMMA/SWNTs) was developed and applied for volatile organic compounds (VOCs) detection. For PMMA/SWNTs preparation, firstly SWNTs dispersed in 1,2-dichloroethane were dropped onto printed circuit board (PCB) substrate and PMMA (M_w 97000) was subsequently spin-coated on the pre-dropped SWNTs network with a spinning speed of 3000 rounds per minute. PCB substrate consists of interdigitated copper electrodes with a gap of 250 μm . PMMA/SWNTs exhibited fast and high response to dichloromethane, chloroform, acetone and methanol vapors with an increase in resistance while non-response to ethanol vapor. These results implied PMMA/SWNTs as a promising material for selectivity of VOCs detection.

Keywords: Volatile organic compounds, Sensor, Polymethylmethacrylate, Single-walled carbon nanotube

ENGINEERING JOURNAL

Article

Effect of Metal Catalysts on Synthesis of Carbon Nanomaterials by Alcohol Catalytic Chemical Vapor Deposition

Worawut Muangrat¹, Supanit Porntheeraphat², and Winadda Wongwiriyan^{1,3*}

¹ College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

² National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC), Khlong Luang, Phatumthani 12120, Thailand

³ Nanotec-KMITL Center of Excellence on Nanoelectronic Device, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
E-mail: w.winadda@gmail.com*

Abstract. Carbon nanomaterials (CNMs) were synthesized by alcohol catalytic chemical vapor deposition (CVD) at atmospheric pressure using different metal catalysts (Ni, Co and Fe) at growth temperature of 700°C. Ni and Fe exhibited as active catalysts for multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) growth, while Co acted as an active catalyst for bamboo-like MWNTs and carbon nanofibers (CNFs). The CNMs synthesized from Ni catalyst showed the highest crystallinity with a small amount of byproducts. These results imply that metal catalyst is key parameter to the structure, morphology and crystallinity of CNMs. The different effect of metal catalyst on growth of CNMs can be described in term of the difference in the change in Gibbs free energy for metal carbide formation.

Keywords: Carbon nanomaterials, multi-walled carbon nanotubes, carbon nanofibers, alcohol catalytic chemical vapor deposition

ENGINEERING JOURNAL Volume # Issue #

Received Date Month Year

Accepted Date Month Year

Published Date Month Year

Online at <http://www.engj.org/>

DOI:10.4186/ej.20xx.xx.x.xx

ENGINEERING JOURNAL Volume # Issue #, ISSN 0125-8281 (<http://www.engj.org/>)

1

Polymer-coated single-walled carbon nanotubes for ethanol and dichloromethane discrimination

Worawut Muangrat¹, Thanawee Chodjarusawad¹, Rungroj Maolanon², Supanit Porntheeraphat³, Sirapat Pratontep^{1,4} and Winadda Wongwiriyan^{1,4*}

¹*College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand*

²*National Nanotechnology Center, Khlong Luang, Phatumthani 12120 Thailand*

³*National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC), Khlong Luang, Phatumthani 12120 Thailand*

⁴*Nanotec-KMITL Center of Excellence on Nanoelectronic Device, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand*

ABSTRACT

Sensor response and pattern recognition of polymer-coated single-walled carbon nanotubes (SWNTs) were investigated. Printed circuit board (PCB) with Cu/Au interdigitated electrode was used as sensor platform. SWNT network was firstly formed on PCB by drop-casting. For polymer-coated SWNTs preparation, poly(methyl methacrylate) (PMMA) and thiophene were employed as polymers to coat on SWNTs by spin coating; PMMA/SWNTs and thiophene/SWNTs. Raman spectra showed no obvious structure changes of SWNT after polymer coating. Next, gas sensing test was conducted. Pristine SWNTs, PMMA/SWNTs and thiophene/SWNTs were exposed to vapors of ethanol and dichloromethane at room temperature. From normalized sensor response results, it was found that SWNT was highly sensitive to ethanol, while PMAA/SWNT was highly sensitive to dichloromethane. In order to discriminate vapors between ethanol and dichloromethane, pattern recognition technique was utilized.

