

การพัฒนาแก๊สเซนเซอร์ด้วยวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์
สำหรับการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำยาล้างเล็บ

CARBON NANOTUBE/POLYMER HYBRID GAS SENSOR FOR
VOLATILE ORGANIC COMPOUND DETECTION IN NAIL POLISH REMOVER

ภิสรินธันญ์ เพชรพริ้ม
PIDSARINTUN PEJRPRIM

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

CARBON NANOTUBE/POLYMER HYBRID GAS SENSOR FOR
VOLATILE ORGANIC COMPOUND DETECTION IN NAIL POLISH
REMOVER

PIDSARINTUN PEJRPRIM

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING
IN NANOMATERIAL ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

COPYRIGHT 2018

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ภาควิชาภาวโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ

การพัฒนาแก๊สเซนเซอร์ด้วยวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนและ
พอลิเมอร์ สำหรับการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำยาล้างเล็บ
Special Project Carbon Nanotube/Polymer Hybrid Gas Sensor for Volatile
Organic Compound Detection in Nail Polish Remover

นักศึกษา

นางสาวภัสสรินฉันทน์ เพชรพริ้ม

รหัสนักศึกษา

581110029

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุนาโน

พ.ศ.

2561

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ดร. มยุรี พลเยี่ยม

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์	
ดร. มยุรี พลเยี่ยม	
ดร. สากล ระหุงษ์	
ดร. นงลักษณ์ หวงก้าแหง	

ภาควิชาภาวโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)

หัวหน้าภาควิชาภาวโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วันที่ 20 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2561

โครงการพิเศษเรื่อง	การพัฒนาก๊าซเซนเซอร์ด้วยวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์สำหรับการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำยาล้างเล็บ
นักศึกษา	นางสาวภิสรินธันัญ เพชรพริ้ม
รหัสนักศึกษา	58110029
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. มยุรี พลเยี่ยม

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ ได้พัฒนาก๊าซเซนเซอร์ด้วยวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์ เพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดไอของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างเล็บ ในขั้นแรกได้หาข้อมูลส่วนประกอบของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำยาล้างเล็บเพื่อออกแบบวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์ โดยพบว่าองค์ประกอบที่สำคัญในน้ำยาล้างเล็บ คือ อะซีโตน ท่อนาโนคาร์บอนที่นำมาศึกษาเป็นชนิดผนังหลายชั้น ผ่านกระบวนการพลาสมาด้วยออกซิเจนเป็นเวลา 90 นาที เพื่อเพิ่มหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนเพื่อให้สามารถยึดติดกับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น การศึกษาประสิทธิภาพการตรวจวัดไอของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ได้ศึกษาความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนและความหนาของฟิล์มไฮบริด โดยพอลิเมอร์ที่เลือกใช้ในการทดลองพิจารณาจากความสามารถในการละลายกับสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เป็นส่วนประกอบของน้ำยาล้างเล็บ ในการทดลองจึงเลือกใช้พอลิเมอร์ คือ พอลิเมทิลเมทาคริเลต ความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนในพอลิเมอร์ศึกษาในช่วงร้อยละ 0.75 ถึง 3.5 และพารามิเตอร์การเตรียมฟิล์มควบคุมโดยจำนวนหยด, ขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้าและสแกนเรท ด้วยกระบวนการเคลือบแบบไฟฟ้าเคมี. หลังจากนั้นนำวัสดุไฮบริดไปวิเคราะห์ การทดสอบประสิทธิภาพก๊าซเซนเซอร์ได้ทำการศึกษาความไวในการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตน และสุดท้ายนำก๊าซเซนเซอร์ที่พัฒนาได้ไปทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างเล็บจริง ความเข้มข้นท่อนาโนคาร์บอนที่ตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนที่ดีที่สุด คือ ร้อยละ 3.5 และพารามิเตอร์การเตรียมฟิล์มที่จำนวนหยด 2 หยด, ขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้า -1 ถึง 1 โวลต์และอัตราการสแกน 0.05 โวลต์ต่อวินาที สุดท้ายสามารถนำไปทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างเล็บได้จริง ซึ่งมีความไวต่อการตอบสนอง

คำสำคัญ: ท่อนาโนคาร์บอน เซนเซอร์ พอลิเมอร์ อะซีโตน น้ำยาล้างเล็บ

Special Project Title	Carbon Nanotube/Polymer Hybrid Gas Sensor for Volatile Organic Compound Detection in Nail Polish Remover
Student	Miss Pidsarintun Pejprim
Student ID	5811029
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2018
Special Project Advisor	Assistant Prof. Dr. Winadda Wongwiriyapan
Special Project Co-Advisor	Dr. Mayuree Phonyiem

