



รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง หมึกพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการตรวจจับแก๊ส
Electronic Inks for Gas Detection

1. นายอุดมเดช ภัคดี
2. นายบุญชัย ต้วงสวัสดิ์
3. นางสาวอนัญญา ไทยบุญนาค
4. นางสาวสุวรรณา รุ่งเรือง

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

กรุงเทพ

งบประมาณผลรายได้ ปี พ.ศ. 2562

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ในงานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณผลประโยชน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ สาขาการศึกษา กลุ่มทั่วไป (วิทยาศาสตร์) ปีงบประมาณ พ.ศ. 2562

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้คำปรึกษาและสนับสนุนในการดำเนินโครงการวิจัย ให้สำเร็จ ลุล่วง เป็นไปด้วยความเรียบร้อย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์สุรศักดิ์ เชียงกา อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่ห้องปฏิบัติการวัสดุระดับนาโนเมตร ที่อยู่ในความรับผิดชอบและกำกับดูแล

ขอขอบคุณ นายกัลป์ เฉลยโกชน นักศึกษาระดับปริญญาเอก ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูล และเสียสละเวลาให้คำปรึกษาในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ขอขอบคุณ ผู้ร่วมวิจัยทุกท่านที่เสียสละกำลังกาย และให้กำลังใจ ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ สำเร็จ ลุล่วง เป็นไปด้วยความเรียบร้อย ตามกำหนดเวลา



บทคัดย่อ

การเติบโตของเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวสามารถเกิดขึ้นบนฟิล์มอินโคเนล 600 ที่ได้จากการสปีดเตอริงลงบนแผ่นรองรับซิลิกอนตามด้วยกระบวนการตกสะสมไอเชิงเคมีด้วยความร้อน โดยใช้แก๊สอะเซทิลีนเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนร่วมกับแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ เส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวถูกใช้ในการเตรียมหมึกพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการประดิษฐ์แก๊สเซ็นเซอร์แบบยืดหยุ่นและตรวจวัดได้ที่อุณหภูมิห้อง หมึกพิมพ์ในบทบาทชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊สถูกเคลือบลงบนแผ่นรองรับพลาสติกที่มีขั้วไฟฟ้าเงินโดยวิธีการหยด ก่อนการหยดชั้นฟิล์ม เส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวถูกทำให้บริสุทธิ์โดยการปรับปรุงพื้นผิวด้วยความร้อนและกรด จากนั้นตัวอย่างถูกนำไปทำให้กระจายตัวในตัวทำละลายต่างๆ ได้แก่ น้ำไม่มีประจุ เอทานอล และไดเมทิลซัลฟอกไซด์ เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์ถูกวัดโดยสังเกตจากการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย และสารประกอบอินทรีย์ระเหย ได้แก่ เอทานอล เมทานอล และไดเมทิลฟูมาเรท โดยใช้ความเข้มข้นเท่ากับ 1000 ppm ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากเส้นฐานความต้านทานของเซ็นเซอร์อยู่ในช่วงการทำงาน (กิโลโอห์ม) ดังนั้น เส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวที่เตรียมโดยใช้น้ำไม่มีประจุเป็นตัวทำละลายจึงแสดงคุณสมบัติการเลือก และการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียได้ดีที่สุด กลไกการตรวจจับแก๊สของเซ็นเซอร์เส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว ถูกกล่าวถึงว่าเป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการจากปฏิกิริยารีดิวซ์ระหว่างโมเลกุลแอมโมเนียและออกซิเจนบนพื้นผิวของเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ นอกจากนี้ ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นถูกสังเคราะห์บนฟิล์มบางทองคำโดยใช้กระบวนการตกสะสมไอเชิงเคมีด้วยความร้อน ฟิล์มบางทองคำถูกทำให้เปลี่ยนเป็นอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาขนาดนาโนเมตรโดยใช้กระบวนการระดมยิงด้วยไอออนของแก๊สอาร์กอนที่กัลังไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 216 วัตต์ การศึกษาลักษณะทางกายภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ พบว่า อุณหภูมิในการสังเคราะห์ มีผลกับลักษณะทางกายภาพของท่อนาโนคาร์บอน จากนั้นท่อนาโนคาร์บอนถูกทำให้บริสุทธิ์โดยใช้การปรับปรุงพื้นผิวด้วยความร้อนและกรด ตัวอย่างถูกนำไปทำให้กระจายตัวในน้ำไม่มีประจุโดยใช้การสั่นด้วยความถี่เหนือเสียง ท่อนาโนคาร์บอนในรูปสารละลายถูกผสมกับพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (PEDOT:PSS) เพื่อเตรียมเป็นหมึกพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ หมึกพิมพ์ถูกเคลือบลงบนแผ่นรองรับพลาสติก พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีขั้วไฟฟ้าเงินโดยวิธีการเคลือบแบบหยดและแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท เพื่อเปรียบเทียบการตรวจจับแก๊สแอมโมเนียและสารประกอบอินทรีย์ระเหย ที่อุณหภูมิห้อง จากผลการทดลอง พบว่า คุณสมบัติการตอบสนองต่อแก๊ส ความไว และการเลือกของเซ็นเซอร์ สำหรับการตรวจจับแก๊สแอมโมเนียถูกเพิ่มประสิทธิภาพได้โดยการใช้เทคนิคการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท กลไกการตรวจจับแก๊สแอมโมเนียของเซ็นเซอร์ ถูกกล่าวถึงว่าเป็นผลเนื่องมาจากพฤติกรรมการบวมของพอลิเมอร์ จากการแพร่ของโมเลกุลแอมโมเนียเข้าไปยังเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ สำหรับท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ถูกกล่าวถึงว่าทำหน้าที่เป็นเส้นทางนำเพื่อเพิ่มสัญญาณในการตรวจจับแก๊ส

Abstract

Growth of helical carbon coils can be achieved by sputtered Inconel[®] 600 films on silicon (Si) substrates followed by thermal chemical vapor deposition (CVD) using acetylene as a carbon source along with the injection of sulfur hexafluoride (SF₆). The coils were used to prepare electronic ink for fabrication of flexible room temperature gas sensors. The ink as a sensing film was deposited onto silver-screen printed plastic substrates by drop casting. Before dripping the sensing film, the coils were purified using oxidation and acid treatments. The purified coils were then dispersed in different solvents such as deionized water (DI water), ethanol and dimethyl sulfoxide (DMSO) for comparisons. The performance of sensors was investigated for its response to ammonia (NH₃) and volatile organic compounds (VOCs) including ethanol, methanol, and dimethylformamide (DMF) in concentration of 1000 ppm at room temperature. Because the baseline resistance of sensor falls within the working range (i.e. kΩ), the coils dispersed in DI water are performed to show the highest selectivity and response to NH₃. The sensing mechanism of helically coiled carbon gas sensors has been also discussed based on the reducing reaction process between NH₃ and chemisorbed oxygen on the surface of purified carbon coils. Moreover, multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) have been synthesized on thin gold (Au) films using thermal chemical vapor deposition (CVD). The films were evolved to catalytic Au nanoparticles (Au NPs) by plasma argon (Ar) ion bombardment with a direct current (DC) power of 216 W. The characteristics of the MWCNTs grown on Au catalysts are strongly dependent on the growth temperature in thermal CVD process. The MWCNTs were then purified by oxidation and acid treatments. After purifying the MWCNTs, they were dispersed in deionized water (DI water) under continuous sonication. The MWCNT solution was then ultrasonically dissolved in a conducting polymer mixture of poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) to prepare for an electronic ink. The ink was deposited onto the flexible and transparent plastic substrates such as polyethylene terephthalate (PET) with fabricated silver interdigitated electrode using two methods such as drop casting and inkjet printing to compare in the detection of ammonia (NH₃) and other volatile organic compounds (VOCs) at room temperature. Based on the results, the gas response, sensitivity and selectivity properties of MWCNT-PEDOT:PSS gas sensor for NH₃ detection are significantly enhanced by using inkjet printing technique. The sensing mechanism of fabricated gas sensor exposed to NH₃ has been also proposed based on the swelling

behaviour of polymer due to the diffusion of NH_3 molecules into the polymer matrix. For the MWCNTs, they were mentioned as the conductive pathways for the enhancement of gas sensing signals.



สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ	1
2	การทบทวนวรรณกรรม	4
3	วิธีดำเนินการวิจัย	15
4	ผลการวิจัย	24
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	40
	เอกสารอ้างอิง	42
	ภาคผนวก	47
	ประวัตินักวิจัย	48



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แก๊สชนิดเอ็นและชนิดพีต่อแก๊สรีตีวซ์ และแก๊สออกซิไดซ์	7
2	เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบาง Al_2O_3 และฟิล์มบาง Inconel	17
3	เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบาง Al_2O_3 และฟิล์มบาง Au	19
4	แผนดำเนินงานตลอดโครงการ	22



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แผนภาพแถบพลังงานของวัสดุ ได้แก่ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ	5
2	แผนภาพกระบวนการตกสะสมไอเชิงเคมีด้วยความร้อน	9
3	แผนภาพกระบวนการสเปร์ย์ไฟโรไลซิส	10
4	แผนภาพกระบวนการสปัตเตอร์ริง	11
5	แผนภาพกระบวนการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท	12
6	พารามิเตอร์ที่ใช้แสดงประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์แก๊ส	13
7	ภาพถ่ายระบบแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง	16
8	ภาพถ่ายระบบการตกสะสมไอเชิงเคมีด้วยความร้อน	16
9	ระบบทดสอบประสิทธิภาพเซ็นเซอร์แก๊ส	18
10	ภาพถ่าย AFM ของพื้นผิวแผ่นรองรับทองแดง (ก) ก่อนการขัด และ (ข) หลังการขัด ด้วยกระดาษทรายอย่างละเอียด	19
11	ภาพถ่ายระบบสปัตเตอร์ริงกระแสนตรงสำหรับเคลือบฟิล์มบางทองคำ	20
12	(ก) แผนภาพ และ (ข) ภาพถ่ายของภาชนะปฏิกิริยาที่ใช้ในการระดมยิงด้วยไอออนของแก๊สอาร์กอน	20
13	ภาพถ่าย (ก) SEM และ (ข) TEM แสดงลักษณะทางกายภาพของเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว (ค) กราฟการแจกแจงขนาดระยะพิทช์เกลียวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกลียวของเส้นใยนาโนคาร์บอน	24

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
14	(ก) แผนภาพแสดงเส้นใยนาโนคาร์บอนและกลุ่มคาร์บอกซิล (ข) สเปกตรัม FTIR ของเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว (ค) สเปกตรัม FTIR ของเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยความร้อนและกรด	25
15	(ก) แผนภาพ และ (ข) ภาพถ่ายของเซ็นเซอร์แก๊สเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว	26
16	แผนภาพระบบทดสอบประสิทธิภาพเซ็นเซอร์แก๊ส	27
17	การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซ็นเซอร์แก๊สเมื่อเปิดและปิดแอมโมเนียที่เตรียมด้วยตัวทำละลาย ได้แก่ น้ำไม่มีประจุ ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ และเอทานอล	27
18	เปอร์เซ็นต์การตอบสนองแก๊สของเซ็นเซอร์ที่เตรียมด้วยตัวทำละลาย ได้แก่ น้ำไม่มีประจุ ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ และเอทานอล	28
19	ภาพถ่าย AFM ของพื้นผิวฟิล์มบาง Au/Al ₂ O ₃ เคลือบบนแผ่นรองรับทองแดง (ก) หลังการระดมยิงด้วยไอออนแก๊สอาร์กอนและ (ข) หลังการนำตัวอย่างไปแอนนัลในกระบวนการ CVD โดยไม่ใช้แก๊สอะเซทิลีน	30
20	กลไกการก่อตัวของอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร (ก) หลังกระบวนการระดมยิงด้วยไอออนของแก๊สอาร์กอน (ข) หลังการแอนนัลระหว่างกระบวนการตกสะสมไอเชิงเคมีด้วยความร้อน	30
21	ภาพถ่าย SEM แสดงท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ (ก) 880 องศาเซลเซียส (ข) 900 องศาเซลเซียส (ค) 950 องศาเซลเซียส และ (ง) แสดงสเปกตรัม EDS ของท่อนาโนคาร์บอนบนกริดทองคำสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	31
22	สเปกตรัมรามานของท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิการสังเคราะห์ (ก) 900 องศาเซลเซียส และ (ข) 950 องศาเซลเซียส	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	(ก) ภาพถ่ายก่อนนาโนคาร์บอนที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวละลายในน้ำ ไม่มีประจุหลังจากผสม 1 วัน และ 30 วัน (ข) แผนภาพแสดง ส่วนประกอบของเซ็นเซอร์แก๊ส	33
24	ภาพถ่าย SEM ของหมึกพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นรองรับที่มี ขั้วไฟฟ้าเงินโดยใช้ (ก)-(ข) วิธีเคลือบแบบหยด (ค)-(ง) วิธีเคลือบ แบบพิมพ์อิงค์เจ็ท	34
25	(ก) การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์แก๊สที่ได้จาก การเตรียมชั้นฟิล์มแบบหยด และแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท (ข) การตอบสนอง ต่อแก๊สชนิดต่างๆ ของเซ็นเซอร์แก๊ส	35
26	การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซ็นเซอร์แก๊สที่ได้จากการเตรียม ชั้นฟิล์มด้วยวิธีแบบพิมพ์อิงค์เจ็ทภายใต้บรรยากาศของแก๊ส ไนโตรเจนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง	35
27	การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซ็นเซอร์แก๊สแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท ที่ชั้นฟิล์มเตรียมจาก (ก) PEDOT:PSS และ (ข) MWCNT-PEDOT:PSS ภายใต้บรรยากาศของแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 1000 ppm ที่อุณหภูมิห้อง	36
28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนีย กับการตอบสนองของแก๊สของเซ็นเซอร์แก๊สที่อุณหภูมิห้อง เตรียมชั้นฟิล์มโดยวิธีการแบบหยด และแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท	37
29	แผนภาพแสดงเส้นทางการขนส่งอิเล็กตรอนสำหรับชั้นฟิล์ม MWCNT-PEDOT:PSS ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการ (ก) แบบพิมพ์อิงค์เจ็ท และ (ข) แบบหยด	38

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในงานวิจัย

AFM	=	Atomic force microscope
Al ₂ O ₃	=	Aluminium oxide
Ar	=	Argon
C ₂ H ₂	=	Acetylene
CMOS	=	Complementary metal-oxide semiconductor
CNFs	=	Carbon nanofibers
CNTs	=	Carbon nanotubes
Cr	=	Chromium
CVD	=	Chemical vapor deposition
DI water	=	Deionized water
DMF	=	Dimethyl fumarate
DMSO	=	Dimethyl sulfoxide
EDS	=	Energy dispersive X-ray spectroscopy
EFTE	=	Ethylene tetrafluoroethylene
Fe	=	Iron
FTIR	=	Fourier transform infrared spectroscopy
FT-Raman	=	Fourier-transform Raman spectroscopy

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

GDP	=	Gross domestic product
HNO ₃	=	Nitric acid
H ₂ SO ₄	=	Sulfuric acid
ITO	=	Indium-tin oxide
MWCNTs	=	Multi-walled carbon nanotubes
NH ₃	=	Ammonia
Ni	=	Nickel
PEDOT:PSS	=	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly (styrenesulfonate)
PET	=	Polyethylene terephthalate
ppm	=	Parts per million
PVD	=	Physical vapor deposition
R.T	=	Room temperature
sccm	=	Standard cubic centimeters per minute
SEM	=	Scanning electron microscope
Si	=	Silicon
TEM	=	Transmission electron microscope
WO ₃	=	Tungsten oxide

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

อุตสาหกรรมการผลิต มีบทบาทสำคัญในการผลักดันเศรษฐกิจของประเทศไทย ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 86 ของผลิตภัณฑ์มวลรวม (Gross Domestic Product: GDP) ประจำปีของประเทศ สำหรับอุตสาหกรรมแข่งขัน ปู่เคมี เคมีภัณฑ์ สี แบตเตอรี่ ยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ ยา พลาสติก กระดาษ สารกึ่งตัวนำ มีการใช้แก๊สชนิดต่างๆ ในระหว่างกระบวนการผลิต ซึ่งแก๊สเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นแก๊สพิษ (Toxic gases) ส่งผลกระทบต่อระบบหายใจ และผิวหนังของมนุษย์ อีกทั้งแก๊สบางชนิดก่อให้เกิดการระเบิดอย่างรุนแรงได้ หากเกิดการรั่วไหลที่ไม่คาดคิด ในภาวะที่มีการแข่งขันสูงทางธุรกิจ เพื่อให้ได้ผลผลิตจำนวนมากในเวลาจำกัด จึงมีโอกาสนี้ที่จะมีความผิดพลาด หรืออุบัติเหตุระหว่างกระบวนการผลิต จากรายงานของ สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม ในเวลากว่า 15 ปี ที่ผ่านมา มีอุบัติเหตุการรั่วไหลของแก๊สโดยเฉพาะแก๊สแอมโมเนีย ในระหว่างกระบวนการผลิตที่ส่งผลเสียหายอย่างรุนแรง จำนวนครั้งที่เกิดอุบัติเหตุมากกว่า 300 ครั้ง ส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินของทั้งพนักงาน และผู้ประกอบการ ถึงแม้จะมีการติดตั้งเครื่องตรวจจับการรั่วไหลแก๊ส แต่เนื่องจากราคาต่อเครื่องที่สูง ทำให้ผู้ประกอบการในธุรกิจขนาดเล็กเพิกเฉยต่อการติดตั้ง เพราะว่าเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ การติดตั้งเครื่องตรวจจับการรั่วไหลของแก๊สในโรงงานขนาดใหญ่ ก็ไม่สามารถตรวจจับการรั่วไหลได้อย่างทั่วถึง เนื่องจากพื้นที่ที่กว้างขวางของโรงงาน ดังนั้นจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนเครื่องให้เพียงพอต่อพื้นที่ขนาดของโรงงาน ซึ่งนั่นก็คือ ต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง การทำงานวิจัยเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีด้านความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมการผลิตจึงมีความจำเป็นเพื่อป้องกัน และลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากอุบัติเหตุที่ไม่คาดคิด

อิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น (Flexible electronics) เป็นที่รู้จักในฐานะเทคโนโลยีที่เข้ามาปฏิวัติอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่น ไม่ว่าจะเป็น ความบางเบา ยืดหยุ่นได้ และต้นทุนการผลิตต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการผลิต CMOS (Complementary metal-oxide semiconductor) หรือไมโครอิเล็กทรอนิกส์แบบดั้งเดิม มีรายงานการวิจัยว่า สามารถใช้เทคนิคการหยดหมึกพิมพ์แบบควบคุมปริมาตร เพื่อพัฒนาตัวตรวจจับแก๊สในราคาประหยัด และสามารถตรวจจับแก๊สได้หลายชนิด สำหรับการพัฒนาระบบรับรู้แก๊สโดยใช้เทคนิคการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท ปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ หมึกพิมพ์ มีรายงานการพัฒนาหมึกพิมพ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการรับรู้แก๊สได้ดีที่อุณหภูมิห้อง โดยวัสดุหลักที่ถูกนำมาใช้เป็นหมึกพิมพ์ ได้แก่ วัสดุคาร์บอน เช่น เส้นใยนาโนคาร์บอน (Carbon nanofibers; CNFs) ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes; CNTs) และกราฟีน (Graphene) โดยวัสดุคาร์บอนโครงสร้างดังกล่าว มีคุณสมบัติเชิงกลที่แข็งแรง และสามารถนำไฟฟ้าได้ อีกทั้งพื้นผิวของโครงสร้างดังกล่าวสามารถทำให้โมเลกุลของแก๊สชนิดต่างๆ ยึดเกาะได้

อย่างไรก็ตาม จากรายงานพบว่า แม้จะสามารถตรวจจับแก๊สได้ แต่มีประสิทธิภาพในการรับรู้แก๊สยังไม่ดี หากดำเนินการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

ในงานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาหมึกพิมพ์เพื่อใช้สำหรับประดิษฐ์เซ็นเซอร์แก๊ส (Gas sensor) ต้นแบบเซ็นเซอร์แก๊สถูกทดสอบกับแก๊สที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น แอมโมเนีย เอทานอล เมทานอล อะซีโตน และไนโตรเจนไดออกไซด์ เป็นต้น หมึกพิมพ์ถูกพัฒนาเพิ่มประสิทธิภาพการรับรู้แก๊สโดยใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้า ผสมลงไปโครงสร้างของหมึกพิมพ์และพิมพ์โดยใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท (Ordinary inkjet office printer; HP deskjet ink 1112) ต้นแบบเซ็นเซอร์แก๊สที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้เป็นตัวตรวจจับแก๊สราคาประหยัด แก้ปัญหาต้นทุนที่สูงของเครื่องตรวจจับแก๊ส อีกทั้งเนื่องจากการมีคุณสมบัติที่โค้งงอได้ของตัวเซ็นเซอร์ ดังนั้นจึงสามารถพัฒนาเป็นตัวตรวจจับแก๊สแบบสวมใส่ได้ (Wearable gas sensor) ในอนาคตอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและทดสอบตัวทำละลายและเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมหมึกพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติในการตรวจจับแก๊สที่อุณหภูมิห้อง
- 1.2.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการตรวจจับแก๊สของเซ็นเซอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท ทดสอบกับแก๊สที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ แอมโมเนีย เอทานอล เมทานอล อะซีโตน และไนโตรเจนไดออกไซด์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ผู้วิจัยทำการสังเคราะห์โครงสร้างระดับนาโนเมตรของคาร์บอน (เส้นใยนาโนคาร์บอน และท่อนาโนคาร์บอน) ด้วยวิธีการตกตะกอนไอเชิงเคมีด้วยความร้อน
- 1.3.2 ผู้วิจัยทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างระดับนาโนเมตรของคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และรามานสเปกโทรมิเตอร์
- 1.3.3 ผู้วิจัยทำการศึกษาและเตรียมเซ็นเซอร์แก๊สโดยใช้เทคนิคการเคลือบแบบหยด และแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท
- 1.3.4 ผู้วิจัยทำการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจจับแก๊สของเซ็นเซอร์ที่เตรียมได้ โดยทดสอบกับแก๊สที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ แก๊สแอมโมเนีย เอทานอล เมทานอล อะซีโตน ไนโตรเจนไดออกไซด์ ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ LabVIEW

ตัวแปรที่ศึกษา

- ตัวแปรอิสระ ได้แก่ ชนิดของตัวทำละลาย และวิธีการเคลือบชั้นฟิล์ม
- ตัวแปรตาม ได้แก่ ประสิทธิภาพในการตรวจจับแก๊ส

ตัวแปรควบคุม ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น ปริมาตรตัวทำลาย สัดส่วนการผสมของหมึกพิมพ์

1.4 สมมติฐาน

ชนิดของตัวทำลาย และวิธีเคลือบชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊ส มีผลต่อประสิทธิภาพในการรับรู้แก๊สของเซ็นเซอร์

1.5 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การสร้างต้นแบบเซ็นเซอร์แก๊สโดยใช้หมึกพิมพ์นั้น วัสดุที่นำมาใช้ทำหมึกพิมพ์สำคัญมาก เนื่องจากหมึกพิมพ์ต้องมีความหนืดที่พอดี และความนำไฟฟ้าที่เหมาะสม ดังนั้นการเลือกใช้ชนิดของตัวทำลายที่ถูกต้องในปริมาณที่เหมาะสม จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับรู้แก๊สได้ นอกจากนี้ การเติมพอลิเมอร์นำไฟฟ้าลงไปในหมึกพิมพ์ในปริมาณที่เหมาะสมจะสามารถทำให้เซ็นเซอร์รับรู้แก๊สได้อย่างรวดเร็ว

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.6.1 ทำการสังเคราะห์โครงสร้างระดับนาโนเมตรของคาร์บอน เช่น ท่อนาโนคาร์บอน หรือ เส้นใยนาโนคาร์บอน โดยวิธีการตกตะกอนไอเชิงเคมีด้วยความร้อน (Thermal CVD)
- 1.6.2 ดำเนินการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้เครื่องมือที่เหมาะสมกับงานวัสดุที่มีขนาดระดับนาโนเมตร เช่น SEM, TEM, EDS, FT-Raman และ AFM
- 1.6.3 ดำเนินการเตรียมเซ็นเซอร์แก๊ส และทดสอบประสิทธิภาพการรับรู้แก๊สชนิดต่างๆ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 เพื่อเป็นการบูรณาการองค์ความรู้จากหลายสาขาในหน่วยงาน
- 1.7.2 เพื่อที่จะเผยแพร่ผลงานวิจัยลงในวารสารระดับนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูลที่เป็นที่ยอมรับ
- 1.7.3 เพื่อที่จะได้ต้นแบบเซ็นเซอร์แก๊สที่สามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิห้อง มีความยืดหยุ่น โค้งงอได้เพื่อพัฒนาเป็นเซ็นเซอร์แก๊สแบบสวมใส่ได้ สำหรับบุคลากรในโรงงานอุตสาหกรรม

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม

2.1 โครงสร้างคาร์บอนระดับนาโนเมตร และการประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์แก๊ส

โครงสร้างคาร์บอนระดับนาโนเมตร (Carbon nanostructure) ได้แก่ เส้นใยนาโนคาร์บอน (Carbon nanofiber) ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) และ กราฟีน (Graphene) ได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก เนื่องจากคุณสมบัติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายด้าน สำหรับงานประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับแก๊ส ท่อนาโนคาร์บอนถูกผสมกับตัวทำละลาย ได้แก่ ไดเมทิลฟอร์มามิด (Dimethylformamide) พบว่า สามารถตรวจจับแก๊สโอโซน (O_3) ที่อุณหภูมิห้องได้ (Y. Park และคณะ, 2009) นอกจากนี้ เมื่อนำท่อนาโนคาร์บอนไปอบที่ความร้อน $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ และล้างด้วยกรด สามารถนำไปใช้เป็นตัวตรวจจับแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิห้องได้ (D. Shall และคณะ, 2013; D. Jung และคณะ, 2014) สำหรับแก๊สที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น แอมโมเนีย (NH_3) และ ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) มีรายงานว่า สามารถใช้ท่อนาโนคาร์บอนตรวจจับได้ โดยสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง (J. Kim และคณะ, 2016) นอกจากนี้โครงสร้างแบบท่อนาโนคาร์บอน โครงสร้างแบบกราฟีน สามารถนำมาใช้เป็นตัวตรวจจับแก๊สแอมโมเนียได้ (W. Chen และคณะ, 2016) แม้ว่าโครงสร้างที่ได้กล่าวไปจะสามารถตรวจจับแก๊สต่างๆ ที่อุณหภูมิห้องได้ แต่ประสิทธิภาพการรับรู้ของแก๊สจะต่ำ เมื่อเทียบกับเซ็นเซอร์แก๊สที่ทำชั้นฟิล์มจากโลหะออกไซด์

2.2 วัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการเคลือบอนุภาคโลหะลงบนโครงสร้างคาร์บอนระดับนาโนเมตร และการประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์แก๊ส

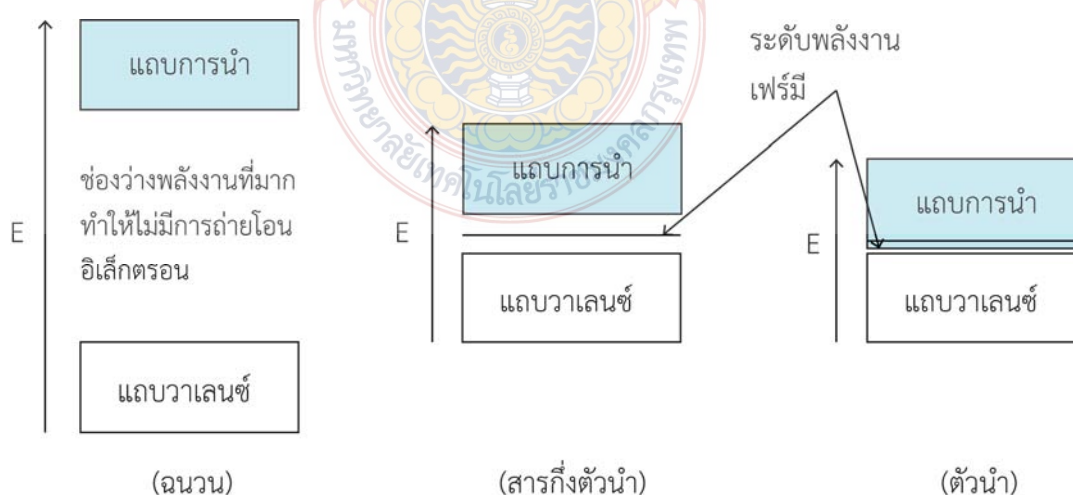
การสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตที่ได้มาจากการเคลือบอนุภาคโลหะระดับนาโนเมตรลงบนฟิล์มคาร์บอน ถูกรายงานว่าสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการรับรู้แก๊สของเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิห้องได้ ยกตัวอย่างเช่น ท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบด้วยอนุภาคดีบุกออกไซด์ (SnO_2) สามารถรับรู้แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ได้ดีที่อุณหภูมิห้อง (R. Leghrib และคณะ, 2010) หรือ ท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบด้วยอนุภาคแพลเลเดียม (Pd) ถูกรายงานว่าสามารถรับรู้แก๊สไฮโดรเจนได้ดีที่อุณหภูมิห้อง (M. Han และคณะ, 2014) สำหรับแก๊สไฮโดรเจนสามารถใช้วัสดุคอมโพสิตอื่นเป็นชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊สสำหรับเซ็นเซอร์แก๊ส เช่น ท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบด้วยอนุภาคโคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) (D. Jung และคณะ, 2014) หรือ ท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบด้วยอนุภาคแพทตินัม (S. Dhall และคณะ, 2015) โดยอนุภาคแพทตินัมเป็นอีกหนึ่งวัสดุที่ได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ โดยมีรายงานว่า ท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบด้วยอนุภาคแพทตินัมสามารถใช้เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับแก๊สที่มีพิษอย่าง โทลูอีน (Toluene) ได้ที่อุณหภูมิห้อง (Y.J. Kwon และคณะ, 2016) นอกจากนี้มีรายงานว่าเมื่อไม่นานมานี้ว่าท่อนาโนคาร์บอนที่เคลือบด้วยอนุภาคสังกะสีออกไซด์สามารถรับรู้แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ได้ดีที่อุณหภูมิห้อง (Y.J. Kwon และคณะ, 2017) จากรายงานที่กล่าวมา พบว่า วัสดุคอมโพสิตที่เกิด

จากการเคลื่อนอนุภาคโลหะ หรือโลหะออกไซด์ลงบนโครงสร้างระดับนาโนเมตรของคาร์บอน เช่น ท่อนาโนคาร์บอน สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการรับรู้แก๊สชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิห้องได้

2.3 การพัฒนาหิมิกพิมพ์สำหรับงานประยุกต์ด้านเซ็นเซอร์แก๊ส

การพัฒนาหิมิกพิมพ์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น หิมิกพิมพ์ที่ได้จากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes; MWCNTs) ที่พิมพ์ลงบนแผ่นรองรับ Ethylene Tetrafluoroethylene (EFTE) สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิ และเซ็นเซอร์ตรวจจับความเครียด (Strain) ได้ (F. Michelis และคณะ, 2015) สำหรับงานประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์แก๊ส เช่น การนำกราฟีนมาผสมกับพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้า เช่น Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly (styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) ถูกรายงานว่า สามารถตรวจจับแก๊สแอมโมเนียได้ดีที่อุณหภูมิห้อง (Y. Seekaew และคณะ, 2014) การเพิ่มประสิทธิภาพการรับรู้แก๊สสามารถทำได้โดยการเคลือบโลหะบางชนิดลงบนโครงสร้างของคาร์บอน ก่อนนำไปใช้เป็นหิมิกพิมพ์ เช่น การเคลือบอินเดียมทินออกไซด์ (Indium-tin oxide; ITO) ลงบนผิวของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรับรู้แก๊สแอมโมเนียได้ (F. Rigoni และคณะ, 2014) หรือแม้แต่การใช้กระดาษเป็นแผ่นรองรับแล้วใช้เทคนิคการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ทเพื่อเตรียมเป็นตัวรับรู้แก๊สแอมโมเนียราคาประหยัด และเพิ่มประสิทธิภาพการรับรู้แก๊สโดยการเติมอนุภาคเงินลงบนท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวก่อนนำไปใช้เป็นหิมิกพิมพ์ (L. Huang และคณะ, 2014)

2.4 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับเซ็นเซอร์แก๊ส



ภาพที่ 1 แผนภาพแถบพลังงานของวัสดุ ได้แก่ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ

ทฤษฎีพื้นฐานที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับงานประยุกต์ด้านเซ็นเซอร์แก๊ส ได้แก่ ทฤษฎีแถบพลังงาน (Band theory) โดยที่แลตทิซ (Lattice) ของวัสดุจะประกอบด้วย แถบวาเลนซ์ (Valence band) และ แถบการนำ (Conduction band) ช่องว่างระหว่างแถบทั้งสองเป็นฟังก์ชันของพลังงาน ซึ่งเกี่ยวข้องกับระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi level) โดยระดับพลังงานเฟอร์มี ถูกนิยามว่าเป็นระดับพลังงานสูงสุด ณ อุณหภูมิใดๆ ที่อิเล็กตรอนจะสามารถอยู่ได้ ประเภทของวัสดุที่จำแนกโดยใช้แถบพลังงาน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และ ตัวนำ แสดงดังภาพที่ 1 ฉนวนมีช่องว่างระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบการนำที่สูงมาก (มากกว่า 10 eV) ทำให้ไม่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างแถบพลังงานทั้งสอง โดยฉนวนจะมีระดับพลังงานเฟอร์มีสูงสุดที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน (A. Shriver, 2006) สารกึ่งตัวนำมีช่องว่างระดับพลังงานแคบลง (0.5-5 eV) ซึ่งอิเล็กตรอนสามารถถ่ายโอนระหว่างแถบพลังงานทั้งสองได้ โดยต้องมีพลังงานภายนอกกระตุ้นให้เพียงพอ สำหรับตัวนำ แถบพลังงานวาเลนซ์และแถบการนำซ้อนทับกับ มีผลให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระระหว่างแถบพลังงานทั้งสอง

ทฤษฎีแถบพลังงานถูกนำมาใช้อธิบายกลไกการตรวจจับแก๊สของเซ็นเซอร์ (N. Barsan, M. Schweizer-Berberich และ W. Göpel, 1999, N. Barsan และ U. Weimar, 2003) โมเลกุลของแก๊สจะมีปฏิกิริยากับพื้นผิวของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้ตรวจจับ มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวพาหะของวัสดุ การเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นนี้จะมีผลทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้า (Conductivity) หรือ ความต้านทาน (Resistivity) ของวัสดุ

กรณีเซ็นเซอร์แก๊สประเภทสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ตัวพาหะคืออิเล็กตรอน สำหรับโมเลกุลแก๊สชนิดให้อิเล็กตรอน ได้แก่ แก๊สรีดิวซ์ (reducing gases) ตัวอย่างเช่น ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แอมโมเนีย (NH_3) มีเทน (CH_4) เป็นต้น หากโมเลกุลของแก๊สดังกล่าวตกลงบนชั้นฟิล์มการตรวจจับของเซ็นเซอร์ จะมีผลทำให้ค่าความนำไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แก๊สเพิ่มขึ้น (ความต้านทานไฟฟ้าลดลง) ในทางตรงกันข้าม สำหรับโมเลกุลของแก๊สชนิดรับอิเล็กตรอน ได้แก่ แก๊สออกซิไดซ์ (Oxidizing gases) ตัวอย่างเช่น ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ออกซิเจน (O_2) และ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น หากโมเลกุลของแก๊สดังกล่าวตกลงบนพื้นผิวการตรวจจับของเซ็นเซอร์ จะมีผลทำให้ค่าความนำไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แก๊สลดลง (ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น)

กรณีเซ็นเซอร์แก๊สประเภทสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) ตัวพาหะคือ โฮล (Hole) จะมีผลในทางตรงกันข้าม นั่นคือ ความนำไฟฟ้าของเซ็นเซอร์จะลดลง (ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น) เมื่อมีโมเลกุลของแก๊สรีดิวซ์ตกลงบนพื้นผิวตรวจจับของเซ็นเซอร์ และความนำไฟฟ้าของเซ็นเซอร์จะเพิ่มขึ้น (ความต้านทานไฟฟ้าลดลง) เมื่อมีโมเลกุลของแก๊สออกซิไดซ์ตกลงบนพื้นผิวตรวจจับ การสรุปการตอบสนองของเซ็นเซอร์แก๊สชนิดเอ็น และชนิดพีต่อแก๊สรีดิวซ์ และแก๊สออกซิไดซ์ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แก๊สชนิดเอ็นและชนิดพีต่อแก๊สรีดิวซ์ และแก๊สออกซิไดซ์

ชนิดเซ็นเซอร์แก๊ส	แก๊สออกซิไดซ์	แก๊สรีดิวซ์
ชนิดเอ็น (n-type)	ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น	ความต้านทานไฟฟ้าลดลง
ชนิดพี (p-type)	ความต้านทานไฟฟ้าลดลง	ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

2.5 ปัจจัยรบกวนการตรวจจับแก๊สของเซ็นเซอร์

การตรวจจับแก๊สอื่น ที่ไม่ต้องการของเซ็นเซอร์แก๊สเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องพิจารณา การวัดการเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้า หรือความต้านทานไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แก๊สควรเป็นผลมาจากโมเลกุลของแก๊สเป้าหมาย (Target gas) เท่านั้น ถ้าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว เป็นผลมาจากแก๊สอื่น การตรวจจับของเซ็นเซอร์แก๊สจะไม่มี ความเที่ยงตรง โมเลกุลของแก๊สต่างๆ ที่มีผลต่อการตรวจวัดเซ็นเซอร์ ได้แก่ โอโซน (Ozone) ไอน้ำ (Water vapor) และสารประกอบอินทรีย์ระเหย (Volatile organic compounds; VOCs) เป็นต้น

2.5.1 โอโซน

บริเวณที่มีความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนมาก บริเวณพื้นผิว ณ ตำแหน่งนั้นจะมีจำนวนอิเล็กตรอนมาก (D. Vincenzi และคณะ, 2000) ผลกระทบนี้จะมีผลต่อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ให้มีค่านำไฟฟ้าสูงขึ้น แต่หากบริเวณนั้นมีแก๊สโอโซน จะมีผลทำให้ค่าความต้านทานลดลง ถ้าความเข้มข้นของโอโซนมีมากเพียงพอ เซ็นเซอร์แก๊สจะตรวจวัดและทำให้การวัดแก๊สเป้าหมายคลาดเคลื่อนไม่แม่นยำ

2.5.2 ไอน้ำ

โมเลกุลของไอน้ำจะมีผลอย่างมากต่อพื้นผิวตรวจจับแก๊สประเภทโลหะออกไซด์ (Metal oxide) (N.G. Patel และคณะ, 2003) โมเลกุลของไอน้ำจะมีไฮดรอกซิล (Hydroxyl; OH⁻) อยู่บนพื้นผิว ซึ่งพร้อมจะให้อิเล็กตรอนแก่เซ็นเซอร์แก๊สชนิดเอ็นทำให้ค่าความนำไฟฟ้าของเซ็นเซอร์มีค่าสูงขึ้น (มีผลเพียงเล็กน้อยกับเซ็นเซอร์แก๊สชนิดพี) จากรายงานพบว่า ชั้นฟิล์มโลหะออกไซด์ของดีบุก (Tin oxide; SnO₂) สามารถตรวจจับโอโซนได้ และความชื้นในอากาศมีผลกระทบต่อเซ็นเซอร์อย่างมาก (G. Korotcenkov และคณะ, 2007)

2.5.3 สารประกอบอินทรีย์ระเหย

มีรายงานการวิจัยระบุว่า ชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์ตอบสนองต่อสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอย่างหลากหลาย เช่น เมทิลแอลกอฮอล์ เอทิลแอลกอฮอล์ ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ และ บิวทิลแอลกอฮอล์ (Z. Wang และคณะ, 1999) นอกจากนี้ ชั้นฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ถูกรายงานว่าตอบสนองต่อ เมทิลแอลกอฮอล์ เอทิลแอลกอฮอล์ และอะซิโตน (V.S. Vaishanv และคณะ, 2010) ดังนั้น การตรวจวัดการตอบสนองต่อแก๊สเป้าหมายต้องคำนึงถึง สารประกอบอินทรีย์ระเหยด้วย เนื่องจากสารประกอบเหล่านี้ระเหยได้ง่ายในบรรยากาศ และมีปะปนบริเวณพื้นที่เปิดโดยทั่วไป