KEYWORDS: single-walled carbon nanotubes; (poly)methylmethacrylate; thiophene; ethanol; dichloromethane; discrimination; pattern recognition

*Corresponding author. E-mail address: kwwinadd@kmitl.ac.th

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ประวัติส่วนตัว ชื่อ-สกุล นางสาว วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
Bachelor of Engineering	Electronic Engineering	Osaka University, ประเทศญี่ปุ่น	2546
Master of Engineering	Electronic Engineering	Osaka University, ประเทศญี่ปุ่น	2548
Doctor of Philosophy in Engineering	Electronic Engineering	Osaka University, ประเทศญี่ปุ่น	2551

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

Carbon nanomaterials, Thin Film Process, Surface Science, Transmission Electron Microscopy, Nanoelectronics, Chemical Sensors

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2549	1. Encouragement of Scientist (Development of gas sensor based on single-walled carbon nanotube thin film and its application for air pollution detection)	Japan society for the promotion of science
2550	2. The 29 th Japanese Journal of Applied Physics (JJAP) Young Scientist Award (Single-Walled Carbon Nanotube Thin-Film Sensor for Ultrasensitive Gas Detection)	Japanese Journal of Applied Physics
2554	3. รางวัลวิทยานิพนธ์ ระดับดีเด่น (Study on Electronic Properties of Single-Walled Carbon Nanotube and its Application to Gas Sensing Device)	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2554	4. Poster Presentation – First Prize (Material Science) (Transmission Electron Microscopy Study on Effect of NO ₂ Adsorption on Structure of Platinum-Decorated Single-Walled	The Microscopy Society of Thailand

	Carbon Nanotubes)	
2554	5. Micrograph Contest- Second Prize (Transmission Electron Microscopy)	The Microscopy Society of Thailand
2554	6. Micrograph Contest- Third Prize (Transmission Electron Microscopy)	The Microscopy Society of Thailand
2554	7.ทุนแลกเปลี่ยนคณาจารย์ระหว่างไทยกับออสเตรเลีย (ASEA-UNINET Staffs Exchange, One month Scholarship))	คณะกรรมการดำเนินงานทุนความร่วมมือระหว่างไทยกับออสเตรเลีย, คณะกรรมการอุดมศึกษา
2555	8. Micrograph Contest- First Prize (Transmission Electron Microscopy)	The Microscopy Society of Thailand
2555	9. Micrograph Contest- Second Prize (Transmission Electron Microscopy)	The Microscopy Society of Thailand
2555	10. รางวัลทุนช่วยเหลือทางด้านวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี	Thailand Toray Science Foundation
2555	11. Third Honor Poster Presentation Award “Facile Growth of Carbon Nanotubes on Stainless Steel Sheet” Dulyaseree P, Wongwiriyan W, Jarernboon W, Pankiew A, Porntheeraphat S, Ichikawa S, and Nukeaw J., The 7th Annual Conference of the Thai Physics Society (SPC2012), 9-12 พฤษภาคม 2555	Thai Physics Society
2556	12. Best Poster Presentation Award “Volatile Organic Compounds Sensors Based on Polymethylmethacrylate/Single-Walled Carbon Nanotubes”, Worawut Munagrat, Supanit Porntheerapat, Winadda Wongwiriyan	Thai Physics Society

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

Journals with impact factor	
1	Ikuno T, Katayama M, Yamauchi N, Wongwiriyan W , Honda S, Oura K, Hobara R, Hasegawa S, Selective Growth of Straight Carbon Nanotubes by Low-Pressure Thermal Chemical Vapor Deposition , <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i> , 2004, 43 , 860-863.
2	Hobara R, Yoshimoto S, Ikuno T, Katayama M, Yamauchi N, Wongwiriyan W , Honda S, Matsuda I, Hasegawa S, Oura K, Electronic transport in multiwalled carbon nanotubes contacted with patterned electrodes , <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i> , 2004, 43 , L1081-L1084.
3	Wongwiriyan W , Katayama M, Ikuno T, Yamauchi N, Mizuta T, Murakami T, Honda S, Oura K, Kisoda K, Harima H, Growth of Single-Walled Carbon Nanotubes Rooted from Fe/Al Catalyst Nanoparticle Array , <i>Jpn. J. Appl.</i>