Abstract

This special project aims to develop gas sensor based on carbon nanotube (CNT) and polymer hybrid materials for volatile organic compound (VOC) detection in nail polish remover. Firstly, components of volatile organic compounds in nail polish remover were investigated to design CNT and polymer hybrid materials as sensing materials. It was found that the important component in nail polish remover was acetone. CNTs used in this study were multi-walled CNTs treated by oxygen plasma for 90 min to increase the oxygen-containing functional groups and improved adhesion between CNT and polymer. Parameters to study on performance of gas sensor toward VOC vapor detection were concentration of CNT and film formation parameters. The polymers used in this study were selected by the solubility parameters of polymers and acetone. In the experiment was used polymethyl methacrylate. The concentration of CNTs in the polymer was in the range of 0.75 to 3.5 percentage and the parameters of the hybrid film was controlled by drop solution, voltage and scan rate with electrochemical assisted deposition (ECAD). Performance of gas sensor was studied in terms of sensitivity. Finally, the developed gas sensor was studied its potential to detect the VOCs in the nail polish remover products. The good result of the calculation of the Hansen solubility is polymethylmethacrylate. The hybrid materials that highly responded to acetone vapor is CNT 3.5 percentage and the ECAD parameters of the hybrid film that prepared at the number of drop 2 drops, the voltage range of -1 to 1 volt and the scan rate of 0.05 volts per second. Finally, the developed gas sensor can be used for vapor detection of volatile organic compounds in nail polish products.

Keywords: carbon nanotube, Sensor, Polymer, Acetone, Nail polish remover

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.มยุรี พลเยี่ยม ผู้ที่ได้ชี้แนะและให้แนวทางกำหนดกรอบการวิจัย พร้อมทั้งคอยให้คำแนะนำแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ และให้การช่วยเหลือสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้ทุกด้าน ข้าพเจ้าจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ ขอขอบคุณเพื่อนและพี่ร่วมงานทุกคนที่อยู่ในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังและแลปวิจัยวัสดุนาโนคาร์บอน และขอขอบพระคุณมารดาและพี่สาวที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้และเป็นกำลังใจ คอยให้ความสนับสนุนตลอด

ภิสรินธันณ์ เพชรพริ้ม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes, CNTs).....	4
2.1.1 ชนิดของท่อนาโนคาร์บอน.....	4
2.1.2 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน.....	5
2.2 พอลิเมอร์ (Polymer).....	5
2.2.1 ชนิดของพอลิเมอร์.....	5
2.2.2 โครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์.....	6
2.2.3 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ใช้ในก๊าซเซนเซอร์.....	7
2.3 สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs).....	9
2.3.1 ความหมายของสารอินทรีย์ระเหยง่าย.....	9
2.3.2 ชนิดและสมบัติของสารอินทรีย์ระเหยง่าย.....	9
2.3.3 ผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม.....	10
2.3.4 ผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภค.....	10
2.4 ก๊าซเซนเซอร์ (Gas sensor).....	12
2.4.1 หลักการทำงานพื้นฐาน.....	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 สมบัติพื้นฐาน	12
2.4.3 ก๊าซเซนเซอร์วัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย.....	13
2.4.4 ก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์	13
2.4.5 ค่าความสามารถในการละลายแบบเฮนเซน (Hansen Solubility Parameter, HSP).....	13
2.5 เทคนิคและเครื่องมือการวิเคราะห์.....	14
2.5.1 เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope)	14
2.5.2 เทคนิครามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy)	15
2.5.3 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared spectroscopy, FTIR).....	16
2.5.4 เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโคปี (Fluorescence spectroscopy)	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	17
3.1 การเปรียบเทียบค่าความสามารถในการละลายแบบเฮนเซนระหว่าง ไอระเหยอะซีโตนกับพอลิเมอร์แต่ละชนิด	18
3.2 การเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์.....	19
3.2.1 การปรับสภาพผิวผนังท่อนาโนคาร์บอน.....	19
3.2.2 การเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอน	19
3.2.3 การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์.....	19
3.3 การเตรียมก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ	19
3.4 การทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายในห้องปฏิบัติการ	22
3.4.1 วิธีดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพในห้องปฏิบัติการ.....	22
3.4.2 วิธีคำนวณหาความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย	23
3.5 การทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายกับผลิตภัณฑ์.....	24
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	25
4.1 ผลของความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์	25
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี	25
4.1.2 ผลการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตน.....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลของพารามิเตอร์ของ ECAD	29
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ของจำนวนการหยุด	29
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ของขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้า	31
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ของอัตราแอสกนเรท	33
4.3 ผลของการศึกษาประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย	34
4.4 ผลของการศึกษาประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายกับ ผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างเล็บ	37
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	40
5.1 สรุปผลการวิจัย	40
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	41
บรรณานุกรม.....	42
ประวัติผู้เขียน.....	44

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย	3
3.1 ค่าความสามารถในการละลายแบบเฮนเซนระหว่างอะซีโตนกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	18
3.2 เงื่อนไขของการปรับสภาพผิวด้วยกระบวนการพลาสมาด้วยก๊าซออกซิเจน	19
3.3 เงื่อนไขของความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์	20
3.4 เงื่อนไขจำนวนการหยด	21
3.5 เงื่อนไขขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้า.....	21
3.6 เงื่อนไขค่าสแกนเรท	21
4.1 เวลาการตอบสนองและเวลาการคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์.....	28
4.2 ค่าความสามารถในการละลายแบบเฮนเซนระหว่างส่วนประกอบอื่นกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต	38
5.1 เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสร้างก๊าซเซนเซอร์ด้วยวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์.....	40