2.6 ปัจจัยที่ต้องคำนึงในการออกแบบเซ็นเซอร์แก๊ส

ปัจจัยมากมายที่ต้องคำนึงในการประดิษฐ์เซ็นเซอร์แก๊สให้มีประสิทธิภาพที่ดีในการตอบสนองแก๊สเป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว เพื่อให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เซ็นเซอร์ที่เหมือนกันอาจจะเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น เซ็นเซอร์แก๊สที่ตรวจวัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องโดยสารในรถยนต์ทั่วไป สามารถออกแบบให้ตรวจวัดที่ความเข้มข้นแก๊สสูงได้ แต่หากรถยนต์นั้นเป็นชนิดเปิดประทุน เซ็นเซอร์แก๊สควรจะสามารถตรวจวัดที่ความเข้มข้นต่ำได้ด้วย นอกจากนี้ในการทดสอบแก๊สที่ความเข้มข้นสูงในช่วง 1,000-10,000 ppm ค่าความแม่นยำที่ตรวจวัดได้อาจจะไม่เกิน 10 ppm จากที่กล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้านี้ แก๊สที่ปะปนอยู่ในอากาศอาจมีผลต่อเซ็นเซอร์ที่ออกแบบได้ เช่น แก๊สไอโซน ที่ได้จากกระบวนการถ่ายเอกสาร อาจมีผลต่อเซ็นเซอร์แก๊สที่ติดตั้งอยู่ในห้องทำงานที่มีเครื่องถ่ายเอกสารใช้งานอยู่ ดังนั้น การออกแบบควรทดสอบให้เซ็นเซอร์แก๊สมีคุณสมบัติการเลือก (Selectivity property) สำหรับตรวจสอบแก๊สเป้าหมาย และทดสอบว่าเซ็นเซอร์แก๊สที่ประดิษฐ์ขึ้นมาตรวจจับแก๊สไอโซนได้ต่ำ หรือหากจำเป็น อาจต้องติดตั้งตัวกรองแก๊สต่างๆ ที่ไม่ต้องการให้ตรวจจับสำหรับการประยุกต์ใช้งาน

2.7 เทคนิคการประดิษฐ์เซ็นเซอร์แก๊ส

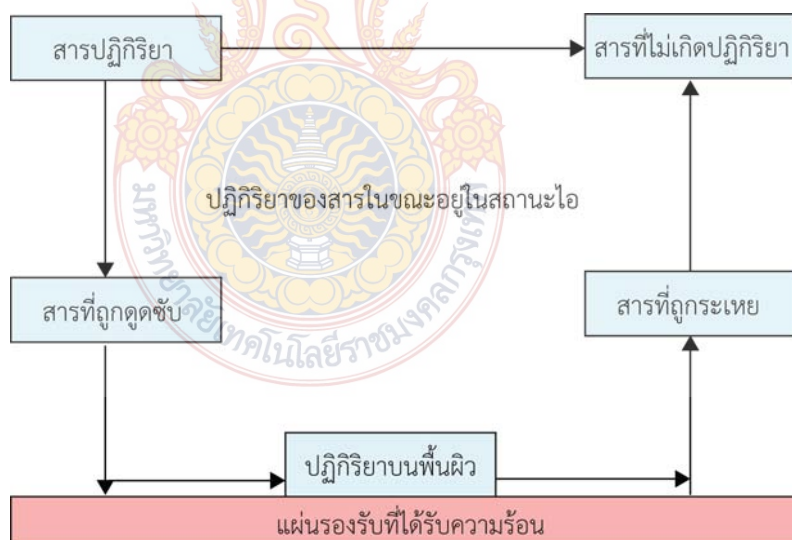
วิธีการประดิษฐ์เซ็นเซอร์แก๊สมีหลากหลายวิธี ปัจจัยที่ต้องคำนึง เช่น ต้นทุนการผลิตต้องไม่สูงเกินไป เพราะถ้าการเตรียมชั้นฟิล์มตรวจจับทำมาจากวัสดุที่มีราคาสูง อาจไม่คุ้มทุนในการผลิตในเชิงพาณิชย์ วัสดุที่เลือกใช้ต้องเหมาะสม เช่น ชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊สหากมีพื้นที่ผิว หรือค่าความเป็นรูพรุนสูง ก็จะสามารถตรวจจับแก๊สได้ในปริมาณมาก เนื่องจากมีพื้นที่ในการให้โมเลกุลของแก๊สเกาะได้มาก อีกทั้งควรมีคุณสมบัติในการตรวจวัดแก๊สซ้ำได้ (Reproducibility property) โดยทั่วไปเทคนิคสำหรับการประดิษฐ์เซ็นเซอร์แก๊ส ได้แก่ การพิมพ์แบบสกรีน (Screen printing) การตกสะสมไอเชิงเคมี (Chemical vapor deposition; CVD) สเปรย์ไพโรไลซิส (Spray pyrolysis) โซลเจล (Sol-Gel) การตกสะสมไอเชิงฟิสิกส์ (Physical vapor deposition; PVD) การเคลือบแบบหยด (Drop casting) และการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท (Inkjet printing)

2.7.1 การพิมพ์แบบสกรีน

การพิมพ์แบบสกรีนถูกใช้อย่างแพร่หลายในระบบอุตสาหกรรม และถูกใช้เป็นวิธีการประดิษฐ์เซ็นเซอร์แก๊ส (V. Vaishanv และคณะ, 1999, A. Shriver, 2006) เทคนิคนี้จะเกี่ยวข้องกับหมึกพิมพ์ที่เคลือบลงบนแผ่นรองรับผ่านรูพรุนและหน้ากากแบบพิมพ์เพื่อให้ได้ลวดลายตามต้องการ ตัวอย่างวิธีการเคลือบชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคนี้ ได้แก่ การผสมหมึกพิมพ์กับน้ำยาประสานเพื่อให้มีความหนืดที่เหมาะสมในการพิมพ์ลงบนแผ่นรองรับ หลังจากนั้นนำไปให้ความร้อนเพื่อนำน้ำยาประสานนั้นออกจากชั้นฟิล์ม ก่อนนำไปทดสอบกับการวัดแก๊ส (A. Shriver, 2006)

2.7.2 การตกสะสมไอเชิงเคมี

วิธีการตกสะสมไอเชิงเคมี แผ่นรองรับจะได้รับความร้อนเพื่อให้เกิดการผสมของสาร ในขณะที่สารอยู่ในสถานะไอ (Vapor phase) ไอของสารที่ถูกระเหยจากการได้รับความร้อนจะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์ม ขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 2 วิธีการนี้สามารถควบคุมลักษณะทางกายภาพของวัสดุได้ เช่น ความเป็นรูพรุน ขนาดเกรน ความหนาของชั้นฟิล์ม โดยใช้ความเร็วในการตกสะสมของชั้นฟิล์ม ข้อดีของวิธีการนี้ คือ สามารถดำเนินการภายใต้ความดันบรรยากาศได้ (Y. Gao, และคณะ, 2006)



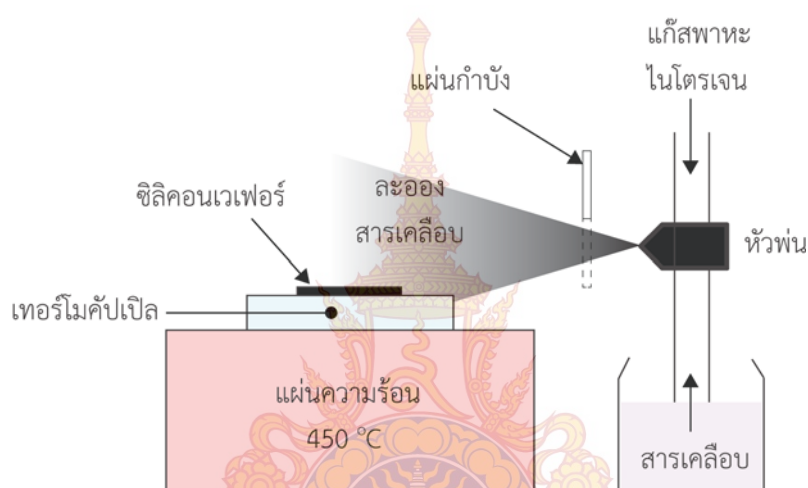
ภาพที่ 2 แผนภาพกระบวนการตกสะสมไอเชิงเคมีด้วยความร้อน

จากรายงานการวิจัย พบว่า วิธีการตกสะสมไอเชิงเคมีด้วยความร้อนสามารถใช้เคลือบฟิล์มทังสเตนออกไซด์ (Tungsten oxide; WO_3) สำหรับใช้เป็นชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊ส (S. Ashraf และคณะ, 2007) เซ็นเซอร์แก๊สแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่ดีต่อ เอทิลแอลกอฮอล์

นอกจากนี้ชั้นฟิล์มอัลลอยของโลหะออกไซด์ ได้แก่ ทังสเตน และโครเมียมผสมไททาเนียมออกไซด์ สามารถเตรียมได้ด้วยเทคนิคนี้ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงค่าพื้นที่ผิวสูง เหมาะกับการใช้เป็นชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊ส (G. Shaw และคณะ, 2005)

2.7.3 สเปรย์ไพโรไลซิส

สเปรย์ไพโรไลซิส เป็นวิธีการเคลือบฟิล์มลงบนแผ่นรองรับที่ถูกให้ความร้อน โดยการพ่นสารเคลือบให้เป็นละออง เกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวแผ่นรองรับที่มีอุณหภูมิสูงและก่อตัวเป็นชั้นฟิล์ม (A. Tischner และคณะ, 2008) แสดงดังภาพที่ 3



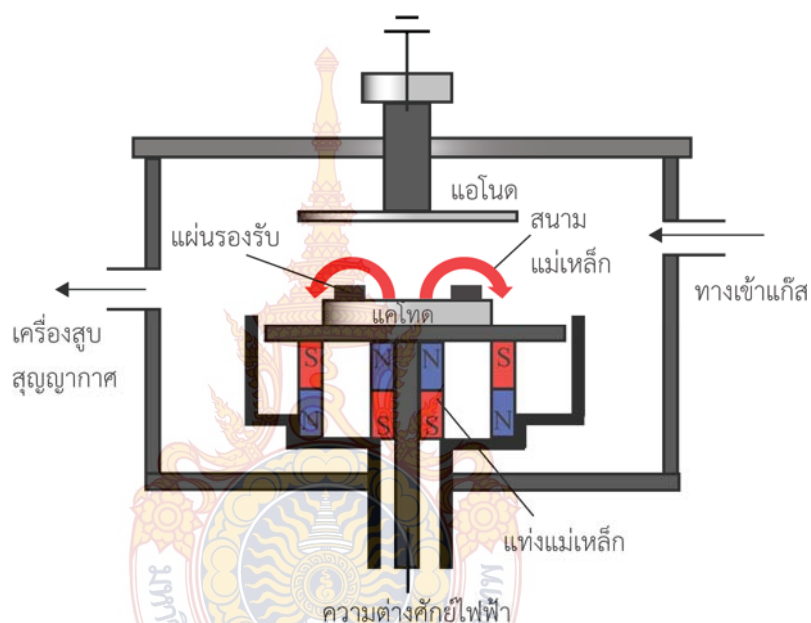
ภาพที่ 3 แผนภาพกระบวนการสเปรย์ไพโรไลซิส

2.7.4 โซลเจล

โซลเจล เป็นเทคนิคที่ถูกใช้เพื่อเตรียมชั้นฟิล์มสำหรับงานประยุกต์ด้านเซ็นเซอร์แก๊ส (D. Vincenzi และคณะ, 2000, L. Yadava และคณะ, 2009) โดยเตรียมอนุภาคดีบุกออกไซด์ลงบนแผ่นรองรับ และพบว่าเซ็นเซอร์แก๊สตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) ได้ดี กระบวนการโซลเจลเกี่ยวข้องกับสารละลายที่เป็นคอลลอยด์และมีอนุภาคของแข็งกระจายอยู่ ด้วยวิธีการนี้ ถ้าเตรียมฟิล์มเซรามิกจะทำให้ได้ค่าความเป็นรูพรุนสูงหลังจากการให้ความร้อน

2.7.5 การตกสะสมไอเชิงฟิสิกส์

การตกสะสมไอเชิงฟิสิกส์ เป็นเทคนิคการเคลือบสารที่อยู่สถานะไอโดยการให้ความร้อน ทำให้สารเคลือบระเหย หรือการให้สารเคลือบถูกระดมยิงด้วยไอออนของแก๊สเฉื่อย หรือที่เรียกโดยทั่วไปว่า เทคนิคสปัตเตอริง (Sputtering) แสดงดังภาพที่ 4 แก๊สเฉื่อยจะถูกเปิดให้ไหลเข้าไปในระบบขณะอยู่ในสภาวะสุญญากาศ ภายใต้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง (กิโลโวลต์ kV) ฟิล์มดีบุกออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการนี้ ตอบสนองต่อแก๊สปิโตรเลียมเหลวได้ดี (Liquid petroleum) (S. Gupta และคณะ, 2004) แต่เนื่องจากเทคนิคนี้ต้องดำเนินการที่สภาวะสุญญากาศ ดังนั้นทำให้ต้นทุนการผลิตเซมิคอนดักเตอร์ด้วยวิธีการนี้มีต้นทุนที่สูง



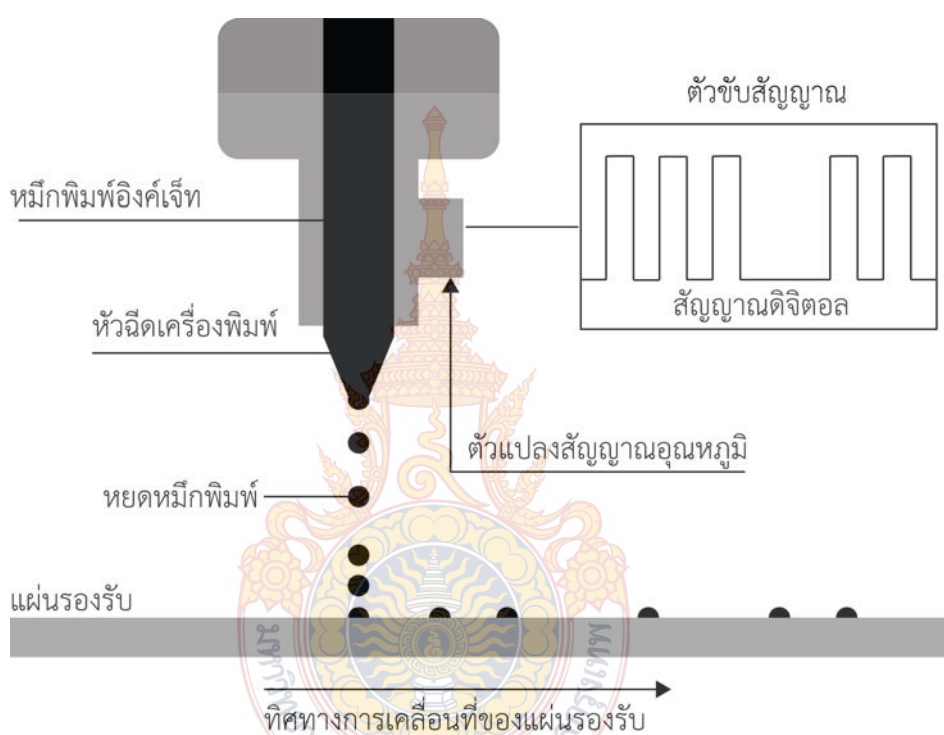
ภาพที่ 4 แผนภาพกระบวนการสปัตเตอริง

2.7.6 การเคลือบแบบหยด

การเคลือบแบบหยดเป็นกระบวนการเคลือบสารลงบนแผ่นรองรับ โดยควบคุมปริมาตรสารเคลือบโดยใช้ ไมโครปิเปต (Micropipette) มีรายงานการวิจัยแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงการยึดติดสารเคลือบให้ดีขึ้นโดยการนำแผ่นรองรับไปปรับความร้อนโดยวิธีการเผา (J. Cerda และคณะ, 2001) วิธีการนี้มีผลทำให้ชั้นฟิล์มมีโครงสร้างขนาดใหญ่ระดับไมโครเมตร ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของการรับรู้แก๊สของเซ็นเซอร์ด้วย (J. Brezmes และคณะ, 2000)

2.7.7 การพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท

การพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท เป็นกระบวนการเคลือบสารลงบนแผ่นรองรับโดยตรงเป็นหยด (Droplet) ขนาด 15-200 ไมโครเมตร แบบต่อเนื่อง ความละเอียดประมาณ 200 หยดต่อเซนติเมตร สำหรับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทของเหลวที่ใช้เป็นหมึกพิมพ์ควรมีความหนืดต่ำกว่า 20 มิลลิพาสคัลวินาที (mPa.s) ดังนั้น หมึกพิมพ์อาจเป็นของเหลว หรือส่วนผสมของของเหลวกับอนุภาคขนาดเล็กได้ (M. Prudenziati และ J. Hormadaly, 2012) แผนภาพกระบวนการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ทแสดงดังภาพที่ 5

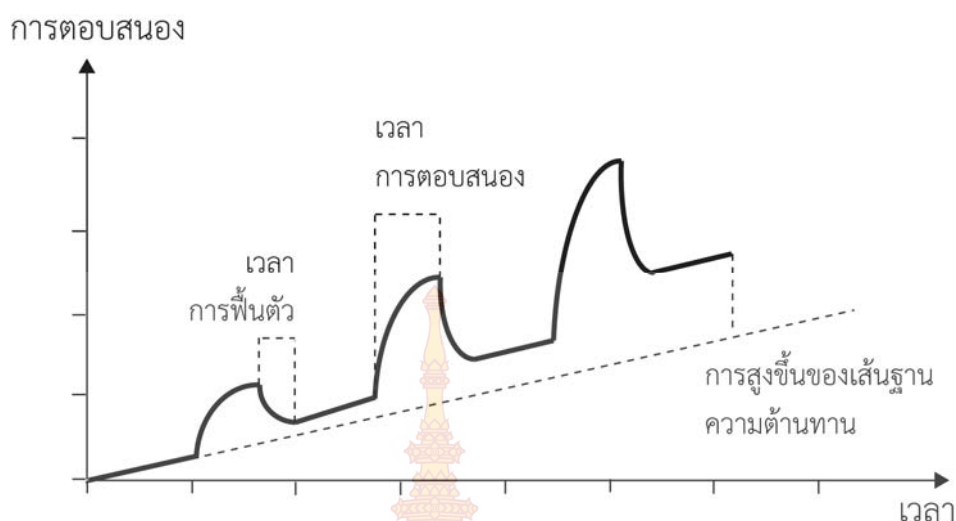


ภาพที่ 5 แผนภาพกระบวนการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท

สำหรับงานประยุกต์ด้านเซ็นเซอร์แก๊ส พอลิเมอร์นำไฟฟ้า poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) ถูกใช้เป็นหมึกพิมพ์สำหรับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท เพื่อใช้เป็นชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊ส ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าสามารถตรวจจับแก๊สแอมโมเนียได้ดี (C. Wongchoosuk และคณะ, 2012) พอลิเมอร์ PEDOT:PSS ถูกนำไปผสมด้วยกราฟีน (Graphene) ถูกใช้เป็นหมึกพิมพ์สำหรับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทเพื่อใช้เป็นชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊สพบว่าสามารถตรวจจับแก๊สแอมโมเนียได้ดี และเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับแก๊สแอมโมเนียได้ดีกว่าชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS ที่ไม่มีการผสมองค์ประกอบอื่น (Y. Seekaew และคณะ, 2014) นอกจากนี้พอลิเมอร์ PEDOT:PSS ที่ผสมด้วยท่อนาโนคาร์บอนแนบด้วยสารประกอบอินทรีย์เอมีน (Amine) และ ไนโตรเจน (N_2) สามารถใช้เป็นหมึกพิมพ์สำหรับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท เพื่อใช้เป็นชั้นฟิล์มตรวจจับ

สารฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ที่ปะปนอยู่ในอาหารทะเล ได้แก่ ปลาหมึก (K. Timsorn และ C. Wongchoosuk, 2019)

2.8 พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับแสดงประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์แก๊ส



ภาพที่ 6 พารามิเตอร์ที่ใช้แสดงประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์แก๊ส

เซ็นเซอร์แก๊สเป็นอุปกรณ์ที่สามารถตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นภายนอกและส่งสัญญาณออกมา สิ่งกระตุ้นภายนอกจะมีผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้า ความนำไฟฟ้า ความจุไฟฟ้า หรือมวลของวัสดุตรวจจับของเซ็นเซอร์ พารามิเตอร์ที่ใช้แสดงประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์แก๊ส แสดงดังภาพที่ 6 พารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ การตอบสนองต่อแก๊ส (Gas response) ความไว (Sensitivity) การเลือก (Selectivity) เวลาการตอบสนอง (Response time) เวลาการฟื้นตัว (Recovery time) และการสูงขึ้นของเส้นฐานความต้านทาน (Drift) สำหรับการตอบสนองต่อแก๊ส (S) สามารถแสดงโดยใช้สมการที่ (1)

$$S(\%) = \frac{R_{\text{gas}} - R_{\text{air}}}{R_{\text{air}}} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ R_{gas} คือ ความต้านทานของเซ็นเซอร์แก๊สภายใต้บรรยากาศของแก๊สที่ต้องการทดสอบ

R_{air} คือ ความต้านทานของเซ็นเซอร์แก๊สภายใต้บรรยากาศของอากาศ

ความไวของเซ็นเซอร์แก๊สสามารถแสดงโดยใช้ความชันของกราฟระหว่างเวลากับการตอบสนองต่อแก๊ส คุณสมบัติการเลือก ถูกแสดงโดยการเปรียบเทียบค่าการตอบสนองของเซ็นเซอร์ต่อแก๊สต่างๆ เวลาการตอบสนอง คือ เวลาที่ความต้านทานไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แก๊สเปลี่ยนแปลงไปร้อยละ