	<i>Phys.</i> , 2005, 44 , 457-460.
4	Wongwiriya W , Honda SI, Konishi H, Mizuta T, Ikuno T, Ito T, Maekawa T, Suzuki K, Ishikawa H, Oura K, Katayama M, Single-Walled Carbon Nanotube Thin-Film Sensor for Ultrasensitive Gas Detection , <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i> , 2005, 44 , L482-L484.
5	Wongwiriya W , Honda S, Konishi H, Mizuta T, Ohmori T, Ito T, Maekawa T, Suzuki K, Ishikawa H, Murakami T, Kisoda K, Harima H, Oura K, Katayama M, Direct Growth of Single-Walled Carbon Nanotube Networks on Alumina Substrate: A Novel Route to Ultrasensitive Gas Sensor Fabrication , <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i> , 2005, 44 , 8227-8230.
6	Wongwiriya W , Honda S, Mizuta T, Ohmori T, Murakami T, Kisoda K, Harima H, Lee JG, Mori H, Oura K, Katayama M, Direct Growth of Single-Walled Carbon Nanotubes on W Tip Apex , <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i> , 2006, 45 , 1880-1882.
7	Wongwiriya W , Honda S, Konishi H, Mizuta T, Ikuno T, Ohmori T, Ito T, Shimazaki R, Maekawa T, Suzuki K, Ishikawa H, Oura K, Katayama M, Ultrasensitive Ozone Detection using Single-Walled Carbon Nanotube Networks , <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i> , 2006, 45 , 3669-3671.
8	Wongwiriya W , Honda S, Konishi H, Mizuta T, Ohmori T, Kishimoto Y, Ito T, Maekawa T, Suzuki K, Ishikawa H, Murakami T, Kisoda K, Harima H, Oura K, Katayama M, Influence of the Growth Morphology of Single-Walled Carbon Nanotubes on Gas Sensing Performance , <i>Nanotechnology</i> , 2006, 17 , 4424-4430.
9	Konishi H, Murata Y, Wongwiriya W , Kishida M, Tomita K, Motoyoshi K, Honda S, Katayama M, Yoshimoto S, Kubo K, Hobara R, Matsuda I, Hasegawa S, Yoshimura M, Lee JG, Mori H, High-yield Synthesis of Conductive Carbon Nanotube Tips for Multiprobe Scanning Tunneling Microscope , <i>Review of Scientific Instruments</i> , 2007, 78 , 013703 (1-3).
10	Wongwiriya W , Inoue S, Ito T, Shimazaki R, Maekawa T, Suzuki K, Ishikawa H, Honda S, Oura K, Katayama M, Highly Sensitive Detection of Carbon Monoxide at Room Temperature Using Platinum-Decorated Single-Walled Carbon Nanotubes , <i>Applied Physics Express</i> , 2008, 1 , 014004 (1-3).
11	Yoshihara K, Ishida K, Wongwiriya W , Inoue S, Okabayashi Y, Honda S, Nishimoto Y, Kuwahara Y, Oura K, Katayama M, Interaction with Single-Walled Carbon Nanotubes , <i>Applied Physics Express</i> , 2008, 1 , 094001 (1-3).
12	Wongwiriya W , Inoue S, Honda S, Katayama M, Adsorption Kinetics of NO₂ on Single-Walled Carbon Nanotube Thin-Film Sensor , <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i> , 2008, 47 , 8145-8147.
13	Inoue S, Suto H, Wongwiriya W , Kimura T, Murata Y, Honda S, Katayama M, Density of States of Single-Walled Carbon Nanotubes Grown on Metal Tip Apex , <i>Applied Physics Express</i> , 2009, 2 , 035005 (1-3).
14	Liu YF, Wongwiriya W , Park KC, Muramatsu H, Takeuchi K, Kim YA, Endo M, Combined Catalyst System for Preferential Growth of Few-Walled Carbon Nanotubes , <i>Carbon</i> , 2009, 47 , 2543-2546.
15	Jang IY, Lee SH, Park KC, Wongwiriya W , Kim C, Teshima K, Oishi S, Kim YJ, Endo M, Effect of photochemically oxidized carbon nanotubes on the deposition of platinum nanoparticles for fuel cell catalysts , <i>Electrochemistry Communication</i> , 2009, 11 , 1472-1475.
16	Fujishige M, Wongwiriya W , Wang F, Park KC, Takeuchi K, Arai S, Endo M, Au-Carbon Nanotube Composite Plating Deposited Using Non-Cyanide Bath , <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i> , 2009, 48 , 070217 (1-3).
17	Wongwiriya W , Inoue S, Okabayashi Y, Ito T, Shimazaki R, Maekawa T, Suzuki K, Ishikawa H, Honda S, Mori H, Oura K, Katayama M, Highly Stable and Sensitive Gas Sensor Based on Single-Walled Carbon Nanotubes Protected by Metal-Oxide Coating Layer , <i>Applied Physics Express</i> , 2009, 2 , 095008 (1-3).
18	Park KC, Jang IY, Wongwiriya W , Morimoto S, Kim YJ, Jung YC, Toya T, Endo M, Carbon-supported Pt-Ru nanoparticles prepared in glyoxylate-reduction system promoting precursor-support interaction , <i>JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY</i> , 2010, 20 , 5345-5354.
19	Wongwiriya W , Okabayashi Y, Minami S, Itabashi K, Ueda T, Shimazaki R, Ito T, Oura K, Honda S, Tabata H, Katayama M, Hydrogen sensing properties of protective-layer-coated single-walled carbon nanotubes with