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว.....	4
2.2 แสดงลักษณะโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น	5
2.3 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลเมทาคริเลต	7
2.4 โครงสร้างทางเคมีของพอลิอะคริโลไนไตรล์	8
2.5 โครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	8
2.6 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	14
2.7 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	15
2.8 แสดงการเกิดการกระเจิงแสงของเทคนิคทางรามาน	15
2.9 แสดงลักษณะการทำงานของเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยแสงช่วงอินฟราเรด.....	16
2.10 แสดงการเปล่งแสงจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของเทคนิคการวัดการเรืองแสงของสาร ช่วงฟลูออเรสเซนซ์.....	16
3.1 แผนภาพแสดงภาพรวมของวิธีการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด.....	17
3.2 แผนภาพแสดงการเตรียมวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการเคลือบ แบบเคมีไฟฟ้า.....	22
3.4 แผนภาพแสดงระบบการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายในห้องปฏิบัติการ	23
4.1 แสดงรามานสเปกตรัมของเงื่อนไขความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอน.....	25
4.2 แสดงค่า I_G/I_{PMMA} ของผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี.....	26
4.3 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนของก๊าซเซนเซอร์จากเงื่อนไขความเข้มข้นของ ท่อนาโนคาร์บอน	27
4.4 แสดงผลแนวโน้มการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนกับเงื่อนไขความเข้มข้นของ ท่อนาโนคาร์บอน	27
4.5 แสดงภาพ SEM ของพารามิเตอร์จำนวนการหยด a) D ₁ b) D ₂ c) D ₃ d) D ₄ และ e) D ₅	29
4.6 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนกับพารามิเตอร์จำนวนการหยด	30
4.7 แสดงผลแนวโน้มการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนกับพารามิเตอร์จำนวนการหยด	31
4.8 แสดงภาพ SEM ของพารามิเตอร์ขอบเขตศักย์ไฟฟ้า a) V ₃ S _{0.1} และ b) V ₁ S _{0.1}	32
4.9 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนกับพารามิเตอร์ขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้า	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.10 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนกับพารามิเตอร์อัตราสแกนเรท	33
4.11 แสดงลักษณะการจัดเรียงของท่อนาโนคาร์บอนของพารามิเตอร์อัตราสแกนเรท	33
4.12 แสดงผลพันธะของฟิล์มไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ก่อนและหลังวัดไอระเหยอะซีโตน จากเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี	34
4.13 แสดงผลการบวมตัวของพอลิเมอร์ก่อนและหลังวัดไอระเหยอะซีโตนจากเทคนิค ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโคปี.....	35
4.14 แสดงผลแนวโน้มการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนที่ความเข้มข้นของไอระเหยอะซีโตน แตกต่างกัน.....	36
4.15 แสดงกลไกการบวมตัวของพอลิเมอร์.....	36
4.16 แสดงกลไกการ change transfer ระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับโมเลกุลไอที่พื้นผิวของ ท่อนาโนคาร์บอน	37
4.17 แสดงผลการตอบสนองต่อไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายในผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างเล็บ	37
4.18 แสดงลักษณะของผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างเล็บ a) nail 1 และ b) nail 2.....	39

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compound, VOC) เป็นสารระเหยง่ายได้ที่อุณหภูมิห้องและความดันปกติ โดยจะพบแหล่งของสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในบ้านมากกว่าภายนอกบ้าน 3 ถึง 5 เท่า เช่น น้ำยาล้างเล็บ สีทาบ้าน น้ำยาเคลือบไม้ น้ำยาทำความสะอาด แหล่งเก็บเชื้อเพลิงต่างๆ เป็นต้น แหล่งที่พบและอยู่ใกล้มากที่สุดในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะผู้หญิง คือน้ำยาล้างเล็บ ซึ่งมีส่วนประกอบหลักสำคัญ คือ สารละลายอะซิโตน ปริมาณร้อยละ 80 โดยสารละลายอะซิโตน เป็นสารไร้สีและระเหยง่ายเป็นพิเศษ จึงมีกลิ่นฉุนและไวต่อไฟมาก และถึงแม้ว่าสารละลายอะซิโตนนั้น จะมีความเป็นพิษต่ำ แต่ถ้าได้รับปริมาณมากและเวลานาน จะเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ได้ โดยเฉพาะระบบทางเดินหายใจ จึงจำเป็นต้องทำอุปกรณ์ที่สามารถตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำยาล้างเล็บ

เทคนิคการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย มี 3 เทคนิค ดังนี้ เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทสโกปี เทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง และเทคนิคก๊าซเซนเซอร์ โดยความแม่นยำและความไวในการตรวจวัดของเทคนิคก๊าซเซนเซอร์ จะสูงไม่เท่ากับ 2 เทคนิคแรก แต่มีราคาถูกกว่าและสามารถพกพาสะดวก จึงสนใจที่จะเลือกและนำไปพัฒนาต่อ

