

การพัฒนาตัวตรวจวัดไอรยะเหยเบนซีนด้วยวัสดุนาโนไฮบริดของท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์

ธัญญา ขอบศิลป์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

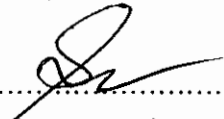
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

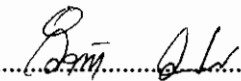
เมษายน 2558

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

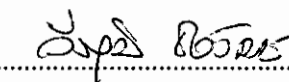
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ ธนัญญา ชอบศิลป์ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

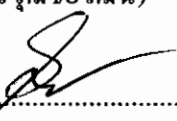
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

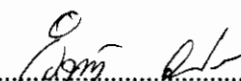

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศักดิ์ อีสโร)

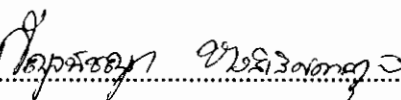

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

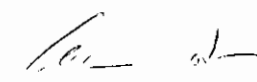

..... ประธาน
(ดร.วีรวุฒิชัยวัฒน์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศักดิ์ อีสโร)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์)


..... กรรมการ
(ดร.กัญจน์ชญา หงส์เลิศคงสกุล)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพา


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัตู ศรีสูง)

วันที่ 30 เดือน เมษายน พ.ศ. 2558

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศักดิ์ อีสโร อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์วิทยาลัยนาโน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางการทำงานที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วย ความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาของการศึกษาในสถาบันแห่งนี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัชชัย ชรินพานิชกุล อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย (ปตท.) ภายใต้วรร่วมมือกับศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีอนุภาค คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มี ส่วนช่วยสนับสนุนทุนวิจัย รวมทั้งมีส่วนช่วยให้ความรู้และคำปรึกษาแก่ผู้วิจัยจนงานวิจัยนี้สำเร็จ ลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มีส่วนสนับสนุนเครื่องมือและสถานที่ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งและขอขอบคุณมาในโอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้กำลังใจ ส่งเสริม และสนับสนุนผู้วิจัยในทุก ๆ ด้าน รวมทั้งเพื่อน ๆ สาขาวิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ และสร้างบรรยากาศทางวิชาการที่ดีตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูเวทิตาแด่ บุพการี บูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้ที่มีการศึกษาและ ประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

ธนัญญา ขอบศิลป์

55910150: สาขาวิชา: ฟิสิกส์; วท.ม. (ฟิสิกส์)

คำสำคัญ: ท่อนาโนคาร์บอน/ ก๊าซเซนเซอร์/ เบนซีน/ เอทิลเซลลูโลส/ การทรีตเมนต์ด้วย

ออกซิเจนพลาสมา/ การทรีตเมนต์ด้วยกรด/ การทรีตเมนต์ด้วยความร้อน

รณัฏฐา ขอบศิลป์: การพัฒนาตัวตรวจวัดไอระเหยเบนซีนด้วยวัสดุนาโนไฮบริดของ

ท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์ (DEVELOPMENT OF BENZENE SENSOR USING CARBON

NANOTUBE AND POLYMER NANOHYBRID MATERIALS) คณะกรรมการควบคุม

วิทยานิพนธ์: ชัยศักดิ์ อิศโร, Ph.D., DR. RER. NAT., วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์, Ph.D., D. ENG., 84

หน้า. ปี พ.ศ. 2558.

งานวิจัยนี้ได้ทำการประดิษฐ์เบนซีนเซนเซอร์จากวัสดุนาโนไฮบริดของท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes; CNTs) และพอลิเมอร์ ขั้นตอนแรกทำการศึกษาอิทธิพลของพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่มีผลต่อการตรวจวัดไอระเหยของเบนซีน CNTs ที่ไม่ผ่านการถูกทรีตเมนต์ (Pristine CNTs) ถูกเตรียมโดยวิธีการหยดลงบนแผ่นพีซีบีทีที่ประกอบด้วยขั้วอินเตอร์ดิจิตัลของคอปเปอร์/ทองแดง (Cu/Au) ที่เป็นแผ่นรองรับของเซนเซอร์ จากนั้นนำพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้แก่ พอลิไอโซพรีน (Polyisoprene; PI), พอลิไวนิลอะซิเตต (Polyvinyl acetate; PVA), พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Poly(methyl methacrylate); PMMA), พอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) และเอทิลเซลลูโลส (Ethyl cellulose; EC) เคลือบลงบนโครงข่าย CNTs ด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง ก๊าซเซนเซอร์จาก EC (5 wt%)/Pristine CNTs แสดงค่าการตอบสนองสูงสุดต่อไอระเหยเบนซีนโดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานมากที่สุดกลไกการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนอธิบายได้จากการพองตัวของพอลิเมอร์ส่งผลให้โครงข่ายของ CNTs แยกห่างจากกันมากขึ้นทำให้ค่าความต้านทานมากขึ้น นอกจากนี้การมีค่าตอบสนองสูงสุดของ CNTs ที่เคลือบด้วย EC อธิบายได้ด้วยการละลายเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์กับไอระเหยเบนซีนด้วยพารามิเตอร์การละลายของแฮนเซน (Hansen solubility parameter) โดย EC และเบนซีนมีความสามารถในการละลายเข้ากันได้ดีที่สุด ขั้นตอนที่สองได้ทำการตรวจสอบผลของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของเอทิลเซลลูโลสที่เคลือบลงบน CNTs ที่มีผลต่อการตรวจวัดไอระเหยเบนซีน ค่าการตอบสนองมีลำดับดังนี้ EC (5 wt%)/Pristine CNTs < EC (10 wt%)/Pristine CNTs < EC (1 wt%)/Pristine CNTs ก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%)/Pristine CNTs แสดงค่าการตอบสนองสูงสุดต่อไอระเหยเบนซีนเนื่องจากสามารถพองตัวได้ดีและเร็วกว่าขั้นตอนที่สามทำการศึกษาอิทธิพลของการทรีตเมนต์ด้วยวิธีต่าง ๆ ที่มีผลต่อการตรวจวัดไอระเหยเบนซีน CNTs ถูกทรีตเมนต์ด้วยกรด (EC (1 wt%)/A-CNTs), ความร้อน (EC (1 wt%)/T-CNTs) และออกซิเจนพลาสมา

(EC (1 wt%)/P-CNTs) เป็นเวลา 60 นาที พบว่า EC (1 wt%)/P-CNTs แสดงค่าการตอบสนองสูงสุดต่อไอระเหยเบนซีนโดยเป็นผลมาจากการสร้างหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนบนพื้นผิวของ CNTs หลังการออกซิเจนพลาสมาทรีตเมนต์ ทำให้การยึดติดระหว่าง EC และ CNTs ดีขึ้น นอกจากนี้ได้ศึกษาผลของเวลาออกซิเจนพลาสมาทรีตเมนต์ โดยนำ CNTs ไปทำการออกซิเจนพลาสมาทรีตเมนต์ที่เวลาต่าง ๆ กัน ได้แก่ 30, 60, 90 และ 120 นาที (EC (1 wt%)/P0-CNTs, EC (1 wt%)/P30-CNTs, EC (1 wt%)/P60-CNTs, EC (1 wt%) /P90-CNTs, EC (1 wt%)/P120-CNTs) พบว่า EC (1 wt%)/P90-CNTs แสดงค่าการตอบสนองสูงสุดต่อไอระเหยเบนซีน มีค่าการตอบสนองที่สูงกว่า EC (1 wt%)/Pristine CNTs ถึง 10.97 เท่า ผลดังกล่าวสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีและฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งพบว่า CNTs ที่ผ่านการออกซิเจนพลาสมาทรีตเมนต์มีปริมาณของหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนเพิ่มขึ้น การใช้งานระหว่าง EC และออกซิเจนพลาสมาทรีตเมนต์น่าจะเป็นเทคนิคที่มีความเป็นไปได้สำหรับการปรับปรุง CNTs สำหรับตรวจวัดเบนซีน

55910150: MAJOR: PHYSICS; M.Sc. (PHYSICS)

KEYWORDS: CARBON NANOTUBES/ GAS SENSOR/ BENZENE/ ETHYL CELLULOSE/
OXYGEN PLASMA TREATMENT/ ACID TREATMENT/ THERMAL
TREATMENT

THANATTHA CHOBSILP: DEVELOPMENT OF BENZENE SENSOR USING
CARBON NANOTUBE AND POLYMER NANOHYBRID MATERIALS. ADVISORY
COMMITTEE: CHAISAK ISSRO, DR. RER. NAT., WINADDA WONGWIRIYAPAN,
D. ENG., 84 P. 2015.

In this research, were fabricated benzene sensors based on nanohybrid material of carbon nanotubes (CNTs) and polymer. First step, the effect of coating pristine CNTs with different polymers on benzene vapor detection was investigated. Pristine CNTs were dropped onto printed circuit board (PCB) substrate with Cu/Au interdigitated electrode as sensor platform. Then, polymer solutions (5 wt%) such as polyisoprene (PI), polyvinyl acetate (PVA), poly(methyl methacrylate) (PMMA), polystyrene (PI) and ethyl cellulose (EC) are subsequently spin-coated on the CNTs network. Gas sensor fabricated from EC (5 wt%)-coated CNTs (EC (5 wt%) /Pristine CNTs) show the best response to benzene vapor which the highest change in resistance. Sensing mechanism of benzene vapor detection can be explained by the swelling of polymer, CNTs network was separated each other, resulting in an increase in resistance. In addition, the highest response to benzene of EC-coated CNTs can be explained by Hansen solubility parameter (HSP), EC and benzene have the best solubility parameter. Second step, the effect of weight percent of EC-coated CNTs on benzene vapor detection was studied. The response is the following: EC (5 wt%)/Pristine CNTs < EC (10 wt%)/Pristine CNTs < EC (1 wt%) /Pristine CNTs. Gas sensor from EC (1 wt%)/Pristine CNTs showed the highest response to benzene vapor due to it can swell better than that of EC (5 wt%)/Pristine CNTs and EC (10 wt%) /pristine CNTs. In the third step, the different treatments of Pristine CNTs on benzene vapor detection was treated by acid (A-CNTs), thermal (T-CNTs) and oxygen plasma (P-CNTs) for 60 min. The results exhibited that EC (1 wt%)/P-CNTs shows the highest response to benzene vapor due to the formation of the oxygen-containing function groups on the surface of CNTs after

oxygen plasma treatment, improve the adhesion between EC and CNTs. Next, the effect of oxygen plasma treatment time was investigated. Pristine CNTs was varied from 0 to 120 min. The samples were labeled accordingly as EC (1 wt%)/P0-CNTs, EC (1 wt%)/P30-CNTs, EC (1 wt%) /P60-CNTs, EC (1 wt%)/P90-CNTs, and EC (1 wt%)/P120-CNTs for 0, 30, 60, 90 and 120 min of oxygen plasma treatment, respectively. EC (1 wt%)/P90-CNTs showed the highest response to benzene vapor, it is 10.97 times highest than that of EC (1 wt%)/Pristine CNTs. This result corresponds to the X-ray photoelectron spectroscopy and Fourier transform infrared spectroscopy analysis that oxygen plasma treated-CNTs increase in oxygen functional group. The combination work between EC and oxygen plasma treatment would be promising technique for improvement of benzene detection.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฉิ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 กรอบแนวคิดของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ชนิดและลักษณะทางโครงสร้างของคาร์บอน.....	6
2.2 ท่อนาโนคาร์บอน.....	8
2.3 สมบัติต่าง ๆ ของท่อนาโนคาร์บอน.....	9
2.4 เทคนิคการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน.....	10
2.5 กลไกการเกิดท่อนาโนคาร์บอน.....	12
2.6 องค์ประกอบและนิยามของเซนเซอร์เคมี.....	13
2.7 การพัฒนาตัวตรวจวัดไอระเหยอะโรมาติกจากท่อนาโนคาร์บอน.....	16
2.8 พารามิเตอร์การละลายของเฮนเซน.....	26
2.9 เครื่องมือวิเคราะห์.....	28
3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.2 การเปรียบเทียบชนิดพอลิเมอร์สำหรับเคลือบ CNTs เพื่อใช้ตรวจวัดไอระเหยของเบนซีน.....	35

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3 การปรับสภาพผิวท่อนาโนคาร์บอน.....	36
3.4 การทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยเบนซีน.....	38
4 ผลการวิจัย	
4.1 ก๊าซเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนด้วยวัสดุท่อนาโนคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ.....	41
4.2 ก๊าซเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนด้วยวัสดุท่อนาโนคาร์บอนเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลส.....	53
4.3 ก๊าซเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนด้วยวัสดุท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการทรีตเมนต์และเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลส.....	56
5 อภิปรายและสรุปผล.....	76
บรรณานุกรม.....	78
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	82

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของท่อนาโนคาร์บอนแบบต่าง ๆ และวัสดุชนิดอื่น.....	10
2	มาตรฐานค่าไอระเหยเบนซีนในบรรยากาศโดยทั่วไป.....	16
3	การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียการตรวจวัดไอระเหยเบนซีนของแต่ละเทคนิค.....	17
4	สรุปตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้พอลิเมอร์และการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของ CNTs ด้วยเทคนิคออกซิเจนพลาสมา และการไฮบริดร่วมกันระหว่างการปรับปรุงสภาพพื้นผิวและการใช้ร่วมกับพอลิเมอร์ ในการนำไปใช้เป็นก๊าซเซนเซอร์.....	25
5	เงื่อนไขการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา.....	38
6	เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยเบนซีน.....	39
7	อุปกรณ์และเครื่องมือชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุก๊าซเซนเซอร์และการตรวจวัดไอระเหยเบนซีน.....	40
8	ค่า I_G/I_D ของตัวอย่างชนิดต่าง ๆ.....	44
9	ค่าความเข้มข้นไอระเหยของเบนซีนที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ.....	45
10	ค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จาก Pristine CNTs และ CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ที่ระดับความเข้มข้น 5 wt% ชนิดต่าง ๆ.....	47
11	ค่าพารามิเตอร์การละลายของแฮนเซนของเบนซีนและพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ.....	50
12	ค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างชนิดต่าง ๆ.....	60
13	ค่า I_G/I_D ของตัวอย่างชนิดต่าง ๆ.....	61
14	ค่าเปอร์เซ็นต์สัมพัทธ์ขององค์ประกอบและพันธะชนิดต่าง ๆ รวมถึงตำแหน่งฟังก์ชันของ Pristine CNTs และ P90-CNTs ที่บริเวณตำแหน่ง C 1s.....	65
15	ค่าเปอร์เซ็นต์สัมพัทธ์ขององค์ประกอบและพันธะชนิดต่าง ๆ รวมถึงตำแหน่งฟังก์ชันของ Pristine CNTs และ P90-CNTs ที่บริเวณตำแหน่ง O 1s.....	66
16	ค่าความเข้มข้นไอระเหยของเบนซีนที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ.....	66
17	ค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) ที่เคลือบด้วยบน Pristine CNTs และเคลือบบนตัวอย่างที่ผ่านการทรีตเมนต์แบบต่าง ๆ.....	68
18	ค่าความเข้มข้นไอระเหยของเบนซีนที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ.....	69

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
19	ค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) ที่เคลือบด้วยบน Pristine CNTs และเคลือบบนตัวอย่างที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาที่เวลาต่าง ๆ กัน.....	72
20	ค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) /P90-CNTs ที่ตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนที่ระดับความเข้มข้น ppm.....	74

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ภาพสรุปงานวิจัยการพัฒนาตัวตรวจวัดไอระเหยจากเบนซีน (a) CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ และ (b) CNTs ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยวิธีต่าง ๆ และเคลือบด้วยพอลิเมอร์.....	5
2	ลักษณะโดยทั่วไปและโครงสร้างของเพชร.....	6
3	ลักษณะโดยทั่วไปและโครงสร้างของแกรไฟต์.....	7
4	โครงสร้างของ CNTs.....	7
5	ฟลูออรีนที่อยู่ในรูปของสารละลายและโครงสร้างของฟลูออรีน.....	8
6	ลักษณะของCNTs (ซ้าย) ผนังชั้นเดียว (ขวา) ผนังหลายชั้น.....	8
7	ลักษณะของ CNTs ของ Armchair (n,n), Zigzag (n,0) และ Chiral (n,m).....	9
8	แผ่นกราฟีนสองมิติที่แสดงพิกัด (n,m).....	9
9	ระบบวิธีอาร์คคิสซาร์จ.....	11
10	ระบบวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์.....	12
11	ระบบวิธีการเคลือบไอระเหยทางเคมี.....	12
12	กลไกการเกิดท่อนาโนคาร์บอนแบบ (ซ้าย) Base growth (ขวา) Tip growth.....	13
13	ตัวอย่างก๊าซเซนเซอร์ CNTs และผลการตรวจวัดก๊าซ NO ₂ และ NH ₃ ที่นำเสนอในช่วงวิจัยเริ่มต้น.....	19
14	กลไกการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์ CNTs.....	20
15	ตัวอย่างภาพSEM ของ PS/MCWNTs ที่เตรียมด้วยวิธี (a) Solution mixing และ (b) Polymerization.....	21
16	ภาพ SEM ของ EC/SWNTs ที่มีปริมาณ CNTs 5wt% ในเมทริกซ์ EC และผลการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีน EC/CNTs.....	21
17	ผลการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนของเซนเซอร์จาก MWNTs ที่ผ่านการทรีเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา.....	23
18	ภาพ TEM ของ MWNTs ที่ตกแต่งอนุภาคนาโนของ Pd (a) ไม่ทำการทรีเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา (b) ทำการทรีเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา.....	24

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	ผลการตรวจวัดก๊าซของ MWNTs ที่ทำการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาและนำไป ตกแต่งด้วยอนุภาคโลหะนาโนชนิดต่าง ๆ (a) เบนซีน และ (b) ไนโตรเจนไดออกไซด์	24
20	ผลการตรวจวัดก๊าซแอมโมเนีย (ซ่าย) MWNTs ที่ผ่านการทรีตเมนต์และไม่ผ่านการ ทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา (ขวา) MWNTs คอมโพสิตกับ PANI ที่ผ่านการ ทรีตเมนต์และไม่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา.....	25
21	แผนภาพแสดงลักษณะของทรงกลมฮันเซน (Hansen sphere) ทั้ง 3 กรณี.....	28
22	ระบบการทำงานของเครื่อง SEM.....	28
23	ระบบการทำงานของเครื่อง TEM.....	29
24	รูปแบบของพลังงานระดับชั้นที่เกี่ยวข้องกับการกระเจิงแบบรามาน.....	30
25	ระบบการทำงานของเครื่อง FTIR.....	31
26	ระบบการทำงานของเครื่อง XPS.....	32
27	รายละเอียดของแผ่น PCB.....	36
28	แสดงขั้นตอนในการสร้างก๊าซเซินเซอร์จาก CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์.....	36
29	แผนผังขั้นตอนการปรับสภาพผิว CNTs ด้วยกรด.....	37
30	แผนผังขั้นตอนการปรับปรุงสภาพผิว CNTs ด้วยความร้อน.....	37
31	แผนผังแสดงระบบทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยเบนซีน.....	39
32	ภาพ SEM ของ (a) Pristine CNTs, (b) PI (5 wt%) /Pristine CNTs, (c) PVA (5 wt%) /Pristine CNTs, (d) PMMA (5 wt%) /Pristine CNTs, (e) PS (5 wt%) /Pristine CNTs และ (f) EC (5 wt%) /Pristine CNTs.....	42
33	รามานสเปกตรัมของ Pristine CNTs, PI (5 wt%) /Pristine CNTs, PVA (5 wt%) /Pristine CNTs, PMMA (5 wt%) /Pristine CNTs, PS (5 wt%) /Pristine CNTs และ EC (5 wt%) /Pristine CNTs.....	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
34	ผลการตอบสนองของไอระเหยของเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์จาก (a) Pristine CNTs, (b) PI (5 wt%) /Pristine CNTs, (c) PVA (5 wt%) /Pristine CNTs, (d) PMMA (5 wt%) /Pristine CNTs, (e) PS (5 wt%) /Pristine CNTs และ (f) EC (5 wt%) /Pristine CNT.....46
35	ภาพการเปรียบเทียบผลการตอบสนองไอระเหยของเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์ Pristine CNTs, PI (5 wt%) /Pristine CNTs, PMMA (5 wt%) /Pristine CNTs, PVA (5 wt%) /Pristine CNTs, PS (5 wt%) /Pristine CNTs และ EC (5 wt%) /Pristine CNTs (a) ผลการตอบสนอง (b) Normalized sensor response.....49
36	การเปรียบเทียบความสามารถละลายเข้ากันของพอลิเมอร์และโมเลกุลของเบนซีน (ซ้าย) สามารถละลายเข้ากันได้ดี (ขวา) ละลายเข้ากันไม่ได้.....52
37	การเปรียบเทียบทรงกลมแสนเซนกรณีของ EC, PS และ PV.....52
38	ภาพ SEM ของ (a) EC (1 wt%) /Pristine CNTs และ (b) EC (5 wt%) /Pristine CNTs...53
39	การเปรียบเทียบผลการตอบสนองไอระเหยของเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์ EC (1 wt%) /Pristine CNTs, EC (5 wt%) /Pristine CNTs และ EC (10 wt%) /Pristine (a) ผลการตอบสนอง และ (b) Normalized sensor response.....55
40	ภาพ SEM ของ (a) pristine CNTs, (b) T-CNTs, (c) A-CNTs, (d) P30-CNTs, (e) P60-CNTs, (f) P90-CNTs และ (g) P120-CNTs.....57
41	ภาพ TEM ของ (a) Pristine CNTs (b) T-CNTs, (c) A-CNTs, (d) P30-CNTs, (e) P60-CNTs (f) P90-CNTs และ (g) P120-CNTs.....59
42	รามานสเปกตรัมของ Pristine CNTs, T-CNTs, A-CNTs และ P-CNTs.....61
43	FTIR สเปกตรัมของ Pristine CNTs, T-CNTs, A-CNTs และ P-CNTs.....63
44	XPS (a) สเปกตรัมของ Pristine CNTs ที่ binding energy ในช่วง 0-1200 eV (b) สเปกตรัมของ C 1s และ (c) สเปกตรัมของ O 1s ของ Pristine CNTs.....64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
45	XPS (a) สเปกตรัมของ P90-CNTs ที่ binding energy ในช่วง 0-1200 eV (b) สเปกตรัมของ C 1s และ (c) สเปกตรัมของ O 1s ของ P90-CNTs.....64
46	แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองไอระเหยของเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) /pristine CNTs, EC (1 wt%) /A-CNTs, EC (1 wt%) /T-CNTs และ EC (1 wt%) /P60-CNTs (a) ผลการตอบสนอง และ (b) Normalized sensor response.....67
47	กลไกการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์ EC (1 wt%) /P-CNTs.....68
48	การเปรียบเทียบผลการตอบสนองไอระเหยของเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs ที่ผ่านการพรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาและเคลือบด้วย EC (1wt%) (a) ผลการตอบสนอง และ (b) Normalized sensor response.....70
49	(a) ค่าการตอบสนองไอระเหยของเบนซีนช่วงระดับความเข้มข้น 517-51,670 ppm (b) ที่ระดับความเข้มข้น 517 ppm และ (c) กราฟแนวโน้มการตอบสนองช่วงระดับความ เข้มข้น 517-51,670 ppm ของก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) /P90-CNTs.....73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันได้มีการขยายตัวของอุตสาหกรรมทางด้านต่าง ๆ อย่างรวดเร็วและกว้างขวางจึงได้มีการนำสารเคมีเข้ามาใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากยิ่งขึ้น โดยสารเคมีส่วนใหญ่ที่ถูกนำมาใช้จะอยู่ในกลุ่มจำพวกสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds, VOCs) สารอินทรีย์ระเหยง่ายเหล่านี้มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญคือสารไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbons) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ระเหยที่เป็นอันตรายอาทิเช่น เบนซีน (Benzene) โทลูอีน (Toluene) และ ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) เป็นต้น สารอินทรีย์ระเหยง่ายเหล่านี้มีสมบัติในการฟุ้งกระจายได้ง่ายในสภาวะที่มีอุณหภูมิและความดันปกติก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเบนซีน เบนซีนเป็นสารที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตยา พลาสติก ยางสังเคราะห์ และ สีย้อม เป็นต้น โดยปกติไม่พบในธรรมชาติทั่วไป เบนซีนเป็นส่วนผสมหนึ่งอยู่ในน้ำมันดิบ เป็นผลผลิตที่ได้จากกระบวนการปิโตรเคมี แต่อาจพบปนเปื้อนในธรรมชาติได้ (Farrow, Wheeler, Bates, & Murray, 2000) เบนซีนเป็นสารพิษที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายเมื่อสัมผัสจะทำให้เกิดการระคายเคือง ปวดศีรษะ คลื่นไส้ หายใจไม่ออก เป็นต้น อีกทั้งได้มีการได้พิสูจน์แล้วว่าสารเบนซีนมีสมบัติก่อมะเร็ง และก่อให้เกิดมะเร็งเม็ดเลือดขาวในมนุษย์ (วิวัฒน์ เอกบูรณะวัฒน์, 2555) การสัมผัสสารนี้ที่ความเข้มข้นประมาณ 20,000 ส่วนในล้านส่วน (Parts per million, ppm) จะทำให้เสียชีวิตได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2544) นอกจากนี้ ผลรายงานจากกรมควบคุมมลพิษ พื้นที่บริเวณทั้งในกรุงเทพ บางบริเวณและพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ปี 2556 พบว่า เบนซีนเป็นสารอินทรีย์ที่มีค่ามาตรฐานเฉลี่ยรายปีเกินค่าที่กำหนดไว้ที่ 1.7 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรหรือ 0.0005 ppm (<http://aqnis.pcd.go.th/data/vocs>) อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ที่อาศัยอยู่ในบริเวณดังกล่าวได้เพื่อเป็นการระวังและป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถใช้ตรวจวัดปริมาณเบนซีนในสถานที่ต่าง ๆ ได้ เพื่อใช้ในการเตือนภัยกรณีที่มีปริมาณของเบนซีนในบรรยากาศเกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes, CNTs) (Iijima, 1991) เป็นอัญรูปหนึ่งของคาร์บอนที่มีลักษณะทางโครงสร้างในระดับนาโน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (Single-walled carbon nanotubes, SWCNTs) และท่อนาโนคาร์บอนแบบผนัง

หลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes, MWCNTs) CNTs มีสมบัติพิเศษต่าง ๆ มากมาย ได้แก่ สมบัติทางไฟฟ้า เคมี แสง และเชิงกล เป็นต้น จากสมบัติดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้พัฒนาเป็น อุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ ได้ เช่น หัววัดสำหรับเครื่อง Atomic force microscopy, AFM/Scanning probe microscopy, STM (Yu et al., 2000), ตัวเก็บประจุ (Wang, Zhang, & Zhang, 2012) และ ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (field-effect transistor) (Tans, Verschueren, & Dekker, 1998) เป็นต้น อีกทั้งได้มีการนำ CNTs ไปประยุกต์งานด้านก๊าซเซนเซอร์ โดยข้อได้เปรียบของการใช้ CNTs เป็น ตัวตรวจวัดก๊าซ ได้แก่ มีลักษณะโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก เป็นโพรงและมีรูพรุนจำนวนมาก พื้นที่ผิว สูง มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของก๊าซได้ดี มีความไวและการตอบสนองทางไฟฟ้าที่ดี สามารถทำงานที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงได้ ถือเป็นข้อได้เปรียบของก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs จากสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของ CNTs นี้ ถือเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของก๊าซเซนเซอร์ ดังนั้น CNTs จึงได้รับความนิยมและสนใจอย่างมากในการนำไปใช้งานทางด้านก๊าซเซนเซอร์

งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการนำ CNTs มาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ใช้ในการตรวจวัด สารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่าง ๆ อาทิเช่น ไคคลอโรมีเทน คลอโรฟอร์ม และเบนซีน เป็นต้น อย่างไรก็ตามสำหรับการตรวจวัดไอระเหยของเบนซีน พบว่าก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs มีค่าการตอบสนองที่ต่ำมากหรือแทบจะไม่ตอบสนองเลยเนื่องจากมีค่าอันตรกิริยาที่ต่ำระหว่าง CNTs กับ ไอระเหยของเบนซีน

ดังนั้นเพื่อพัฒนาก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs ให้มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอระเหย ของเบนซีนได้ดีขึ้น จึงได้มีการนำพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ มาพัฒนาใช้งานร่วมกับ CNTs อาทิเช่น พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) และเอทิลเซลลูโลส (Ethyl cellulose, EC) พบว่าเซนเซอร์จากวัสดุ ผลระหว่าง CNTs กับ PS และ CNTs กับ EC เป็นวัสดุผสมที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของก๊าซ เซนเซอร์ให้สามารถตอบสนองไอระเหยของเบนซีนได้ดีขึ้น โดยเฉพาะการใช้งานร่วมกันระหว่าง CNTs และ EC แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า การเตรียมพอลิเมอร์ที่ผสมกับ CNTs นั้น มักจะเตรียมอยู่ในรูปแบบของการกระจายตัวของ CNTs ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ซึ่ง เกี่ยวข้องกับทฤษฎีเปอร์โคเลชัน (Percolation theory) นอกจากนี้ยังพบว่า การอธิบายกลไกในการ ตอบสนองของ CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ต่อไอระเหยของเบนซีนนั้น มีการรายงาน เพียงส่วนน้อยเท่านั้นและยังไม่มี ความชัดเจนเท่าที่ควร

นอกจากนี้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอระเหยเบนซีน ได้มีการศึกษาการ ปรับสภาพผิวของ CNTs เพื่อสร้างหมู่ฟังก์ชันให้กับ CNTs ด้วยเทคนิคต่าง ๆ พบว่าหลังการ ทรานส์ฟอร์มด้วยวิธีต่าง ๆ จะเกิดหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่บริเวณพื้นผิวของ CNTs อาทิเช่น C-O, C=C,