	palladium nanoparticle decoration, <i>NANOTECHNOLOGY</i> , 2011, 22, 055501(1-5)
20	Itabashi K, Tabata H, Wongwiriyan W , Minami S, Matsushita K, Shimazaki R, Ueda T, Ito T and Katayama M, Ultraviolet photoresponse properties of single-walled carbon nanotubes decorated with thickness-controlled ZnO layer by pulsed laser deposition , <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i> , 2012, 43, 055104

Journals without impact factors	
1	Kas J K, Kasi A K, Wongwiriyan W , Afzulpurka N, Dulyaseree P, Hasan M and Tuantranont A, Synthesis of carbon Nanotube and carbon nanofiber in nanopore of anodic aluminum oxide template by chemical vapor deposition at atmospheric pressure , <i>Adv. Mater. Res.</i> (2012) 557-559, 544-549
2	Chamnan-Arsa S, Wongwiriyan W and Kansuwan P การสังเคราะห์โครงสร้างนาโนคาร์บอนบนนิเกิลจากแอลกอฮอล์ด้วยกระบวนการตกสะสมไอเคมี (Growth of Carbon nanostructures on Nickel Substrates by Alcohol Chemical Vapor Deposition) วารสารของวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ปีที่ 4 ฉบับที่ 4 เดือน ธันวาคม 2555 29
3	Dulyaseree P, Wongwiriyan W , Jareenboon W, Pankiew A, Porntheeraphat S, Ichikawa S and Nukeaw J, Facile Growth of Carbon Nanofibers and Carbon Nanotubes on Stainless Steel Sheet <i>THAI JOURNAL OF PHYSICS SERIES 8 (TPS Journal)</i> , 2012, 75-78
4	Dulyaseree P, Wongwiriyan W , Jareenboon W, Bunjongpru W, Sopitpan S, Porntheeraphat S, Ichikawa S4 and Nukeaw J Effect of Support Layers on Growth of Carbon Nanomaterials by Alcohol Catalytic Chemical Vapor Deposition <i>Journal of the Microscopy Society of Thailand</i> 5 (1-2), xx-13 (2012), Accepted