นิยามของก๊าซเซนเซอร์ คือ อุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูลการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นเชิงกายภาพหรือเคมี จะให้ผลออกมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย ตัวรับรู้และตัวแปลงสัญญาณ ในพารามิเตอร์ที่สำคัญของก๊าซเซนเซอร์ คือ sensitivity ความไวในการตรวจวัดและ selectivity ความจำเพาะในการตรวจวัด โดยชนิดของก๊าซเซนเซอร์มี 3 ชนิด คือ ชนิดสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ [1] จะมีการตอบสนองสูง แต่ทำงานที่อุณหภูมิสูงเช่นกัน ชนิดพอลิเมอร์นำไฟฟ้า [6,7] จะมีความจำเพาะดีที่สุดในที่นี้ แต่ไม่ค่อยมีความไวในการตรวจวัดและตอบสนองความชื้น และชนิดท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotube, CNTs) [2] ตอบสนองได้ดีที่อุณหภูมิห้องด้วยคุณสมบัติพิเศษของวัสดุท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอน คืออะตอมคาร์บอนเรียงต่อกันเป็นลักษณะแผ่นกราฟีนม้วนกันคล้ายท่อที่ระดับนาโนเมตร ทำให้มีคุณสมบัติ ดังนี้ พื้นที่ผิวสูง มีความยืดหยุ่นมาก นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี

เป็นได้ทั้งโลหะและสารกึ่งตัวนำ และง่ายต่อการเพิ่มหมู่ฟังก์ชัน [5] ซึ่งจากการศึกษางานวิจัย ก๊าซเซนเซอร์ที่ทำจากวัสดุท่อนาโนคาร์บอน [3] พบว่าจะตรวจวัดก๊าซอย่างไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกไซด์ และเอทานอล เป็นต้น ไม่ค่อยมีการตรวจวัดไอของสารอินทรีย์ระเหยง่าย และมีปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมท่อนาโนคาร์บอนลงบนขั้ว ความไวในการตรวจวัดและความจำเพาะในการตรวจวัด จึงสนใจที่จะพัฒนาก๊าซเซนเซอร์ด้วยวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ [6,7] เพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดไอของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

โครงการพิเศษนี้ ได้พัฒนาก๊าซเซนเซอร์ด้วยวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์ เพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดไอของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างเล็บ ในขั้นแรกได้ศึกษาส่วนประกอบของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำยาล้างเล็บเพื่อออกแบบวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์ การศึกษาประสิทธิภาพการตรวจวัดไอของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอน และพารามิเตอร์การเตรียมก๊าซเซนเซอร์ การทดสอบประสิทธิภาพ ก๊าซเซนเซอร์ได้ทำการศึกษาความไวในการตอบสนองต่อชนิดของไอของสารอินทรีย์ระเหยง่าย และสุดท้ายนำก๊าซเซนเซอร์ที่พัฒนาได้ไปทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ในผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างเล็บจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการสร้างก๊าซเซนเซอร์จากวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์ สำหรับการตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอน และพารามิเตอร์ของการเตรียมฟิล์มไฮบริดต่อประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน

1.2.3 เพื่อศึกษาผลประสิทธิภาพของก๊าซเซนเซอร์จากวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์ สำหรับการตรวจวัดไอระเหยอะซีโตนในผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างเล็บ

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1.3.1 ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนแตกต่างกัน จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน

1.3.2 พารามิเตอร์ของกระบวนการเคลือบแบบไฟฟ้าเคมี (electrochemical assisted deposition, ECAD) ได้แก่ จำนวนการหยด ขอบเขตศักย์ไฟฟ้าและอัตราสแกนเรทแตกต่างกัน จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน

1.4 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 การปรับสภาพผิวผนังท่อนาโนคาร์บอนโดยกระบวนการพลาสมาด้วยก๊าซออกซิเจน 90 นาที และเตรียมก๊าซเซนเซอร์จากความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอน และพารามิเตอร์การเตรียมฟิล์มไฮบริด

1.4.2 การทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยอะซีโตนของก๊าซเซนเซอร์จากวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์

1.4.3 การทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอระเหยอะซีโตนในผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างเล็บของก๊าซเซนเซอร์จากวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 เตรียมก๊าซเซนเซอร์จากวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์ตามเงื่อนไขที่กำหนด

1.5.3 วิเคราะห์สมบัติของวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์

1.5.4 ทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดของก๊าซเซนเซอร์

1.5.5 สรุปผลงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 แสดงระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัย	ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย			
	เดือนส.ค. - ต.ค. พ.ศ. 2561	เดือนพ.ย. - ธ.ค. พ.ศ. 2561	เดือนม.ค. - ก.พ. พ.ศ. 2562	เดือนมี.ค. - พ.ค. พ.ศ. 2562
1.5.1	✓	✓		
1.5.2		✓	✓	
1.5.3			✓	
1.5.4			✓	✓
1.5.5				✓

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes, CNTs)

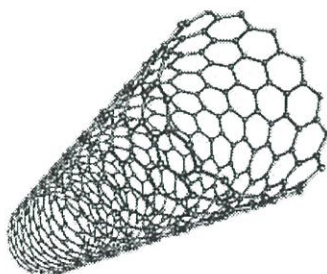
คาร์บอน เป็นธาตุหมู่สี่ของตารางธาตุ และองค์ประกอบพื้นฐานในสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิต บางส่วน เกิดพันธะได้หลากหลายรูปแบบอย่าง พันธะเดี่ยว พันธะคู่ พันธะสาม โดยมี 4 โคออดิเนชัน (Coordination) หรือวงอิเล็กตรอนนอก (Valence Electron) 4 ตัว ทำให้ได้โครงสร้างของคาร์บอน หลายแบบ เช่น คาร์บอนรูปอสัณฐาน (Amorphous Carbon) หรือท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอน เป็นวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างแบบหนึ่งมิติ มีลักษณะโครงสร้างคล้ายแผ่น โครงสร้างตาข่ายของแผ่นกราฟีน (Graphene sheet) โค้งงอแล้วม้วนตัวเป็นรูปทรงกระบอกคล้าย ท่อ (Cylindrical shape) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent) ที่เปลี่ยนแปลงจากการ ไฮบริดออร์บิทัล (Hybrid Orbital) แบบ sp^2 ค้นพบโดยศาสตราจารย์ ซุมิโอะ อิจิม่า (Dr.Sumio Iijima) นักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น