C=O, C-H, -OH และ O-H เป็นต้น ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะระหว่าง CNTs กับ โมเลกุลของเบนซีนงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการนำ CNT มาปรับปรุงสภาพผิวด้วยออกซิเจนพลาสมา จากนั้นนำไปตกแต่งด้วยอนุภาคนาโนชนิดต่าง ๆ ได้แก่ โรเดียม (Rhodium, Rh) แพลเลเดียม (Palladium, Pd) และนิกเกิล (Nickel, Ni) พบว่าเพิ่มความไวและการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาการปรับปรุงสภาพผิว CNTs และนำไปเคลือบด้วยพอลิเมอร์ เพื่อใช้สำหรับตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนนั้นยังไม่มีการศึกษา งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการพัฒนา CNTs เพื่อใช้เป็นตัวตรวจวัดไอระเหยเบนซีนซึ่งงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาเปรียบเทียบชนิดพอลิเมอร์สำหรับเคลือบ CNTs เพื่อใช้ตรวจวัดไอระเหยของเบนซีน ส่วนที่สองเป็นการศึกษาการปรับสภาพผิวของ CNTs ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ การทรีตเมนต์ด้วยกรดความร้อน และออกซิเจนพลาสมา และนำไปตรวจวัดไอระเหยเบนซีน และส่วนที่สามเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยของไฮบริด CNTs ที่ผ่านการปรับสภาพผิวและเคลือบด้วยพอลิเมอร์รวมไปถึงการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการอธิบายการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนกับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนด้วยก๊าซเซนเซอร์จากไฮบริด CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

1.2.2 เพื่อศึกษาการปรับสภาพผิว CNTs ด้วยเทคนิคต่าง ๆ

1.2.3 เพื่อศึกษาการตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนด้วยก๊าซเซนเซอร์จากไฮบริด CNTs ที่ผ่านการปรับสภาพผิวและเคลือบด้วยพอลิเมอร์

1.3 กรอบแนวคิดของการวิจัย

ผู้วิจัยได้แบ่งการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์เป็น 5 ขั้นตอน คือ

1.3.1 การเตรียมไฮบริด CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ โดยทำการเตรียม CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ กัน ด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating)

1.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยเบนซีนของไฮบริด CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของไฮบริด CNTs ภายใต้บรรยากาศของไอระเหยเบนซีน

1.3.3 การปรับสภาพผิว CNTs ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ การทรีตเมนต์ด้วยกรดความร้อนและออกซิเจนพลาสมา เป็นต้น

1.3.4. การเตรียมไฮบริด CNTs ที่ผ่านการปรับสภาพผิวและเคลือบด้วยพอลิเมอร์ โดยนำตัวอย่างที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3 มาเคลือบด้วยพอลิเมอร์ในขั้นตอนที่ 2 ที่ให้ประสิทธิภาพการตรวจวัดที่ดีที่สุด

1.3.5. การศึกษาประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยของไฮบริด CNTs ที่ผ่านการปรับสภาพผิวและเคลือบด้วยพอลิเมอร์โดยนำตัวอย่างที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 4 มาใช้ในการตรวจวัดไอระเหยเบนซีน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.4.1 สามารถเตรียมก๊าซเซนเซอร์ไฮบริด CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ต่าง ๆ ด้วยวิธีเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงได้

1.4.2 สามารถเตรียมก๊าซเซนเซอร์จากการปรับปรุงสภาพผิวของ CNTs ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้

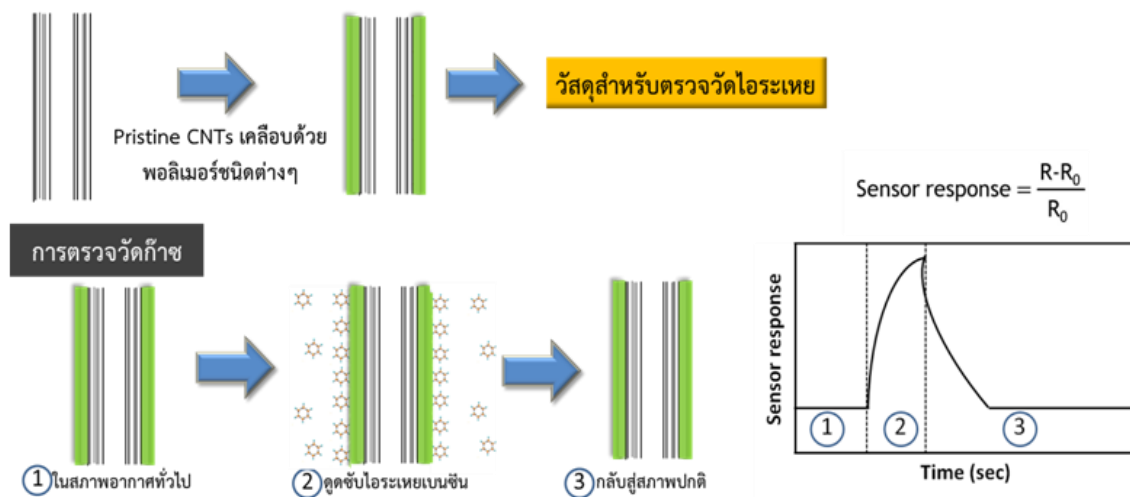
1.4.3 เข้าใจลักษณะรูปแบบและประสิทธิภาพต่อการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนของ CNTs ไฮบริด CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์และไฮบริด CNTs ที่ปรับสภาพผิวและเคลือบด้วยพอลิเมอร์ได้

1.4.4 สามารถผลิตอุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์อย่างง่าย เพื่อนำไปใช้เป็นตัวเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนได้

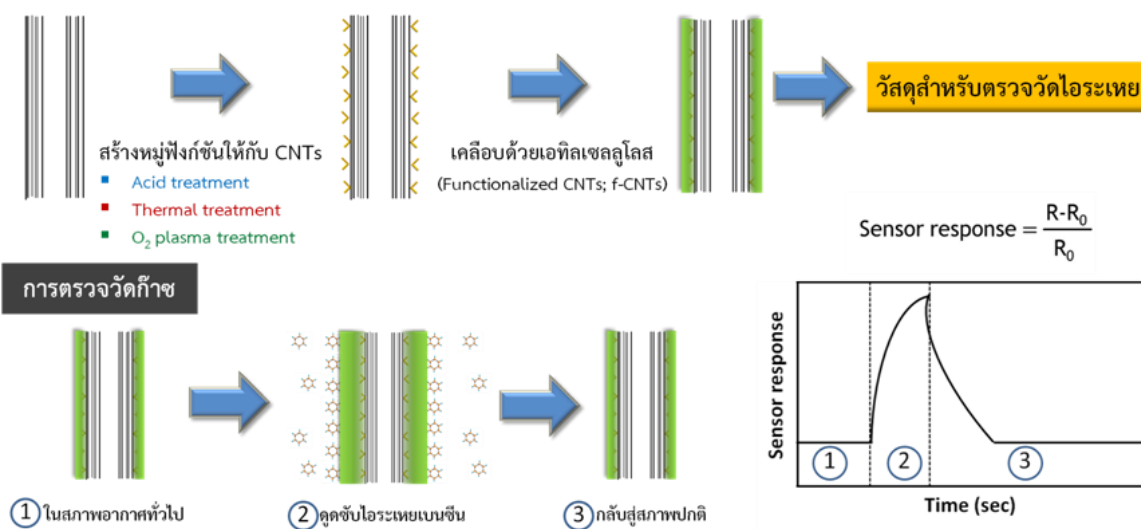
1.5 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาขั้นตอนการเตรียมก๊าซเซนเซอร์ด้วยไฮบริด CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ต่าง ๆ และการปรับสภาพผิวของ CNTs ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ การทรีตเมนต์ด้วยกรดความร้อน และออกซิเจนพลาสมา เป็นต้น รวมทั้งการไฮบริดร่วมกันระหว่าง CNTs ที่ปรับปรุงสภาพผิวและเคลือบด้วยพอลิเมอร์ เพื่อนำไปใช้ในการตรวจวัดไอระเหยของเบนซีน จากนั้นจะนำก๊าซเซนเซอร์ที่ให้ค่าการตอบสนองทางไฟฟ้าที่ดีที่สุดมาทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยของเบนซีนต่อประสิทธิภาพการตรวจวัดสรุปงานวิจัยนี้ดังแสดงในภาพที่ 1

(a)



(b)



ภาพที่ 1 แสดงภาพสรุปงานวิจัยการพัฒนาตัวตรวจวัดไอระเหยเบนซีนจาก (a) CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ และ (b) CNTs ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยวิธีต่างๆ และเคลือบด้วยพอลิเมอร์

บทที่ 2

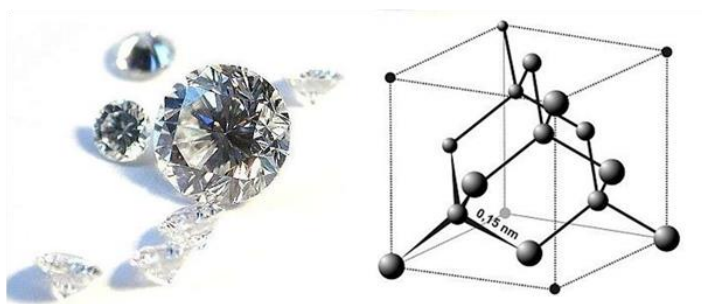
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชนิดและลักษณะทางโครงสร้างของคาร์บอน

คาร์บอนเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญและเป็นองค์ประกอบหลักของสิ่งมีชีวิตบนโลก แล้วคาร์บอนยังเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เพราะคาร์บอนเป็นแหล่งพลังงานให้กับมนุษย์ นอกจากนี้คาร์บอนยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอีกมากมาย เนื่องจากคาร์บอนเป็นธาตุที่มีการจัดเรียงตัวกันได้หลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบก็จะมีสมบัติแตกต่างกันออกไป โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

2.1.1 โครงสร้างแบบสามมิติ

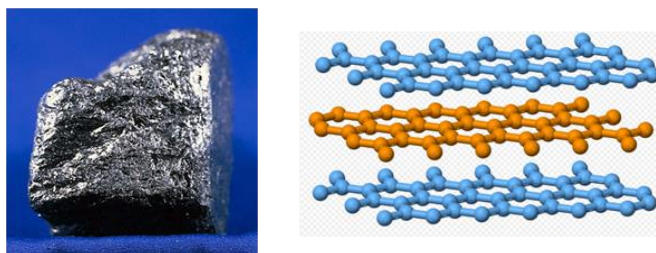
โครงสร้างรูปแบบนี้เกิดจากการยึดเหนี่ยวกันของอะตอมคาร์บอนด้วยพันธะโควาเลนต์ โครงสร้างรูปแบบนี้เกิดจากการยึดเหนี่ยวกันของอะตอมคาร์บอนด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ sp^3 ทำให้โครงสร้างแบบสามมิตินี้มีความแข็งแรงเป็นอย่างมากสามารถพบทั่วไปในรูปของเพชร จากโครงสร้างดังกล่าวจึงเป็นที่ยอมรับโดยทั่วกันว่าเพชรเป็นวัสดุที่แข็งแรงที่สุดและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มากมาย อาทิเช่น อุตสาหกรรมเครื่องประดับ อุปกรณ์ตัดเจาะวัสดุต่าง ๆ เป็นต้น ภาพที่ 2 แสดงลักษณะโดยทั่วไปและโครงสร้างของเพชร



ภาพที่ 2 ลักษณะ โดยทั่วไปและโครงสร้างของเพชร (<http://en.wikipedia.org/wiki/Diamond>)

2.1.2 โครงสร้างแบบสองมิติ

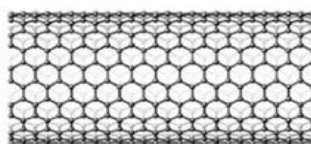
โครงสร้างแบบสองมิติมักมีลักษณะเป็นแผ่นของอะตอมคาร์บอนวางซ้อนทับกันในแนวระนาบ และยึดเหนี่ยวกับคาร์บอนอีกสามอะตอมด้วยพันธะโควาเลนต์ ส่วนพันธะที่เหลือจะยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals forces) โครงสร้างนี้จะพบว่าเป็น โครงสร้างของแกรไฟต์ดังแสดงในภาพที่ 3 หรือที่เราที่รู้จักกันดีอีกชื่อหนึ่งคือ ไม้ดินสอ



ภาพที่ 3 ลักษณะโดยทั่วไปและโครงสร้างของแกรไฟต์ (<http://en.wikipedia.org/wiki/Graphite>)

2.1.3 โครงสร้างแบบหนึ่งมิติ

มีลักษณะโครงสร้างเปรียบเสมือนแผ่นกราฟีนที่ม้วนตัวเข้าเป็นท่อ โดยท่อมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตรและมีขนาดความยาวของท่อในระดับไมโครเมตร เมื่อเปรียบอัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทำให้ดูเหมือนว่าเป็นเส้นยาวเมื่อเทียบกับความยาวของท่อในแนวหนึ่งมิติ เรียกว่า ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube, CNTs) ภาพที่ 4 แสดงลักษณะโครงสร้างของ CNTs

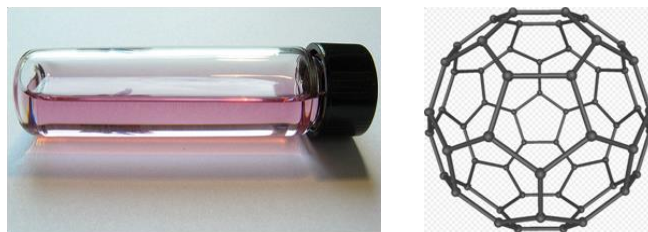


ภาพที่ 4 โครงสร้างของ CNTs (Iijima, 2002)

2.1.4 โครงสร้างแบบศูนย์มิติ

โครงสร้างแบบศูนย์มิติมักมีลักษณะเป็นก้อนเล็ก ๆ หรืออาจถือได้ว่าเป็นจุดที่ไม่มีมิติ หรือเป็นศูนย์มิติเรียกคาร์บอนที่มีลักษณะโครงสร้างแบบนี้ว่า ฟูลเลอรีน (Fullerene) ตัวอย่าง

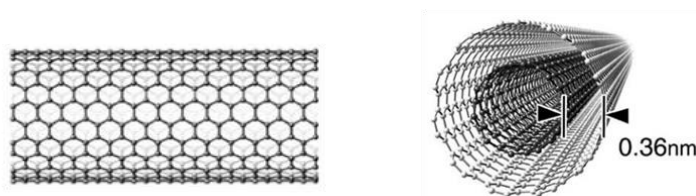
ของฟลูเลอรีนที่เป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ C_{60} หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า บักกี้บอล (Buckyballs) นอกจากนี้ยังมีฟลูเลอรีนแบบอื่น ๆ ได้แก่ C_{70} และ C_{80} เป็นต้น



ภาพที่ 5 ฟลูเลอรีนที่อยู่ในรูปของสารละลายและ โครงสร้างของฟลูเลอรีน
(<http://en.wikipedia.org/wiki/Fullerene>)

2.2 ท่อนาโนคาร์บอน

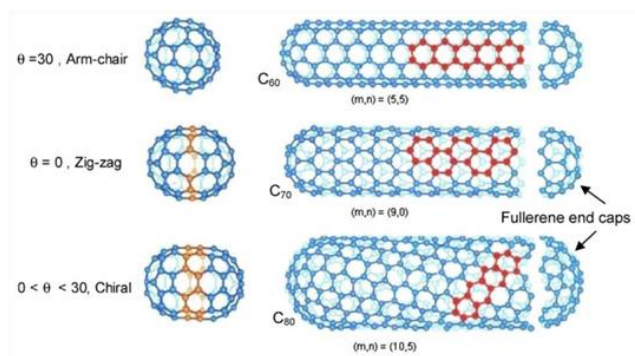
CNTs เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างระดับนาโนที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีสมบัติพิเศษเฉพาะตัว CNTs ถูกค้นพบโดย Iijima ซึ่งสังเคราะห์ด้วยวิธีอาร์คดิสชาร์จ (Iijima, 1991) โดยลักษณะทางโครงสร้างของ CNTs นั้นมีลักษณะคล้ายกับแผ่นกราฟีนม้วนตัวเข้าเป็นรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตร ขณะที่ความยาวอยู่ในระดับไมโครเมตร CNTs สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (Single-walled carbon nanotubes, SWNTs) ดังแสดงในภาพที่ 6 (ซ้าย) และท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes, MWCNTs) แสดงภาพที่ 6 (ขวา) โดยระยะห่างระหว่างชั้นของ MWNTs มีค่าเท่ากับ 0.34-0.36 นาโนเมตร ซึ่งค่าดังกล่าวสอดคล้องกับระยะห่างระหว่างชั้นของแกรไฟต์



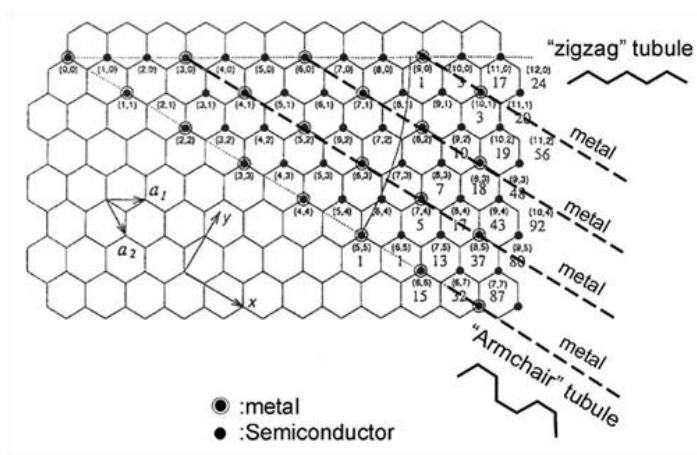
ภาพที่ 6 ลักษณะของ CNTs (ซ้าย) ผนังชั้นเดียว (ขวา) ผนังหลายชั้น (Iijima, 2002)

โครงสร้างของ CNTs ยังสามารถแบ่งได้ตามลักษณะจากการม้วนตัวเข้าของท่อ โดยแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ท่อแบบ Zigzag (n,0), Armchair (n,n) และ Chiral (n,m) ดังภาพที่ 7 โดยค่า

พิกัด (n,m) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกลักษณะว่า CNTs จะมีโครงสร้างเป็นรูปแบบใด นอกจากนี้การม้วนตัวเข้าของ CNTs นั้นยังมีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้า CNTs มีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งสารกึ่งตัวนำและโลหะพิจารณาจากพิกัด (n,m) ดังภาพที่ 8 CNTs จะมีสมบัติเป็นโลหะเมื่อค่าพิกัด $(n-m)/3$ มีค่าลงตัวพอดี หากค่าดังกล่าวไม่ลงตัว CNTs จะแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ



ภาพที่ 7 ลักษณะของ CNTs ของ Armchair (n,n) , Zigzag $(n,0)$ และ Chiral (n,m)
(Kalamkarov, Georgiades, Rokkam, Veedu, & Ghasemi-Nejhad, 2006)



ภาพที่ 8 แผ่นกราฟีนสองมิติที่แสดงพิกัด (n,m) (Lau & Hui, 2002)

2.3 สมบัติต่างๆ ของท่อนาโนคาร์บอน

2.3.1 สมบัติเชิงไฟฟ้า

CNTs มีสมบัติเป็นได้ทั้งสารกึ่งตัวนำและโลหะ ซึ่งเกิดจากการม้วนตัวของท่อตาม พิกัด (n,m) ที่ค่าแตกต่างกัน การคำนวณเชิงทฤษฎีของ CNTs ที่มีสมบัติเป็นโลหะพบว่ามีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงถึง 4×10^9 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (Hong & Myung, 2007) ซึ่งถือว่า มีค่ามากกว่าโลหะชนิดอื่น ๆ เช่น ทองแดง มากกว่าถึง 1,000 เท่า

2.3.2 สมบัติเชิงความร้อน

CNTs มีความสามารถนำความร้อนได้ดีมาก สภาพการนำความร้อนของ CNTs ตามแนวแกนท่อที่อุณหภูมิห้องพบว่ามีความสูงถึง 3,500 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (Pop, Mann, Wang, Goodson, & Dai, 2006) ในขณะที่ทองแดงมีค่าสภาพนำความร้อนเท่ากับ 38 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน เห็นได้ CNTs มีค่าสภาพการนำความร้อนได้ดีกว่าทองแดงถึง 9 เท่า

2.3.3 สมบัติเชิงกล

CNTs ถือว่าเป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่มีความแข็งแรงสูง สามารถคงรูปได้ดี มีค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และค่าการยืดตัวที่จุดขาด (Elongation at break) ที่สูง ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของท่อนาโนคาร์บอนแบบต่าง ๆ และวัสดุชนิดอื่น

(http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube)

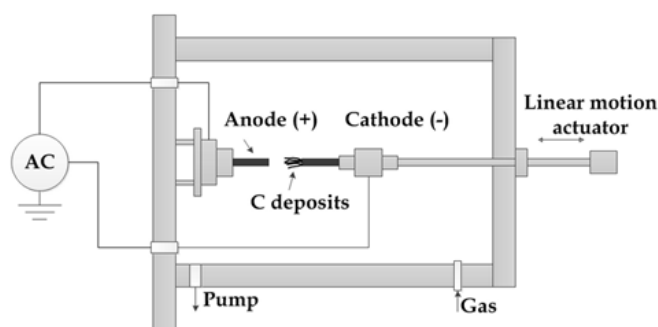
Material	Young's modulus (TPa)	Tensile strength (GPa)	Elongation at break (%)
CNTs	1-5	15-53	16
Armchair SWNTs	0.94	126.2	23.1
Zigzag SWNTs	0.94	94.5	15.6-17.5
Chiral SWNT	0.92	-	-
MWNTs	0.2-0.95	11-150	-
Stainless steel	0.186-0.214	0.38-1.55	15-50

2.4 เทคนิคการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

เทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์ CNTs มีเทคนิคหลัก ๆ ด้วยกัน 3 วิธี โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1 วิธีอาร์คคิสซาร์จ (Arc discharge)

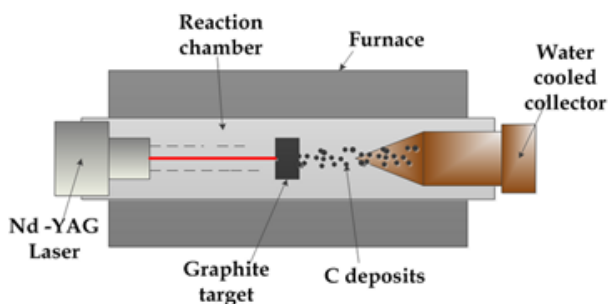
การสังเคราะห์ CNTs ด้วยวิธีอาร์คคิสซาร์จ (Iijima, 1991) เป็นวิธีแรกเริ่มในการสังเคราะห์ CNTs ซึ่งเดิมเป็นวิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟูลเลอร์ริน เทคนิคนี้สังเคราะห์โดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแท่งแกรไฟต์ ภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อยเช่นฮีเลียมหรืออาร์กอน เกิดการควบแน่นและก่อตัวเป็น CNTs ที่ขั้วคาโทด การควบคุมปริมาณและคุณภาพของ CNTs ขึ้นอยู่กับการควบคุมความดัน อุณหภูมิ และความสม่ำเสมอของสถานะพลาสมา ซึ่ง CNTs ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะสามารถเกิดเป็น CNTs ได้ทั้งแบบผนังชั้นเดียวและผนังหลายชั้น จะขึ้นอยู่กับการเติมโลหะคะตะลิสต์เช่น เหล็ก นิกเกิล และ โคบอลต์ให้กับแท่งแกรไฟต์ภาพที่ 9 แสดงระบบการสังเคราะห์ CNTs ด้วยวิธีอาร์คคิสซาร์จ



ภาพที่ 9 ระบบวิธีอาร์คคิสซาร์จ (Yellampalli, 2011)

2.4.2 วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser vaporization)

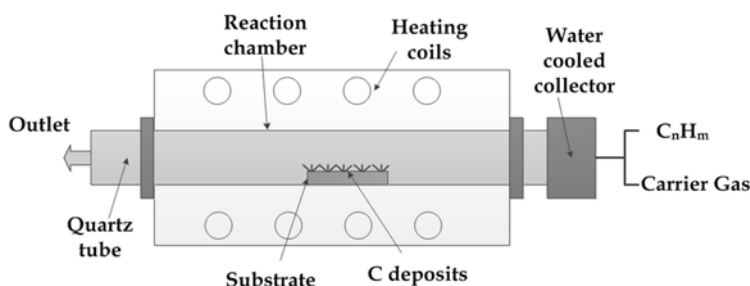
การสังเคราะห์ CNTs ด้วยวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Guo, Nikolaev, Thess, Colbert, & Smalley, 1995) เป็นการทำให้เป้าแกรไฟต์ที่ผสมกับโลหะคะตะลิสต์กลายเป็นไอโดยใช้ลำเลเซอร์ที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสและใช้แก๊สเฉื่อยผ่านเข้าไปในระบบเพื่อที่จะพา CNTs ไปเก็บที่บริเวณต้องการการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้ CNTs ที่ได้มีปริมาณและคุณภาพที่ดีกว่าแบบวิธีอาร์คคิสซาร์จ แต่มีข้อเสียคือมีค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ที่ค่อนข้างสูงกว่า เนื่องจากการใช้แหล่งกำเนิดที่เป็นเลเซอร์ที่มีราคาแพง ภาพที่ 10 ระบบวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์



ภาพที่ 10 ระบบวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Yellampalli, 2011)

2.4.3 วิธีการเคลือบไอระเหยทางเคมี (Chemical vapor deposition)

เทคนิคการสังเคราะห์ CNTs อีกวิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ การเคลือบไอระเหยทางเคมี ทำโดยการปล่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอน อาทิเช่น มีเทน (Kong, Cassell, & Dai, 1998), อะเซทีลีน (Lee, Park, & Yu, 2002) และเอทานอล (Muangrat, Porn heeraphat, & Wongwiryapan, 2013) เป็นต้น เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนเข้าไปภายในเตาเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 700-1000 องศาเซลเซียส สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดการแตกตัวเป็นอะตอมคาร์บอน และเกิดเป็น CNTs วิธีการเคลือบไอระเหยทางเคมีสามารถควบคุมลักษณะของ CNTs ได้โดยการควบคุมชนิดและสัดส่วนสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และอัตราการไหลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ฯลฯ ภาพที่ 11 ระบบการเคลือบไอระเหยทางเคมี



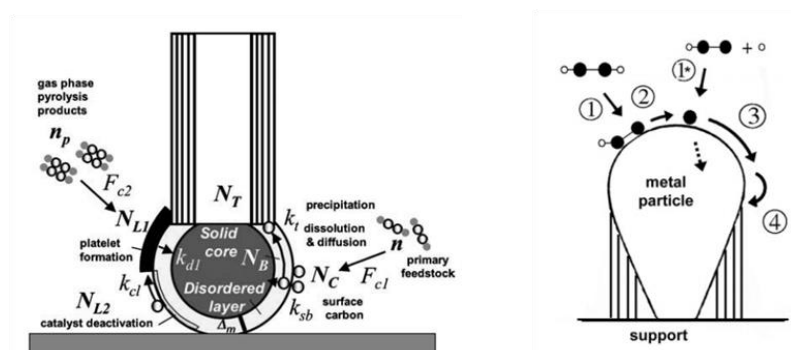
ภาพที่ 11 ระบบการเคลือบไอระเหยทางเคมี (Yellampalli, 2011)

2.5 กลไกการเกิดท่อนาโนคาร์บอน

ทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายรูปแบบขั้นตอนการเกิดของ CNTs ที่เป็นที่ยอมรับในปัจจุบันนั้น มีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ วิธีแบบ base growth กับ tip growth โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 Base growth อธิบายการเกิด CNTs ในกรณีที่อันตรกิริยาระหว่างคะตะลิสต์กับตัวรองรับมีค่าสูง เมื่ออะตอมของคาร์บอนแตกตัวและตกแพร่ลงบนคะตะลิสต์แล้ว อะตอมคาร์บอนจะรวมตัวกันที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของคะตะลิสต์ จากนั้นจะค่อย ๆ ก่อตัวขึ้นเป็น CNTs และค่อย ๆ ยาวออกไป (Poretzky, Geohegan, Jesse, Ivanov, & Eres, 2005) ดังภาพที่ 12 (ซ้าย)

2.5.2 Tip growth เป็นกลไกที่ใช้อธิบายในกรณีที่อันตรกิริยาระหว่างคะตะลิสต์กับตัวรองรับมีค่าต่ำ เมื่ออะตอมคาร์บอนตกแพร่ลงบนผิวคะตะลิสต์อะตอมคาร์บอนบางส่วนเคลื่อนตัวไปที่บริเวณรอยต่อระหว่างคะตะลิสต์กับตัวรองรับ เนื่องด้วยค่าอันตรกิริยาระหว่างคะตะลิสต์กับตัวรองรับมีค่าต่ำ ดังนั้นอะตอมของคาร์บอนจึงแทรกตัวเข้าไปยังบริเวณรอยต่อดังกล่าวได้ และเกิด CNTs ที่บริเวณนั้น CNTs ที่เกิดขึ้นจะค่อย ๆ ดันคะตะลิสต์ขึ้นไปด้านบน (Hofmann, Csanyi, Ferrari, Payne, & Robertson, 2005) ดังภาพที่ 12 (ขวา)



ภาพที่ 12 กลไกการเกิด CNTs แบบ (ซ้าย) Base growth (Poretzky et al., 2005)

(ขวา) Tip growth (Hofmann et al., 2005)