Proceedings	
1	Katayama S, Tabata H, Wongwiriyan W Research and development of single-walled carbon nanotube thin-film sensor with sensing selectivity and stability Proceeding of the 3rd Global COE International Symposium on Electronic Devices, October 16-17, 2011
2	Chamnan-Arsa S, Wongwiriyan W and Kansuwan P Carbon nanotube growth directly on nickel substrate using alcohol Proceeding of the 2nd the Thai Society of Mechanical Engineers-International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME), October 19-21, 2011
3	Muangrat W, Porntheeraphat S, Wongwiriyan W, Effect of metal catalysts on synthesis of carbon nanomaterials by alcohol catalytic chemical vapor deposition, Proceeding of the 1st Joint Conference in Renewable Energy and Nanotechnology, November 19, 2012, p216-p219
4	Nittaya Sa-ard, Suwan Chaiyasith, Winadda Wongwiriyan, and Worawut Muangrat SYNTHESIS OF GRAPHENE/Co₃O₄ AND APPLICATIONS FOR GAS SENSING AT ROOM TEMPERATURE Proceedings of Pure and Applied Chemistry International Conference. (PACCON2013), January 23-25, 2013
5	M. Yuwapan, P. Dulyaseree and W. Wongwiriyan Modification of used Atomic Force Microscope Cantilever by Carbon Nanotube Attachment and its Imaging Performance Proceedings of the 8th Annual Conference of Thai Physics Society, Chiangmai, Thailand, March 21-23, 2013

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

ประวัติส่วนตัว ชื่อ-สกุล นายสิรพัฒน์ ประโทนเทพ

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
M.Sci. (Physics) hon. Class I (equivalent to B.Sc.+M.Sc.)	Physics	The University of Birmingham, UK	2541
Ph.D. (Physics)	Physics	The University of Birmingham, UK	2546

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์

1. นักเรียนทุนโครงการ พสวท. รุ่นที่ 6 เริ่มรับทุนตั้งแต่ พศ. 2532
2. ผู้แทนประเทศไทยเข้าร่วมแข่งขันโอลิมปิกวิชาการสาขาฟิสิกส์ ปี พศ. 2535 ที่ประเทศฟินแลนด์
3. รางวัล *Nolan Merrill Prize* (BNFL and School of Physics and Astronomy, the University of Birmingham) สำหรับโครงงานวิจัยชั้นปีที่ 4 ดีเด่นเรื่อง “An in-situ investigation of the radiation inactivation in Firefly luciferase”
4. รางวัล *S.W.J. Smith Prize* (the Faculty of Science, the University of Birmingham) สำหรับคะแนนสูงสุดประจำหลักสูตร MSci (Physics)
5. รางวัล *University Club Colour Award* สำหรับกิจกรรมงานบริการในแก่สมาคมกีฬา Birmingham University Orienteering Club ของมหาวิทยาลัย

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

Suranan Anantachaisilp, SiwapornMeejoo Smith, Alongkot Treetong, **Sirapat Pratontep**, Satit Puttipipatkachorn and Uracha Rungsardthong Ruktanonchai, “Chemical and structural investigation of lipid nanoparticles: drug–lipid interaction and molecular distribution”, *Nanotechnology* **21**, 125102 (2010).

Thanyarat Sawatsuk, Anon Chindaduang, Chaiyuth Sae-kung, **Sirapat Pratontep** and Gamolwan Tumcharern,” Dye-sensitized solar cells based on TiO₂-MWCNTs composite electrodes: performance improvement and their mechanisms”, *Diamond & Related Materials* **18**, 524-427 (2009).