2.1.1 ชนิดของท่อนาโนคาร์บอน

1. ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว (Single walled Carbon Nanotubes, SWCNTs)

เกิดจากแผ่นกราฟีนแผ่นเดียวโค้งงอแล้วม้วนตัวเป็นรูปทรงกระบอกคล้ายท่อ จึงทำให้มีผนัง เพียงชั้นเดียว ลักษณะการม้วนโครงสร้างของผนังชั้นเดียวแบ่งเป็น 3 รูปแบบ คือ อาร์มแชร์ (Armchair) หรือการม้วนแบบแนวนอน ซิกแซก (Zigzag) หรือการม้วนแบบแนวตั้ง และไครัล (Chiral) หรือการม้วนแบบแนวเอียง



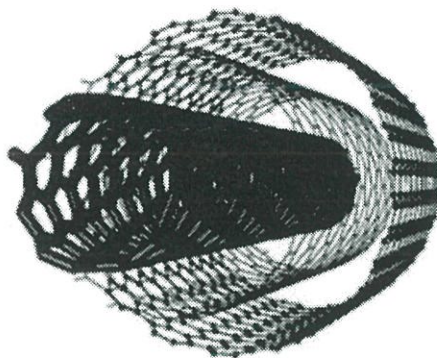
ภาพที่ 2.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว

(<https://www.indiamart.com/proddetail/swcnt-ultra-pure-10766309488.html> [8])

2. ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น

walled Carbon Nanotubes, MWCNTs)

เกิดจากแผ่นกราฟีนหลายแผ่น (มากกว่า 2 แผ่นขึ้นไป) โค้งงอแล้วม้วนตัวเป็นรูปทรงกระบอกคล้ายท่อและซ้อนทับกัน จึงทำให้มีผนังหลายชั้น โดยระยะห่างระหว่างชั้นแต่ละชั้นประมาณ 0.34 นาโนเมตร



ภาพที่ 2.2 แสดงลักษณะโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น

(<https://www.ec21.com/offer-detail/Sell-carbon-nanotubes-MWCNT-SWCNT-13060630.html> [9])

2.1.2 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

มีน้ำหนักเบา พื้นที่ผิวมาก นำไฟฟ้าดีกว่าทองแดง ทำให้นำไปใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าหรือสารกึ่งตัวนำ ค่าโมดูลัสของยังและค่าความทนทานต่อการดึงมากกว่าเหล็ก นำความร้อนได้ดี ไม่ละลายในน้ำหรือตัวทำละลายอินทรีย์ และมีความสามารถในการจับ หรือเติม หรือสร้างพันธะกับอะตอม หรือโมเลกุลตัวอื่นได้

2.2 พอลิเมอร์ (Polymer)

สารประกอบโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่และมีมวลโมเลกุลมาก เกิดจากมอนอเมอร์ (monomer) ซึ่งเป็นโมเลกุลเดี่ยวอาจเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันจำนวนหลายพันหลายหมื่นโมเลกุลมายึดต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์

2.2.1 ชนิดของพอลิเมอร์

1. แหล่งกำเนิดของพอลิเมอร์ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ พอลิเมอร์ธรรมชาติ มีทั้งที่เป็นสารอินทรีย์ (แป้ง ไกลโคเจน เซลลูโลส) และเป็นสารอนินทรีย์ (แร่ซิลิเกตและทรายซิลิกา) และพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พลาสติก ยางสังเคราะห์ และเส้นใยสังเคราะห์ เป็นต้น

2. ชนิดของมอนอเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุล แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ โฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดเดียวกัน เช่น พอลิเอทิลีน เป็น

พอลิเมอร์ที่มีมอนอเมอร์คือเอทิลีนเหมือนกันหมด และโคพอลิเมอร์ (copolymer) คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยเล็ก ๆ ของมอนอเมอร์ต่างชนิดกัน

3. สมบัติของพอลิเมอร์และการใช้งาน แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

เส้นใย เช่น ฝ้าย ขนสัตว์ ไหม และเส้นใยสังเคราะห์ มีลักษณะเป็นเส้นเล็กยาว มีความแข็งแรง และทนต่อแรงดึงตามความยาวของเส้น

สารยืดหยุ่น เช่น ภูมียาง และยางรถยนต์ชนิดต่าง ๆ เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนรูปร่างได้ เมื่อยืดแล้วปล่อยก็จะกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ เนื่องจากแรงยึดระหว่างโมเลกุลไม่แข็งแรง เมื่อยืดโมเลกุลจะเรียงตัวเป็นระเบียบ แต่เมื่อปล่อยจากการยืดจะกลับสู่สภาพเดิมที่เป็นก้อนขด ไม่เป็นระเบียบ