ละ 90 เมื่ออยู่ภายใต้แก๊สทดสอบ เวลาการฟื้นตัว คือ เวลาที่ความต้านทานเปลี่ยนแปลงกลับมาที่ความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นภายใต้บรรยากาศของอากาศ การสูงขึ้นของเส้นฐานความต้านทาน คือ การเปลี่ยนแปลงของเส้นฐานความต้านทานเมื่อเซ็นเซอร์แก๊สถูกทดสอบในแต่ละรอบ (Cycle) เซ็นเซอร์แก๊สที่ดีควรสามารถแสดงการตอบสนองต่อแก๊สเป้าหมายซ้ำได้ และประสิทธิภาพไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับการเกิดการสูงขึ้นของเส้นฐานความต้านทาน เนื่องจากโมเลกุลของแก๊สทดสอบไม่สามารถคายออกได้หมดจากชั้นผิวการตรวจจับแก๊สของเซ็นเซอร์



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ ดำเนินการพัฒนาหมึกพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการตรวจจับแก๊สจากวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตร ได้แก่ เส้นใยนาโนคาร์บอน และท่อนาโนคาร์บอน โดยเริ่มจากการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมหมึกพิมพ์ นั่นคือ การหาตัวทำละลายที่เหมาะสม หลังจากนั้นนำหมึกพิมพ์ที่เตรียมได้ไปใช้ในระบบพิมพ์แบบอิงค์เจ็ทเพื่อใช้พิมพ์ชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊สของเซ็นเซอร์ และทดสอบประสิทธิภาพการตรวจจับแก๊ส

3.1 วิธีการทดลองหาตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับเตรียมหมึกพิมพ์

หมึกพิมพ์ที่ใช้ในการวิจัยนี้ทำจากวัสดุคาร์บอน ได้แก่ เส้นใยนาโนคาร์บอน และท่อนาโนคาร์บอน เนื่องจากวัสดุคาร์บอนกระจายตัวได้ไม่ดีในตัวทำละลาย โดยมีสาเหตุจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) ระหว่างโมเลกุลคาร์บอน ทำให้ผงคาร์บอนรวมตัวกันอย่างรวดเร็วในสารละลายต่างๆ ดังนั้น การหาตัวทำละลายและเงื่อนไขที่เหมาะสม ที่จะทำให้วัสดุคาร์บอนกระจายตัวได้ดี สำหรับใช้เตรียมเป็นหมึกพิมพ์จึงเป็นสิ่งจำเป็น อีกทั้งหมึกพิมพ์ดังกล่าวต้องมีคุณสมบัติในการตรวจจับแก๊สด้วย โดยมีขั้นตอนการดำเนินการ ดังนี้

3.1.1 ตัดแผ่นซิลิกอน (Silicon; Si) ความหนา 3 มิลลิเมตร (mm) ให้มีขนาดขนาดพื้นที่ 9 ตารางเซนติเมตร (cm²) ทำความสะอาดด้วยอะซิโตน (Acetone) และเมทานอล (Methanol) โดยใช้เครื่องทำความสะอาดด้วยความถี่เหนือเสียง (Ultrasonic cleaner) เป็นเวลา 15 นาที เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน (N₂)

3.1.2 ดำเนินการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide ; Al₂O₃) ที่มีความหนา 100 นาโนเมตร (nm) ลงบนแผ่นรองรับซิลิกอนที่ได้จากข้อ 3.1.1 โดยใช้วิธีรีแอกทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (Reactive magnetron sputtering) ระบบแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง แสดงดังภาพที่ 7 ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ถูกใช้เป็นชั้นป้องกัน (Buffer layer) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเติบโตของชั้นฟิล์มคาร์บอน

3.1.3 ดำเนินการเคลือบฟิล์มบางอินโคเนล (Inconel) ที่มีความหนา 80 นาโนเมตร (nm) ลงบนแผ่นรองรับที่ได้จากข้อ 3.1.2 โดยใช้วิธีรีแอกทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง ฟิล์มบางอินโคเนลเป็นฟิล์มของโลหะผสมของนิกเกิล (Nickel; Ni) เป็นธาตุหลัก และมีส่วนผสมของเหล็ก (Iron; Fe) และโครเมียม (Chromium; Cr) เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 2 ฟิล์มบางอินโคเนลถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการก่อตัวเป็นเส้นใยนาโนคาร์บอน



ภาพที่ 7 ภาพถ่ายระบบแมกนีตรอนสปีดเตอริง



ภาพที่ 8 ภาพถ่ายระบบการตกสะเก็ดไอเชิงเคมีด้วยความร้อน

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบาง Al_2O_3 และฟิล์มบาง Inconel

พารามิเตอร์	ฟิล์มบาง Al_2O_3	ฟิล์มบาง Inconel
ความดันต่ำสุด (mbar)	5×10^{-5}	5×10^{-5}
ความดันขณะเคลือบฟิล์ม (mbar)	3×10^{-3}	3×10^{-3}
อุณหภูมิแผ่นรองรับ ($^{\circ}\text{C}$)	R.T	R.T
ระยะเป้าสารเคลือบถึงแผ่นรองรับ (cm)	10	10
อัตราการไหลแก๊ส Ar (sccm)	5	5
อัตราการไหลแก๊ส O_2 (sccm)	1	-
กำลังไฟฟ้า (W)	216	216
เวลาการเคลือบฟิล์ม (s)	100	60

3.1.4 ดำเนินการสังเคราะห์เส้นใยนาโนคาร์บอนโดยใช้วิธีการตกสะสมไอเชิงเคมีด้วยความร้อน (Thermal CVD) ระบบการตกสะสมไอเชิงเคมีด้วยความร้อน แสดงดังภาพที่ 8 นำแผ่นรองรับที่ได้จากข้อ 3.1.3 วางในภาชนะปฏิกิริยาที่สอดอยู่ในเตาไฟฟ้า เปิดเครื่องสุญญากาศ จนความดันภายในภาชนะปฏิกิริยามีค่าต่ำกว่า 10^{-2} มิลลิบาร์ (mbar)

3.1.5 เปิดแก๊สอาร์กอน (Argon; Ar) เข้าไปในระบบด้วยอัตราการไหล 200 sccm จนกระทั่งความดันภายในภาชนะปฏิกิริยามีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ เปิดเตาไฟฟ้าให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 770 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อยเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์บนชั้นผิวของฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา

3.1.6 เปิดแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen; H_2) เข้าไปในระบบด้วยอัตราการไหล 200 sccm เป็นเวลา 5 นาที เมื่ออุณหภูมิภายในปฏิกิริยาเท่ากับ 770 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนนี้อุณหภูมิตัวเร่งปฏิกิริยาอินโคเนลขนาดนาโนเมตรจะก่อตัวขึ้น

3.1.7 เปิดแก๊สอะเซทิลีน (Acetylene; C_2H_2) และแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (Sulfur hexafluoride; SF_6) ด้วยอัตราการไหล 60 sccm และ 40 sccm ตามลำดับ โดยใช้เวลา 60 นาที ในขั้นตอนนี้ เส้นใยนาโนคาร์บอนจะก่อตัวขึ้น

3.1.8 ปิดแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สอะเซทิลีน และปิดเตาไฟฟ้า ขณะอุณหภูมิลดลงเปิดแก๊สอาร์กอนด้วยอัตราการไหล 50 sccm จนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะปฏิกิริยาลดลงมาที่อุณหภูมิห้องและเก็บตัวอย่าง

3.1.9 นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM Quanta 450 FEI) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM Hitachi HT 770)

3.1.10 นำตัวอย่างมวล 0.5 กรัม ไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยกรดที่มาจากกรดมผสมของกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid; H_2SO_4) และกรดไนตริก (Nitric acid; HNO_3) ที่มีอัตราส่วนการผสมเป็น 3:1 (H_2SO_4/HNO_3) โดยใช้เครื่องสั่นความถี่เหนือเสียง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นล้างสารตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วยเตาอบ นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป (Fourier transform infrared spectroscope; FTIR Perkin Elmer Spectrum 400)

3.1.11 นำตัวอย่างที่ได้ไปผสมตัวทำละลายด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงคาร์บอนต่อตัวทำละลาย เท่ากับ 1:3 โดยตัวทำละลายที่ศึกษา ได้แก่ น้ำที่ไม่มีประจุ (Deionized water; DI water) เอทานอล (Ethanol) ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide; DMSO) โดยใช้เครื่องสั่นความถี่เหนือเสียง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นหยดหมึกพิมพ์ลงบนขั้วไฟฟ้าเงินที่ถูกพิมพ์สกรีน (Screen printing) อยู่บนแผ่นรองรับ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate; PET)

3.1.12 นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3.1.11 ไปทดสอบประสิทธิภาพการรับรู้แก๊สโดยใช้ระบบที่แสดงดังภาพที่ 9 แก๊สที่ใช้ทดสอบได้แก่ แอมโมเนีย (Ammonia; NH_3) เอทานอล (Ethanol) เมทานอล (Methanol) และไดเมทิลฟูมาเรท (Dimethyl fumarate; DMF)



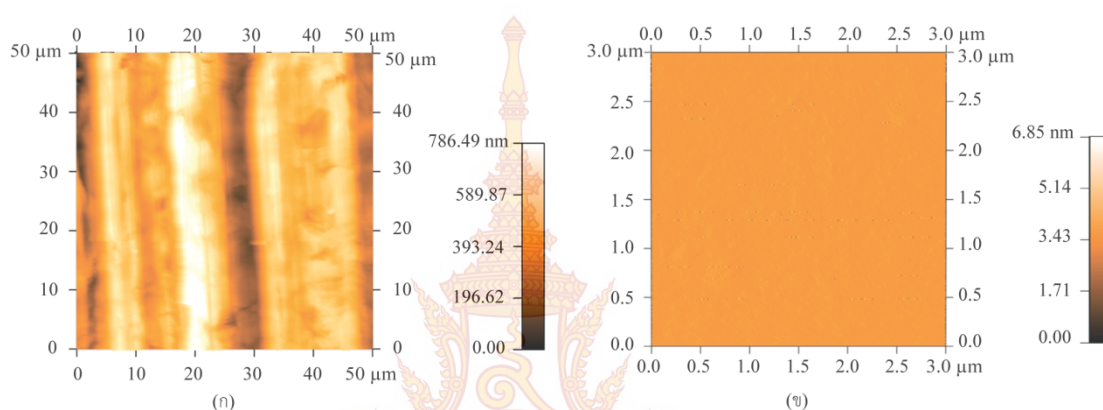
ภาพที่ 9 ระบบทดสอบประสิทธิภาพเซ็นเซอร์แก๊ส

3.2 วิธีการทดลองหาประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์แก๊สโดยวิธีการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท

ในหัวข้อนี้ เป็นการศึกษาการเตรียมหมึกพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบพิมพ์อิงค์เจ็ท (Inkjet Printing) ที่มีคุณสมบัติการตรวจจับแก๊ส หมึกพิมพ์ถูกเตรียมจากวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้าง

ระดับนาโนเมตร ได้แก่ ท่อนาโนคาร์บอน เพื่อเป็นการศึกษาผลกระทบของการเคลือบฟิล์มคาร์บอน โดยใช้ระบบพิมพ์อิงค์เจ็ท ที่มีต่อประสิทธิภาพเซ็นเซอร์แก๊ส ประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์แก๊สถูกเปรียบเทียบกับเตรียมฟิล์มโดยใช้วิธีการหยด (Drop-casting) โดยมีขั้นตอนการดำเนินการ ดังนี้

3.2.1 แผ่นพอยล์ทองแดง ความหนา 50 ไมโครเมตร (Micrometer; μm) ถูกใช้เป็นแผ่นรองรับ ชัดให้เรียบโดยใช้กระดาษทรายอย่างละเอียด หลังจากนั้นตัดแผ่นรองรับให้มีขนาดพื้นที่ 9 ตารางเซนติเมตร ทำความสะอาดด้วยอะซิโตน และเมทานอล โดยใช้เครื่องทำความสะอาดด้วยความถี่เหนือเสียง เป็นเวลา 15 นาที เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ลักษณะของพื้นผิวแผ่นทองแดง ก่อนและหลังขัดแสดงด้วยภาพ 2 มิติ จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope; AFM AR MFP-3D) ดังภาพที่ 10



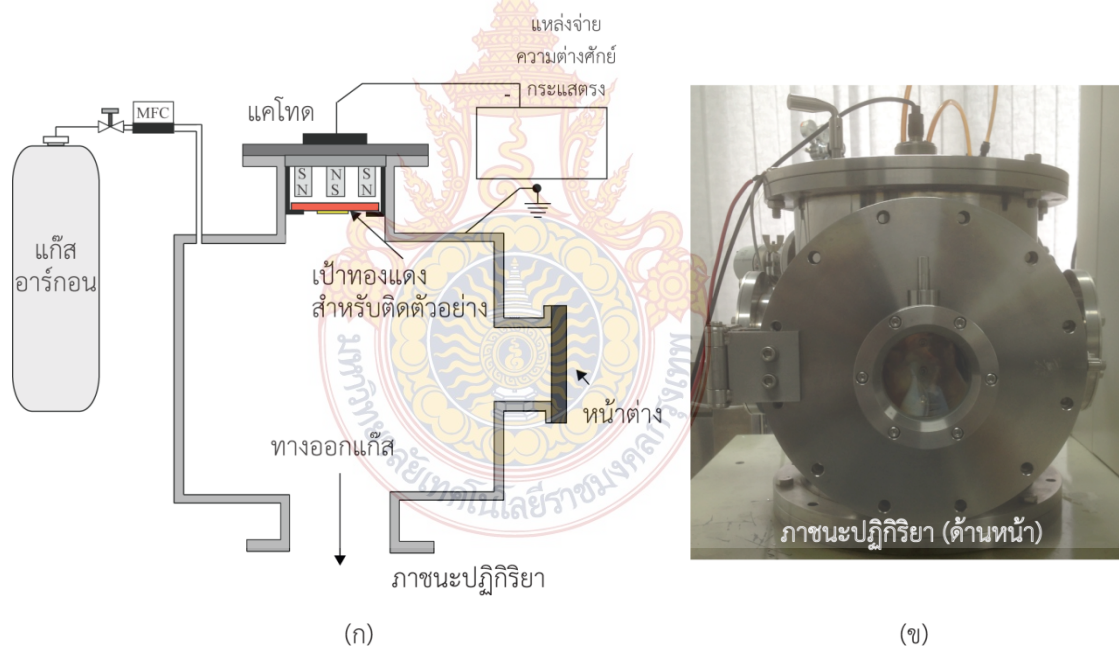
ภาพที่ 10 ภาพถ่าย AFM ของพื้นผิวแผ่นรองรับทองแดง (ก) ก่อนการขัด และ (ข) หลังการขัด ด้วยกระดาษทรายอย่างละเอียด

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบาง Al_2O_3 และฟิล์มบาง Au

พารามิเตอร์	ฟิล์มบาง Al_2O_3	ฟิล์มบาง Au
ความดันต่ำสุด (mbar)	5×10^{-5}	5×10^{-3}
ความดันขณะเคลือบฟิล์ม (mbar)	3×10^{-3}	1×10^{-1}
อุณหภูมิแผ่นรองรับ ($^{\circ}\text{C}$)	R.T	R.T
ระยะเป้าสารเคลือบถึงแผ่นรองรับ (cm)	10	5
อัตราการไหลแก๊ส Ar (sccm)	5	5
อัตราการไหลแก๊ส O_2 (sccm)	1	-
กำลังไฟฟ้า (W)	216	20
เวลาการเคลือบฟิล์ม (s)	60	30



ภาพที่ 11 ภาพถ่ายระบบสputtering กระแสตรงสำหรับเคลือบฟิล์มบางทองคำ



ภาพที่ 12 (ก) แผนภาพ และ (ข) ภาพถ่ายของภาชนะปฏิกิริยาที่ใช้ในการระดมยิงด้วยไอออนของแก๊สอาร์กอน

3.2.2 ดำเนินการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่มีความหนา 45 นาโนเมตร ลงบนแผ่นรองรับพอยด์ทองแดงที่ได้จากข้อ 3.2.1 โดยใช้วิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสputtering ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ถูกใช้เป็นชั้นป้องกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเติบโตของชั้นฟิล์มคาร์บอน

3.2.3 ดำเนินการเคลือบฟิล์มบางทองคำ ที่มีความหนา 10 นาโนเมตร ลงบนแผ่นรองรับที่ได้จากข้อ 3.2.2 โดยใช้วิธีการสปัตเตอร์ริงกระแสดตรง (Scancoat Six; BOC Edwards) แสดงดังภาพที่ 11 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 3 ฟิล์มบางทองคำถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการก่อตัวเป็นท่อคาร์บอน

3.2.4 ดำเนินการเปลี่ยนฟิล์มบางทองคำให้เป็นอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร โดยใช้วิธีการระดมยิงด้วยไอออนของแก๊สอาร์กอน (Ar ion-bombardment) แผนภาพและภาพถ่ายของภาชนะปฏิกิริยาที่ใช้ในการระดมยิงด้วยแก๊สอาร์กอน แสดงดังภาพที่ 12 แผ่นรองรับตามข้อ 3.2.3 ถูกยึดติดบนเป่าทองแดงของระบบรีแอคทีฟสปัตเตอร์ริง ภาชนะปฏิกิริยาถูกทำให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศที่ความดัน 5×10^{-5} มิลลิบาร์ แก๊สอาร์กอนถูกจ่ายเข้าไปในระบบด้วยอัตราการไหล 5 sccm โดยมีกำลังไฟฟ้ากระแสดตรงขนาด 260 วัตต์ (W) จ่ายให้กับขั้วทองแดงเป็นเวลา 5 นาที อนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรก่อตัวขึ้นในขั้นตอนนี้

3.2.5 ดำเนินการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนโดยวิธีการตกสะสมไอเชิงเคมีด้วยความร้อน โดยมีขั้นตอนตามข้อ 3.1.4 ถึง 3.1.8 ดำเนินการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 880, 900 และ 950 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และใช้แก๊สปฏิกิริยา ได้แก่ แก๊สอะเซทิลีน

3.2.6 นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน วิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยใช้เทคนิคการกระจายตัวพลังงานรังสีเอกซ์ (Energy dispersive X-ray spectroscopy; EDS) และวิเคราะห์ความเป็นผลึกโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มมามานสเปกโทรสโคปี (Fourier-transform Raman spectroscopy; FT-Raman Perkin Elmer spectrometer)

3.2.7 นำตัวอย่างมวล 0.5 กรัม ไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยกรดที่มาจากกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid; H_2SO_4) และกรดไนตริก (Nitric acid; HNO_3) ที่มีอัตราส่วนการผสมเป็น 3:1 ($3:1 H_2SO_4/HNO_3$) โดยใช้เครื่องสั่นความถี่เหนือเสียง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นล้างสารตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วยเตาอบ

3.2.8 นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3.2.7 ไปผสมตัวทำละลาย ได้แก่ น้ำที่ไม่มีประจุ ด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงคาร์บอนต่อน้ำ เท่ากับ 1:3 โดยใช้เครื่องสั่นความถี่เหนือเสียง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นผสมสารละลายท่อคาร์บอนกับพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ได้แก่ poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate; PEDOT:PSS) โดยใช้สัดส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายท่อคาร์บอนต่อพอลิเมอร์นำไฟฟ้าเป็น 10:90 เปอร์เซ็นต์

3.2.9 ดำเนินการเคลือบหมึกพิมพ์ปริมาตร 20 ไมโครลิตร ลงบนแผ่นรองรับพลาสติกที่มีขั้วไฟฟ้าเงิน ด้วยวิธีการหยด โดยใช้ไมโครปิเปต และวิธีการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ทโดยใช้เครื่องพิมพ์ HP

3.5 การออกแบบการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ เริ่มจากการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมหมึกพิมพ์ นั่นคือ การหาตัวทำละลายที่เหมาะสม หลังจากนั้นนำหมึกพิมพ์ที่เตรียมได้ไปใช้ในระบบพิมพ์แบบอิงค์เจ็ทเพื่อเตรียมเซ็นเซอร์แก๊ส และทดสอบประสิทธิภาพการตรวจจับแก๊ส จึงกำหนด ตัวแปรต้น ตัวแปรตาม และตัวแปรควบคุม ดังนี้

3.5.1 การกำหนดตัวแปรสำหรับวิธีการหาตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับเตรียมหมึกพิมพ์

ตัวแปรต้น : ชนิดของตัวทำละลาย
 ตัวแปรตาม : ประสิทธิภาพการตรวจจับแก๊ส
 ตัวแปรควบคุม : อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น ปริมาตรตัวทำละลาย สัดส่วนผสมของหมึกพิมพ์

3.5.2 การกำหนดตัวแปรสำหรับการหาประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์แก๊สโดยวิธีการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท

ตัวแปรต้น : วิธีการพิมพ์หมึก
 ตัวแปรตาม : ประสิทธิภาพการตรวจจับแก๊ส
 ตัวแปรควบคุม : อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น ปริมาตรตัวทำละลาย และสัดส่วนผสมของหมึกพิมพ์