Annop Klamchuen and **Sirapat Pratontep**, Fabrication of superhydrophilic nanostructured surface by thermal annealing of titanium thin films in air, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* **9**, 1509-1513 (2009).

- Sureeporn Uttiya, Teerakiat Kerdcharoen, Santi Vatanayon, **Sirapat Pratontep**, “Effect of Structural Transformation to The Gas Sensing Properties of Phthalocyanine Thin Film”, *Journal of the Korean Physical Society* **52**, 1575_1579 (2008).
- Don Klaitabtim, **Sirapat Pratontep**, and Jiti Nukeaw, “Effect of gas-timing technique on structure and optical properties of sputtered zinc oxide films”, *Ceramics International* **34** (2008), 1103–1107.
- Don Klaitabtim, **Sirapat Pratontep**, and Jiti Nukeaw, “Growth and Characterization of Zinc Oxynitride Thin Films by Reactive Gas-Timing RF Magnetron Sputtering”, *Japanese Journal of Applied Physics* **47**, 653-656 (2008).
- Martin Brinkmann, **Sirapat Pratontep**, Christian Chaumont, and Jean-Claude Wittmann, “Oriented and Nanostructured Polycarbonate Substrates for the Orientation of Conjugated Molecular Materials and Gold Nanoparticles”, *Macromolecules* **40**, 9420-9426 (2007).
- M. Brinkmann, **S. Pratontep**, C. Contal, “Correlated and non-correlated growth kinetics of pentacene in the sub-monolayer regime”, *Surface Science* **600**, 4712–4716 (2006).
- S. Pratontep**, F. Nüesch, L. Zuppiroli and M. Brinkmann, “Comparison between nucleation of pentacene monolayer islands on polymer and inorganic substrates”, *Physical Review B* **72**, art no. 085221 (2005).
- S. Pratontep**, S. J. Carroll, C. Xirouchaki, M. Streun and R. E. Palmer, “Size-selected cluster beam source based on RF magnetron plasma sputtering and gas condensation”, *Review of Scientific Instruments* **76**, 045103 (2005).
- R.E. Palmer, **S. Pratontep** and H.-G. Boyen, “Nanostructured surfaces from size-selected clusters for semiconductor fabrication and immobilisation of proteins”, *Nature Materials* (Review article) **2**, 443-448 (2003).
- S. Pratontep**, P. Preece, C. Xirouchaki, R. E. Palmer, C. F. Sanz-Navarro and R. Smith, “Scaling relations for implantation of size-selected Au, Ag and Si clusters into graphite”, *Physical Review Letters* **90**, art. no. 055503 (2003).
- S.J. Carroll, **S. Pratontep**, M. Streun, R.E. Palmer, S. Hobday and R. Smith, “Pinning of size-selected Ag clusters on graphite surfaces”, *Journal of Chemical Physics* **113**, 7723-7727 (2000). (Also reviewed in *Nature* (news & view) **408**, p. 531, 23rd November 2000.)

คำขอสิทธิบัตร

Sirapat Pratontep, Rungroj Maolanon, “Methods for qualitative classification of color of objects and devices exploiting said methods”, Thai patent application (Application no. 1001000739, May 2010).

Sirapat Pratontep, Pattaraluck Pattamang, Chinapat Srikomut, Rungroj Maolanon, Pimwipha Piyakulawat, Udom Asawapirom, Supanit Porntheeraphat, Amporn Poyai, “Composite Materials from Zinc Oxide Nanoparticles and Polymer Semiconductor Ultraviolet for uses in ultraviolet photodetectors”, Thai patent application (Application no. 0901004648, Oct 2009).

Sirapat Pratontep, Rungroj Maolanon, Teerakiat Kerdcharoen, Paisal Doungjak na ayutthaya, “Methods for scent detection and portable devices exploiting said methods”, Thai patent application (Application no. 0801004238, Aug 2008).