พลาสติก เช่น เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้นใช้แทนวัสดุธรรมชาติ บางชนิดเมื่อเย็นก็แข็งตัว เมื่อถูกความร้อนก็อ่อนตัว บางชนิดแข็งตัวถาวรมีหลายชนิด เช่น ไนลอน ยางเทียม ใช้ทำสิ่งต่าง ๆ เช่น เสื้อผ้า ฟิล์ม ภาชนะ ส่วนประกอบเรือ หรือ รถยนต์

2.2.2 โครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์

สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์จะมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างซึ่งแบ่งเป็น 3 แบบ ดังนี้

1. โครงสร้างแบบสายยาวหรือโซ่ตรง เกิดจากมอนอเมอร์ที่มาสร้างพันธะเรียงต่อกันเป็นเส้นตรง มีสมบัติเหนียว แข็งแรง สามารถยืดตัวและโค้งงอได้ เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวและจะแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้โดยที่สมบัติของพอลิเมอร์ไม่เปลี่ยนแปลง

2. โครงสร้างแบบสาขาหรือแขนง เกิดจากมอนอเมอร์ที่มายึดกันและแตกกิ่งก้านสาขาออกจากโซ่พอลิเมอร์หลัก สมบัติของโครงสร้างนี้มีลักษณะคล้ายโครงสร้างแบบยาว แต่จะมีความหนาแน่นน้อยและโค้งงอได้ดีกว่า เนื่องจากมีกิ่งก้านสาขาขวางกั้นอยู่ระหว่างโมเลกุลของสายพอลิเมอร์ ซึ่งสมบัติพิเศษของพอลิเมอร์นั้น ได้แก่

1. ทนต่อสารเคมี

สำหรับพลาสติกที่สามารถทนทานต่อสารเคมีเหล่านี้ได้ แม้ว่าตัวทำละลายอาจละลายพลาสติกบางชนิดได้ง่าย แต่พลาสติกส่วนใหญ่ก็ยังคงมีความทนทานต่อสารเคมีและมีความปลอดภัย

2. ทนทานต่อแรงกระแทก

พลาสติกบางชนิดมีความทนทานต่อแรงกระแทก การใช้งานที่สมบุกสมบัน ซึ่งถูกนำมาใช้ผลิตกระเป๋าดูหนัง กันชนรถยนต์ เป็นต้น

3. มีความเหนียวและยืดหยุ่น

พอลิเมอร์บางชนิดสามารถทำให้ร้อนและเปลี่ยนรูปได้ครั้งแล้วครั้งเล่า ซึ่งสมบัตินี้ทำให้ง่ายต่อกระบวนการผลิตและสะดวกต่อการรีไซเคิล สามารถนำไปทำเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารด้วยการฉีดขึ้นรูปได้ นอกจากนี้ด้วยสมบัติความยืดหยุ่น เช่น ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ก็สามารถนำไปผลิตเป็นยางรถยนต์ ตลอดจนผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่ต้องการสมบัติความยืดหยุ่นได้

4. เป็นทั้งฉนวนความร้อนและฉนวนไฟฟ้า

พอลิเมอร์เป็นทั้งฉนวนความร้อนและฉนวนไฟฟ้า และด้วยสมบัตินี้เราจึงเห็นอุปกรณ์จำพวกสายไฟ ปลั๊กไฟฟ้า ผลิตหรือถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุพอลิเมอร์ ส่วนสมบัติเป็นฉนวนความร้อนจะเห็นได้ชัดเจนจากหม้อหุงหรือด้ามกระทะ ที่ทำจากพอลิเมอร์ ซึ่งช่วยให้เราสามารถทำอาหารได้อย่างสะดวกขึ้น แม้แต่ตู้เย็นหรือกระติกน้ำก็มีพอลิเมอร์เป็นองค์ประกอบด้วยเช่นกัน

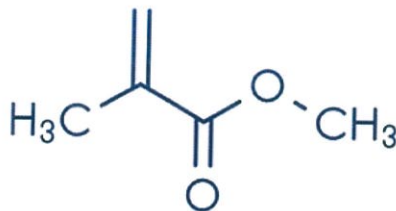
5. มีน้ำหนักเบา

พอลิเมอร์มีน้ำหนักเบา ซึ่งระดับความแข็งแรงและน้ำหนักของพอลิเมอร์นั้นจะแปรผันตามกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างหลากหลาย

2.2.3 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ใช้ในก๊าซเซนเซอร์

1. พอลิเมทิลเมทาคริเลต Polymethylmethacrylate (PMMA)

ความหนาแน่น 1.18 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว 160 องศาเซลเซียส และจุดเดือด 200 องศาเซลเซียส[10]



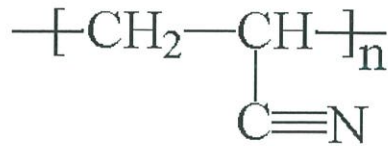
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลเมทาคริเลต

([https://en.wikipedia.org/wiki/Poly\(methyl_methacrylate\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Poly(methyl_methacrylate))) [11])