2.6 องค์ประกอบและนิยามของเซนเซอร์เคมี

เซนเซอร์เคมีเป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการรับรู้ก๊าซที่เข้ามาสัมผัสและตอบสนองออกมาในรูปของการเปลี่ยนแปลงทางสัญญาณ สามารถตรวจวัดสารเคมีได้ทั้งที่เป็นของเหลวหรือก๊าซ หลักการทำงานของเซนเซอร์เคมีประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ การรับรู้หรือการจดจำ และการแปลงออกมาเป็นรูปแบบสัญญาณ กล่าวคือ เมื่อมีสารเคมีผ่านเข้ามายังเซนเซอร์เคมีจะเกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารเคมีกับตัวเซนเซอร์ โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะถูกแปลงออกมาให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า อาทิ เช่น ค่าความต้านทานไฟฟ้า ความนำไฟฟ้า หรือความจุไฟฟ้า เป็นต้น

2.6.1 วิธีการจดจำ (Recognition methods)

2.6.1.1 หลักการทั่วไป

วิธีการจำถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานด้านเคมีเซนเซอร์อย่างกว้างขวางสามารถอธิบายรูปแบบการจำที่เกิดขึ้นด้วยสมการที่ (1) โดยที่ A คือ สารที่ต้องการวิเคราะห์ (Analyte), R คือ ตัวรับรู้การจำ (Recognition receptor) และ P คือ ผลิตภัณฑ์ของอันตรกิริยาระหว่างตัวรับรู้กับสารที่วิเคราะห์



ลูกศรคู่แสดงถึงกระบวนการรับรู้ที่สามารถเกิดเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ที่สมดุล โดยความสามารถย้อนกลับได้ของกระบวนการจำ เกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์ P ซึ่งเกี่ยวข้องกับพันธะไอออนิก (Ionic bond), พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) และอันตรกิริยาแวนเดอร์วาลส์ นอกจากนี้การอธิบายกระบวนการจำนั้น สามารถอธิบายด้วยค่าคงที่ K_A ในสมการที่ (2)

$$K_A = \frac{c_P}{c_A c_R} \quad (2)$$

โดยที่ c คือ ค่าความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ โดยที่ค่าคงที่แสดงถึงความสามารถของตัวรับรู้กับสารที่ต้องการจะวิเคราะห์ ซึ่งค่าคงที่ที่มีค่าสูง หมายถึง มีความสามารถในการดึงดูดที่สูง อีกสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการจดจำก็คือ ความสามารถในการจำแนกสารที่ตรวจวัด (Selectivity) เป็นความสามารถของเซนเซอร์ที่ตอบสนองต่อสารที่ต้องการจะตรวจวัดจริง ๆ แต่จะไม่ตอบสนองกับสารที่ไม่ต้องการตรวจวัดรูปแบบอันตรกิริยาระหว่างตัวรับรู้กับสิ่งรบกวน (B) ถูกแสดงในสมการที่ (3)



ความชอบของตัวรับรู้กับสารชนิด B ถูกแสดงโดยค่าคงที่สมดุลดังสมการที่ (4)

$$K_B = \frac{c_Q}{c_B c_R} \quad (4)$$

ความสามารถในการจำแนกของเซนเซอร์ต่อสารที่ต้องการวิเคราะห์ คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่าง K_A กับ K_B โดยที่ค่าจำแนกที่ดีควรมีค่า $K_A/K_B \gg 1$

2.6.1.2 การดูดซับไอระเหยและก๊าซ

การตรวจวัดก๊าซและไอระเหยเป็นเรื่องที่ได้รับความสนใจเป็นเชิงกว้าง รวมทั้งการเฝ้าระวังคุณภาพอากาศ การควบคุมไอระเหยและก๊าซพิษในโรงงานอุตสาหกรรม วิธีการจดจำโดยทั่วไปสำหรับก๊าซและไอระเหยอยู่บนพื้นฐานของการดูดซับที่พื้นผิวหรือภายในวัสดุแข็งสำหรับการจดจำ มีการใช้วัสดุอย่างหลากหลายในการจดจำขึ้นอยู่กับเป้าหมายสารประกอบ วัสดุที่ถูกนำมาใช้ อาทิเช่น โลหะ วัสดุพอลิเมอร์ หรือ วัสดุอนินทรีย์ การดูดซับสามารถเป็นได้ทั้งแบบการดูดซับเชิงกายภาพ (Physisorption) หรือการดูดซับเชิงเคมี (Chemisorption)

2.6.2 วิธีการแปลง (Transduction)

2.6.2.1 หลักการทั่วไป

วิธีการแปลงสัญญาณแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ การแปลงสัญญาณเชิงเคมี และเชิงกายภาพ ซึ่งการแปลงสัญญาณเชิงเคมีจะใช้การเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตรวจวัดกับสารวิเคราะห์ เพื่อที่จะสร้างรูปแบบการตอบสนองหรือการจดจำเหล่านั้น กล่าวได้ว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (หรือจำนวน) ของผลิตภัณฑ์ที่ถูกวัด ในส่วนของการแปลงสัญญาณเชิงกายภาพนั้น จะพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุตรวจวัดที่ตอบสนองกับสารวิเคราะห์ โดยทั่วไปวิธีการแปลงสัญญาณเชิงกายภาพจะอยู่บนพื้นฐานของการวัดมวลดัชนีหักเห สมบัติไดอิเล็กทริก หรือสภาพต้านทานทางไฟฟ้า เป็นต้น

2.6.2.2 การแปลงสัญญาณความต้านทานและความจุไฟฟ้า

อันตรกิริยาระหว่างสารวิเคราะห์กับวัสดุตรวจวัดจะถูกแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปของสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ตัวอย่างเช่น การตรวจวัดก๊าซด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดโลหะออกไซด์ เมื่อวัสดุตรวจวัดสัมผัสก๊าซและเกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานทางไฟฟ้า กล่าวได้ว่าเป็นการแปลงสัญญาณเชิงความต้านทาน

นอกจากนี้ยังสมบัติอื่น ๆ ที่นำมาใช้ในกระบวนการจดจำ ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก สมบัติค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสามารถนำมาประยุกต์ในวัสดุเพื่อใช้ในกระบวนการจดจำในรูปของโครงสร้างตัวเก็บประจุและการวัดค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ หรือที่เรียกว่าการแปลงสัญญาณเชิงความจุ

2.7 การพัฒนาตัวตรวจวัดไอระเหยอะโรมาติกจากท่อไอคาร์บอน

2.7.1 วิธีการตรวจวัดไอระเหยอะโรมาติกในปัจจุบัน

การตรวจวัดไอระเหยอะโรมาติก มีความสำคัญเนื่องจากสารอะโรมาติกนั้นเป็นสารเคมีหลักที่ใช้มากโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมทางเคมีและปิโตรเลียม จากการเจริญเติบโตทางอุตสาหกรรมทำให้มีโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้นมีการใช้สารเคมีในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น และอาจมีความเสี่ยงของการรั่วไหลของสารเคมีออกสู่ภายนอกจนอาจก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ สารอะโรมาติกที่พบมากชนิดหนึ่งคือเบนซีนการได้รับไอระเหยเบนซีนที่มากเกินไป ทำให้ก่ออาการพิษเฉียบพลันและพิษเรื้อรังได้ และยังเป็นสารก่อมะเร็ง ก่อให้เกิดโรคมะเร็งในเม็ดเลือดขาว มาตรฐานค่าไอระเหยเบนซีนในบรรยากาศโดยทั่วไปแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 มาตรฐานค่าไอระเหยเบนซีนในบรรยากาศโดยทั่วไป

ประเทศ	ระยะเวลา	ค่ากำหนดไม่เกิน [ppm ^{*1}]
ไทย	เฉลี่ยต่อปี	1.7 ppm ^[1]
	เฉลี่ยในเวลา 24 ชั่วโมง	7.6 ppm ^[1]
ญี่ปุ่น	เฉลี่ยต่อปี	0.003 ppm ^[2]
อเมริกา OSHA ^{*2}	เฉลี่ยในเวลา 8 ชั่วโมง	1.0 ppm ^[3]
อเมริกา ACGIH ^{*3}	เฉลี่ยในเวลา 8 ชั่วโมง	0.5 ppm ^[3]
อเมริกา NIOSH ^{*4}	เฉลี่ยในเวลา 10 ชั่วโมง	0.1 ppm ^[3]
อังกฤษ	เฉลี่ยในเวลา 8 ชั่วโมง	3 ppm ^[3]
ฝรั่งเศส	เฉลี่ยในเวลา 8 ชั่วโมง	1 ppm ^[3]
เยอรมัน	เฉลี่ยในเวลา 8 ชั่วโมง	1 ppm ^[3]
ออสเตรเลีย	เฉลี่ยในเวลา 8 ชั่วโมง	1 ppm ^[3]

*1 ppm: parts per million (mg/m³)

*2 OSHA: Occupational Safety and Health Administration

*3 ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists

*4 NIOSH: National Institute for Occupational Safety and Health

ที่มา [1] http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_airsnd01.html

[2] <https://www.env.go.jp/kijun/taiki3.html>

[3] <http://www.raesystems.com/sites/default/files/downloads/benzene-application-note.pdf>

การตรวจวิเคราะห์ไอระเหยเบนซีน สามารถทำการตรวจวัดได้หลายวิธี อาทิเช่น Semiconductor or metal oxide sensors, Gas chromatography/mass spectrography techniques (GC/MS), Portable GC, Photoionization detectors และ High performance liquid chromatography (HPLC) เป็นต้น แต่ละวิธีต่างมีจุดแข็งและจุดด้อยที่แตกต่างกันไป ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบการตรวจวัดไอระเหยเบนซีนของแต่ละเทคนิค

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียการตรวจวัดไอระเหยเบนซีนของแต่ละเทคนิค

เทคนิค	ข้อดี	ข้อเสีย
Semiconductor or Metal oxide sensors	<ul style="list-style-type: none"> • ราคาไม่แพง • ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแบบพกพา 	<ul style="list-style-type: none"> • ไม่มีความจำเพาะเจาะจงในการวัดชนิดของไอระเหย นอกจากประกอบเป็นระบบเซนเซอร์อะเรย์ • ค่า sensitivity ไม่เพียงพอต่อมาตรฐานการตรวจวัด • เวลาการตอบสนองช้า • มีผลกระทบจากความชื้นและอุณหภูมิจากสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ • ทำงานภายใต้อุณหภูมิสูง (>300 องศาเซลเซียส)
Colorimetric gas detection tube	<ul style="list-style-type: none"> • ราคาไม่แพง 	<ul style="list-style-type: none"> • ใช้แล้วทิ้ง • ไม่สามารถทำการวิเคราะห์และมอนิเตอร์ได้อย่างต่อเนื่อง

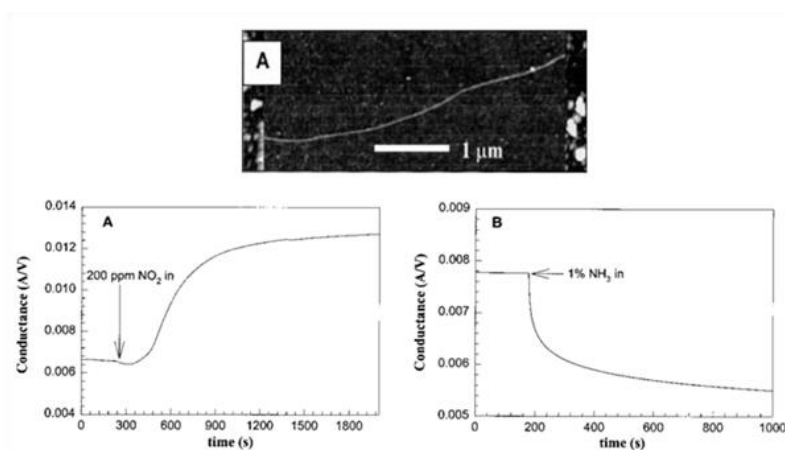
เทคนิค	ข้อดี	ข้อเสีย
		<ul style="list-style-type: none"> • เกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย ค่าความถูกต้องแม่นยำ $\pm 25\%$ • เวลาการตอบสนองช้า
GC-MS และ HPLC	<ul style="list-style-type: none"> • มีความจำเพาะเจาะจงในการวัดชนิดของไอระเหย • วัดในระดับความเข้มข้นที่มาตรฐานกำหนดได้ 	<ul style="list-style-type: none"> • ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญและระยะเวลาในการวิเคราะห์ • ไม่สามารถทำการวิเคราะห์และมอนิเตอร์ได้อย่างต่อเนื่อง • ไม่สามารถพกพาได้ • ราคาแพง
Portable GC system	<ul style="list-style-type: none"> • มีความจำเพาะเจาะจงในการวัดชนิดของไอระเหย • วัดในระดับความเข้มข้นที่มาตรฐานกำหนดได้ 	<ul style="list-style-type: none"> • ขนาดใหญ่และหนักที่จะใช้ในพื้นที่แคบ • เครื่องมือค่อนข้างซับซ้อน • เวลาในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ใช้เวลา 5-10 นาที • ราคาแพง
Photo ionization detector(PID)	<ul style="list-style-type: none"> • วัดในระดับความเข้มข้นที่มาตรฐานกำหนดได้และยังสามารถวัดในหลายระดับความเข้มข้น ตั้งแต่ระดับ parts per billion จนถึง 15000 ppm • เวลาการตอบสนองไว 	<ul style="list-style-type: none"> • อุปกรณ์บางส่วนใช้งานแล้วต้องทิ้ง ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ • ราคาแพง

ในปัจจุบันความต้องการก๊าซเซนเซอร์สำหรับการพกพา และการวัดในสถานที่ทำงานมีเพิ่มมากขึ้น โดยก๊าซเซนเซอร์นั้นควรมีความไวในการวัด ความจำเพาะเจาะจงในชนิดของ

ไอร่หะย ความเสถียร ใช้พลังงานต่ำ ที่สำคัญควรมีราคาถูก และสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ โดยในปัจจุบันได้มีการพัฒนาก๊าซเซนเซอร์ประเภทสารกึ่งตัวนำหรือเซ็นเซอร์ของโลหะออกไซด์เพิ่มมากขึ้นเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้งานดังที่กล่าวข้างต้นได้

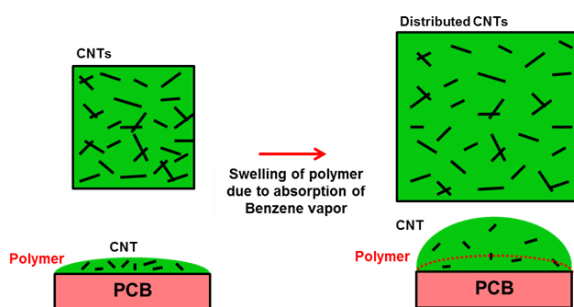
2.7.2 การใช้ท่อนาโนคาร์บอนในการตรวจวัดก๊าซชนิดต่าง ๆ

CNTs เป็นวัสดุระดับนาโนเมตรที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางและมีสมบัติพิเศษทั้งสมบัติเชิงไฟฟ้า ภายภาพ เชิงกล และเคมีที่ดี สามารถนำไปใช้พัฒนาเป็นอุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ ได้ โดยเฉพาะสมบัติเชิงกายภาพและไฟฟ้าของ CNTs ทำให้ CNTs ได้รับความนิยมที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านก๊าซเซนเซอร์ เนื่องจากมีลักษณะทางโครงสร้างที่เหมาะสมแก่การนำไปตรวจวัดก๊าซ อันได้แก่ มีพื้นที่ผิวสูง มีความไวต่อก๊าซชนิดต่าง ๆ สามารถทำงานอุณหภูมิห้องได้ งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการนำ CNTs มาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ใช้ในการตรวจวัดก๊าซชนิดต่าง ๆ ได้แก่ คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO), ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂), แอมโมเนีย (NH₃) และอื่น ๆ รวมไปถึงสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compound, VOCs) อาทิเช่น Dichloromethane, Chloroform เป็นต้น ภาพที่ 13 แสดงตัวอย่างก๊าซเซนเซอร์ CNTs และผลการตรวจวัดก๊าซ NO₂ และ NH₃ ที่นำเสนอในช่วงวิจัยเริ่มต้น โดยกลุ่มวิจัยของมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ดเป็นการสาธิตการใช้ CNTs ในการตรวจวัดก๊าซ NO₂ และ NH₃ (Kong et al., 2000) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า CNTs มีความสามารถในการตรวจวัดก๊าซทั้ง NO₂ และ NH₃ ได้



ภาพที่ 13 ตัวอย่างก๊าซเซนเซอร์ CNTs และผลการตรวจวัดก๊าซ NO₂ และ NH₃ ที่นำเสนอในช่วงวิจัยเริ่มต้น (Kong et al., 2000)

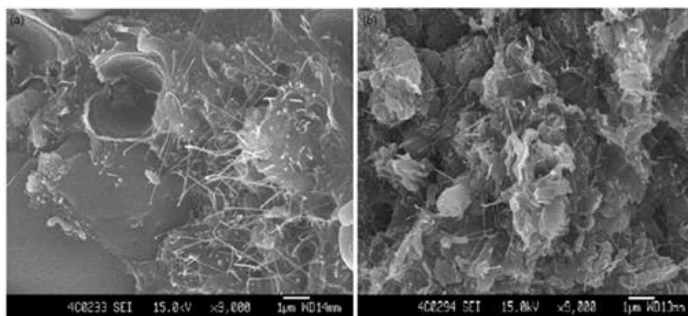
ในส่วนองงานวิจัยเชิงทฤษฎีและเชิงการทดลองก่อนหน้าี้ ยังมีงานวิจัยเกี่ยวกับ ก๊าซเซนเซอร์ CNTs ทั้งชนิดแบบ SWNTs และ MWNTs ในการตรวจวัดไอรเหยเบนซินไม่ มากนัก พบว่าก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs ไม่ตอบสนองต่อไอรเหยเบนซิน เนื่องจากมีค่า อันตรกิริยาที่ต่ำระหว่าง โมเลกุลเบนซินกับ CNTs อย่างไรก็ตามพบว่าหากนำ CNTs มาใช้งาน ร่วมกับพอลิเมอร์จะทำให้มีความสามารถตรวจวัดไอรเหยเบนซินได้ดีขึ้น อาทิเช่น พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) โดยเตรียมสารผสมของ PS และ MWNTs (PS/MWNTs) ด้วยวิธี พอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) และสารละลายผสม (Solution mixing) พบว่าการเตรียมด้วยวิธี พอลิเมอร์ไรเซชัน นั้น มีการกระจายตัวของ MWNTs ในเมทริกซ์ PS ได้ดีกว่าแบบสารละลายผสม เนื่องจากปริมาณของ MWNTs ที่ใช้น้อยกว่าและเพียงพอที่จะสร้างส่วนของตัวนำ เมื่อนำไป ทดสอบตรวจวัดไอรเหยเบนซินพบว่า PS/MWNTs ที่เตรียมด้วยวิธีพอลิเมอร์ไรเซชัน ให้ผลการ ตอบสนองที่ดีกว่ากลไกการตอบสนองอธิบายได้ด้วยหลักการพองตัว (swelling) ออกของ MWNTs ดังแสดงในภาพที่ 14 ในเมทริกซ์ PS เกิดการเคลื่อนที่ออกห่างจากกัน MWCNTs ในเมทริกซ์ PS ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สามารถตอบสนองกับไอรเหยเบนซินได้ ภาพที่ 15 แสดงภาพตัวอย่าง SEM ของ PS/MWNTs ที่เตรียมด้วยวิธีพอลิเมอร์ไรเซชันและสารละลายผสม (Zhang et al., 2005)



top & cross section view

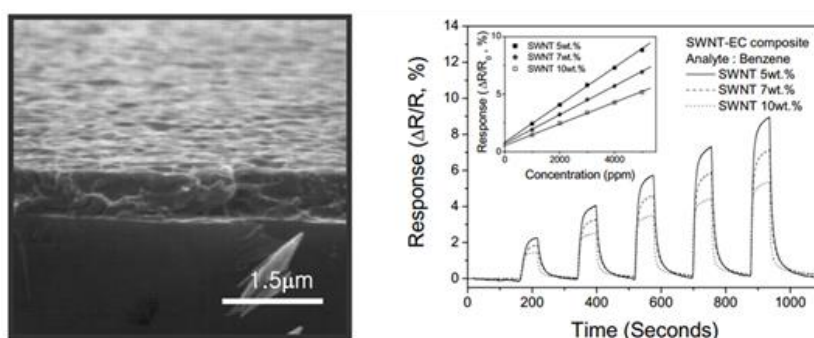
- swelling of Polymer
- volume expansion
- increase in distance between adjacent CNTs
- increase resistance of Polymer/CNTs

ภาพที่ 14 กลไกการการตอบสนองต่อไอรเหยเบนซินของก๊าซเซนเซอร์ CNTs



ภาพที่ 15 ตัวอย่างภาพ SEM ของ PS/MWNTs ที่เตรียมด้วยวิธี (a) Solution mixing และ (b) Polymerization (Zhang et al., 2005)

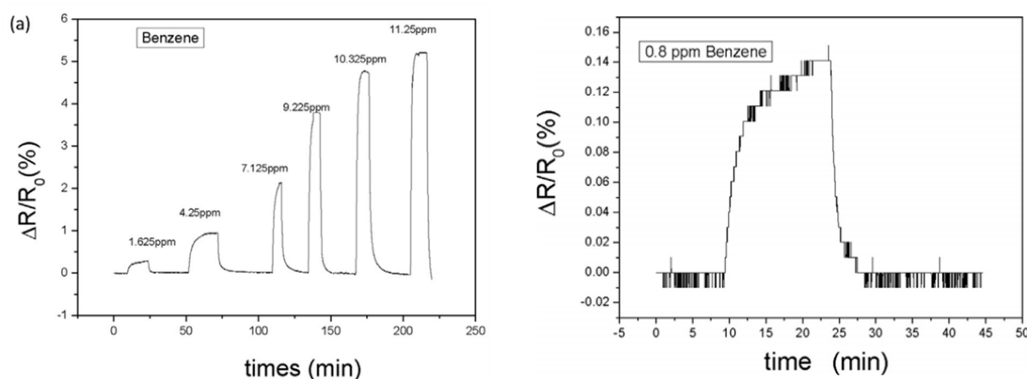
อีกทั้งยังได้มีการศึกษาการนำเอทิลเซลลูโลส (Ethyl cellulose, EC) มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับ SWNTs โดยศึกษาปริมาณของ SWNTs ที่เติมลงไปในเมทริกซ์ของ EC ที่มีผลต่อการตรวจวัดไอระเหยเบนซีนโดยใช้ทฤษฎีเฟอร์โรโคเลชัน จากนั้นทำการตรวจวัดเบนซีนในช่วงความเข้มข้น 1000-5000 ppm แก๊สเซนเซอร์ EC/SWNTs มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อสัมผัสกับไอระเหยของเบนซีน เนื่องจากเกิดการพองตัวของ EC ส่งผลให้ SWNTs ที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ EC เคลื่อนที่ออกจากกัน เป็นผลทำให้มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งยังพบว่าการผสม SWNTs ที่ปริมาณ 5 wt% ในเมทริกซ์ EC นั้น ให้ค่าการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนได้ดีที่สุด มีค่าประมาณ 9% ที่ระดับความเข้มข้น 5000 ppm ภาพที่ 16 แสดงภาพ SEM ของ EC/SWNTs ที่มีปริมาณ CNTs 5 wt% ในเมทริกซ์ EC และผลการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนของ EC/CNTs ที่มีปริมาณ SWNTs ต่างกัน (Cho, Kim, Kim, Yang, & Ha, 2004)



ภาพที่ 16 ภาพ SEM ของ EC/SWNTs ที่มีปริมาณ CNTs 5wt% ในเมทริกซ์ EC และผลการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนของ EC/CNTs (Cho et al., 2004)

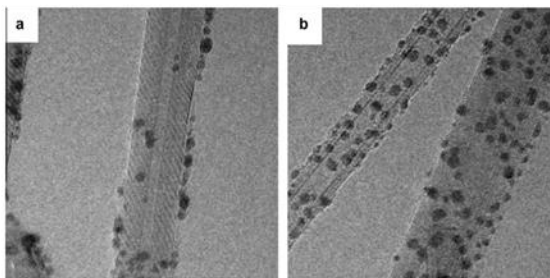
นอกจากนี้ยังมีตัวอย่างงานวิจัยที่มีการศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิคออกซิเจนพลาสมาและนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดก๊าซชนิดต่าง ๆ เทคนิคออกซิเจนพลาสมา เป็นอีกหนึ่งวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการกัดหรือปรับปรุงสภาพพื้นผิววัสดุให้มีสมบัติตามความต้องการการปรับปรุงพื้นผิววัสดุด้วยเทคนิคออกซิเจนพลาสมานั้นจะกระทำในแชมเบอร์ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่ความดันต่ำ ทำการปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าไปภายในแชมเบอร์ และทำการผลิตพลาสมาออกซิเจนโดยการใช้ความถี่คลื่นวิทยุ (Radio frequency) หรือความร้อน เพื่อทำให้เกิดสถานะที่เป็นพลาสมาของออกซิเจน ออกซิเจนพลาสมาที่เกิดขึ้นจะทำการกัดผิวพื้นของวัสดุ รวมไปถึงการสร้างหมู่ฟังก์ชันกับผิววัสดุดังกล่าวได้อีกด้วย

Hafaiedh et al. (2013) ได้วิจัยเกี่ยวกับการสร้างหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนให้กับ MWNTs ด้วยเทคนิคออกซิเจนพลาสมาทรีตเมนต์ (Oxygen plasma treatment) เพื่อนำไปใช้ตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่าง ๆ ได้แก่ โทลูอิน เบนซีน อะซีโตน เมทานอล และเอทานอล ที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างที่ผ่านการทำออกซิเจนพลาสมาแล้ว จะถูกนำไปเคลือบลงบนแผ่นรองรับอะลูมินา (Alumina) ที่ประกอบด้วยหัวทองแบบอินเตอร์ดิเจคต์ด้วยวิธี Air-brushing เพื่อใช้เป็นเซนเซอร์ ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าหมู่ฟังก์ชันของกลุ่มไฮดรอกซิล คาร์บอกซิล และคาร์บอนิล ที่พื้นผิวของ MWNTs ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ดียิ่งขึ้นกว่าเดิม ซึ่งได้แก่ กลุ่มอะโรมาติกสารอินทรีย์ระเหยง่าย (โทลูอิน และเบนซีน) และกลุ่มแอลกอฮอล์ (อะซีโตน เมทานอล และ เอทานอล) การดูดซับระหว่าง MWNTs ที่ถูกสร้างหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนกับไอระเหยชนิดต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ด้วยการดูดซับเชิงกายภาพ (Physisorption) กับกลุ่มอะโรมาติกสารอินทรีย์ระเหยง่าย และการดูดซับเชิงเคมี (Chemisorption) กับกลุ่มแอลกอฮอล์ ส่งผลให้เกิดรูปแบบการตอบสนองกับไอระเหยที่แตกต่างกันนอกจากนี้ยังสามารถจำแนกกลุ่มอะโรมาติกสารอินทรีย์ระเหยง่าย และกลุ่มแอลกอฮอล์ได้ออกจากกันได้โดยการใช้ความสัมพันธ์ของค่าความเร็วในการตรวจวัด (Response time) ของสารระเหยกลุ่มต่าง ๆ ได้อีกด้วย ภาพที่ 17 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนของเซนเซอร์จาก MWNTs ที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา

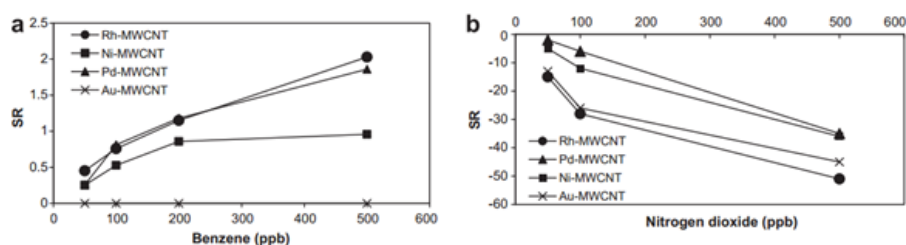


ภาพที่ 17 ผลการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนของเซนเซอร์จาก MWNTs ที่การผ่านการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา (Hafaiedh et al., 2013)

Leghrib et al. (2010) ได้วิจัยเกี่ยวกับการศึกษาการนำ MWNTs มาทำการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาและนำไปตกแต่งด้วยอนุภาคโลหะนาโนชนิดต่าง ๆ ได้แก่ โรเดียม (Rh), พาราเดียม (Pd), ทอง (Au) และ นิกเกิล (Ni) ด้วยเทคนิคการพ่นสารละลายคอลลอยด์โลหะ (Spray metal colloid solution) และ การทำให้เป็นไระเหย (Evaporation) พบว่า อนุภาคโลหะนาโนสามารถยึดเกาะที่ผนังท่อและมีการกระจายตัวบน MWNTs ที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาได้ดีกว่า MWNTs ที่ไม่ได้ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา เมื่อศึกษาการนำไปตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนในช่วงความเข้มข้น 50-500 ppb พบว่า Rh/MWNTs, Pd/MWNTs และ Ni/MWNTs สามารถตรวจวัดเบนซีน โดยมีค่าการตอบสนองตามลำดับดังนี้ $Rh/MWNTs > Pd/MWNTs > Ni/MWNTs$ ในขณะที่ Au/MWNTs ไม่ตอบสนองต่อการตรวจวัดเบนซีน ในส่วนของการตรวจวัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์พบว่ามีค่าการตอบสนองตามลำดับดังนี้ $Rh/MWNTs > Au/MWNTs > Ni/MWNTs > Pd/MWNTs$ ภาพที่ 18 แสดงภาพ TEM ของ MWNTs ที่ตกแต่งอนุภาคนาโนของ Pd และภาพที่ 19 แสดงตัวอย่างของ MWNTs ที่ใช้ในการงานวิจัยและผลการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนและไนโตรเจนไดออกไซด์



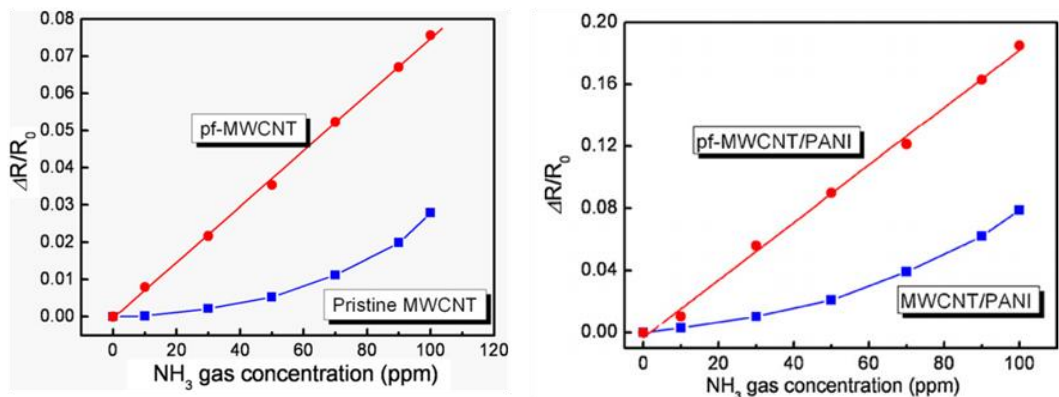
ภาพที่ 18 ภาพ TEM ของ MWNTs ที่ตกแต่งอนุภาคนาโนของ Pd (a) ไม่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วย ออกซิเจนพลาสมา (b) ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา (Leghrib et al., 2010)



ภาพที่ 19 ผลการตรวจวัดก๊าซของ MWNTs ที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาและ นำไปตกแต่งด้วยอนุภาคโลหะนาโนชนิดต่างๆ (a) เบนซีนและ (b) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (Leghrib et al., 2010)

ต่อมา Yoo et al. (2009) ได้พัฒนาก๊าซเซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดแอมโมเนียโดยการใช้คอมโพสิตร่วมกันระหว่าง MWNTs แบบที่ทำและไม่ได้ทำการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา กับพอลิอะนิลีน Polyaniline (PANI) โดย MWNTs จะถูกปลูกลงบนแผ่นรองรับ จากนั้น MWNTs จะถูกทำการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา ที่ช่วงเวลา 0-90 นาที จากนั้นทำการเคลือบด้วย PANI ลงบน MWNTs ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า MWNTs ที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดก๊าซแอมโมเนียได้ดีกว่า pristine MWNTs ซึ่งไม่ได้รับการทรีตเมนต์ ในกรณีของการคอมโพสิตร่วมกันกับ PANI ก็มีลักษณะแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือ MWNTs ที่ผ่านการทำทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาและนำไปคอมโพสิตกับ PANI สามารถตรวจวัดแอมโมเนียได้ดีกว่า สาเหตุดังกล่าวมาจากการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของ MWNTs ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันขึ้น ซึ่งทำให้สามารถจับกับโมเลกุลของแอมโมเนียได้ดีขึ้น และในกรณีที่คอมโพสิตกับ PANI ก็พบว่า หมู่ฟังก์ชันที่เกิดบนผนัง MWNTs ทำให้ PANI ยึดเกาะกันกับ

ผนัง MWNTs ได้ดีขึ้น จึงมีปริมาณของ PANI ยึดเกาะตามผนังท่อเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้สามารถตรวจวัดแอมโมเนียได้ดีขึ้น ภาพที่ 20 แสดงผลการตรวจวัดแอมโมเนียของ MWNTs ที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาและคอมโพสิตกับ PANI



ภาพที่ 20 ผลการตรวจวัดแอมโมเนีย (ซ้าย) MWNTs ที่ผ่านการทรีตเมนต์และไม่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา (ขวา) MWNTs คอมโพสิตกับ PANI ที่ผ่านการทรีตเมนต์และไม่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา (Yoo et al., 2009)

ตารางที่ 4 สรุปตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้พอลิเมอร์และการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของ CNTs ด้วยเทคนิคออกซิเจนพลาสมา และการไฮบริดร่วมกันระหว่างการปรับปรุงสภาพพื้นผิวและการใช้ร่วมกับพอลิเมอร์ ในการนำไปใช้เป็นก๊าซเซนเซอร์

งานวิจัยที่อ้างอิง	วัสดุเซนเซอร์	สารที่ตรวจวัด	หมายเหตุ
Zhang et al. (2005)	PS/CNTs	เตตระไฮโดรฟูแลน, เบนซีน, โทลูอิน, ไซโคลเฮกเซน, คาร์บอนเตตระคลอไรด์, คลอโรฟอร์ม, เอทิลอะซิเตท, ไดเอทิลอีเทอร์,	ตอบสนองได้ดีกับทุก ๆ สารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับเตตระไฮโดรฟูแลน, เบนซีน และ โทลูอิน

งานวิจัยที่ อ้างอิง	วัสดุเซนเซอร์	สารที่ตรวจวัด	หมายเหตุ
		อะซีโตน และ แอลกอฮอล์ ที่ความ ดันบรรยากาศ	
Cho et al. (2004)	EC/SWNTs	เบนซีน และ เอทานอล (1,000-5,000 ppm)	EC/SWNTs (5wt%) ตอบสนอง ต่อเบนซีน (5,000 ppm) ได้ดี ที่สุด ประมาณ 9%
Hafaiedh et al. (2013)	CNTs + Oxygen plasma treatment	โทลูอีน, เบนซีน (0.8 ppm), อะซีโตน, เมทานอล และ เอทานอล	จำแนกกลุ่มอะโรมาติก สารอินทรีย์ระเหยง่าย และกลุ่ม แอลกอฮอล์ได้ออกจากกันได้ โดยการใช้ความสัมพันธ์ของค่า ความเร็วในการตรวจวัด
Leghrib et al. (2010)	MWNTs + Oxygen plasma treatment+ Metal decoration (Rh, Pd, Au และ Ni)	เบนซีน (50-500 ppb) และ ไนโตรเจน ไดออกไซด์	ลำดับการตอบสนองต่อเบนซีน Rh/MWNTs > Pd/MWCNTs > Ni/MWNTs
Yoo et al. (2009)	MWNTs + Oxygen plasma treatment+ PANI	แอมโมเนีย	ลำดับการตอบสนอง pf-MWNTs/PANI > MWNTs/PANI > และ Pf-MWNTs > Pristine MWNTs

2.8 พารามิเตอร์การละลายของเฮนเซน (Hansen solubility parameter, HSP)

เป็นหลักการที่ใช้ในการทำนายความสามารถของการละลายเข้ากันระหว่างตัวทำละลายและตัวถูกละลาย โดยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์การละลายของ Hansen ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับตัวแปร 3 ชนิด ได้แก่ แรงแพร่กระจาย (dispersion force; δ_d) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (intermolecular force; δ_p) และพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond; δ_h) โดยตัวที่ถูกทำละลายจะละลายเข้ากันได้ดีในตัวทำละลาย จะต้องมามีค่าความเป็นขั้วใกล้เคียงกับความเป็นขั้วของตัวทำละลาย

สภาพการละลายเข้ากันได้ระหว่างตัวทำละลายและตัวถูกละลายคำนวณได้จากสมการที่ 5 และ 6 โดยการพิจารณาค่าจากค่า Relative energy distance, RED แบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

1. กรณีค่า $RED < 1$ มีความหมายว่าตัวทำละลายและตัวถูกละลายสามารถที่จะละลายเข้ากันได้เป็นอย่างดี
2. กรณีค่า $RED = 1$ มีความหมายว่า ตัวทำละลายและตัวถูกละลายสามารถที่จะละลายเข้ากันได้เพียงบางส่วน
3. กรณีค่า $RED > 1$ มีความหมายว่า ตัวทำละลายและตัวถูกละลายไม่สามารถละลายเข้ากันได้เลย

$$R_a = \sqrt{4(\delta_{d2} - \delta_{d1})^2 + (\delta_{p2} - \delta_{p1})^2 + (\delta_{h2} - \delta_{h1})^2} \quad (5)$$

R_a คือ พารามิเตอร์การละลายของแฮนเซนของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย

δ_d คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของแรงแพร่กระจายของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย

δ_p คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย

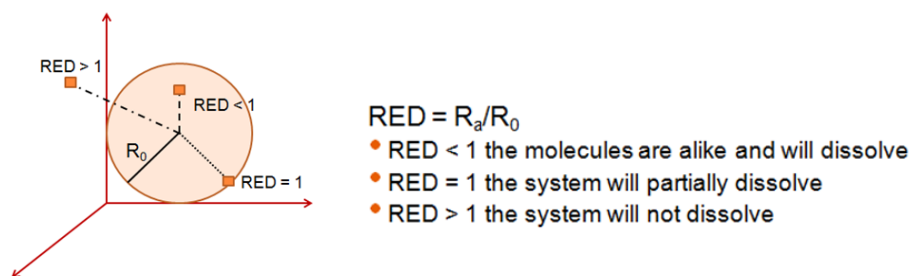
δ_h คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของพันธะไฮโดรเจนของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย

$$RED = \frac{R_a}{R_0} \quad (6)$$

RED คือ ระยะทางพลังงานสัมพัทธ์ (Relative energy distance)

R_0 คือ รัศมีอันตรกิริยา (Interaction radius) ของพอลิเมอร์

จากภาพที่ 21 แผนภาพแสดงลักษณะของทรงกลม Hansen (Hansen sphere) ทั้ง 3 กรณี

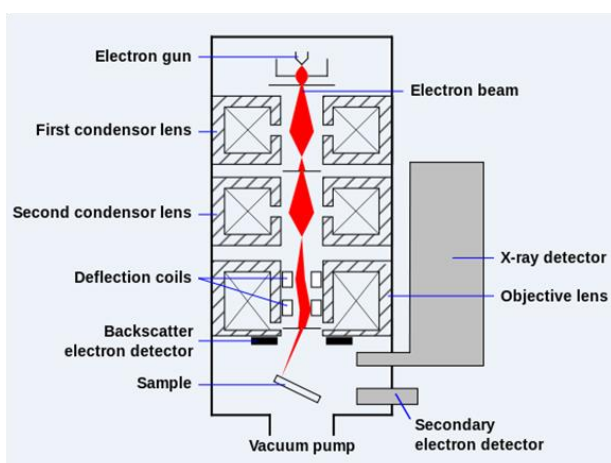


ภาพที่ 21 แผนภาพแสดงลักษณะของทรงกลมแฮนเซน (Hansen sphere) ทั้ง 3 กรณี

2.9 เครื่องมือวิเคราะห์

2.9.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

CNTs เป็นวัสดุระดับนาโนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่า 100 นาโนเมตร ดังนั้นการตรวจสอบเชิงโครงสร้างและสัณฐานวิทยาจึงมีความจำเป็นต้องใช้ SEM ในการวิเคราะห์ หลักการทำงานของ SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) โดยกระทำภายใต้ภาวะสุญญากาศ อิเล็กตรอนที่ผลิตได้จะถูกรวมกลายเป็นลำอิเล็กตรอนด้วยเลนส์รวบรวมรังสี ลำอิเล็กตรอนจะส่องกราดลงบนพื้นผิวตัวอย่าง ส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) จากนั้นจะทำการตรวจวัดสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และแปลงไปเป็นสัญญาณปรากฏภาพบนจอรับภาพออกมาในลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ ภาพที่ 22 แสดงระบบการทำงานของเครื่อง SEM

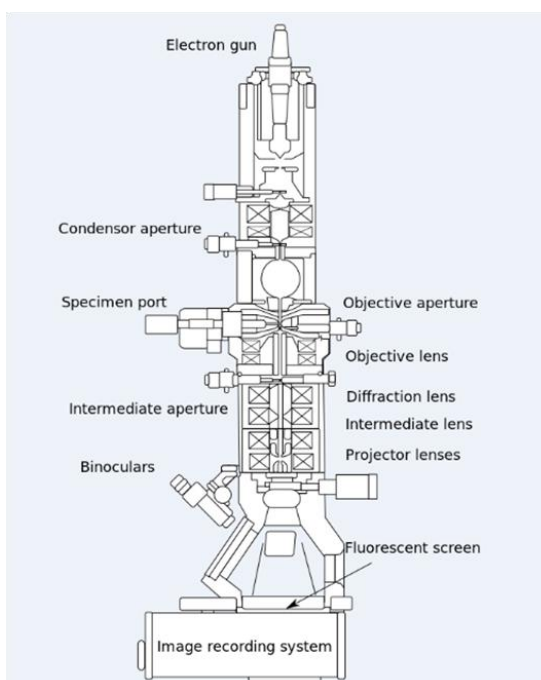


ภาพที่ 22 ระบบการทำงานของเครื่อง SEM

(http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope)

2.9.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Tunneling electron microscope; TEM)

การวิเคราะห์ด้วย TEM เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถใช้วิเคราะห์โครงสร้างและความสมบูรณ์ผลึกของ CNTs ได้ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่มีพลังงานความเข้มที่สูง โดยกระทำภายใต้ภาวะสุญญากาศ อิเล็กตรอนที่ผลิตได้จะถูกรวมกลายเป็นลำอิเล็กตรอนด้วยเลนส์รวบรวมรังสี ลำอิเล็กตรอนจะถูกส่งลงบนตัวอย่างตัวอย่างที่วิเคราะห์ต้องมีความบางอยู่ในช่วง 1-100 นาโนเมตร อิเล็กตรอนพลังงานสูงจะทะลุผ่านตัวอย่าง จากนั้นจะทำการตรวจวัดสัญญาณจากอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างและแปลงไปเป็นสัญญาณปรากฏภาพบนจอรับภาพออกมาในลักษณะเป็นภาพ 2 มิติภาพที่ 23 แสดงระบบการทำงานของเครื่อง TEM



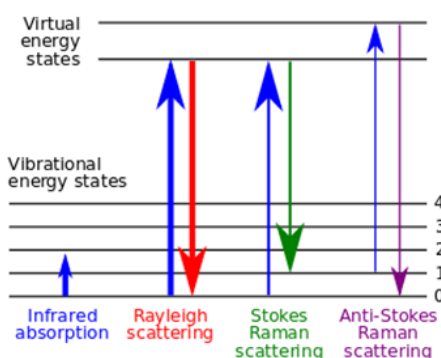
ภาพที่ 23 ระบบการทำงานของเครื่อง TEM

(http://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_electron_microscopy)

2.9.3 รามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy)

รามานสเปกโทรสโกปีเป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้าง ความสมบูรณ์และพันธะคาร์บอนของ CNTs สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซได้ โดยการใช้ลำแสงของคลื่นแสงที่มีความถี่ค่าเดียว (Monochromatic light) ปกติโดยทั่วไปจะใช้เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสง เมื่อแสงกระทบกับตัวอย่าง มีแสงบางส่วนเกิดการกระเจิงไปด้วยการ

ชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) และเกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) เพียงส่วนน้อยเท่านั้น ซึ่งรูปแบบการชนแบบไม่ยืดหยุ่น เรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่าการกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering) โดยมีหลักการคือ เมื่อแสงเลเซอร์กระทบกับตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาต่อกันเกิดการเลื่อนขึ้นหรือเลื่อนลงของระดับชั้นพลังงานเลเซอร์ เนื่องจากการดูดกลืนหรือการคายพลังงานของอะตอม ซึ่งจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับโหมดการสั่นของอะตอมในตัวอย่าง ผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ออกมาเป็นข้อมูลต่าง ๆ ได้

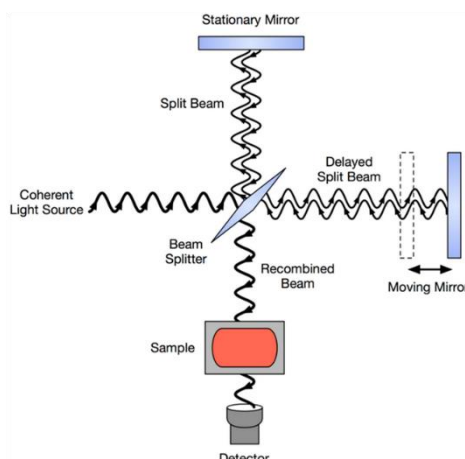


ภาพที่ 24 รูปแบบของพลังงานระดับชั้น ที่เกี่ยวข้องกับการกระเจิงแบบรามาน

(http://en.wikipedia.org/wiki/Raman_spectroscopy)

2.9.4 ฟูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)

FTIR เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์พันธะเคมี หมู่ฟังก์ชัน รวมไปถึงโครงสร้างโมเลกุลของสาร (สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์) โดยอาศัยหลักการการดูดกลืน (Absorption) หรือการทะลุผ่าน (Transmission) ของแสงในช่วงอินฟราเรด เมื่อแสงถูกส่งกระทบกับสารตัวอย่าง ทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ซึ่งโมเลกุลของสารจะดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงอินฟราเรดได้นั้น จะต้องมีค่าความถี่ของการสั่นเดียวกันกับความถี่ของพลังงานแสงที่ปล่อยเข้ามากระทบ สามารถวิเคราะห์ออกมาในรูปแบบของสเปกตรัมที่เฉพาะเจาะจงของสารแต่ละชนิดได้ บ่งบอกถึงโครงสร้างโมเลกุล หมู่ฟังก์ชัน และชนิดของสารชนิดนั้น ๆ ได้ภาพที่ 25 แสดงระบบการทำงาน of เครื่อง FTIR

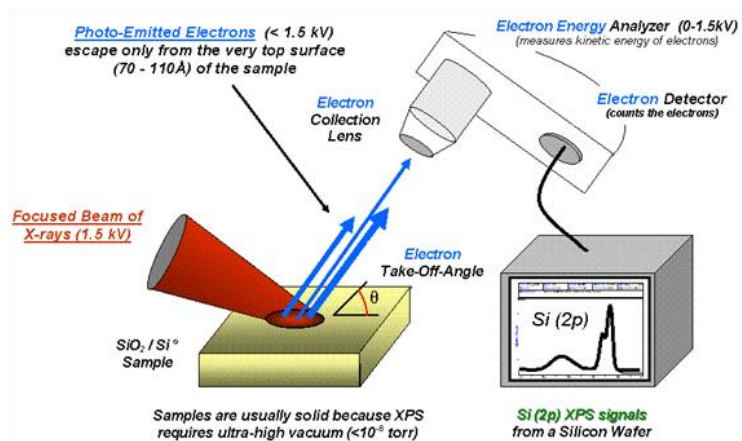


ภาพที่ 25 ระบบการทำงานของเครื่อง FTIR

(http://en.wikipedia.org/wiki/Fourier_transform_infrared_spectroscopy)

2.9.5 เครื่องเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)

XPS เป็นเทคนิคที่วิเคราะห์ที่พื้นผิวของตัวอย่างภายใต้เงื่อนไขความเป็นสุญญากาศสูง (high vacuum) ที่ระดับความดันประมาณ 10^{-8} มิลลิบาร์ หรือความเป็นสุญญากาศขั้นสูง (ultra high vacuum) ที่ระดับความดันต่ำกว่า 10^{-9} มิลลิบาร์ (http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_photoelectron_spectroscopy) วิเคราะห์ข้อมูลออกมาในรูปแบบของชนิดและองค์ประกอบธาตุ โครงสร้างทางเคมี พันธะเคมี และสถานะออกซิเดชันของอะตอม โดยหลักการทำงานของ XPS จะใช้รังสีเอ็กซ์ยิงไปยังพื้นผิวของตัวอย่าง ทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมหลุดออกเป็นอิสระ เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน จากนั้นทำการตรวจวัดพลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอน เทียบกับค่าพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่ทราบค่าแน่นอน เพื่อคำนวณเป็นค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของโฟโตอิเล็กตรอนก่อนที่จะหลุดเป็นอิสระออกจากอะตอมว่ามีค่าระดับพลังงานเท่าใด ทำให้วิเคราะห์ได้ว่าเป็นอะตอมของธาตุชนิดนั้น ๆ ภาพที่ 26 แสดงระบบการทำงานของเครื่อง XPS



ภาพที่ 26 ระบบการทำงานของเครื่อง XPS

(http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_photoelectron_spectroscopy)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ส่วนคือ (1) วัสดุที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย CNTs และสารละลายพอลิเมอร์ (2) วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพผิว CNTs (3) วัสดุที่ใช้ในการเตรียมก๊าซเซนเซอร์ (4) วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ (5) เครื่องมือวิเคราะห์ CNTs และ ไฮบริด CNTs ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 วัสดุที่ใช้เตรียมสารละลาย CNTs และสารละลายพอลิเมอร์

3.1.1.1 บีกเกอร์

3.1.1.2 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube, CNTs)

3.1.1.3 1,2-ไดคลอโรอีเทน (Dichloroethane, 1,2-DCE)

3.1.1.4 เครื่องสั่นอุลตราโซนิค (Ultrasonicator)

3.1.1.5 ปิเปต (Pipette)

3.1.1.6 ไมโครปิเปต (Micropipette)

3.1.1.7 ขวดเก็บสาร (Laboratory bottle duran)

3.1.1.8 พอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่

3.1.1.8.1 เอทิลเซลลูโลส (Ethyl cellulose, EC)

3.1.1.8.2 พอลิสไตไร์น (Polystyrene, PS) ($M_w = 35,000$)

3.1.1.8.3 พอลิไวนิลอะซีเตต (Polyvinyl acetate, PVA) ($M_w = 140,000$)

3.1.1.8.4 พอลิไอโซพรีน (Polyisoprene, PI) ($M_w = 400,000$)

3.1.1.8.5 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Poly (methyl methacrylate) , PMMA)

($M_w = 84,600$)

3.1.1.9 แท่งแม่เหล็กกวนสาร

3.1.1.10 เครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็ก

3.1.2 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงสภาพผิว CNTs

3.1.2.1 บีกเกอร์

3.1.2.2 กระบอกตวง (Cylinder)

3.1.2.3 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes)

- 3.1.2.4 ไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) 37%
- 3.1.2.5 เครื่องสูบล้างโซลิตร่าโซนิค
- 3.1.2.6 ชุดกรองสารระบบสุญญากาศ (Vacuum filtration set)
- 3.1.2.7 กระดาษกรอง (Filter paper)
- 3.1.2.8 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI water)
- 3.1.2.9 เตาให้ความร้อน (Hot plate)
- 3.1.2.10 อลูมิเนียมฟอยล์
- 3.1.2.11 เครื่องทำความสะอาดแบบพลาสมา (Expanded plasma cleaner)
- 3.1.2.12 ก๊าซออกซิเจน
- 3.1.3 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมเซนเซอร์
 - 3.1.3.1 บีกเกอร์
 - 3.1.3.2 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH)
 - 3.1.3.3 อะซีโตน (Acetone)
 - 3.1.3.4 เอทานอล (Ethanol)
 - 3.1.3.5 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI water)
 - 3.1.3.6 เครื่องสูบล้างโซลิตร่าโซนิค
 - 3.1.3.7 ก๊าซไนโตรเจน
 - 3.1.3.8 แผ่น Printed circuit board (PCB) ซึ่งประกอบด้วยขั้ว ทองแดง/ทอง
 - 3.1.3.9 ปิเปต
 - 3.1.3.10 ไมโครปิเป
 - 3.1.3.11 เตาให้ความร้อน
 - 3.1.3.12 สารละลายพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ
- 3.1.4 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์
 - 3.1.4.1 ก๊าซไนโตรเจน
 - 3.1.4.2 เบนซีน (Benzene)
 - 3.1.4.3 เตาให้ความร้อน (Hot plate)
 - 3.1.4.4 อุปกรณ์ควบคุมการไหลของก๊าซชนิดต่าง ๆ
 - 3.4.4.5 เครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า (FLUKE NetDAQ NETWORKED DATA ACQUISITION UNIT)

3.1.5 เครื่องมือวิเคราะห์ CNTs และ ไฮบริด CNTs

3.1.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.1.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

3.1.5.3 เครื่องรามานสเปกโทรสโกปี

3.1.5.4 เครื่องฟูรีเยร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

3.1.5.5 เครื่องเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

3.2 การเปรียบเทียบชนิดพอลิเมอร์สำหรับเคลือบ CNTs เพื่อใช้ตรวจวัดไอระเหยของเบนซีน

การเตรียม CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ และสร้างเป็นอุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

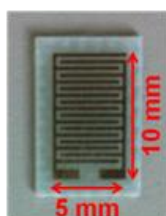
3.2.1 เตรียมสารละลาย CNTs โดยนำ CNTs จำนวน 0.3 มิลลิกรัมไปกระจายตัวใน Dichloroethane (1,2-DCE) ปริมาตร 100 มิลลิลิตรและนำไปปั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกส์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมงจนได้สารละลายเนื้อเดียวกัน

3.2.2 เตรียมสารละลายพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ โดยนำมาผสมกับโทลูอินที่ความเข้มข้น 1 และ 5 wt% แล้วนำไปปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจนพอลิเมอร์ละลายเป็นเนื้อเดียวกันเตรียมเซนเซอร์โดยใช้แผ่นรองรับคือ Print circuit board (PCB) ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้ารูปหวี (Interdigitated electrode) รายละเอียดของแผ่น PCB ดังแสดงในภาพที่ 27 ทำความสะอาดด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH), อะซีโตน (Acetone), เมทานอล (Methanol) และน้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI water) ในแต่ละขั้นตอนด้วยเครื่องสั่นอัลตราโซนิกครั้งละ 10 นาที นำแผ่น PCB ที่ถูกทำความสะอาดแล้วไปเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3.2.3 หยดสารละลาย CNTs ที่เตรียมได้ในข้อ (3.2.1) จำนวนครั้งละ 2 ไมโครลิตร ลงบนแผ่นเซนเซอร์ และนำไปอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเพื่อกำจัดตัวทำละลายออกไป ทำจนกระทั่งปรับค่าความต้านทานไฟฟ้าของเซนเซอร์ให้มีค่าเท่ากับ 1 กิโลโอห์ม

3.2.4 นำสารละลายพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ในข้อ (3.2.2) ปริมาณ 150 ไมโครลิตร นำมาเคลือบ CNTs บนแผ่นรองรับในข้อ (3.2.3) ด้วยกระบวนการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) โดยใช้รอบในการหมุน 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

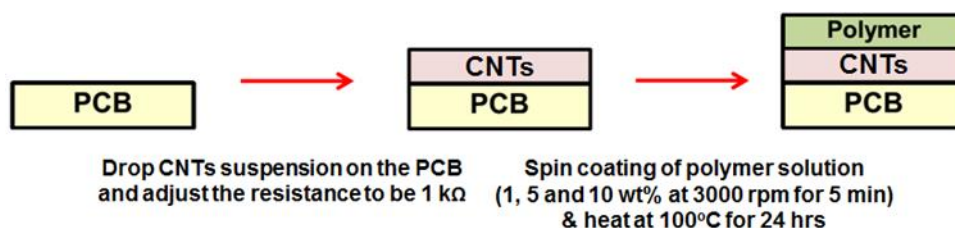
3.2.5 นำเซนเซอร์ที่เตรียมได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมงเพื่อกำจัดตัวทำละลายออกไป



- Gap 0.25 mm
- Sensing area 22.65 mm²
- Substrate PCB
- Electrode Au/Cu

ภาพที่ 27 รายละเอียดของแผ่น PCB

ขั้นตอนการเตรียม CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ และสร้างเป็นอุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์ตามภาพที่ 28 ขั้นตอนในการสร้างก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์



ภาพที่ 28 ขั้นตอนในการสร้างก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์

3.3 การปรับสภาพผิวท่อนาโนคาร์บอน (Surface functionalization)

เปรียบเทียบการปรับสภาพผิว CNTs ด้วยเทคนิค 3 เทคนิค หลังจากนั้นทำ CNTs ที่ปรับสภาพผิวแล้วไปเคลือบด้วยพอลิเมอร์ และนำไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยของเบนซีน โดยการปรับสภาพผิว CNTs มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

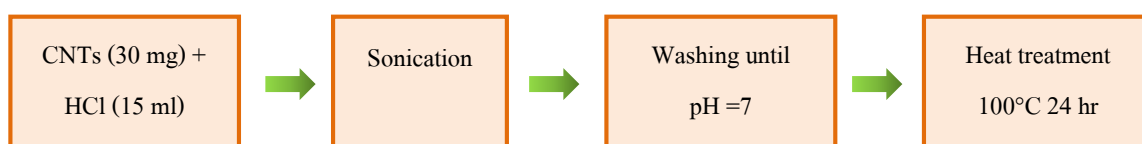
3.3.1 การทรีตเมนต์ด้วยกรด

3.3.1.1 ผสม CNTs ที่ไม่ได้มีการทรีตเมนต์ใด ๆ (pristine CNTs) ปริมาณ 30 มิลลิกรัมและกรดไฮคลอริก (HCl 37%) ปริมาตร 15 มิลลิลิตร

3.3.1.2 นำสารละลายในข้อ (3.3.1.1) ไปสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกส์ที่เวลาต่าง ๆ ได้แก่ 5, 10, 30 และ 60 นาที

3.3.1.3 นำสารละลายในข้อ (3.3.1.2) มาล้างด้วย DI water จนได้ค่า pH เท่ากับ 7 และกรองด้วยเครื่องกรองสารระบบสุญญากาศ