Sirapat Pratontep, Wittawat Saenrank, Yongyuth Wanna, Wiyong Kangwansupamonkon, “Process for preparation of natural rubber fibers”, Thai patent application (Application no. 0801001730, Apr 2008).

Sirapat Pratontep, Anon Chindadaung, Gamolwan Tumcharoen, Chaiyuth Saekang, “Counter Electrodes of Dye-Sensitized Solar Cells Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes and Platinum and the Method of Preparation Therein”, Thai patent application (Application no. 0701006250, Dec 2007).

Sirapat Pratontep, Anon Chindadaung, Gamolwan Tumcharoen, Chaiyuth Saekang, “Method for Fabricating the Front Electrode of Dye-Sensitized Solar Cells containing Multi-Walled Carbon Nanotubes by using direct mixing methods”, Thai patent application (Application no. 0701006249, Dec 2007).

Annop Klamcheun, Sirapat Pratontep, and Jiti Nukaew, “Process for coating titanium nitride and titanium oxynitride on substrate by plasma sputtering and thermal annealing in air”, Thai patent application (Application no. 0701001915, Apr 2007).

Jiti Nukeaw, Supanit Porntheeraphat, Don Klaitabtim, and Sirapat Pratontep. “Indium Tin Oxide Nitride Conductive Optical Filter”, Thai patent application (Application no. 0601006624, 29 Dec 2006).

ผลงานตีพิมพ์อื่นๆ

- A. Chindaduang, P. Duangkaew, S. Pratontep, and G. Tumcharern, "Composite Polymer Electrolyte for Dye-Sensitized Solar Cells: Role of Multi-Walled Carbon Nanotubes", *Advanced Materials Research* **93-94**, 31-34 (2010).
- A.Pankiew, W.Bunjongpru, N.Somwang¹, S.Porntheeraphat, S.Pratontep, S.Sophitpan, J.Nukaew, C.Hruanun And A.Poyai, "The optimization of TiN film deposited by DC magnetron sputtering provided for Al diffusion barrier", *Advanced Materials Research* **93-94**, 578-582 (2010).
- T. Hongkachern, W. Suwannet, R. Jaisutti, **S. Pratontep** and T. Osotchan, "Feature Difference of Interaction Between Various Organic Solvent Vapors and Metal Phthalocyanines Coated on Quartz Crystal", *Advanced Materials Research* **55-57**, 305-308 (2008).
- O. Chamlek, **S. Pratontep**, T. Kerdcharoen and T. Osotchan, "Spectroscopys Studies of Iron Phthalocyanine Thin Films", *Advanced Materials Research* **55-57**, 301-304 (2008).
- Sakon Rahong, Annop Klumcheun, Apinan Soottitantawat, Keisuke Fukaya, Pisit Singjai and **Sirapat Pratontep**, "Synthesis of carbon nanofibers by chemical vapor deposition using polyoxometalates as catalysts", *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences Special Issue on Nanotechnology* **7**, 81-88 (2008)
- Don Klaitabtim, **Sirapat Pratontep**, Jiti Nukeaw, "Growth and characterization of zinc oxide thin films by gas-timing RF magnetron sputtering", *Thai Journal of Physics* **2**, 78-82 (2007)
- S. Nilphai, N. Hongsith, C. Sae-Kung, **S. Pratontep**, P. Mangkorntong, N. Mangkorntong, S. Chooapun, "ZnO nanostructures as semiconducting photoelectrodes in dye-sensitized solar cells", *Thai Journal of Physics* **3**, 66-68 (2008)
- Anon Chindaduang, Thanyarat Sawatsuk, Waraporn Wongsukkab, Chaiyut Sae-kung, Gamolwan Tumcharern and **Sirapat Pratontep**, "Electron microscopy and optical spectroscopy analyses of carbon nanotube composite electrodes for dye-sensitized solar cells", *Journal of Microscopy Society of Thailand* **22**, 24-26 (2008)
- Sirapat Pratontep**, Sureeporn Uttiya and Teerakiat Kerdcharoen, "In-situ AFM study of thermally activated structural transformation in zinc phthalocyanine gas sensors", *Journal of Microscopy Society of Thailand* **21**, 31-35 (2007).
- Gamolwan Tumcharern, Vichuta Lauruengtana, Annop Klamchuen, **Sirapat Pratontep** and Joydeep Dutta, "Bacteria Detection by ZnS:Mn²⁺ Quantum Dots", *Journal of Microscopy Society of Thailand* **21**, 333-336 (2007)