หรือที่เรียกว่า อะคริลิกแก้ว มักใช้ในรูปแบบแผ่นเป็นทางเลือกที่มีน้ำหนักเบา สามารถใช้เป็นเรซินหล่อในหมึกพิมพ์และสารเคลือบ มีความโปร่งใส แข็งแรง ทนทานต่อรังสียูวี แรงกระแทก รอยขีดข่วน ดัดงอ สารเคมีและความร้อน และมีคุณสมบัติอื่นอีกมากมาย มีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์เช่น Anisole ฟีนอล เป็นต้น

2. พอลิอะคริโลไนไตรล์ Polyacrylonitrile (PAN)

ความหนาแน่น 1.184 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว 300 องศาเซลเซียส และจุดเดือด ไม่สามารถบอกค่า[12]



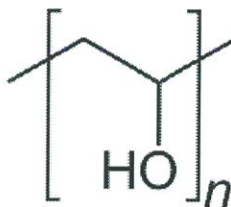
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของพอลิอะคริโลไนไตรล์

(<https://pslc.ws/macrog/pan.htm> [13])

อะคริโลไนไตรล์โดยมากจะใช้เป็นมอนอเมอร์สำหรับการผลิตพอลิเมอร์ประเภทพอลิอะคริโลไนไตรล์ การทำเส้นใยอะคริลิกหรือใยสังเคราะห์ เพื่อใช้เป็นส่วนหนึ่งของการผลิตเสื้อผ้า และใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเม็ดพลาสติกพอลิเมทิลเมตะคริเลต และใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเม็ดพลาสติกพอลิเมทิลเมตะคริเลต

3. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ Polyvinyl alcohol (PVA)

ความหนาแน่น 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว 200 องศาเซลเซียส และจุดเดือด 228 องศาเซลเซียส[14]



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

(https://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_alcohol [14])

เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่สามารถละลายน้ำได้ ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ทนต่อตัวทำละลายอินทรีย์ได้ดี มีสมบัติการเกิดฟิล์มและการยึดติด (adhesion) ได้ดี มีความยืดหยุ่น ทนต่อแรงดึงดี และมีความต้านทานต่อการซึมผ่านของออกซิเจนที่ดี (Schellekens and Bastiaansen, 1991) จึงนิยมนำมาผลิตเป็นแผ่นฟิล์มหรือกาว ซึ่งสามารถเกิดผลึกได้และมีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลสูง ทำให้ฟิล์มหรือกาวจะมีลักษณะค่อนข้างแข็งเปราะ เมื่อแห้งสนิท นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของน้ำและความชื้นต่ำเนื่องจากโมเลกุลที่มีขั้ว ทำให้นำไปใช้งานในรูปของฟิล์มหรือกาวในสถานะที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง อาจทำให้เกิดปัญหาการบวมพองและหลุดล่อนได้

2.3 สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs)

2.3.1 ความหมายของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

สำนักงานนโยบายสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข นิยามว่า หมายถึงสารประกอบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และมีไฮโดรเจน ออกซิเจน ฟลูออไรด์ คลอไรด์ โบรไมด์ ซัลเฟอร์ หรือไนโตรเจน ประกอบกัน เป็นพวกอะลิฟาติก (Aliphatic) หรืออะโรมาติก (Aromatic) รวมถึงกลุ่มคาร์บอนิล (อัลดีไฮด์ คีโตน) และกลุ่มแอลกอฮอล์ ที่สามารถระเหยกลายเป็นไอ หรือก๊าซได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง มีความดันไอมากกว่า 0.14 มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นตัวทำละลายที่ดี โดยทั่วไปจะเป็น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอน 2 ถึง 12 อะตอม [15]

2.3.2 ชนิดและสมบัติของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข จำแนกสารอินทรีย์ระเหยง่ายตามลักษณะการใช้งาน (www.fda.moph.go.th/fda-net/html/product/addict/narcotic2/Inhalant) คือ

1) สารระเหย (volatile substances) เป็นสารประกอบอินทรีย์เคมีที่ได้มาจากน้ำมันปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติ ระเหยได้ง่ายแม้ในอุณหภูมิห้อง นิยมใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมที่มีคุณสมบัติแห้งระเหยได้เร็ว

2) ตัวทำละลาย (solvents) เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม (เป็นสารละลายและสกัดสาร) และผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในครัวเรือน เช่น โทลูอีน ในกาต้มน้ำเด็กเล่น, ทินเนอร์ แล็กเกอร์ และอะซีโตน ในรูปน้ำยาล้างเล็บ เป็นต้น

3) ละอองลอย (aerosols) จัดบรรจุในภาชนะที่ใช้สำหรับฉีด มีส่วนผสมของไฮโดรคาร์บอนหรือฮาโลคาร์บอน พบมากในรูปของสเปรย์ฉีดผม สีกะปोंงสำหรับพ่น สีเคลือบภาชนะในครัว ผลิตภัณฑ์กำจัดแมลง เป็นต้น

สำนักงานนโยบายสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข [15] จำแนกสารอินทรีย์ระเหยง่ายเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

ตามลักษณะของโมเลกุล

1. Non-chlorinated VOCs หรือ Non-halogenated Hydrocarbons กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ไม่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล มาจากการเผาไหม้ของกองขยะ พลาสติก วัสดุอื่นๆ สารตัวทำละลาย สีทาวัสดุ เป็นต้น มีผลเสียต่อสุขภาพของผู้ที่ได้รับปริมาณมากและเป็นเวลานาน มักจะเป็นโรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจ ได้แก่