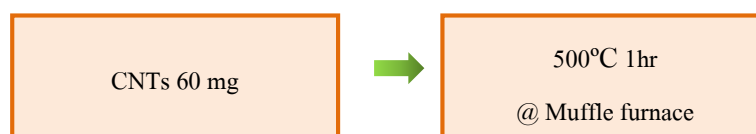
3.3.1.4 นำ CNTs ที่ได้จากข้อ (3.3.1.3) ไปอบไล่ความชื้นออกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ขั้นตอนการปรับสภาพผิว CNTs ด้วยความกรดแสดงสรุปในภาพที่ 29 แผนผังขั้นตอนการปรับสภาพผิว CNTs ด้วยความกรด



ภาพที่ 29 แผนผังขั้นตอนการปรับสภาพผิว CNTs ด้วยกรด

3.3.2 การทรีตเมนต์ด้วยความร้อน

การปรับสภาพผิว CNTs ด้วยการทรีตเมนต์ด้วยความร้อน ทำโดยนำ pristine CNTs ปริมาณ 60 มิลลิกรัมนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงด้วยเตาอบ (Muffle furnace) ดังแสดงใน ภาพที่ 30 แผนผังขั้นตอนการการปรับสภาพผิว CNTs ด้วยความร้อน



ภาพที่ 30 แผนผังขั้นตอนการปรับสภาพผิว CNTs ด้วยความร้อน

3.3.3 การทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา

การปรับสภาพผิวของ CNTs ด้วยออกซิเจนพลาสมา ทำโดยนำ pristine CNTs 60 มิลลิกรัมมาผ่านกระบวนการพลาสมาด้วยออกซิเจน โดยใช้เครื่องทำความสะอาดแบบพลาสมา ซึ่งเงื่อนไขในการพลาสมาแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เงื่อนไขการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา

เงื่อนไข	รายละเอียด
ปริมาณ CNTs	: 60 มิลลิกรัม
ความต่างศักย์	: 740 โวลต์
กระแสไฟฟ้า	: 40 มิลลิแอมแปร์
กำลังไฟฟ้า	: 29.6 วัตต์
เวลาทรีตเมนต์	: 30, 60, 90 และ 120 นาที

3.4 การทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยเบนซีน

การทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยเบนซีน ทำภายใต้ระบบทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยเบนซีนดังภาพที่ 31 แผนผังแสดงระบบทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยเบนซีนละตารางที่ 6 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยเบนซีน โดยทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.4.1 ปรับบรรยากาศภายในระบบวัดโดยการปล่อยก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 3.0 ลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 3 นาที

3.4.2 ส่งผ่านไอระเหยเบนซีนเข้าไปในระบบวัดโดยวิธีบับบลิ้ง (Bubbling) ด้วยก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 3 นาที โดยเบนซีนที่อยู่ในสถานะของเหลวถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส ค่าดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 90% ของจุดเดือดของเบนซีน

3.4.3 หยุดการปล่อยไอระเหยเบนซีน และปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในระบบเป็นเวลา 60 นาที เพื่อทำการไล่โมเลกุลเบนซีนที่ติดอยู่ที่ก๊าซเซนเซอร์ พร้อมทั้งศึกษาเวลาการคืนตัว (Recovery time) ของก๊าซเซนเซอร์ เพื่อหาประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้งานใหม่

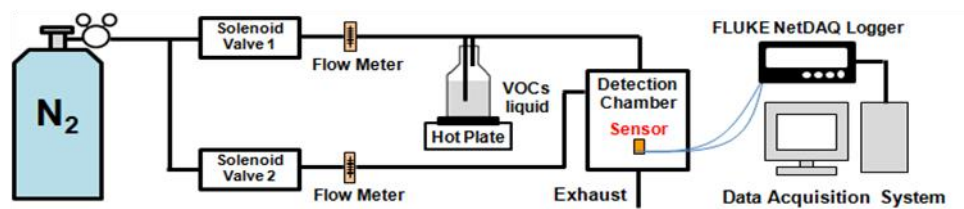
3.4.4 ค่าการตอบสนองไอระเหยเบนซีน ถูกบันทึกอยู่ในรูปของค่าสัญญาณทางไฟฟ้า ด้วยเครื่อง FLUKE NetDAQ NETWORKED DATA ACQUISITION UNIT ซึ่งค่าการตอบสนอง (Sensor response, SR) สามารถคำนวณหาได้ดังสมการ (7)

$$\text{Sensor Response (SR)} = \frac{R - R_0}{R_0} \quad (7)$$

โดยที่ R_0 คือ ค่าความต้านทานเริ่มต้นของก๊าซเซนเซอร์และ R คือ ค่าความต้านทานของก๊าซเซนเซอร์ภายใต้บรรยากาศไอระเหยของเบนซีน

3.4.5 คำนวณค่าการตอบสนองนอร์มัลไลซ์ (Normalized sensor response) โดยการนำค่าจากอัตราส่วนระหว่างค่าการตอบสนองที่วินาทีที่ 360 (SR_{360}) กับค่าความเข้มข้นของไอระเหยของเบนซีน (C) ที่ใช้ในการทดสอบในแต่ละครั้ง ดังสมการ (8) เพื่อทำการเปรียบเทียบการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ โดยตั้งสมมติฐานว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองและค่าความเข้มข้นแปรผันตรงกัน

$$\text{Normalized sensor response} = \frac{SR_{360}}{C} \quad (8)$$



ภาพที่ 31 แผนผังแสดงระบบทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยเบนซีน

ตารางที่ 6 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยเบนซีน

เงื่อนไข	รายละเอียด
ไอระเหย	: เบนซีน
ความเข้มข้น	: part per million (ppm) และ part per thousand
อุณหภูมิในระบบวัด	: อุณหภูมิห้อง

อุปกรณ์และเครื่องมือชนิดต่าง ๆ ทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุก๊าซเซนเซอร์และการตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนได้สรุปไว้ในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 อุปกรณ์และเครื่องมือชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุก๊าซเซนเซอร์
และการตรวจวัดไอระเหยของเบนซีน

เป้าหมาย	สมบัติ	เทคนิควิเคราะห์
วัสดุก๊าซเซนเซอร์ <ul style="list-style-type: none"> ● Polymer-coated CNTs ● Surface functionalized CNTs ● Polymer/ surface functionalized CNTs 	สัณฐานวิทยา	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
	โครงสร้างภายใน	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
	โครงสร้างคาร์บอน, ความเป็นผลึก และความสมบูรณ์	เครื่องรามานสเปกโทรสโกปี
	หมู่ฟังก์ชัน	เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
	องค์ประกอบธาตุ และสถานะเคมี	เครื่องเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี
การตรวจวัดไอระเหยของเบนซีน	การตอบสนองก๊าซเซนเซอร์ (การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่อสัมผัสกับไอระเหยเบนซีน)	ระบบการตรวจวัดก๊าซเซนเซอร์

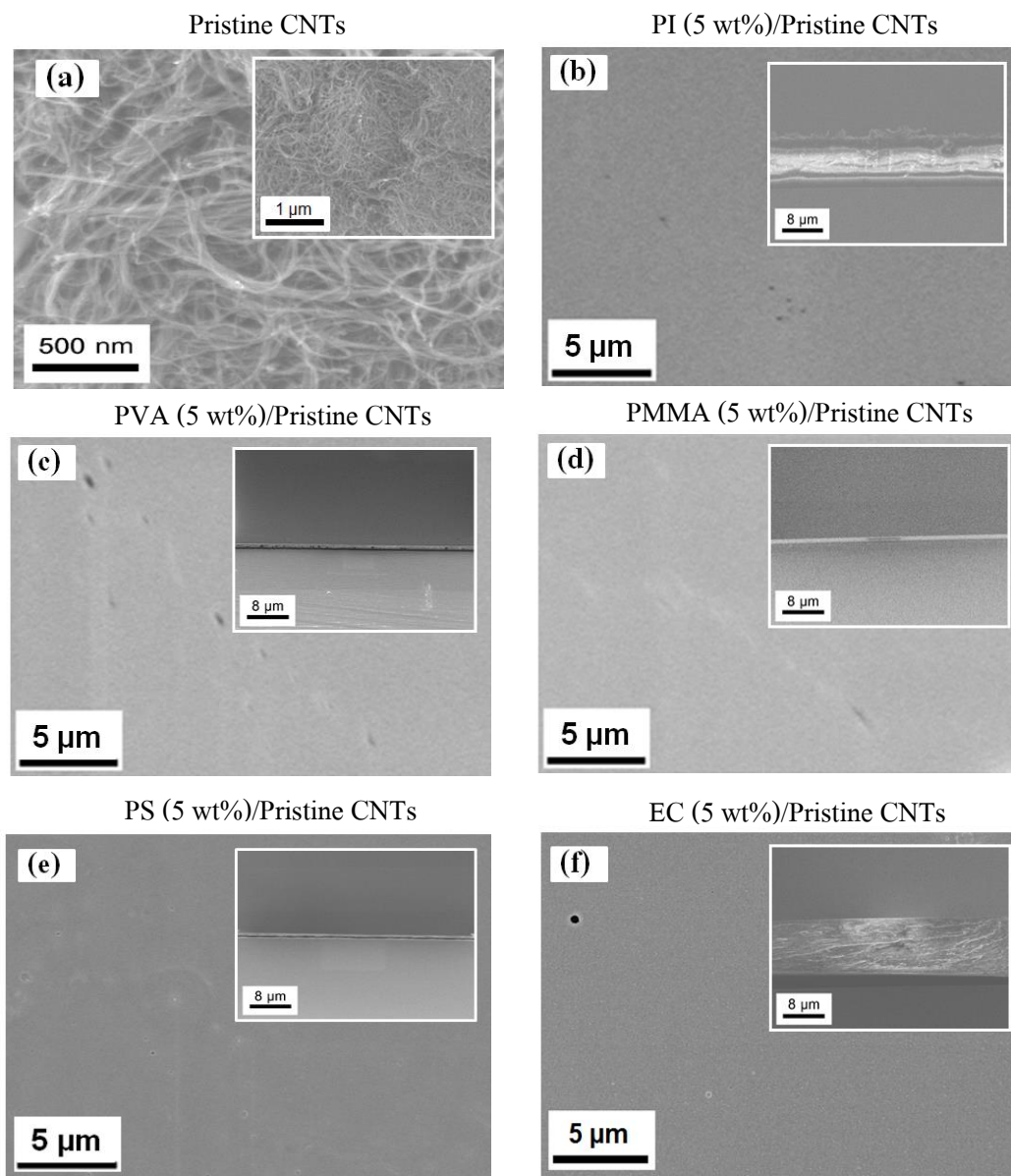
บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ก๊าซเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนด้วยวัสดุท่อนาโนคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

ภาพที่ 32 แสดงภาพ SEM ของ (a) Pristine CNTs (b) PI (5 wt%)/Pristine CNTs, (c) PVA (5 wt%)/Pristine CNTs, (d) PMMA (5 wt%)/Pristine CNTs, (e) PS (5 wt%)/Pristine CNTs และ (f) EC (5 wt%)/Pristine CNTs ตามลำดับนอกจากนี้ในแต่ละภาพยังได้แสดงภาพแทรกเพื่อแสดงรายละเอียดต่าง ๆ เพิ่มเติม โดยภาพแทรกที่ 32 (a) แสดงภาพ CNTs ที่กำลังขยายที่ต่ำในขณะที่ภาพแทรกของภาพที่ 32 (b-f) เป็นการแสดงภาพตัดขวาง SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่เคลือบบน CNTs



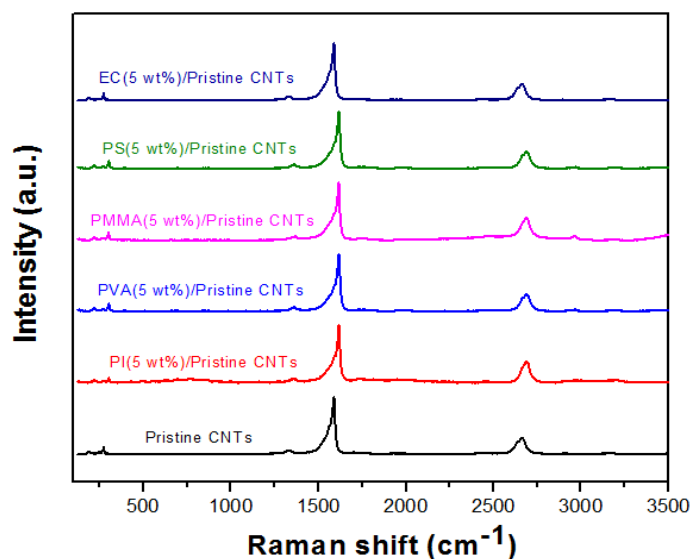
ภาพที่ 32 ภาพ SEM ของ (a) Pristine CNTs, (b) PI (5wt%)/Pristine CNTs,
 (c) PVA (5wt%)/Pristine CNTs, (d) PMMA (5wt%)/Pristine CNTs,
 (e) PS (5wt%)/Pristine CNTs และ (f) EC (5wt%)/Pristine CNTs

จากภาพเห็นได้ว่า Pristine CNTs มีลักษณะเป็นท่อที่พาดพันกันไปมาในลักษณะของโครงข่ายที่ติดต่อกัน ในส่วนของ CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์นั้น พบว่าพอลิเมอร์แต่ละชนิดเคลือบทับบน CNTs จนไม่สามารถสังเกต CNTs ได้ เมื่อพิจารณาความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์

พบว่า PI (5 wt%)/Pristine CNTs, PVA (5 wt%)/Pristine CNTs, PMMA (5 wt%)/Pristine CNTs, PS (5 wt%)/Pristine CNTs และ EC (5 wt%)/Pristine CNTs มีค่าเท่ากับ 9.25, 0.93, 1.21, 0.89 และ 10.18 μm ตามลำดับ โดยความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ที่แตกต่างกันนั้น เกิดจากการใช้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) ที่แตกต่างกัน ทำให้สารละลายพอลิเมอร์ที่เตรียมได้แต่ละชนิดมีความหนืดของสารละลายที่แตกต่างกัน เมื่อนำไปทำการเคลือบลงบน CNTs ด้วยวิธีเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง จึงส่งผลให้มีค่าความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโทรสโกปีท่อนาโนคาร์บอนและท่อนาโนคาร์บอนที่ทำการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

ภาพที่ 33 แสดงรามานสเปกตรัมของ Pristine CNTs, PI (5 wt%)/Pristine CNTs, PVA (5 wt%)/Pristine CNTs, PMMA (5 wt%)/Pristine CNTs, PS (5 wt%)/Pristine CNTs และ EC (5 wt%)/Pristine CNTs ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องรามานสเปกโทรสโกปี



ภาพที่ 33 รามานสเปกตรัมของ Pristine CNTs, PI (5 wt%)/Pristine CNTs, PVA (5 wt%)/Pristine CNTs, PMMA (5 wt%)/Pristine CNTs, PS (5 wt%)/Pristine CNTs และ EC (5 wt%)/Pristine CNTs

ตารางที่ 8 ค่า I_G/I_D ของตัวอย่างชนิดต่าง ๆ

ตัวอย่าง	I_G/I_D
Pristine CNTs	14.02±1.20
PI(5 wt%)/Pristine CNTs	15.91±0.88
PVA(5 wt%)/Pristine CNTs	16.77±2.78
PMMA(5 wt%)/Pristine CNTs	14.79±2.05
PS(5 wt%)/Pristine CNTs	14.02±0.24
EC(5 wt%)/Pristine CNTs	13.47±0.48

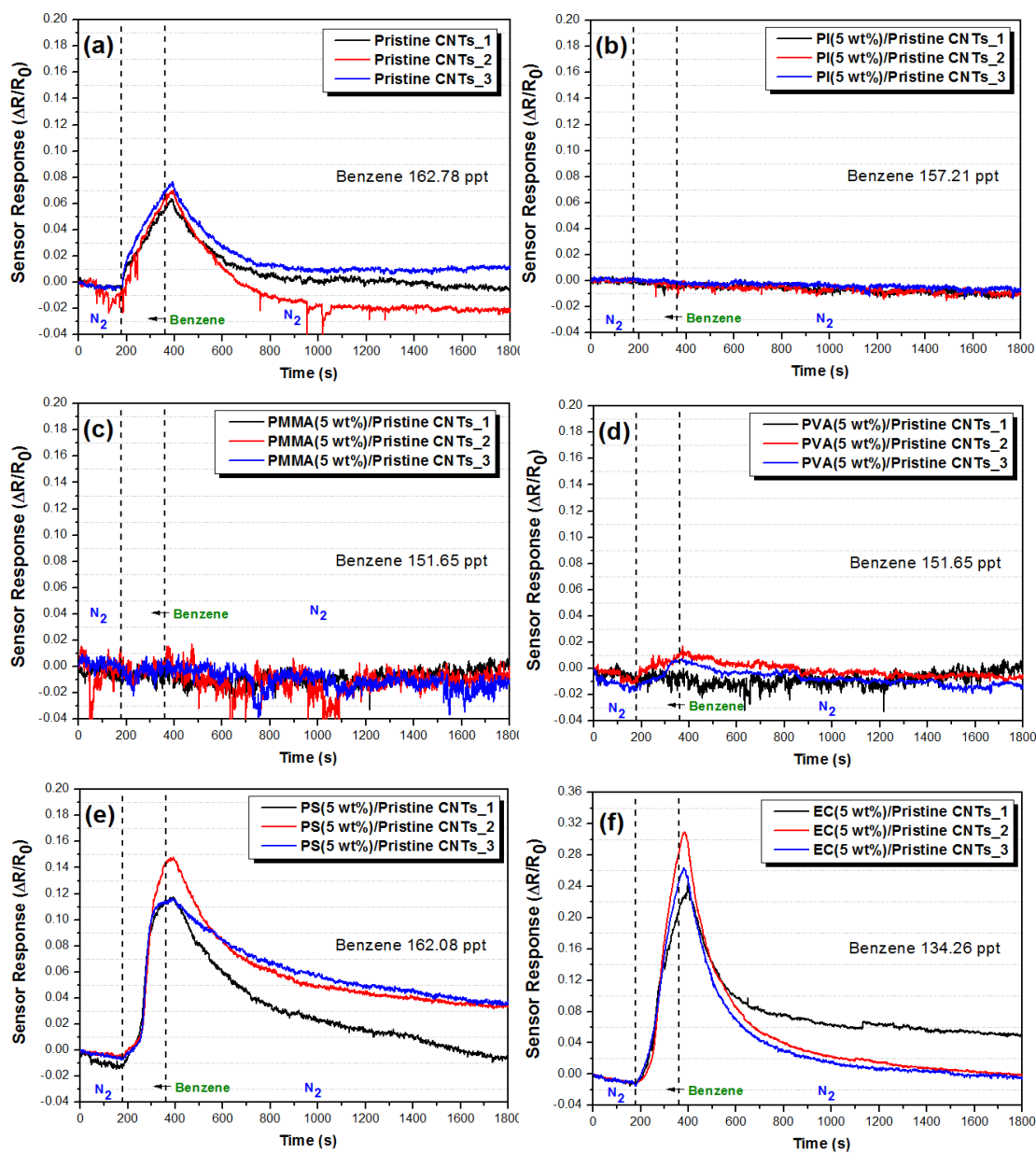
ภาพที่ 33 แสดงรามานสเปกตรัมของ Pristine CNTs, PI(5 wt%)/Pristine CNTs, PVA(5 wt%)/Pristine CNTs, PMMA(5 wt%)/Pristine CNTs, PS(5 wt%)/Pristine CNTs และ EC(5 wt%)/Pristine CNTs จากรามานสเปกตรัม พบว่าทุกตัวอย่างมีพีคหลัก 3 พีคที่ตำแหน่งประมาณ 1340 cm^{-1} , 1580 cm^{-1} และ 2680 cm^{-1} ตามลำดับ โดยแต่ละพีคแสดงถึงตำแหน่งของ *D*, *G* และ *2D* band ตามลำดับ โดย *D* band แสดงถึงความไม่สมบูรณ์ของแผ่นกราฟไฟต์และคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบที่เจือปนอยู่ *G* band แสดงถึงความเป็นระเบียบของกราฟไฟต์ โดยทั่วไปค่าความสมบูรณ์ของ CNTs สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างความสูงของ *G* band ต่อ *D* band (I_G/I_D) ค่า I_G/I_D แสดงในตารางที่ 8

4.1.3 ผลการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

ภาพที่ 34 (a-f) แสดงกราฟผลการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์จาก Pristine CNTs, PI (5 wt%)/Pristine CNTs, PMMA (5 wt%)/Pristine CNTs, PVA (5 wt%)/Pristine CNTs, PS (5 wt%)/Pristine CNTs และ EC (5 wt%)/Pristine CNTs ตามลำดับ โดยจะใช้ก๊าซเซนเซอร์จำนวน 3 ตัวของแต่ละชนิดก๊าซเซนเซอร์ในการทดสอบ โดยที่ค่าความเข้มข้นของไอระเหยของเบนซีนที่ใช้ในการทดสอบกับก๊าซเซนเซอร์แต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าความเข้มข้นไอระเหยของเบนซีนที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ

ก๊าซเซนเซอร์	ความเข้มข้นของไอระเหยเบนซีน (parts per thousand, ppt)
Pristine CNTs	162.78
PI (5 wt%)/Pristine CNTs	157.21
PMMA (5 wt%)/Pristine CNTs	151.65
PVA (5 wt%)/Pristine CNTs	151.65
PS (5 wt%)/Pristine CNTs	162.08
EC (5 wt%)/Pristine CNTs	134.26



ภาพที่ 34 ผลการตอบสนองไอรยะเหยงของเบนซีนของก้ำชเซนเซอร์จาก (a) Pristine CNTs, (b) PI (5 wt%)/Pristine CNTs, (c) PMMA (5 wt%)/Pristine CNTs, (d) PVA (5 wt%)/PristineCNTs, (e) PS (5 wt%)/Pristine CNTs และ (f) EC (5 wt%)/Pristine CNTs

ก่อนการตรวจวัดไอรยะเหยงของเบนซีนจะทำการปรับระบบการตรวจวัดด้วยก้ำชไนโตรเจนเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นทำการพาไอรยะเหยงเบนซีนเข้าไปในระบบการตรวจวัดด้วยก้ำช

ไนโตรเจนเป็นตัวพาเป็นเวลา 3 นาที พบว่าก๊าซเซนเซอร์มีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่อสัมผัสกับไอรระเหยของเบนซีน จากนั้นก๊าซเซนเซอร์จะมีค่าความต้านทานลดลงเมื่อทำการไล่โมเลกุลของไอรระเหยเบนซีนด้วยก๊าซไนโตรเจน ผลการทดลองที่ได้พบว่าก๊าซเซนเซอร์จาก EC (5 wt%)/CNTs มีค่าการตอบสนองต่อไอรระเหยของเบนซีน ได้ดีที่สุด ตามมาด้วย PS (5 wt%)/CNTs, Pristine CNTs และ PVA (5 wt%)/Pristine CNTs ตามลำดับ ในขณะที่ก๊าซเซนเซอร์จาก PI(5 wt%)/Pristine CNTs และ PMMA (5 wt%)/Pristine CNTs ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่อสัมผัสกับไอรระเหยของเบนซีน อีกทั้งยังพบว่าก๊าซเซนเซอร์จาก EC (5 wt%)/CNTs, PVA (5 wt%)/Pristine CNTs และ Pristine CNTs สามารถกลับคืนสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นได้ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ยกเว้นก๊าซเซนเซอร์จาก PS (5 wt%)/Pristine CNTs ที่ไม่สามารถกลับคืนสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นได้ สาเหตุคาดว่ามาจากการก๊าซไนโตรเจนไม่สามารถกำจัดโมเลกุลของไอรระเหยเบนซีนออกไปจากพื้นผิวของก๊าซเซนเซอร์ได้หมด ส่งผลให้ค่าความต้านทานไม่สามารถที่จะกลับคืนสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นได้

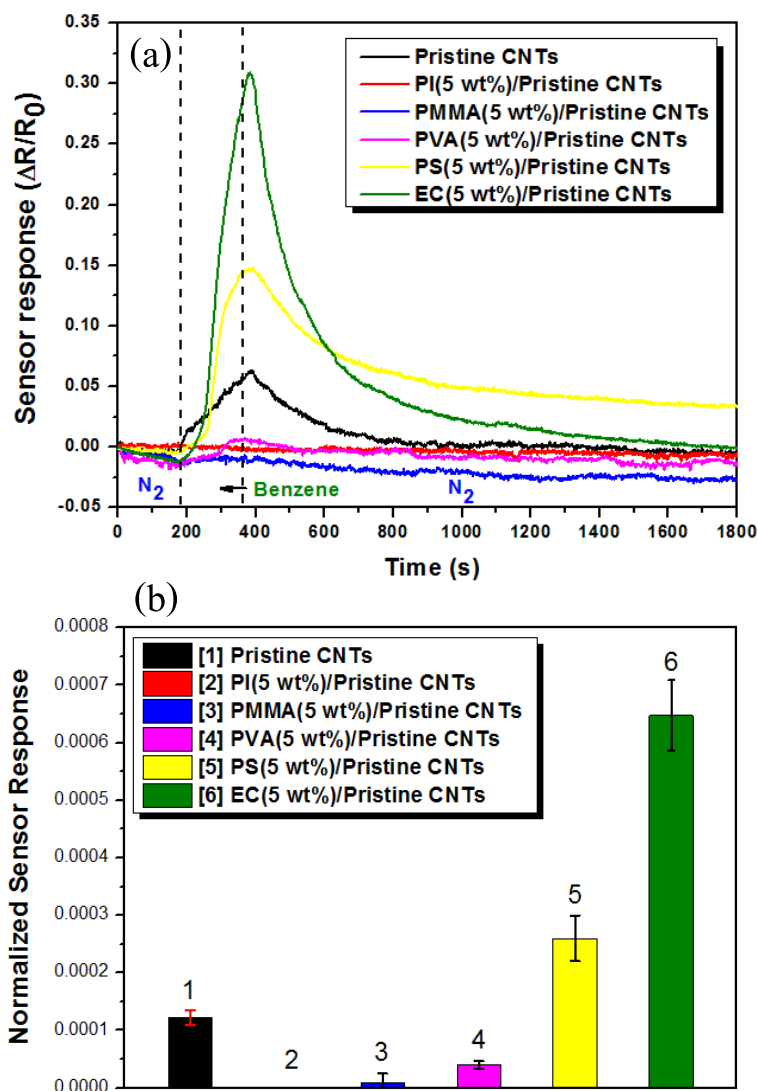
ค่าเวลาการตอบสนอง (Response time) ของก๊าซเซนเซอร์แต่ละชนิด คำนวณได้จากเวลาที่ใช้ในการตอบสนองที่ระดับ 90% เทียบกับค่าการตอบสนองสูงสุด ในขณะที่ค่าเวลาการคืนตัว (Recovery time) ของก๊าซเซนเซอร์พิจารณาได้โดยการคำนวณเวลาที่เซนเซอร์ใช้ในการกลับคืนสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ตารางที่ 8 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จาก Pristine CNTs และ CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ที่ระดับความเข้มข้น 5 wt% ชนิดต่าง ๆ พบว่าได้ว่าก๊าซเซนเซอร์จาก PS (5 wt%)/Pristine CNTs มีค่าเวลาการตอบสนองดีที่สุด ในขณะที่ก๊าซเซนเซอร์จาก Pristine CNTs มีค่าเวลาการคืนตัวที่ดีที่สุด

ตารางที่ 10 ค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จาก Pristine CNTs และ CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ที่ระดับความเข้มข้น 5 wt% ชนิดต่าง ๆ

Gas sensor	Response time (s)	Recovery time (s)
Pristine CNTs	153	530
PI(5 wt%)/Pristine CNTs	-	-
PMMA(5 wt%)/Pristine CNTs	-	-
PVA(5 wt%)/Pristine CNTs	171	1126
PS(5 wt%)/Pristine CNTs	15	-

Gas sensor	Response time (s)	Recovery time (s)
EC(5 wt%)/Pristine CNTs	159	1440

ภาพที่ 35 (a) แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองไอระเหยของเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์แต่ละชนิด โดยเลือกผลการตอบสนองที่เป็นค่าเฉลี่ยของแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบกัน และภาพที่ 35 (b) แสดงค่า Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์แต่ละชนิด โดยนำค่าการตอบสนองต่อไอระเหยของแต่ละก๊าซเซนเซอร์หารด้วยค่าความเข้มข้นของไอระเหยเบนซีนของการวัดแต่ละครั้งแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน



ภาพที่ 35 การเปรียบเทียบผลการตอบสนองไอรยะเหยเบนซีนของก้ำซเซนเซอร์ Pristine CNTs, PI (5 wt%)/Pristine CNTs, PMMA (5 wt%)/Pristine CNTs, PVA (5 wt%)/Pristine CNTs, PS (5 wt%)/Pristine SWNTs และ EC (5 wt%)/Pristine CNTs (a) ผลการตอบสนอง และ (b) Normalized sensor response

จากภาพที่ 35 (a) พบว่า EC (5 wt%)/Pristine CNTs มีค่าการตอบสนองต่อไอรยะเหยเบนซีนสูงสุด ตามมาด้วย PS (5 wt%)/Pristine CNTs, Pristine CNTs, PVA (5 wt%)/Pristine CNTs, PMMA (5 wt%)/Pristine CNTs และ PI (5 wt%)/Pristine CNTs ตามลำดับซึ่งค่าผลการตอบสนองมี