หมายเหตุ

ชนิดตัวทำละลาย ได้แก่ น้ำไม่มีประจุ (DI water) ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (DMSO) และเอทานอล (Ethanol)

ประสิทธิภาพการตรวจจับแก๊ส ได้แก่ การตอบสนองต่อแก๊ส (Gas response) ความไว (Sensitivity) และการเลือก (Selectivity)

วิธีการพิมพ์หมึก ได้แก่ แบบหยด (Drop-casting) และแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท (Inkjet printing)

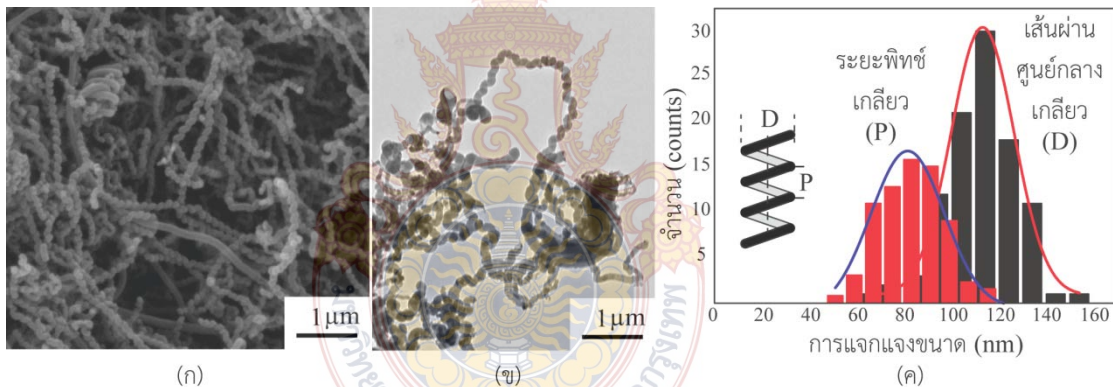
บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

ผลการดำเนินการวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 การทดลองหาตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับเตรียมหมึกพิมพ์ และตอนที่ 2 การทดลองหาประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์แก๊สที่เตรียมโดยวิธีการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท

4.1 ผลการทดลองหาตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับเตรียมหมึกพิมพ์

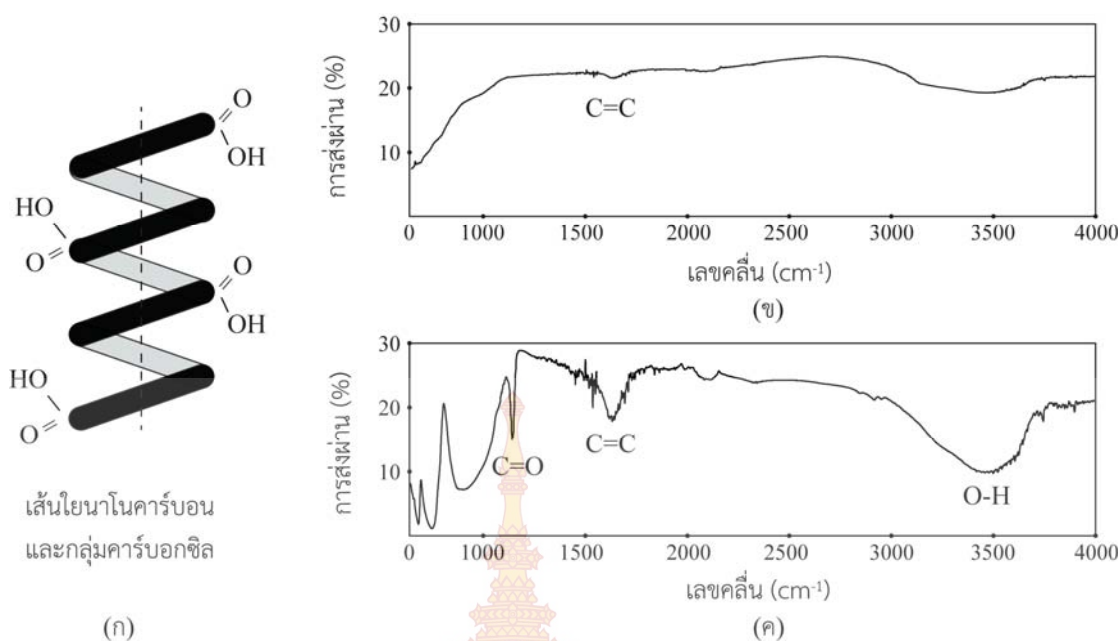
หมึกพิมพ์ที่ใช้ในการวิจัยนี้ทำจากวัสดุคาร์บอน ได้แก่ เส้นใยนาโนคาร์บอน และท่อนาโนคาร์บอน ที่ถูกสังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอนไอเชิงเคมีด้วยความร้อน ในหัวข้อนี้จะเป็นเส้นใยนาโนคาร์บอนที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นเกลียว (Coil) โดยโครงสร้างลักษณะนี้จะมีพื้นที่ผิวมากกว่าโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นท่อตรง ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว แสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ภาพถ่าย (ก) SEM และ (ข) TEM แสดงลักษณะทางกายภาพของเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว (ค) กราฟการแจกแจงขนาดระยะพิทซ์เกลียวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกลียวของเส้นใยนาโนคาร์บอน

ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว แสดงดังภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ดังภาพที่ 13 (ก) และ 13 (ข) ตามลำดับ และกราฟการแจกแจงขนาดระยะพิทซ์เกลียวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกลียวของเส้นใยนาโนคาร์บอน แสดงดังภาพที่ 13 (ค) สำหรับการแจกแจงขนาดระยะพิทซ์เกลียวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกลียวของเส้นใยนาโนคาร์บอนคำนวณจากโปรแกรม ImageJ โดยเก็บข้อมูลทางสถิติจากภาพถ่าย SEM จำนวน 10 ภาพ และนับจำนวนเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว

จำนวน 200 เส้น พบว่า ค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกลียว และขนาดระยะพิทช์เกลียวของเส้นใยนาโนคาร์บอน เท่ากับ 114 ± 16 นาโนเมตร และ 93 ± 23 นาโนเมตร ตามลำดับ

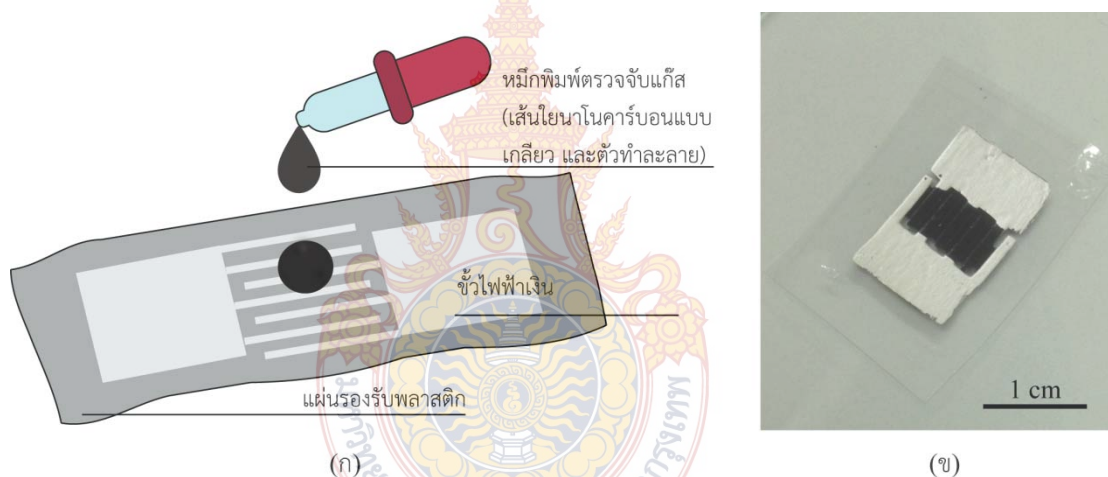


ภาพที่ 14 (ก) แผนภาพแสดงเส้นใยนาโนคาร์บอนและกลุ่มคาร์บอกซิล (ข) สเปกตรัม FTIR ของเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว (ค) สเปกตรัม FTIR ของเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยความร้อนและกรด

เส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวที่ได้จากกระบวนการตกตะกอนไอเชิงเคมีด้วยความร้อน จะกระจายตัวได้ไม่ดีในตัวทำละลายต่างๆ หรือผสมกับพอลิเมอร์ได้ และประสานกันได้ดี เนื่องจากมีแรงกระทำระหว่างเส้นใยแต่ละเส้น นั่นคือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) ทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน แม้จะทำให้กระจายตัว ด้วยเครื่องสั่นความถี่เหนือเสียง ดังนั้น การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยนาโนคาร์บอนจึงเป็นกระบวนการที่จำเป็น ในงานวิจัย พื้นผิวของเส้นใยนาโนคาร์บอนถูกปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้ความร้อนและกรด โดยหลังจากได้เส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวจากกระบวนการตกตะกอนไอเชิงเคมีด้วยความร้อน ตัวอย่างถูกนำไปให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศของอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อกำจัดอสัณฐานคาร์บอน (Amorphous carbon) และนำไปแช่ในกรดผสมซัลฟิวริกและไนตริกในอัตราส่วน 3:1 และทำให้กระจายตัวด้วยเครื่องสั่นความถี่เหนือเสียงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น (Distilled water) ทำให้แห้งด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

หลังจากเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวถูกปรับปรุงพื้นผิว ตัวอย่างถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 14 โดยที่ ภาพที่ 14 (ก) แสดงแผนภาพเส้นใยนาโนคาร์บอนและกลุ่มคาร์บอกซิล และภาพที่ 14 (ข) และ ภาพที่ 14

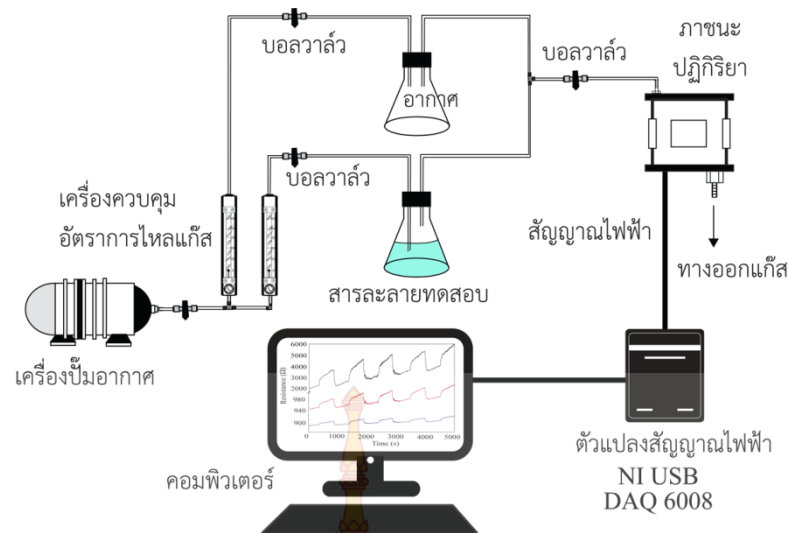
(ค) แสดง สเปกตรัมฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีของเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยความร้อนและกรด ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่า สเปกตรัมฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีของเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวมีพีค (Peak) ขนาดเล็กที่เลขคลื่นประมาณ $1600 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ ซึ่งระบุพันธะคู่ระหว่างคาร์บอน $C=C$ แต่สเปกตรัมฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีของเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยความร้อนและกรด พบพีคเพิ่มเติม ได้แก่ พีคในช่วงเลขคลื่น $3400-3500 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ ซึ่งระบุพันธะเดี่ยว ระหว่าง ออกซิเจน และ ไฮโดรเจน $O-H$ นอกจากนี้ พบพีคที่เลขคลื่นประมาณ $1000-1200 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ ซึ่งระบุพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน $C=O$ จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีดังกล่าวเป็นการยืนยันว่ามีกลุ่มคาร์บอกซิลบนพื้นผิวของเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว โดยการแนบกลุ่มคาร์บอกซิลบนพื้นผิวของโครงสร้างคาร์บอนระดับ นาโนเมตรเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊ส และยังช่วยให้เกิดการกระจายตัวที่ดีในตัวทำละลาย (V.T. Le และคณะ, 2013)



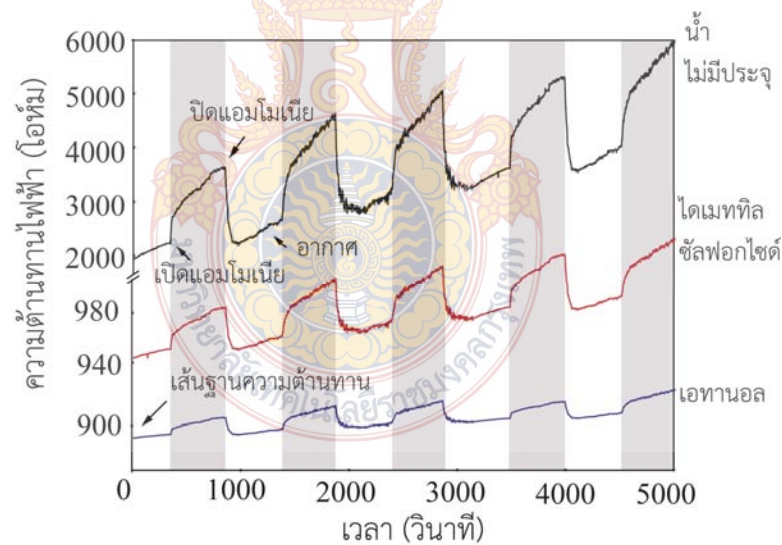
ภาพที่ 15 (ก) แผนภาพ และ (ข) ภาพถ่ายของเซ็นเซอร์แก๊สเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว

ผงเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวถูกละลายในตัวทำละลายชนิดต่างๆ เพื่อเตรียมเป็นชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊สในรูปแบบของหมึกพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ จากผลการทดลอง พบว่า หมึกพิมพ์เส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวกระจายตัวได้ดีในตัวทำละลายทุกชนิด หลังจากนั้นหมึกพิมพ์ปริมาตร 20 ไมโครลิตร ถูกหยดลงบนแผ่นรองรับพลาสติกที่มีขั้วไฟฟ้าเงิน แผนภาพและภาพถ่ายของเซ็นเซอร์แก๊สเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวแสดงดังภาพที่ 15 (ก) และ ภาพที่ 15 (ข) ตามลำดับ แผนภาพระบบทดสอบประสิทธิภาพเซ็นเซอร์แก๊ส แสดงดังภาพที่ 16 ตัวอย่างเซ็นเซอร์ถูกวางภายในภาชนะปฏิกิริยา (Chamber) ที่เชื่อมต่ออยู่กับแผงวงจรไฟฟ้า อากาศและแก๊สเป้าหมายถูกควบคุมการไหลด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหลแก๊ส (Flow meter) บอลวาล์ว (Ball valve) ถูกใช้

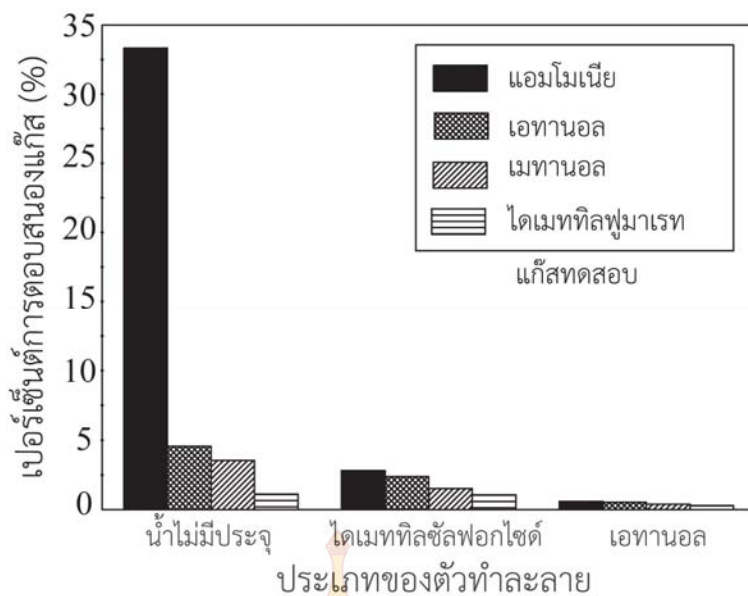
สำหรับการเปิด และปิดแก๊สทุกชนิด ความต้านทานของเซ็นเซอร์ถูกวัดทุกวินาทีด้วยโปรแกรม LabVIEW ที่เชื่อมต่อกับตัวแปลงสัญญาณ NI DAQ 6008 แสดงผลด้วยจอคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 16 แผนภาพระบบทดสอบประสิทธิภาพเซ็นเซอร์แก๊ส



ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซ็นเซอร์แก๊สเมื่อเปิดและปิดแอมโมเนียที่เตรียมด้วยตัวทำละลาย ได้แก่ น้ำไม่มีประจุ โดเมททิลซิลฟอกไซด์ และเอทานอล



ภาพที่ 18 เปอร์เซนต์การตอบสนองแก๊สของเซ็นเซอร์ที่เตรียมด้วยตัวทำละลาย ได้แก่ น้ำไม่มีประจุ โดเมทิลซัลฟอกไซด์ และเอทานอล

ภาพที่ 17 แสดงค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของเซ็นเซอร์แก๊สภายใต้บรรยากาศของแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นแก๊ส 1000 ppm เตรียมหมักพิมพ์ตรวจจับแก๊สโดยใช้ตัวละลายที่แตกต่างกัน ค่าการตอบสนองแก๊สของเซ็นเซอร์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) จากผลการทดลองพบว่า การตอบสนองของเซ็นเซอร์แก๊สที่เตรียมหมักพิมพ์จากตัวทำละลาย ได้แก่ น้ำไม่มีประจุ โดเมทิลซัลฟอกไซด์ ที่มีต่อแก๊สแอมโมเนียมีค่าเท่ากับ 33.3%, 2.8% และ 0.6% ตามลำดับ นอกจากนี้ เซ็นเซอร์แก๊สถูกนำไปทดสอบกับแก๊สอื่นๆ ได้แก่ เอทานอล เมทานอล และโดเมทิลฟูมาเรท จากภาพที่ 18 พบว่า เมื่อเซ็นเซอร์แก๊สถูกเตรียมหมักพิมพ์จากตัวทำละลายโดเมทิลซัลฟอกไซด์ และเอทานอล การตอบสนองของเซ็นเซอร์แก๊สมีค่าต่ำกว่า 5% นั่นคือ เซ็นเซอร์แก๊สมีคุณสมบัติการเลือก (Selectivity) ตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย

กระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรด ถูกอ้างถึงว่าสามารถทำให้กลุ่มคาร์บอกซิล (COOH) เกาะที่พื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNTs) ซึ่งมีผลทำให้เมื่อนำตัวอย่างไปเตรียมเป็นชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊สของเซ็นเซอร์ ทำให้เซ็นเซอร์แสดงคุณสมบัติการเลือกต่อแก๊สแอมโมเนีย (S. Sharma, และคณะ, 2013) ในทำนองเดียวกัน การแสดงถึงกลุ่มคาร์บอกซิลบนพื้นผิวเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว ที่ได้จากเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี ตามภาพที่ 14 จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เซ็นเซอร์ที่เตรียมได้มีคุณสมบัติการเลือกตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย กลไกการตรวจจับแก๊สของเซ็นเซอร์เส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวถูกกล่าวถึงว่าเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลแอมโมเนียและโมเลกุลออกซิเจนจากกลุ่มคาร์บอกซิลบนพื้นผิวเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว เมื่อพื้นผิวของเส้นใยนาโนคาร์บอนดูดซับโมเลกุลแอมโมเนีย โมเลกุลแอมโมเนียจะให้อิเล็กตรอนแก่โมเลกุลออกซิเจน ทำให้เกิดการพร่อง (Depletion) ของโฮลจากแถบ

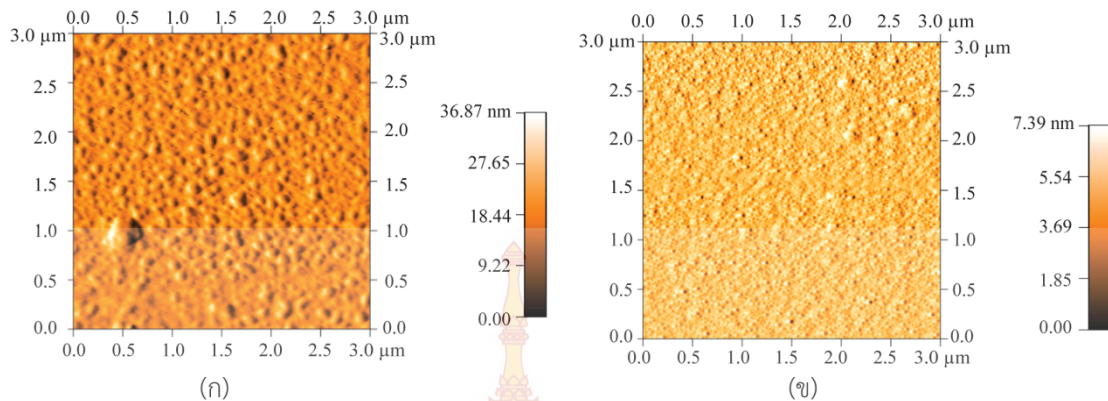
วาเลนซ์ของเส้นใยนาโนคาร์บอน นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ เมื่อโมเลกุลแอมโมเนียถูกดูดซับบนพื้นผิวของเส้นใยนาโนคาร์บอน