- F. Claeysens, **S. Pratontep**, C. Xirouchaki and R E Palmer, "Immobilization of large size-selected silver clusters on graphite", *Nanotechnology* **17** (3), 805-807 (2006).
- S. Pratontep**, M. Brinkmann, F. Nüesch, M. Schaer and L. Zuppiroli, "Growth mechanism in ultra-thin pentacene films used in organic field effect transistors: Effect of deposition rate", *Physical Review B* **69**, art. no. 165201 (2004).
- Sureeporn Uttiya, Anurak Udomvech, **Sirapat Pratontep**, Santi Vatanayon, Teerakiat Kerdcharoen, "Interaction between Alcohol and Zinc Phthalocyanine: Computational Modeling and Spectroscopy", The 10th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE10), Chiang Mai, Thailand, March 22-24, 2006.
- Paisarn Doungjak na ayutthaya, Krisanadej Jaroensutasinee, **Sirapat Pratontep** and Teerakiat Kerdcharoen, "Classification of Thai instant coffees using electronic nose", The 31st Congress on Science and Technology of Thailand, Suranaree University of Technology, Nakornrachsrma, October 18-20, 2005.
- S. Pratontep**, A. Klamcheun, S. Uttiya and T. Kerdcharoen, "Characterization of Zinc Phthalocyanine Thin Films Prepared by Drop Casting Technique", The 23rd Annual Conference Microscopy Society of Thailand The Twin Tower Hotel, Bangkok, Thailand, February 22-24, 2006.
- S. Pratontep** and M. Brinkmann, F. Nüesch and L. Zuppiroli, "Nucleation and growth of ultrathin pentacene films on silicon dioxide: effect of deposition rate and substrate temperature", *Synthetic Metals* **146**, 387-391 (2004).
- M. Brinkmann, B. Fite, **S. Pratontep** and C. Chaumont, "Structure and spectroscopic properties of the crystalline structures containing meridional and facial isomers of tris(8-hydroxyquinoline) Gallium (III)", *Chemistry of Materials* **16**; 4627-4633 (2004).
- M. Couillard, **S. Pratontep** and R. E. Palmer, "Metastable, ordered arrays of size-selected Ag clusters on graphite", *Applied Physics Letters* **82**, 2595-2597 (2003).
- C.F. Sanz-Navarro, R. Smith, D.J. Kenny, **S. Pratontep** and R.E. Palmer, "Scaling behaviour of the penetration depth of energetic silver cluster in graphite", *Physical Review B* **65**, art. no. 165420 (2002).
- M. Couillard, **S. Pratontep**, M. Streun, R.E. Palmer and P.D. Nellist, "HRTEM studies of the aggregation of size-selected Ag clusters deposited onto graphite", *Electron Microscopy and Analysis 1999*, 545-548 (1999).

N. Berovic, **S. Prantontep**, A. Bryant, A. Montouris and R.G. Green, “The kinetics of radiation damage to the protein luciferase and recovery of enzyme activity after irradiation”, *Radiation Research* **157**, 122-127 (2002).

H.F. Poulsen, L.G. Anderson, T. Frello, **S. Prantontep**, N.H. Anderson, S. Garbe, J. Madsen, A. Abrahamsen, M.D. Bentzon and M. von Zimmermann, “*In-situ* study of equilibrium phenomena and kinetics in a BiSCCO Ag tape”, *PHYSICA C* **315**, 254-262 (1999).