ความสัมพันธ์กันกับค่า Normalized sensor response ภาพที่ 35 (b) หลักการที่ใช้ในการอธิบาย การตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์จาก Pristine CNTs ต่อไอระเหยของเบนซีนนั้นอธิบายด้วย หลักการสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type semiconductor) เมื่อไอระเหยของเบนซีนสัมผัสกับพื้นผิว CNTs เกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนจากไอระเหยเบนซีนไปยังท่อนาโนคาร์บอน ส่งผลให้ความหนาแน่นโฮล (Hole density) ของCNTs ลดลง ส่งผลให้ CNTs มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูงขึ้น ซึ่ง สอดคล้องกับผลการตอบสนองระหว่างก๊าซเซนเซอร์ Pristine CNTs และ ไอระเหยของเบนซีน สำหรับกลไกการการตอบสนองของต่อไอระเหยเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์ CNTs ที่เคลือบด้วย พอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ด้วยการพองตัว (Swelling) ของพอลิเมอร์ เมื่อโมเลกุลของ ไอระเหยเบนซีนสัมผัสกับวัสดุก๊าซเซนเซอร์ จะเกิดการพองตัวของพอลิเมอร์ ทำให้ CNTs ที่ฝังตัว อยู่ในพอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ออกจากกัน และเกิดค่าความต้านทานสัมผัสเพิ่มมากขึ้น ส่งผล ให้ค่าความต้านทานของก๊าซเซนเซอร์มีค่าสูงขึ้นดังแสดงในภาพที่ 14 โดยผลการทดสอบการ ตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ พบว่าพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีความสามารถในการ ตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนที่แตกต่างกัน สามารถอธิบายได้ด้วยพารามิเตอร์การละลาย ของแฮนเซน (Hansen solubility parameter) ที่ใช้ทำนายความสามารถของการละลายเข้ากันระหว่าง พอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ กับไอระเหยของเบนซีน จำนวนได้จากสมการที่ 5 และ 6 โดยสรุปผลการ คำนวณค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่าพารามิเตอร์การละลายของแฮนเซนของเบนซีนและพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

Polymer and solvent	Hansen solubility parameter, HSP (MPa ^{1/2})*			R ₀	R _a	RED (R _a /R ₀)
	δ _D	δ _P	δ _H			
PI	18.1	2.4	10.3	10.3		
Benzene	18.4	0.0	2.0		2.5	0.24
PMMA	17.9	10.1	5.4	11.0		
Benzene	18.4	0.0	2.0		10.7	0.97
PVA	20.9	11.3	9.7	13.7		
Benzene	18.4	0.0	2.0	-	14.6	1.07

Polymer and solvent	Hansen solubility parameter, HSP (MPa ^{1/2})*			R ₀	R _a	RED (R _a /R ₀)
	δ _D	δ _P	δ _H			
PS	22.8	5.8	4.3	12.7		
Benzene	18.4	0.0	2.0	-	10.8	0.85
EC	19.0	5.6	4.9	7.90		
Benzene	18.4	0.0	2.0	-	6.40	0.81

* (http://www.accudynetest.com/polytable_01_print.html#istop)

δ_D คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของแรงแพร่กระจายของตัวทำละลายและตัวถูกทำละลาย (Hansen dispersion solubility parameter)

δ_P คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายและตัวถูกทำละลาย (Hansen polar solubility parameter)

δ_H คือ พารามิเตอร์การละลายในองค์ประกอบของพันธะไฮโดรเจนของตัวทำละลายและตัวถูกทำละลาย (Hansen hydrogen bonding solubility parameter)

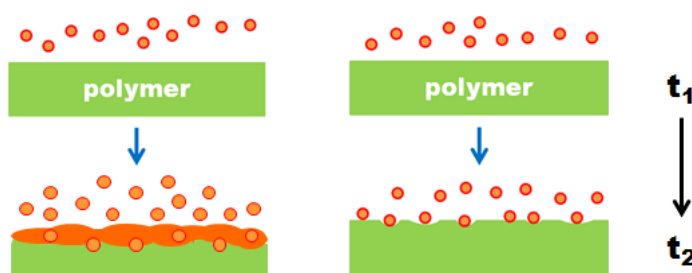
R₀ คือ รัศมีอันตรกิริยา (Interaction radius) ของพอลิเมอร์

R_a คือ พารามิเตอร์การละลายของเส้นเซนของตัวทำละลายและตัวถูกทำละลาย (HSP of two substances)

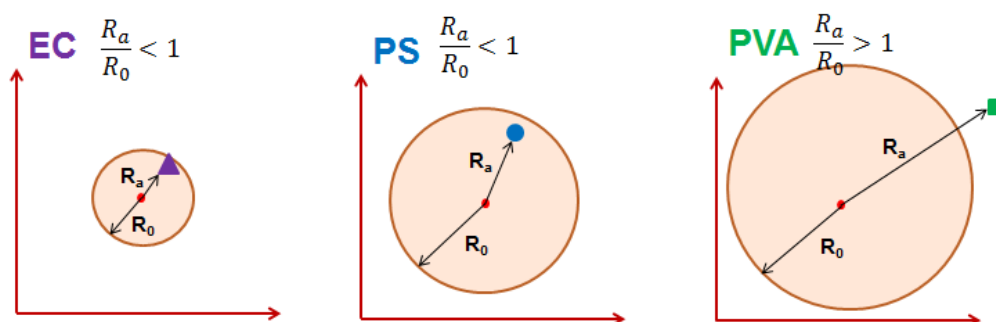
RED คือ ระยะทางพลังงานสัมพัทธ์ (Relative energy distance)

ความสามารถในการละลายเข้ากันของเบนซีนและพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ พิจารณาได้จากค่า RED ดังแสดงผลในตารางที่ 11 หลักการพารามิเตอร์การละลายของเส้นเซนได้อธิบายว่า ตัวที่ถูกทำละลายจะละลายเข้ากันได้ดีในตัวทำละลาย จะต้องมีความเป็นขั้วใกล้เคียงกับความเป็นขั้วของตัวทำละลาย หากค่า RED ของตัวที่ถูกทำละลายและตัวทำละลายมีค่าแนวโน้มลดต่ำลง หมายความว่าตัวถูกทำละลายและตัวทำละลายจะมีความสามารถละลายเข้ากันได้ดี (ภาพที่ 36 (ซ้าย)) ในทางตรงกันข้ามหากค่า ค่า RED ของตัวที่ถูกทำละลายและตัวทำละลายมีค่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นลง หมายความว่าตัวถูกทำละลายและตัวทำละลายจะมีความสามารถละลายเข้ากันได้น้อยลง (ภาพที่ 36 (ขวา) ผลการคำนวณค่า RED จากตารางที่ 11 พบว่าค่า RED ของพอลิเมอร์มีแนวโน้มดังนี้ EC < PS < PVA ซึ่งหมายความว่า EC สามารถละลายเข้ากันได้ดีกับเบนซีนได้ดีที่สุด จากนั้นเป็น PS

และ PVA ตามลำดับ ค่า RED ของพอลิเมอร์ สอดคล้องกับค่าการตอบสนองและ Normalized sensor response ดังภาพที่ 35 โดยสามารถพิจารณาผลการเปรียบเทียบได้จากทรงกลมแฮนเซนดังแสดงในภาพที่ 37 แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนระหว่างค่า R_a/R_0 ซึ่งก็คือค่า RED จะเห็นได้ว่า EC แสดงค่า RED น้อยที่สุด ตามมาด้วย PS และ PVA ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในส่วนของพอลิเมอร์ PI และ PMMA พบว่าไม่สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการพารามิเตอร์การละลายของแฮนเซน เนื่องจากมีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนไม่สอดคล้องกับผลการตรวจวัด แต่อย่างไรก็ตามการตรวจวัดไอระเหยเบนซีนด้วยจาก PI และ PMMA มีค่าการตอบสนองที่ต่ำ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงไม่ได้ให้ความสำคัญในการพิจารณา



ภาพที่ 36 การเปรียบเทียบความสามารถละลายเข้ากันได้ของพอลิเมอร์และ โมเลกุลของเบนซีน (ซ้าย) สามารถละลายเข้ากันได้ดี (ขวา) ละลายเข้ากันได้ไม่ดี



ภาพที่ 37 การเปรียบเทียบทรงกลมแฮนเซนกรณีของ EC, PS และ PVA

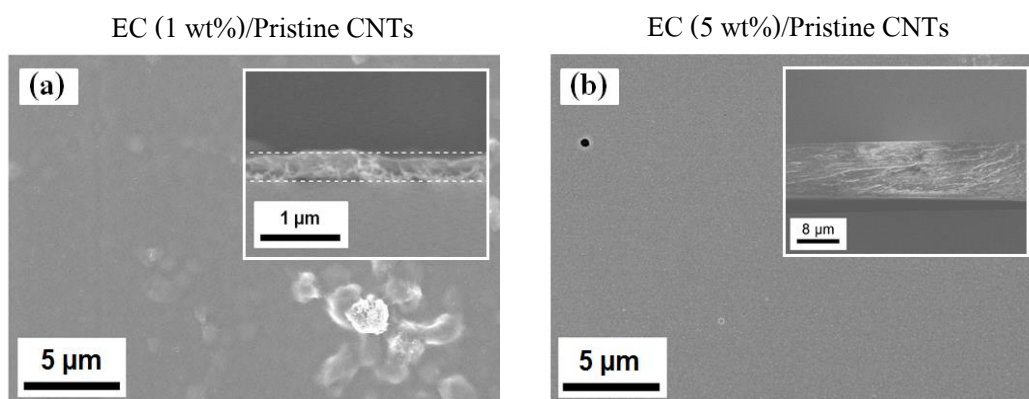
ผลการทดสอบตรวจวัด ไอระเหยของเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ในเบื้องต้นพบว่า EC เป็นพอลิเมอร์ที่ให้ค่าการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ โดยก๊าซเซนเซอร์จาก

EC(5 wt%)/Pristine CNTs ประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนเพิ่มขึ้น 5.27 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับก๊าซเซนเซอร์จาก Pristine CNTs ดังนั้นในส่วนที่สองจึงได้ทำการศึกษาเพิ่มใน ประเด็นผลของปริมาณ EC ที่มีผลต่อการตรวจวัดไอระเหยของเบนซีน โดยทำการเตรียม EC ที่ ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 wt% จากนั้นนำไปทำก๊าซเซนเซอร์เพื่อนำไปใช้ตรวจวัดไอระเหยของ เบนซีน

4.2 ก๊าซเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนด้วยวัสดุท่อนาโนคาร์บอนเคลือบด้วย เอทิลเซลลูโลส

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของท่อนาโนคาร์บอนที่ เคลือบด้วย EC ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน

ภาพที่ 38 (a-b) แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย SEM ของ (a) EC (1 wt%)/Pristine CNTs และ (b) EC (5 wt%)/Pristine CNTs ตามลำดับ โดยภาพแทรกที่ 38 (a-b) เป็นการแสดงภาพตัดขวาง ของฟิล์ม EC ที่ความเข้มข้น 1 และ 5 wt% ที่เคลือบบน CNTs ตามลำดับ



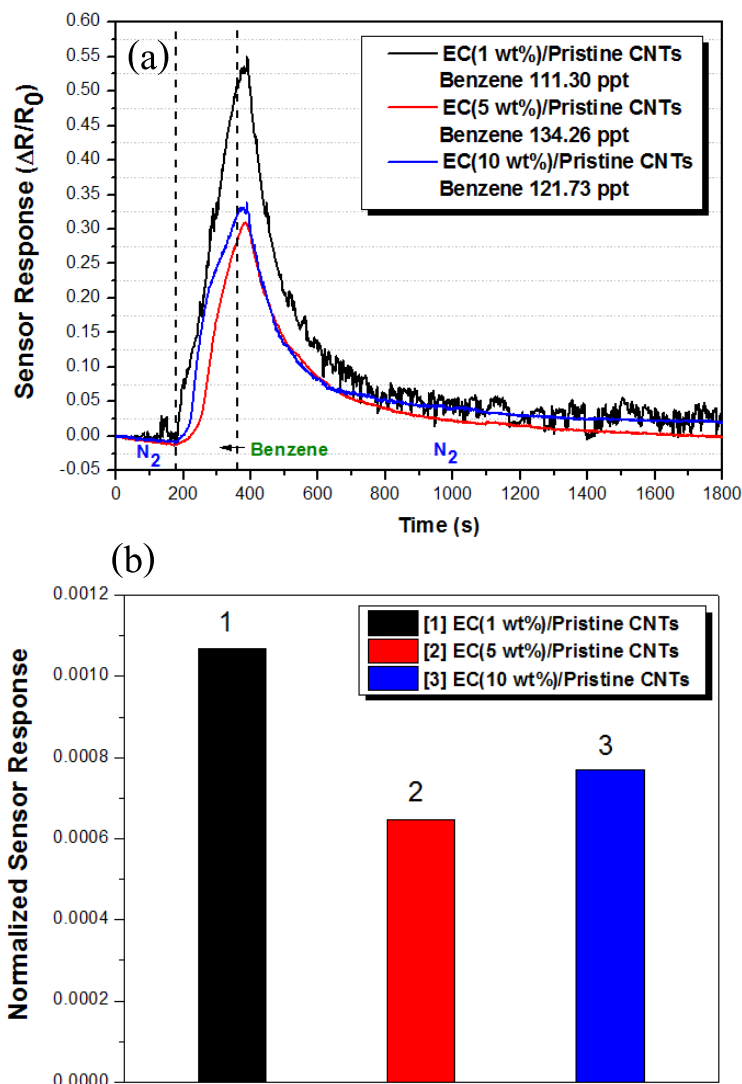
ภาพที่ 38 ภาพ SEM ของ (a) EC (1 wt%)/Pristine CNTs และ (b) EC (5 wt%)/Pristine CNTs

ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM จะเห็นได้ว่าทั้ง EC กรณี 1 และ 5 wt% นั้น EC เคลือบทับ ลงไปบน CNTs ทั้งหมด ไม่สามารถสังเกตเห็น CNTs จากการวิเคราะห์พื้นผิวด้านบนได้ เมื่อ พิจารณาภาพตัดขวางพบว่าฟิล์ม EC (1wt%) และ EC (5 wt%) มีค่าความหนาเท่ากับ 0.22 μm และ 10.18 μm ตามลำดับ เนื่องจากฟิล์ม EC ที่เนื้อแน่น 1 wt% มีความเข้มข้นของพอลิเมอร์ที่ลดลง หลังจากทำการเคลือบด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงแล้ว ส่งผลให้ฟิล์มมีค่าความหนา

ลดลงไปด้วย นอกจากนี้ยังสังเกตเห็น CNTs บางส่วนจากฟิล์ม EC (1 wt%) ในขณะที่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้จาก EC (5 wt%) อาจเป็นไปได้ว่าฟิล์ม EC (5 wt%) มีความเข้มข้นที่มากกว่า ทำให้ชั้นฟิล์ม EC หนากว่าจึงไม่สามารถสังเกตเห็น CNTs ได้ กรณีของ EC (1 wt%) มีความเข้มข้นที่น้อยกว่า ดังนั้นฟิล์มที่เตรียมได้จึงมีความบางกว่า จึงสามารถสังเกตเห็น CNTs ภายในฟิล์มได้

4.2.2 ผลการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs ที่เคลือบด้วย EC ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน

ภาพที่ 39 แสดงกราฟ (a) การตอบสนองและ (b) ค่า Normalized sensor response ต่อไอระเหยเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1wt%)/Pristine CNTs, EC (5wt%)/Pristine CNTs และ EC (10 wt%)/Pristine CNTs ตามลำดับ



ภาพที่ 39 การเปรียบเทียบผลการตอบสนองไอระเหยของเบนซีนของก้ำซเซนเซอร์จาก

EC (1 wt%)/Pristine CNTs, EC (5 wt%)/Pristine และ EC (10 wt%)/Pristine CNTs (a) ผลการตอบสนอง และ (b) Normalized sensor response

จากภาพที่ 39 (a) พบว่าก้ำซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%)/Pristine CNTs มีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนสูงสุด ตามมาด้วยก้ำซเซนเซอร์ EC (10 wt%)/Pristine CNTs และ EC (5 wt%)/Pristine CNTs ตามลำดับซึ่งค่าผลการตอบสนองมีความสอดคล้องกันกับค่า Normalized sensor response ภาพที่ 39 (b)ค่าการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนที่สูงที่สุดของ EC (1 wt%)/Pristine CNTs คาดว่ามาจาก EC ที่เงื่อนไข 1 wt% มีความหนาของฟิล์มที่น้อยกว่า EC

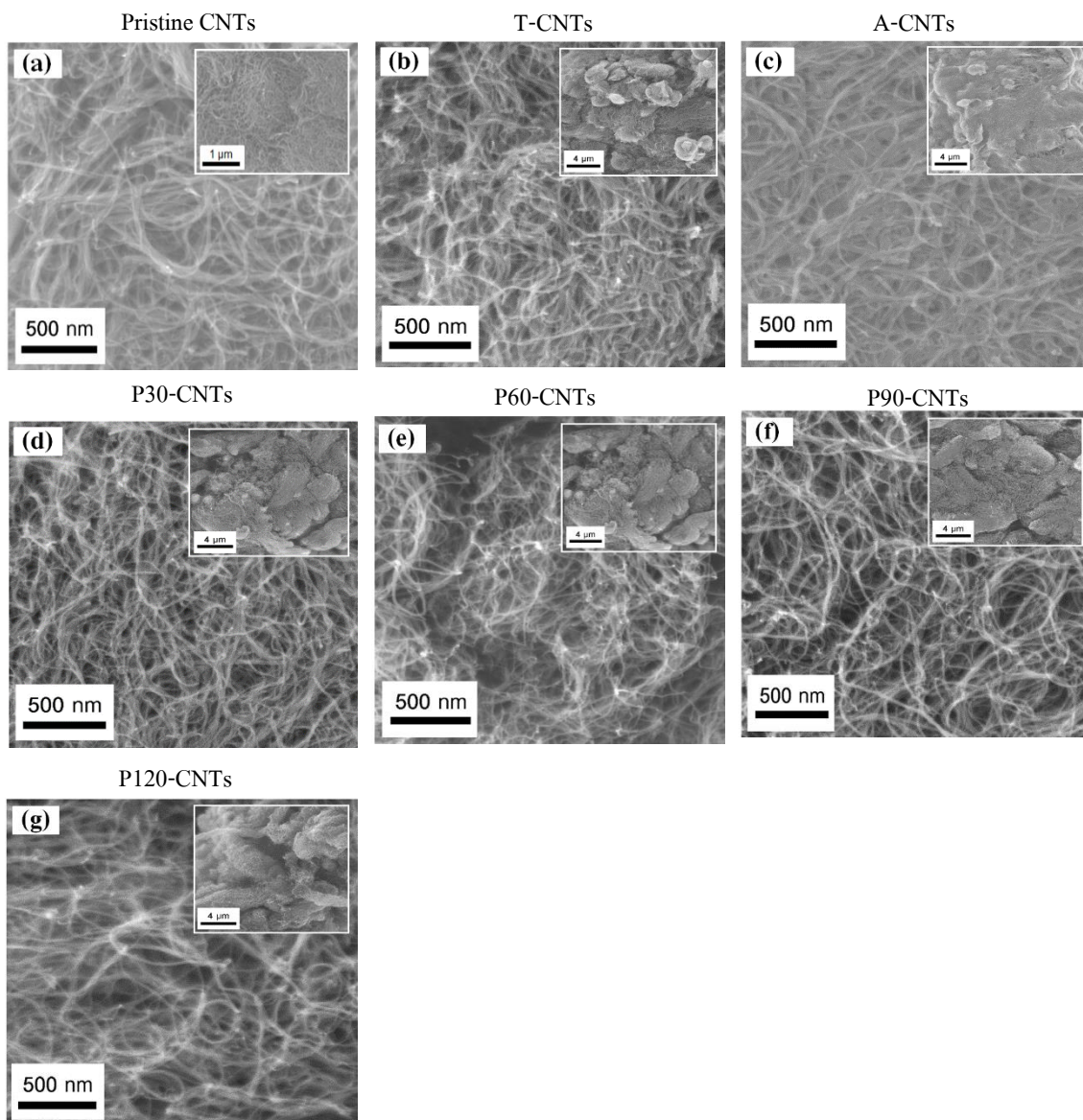
ที่เงื่อนไข 5 wt% (ภาพที่ 38 (a)) เมื่อ EC (1wt%) สัมผัสกับไอระเหยของเบนซิน จึงสามารถพองตัวได้ง่ายกว่า EC (5 wt%) และเมื่อ EC (1 wt%) พองตัวได้ง่ายกว่าทำให้ CNT ที่อยู่ในฟิล์ม EC ที่ความเข้มข้น 1 wt% เคลื่อนตัวห่างออกจากกันได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ EC ที่ความเข้มข้น 5 wt% เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้ามากกว่า ส่งผลให้มีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซินได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตามในกรณี EC ที่เงื่อนไข 10 wt% พบว่ามีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซินไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับ EC ที่เงื่อนไข 5 wt% มีความเป็นไปได้ว่าการพองตัวของฟิล์ม EC เมื่อสัมผัสกับไอระเหยของเบนซินเริ่มที่จะอึดอัดในระดับความหนาหรือค่าความเข้มข้นที่ใช้ในระดับนี้

4.3 ก๊าซเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยของเบนซินด้วยวัสดุท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการทรีตเมนต์และเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลส

ผลการทดสอบการตรวจวัดไอระเหยของเบนซินในเบื้องต้นพบว่า CNTs ที่เคลือบด้วย EC (1 wt%) สามารถตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซินได้ดีที่สุด ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยของเบนซิน จึงได้ทำการทรีตเมนต์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ การทรีตเมนต์ด้วยความร้อน กรดและออกซิเจนพลาสมา เพื่อเพิ่มหมู่ฟังก์ชันให้กับ CNTs โดยประกอบไปด้วยก๊าซเซนเซอร์ดังนี้ Pristine CNTs, Thermal-CNTs (T-CNTs), Acid-CNTs (A-CNTs) และ Oxygen plasma-CNTs (P-CNTs)

4.3.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ CNTs และ CNTs ทำการทรีตเมนต์ด้วยความร้อน, กรด และออกซิเจนพลาสมา

ภาพที่ 40 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย SEM ของ (a) Pristine CNTs (b) T-CNTs, (c) A-CNTs, (d) P30-CNTs, (e) P60-CNTs (f) P90-CNTs และ (g) P120-CNTs ตามลำดับและแสดงภาพแทรกเป็นภาพ SEM ที่กำลังขยายต่ำกว่า

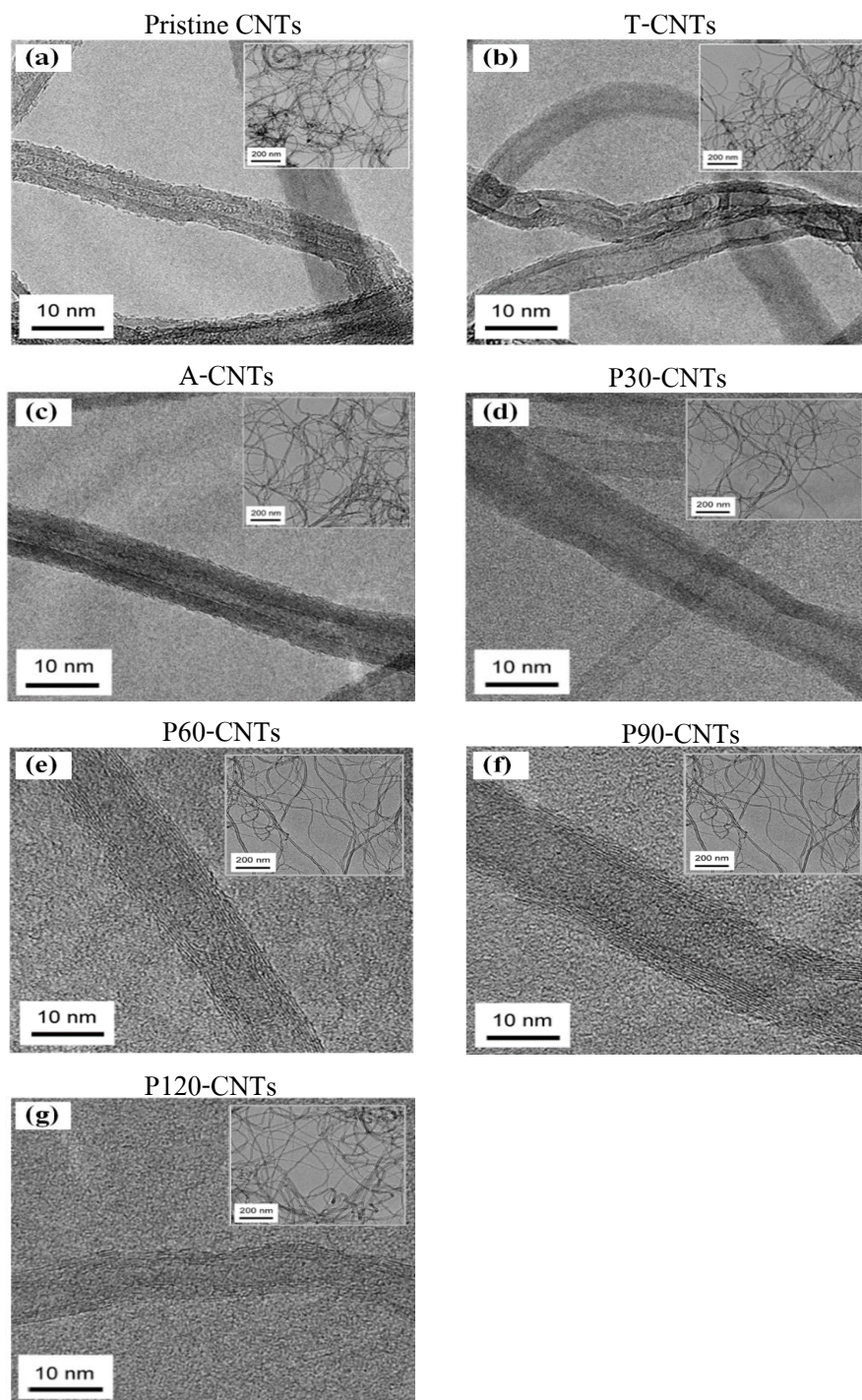


ภาพที่ 40 ภาพ SEM ของ (a) pristine CNTs, (b) T-CNTs, (c) A-CNTs, (d) P30-CNTs, (e) P60-CNTs, (f) P90-CNTs และ (g) P120-CNTs

ภาพที่ 40 (a-c) แสดงภาพ SEM ของ Pristine CNTs, T-CNTs และ A-CNTs ตามลำดับ และภาพที่ 40 (d-g) แสดงภาพของ P-CNTs ที่เวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่า CNTs และ CNTs ที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยวิธีต่าง ๆ มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อที่พาดพันกันไปมาในลักษณะของโครงข่ายที่ติดต่อกัน กรณีของ Pristine CNTs พบว่ามีอะตอมคาร์บอนที่เชื่อมกันอยู่ตามผนัง CNTs สังเกตได้จากจุดคอนทราสต์สีขาวดังแสดงในภาพที่

40 (a) เมื่อทำการทรีตเมนต์ CNTs ด้วยกรด ภาพที่ 40 (c) เห็นชัดได้ว่าคะตะลิสต์ที่เจือปนอยู่ตามผนัง CNTs หายไปอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกรทรีตเมนต์ด้วยความร้อนและออกซิเจน พลาสมาซึ่งยังคงสามารถสังเกตเห็นคะตะลิสต์ที่ยังหลงเหลืออยู่ตามผนัง CNTs อย่างไรก็ตามการทรีตเมนต์ CNTs ด้วยวิธีต่าง ๆ ลักษณะทางกายภาพของ CNTs ยังคงมีลักษณะคงเดิม ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ TEM ในการวิเคราะห์เพื่อศึกษาในรายละเอียดเชิงลึกต่อไป

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของท่อนาโนคาร์บอนและท่อนาโนคาร์บอนที่ทำการทรีตเมนต์ด้วยความร้อน, กรดและออกซิเจนพลาสมา ภาพที่ 41(a-g) แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย TEM ของ (a) Pristine CNTs (b) T-CNTs, (c) A-CNTs, (d) P30-CNTs, (e) P60-CNTs (f) P90-CNTs และ (g) P120-CNTs ตามลำดับ ในขณะที่ภาพแทรกเป็นภาพ TEM ที่กำลังขยายต่ำกว่า



ภาพที่ 41 ภาพ TEM ของ (a) Pristine CNTs (b) T-CNTs, (c) A-CNTs, (d) P30-CNTs, (e) P60-CNTs (f) P90-CNTs และ (g) P120-CNTs

ภาพที่ 41 แสดงภาพ TEM ของ Pristine CNTs และ CNTs ที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยกรด, ความร้อนและออกซิเจนพลาสมาพบว่า CNTs มีลักษณะที่พาดกันไปมาเป็นเครือข่ายเชื่อมโยงกัน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของ Pristine CNTs, T-CNTs และ A-CNTs เท่ากับ 12.0 ± 1.5 , 20.8 ± 7.4 และ 9.2 ± 3.2 นาโนเมตรตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 12 ขนาดที่ลดลงของ A-CNTs อาจเกิดจากการคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบที่เกาะติดที่ผนังท่อ CNTs ถูกกำจัดออกไปทำให้มีขนาดลดลง แต่อย่างไรก็ตามกรณีของ T-CNTs นั้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นแต่ก็มีค่าความแปรปรวนที่มากขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้จุดคอนทราสต์สีดำในภาพแสดงถึงคะตะลิสต์ที่ติดเจือปนอยู่พบว่าหลังจากทำการทรีตเมนต์ด้วยกรดแล้วปริมาณคะตะลิสต์ลดลงหลังการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาพบว่า มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของ P-CNTs เวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 นาทีเท่ากับ 12.0 ± 1.5 , 12.6 ± 2.87 , 13.1 ± 3.5 , 16.3 ± 4.5 และ 16.9 ± 3.2 นาโนเมตรตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 12 หลังจากทำการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาที่ใช้เวลาต่าง ๆ กันมีผลทำให้คะตะลิสต์และคาร์บอนอสัณฐานที่เจือปนอยู่ มีปริมาณลดลงเมื่อพิจารณาลักษณะผนังท่อพบว่าก่อนทำการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา ผนังท่อของ CNTs มีกลุ่มของคาร์บอนอสัณฐานบางส่วนติดอยู่ที่พื้นผิวของ CNTs ต่อมาเมื่อทำการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาที่เวลา 30 และ 60 นาทีผนังท่อจะมีลักษณะเรียบขึ้นและผนังท่อบางส่วนมีลักษณะขรุขระเพียงเล็กน้อย สาเหตุคาดว่าเกิดจากการพลาสมาของออกซิเจนที่ไปกำจัดคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบที่ติดอยู่บนผนังท่อออกไป แต่อย่างไรก็ตามการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาที่เวลา 90 และ 120 นาที ลักษณะของผนังท่อจะมีลักษณะขรุขระขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาที่เวลา 120 นาที ลักษณะของผนังท่อขรุขระมากยิ่งขึ้นและบริเวณบางส่วนของผนังหายไป สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน

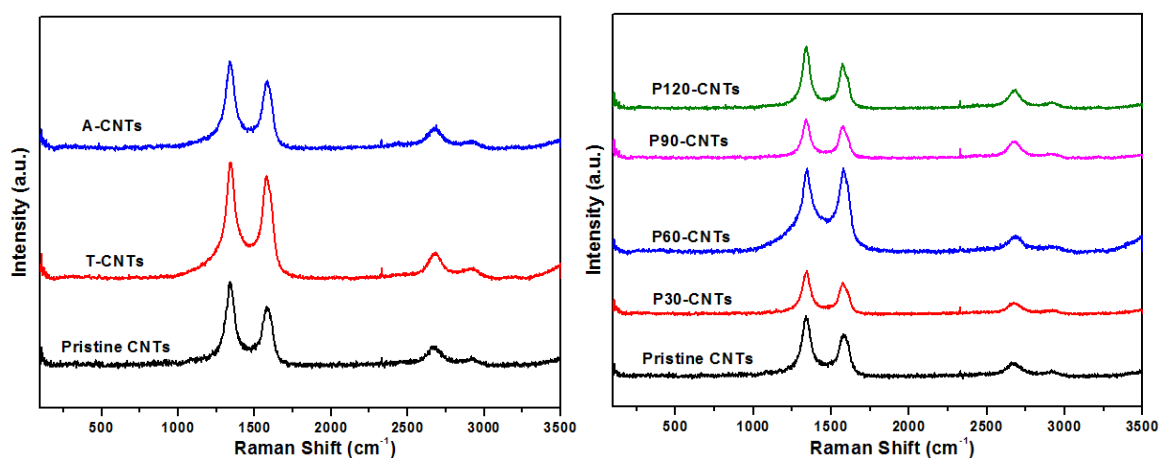
ตารางที่ 12 ค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างชนิดต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (นาโนเมตร)
Pristine CNTs	12.0 ± 1.5
T-CNTs	20.8 ± 7.4
A-CNTs	9.2 ± 3.2
P30-CNTs	12.6 ± 2.9
P60-CNTs	13.1 ± 3.5
P90-CNTs	16.3 ± 4.5

ตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (นาโนเมตร)
P120-CNTs	16.9±3.2

4.3.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโทรสโกปีท่อนาโนคาร์บอนและท่อนาโนคาร์บอนที่ทำการทรีตเมนต์ด้วยความร้อน กรดและออกซิเจนพลาสมา

ภาพที่ 42 แสดงรามานสเปกตรัมของ Pristine CNTs, T-CNTs, A-CNTs และ P-CNTs ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องรามานสเปกโทรสโกปี



ภาพที่ 42 รามานสเปกตรัมของ Pristine CNTs, T-CNTs, A-CNTs และ P-CNTs

ตารางที่ 13 ค่า I_G/I_D ของตัวอย่างชนิดต่าง ๆ

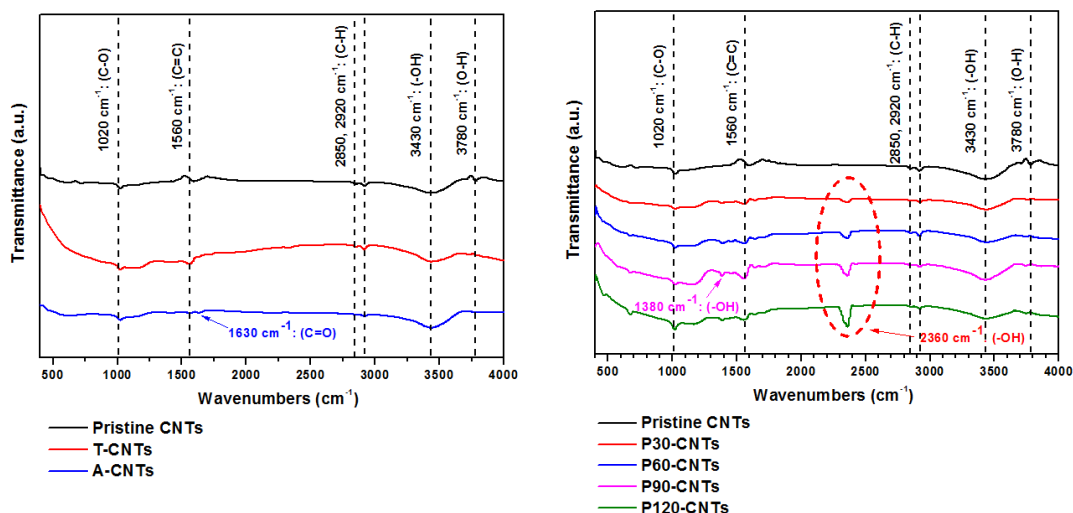
ตัวอย่าง	I_G/I_D
Pristine CNTs	0.72±0.02
T-CNTs	0.89±0.06
A-CNTs	0.76±0.02
P30-CNTs	0.73±0.03
P60-CNTs	0.97±0.03
P90-CNTs	0.84±0.09
P120-CNTs	0.74±0.05

ภาพที่ 42 แสดงรามานสเปกตรัมของ pristine CNTs, A-CNTs, T-CNTs และ P-CNTs จากรามานสเปกตรัม พบว่าทุกตัวอย่างมีพีคหลัก 3 พีคที่ตำแหน่งประมาณ 1340cm^{-1} , 1580cm^{-1} และ 2680cm^{-1} ตามลำดับ โดยแต่ละพีคแสดงถึงตำแหน่งของ *D*, *G* และ *2D* band ตามลำดับ โดย *D* band แสดงถึงความไม่สมบูรณ์ของแผ่นกราฟไฟต์และคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบที่เจือปนอยู่ *G* band แสดงถึงความเป็นระเบียบของกราฟไฟต์ โดยทั่วไปค่าความสมบูรณ์ของ CNTs สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างความสูงของ *G* band ต่อ *D* band (I_G/I_D) ค่า I_G/I_D แสดงในตารางที่ 13

จากผลที่ได้พบว่าการทรีตเมนต์ด้วยความร้อนค่าความสมบูรณ์ของ CNTs เพิ่มขึ้น โดยอาจมีสาเหตุมาจากสามารถกำจัดคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบออกไปได้ ในทางตรงกันข้ามการทรีตเมนต์ด้วยกรดนั้น พบว่าค่าความสมบูรณ์ของ CNTs เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่น้อยกว่าวิธีการทรีตเมนต์ด้วยความร้อน การทรีตเมนต์ด้วยกรดนั้น นอกจากจะกำจัดคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบออกไปแล้ว กรดอาจจะเกิดปฏิกิริยารุนแรงทำให้ผนังท่อของ CNTs ที่บริเวณนั้น ๆ เกิดความไม่เป็นระเบียบขึ้นมาได้ ในส่วนของการออกซิเจนพลาสมาช่วงเวลา 0-60 นาทีค่าความสมบูรณ์ของ CNTs มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยอาจมีสาเหตุมาจากการกำจัดคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบออกไปแต่อย่างไรก็ตามพบว่าการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาที่เวลา 90 และ 120 นาทีมีค่าความสมบูรณ์ของ CNTs ลดลง ซึ่งสาเหตุดังกล่าวคาดว่าเป็นผลมาจากการใช้เวลานานเกินไปส่งผลให้พลาสมาของออกซิเจนไปทำลายผนังของ CNTs ดังนั้น จึงเกิดความไม่เป็นระเบียบขึ้นมาซึ่งทำให้ค่าความสมบูรณ์ของ CNTs ลดลงนั่นเอง ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย TEM

4.3.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูรีเยร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีท่อนานโนคาร์บอนและ CNTs ที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยความร้อน กรดและออกซิเจนพลาสมา

ภาพที่ 43 แสดง FTIR สเปกตรัมของ Pristine CNTs, T-CNTs, A-CNTs และ P-CNTs ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูรีเยร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR)

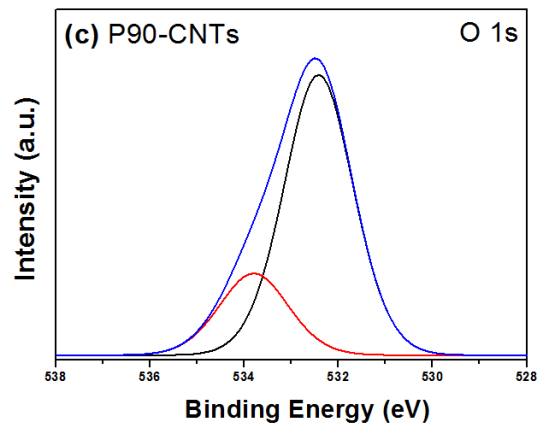
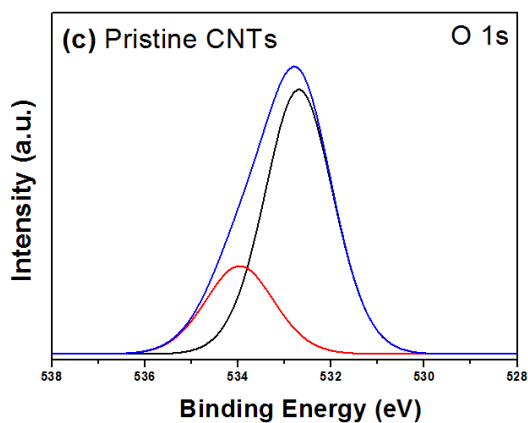
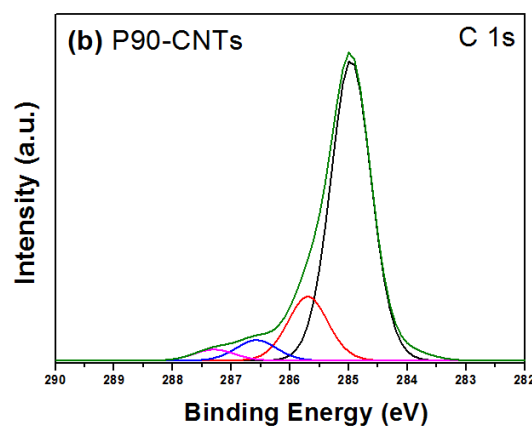
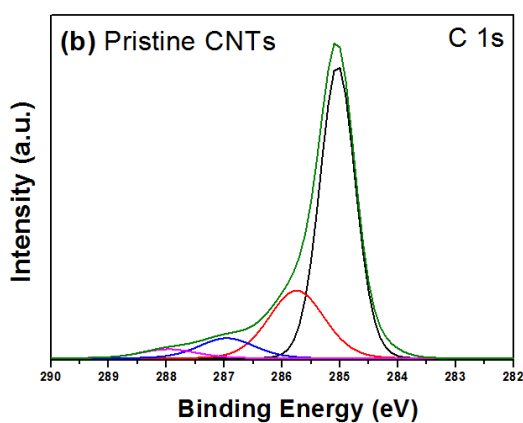
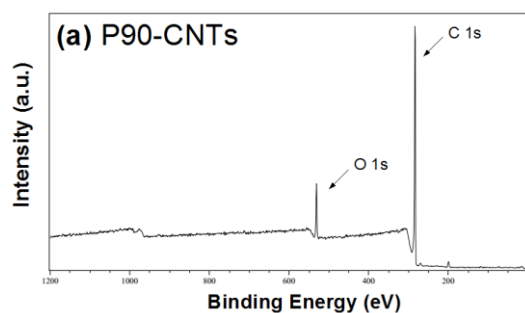
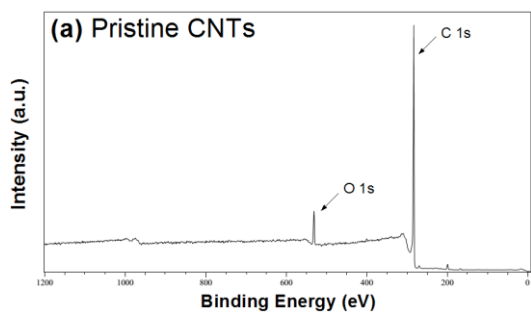


ภาพที่ 43 FTIR สเปกตรัมของ Pristine CNTs, T-CNTs, A-CNTs และ P-CNTs

จาก FTIR สเปกตรัม ที่ได้พบว่าตัวอย่างทั้งหมดเกิดพีคขึ้น 5 พีคหลัก ที่บริเวณ ตำแหน่ง 1020 cm^{-1} , 1560 cm^{-1} , 2920 cm^{-1} , 3430 cm^{-1} และ 3780 cm^{-1} ซึ่งได้แก่หมู่ฟังก์ชัน C-O (Busquets-Fite et al., 2013), C=C (Abuilaoui, Laoui, Mamdouh, Al-Harathi, & Atieh, 2010), C-H (Zhao et al., 2004), -OH (Chen, Xia, Tan, Zhou, & Yuan, 2009) และ O-H (Vijayalakshmi, Jayachandran, & Sanjeeviraja, 2003) ตามลำดับและพบว่า A-CNTs เกิดพีคใหม่ที่ตำแหน่ง 1630 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน C=O (Yudianti et al., 2011) จากผลการทดลองเบื้องต้นนี้ แสดงว่าการ ทรินเมนต์ด้วยกรดทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันได้มากกว่าการทรินเมนต์ด้วยความร้อน อีกทั้งยังพบว่าการ ทรินเมนต์ด้วยดิวออกซิเจนพลาสมาทำให้เกิดพีคใหม่ที่ตำแหน่ง 1380 cm^{-1} และ 2360 cm^{-1} โดย พีคดังกล่าวคือหมู่ฟังก์ชันของ -OH (Abdel-Ghani, El-Chaghaby, & Helal, 2014) นอกจากนี้ยัง พบว่าเมื่อทำการทรินเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมานานขึ้นส่งผลให้พีคที่ตำแหน่ง 3780 cm^{-1} ซึ่งเป็น พีคที่แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของ O-H หายไป สาเหตุอาจมาจากการใช้เวลาทรินเมนต์ด้วยออกซิเจน พลาสมาที่นานมากจนเกินไป จนทำลายหมู่ฟังก์ชันดังกล่าว

4.3.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีของท่อนาโน คาร์บอนและท่อนาโนคาร์บอนที่ทำการทรินเมนต์ออกซิเจนพลาสมา

ภาพที่ 44-45 แสดงสเปกตรัมของ Pristine CNTs และ P90-CNTs ที่วิเคราะห์ด้วย เครื่องเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (XPS) ตามลำดับ



ภาพที่ 44 XPS (a) สเปกตรัมของ Pristine CNTs ที่ binding energy ในช่วง 0-1200 eV (b) สเปกตรัมของ C 1s และ (c) สเปกตรัมของ O 1s ของ Pristine CNTs

ภาพที่ 45 XPS (a) สเปกตรัมของ P90-CNTs ที่ binding energy ในช่วง 0-1200 eV (b) สเปกตรัมของ C 1s และ (c) สเปกตรัมของ O 1s ของ P90-CNTs

ภาพที่ 44 (a) และ 45 (a) แสดง XPS สเปกตรัมของ Pristine CNTs และ P90-CNTs ที่ค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ในช่วงพลังงาน 0 – 1200 eV ตามลำดับ เมื่อพิจารณา สเปกตรัมของ Pristine CNTs พบว่าเกิดพีคหลักที่บริเวณตำแหน่ง 284.7 eV และ 532.7 eV ซึ่งเป็น สเปกตรัมของ C 1s และ O 1s ตามลำดับ โดยมีปริมาณธาตุคาร์บอนและออกซิเจนเท่ากับ 93.57% และ 4.82% ตามลำดับ หลังการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาเป็นเวลา 90 นาที พบว่า P90-CNTs เกิดพีคหลักที่บริเวณตำแหน่ง 285.2 eV และ 532.2 eV ซึ่งเป็นสเปกตรัมของ C 1s และ O 1s ตามลำดับมีปริมาณธาตุคาร์บอนและออกซิเจนเท่ากับ 92.30% และ 6.78% ตามลำดับผลการ วิเคราะห์ด้วย XPS แสดงให้เห็นว่าหลังการทรีตเมนต์ CNTs ด้วยออกซิเจนพลาสมา ปริมาณธาตุ ออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเพิ่มจาก 4.82% เป็น 6.78% สาเหตุดังกล่าวมาจากการเกิดปฏิกิริยากัน ระหว่างพลาสมาของออกซิเจนกับผนังท่อของ CNTs ส่งผลให้เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนที่ บริเวณผิวของ CNTs ในขณะที่ระหว่างการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมานั้นยังส่งผลให้ปริมาณ ธาตุคาร์บอนในตัวอย่างลดลงจาก 93.57% เหลือ 92.30% คาดว่ามาจากการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจน พลาสมาส่งผลให้เกิดการทำลายผนังท่อของ CNTs ทำให้ปริมาณธาตุคาร์บอนมีค่าลดลง ตารางที่ 14-15 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์สัมพัทธ์ขององค์ประกอบและพันธะชนิดต่าง ๆ รวมไปถึงตำแหน่งที่เกิด พีคของ Pristine CNTs และ P90-CNTs

ตารางที่ 14 ค่าเปอร์เซ็นต์สัมพัทธ์ขององค์ประกอบและพันธะชนิดต่าง ๆ รวมถึงตำแหน่งพีค ของ Pristine CNTs และ P90-CNTs ที่บริเวณตำแหน่ง C 1s

ตัวอย่าง	Pristine CNTs	P90-CNTs
sp ² carbon(C=C) (%)	70.28	69.72
Binding energy (eV)	285.05	284.98
sp ³ carbon (%)	16.28	15.02
Binding energy (eV)	285.76	285.70
Carbonyl group (C=O) (%)	4.77	4.80
Binding energy (eV)	287.00	286.62
Carboxyl group (COO) (%)	2.24	2.76
Binding energy (eV)	288.02	287.33

ตารางที่ 15 ค่าเปอร์เซ็นต์สัมพัทธ์ขององค์ประกอบและพันธะชนิดต่าง ๆ รวมถึงตำแหน่งพีคของ Pristine CNTs และ P90-CNTs ที่บริเวณตำแหน่ง O 1s

ตัวอย่าง	Pristine CNTs	P90-CNTs
Carbonyl group (C=O) (%)	3.62	5.25
Binding energy (eV)	532.69	532.42
Carboxyl group (-COO) (%)	1.20	1.53
Binding energy (eV)	533.95	533.81

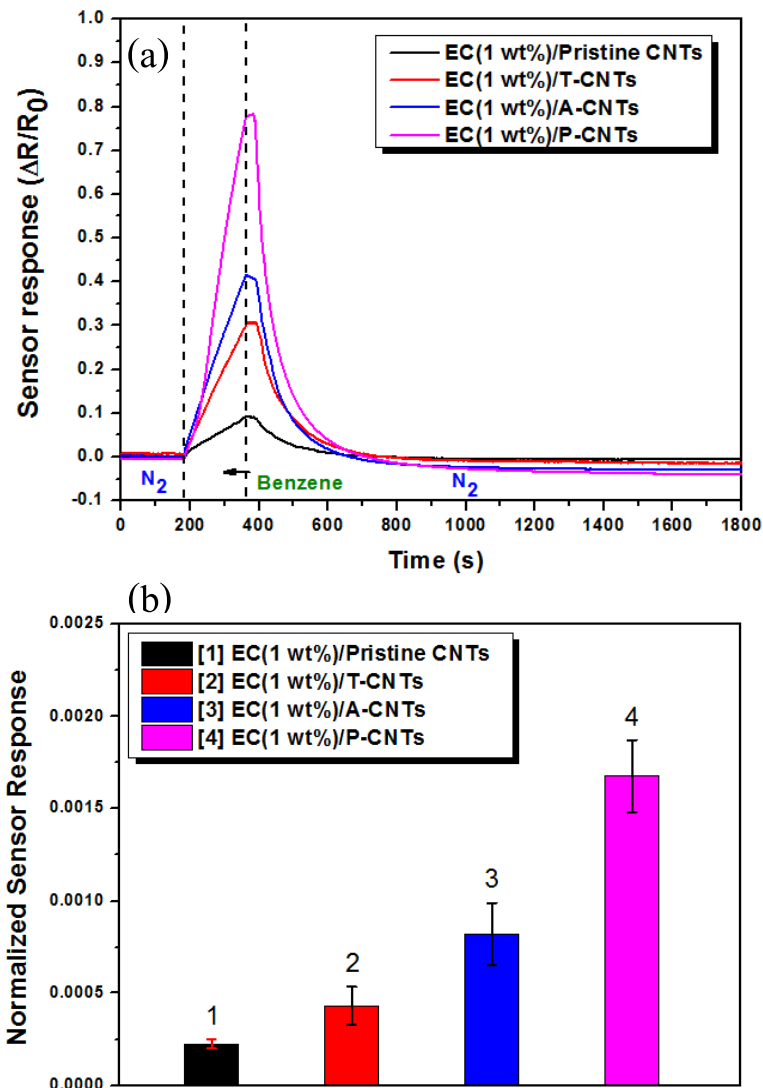
4.3.6 ผลการตอบสนองต่อไอรยะเหยของเบนซินของก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs ที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยความร้อน กรดและออกซิเจนพลาสมา และเคลือบด้วย EC (1wt%)

ภาพที่ 46 (a-d) แสดงกราฟการตอบสนองต่อไอรยะเหยเบนซินของก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%)/Pristine CNTs และ CNTs ที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยความร้อน กรดและออกซิเจนพลาสมาเป็นเวลา 60 นาที ได้แก่ EC (1 wt%)/T-CNTs, EC (1 wt%)/A-CNTs และ EC (1 wt%)/P-CNTs โดยจะใช้เซนเซอร์จำนวน 4 ตัวในการทดสอบค่าความเข้มข้นของไอรยะเหยของเบนซินที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์แต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ค่าความเข้มข้นไอรยะเหยของเบนซินที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ

ก๊าซเซนเซอร์	ความเข้มข้นของไอรยะเหยเบนซิน (parts per thousand, ppt)
EC(1 wt%)/Pristine CNTs	141.90
EC(1 wt%)/T-CNTs	170.42
EC(1 wt%)/A-CNTs	170.42
EC(1 wt%)/P-CNTs	143.29

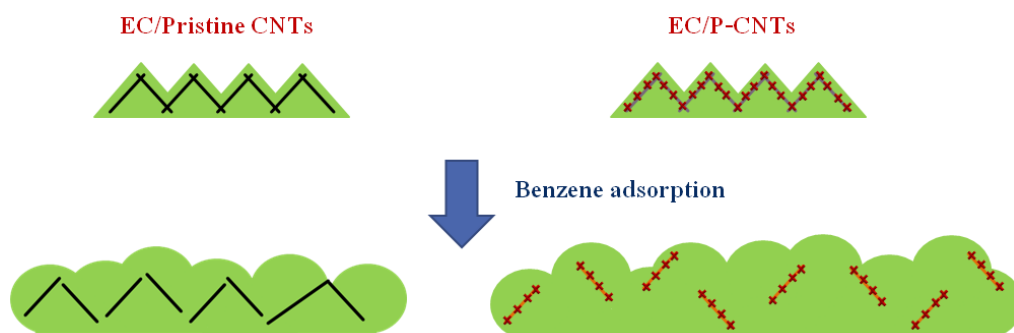
ภาพที่ 46 (a) เป็นภาพตัวแทนลักษณะการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละชนิด (b) แสดงค่า Normalized sensor response ของก๊าซเซนเซอร์



ภาพที่ 46 การเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) /Pristine CNTs, EC (1 wt%)/A-CNTs, EC (1 wt%)/T-CNTs และ EC (1 wt%)/P60-CNTs (a) ผลการตอบสนอง และ (b) Normalized sensor response

จากภาพที่ 46 (a) ก๊าซเซนเซอร์ทุกชนิดมีลักษณะการตอบสนองไปในแนวโน้มเดียวกันคือ ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่อสัมผัสกับไอระเหยของเบนซีน และค่าความต้านทานกลับสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นเมื่ออยู่ภายใต้ก๊าซไนโตรเจนผลการตรวจวัดต่อไอระเหยของเบนซีนพบว่า ก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) /P-CNTs มีค่าการตอบสนองสูงสุด ตามมาด้วยก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) /A-CNTs, EC (1 wt%) /T-CNTs และ EC (1 wt%) /Pristine CNTs ตามลำดับ สาเหตุ

ดังกล่าวคาดว่ามาจากการที่รีดเมนต์ CNTs ด้วยกรดและออกซิเจนพลาสมาทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของ CNTs (ภาพที่ 43) โดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวมีส่วนสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่าง EC กับผิว CNTs ได้ดีขึ้น เมื่อพอลิเมอร์พองตัว ทำให้ CNTs ถูกดึงห่างออกจากกันมากขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้มีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการที่รีดเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา สำหรับกลไกการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) /P-CNTs ต่อไอระเหยของเบนซีน ได้แสดงไว้ในภาพที่ 47



ภาพที่ 47 กลไกการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์ EC (1 wt%) /P-CNTs

ตารางที่ 17 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) ที่เคลือบด้วยบน Pristine CNTs และเคลือบบนตัวอย่างที่ผ่านการรีดเมนต์แบบต่าง ๆ พบว่าได้ว่าก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) /P-CNTs มีค่าเวลาการตอบสนองที่ดีที่สุด ในขณะที่ก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) /A-CNTs มีค่าเวลาคืนตัวที่ดีที่สุด

ตารางที่ 17 ค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) ที่เคลือบด้วยบน Pristine CNTs และเคลือบบนตัวอย่างที่ผ่านการรีดเมนต์แบบต่าง ๆ

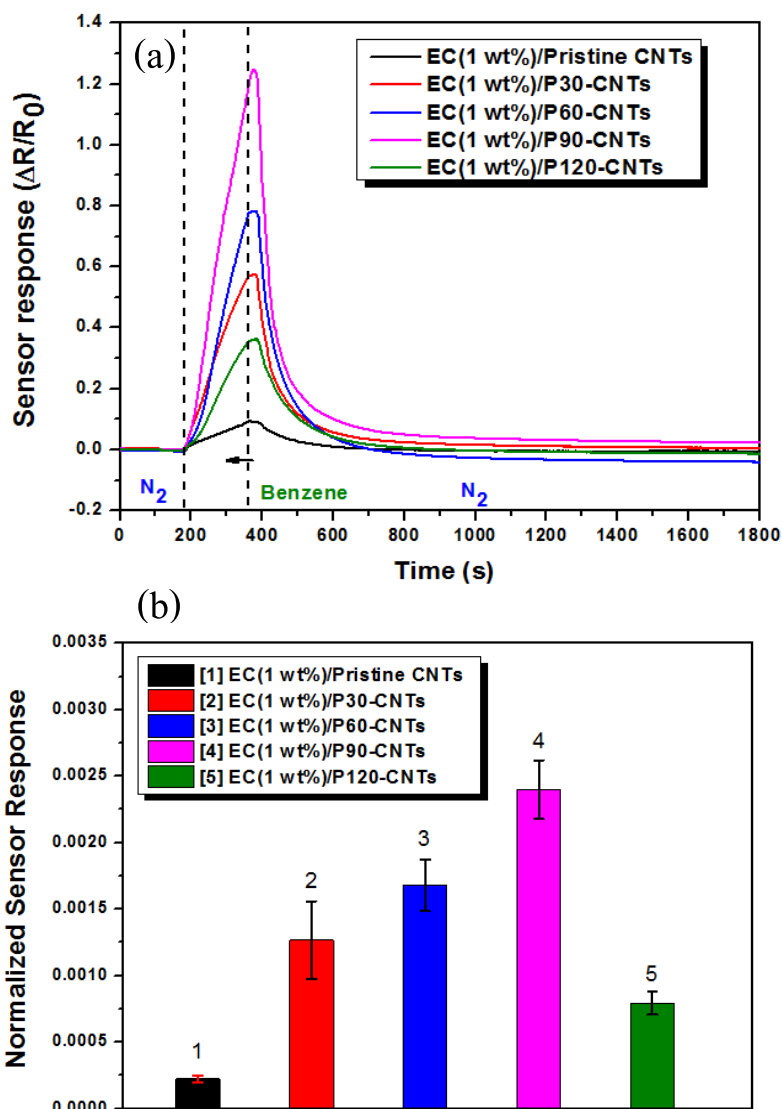
Gas sensor	Response time (s)	Recovery time (s)
EC (1 wt%) /Pristine CNTs	165	467
EC (1 wt%) /T-CNTs	161	355
EC (1 wt%) /A-CNTs	160	319
EC (1 wt%) /P-CNTs	112	441

เมื่อเปรียบเทียบค่าการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ทั้ง 4 ชนิด พบว่า EC (1 wt%)/P-CNTs มีค่าการตอบสนองต่อไอรยะเหยเบนซีนสูงสุด ตามด้วย EC (1 wt%)/A-CNTs, EC (1 wt%)/T-CNTs และ EC (1 wt%)/Pristine CNTs ตามลำดับซึ่งค่าผลการตอบสนองมีความสอดคล้องกันกับค่า Normalized sensor response ภาพที่ 46 (b) โดยพบว่าค่าการตอบสนองของ EC (1 wt%) /P-CNTs, EC (1 wt%) /A-CNTs และ EC (1 wt%) /T-CNTs นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นกว่า EC (1 wt%) /Pristine CNTs เป็น 7.48, 3.66 และ 1.92 เท่า ตามลำดับ นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาเพิ่มเติม โดยศึกษาปัจจัยเวลาการทรีตเมนต์ที่เวลาต่าง ๆ กัน ได้แก่ 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที และนำไปตรวจวัดไอรยะเหยของเบนซีน