ในกรณีเซ็นเซอร์แก๊สที่ทำมาจากวัสดุคาร์บอน คุณสมบัติด้านความไวในการตอบสนองแก๊สถูกรายงานว่าขึ้นกับขนาดของโครงสร้างคาร์บอน กรณีโครงสร้างขนาดเล็ก เช่น ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6 ถึง 3 นาโนเมตร) ช่วงค่าความต้านทานเริ่มต้น หรือเส้นฐานความต้านทานของเซ็นเซอร์ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวที่ตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียอยู่ในช่วง 20 ถึง 200 โอห์ม (H. Lee, และคณะ, 2011) กรณีโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 ถึง 200 นาโนเมตร) ถูกรายงานว่า เส้นฐานความต้านทานที่ตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียในช่วง กิโลโอห์ม นั้นคือมากกว่า 1 กิโลโอห์ม (H. Lee, และคณะ, 2011; O. Monereo, และคณะ, 2013) เส้นฐานความต้านทานของเซ็นเซอร์แก๊สสามารถปรับได้โดยการเติมโมเลกุลออกซิเจนบนพื้นผิวของคาร์บอนโดยการละลายในตัวทำละลาย (A. Staerz, และคณะ, 2016) จากภาพที่ 17 พบว่า เส้นฐานความต้านทานของเซ็นเซอร์แก๊สเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 60 ถึง 160 นาโนเมตร) ที่ได้จากตัวทำละลาย ได้แก่ เอทานอล โดเมทิลซัลฟอกไซด์ และน้ำไม่มีประจุมีค่าเท่ากับ 0.80, 0.95 และ 1.99 โอห์ม ตามลำดับ ดังนั้น เซ็นเซอร์แก๊สเส้นใยนาโนคาร์บอนที่เตรียมได้จากน้ำไม่มีประจุ มีค่าอยู่ในช่วงการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย ค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์แก๊สที่มากที่สุด ในกรณีเซ็นเซอร์แก๊สเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวที่เตรียมได้จากเจ็อนไซตัวทำละลายน้ำไม่มีประจุ มีผลมาจากการเติมโมเลกุลออกซิเจนที่ได้จากน้ำ เวลาในการตอบสนองแก๊สของเซ็นเซอร์มีค่าประมาณ 8 นาที อย่างไรก็ตาม จากภาพที่ 17 การสูงขึ้นของเส้นฐานความต้านทานเป็นผลมาจากการที่โมเลกุลแอมโมเนียไม่สามารถหลุดออกจากพื้นผิวคาร์บอนได้หมด หลังการทดสอบ เพราะความแข็งแรงของพันธะระหว่างโมเลกุลแอมโมเนียและโมเลกุลของออกซิเจนบนพื้นผิวคาร์บอนที่อุณหภูมิต่ำ

4.2 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์แก๊สโดยวิธีการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท

ในการทดลองตอนนี้ วัสดุที่ใช้ทำหมึกพิมพ์ ได้แก่ ท่อนาโนคาร์บอน โดยทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนไอเชิงเคมีด้วยความร้อนบนแผ่นรองรับพอลิโพรพิลีนที่เคลือบด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ความหนา 45 นาโนเมตร และฟิล์มบางทองคำความหนา 10 นาโนเมตร เจ็อนไซ การเคลือบฟิล์มแสดงดังตารางที่ 2 หลังจากนั้น นำไปใส่ในภาชนะปฏิบัติการที่ใช้ในการระดมยิงด้วยไอออนของแก๊สอาร์กอน (Ar ion-bombardment) แสดงดังภาพที่ 12 พื้นผิวของฟิล์มบางหลังการระดมยิงด้วยไอออนของแก๊สอาร์กอน แสดงดังภาพที่ 19 พบว่า ค่าความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวฟิล์มบางหลังกระบวนการระดมยิงด้วยไอออนของแก๊สอาร์กอน และ ค่าความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวฟิล์มบางหลังกระบวนการตกตะกอนไอเชิงเคมีที่ไม่ใช่แหล่งกำเนิดคาร์บอน เท่ากับ 18.6 นาโนเมตร และ 4.5 นาโนเมตร ตามลำดับ ค่าความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวแผ่นฟิล์มหลังการ แอนนิล (Annealing) ระหว่างกระบวนการตกตะกอนไอเชิงเคมีด้วยความร้อนที่น้อยกว่าก่อนกระบวนการถูกอธิบายว่าเป็น

ผลมาจากการเติมเต็มช่องว่างของชั้นบัฟเฟอร์ของแผ่นฟิล์มด้วยอนุภาคระดับนาโนเมตรหลังการได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง (J.S Kim และคณะ, 2013) กลไกการเติมเต็มนี้สามารถอธิบายได้โดยใช้ภาพที่ 20 ระหว่างกระบวนการตกตะกอนไอเชิงเคมีที่อุณหภูมิสูงพื้นผิวของชั้นบัฟเฟอร์จะมีความขรุขระมากขึ้น แต่เนื่องจากความหนาของฟิล์มบางทองคำที่บางมากซึ่งอยู่ในระดับนาโนเมตร จึงเติมเต็มช่องว่างที่ขรุขระของชั้นฟิล์มบัฟเฟอร์นั้น

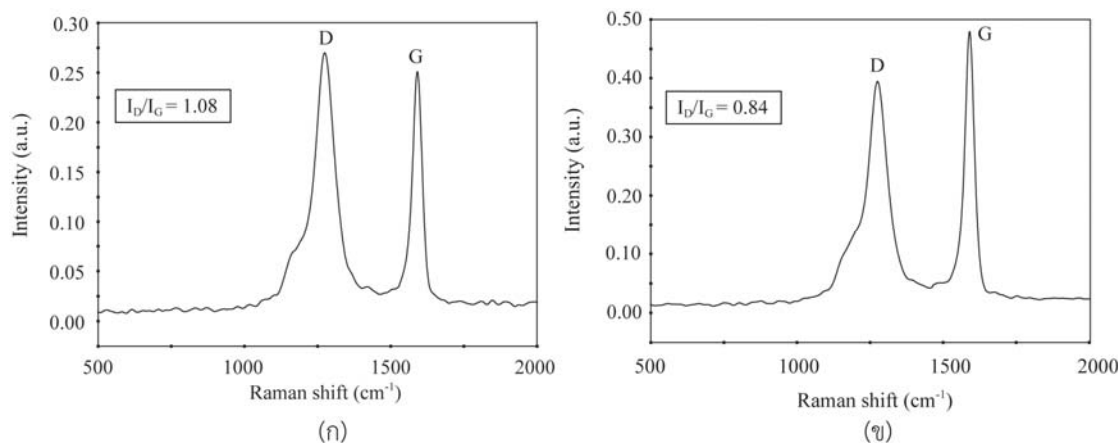


ภาพที่ 19 ภาพถ่าย AFM ของพื้นผิวฟิล์มบาง Au/Al₂O₃ เคลือบบนแผ่นรองรับทองแดง (ก) หลังการระดมยิงด้วยไอออนแก๊สอาร์กอนและ (ข) หลังการนำตัวอย่างไปแอนนีสในกระบวนการ CVD โดยไม่ใช้แก๊สอะเซทิลีน



ภาพที่ 20 กลไกการก่อตัวของอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตร (ก) หลังกระบวนการระดมยิงด้วยไอออนของแก๊สอาร์กอน (ข) หลังการแอนนีสระหว่างกระบวนการตกตะกอนไอเชิงเคมีด้วยความร้อน

เมื่อนำฟิล์มบาง Au/Al₂O₃ ไปใช้เป็นแผ่นรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีการตกตะกอนไอเชิงเคมีด้วยความร้อน พบว่า ลักษณะทางกายภาพของท่อนาโนคาร์บอน แสดงดังภาพที่ 21

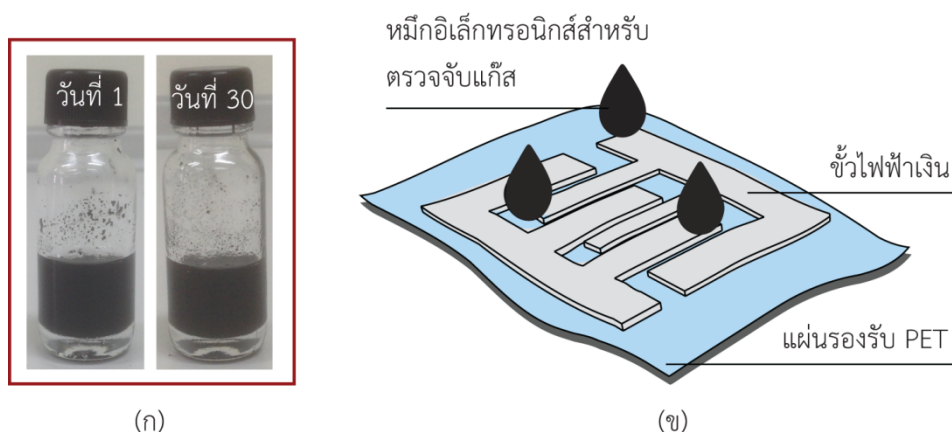


ภาพที่ 22 สเปกตรัมรามานของท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิการสังเคราะห์ (ก) 900 องศาเซลเซียส และ (ข) 950 องศาเซลเซียส

มีรายงานตีพิมพ์ก่อนหน้านี้ว่า คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนสามารถระบุได้โดยใช้ อัตราส่วนความเข้มของพีค D และ พีค G (I_D/I_G) ที่ได้จากเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งระบุเป็นค่า ต่ำหนิของท่อนาโนคาร์บอน (G. Atthipalli และคณะ, 2011) พีค D และ พีค G จากเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ระบุถึงอัสัณฐานของคาร์บอน (ตำแหน่งพีค 1350 cm^{-1}) และสัณฐานคาร์บอนแบบแกรไฟต์ (ตำแหน่งพีค 1580 cm^{-1}) ตามลำดับ จากภาพที่ 22 อัตราส่วน I_D/I_G สำหรับสเปกตรัมรามาน ของท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิการสังเคราะห์ 900 องศาเซลเซียส และ 950 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 1.08 และ 0.84 ตามลำดับ นั่นคือ ต่ำหนิของท่อนาโนคาร์บอนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ดังนั้น ท่อนาโนคาร์บอนที่เติบโตบนตัวเร่งปฏิกิริยาทองคำจะมีคุณภาพดีที่สุดเมื่อ ดำเนินการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส และนำท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จากเงื่อนไขนี้ไปใช้ เป็นวัสดุในการทำหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า

การกระจายตัวได้ไม่ดีของท่อนาโนคาร์บอนในสารละลายต่างๆ เป็นปัญหาสำคัญในการเตรียมหมึกพิมพ์เพื่อใช้เป็นชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊ส ดังนั้น การปรับปรุงพื้นผิวและการแนบกลุ่มฟังก์ชัน สารประกอบอินทรีย์บนพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนจึงเป็นสิ่งที่จะต้องดำเนินการ ในงานวิจัยนี้ท่อนาโนคาร์บอนถูกทำให้บริสุทธิ์โดยใช้ความร้อนและสารละลายชนิดกรด ได้แก่ กรดซัลฟิวริกและกรดไนตริกในอัตราส่วน กรดซัลฟิวริก 3 ส่วน ต่อกรดไนตริก 1 ส่วน (3:1 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{HNO}_3$) โดยกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนด้วยกรดถูกกล่าวถึงว่าเป็นการแนบสารประกอบอินทรีย์คาร์บอกซิลที่พื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอน (V.T. Le และคณะ, 2013)

เพื่อที่จะเข้าใจผลกระทบของการปรับปรุงพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนด้วยกรดต่อการกระจายตัวในตัวทำละลายเพื่อที่ใช้เตรียมหมึกพิมพ์นำไฟฟ้า ผงท่อนาโนคาร์บอน ปริมาณ 0.5 กรัม ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวถูกนำไปผสมกับน้ำไม่มีประจุ ปริมาตร 80 มิลลิลิตร โดยนำไปสั่นด้วยเครื่องสั่นเหนือเสียงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



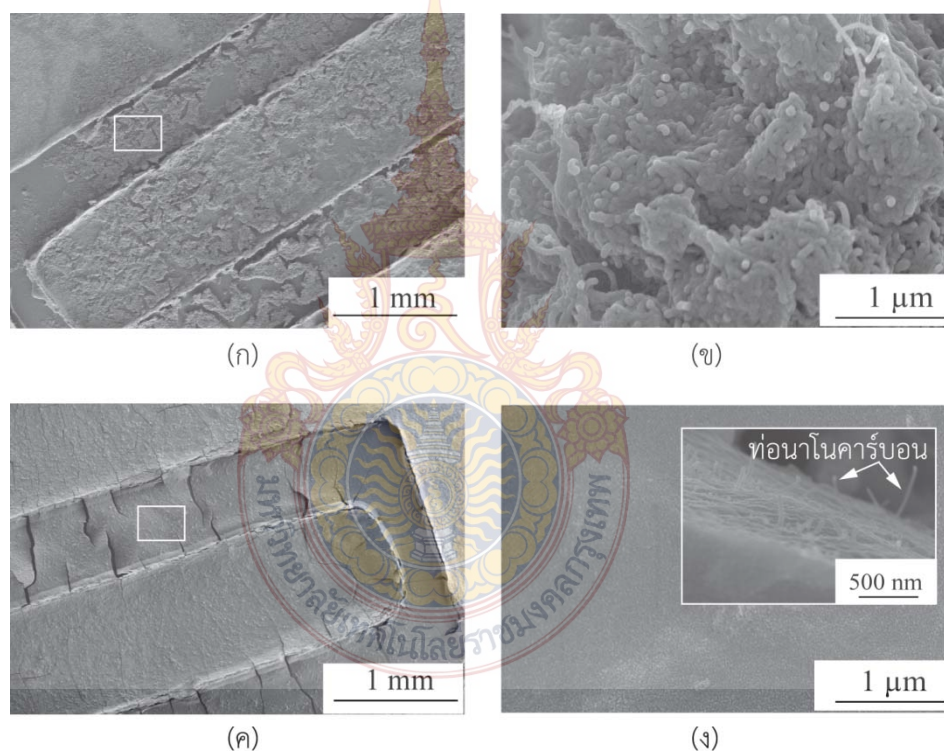
ภาพที่ 23 (ก) ภาพถ่ายท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวละลายในน้ำไม่มีประจุหลังจากผสม 1 วัน และ 30 วัน (ข) แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเซ็นเซอร์แก๊ส

ภาพที่ 23 แสดง (ก) ภาพถ่ายท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวละลายในน้ำไม่มีประจุ หลังจากผสม 1 วัน และ 30 วัน พบว่าการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนยังคงกระจายตัวได้ดีแม้เวลาจะผ่านไป 30 วัน หลังจากดำเนินการผสม ดังนั้นกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนด้วยกรดมีผลทำให้ท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวได้ดีในตัวทำละลาย หลังจากนั้นนำสารละลายท่อนาโนคาร์บอนไปผสมกับพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และเคลือบลงบนแผ่นรองรับที่มีขั้วไฟฟ้ากาวเงินด้วยวิธีการหยด และวิธีแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท แผนภาพส่วนประกอบของเซ็นเซอร์แก๊สแสดงดังภาพที่ 23 (ข)

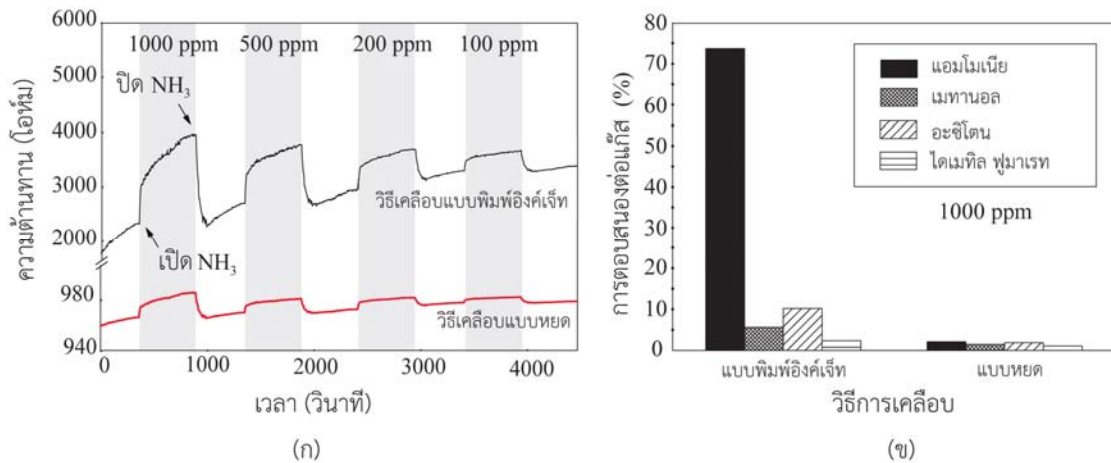
ภาพที่ 24 แสดงภาพถ่าย SEM ของหมึกพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นรองรับที่มีขั้วไฟฟ้าเงิน โดยใช้ (ก)-(ข) วิธีเคลือบแบบหยด (ค)-(ง) วิธีเคลือบแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท และเนื่องจากความตึงผิวที่สูงของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS เมื่อหยดหมึกลงบนแผ่นรองรับจึงปรากฏลักษณะของฟิล์มตรวจจับแก๊สที่ไม่เป็นแผ่นปกคลุมทั่วแผ่นรองรับ แต่มีลักษณะเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดต่างๆ แสดงดังภาพที่ 24 (ก) และภาพที่ 24 (ข) ในทางตรงกันข้าม หมึกพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เคลือบด้วยวิธีแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท มีการปกคลุมและมีความหนาแน่นอย่างสม่ำเสมอ แสดงดังภาพที่ 24 (ค) และ ภาพที่ 24 (ง) นอกจากนี้ จากภาพแทรกในภาพที่ 24 (ง) แสดงท่อนาโนคาร์บอนที่แทรกตัวอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS

ประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์แก๊สถูกประเมินจากคุณสมบัติการตอบสนองต่อแก๊ส ความไว และการเลือก โดยการตอบสนองต่อแก๊สสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) คุณสมบัติความไวสามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟเส้นตรงระหว่างค่าความเข้มข้นของแก๊สกับค่าการตอบสนองต่อแก๊ส คุณสมบัติการเลือกระบุได้จากการเปรียบเทียบค่าการตอบสนองต่อแก๊สชนิดต่างๆ ภาพที่ 25 (ก) แสดงค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของเซ็นเซอร์แก๊สที่มีต่อแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยเซ็นเซอร์แก๊สเตรียมได้จากวิธีเคลือบแบบหยด และวิธีเคลือบแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท และภาพที่ 25 (ข)

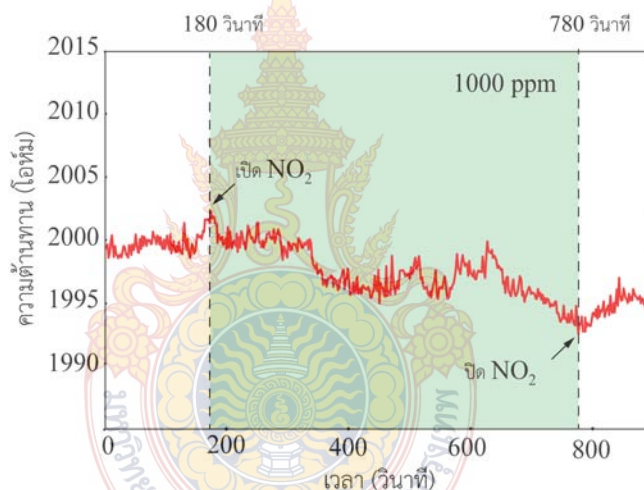
แสดงการเปรียบเทียบการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย และสารประกอบอินทรีย์ระเหยอื่นๆ ได้แก่ อะซิโตน เมทานอล และไตรเมทิลฟลูออไรด์ ที่ความเข้มข้น 1000 ppm จากผลการทดลอง พบว่า เซ็นเซอร์แก๊สที่ได้จากการเตรียมหมึกพิมพ์ด้วยวิธีพิมพ์อิงค์เจ็ท ตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียได้ดีที่สุด โดยค่าการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียของเซ็นเซอร์ที่ได้จากการเตรียมชั้นฟิล์มแบบหยดที่ความเข้มข้น 100, 200, 500 และ 1000 ppm มีค่าเท่ากับ 0.2, 0.3, 0.8 และ 1% ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นเท่ากัน สำหรับเซ็นเซอร์ที่ได้จากการเตรียมชั้นฟิล์มแบบพิมพ์อิงค์เจ็ทค่าการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียของเซ็นเซอร์ เท่ากับ 8.5, 23.3, 40.7 และ 73.7% ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่าเซ็นเซอร์ที่ได้จากการเตรียมชั้นฟิล์มแบบหยดแสดงค่าการตอบสนองต่อแก๊สทุกชนิดได้ต่ำ (ต่ำกว่า 5%) ในขณะที่เซ็นเซอร์ที่ได้จากการเตรียมชั้นฟิล์มแบบพิมพ์อิงค์เจ็ทตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตน เมทานอล และไตรเมทิล ฟลูออไรด์ ได้ต่ำกว่า 10% นั่นคือเซ็นเซอร์ที่ได้จากการเตรียมชั้นฟิล์มแบบพิมพ์อิงค์เจ็ทมีคุณสมบัติการเลือกตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย



ภาพที่ 24 ภาพถ่าย SEM ของหมึกพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นรองรับที่มีขั้วไฟฟ้าเงินโดยใช้ (ก)-(ข) วิธีเคลือบแบบหยด (ค)-(ง) วิธีเคลือบแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท



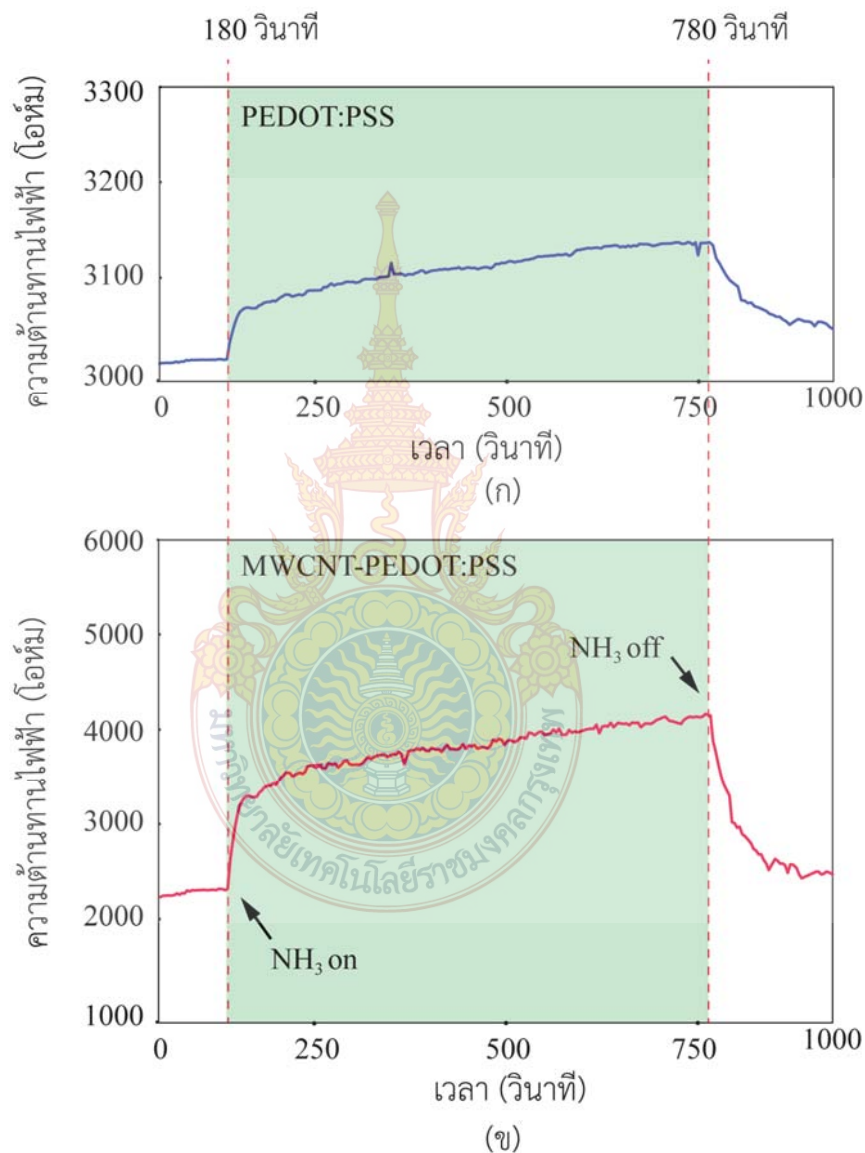
ภาพที่ 25 (ก) การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์แก๊สที่ได้จากการเตรียมชั้นฟิล์มแบบหยด และแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท (ข) การตอบสนองต่อแก๊สชนิดต่างๆ ของเซ็นเซอร์แก๊ส



ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซ็นเซอร์แก๊สที่ได้จากการเตรียมชั้นฟิล์มด้วยวิธีแบบพิมพ์อิงค์เจ็ทภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง

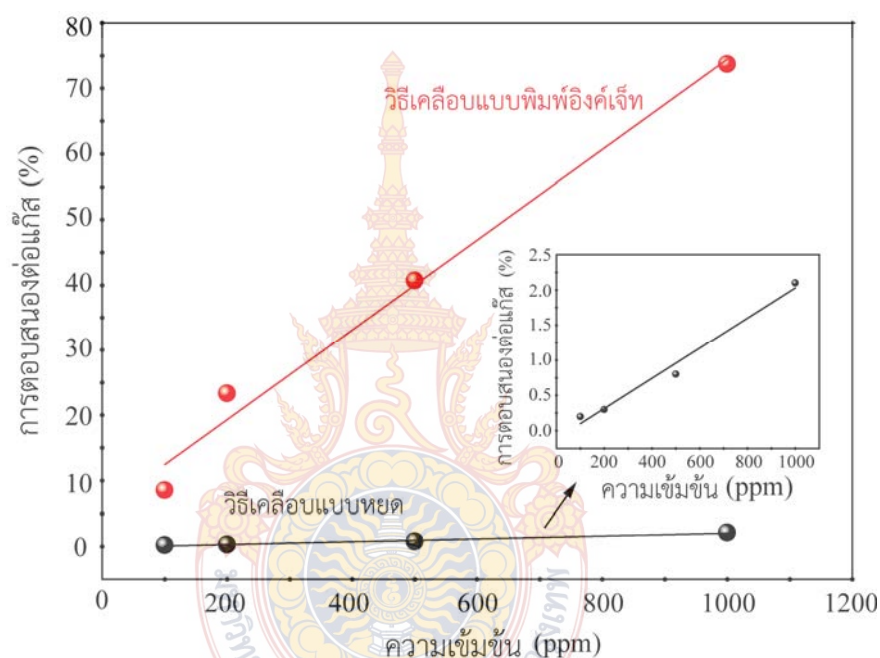
เนื่องด้วยพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และท่อนาโนคาร์บอน เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) (C. Wongchoosuk และคณะ, 2010; Y. Lin และคณะ, 2015) ดังนั้นวัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการผสมกันระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS และท่อนาโนคาร์บอนจึงมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี สังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของความต้านทานไฟฟ้าเมื่อมีโมเลกุลของแก๊สแอมโมเนียมาเกาะที่ชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊ส นอกจากนี้เซ็นเซอร์แก๊สแบบพิมพ์อิงค์เจ็ทถูกทดสอบกับแก๊สออกซิไดซ์ (Oxidizing gas) นั่นคือแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 26 พบว่า เซ็นเซอร์แก๊สตอบสนองได้ไม่ดีกับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตาม ค่าความต้านทานลดลงเล็กน้อยเมื่อมี

โมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์มาเกาะที่ชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊ส ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของ เซ็นเซอร์แก๊สสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่มีต่อแก๊สออกซิไดซ์ (G.F. Fine และคณะ, 2010) เป็นผล เนื่องจากพาหะของสารกึ่งตัวนำชนิดพีของชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊สของเซ็นเซอร์ นั้นคือ โฮลมีจำนวน มากกว่าอิเล็กตรอนทำให้เซ็นเซอร์ที่เตรียมได้นี้มีการตอบสนองที่ไม่ดีต่อแก๊สออกซิไดซ์ ซึ่งมีคุณสมบัติ เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งตรงกันข้ามกับการตอบสนองที่ให้อิเล็กตรอน หรือแก๊สรีดิวซ์ (Reducing gas) อย่างแก๊สแอมโมเนีย



ภาพที่ 27 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซ็นเซอร์แก๊สแบบพิมพ์อิงค์เจ็ทที่ชั้นฟิล์มเตรียมจาก (ก) PEDOT:PSS และ (ข) MWCNT-PEDOT:PSS ภายใต้บรรยากาศของแก๊สแอมโมเนีย ความเข้มข้น 1000 ppm ที่อุณหภูมิห้อง

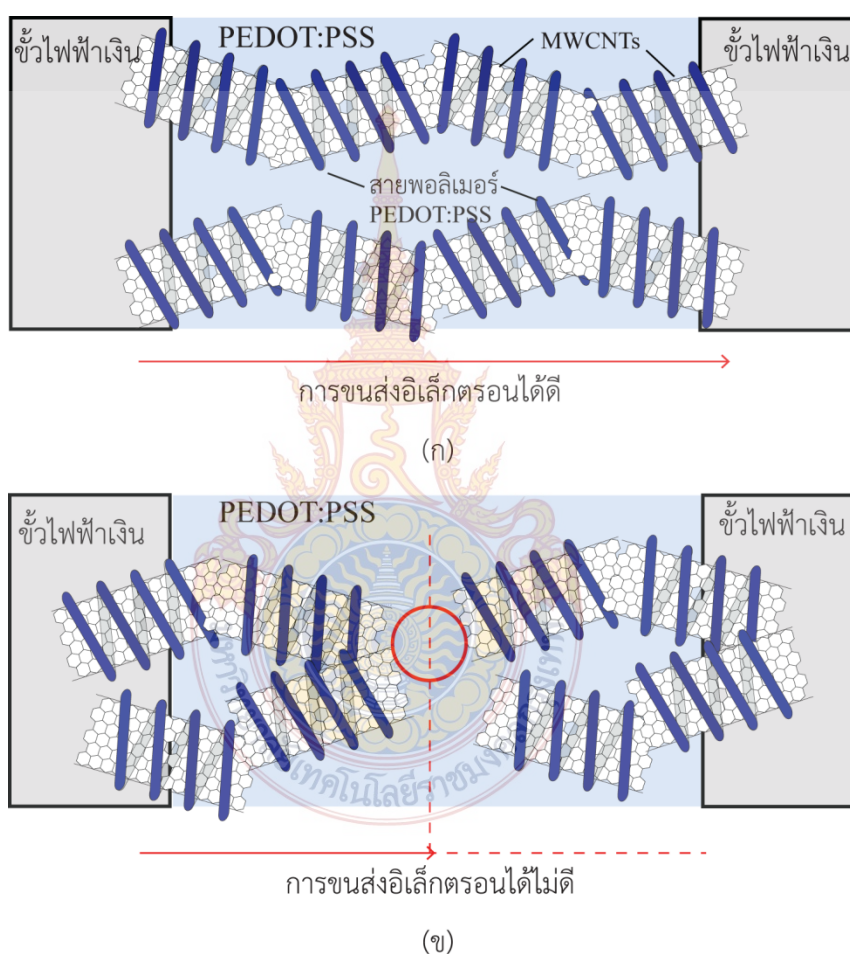
มีรายงานจากเอกสารตีพิมพ์ว่า พอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT:PSS สามารถนำไปเป็นชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊สแอมโมเนียได้ (C. Wongchoosuk และคณะ, 2012; N. Tang และคณะ, 2017; S. Li และคณะ, 2018) ภาพที่ 27 แสดงการตอบสนองของเซ็นเซอร์ที่เตรียมได้จากหมึกพิมพ์ PEDOT:PSS และ MWCNT-PEDOT:PSS เตรียมด้วยวิธีแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท ทดสอบกับแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 1000 ppm พบว่า ค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ทั้งสองเพิ่มขึ้นเมื่อมีโมเลกุลของแก๊สแอมโมเนียมาเกาะที่ผิวชั้นฟิล์ม หลังจากหาคำนวณค่าการตอบสนองต่อแก๊ส พบว่า ค่าการตอบสนองของเซ็นเซอร์แก๊สที่เตรียมชั้นฟิล์มด้วยพอลิเมอร์ PEDOT:PSS และ MWCNT-PEDOT:PSS มีค่าเท่ากับ 4.0% และ 74.0% ตามลำดับ ดังนั้น ชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS สามารถตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียได้ และประสิทธิภาพจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนในชั้นฟิล์ม



ภาพที่ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนียกับการตอบสนองของแก๊สของเซ็นเซอร์แก๊สที่อุณหภูมิห้อง เตรียมชั้นฟิล์มโดยวิธีการแบบหยด และแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท

ภาพที่ 28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนียกับการตอบสนองของแก๊สของเซ็นเซอร์แก๊สที่อุณหภูมิห้อง โดยเตรียมชั้นฟิล์มด้วยวิธีการแบบหยด และแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท พบว่า เมื่อความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนียเพิ่มขึ้น การตอบสนองต่อแก๊สของเซ็นเซอร์ทั้งสองเพิ่มขึ้นด้วย และเซ็นเซอร์แก๊สที่เตรียมชั้นฟิล์มด้วยวิธีแบบพิมพ์อิงค์เจ็ทตอบสนองต่อแก๊สได้ดีกว่าเซ็นเซอร์แก๊สที่เตรียมชั้นฟิล์มโดยวิธีการแบบหยดในทุกความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนีย ซึ่งเป็นผลจากปรากฏการณ์การเกาะกลุ่มเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous gain effect) ของชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊สที่ถูกพิมพ์ด้วยวิธีการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณีของเซ็นเซอร์ที่เตรียมชั้นฟิล์มด้วยวิธีการแบบหยด โดย

ปรากฏการณ์นี้ถูกอธิบายว่าช่วยในการเพิ่มเส้นทางการนำสัญญาณ (Conductive path-way) (Y.H. Kim และคณะ, 2018; A. Benchirouf และคณะ, 2016) สำหรับคุณสมบัติความไวในการตอบสนองแก๊ส คำนวณได้จากความชันของกราฟเส้นตรงระหว่างความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนียกับการตอบสนองของแก๊สของเซ็นเซอร์แก๊ส ซึ่งค่าความไวในการตอบสนองแก๊สแอมโมเนียของเซ็นเซอร์ที่เตรียมชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊สโดยวิธีแบบหยด และแบบพิมพ์อิงค์เจ็ทมีค่าเท่ากับ 0.002 ppm^{-1} และ 0.069 ppm^{-1} ตามลำดับ ดังนั้น เซ็นเซอร์แก๊สที่เตรียมชั้นฟิล์มด้วย MWCNT-PEDOT:PSS ด้วยวิธีการพิมพ์อิงค์เจ็ทมีคุณสมบัติความไวในการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียได้ดีกว่าเซ็นเซอร์แก๊สที่เตรียมชั้นฟิล์มด้วยวิธีการแบบหยด



ภาพที่ 29 แผนภาพแสดงเส้นทางการขนส่งอิเล็กตรอนสำหรับชั้นฟิล์ม MWCNT-PEDOT:PSS ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการ (ก) แบบพิมพ์อิงค์เจ็ท และ (ข) แบบหยด

แผนภาพแสดงเส้นทางการขนส่งอิเล็กตรอนสำหรับชั้นฟิล์ม MWCNT-PEDOT:PSS ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท และแบบหยด แสดงดังภาพที่ 29 พบว่า เนื่องจากการครอบคลุมสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันของชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊สของเซ็นเซอร์ที่เตรียมได้จากการพิมพ์

แบบอิงค์เจ็ท ทำให้เส้นทางการขนส่งอิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟ้าเงินดีกว่า เส้นทางการขนส่งอิเล็กตรอนของชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊สที่ได้จากวิธีการแบบหยดที่ชั้นฟิล์มเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็ก เนื่องจากความตึงผิวที่สูงของพอลิเมอร์ PEDOT:PSS ทำให้การขนส่งอิเล็กตรอนได้ไม่ดี เป็นผลให้สัญญาณการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียได้ไม่ดี

เวลาการตอบสนองต่อแก๊สถูกนิยามว่า คือ เวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีโมเลกุลของแก๊สมาเกาะติดที่ชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊สของเซ็นเซอร์ จากผลการทดลอง พบว่าเวลาการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียทั้งชั้นฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีการแบบหยด และแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท คือ ประมาณ 10 นาที อย่างไรก็ตาม ค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ไม่สามารถกลับมาที่เส้นฐาน แม้ว่าแหล่งกำเนิดของแก๊สทดสอบถูกปิด ซึ่งเป็นผลมาจาก โมเลกุลของแอมโมเนียแพร่เข้าไปในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ได้ช้าที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งการตอบสนองต่อแก๊สของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ PEDOT:PSS ถูกอธิบายว่าเป็นผลมาจากกระบวนการบวม (Swelling process) ของพอลิเมอร์ (U. Latif และคณะ, 2015; L. Biessmann และคณะ, 2018) จากผลการทดลองสามารถระบุกลไกการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียของเซ็นเซอร์แก๊ส โดยทำนายว่าคาร์บอนที่รวมอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ทำหน้าที่เป็นเส้นทางการขนส่งอิเล็กตรอน การทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียของเซ็นเซอร์แก๊สแบบพิมพ์อิงค์เจ็ทถูกทดสอบซ้ำทุกๆ สัปดาห์เป็นเวลา 30 วัน พบว่า ประสิทธิภาพค่อนข้างคงที่โดยลดลงเพียง 5% จากการตอบสนองตอนเริ่มต้น การสูงขึ้นของเส้นฐานความต้านทานเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่แสดงถึงประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์ ในการทดลองพบว่า เส้นฐานความต้านทานสูงขึ้นจากการทดลอง การเปิด และปิดแก๊สแอมโมเนียจำนวน 4 รอบ ซึ่งเป็นผลมาจากหลุดออกจากชั้นผิวตรวจจับแก๊สไม่หมดของโมเลกุลแก๊สแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้อง



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ หมึกพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการตรวจจับแก๊สถูกเตรียมจากวัสดุคาร์บอน ได้แก่ เส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว และท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น สำหรับเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว ถูกสังเคราะห์บนฟิล์มอินโคเนลโดยใช้แก๊สผสมของอะเซทิลีนและซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ในกระบวนการตกสะสมไอเชิงเคมีด้วยความร้อน จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางภาพ ImageJ พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเกลียวและ ระยะระยะพิทช์เฉลี่ยของเกลียว เท่ากับ 114 ± 16 นาโนเมตร และ 93 ± 23 นาโนเมตร ตามลำดับ เส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว ถูกทำให้บริสุทธิ์โดยใช้ความร้อนและกรดผสมของซัลฟิวริกและไนตริก หลังจากนั้นถูกนำไปเตรียมเป็นชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊สเพื่อทดสอบคุณสมบัติการตอบสนอง และคุณสมบัติการเลือก โดยทดสอบกับแก๊สชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า เซ็นเซอร์แก๊สเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว ตอบสนองได้ดีต่อแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 1000 ppm การก่อกวนของกลุ่มคาร์บอนซิลิโคนพื้นผิวของเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียวถูกระบุว่าเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย ในการเตรียมเซ็นเซอร์แก๊สเส้นใยนาโนคาร์บอนแบบเกลียว พบว่า ความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นของเซ็นเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ตรวจจับแก๊สแอมโมเนียอยู่ในช่วง กิโลโอห์ม ยิ่งไปกว่านั้น ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สของเซ็นเซอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ น้ำไม่มีประจุ เป็นตัวทำละลาย

หมึกพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการตรวจจับแก๊สที่เตรียมจากวัสดุท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ท่อนาโนคาร์บอนถูกสังเคราะห์บนฟิล์มบางทองคำที่ผ่านกระบวนการระดมยิงด้วยไอออนของแก๊สอาร์กอน เพื่อเปลี่ยนให้ฟิล์มบางทองคำเป็นอนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการตกสะสมไอเชิงเคมีด้วยความร้อน จากการทดลอง พบว่า อุณหภูมิการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาทองคำที่ทำให้ได้ตัวอย่างที่มีคุณภาพดีที่สุด คือ 950 องศาเซลเซียส ท่อนาโนคาร์บอนถูกทำให้บริสุทธิ์โดยใช้ความร้อนและกรดผสมของซัลฟิวริกและไนตริกและนำไปใช้เป็นวัสดุสำหรับเตรียมหมึกพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยพิมพ์ลงบนแผ่นรองรับพลาสติกที่มีขั้วไฟฟ้าเงิน ด้วยวิธีการหยดและวิธีแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท พบว่า เซ็นเซอร์แก๊สที่เตรียมได้ด้วยวิธีแบบพิมพ์อิงค์เจ็ทแสดงคุณสมบัติในการเลือกตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย ได้ดีกว่าเซ็นเซอร์แก๊สที่เตรียมด้วยวิธีการหยด และเซ็นเซอร์แก๊สที่เตรียมได้แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อทดสอบกับแก๊สรีดิวซ์ ได้แก่ แอมโมเนีย และแก๊สออกซิไดซ์ ได้แก่ ไนโตรเจนไดออกไซด์

คุณสมบัติในการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่ดีขึ้นของเซ็นเซอร์แก๊สแบบพิมพ์อิงค์เจ็ท ถูกเสนอว่าเป็นผลมาจากการเกาะเป็นเนื้อเดียวกันของชั้นฟิล์มทำให้เส้นทางการขนส่งอิเล็กตรอนดีกว่าชั้นฟิล์มที่เตรียมได้จากวิธีการหยด กลไกการตอบสนองต่อแก๊สถูกเสนอว่าเป็นผลมาจากกระบวนการบวมของพอลิเมอร์ เนื่องจากการแพร่ของโมเลกุลแอมโมเนียในสายเมทริกซ์ของพอลิเมอร์

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่แสดงถึงประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์แก๊ส ได้แก่ การตอบสนองต่อแก๊ส ความไว การเลือก ที่ได้จากเซ็นเซอร์ในงานวิจัยนี้ อาจจะไม่แสดงถึงประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยเปรียบเทียบกับผลงานจากกลุ่มวิจัยอื่นๆ ในต่างประเทศ แต่ว่าในงานวิจัยนี้ ได้เสนอวิธีการเตรียมชั้นฟิล์มตรวจจับแก๊สด้วยวิธีการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ทว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับแก๊สของเซ็นเซอร์ได้ และเมื่อนำไปประกอบกับเงื่อนไขการเตรียมอื่นๆ อาจจะมีผลทำให้สามารถยกระดับประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์แก๊สได้เพิ่มขึ้นไปอีก



เอกสารอ้างอิง

- Atthipalli, G., Epur, R., Kumta, P.N. et al. (2011, February). The effect of temperature on the growth of carbon nanotubes on copper foil using a nickel thin film as catalyst. **Thin Solid Films**, 519, (16), 5371-5375.
- Atthipalli, G., Wang, H. and Gray, J.L. (2013, March). Catalyst-assisted vertical growth of carbon nanotubes on Inconel coated commercial copper foil substrates versus sputtered copper films. **Applied Surface Science**, 273, 515-519.
- Benchirouf, A., Palaniyappan, S., Ramalindame, R., et al. (2015, December). Electrical properties of multi-walled carbon nanotubes/PEDOT:PSS nanocomposites thin films under temperature and humidity effects. **Sensors and Actuators B**, 224, 344-350.
- Biessmann, L., Kreuzer, L.P., Widmann, T., et al. (2018, February). Monitoring the swelling behavior of PEDOT:PSS electrodes under high humidity conditions. **ASC Applied Materials & Interfaces**, 10 (11), 9865-9872.
- Choi, S.-W., Kim, J. and Byun, Y.T. (2016, July). Highly sensitive and selective NO₂ detection by Pt nanoparticles-decorated single-walled carbon nanotubes and the underlying sensing mechanism. **Sensors and Actuators B**, 238, 1032-1042.
- Fine, G.F., Cavanagh, L.F., Afonja, A. and Binions, R. (2010, June). Metal oxide semiconductor gas sensors in environmental monitoring. **Sensors**, 10 (6), 5469-5502.
- Gracia-Espino, E., Rebollo-Plata, B., Martínez-Gutiérrez, H., et al. (2015, December). Temperature dependence of sensors based on silver-decorated nitrogen-doped multiwalled carbon nanotubes. **Journal of Sensors**, 2016, 4319498.
- Han, M., Jung, D. and Lee, G.S. (2014, July). Palladium-nanoparticle-coated carbon nanotube gas sensor. **Chemical Physics Letters**, 610-611, 261-266.
- Homma, Y. (2014, March). Gold nanoparticles as the catalyst of single-walled carbon nanotube synthesis. **Catalysts**, 4 (1), 38-48.

- Janudin, N., Abdullah, N., Yunus, W.M.Z.W., Yasin, F.M., Yaacob, M.H., Saidi, M.M. and Kasim, N.A.M. (2018, September). Effect of functionalized carbon nanotubes in the detection of benzene at room temperature. **Journal of Nanotechnology**. 2018, 2107898.
- Kim, D.-C., and Kim, S.-H. (2018, March). Geometry-controlled carbon coils by SF₆ flow injection time with reaction temperature, **Journal of Nanomaterials**, 2018, 7859747.
- Kim, J.S., Jang, Y.-W. and Im, I.-T. (2013, "Growth of vertical carbon nanotubes according to the Al₂O₃ buffer layer preparation. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 19 (5), 1501-1506.
- Kim, Y.H., Sachse, C., Machala, M.L., et al. (2011). Highly conductive PEDOT:PSS electrode with optimized solvent and thermal post-treatment for ITO-free organic solar cells. **Advanced Functional Materials**, 21 (6), 1076-1081.
- Lascialfari, L., Marsili, P., Caporali, S., Muniz-Miranda, M., Margheri, G., Serafini, A., Brabdi, A., Giorgetti, E. and Cicchi, S. (2014, September). Carbon nanotubes/laser ablation gold nanoparticles composites. **Thin Solid Films**, 569, 93-99.
- Latif, U. and Dickert, F.L. (2015, December). Graphene hybrid materials in gas sensing applications. **Sensors**, 15 (12), 30504-30524.
- Le, V.T., Ngo, C.L., Le, Q.T. et al. (2013, July). Surface modification and functionalization of carbon nanotube with some organic compounds. **Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology**, 4 (3), 035017.
- Lee, C.J., Park, J. and Yu, J.A. (2002, July). Catalyst effect on carbon nanotubes synthesized by thermal chemical vapor deposition. **Chemical Physics Letters**, 360 (3-4), 250-255.
- Lee, H., Shaker, G., Naishadham, K., et al. (2011, October). Carbon nanotube loaded antenna-based ammonia gas sensor. **IEEE Trans. Microw. Theory Tech**, 59, 2665-2673.

- Lee, K., Scardaci, V., Kim, H.-Y., Hallam, T., Nolan, H., Bolf, B.E., Maltbie, G.S., Abbott, J.E., Duesberg, G.S. (2013, July). Highly sensitive, transparent, and flexible gas sensors based on gold nanoparticle decorated carbon nanotubes. **Sensors and Actuators B**, 188, 571-575.
- Lee, K.S., Shin, M.J., Park, C.W. and Kim, J.-D. (2017, October). Simple and direct synthesis of ZnO decorated multi-walled carbon nanotube for supercapacitor electrodes. **Colloids and Surfaces A**, 538, 23-27.
- Lee, S.-H., Kwak, E.-H., Kim, H.-S., Lee, S.-W. and Jeong, G.-H. (2013, April). Evolution of gold thin films to nanoparticles using plasma ion bombardment and their use as a catalyst for carbon nanotube growth. **Thin Solid Films**, 547, 188-192.
- Li, S., Li, Y., Chen, S. et al. (2018, March). Improved sensitivity of inkjet-printed PEDOT:PSS ammonia sensor with “Nonideal” morphology. **IEEE Sensors Letters**, 2 (1), 2000204.
- Lin, Y., Huang, L., Chen, L. et al. (2015, April). Fully gravure-printed NO₂ gas sensor on a polyimide foil using WO₃-PEDOT:PSS nanocomposites and Ag electrodes. **Sensors and Actuators B**, 216, 176-183.
- Luo, C., Liu, L., Jiang, K., Zhang, L., Li, Q. and Fan, S. (2007, December). Growth mechanism of Y-junctions and related carbon nanotube junctions synthesized by Au-catalyzed chemical vapor deposition. **Carbon**, 46 (3), 440-444.
- Monereo, O., Claramunt, S., Martínez de Marigorta, M. et al. (2013, January). Flexible sensor based on carbon nanofibers with multifunctional sensing features. **Talanta**, vol. 107, 239-247.
- Nguyen, L.Q., Phan, P.Q., Duong, H.N., Nguyen, C.D. and Nguyen, L.H. (2018, September). Enhancement of NH₃ gas sensitivity at room temperature by carbon nanotube-based sensor coated with Co nanoparticles. **Sensors**, 13, (2), 1754-1762.
- Pakdee, U., Chiangga, S., Suwannatus, S. and Limsuwan, P. (2017, March). Growth of MWCNTs on flexible stainless steels without additional catalysts. **Journal of Nanomaterials**, 2017, 5672728.

- Pakdee, U., Phunudom, P., Nantakarat, S., Thaibunnak, A., Roipromma, P., Rungruang, S., Prajansri, P. and Chaloeipote, G. (2019, April). Room temperature gas sensor based on helical carbon coils. **Key Engineering Materials**, 798, 105-110.
- Rigoni, F., Drera, G., Pagliara, S., Goldoni, A. and Sangaletti, L. (2014, August). High sensitivity, moisture selective, ammonia gas sensors based on single-walled carbon nanotubes functionalized with indium tin oxide nanoparticles. **Carbon**, 80, 356-363.
- Seekaew, Y., Phokharatkul, D., Wisitsorat, A. and Wongchoosuk, C. (2017, January). Highly sensitive and selective room-temperature NO₂ gas sensor based on bilayer transferred chemical vapor deposited graphene, **Applied Surface Science**, 404, 357-363.
- Sharma, S., Sengupta, K. and Islam, S.S. (2012, March). Deposition of pristine and functionalized MWCNTs in alumina matrix by sol-gel technique and investigation of their ammonia sensing properties. **Nanomaterials and Nanotechnology**, 2, 4.
- Silva, R.M., Batos, A.C., Oliveira, F.J., Conte, D.E., Fan, Y., Pinna, N. and Silva, R.F. (2015, July) Catalyst-free growth of carbon nanotube arrays directly on Inconel® substrates for electrochemical carbon-based electrodes. **Journal of Materials Chemistry A**, 3(34), 17804-17810.
- Staerz, A., Berthold, C., Russ, T., Wicker, S., Weimar, U. and Barsan, N. (2016, June). The oxidizing effect of humidity on WO₃ based sensors, **Sensors and Actuators B**, 237, 54-58.
- Su, Y., Yang, Z., Wei, H., Kong, E.S.-W. and Zhang, Y. (2010, October). Synthesis of single-walled carbon nanotubes with selective diameter distributions using DC arc discharge under CO mixed atmosphere. **Applied Surface Science**, 257 (7), 3123-3127.
- Tang, N., Jiang, Y., Qu, H. et al. (2017, November). Conductive polymer nanowire gas sensor fabricated by nanoscale soft lithography. **Nanotechnology**, 28, 485301.

- Ujjain, S.K., Ahuja, P., Bhatia, R. and Attri, P. (2016, June). Printable multi-walled carbon nanotubes thin films for high performance all solid state flexible supercapacitors. **Materials Research Bulletin**, 83, 167-171.
- Wongchoosuk, C., Jangtawee, P., Lokavee, S., Udomrat, S., Sudkeaw, P. and Kerdcharoen, T. (2012). Novel flexible NH₃ gas sensor prepared by ink-jet printing technique. **Advanced Materials Research**, 506, 39-42.
- Wongchoosuk, C., Wisitsoraat, A., Phokharatkul, D. et al. (2010, August). Multi-walled carbon nanotube-doped tungsten oxide thin films for hydrogen gas sensing. **Sensors**, 10 (8), 7705-7715.
- Yamada, M., Kawana, M. and Miyake, M. (2006, February). Synthesis and diameter control of multi-walled carbon nanotubes over gold nanoparticle catalysts," **Applied Catalysis A: General**, 302 (2), 201-207.
- Yoon, S., Lee, S., Kim, S., Park, K.-W., Cho, D. and Jeong, Y. (2015, January). Carbon nanotube film anodes for flexible lithium ion batteries. **Journal of Power Sources**. 279, 495-501.
- Zeng, Q., Tian, H., Jiang, J., Xiaobo, J., Gao, D. and Wang, C. (2017, January). High-purity helical carbon nanotubes with enhanced electrochemical properties for supercapacitors. **RSC Advances**, 7(12), 7375-7381.
- Zhang, X., Wu, X., Yang, B. and Xiao, H. (2014, November). Enhancement of gas sensing characteristics of multiwalled carbon nanotubes by CF₄ plasma treatment for SF₆ decomposition component detection. **Journal of Nanomaterials**, 2015, 171545.
- Zhao, J., Wei, L., Yang, Z. and Zhang, Y. (2012, April). Continuous and low-cost synthesis of high-quality multi-walled carbon nanotubes by arc discharge in air. **Physica E**, 44, (7-8), 1639-1643.
- Zhuo, C., Wang, X., Nowak, W. and Lavendis, Y.A. (2014, June). Oxidative heat treatment of 316L stainless steel for effective catalytic growth of carbon nanotubes. **Applied Surface Science**, 313, 227-236.

ภาคผนวก

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Pakdee, U., and Thaibunnak. A. (2019, June). Growth of MWCNTs on plasma ion-bombarded thin gold films and their enhancements of ammonia-sensing properties using inkjet printing. **Journal of Nanotechnology**, 2019: 3424915.

Pakdee, U., Phunudom, P., Nantakarat, S., Thaibunnak, A., Roipromma, P., Rungruang, S., Prajansri, P. and Chaloeipote, G. (2019, April). Room temperature gas sensor based on helical carbon coils. **Key Engineering Materials**, 798: 105-110.



ประวัตินักวิจัย

ประวัติคณะผู้วิจัย (หัวหน้าโครงการวิจัย)

1. ชื่อ นายอุดมเดช ภัคดี
2. ตำแหน่งทางวิชาการ อาจารย์
3. ตำแหน่งทางการบริหาร -
4. สังกัดสาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
5. E-mail: udomdej.p@mail.rmutk.ac.th
6. โทรศัพท์มือถือ 089-7681628
7. โทรศัพท์ที่ทำงาน 022-879718 ต่อ 7075, 7090
โทรสาร -
8. ที่อยู่ในการจัดส่งเอกสาร
สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120
9. กรณีมีผู้ประสานงานสามารถติดต่อได้ที่
-
10. ประวัติการศึกษา
 - 10.1) ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ฟิสิกส์)
 - 10.2) ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)
 - 10.3) ปริญญาศึกษาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์)
11. ผลงานวิจัย / ผลงานวิชาการ
 - 11.1) Pakdee, U., Thaibunnak, A., (2019, June). Growth of MWCNTs on Plasma Ion-Bombarded Thin Gold Films and Their Enhancements of Ammonia-Sensing Properties Using Inkjet Printing. **Journal of Nanotechnology**. 2019, Article ID.3424915.
 - 11.2) Pakdee, U., Phunudom, P., Nantakarat, S., Thaibunnak, A., Roipromma, P., Rungruang, S.,...Chaloeipote, G., (2019, April). Room Temperature Gas Sensor Based on Helical Carbon Coils. **Key Engineering Materials**. 798, 105-110.

- 11.3) Suwannatus, S., Duangsawat, B., Pakdee, U., (2018, June). Lithium storage performance of copper nitride films deposited by reactive DC magnetron sputtering. **Materials Today: Proceedings**. 5, 15208-15212.
- 11.4) Pakdee, U., Duangsawat, B., (2017, November). Buffer Film Assisted Growth of Dense MWCNTs on Copper Foils for Flexible Electrochemical Applications. **Journal of Nanomaterials**. 2017. Article ID.1867414.
- 11.5) Pakdee, U., Chiangga, S., Suwannatus, S., Limsuwan, P. (2017, March). Growth of MWCNTs on Flexible Stainless Steels without Additional Catalysts. **Journal of Nanomaterials**. 2017. Article ID.5672728.

12. ความเชี่ยวชาญในสาขาวิชา

- 12.1) Nanoscience & Nanotechnology
- 12.2) Sputtering & Chemical Vapor Deposition Techniques
- 12.3) Printable Thin Film Electrode
- 12.4) Inkjet-printed Gas Sensors



ประวัติคณะผู้วิจัย (ผู้ร่วมโครงการวิจัย)

1. ชื่อ นายบุญชัย ต้วงสวัสดิ์
2. ตำแหน่งทางวิชาการ อาจารย์
3. ตำแหน่งทางการบริหาร -
4. สังกัดภาควิชา วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
5. E-mail: boonchai.d@mail.rmutk.ac.th
6. โทรศัพท์มือถือ -
7. โทรศัพท์ที่ทำงาน 022-879718 ต่อ 7014
โทรสาร -
8. ที่อยู่ในการจัดส่งเอกสาร
สาขาวิชาเคมี ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120
9. กรณีมีผู้ประสานงานสามารถติดต่อได้ที่
-
10. ประวัติการศึกษา
 - 10.1) ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
11. ผลงานวิจัย / ผลงานวิชาการ
 - 11.1) Suwannatus, S., Duangsawat, B., Pakdee, U., (2018, June). Lithium storage performance of copper nitride films deposited by reactive DC magnetron sputtering. **Materials Today: Proceedings.** 5, 15208-15212.
 - 11.2) Pakdee, U., Duangsawat, B., (2017, November). Buffer Film Assisted Growth of Dense MWCNTs on Copper Foils for Flexible Electrochemical Applications.
12. ความเชี่ยวชาญในสาขาวิชา
 - 12.1) Instruments of Chemistry
13. ประสบการณ์พิเศษ.
-

ประวัติทำงานร่วมกับหน่วยงานภายนอก

-

ประวัติคณะผู้วิจัย (ผู้ร่วมโครงการวิจัย)

1. ชื่อ นางสาวอนัญญา ไทยบุญนาค
2. ตำแหน่งทางวิชาการ อาจารย์
3. ตำแหน่งทางการบริหาร หัวหน้างานประชาสัมพันธ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
4. สังกัดภาควิชา เทคโนโลยีสื่อสารและอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
5. E-mail: ananya.t@mail.rmutk.ac.th
6. โทรศัพท์มือถือ -
7. โทรศัพท์ที่ทำงาน 022-879718 ต่อ 7343
โทรสาร -
8. ที่อยู่ในการจัดส่งเอกสาร
สาขาวิชาเทคโนโลยีการพิมพ์ ภาควิชาเทคโนโลยีสื่อสารและอุตสาหกรรม คณะ
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120
9. กรณีมีผู้ประสานงานสามารถติดต่อได้ที่
-
10. ประวัติการศึกษา
 - 10.1) ปริญญาครุศาสตรอุตสาหกรรมมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม)
 - 10.2) ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ออกแบบผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม)
11. ผลงานวิจัย / ผลงานวิชาการ
 - 11.1) Pakdee, U., Thaibunnak, A., (2019, June). Growth of MWCNTs on Plasma Ion-Bombarded Thin Gold Films and Their Enhancements of Ammonia-Sensing Properties Using Inkjet Printing. **Journal of Nanotechnology**. 2019, Article ID.3424915.
 - 11.2) Pakdee, U., Phunudom, P., Nantakarath, S., Thaibunnak, A., Roipromma, P., Rungruang, S.,...Chaloeipote, G., (2019, April). Room Temperature Gas Sensor Based on Helical Carbon Coils. **Key Engineering Materials**. 798, 105-110.

12.ความเชี่ยวชาญในสาขาวิชา

12.1) Product Design

12.2) Printing Technology

13. ประสบการณ์พิเศษ.

-

ประวัติทำงานร่วมกับหน่วยงานภายนอก

-

ประวัติคณะผู้วิจัย (ผู้ร่วมโครงการวิจัย)

1. ชื่อ นางสาวสุวรรณา รุ่งเรือง

2. ตำแหน่งทางวิชาการ อาจารย์

3. ตำแหน่งทางการบริหาร -

4. สังกัดภาควิชา เทคโนโลยีสื่อสารและอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

5. E-mail: suvanna.r@mail.rmutk.ac.th

6. โทรศัพท์มือถือ -

7. โทรศัพท์ที่ทำงาน 022-879718 ต่อ 7343

โทรศัพท์ -

8. ที่อยู่ในการจัดส่งเอกสาร

สาขาวิชาเทคโนโลยีการพิมพ์ ภาควิชาเทคโนโลยีสื่อสารและอุตสาหกรรม คณะ
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

9. กรณีมีผู้ประสานงานสามารถติดต่อได้ที่

-

10.ประวัติการศึกษา

10.1) ปริญญาเทคโนโลยีบัณฑิต (เทคโนโลยีการพิมพ์)

11.ผลงานวิจัย / ผลงานวิชาการ

11.1) Pakdee, U., Phunudom, P., Nantakarat, S., Thaibunnak, A.,
Roipromma, P., Rungruang, S.,...Chaloeipote, G., (2019, April). Room
Temperature Gas Sensor Based on Helical Carbon Coils. **Key
Engineering Materials**. 798, 105-110.

12.ความเชี่ยวชาญในสาขาวิชา

12.1) Printing Technology

13. ประสบการณ์พิเศษ.

-

ประวัติการทำงานร่วมกับหน่วยงานภายนอก

-