ภาพที่ 48 (a-e) แสดงกราฟการตอบสนองต่อไอรยะเหยเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์ที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาเป็นเวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที ได้แก่ EC (1 wt%)/Pristine CNTs, EC (1 wt%)/P30-CNTs, EC (1 wt%)/P60-CNTs, EC (1 wt%)/P90-CNTs และ EC (1 wt%)/P120-CNTs โดยจะใช้เซนเซอร์ชนิดละ 4 ตัวในการทดสอบค่าความเข้มข้นของไอรยะเหยเบนซีนที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์แต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 18 กราฟในภาพที่ 48 (a) เป็นภาพตัวแทนลักษณะการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละชนิด

ตารางที่ 18 ค่าความเข้มข้นไอรยะเหยของเบนซีนที่ใช้ในการทดสอบก๊าซเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ

ก๊าซเซนเซอร์	ความเข้มข้นของไอรยะเหยเบนซีน (parts per thousand, ppt)
EC (1 wt%)/Pristine CNTs	141.90
EC(1 wt%)/P30-CNTs	146.08
EC (1 wt%)/P60-CNTs	143.29
EC (1 wt%)/P90-CNTs	143.29
EC (1 wt%)/P120-CNTs	129.38



ภาพที่ 48 การเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อไอระเหยเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs ที่ทำการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาและเคลือบด้วย EC (1 wt%) (a) ผลการตอบสนอง และ (b) Normalized sensor response

จากภาพที่ 48 (a) แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนของก๊าซเซนเซอร์จาก CNTs ที่ทำการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาที่เวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที พบว่า CNTs ที่ทำการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาที่เวลา 90 นาที มีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนดีที่สุด สาเหตุดังกล่าวคาดว่ามาจากการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาที่เงื่อนไขนี้ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของ CNTs มากที่สุด สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค

XPS ดังแสดงในภาพที่ 45 และตารางที่ 14-15 หลังการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาพบว่า ปริมาณหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนในตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น โดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวจะช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่าง CNTs กับ EC ได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง Pristine CNTs ดังนั้นก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%)/P90-CNTs จึงมีความสามารถในการตรวจวัดไอระเหย ของเบนซิน ได้ดีกว่าก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%)/Pristine CNTs (Yoo et al., 2009)

อย่างไรก็ตาม CNTs ที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาเป็นเวลา 120 นาที พบว่ามีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซินลดลง สาเหตุดังกล่าวคาดว่ามาจากการทรีตเมนต์ ด้วยออกซิเจนพลาสมานานจนเกินไป ทำให้ทำลายผนังท่อของ CNTs บางส่วน มีผลทำให้ปริมาณ ของหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนลดลงไปด้วย โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วย TEM ของ P120-CNTs ภาพที่ 41(g) เห็นได้ว่าผนังท่อของ CNTs บางส่วนถูกทำลายออกไป ทำให้หมู่ฟังก์ชัน ที่ยึดติดที่ผนังท่อเดิมถูกกำจัดออกไปด้วย ดังนั้นปริมาณหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนในตัวอย่างจึงลดลงไป ด้วย (Yoo et al., 2009) นอกจากนี้ผลดังกล่าวยังมีสอดคล้องกับค่าความสมบูรณ์ของ P120-CNTs ตารางที่ 13 พบว่า CNTs มีค่าความสมบูรณ์ลดลงเมื่อใช้เวลากการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา 120 นาที จึงอาจสรุปได้ว่าการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาที่เวลา 120 นาที เป็นเวลานาน จนเกินไป ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอระเหยของเบนซินของก๊าซเซนเซอร์

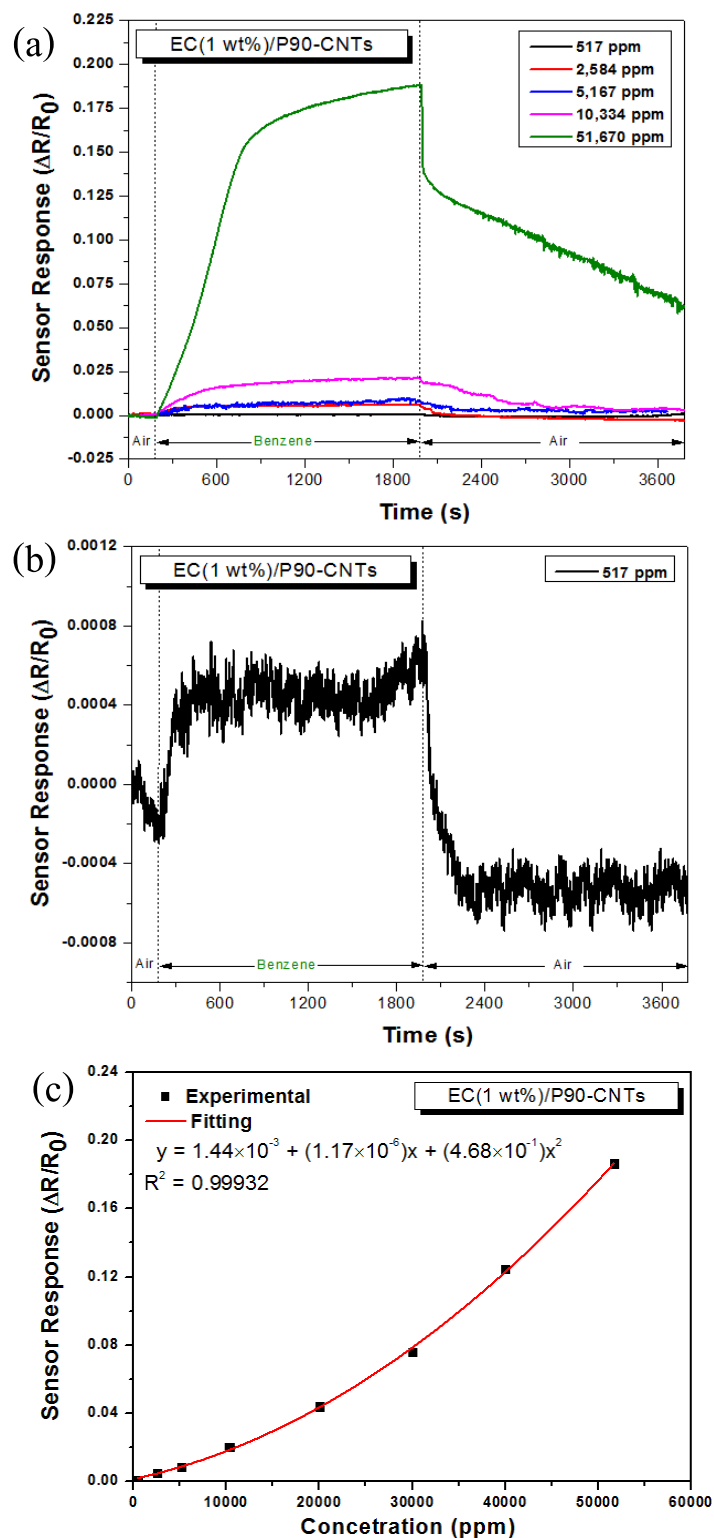
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา สามารถ ปรับปรุงพื้นผิวของ CNTs ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอระเหยของเบนซินได้เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยของเบนซินพบว่าก๊าซเซนเซอร์ที่ผ่านการทำ ทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาที่เวลา 90 นาที (EC (1wt%)/P90-CNTs) สามารถเพิ่มค่าการ ตอบสนองดีขึ้นถึง 10.67 เท่าเมื่อเทียบกับ EC (1wt%)/Pristine CNTs ตารางที่ 19 แสดงค่าเวลาการ ตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) ที่เคลือบด้วยบน Pristine CNTs และ เคลือบบนตัวอย่างที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาที่เวลาต่าง ๆ กันผลการทดลองที่ได้ แสดงให้เห็นว่าก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%)/P60-CNTs มีค่าเวลาการตอบสนองดีที่สุด ในขณะที่ ก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%)/P120-CNTs มีค่าเวลาการคืนตัวที่ดีที่สุด

ตารางที่ 19 ค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) ที่เคลือบบน Pristine CNTs และเคลือบบนตัวอย่างที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาที่เวลาต่าง ๆ กัน

Gas sensor	Response time (s)	Recovery time (s)
EC(1 wt%)/Pristine CNTs	165	467
EC(1 wt%)/P30-CNTs	159	691
EC(1 wt%)/P60-CNTs	161	545
EC(1 wt%)/P90-CNTs	163	659
EC(1 wt%)/P120-CNTs	163	441

4.3.7 ผลการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนในช่วงระดับความเข้มข้นระดับหนึ่งในพื้นผิวส่วนของก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาที่เวลา 90 นาทีและเคลือบด้วย EC (1wt%)

ผลการทดลองในข้างต้นได้แสดงให้เห็นแล้วว่าก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) /P90-CNTs มีความสามารถต่อการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนได้ดีที่สุด ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยการนำก๊าซเซนเซอร์ดังกล่าวมาใช้ตรวจวัดในช่วงระดับความเข้มข้นระดับหนึ่งในพื้นผิวส่วน (parts per million,ppm) เริ่มแรกก๊าซเซนเซอร์จะถูกทิ้งไว้ภายใต้อากาศเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นจะทำการปล่อยไอระเหยเบนซีนในช่วงความเข้มข้น 517-51,670 ppm เข้าสู่ระบบการตรวจวัดเป็นเวลา 30 นาที และทำการไล่โมเลกุลไอระเหยของเบนซีนภายใต้อากาศเป็นเวลา 30 นาที ภาพที่ 49 แสดงกราฟการตอบสนองและ Normalized sensor response ต่อไอระเหยเบนซีนในช่วงระดับ ppm ของก๊าซเซนเซอร์ EC (1wt%) /P90-CNTs โดยความเข้มข้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 517-51,670 ppm



ภาพที่ 49 (a) ค่าการตอบสนองไอระเหยของเบนซีนช่วงระดับความเข้มข้น 517-51,670 ppm (b) ที่ระดับความเข้มข้น 517 ppm และ (c) กราฟแนวโน้มการตอบสนองช่วงระดับความเข้มข้น 517-51,670 ppm ของก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) /P90-CNTs

ภาพที่ 49 (a) แสดงผลการตรวจวัดไอระเหยเบนซีนในช่วงระดับความเข้มข้น 517-51,670 ppm ของก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) /P90-CNTs พบว่าเมื่อก๊าซเซนเซอร์สัมผัสกับไอระเหยของเบนซีนในช่วงความเข้มข้นระดับ ppm ก๊าซเซนเซอร์มีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น และมีค่าความต้านทานลดลงเมื่อก๊าซเซนเซอร์อยู่ภายใต้อากาศ ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าก๊าซเซนเซอร์ยังคงตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนที่ระดับความเข้มข้นในช่วงดังกล่าว เมื่อพิจารณาค่าการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ที่ระดับความเข้มข้น 517 ppm ในภาพที่ 49 (b) พบว่าก๊าซเซนเซอร์ยังสามารถที่จะตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซีนอยู่ได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าการตอบสนองดังกล่าวถือว่าอยู่ในระดับที่ต่ำมากหรือแทบจะไม่ตอบสนองเลย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นที่เงื่อนไขอื่นๆ ดังนั้นการตรวจวัดที่ระดับความเข้มข้นที่ต่ำกว่านี้อาจจะไม่เหมาะสมกับการใช้ก๊าซเซนเซอร์ชนิดนี้ในการตรวจวัดภาพที่ 49 (c) แสดงกราฟแนวโน้มค่าการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ที่ระดับความเข้มข้นในช่วง 517-51,679 ppm พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองกับค่าความเข้มข้นไอระเหยของเบนซีนที่ตรวจวัด มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงต่อกัน นั่นคือ เมื่อค่าความเข้มข้นไอระเหยของเบนซีนที่ใช้ตรวจวัดมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ก็จะเพิ่มสูงขึ้นด้วยตารางที่ 20 แสดงค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%) /P90-CNTs ที่ตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนในช่วงระดับความเข้มข้น ppm ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าการตรวจวัดที่ระดับความเข้มข้น 51,679 ppm ก๊าซเซนเซอร์มีค่าเวลาการตอบสนองดีที่สุด และยังพบว่าที่ระดับความเข้มข้นนี้ ก๊าซเซนเซอร์ไม่สามารถคืนตัวกลับสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นได้ภายใน 30 นาที ภายใต้อากาศ อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 49 (a) มีความเป็นไปได้ที่ก๊าซเซนเซอร์มีแนวโน้มที่จะคืนตัวได้หากใช้เวลานานมากกว่านี้ ในส่วนค่าเวลาคืนตัวพบว่าที่ระดับความเข้มข้น 2,584 ppm มีค่าเวลาคืนตัวที่ดีที่สุด

ตารางที่ 20 ค่าเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%)/P90-CNTs ที่ตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนที่ระดับความเข้มข้น ppm

Benzene concentration (ppm)	Response time (s)	Recovery time (s)
517	1,587	310
2,584	1,135	296
5,167	1,777	385
10,334	879	1,311

51,679	845	-
--------	-----	---

ผลการทดสอบดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่าก๊าซเซนเซอร์จาก EC (1 wt%)/P90-CNTs มีความสามารถในการตรวจวัดไอระเหยของเบนซีนในช่วงระดับความเข้มข้น ppm อีกทั้งยังสามารถ recovery กลับสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นภายใต้อากาศ แสดงให้เห็นว่าก๊าซเซนเซอร์แบบ EC (1 wt%)/P90-CNTs มีความสามารถในการนำกลับมาใช้งานใหม่ได้อีกด้วย

บทที่ 5

อภิปรายและสรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์จากการใช้งานร่วมกันระหว่างท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes; CNTs) และพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ พอลิไอโซพรีน (Polyisoprene; PI), พอลิไวนิลอะซิเตด (Polyvinyl acetate; PVA), พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Poly(methyl methacrylate); PMMA), พอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) และเอทิลเซลลูโลส (Ethyl cellulose; EC) อีกทั้งยังได้พัฒนาก๊าซเซนเซอร์โดยการใช้เทคนิคการทรีตเมนต์แบบต่าง ๆ ได้แก่ การทรีตเมนต์ด้วยกรด ความร้อน และออกซิเจนพลาสมา เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อก๊าซ โดยนำก๊าซเซนเซอร์ที่เตรียมได้ไปใช้ทดสอบตรวจวัดไอระเหยของเบนซินที่ระดับความเข้มข้นในช่วง parts per million (ppm) - parts per thousand (ppt) ในส่วนแรกได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยของเบนซินจากพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ กัน พบว่าก๊าซเซนเซอร์จาก EC/CNTs มีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซินได้ดีที่สุด โดยมีลำดับค่าการตอบสนองดังนี้ $EC/CNTs > PS/CNTs > PVA/CNTs > PMMA/CNTs > Pristine\ CNTs > PI/CNTs$ ผลการทดลองนี้สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการของพารามิเตอร์การละลายของแฮนเซน (Hansen Solubility Parameters) ที่อธิบายเกี่ยวกับสภาพการละลายเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์กับไอระเหยของเบนซิน ผลการคำนวณเชิงจากหลักการของ Hansen Solubility Parameters พบว่าเบนซินมีสภาพการละลายเข้ากันได้ดีที่สุดกับ EC ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ตรวจวัดได้จริง

ในส่วนที่สองเป็นการศึกษาการใช้เทคนิคการทรีตเมนต์แบบต่าง ๆ กับ CNTs ได้แก่ การทรีตเมนต์ด้วยกรด ความร้อน และพลาสมาออกซิเจน เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซิน โดยใช้พอลิเมอร์ที่ตอบสนองได้ดีที่สุดจากขั้นตอนแรกมาใช้งาน ได้แก่ EC ผลการตรวจวัดไอระเหยของเบนซินที่ได้มีผลการตอบสนองดังนี้ $EC/P-CNTs > EC/A-CNTs > EC/T-CNTs > EC/pristine\ CNTs$ เห็นได้ว่าก๊าซเซนเซอร์ที่ผ่านทำการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมามีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยของเบนซินดีที่สุด สาเหตุดังกล่าวเป็นผลมาจากการพลาสมาของออกซิเจนทำให้เกิดการสร้างตำหนิและหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนที่บริเวณผนังของ CNTs สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Transmission electron microscopy (TEM) ซึ่งพบว่าหลังการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา สามารถสังเกตเห็นตำหนิที่เกิดขึ้นบริเวณผนัง CNTs รวมไปถึงการวิเคราะห์ด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) และ X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) พบว่าเกิดหมู่ฟังก์ชันใหม่และมีปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น โดยตำหนิและหมู่

ฟังก์ชันออกซิเจนที่เกิดขึ้นนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะกันระหว่าง CNTs กับ EC ได้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการทรีตเมนต์ด้วยกรดและความร้อน ส่งผลให้ก๊าซเซนเซอร์ EC/P-CNTs มีค่าการตอบสนองต่อไอรอะเหยเบนซีนได้ดีที่สุด

ในส่วนที่สามได้ทำการศึกษาเวลาที่ใช้ในการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาที่เวลาต่าง ๆ ที่มีผลต่อการตรวจวัดไอรอะเหยของเบนซีน โดยทำการทรีตเมนต์ที่เวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที ผลการตรวจวัดไอรอะเหยของเบนซีนที่ได้มีผลดังนี้ $EC/P90-CNTs > EC/P60-CNTs > EC/P30-CNTs > EC/P120-CNTs > EC/P0-CNTs$ พบว่าการใช้เวลาการทรีตเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์กับไอรอะเหยของเบนซีนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในกรณีของ EC/P120-CNTs พบว่าค่าการตอบสนองกลับมีค่าลดลง สาเหตุดังกล่าวคาดว่ามาจากการใช้เวลา ทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมาที่นานจนเกินไป ส่งผลให้เกิดการทำลายผนังของ CNTs จนเกิดความเสียหายและส่งผลให้มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนที่ผิว CNTs ลดลง เป็นผลทำให้มีปริมาณของ EC ที่ยึดเกาะกับผนัง CNTs ลดลงไปด้วยเช่นกัน ดังนั้น EC/P120-CNTs จึงมีค่าการตอบสนองต่อไอรอะเหยเบนซีนที่ลดต่ำลง

ผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าก๊าซเซนเซอร์จาก EC/P90-CNTs มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อไอรอะเหยของเบนซีนได้ดีที่สุด โดยมีค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นถึง 10.67 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับก๊าซเซนเซอร์จาก EC/pristine CNTs ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้พอลิเมอร์ EC ร่วมกันกับเทคนิคการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาออกซิเจนกับ CNTs ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของก๊าซเซนเซอร์ในการตรวจวัดไอรอะเหยของเบนซีนได้ดีขึ้น

บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. (2544). ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ Chemical Data Bank เอกสาร
ข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS), เข้าถึงได้จาก
<http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=2413>
- มูลนิธิสัมมาอาชีวะ. (2555). Benzene. เข้าถึงได้จาก
http://www.summacheeva.org/index_thaitox_benzene.htm
- สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียงกรมควบคุมมลพิษ. (2556). ข้อมูลสารอินทรีย์ระเหยง่ายใน
บรรยากาศ (VOCs). เข้าถึงได้จาก <http://aqnis.pcd.go.th/data/vocs>
- Abdel-Ghani, N. T., El-Chaghaby, G. A., & Helal, F. S. (2014). Individual and competitive
adsorption of phenol and nickel onto multiwalled carbon nanotubes. *Journal of Advanced
Research*, 6, 405-415.
- Abuilaiwi, F. A., Laoui, T., Al-Harathi, M., & Atieh, M. A. (2010). Modifiatiion and
functionalization of multiwalled carbon nanotube (MWCNT) via fischer esterification. *The
Arabian Journal for Science and Engineering*, 35, 37-48.
- Busquets-Fite, M., Fernandez, E., Janer, G., Vilar, G., Vazquez-Campos, S., Zanasca, R., Citterio,
C., Mercante, L., & Victor, V. (2013). Exploring release and recovery of nanomaterials
from commercial polymeric nanocomposites. *Journal of Physics: Conference Series*, 429,
012048 (1-10).
- Chen, J., Xia, N., Tan, S., Zhoi, T., & Yuan, D. (2009). Synthesis of ZnO@CNTs from anhydrous
zinc acetate via thermal decomposition. *ECS Transactions*, 19, 3-6.
- Cho, S. M., Kim, Y. J., Kim, Y. S., Yang, Y., & Ha, S. C. (2004). The application of carbon
nanotube – polymer composite as gas sensing materials. *Sensors, Proceeding of IEEE*, 2,
701-704.
- Dong, K. Y., Ham, D. J., Kang, B. H., Lee, K., Choi, J., Lee, J. W., Choi, H. H., & Ju, B. K.
(2012). Effect of plasma treatment on the gas sensor with single-walled carbon nanotube
paste. *Talanta*, 89, 33-37.
- Farrow, C., Wheeler, H., Bates, N., & Murray, V. (2000). The chemical incident management
handbook. London: The Stationery Office.

- Guo, T., Nikolaev, A., Thess, A., Colbert, D. T., & Smalley, R. E. (1995). Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization. *Chemical Physics Letters*, 243, 49-54.
- Hafaiedh, I., Elleuch, W., Clement, P., Llobet, E., & Abdelghani, A. (2013). Multi-walled carbon nanotubes for volatile organic compound detection. *Sensors and Actuators B*, 182, 344-350.
- Hofmann, S., Csanyi, G., Ferrari, A. C., Payne, M. C., & Robertson, J. (2005). Surface diffusion: The low activation energy path for nanotube growth. *Physical Review Letters*, 95, 036101(1-4).
- Hong, S., & Myung, S. (2007). Nanotube Electronics: A flexible approach to mobility. *Nature Nanotechnology*, 2, 207-208.
- Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354, 56-58.
- Iijima, S. (2002). Carbon nanotubes: past, present, and the future. *Physica B*, 323, 1-5.
- Kalamkarov, A. L., Georgiades, A. V., Rokkam, S. K., Veedu, V. P., & Ghasemi-Nejhad, M. N. (2006). Analytical and numerical techniques to predict carbon nanotubes properties. *International Journal of Solids and Structure*, 43, 6832-6854.
- Kong, J., Franklin, N. R., Zhou, C., Chapline, M. G., Peng, S., Cho, K., & Dai, H. (2000). Nanotube molecular wires as chemical sensors. *Science*, 287, 622-625.
- Kong, K., Cassell, A. M., & Dai, H. (1998). Chemical vapor deposition of methane for single-walled carbon nanotubes. *Chemical Physics Letters*, 292, 567-574.
- Lau, K. T., & Hui, D. (2002). The revolutionary creation of new advanced materials-carbon Nanotube composites. *Composites Part B: Engineering*, 33, 263-277.
- Lee, C. J., Park, J., & Yu, J. A. (2002). Catalyst effect on carbon nanotubes synthesized by thermal chemical vapor deposition. *Chemical Physics Letters*, 360, 250-255.
- Leghrib, R., Felten, A., Demoisson, F., Reniers, F., Pireaux, J. J., & Llobet, E. (2010). Room temperature, selective detection of benzene at trace levels using plasma-treated metal decorated multiwalled carbon nanotubes. *Carbon*, 48, 3477-3484.
- Muangrat, W., Porntheeraphat, S., & Wongwiriyan, W. (2013). Effect of metal catalysts on synthesis of carbon nanomaterials by alcohol chemical vapor deposition. *Engineering Journal*, 17, 35-39.

- Pop, E., Mann, D., Wang, Q., Goodson, K., & Dai, H. (2006). Thermal conductance of an individual single-wall carbon nanotube above room temperature. *Nano Letters*, 6, 96-100.
- Puretzky, A. A., Geohegan, D. B., Jesse, S., Ivanov, I. N., & Eres, G. (2005). In situ measurements and modeling of carbon nanotube array growth kinetics during chemical vapor deposition. *Applied Physics A*, 81, 223-240.
- Tans, S. J., Verschueren, A. R. M., & Dekker, C. (1998). Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube, *Nature (London)*, 393, 49-52
- Vijayalakshmi, R., Jayachandran, M., & Sanjeeviraja, C. (2003). Structural, electrochromic and FT-IR studies on electrodeposited tungsten trioxide films, *Current Applied Physics*, 3, 171-175.
- Wang, G., Zhang, L., & Zhang, J. (2012). A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors, *Chemical Society Reviews*, 41, 797-828.
- Wikipedia the free encyclopedia. (2014, August). *Carbon nanotube*. Retrieved from, http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube
- Wikipedia the free encyclopedia. (2014, August). *Fullerene*. Retrieved from, <http://en.wikipedia.org/wiki/Fullerene>
- Wikipedia the free encyclopedia. (2014, August). *Diamond*. Retrieved from, <http://en.wikipedia.org/wiki/Diamond>
- Wikipedia the free encyclopedia. (2014, August). *Graphite*. Retrieved from, <http://en.wikipedia.org/wiki/Graphite>
- Yakobson, B. I., & Smalley, R. E. (1997). Fullerene nanotube: C_{1,000,000} and beyond. *American Scientist*, 85, 324-337.
- Yellampalli, S. (2011). *Carbon nanotubes – synthesis, characterization, applications*. InTech.
- Yoo, K. P., Kwon, K. H., Min, N. K., Lee, M. J., & Lee, C. J. (2009). Effects of O₂ plasma treatment on NH₃ sensing characteristics of multiwallcarbon nanotube/polyaniline composite films. *Sensors and Actuators B*, 143, 333-340.

- Yu, M. F., Lourie, O., Dyer, M. J., Moloni, K., Kelly, T. F., & Ruoff, R. S. (2000). Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load. *SCIENCE*, 287, 637-640
- Yudianti, R., Onggo, H., Sudirman, Saito, Y., Iwata, T., & Azuma, J. (2011). Analysis of functional group sited on multi-wall carbon nanotube surface. *The Open Materials Science Journal*, 5, 242-247.
- Zhang, B., Fu, R. W., Zhang, M. Q., Dong, X. M., Lan, P. L., & Qiu, J. S. (2005). Preparation and characterization of gas-sensitive composites from multi-walled carbon nanotubes/polystyrene. *Sensors and Actuators B*, 109, 323-328.
- Zhao, C., Ji, L., Lui, H., Hu, G., Zhang, S., Yang, M., & Yang, Z. (2004). Functionalized carbon nanotubes containing isocyanate groups. *Journal of Solid State Chemistry*, 177, 4394-4398.

รางวัลหรือทุนการศึกษา

พ.ศ. 2557

ทุนสนับสนุนการวิจัยจากการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย (ปตท.) ภายใต้ความร่วมมือกับศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีอนาคต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2557

รางวัลชนะเลิศอันดับที่ 1 การนำเสนอผลงานวิชาการ รูปแบบโปรสเตอร์ งานประชุมวิชาการสมาคมฟิสิกส์แห่งประเทศไทย ประจำปี 2557 ในหัวข้อ “Benzene Sensor Based on Ethyl Cellulose-coated Single-walled Carbon Nanotubes”

ผลงานวิชาการ

งานประชุมวิชาการ
ระดับชาติ

Worawut Maungrat, Thanattha Chobsilp,
Rungroj Maolanon, Supanit Porntheeraphat, Winadda
Wongwiriyan (2014), **Benzene sensor based on
ethyl cellulose-coated single-walled carbon
nanotubes**, The 9th Annual Conference of the Thai
Physics Society, Nakhon Ratchasima, Thailand, 26-29
March, 2014, p. 99. **(Poster presentation)**

งานประชุมวิชาการ
ระดับนานาชาติ

Thanattha Chobsilp, Winadda Wongwiriyan,
Chaisak Issro, Worawut Maungrat, Weerawut Chaiwat,
Apiluck Eias-ua, Tawatchai Charinpanitkul, Komkrit
Suttiaponpanit (2014), **Study on effect of acid and heat
treatments of multi-walled carbon nanotubes on
benzene detection**, German-Thai Symposium on
Nanoscience and Nanotechnology (GTSNN2014),
Phitsanulok, Thailand, October 14-17, 2014
(Poster presentation)

Thanattha Chobsilp, Winadda Wongwiriyan,
Chaisak Issro, Worawut Maungrat, Weerawut Chaiwat,
Apiluck Eias-ua, Tawatchai Charinpanitkul, Komkrit
Suttiaponpanit (2014), **Surface functionalization of
multi-walled carbon nanotubes by oxygen plasma
treatment for benzene detection**, The 3rd Joint
Conference in Renewable Energy and Nanotechnology
(JCREN2014), Kanchanaburi, Thailand, December
22-23, 2014 **(Oral presentation)**

งานประชุมวิชาการ
ระดับนานาชาติ

Thanattha Chobsilp, Winadda Wongwiriyan,
Chaisak Issro, Worawut Maungrat, Weerawut Chaiwat,
Apiluck Eias-ua, Tawatchai Charinpanitkul, Komkrit
Suttiponpanit (2015), Ethyl cellulose-coated oxygen
plasma-functionalized carbon nanotubes for benzene
detection, Burapha University International Conference
2015, Chonburi, Thailand, July 10-12, 2015
(Poster presentation)

บทความวิชาการ
ระดับนานาชาติ

Thanattha Chobsilp, Winadda Wongwiriyan,
Chaisak Issro, Worawut Maungrat, Weerawut Chaiwat,
Apiluck Eias-ua, Tawatchai Charinpanitkul, Komkrit
Suttiponpanit (2015), **Study on effect of acid and heat
treatments of multi-walled carbon nanotubes on
8i benzene detection**, Advanced Materials Research,
1103, 2015, p. 105-111.