1.1 Aliphatic Hydrocarbons เช่น Fuel Oils, Gasoline, Hexane, Industrial solvents

1.2 กลุ่มสารในอุตสาหกรรม เช่น Alcohols, Aldehydes, Ketones

1.3 Aromatic Hydrocarbons เช่น กลุ่มสารตัวทำละลายอย่าง Toluene, Benzene, Ethylbenzene, Xylenes, Styrene, Phenol

2. Chlorinated VOCs หรือ Halogenated Hydrocarbons กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีธาตุคลอรีนประกอบอยู่ด้วย มีความเป็นพิษและเสถียรตัวทางสิ่งแวดล้อมมากกว่ากลุ่มแรก ยากต่อการสลายตัวทางธรรมชาติ ชีวภาพ กายภาพ หรือเคมีทั่วไป ความคงตัวและสะสมนาน กระตุ้นหรือก่อให้เกิดมะเร็งได้

ตามลักษณะของโครงสร้าง

1. Aliphatic Hydrocarbons คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนเรียงต่อกันเป็นสายโซ่ทั้งตรงหรือกิ่งปลายเปิด เช่น Hexane

2. Aromatic Hydrocarbons สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีวงเบนซินตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป จัดเรียงกันเป็นเส้นตรง หรือมุม หรือกลุ่ม องค์ประกอบมีเพียงไฮโดรเจนและคาร์บอน ส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำ เช่น Benzene, Toluene, Xylene

3. Oxygenated คือ สารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น Acetone, Ketones

2.3.3 ผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

ผลกระทบต่อสุขภาพ

ระบบภูมิคุ้มกันอาจถูกรบกวนหรือทำลายได้ ทำให้มีภูมิคุ้มกันทางร่างกายระดับต่ำกว่าปกติ ระบบประสาท ถูกกดประสาท ทำให้เกิดอาการง่วงนอน วิงเวียน ปวดศีรษะ ซึมเศร้า หรือหมดสติ ระบบสืบพันธุ์ ทำให้เป็นหมัน หรือเด็กเกิดการกลายเพศ ระบบพันธุกรรม ทำลายโครโมโซมของเซลล์ ระบบอวัยวะต่างๆ อาจส่งผลกระทบต่อระบบร่างกายอื่นๆอีก และอาจก่อให้เกิดมะเร็งได้

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ก่อให้เกิด Photochemical smog กลุ่มหมอกควันจากสารเคมี ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศ ทำให้โอโซนดีในชั้นบรรยากาศสูงเบาบางลงและเพิ่มโอโซนแย้เข้าใกล้โลกมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิโลกสูงขึ้น สิ่งก่อสร้างชำรุดและผลผลิตทางการเกษตรตกต่ำ

การปนเปื้อนในดินและน้ำ ส่งผลให้จำนวนจุลินทรีย์ในดินกับสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในดินและน้ำ ลดลง คุณภาพของดินและน้ำเสื่อมลง และความสมบูรณ์ของระบบนิเวศลดลง[15]

2.3.4 ผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภค

สินค้าอุปโภคบริโภค (Consumer Goods)คือ สินค้าหรือบริการที่ผู้บริโภคซื้อตามความต้องการในการบริโภค แบ่งเป็น 4 ประเภท

1. สินค้าสะดวกซื้อ (Convenience Goods) เป็นสินค้านำราคาถูก ไม่คงทน ซื้อในปริมาณน้อย แต่บ่อยครั้ง เคยใช้ประจำ ไม่เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล เทศกาล ระยะเวลาและความนิยม ไม่กำหนดเจาะจงในการเลือกซื้อตราสินค้าตราเดิม

2. สินค้าซื้อประจำ (Staple Goods) เป็นสินค้าประเภทของกินของใช้ในชีวิตประจำวัน ต้องซื้อบ่อยครั้งแต่ปริมาณไม่มาก มีกำหนดเจาะจงในการเลือกซื้อตราสินค้าตราเดิม เลือกสถานที่ซื้อที่ใกล้ตัว และไม่คำนึงถึงราคาซื้อ

3. สินค้าซื้อโดยสิ่งกระตุ้น (Impulse Goods) เป็นสินค้าที่ไม่ได้วางแผนหรือตั้งใจเลือกซื้อ ตั้งแต่แรก เลือกซื้อเพราะสะดุดตา หรือตั้งป้ายลดราคา หรือความต้องการอื่น

4. สินค้าซื้อกรณีฉุกเฉิน เป็นสินค้าที่ปกติไม่ได้ใช้ประโยชน์ แต่เมื่อเกิดเหตุจำเป็นต้องใช้สินค้านั้นๆ เช่น เครื่องมือปฐมพยาบาล น้ำมัน อุปกรณ์เกี่ยวกับรถยนต์ เป็นต้น ขึ้นอยู่กับความเร็วในการได้มาซึ่งสินค้า โดยไม่คำนึงถึงราคาและคุณภาพ

น้ำยาล้างเล็บ เป็นสินค้าอุปโภคบริโภคชนิดหนึ่งที่มีส่วนประกอบสำคัญที่เป็นสารอินทรีย์ระเหยง่าย คือ อะซีโตน (Acetone) เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ ไม่มีสี ความเป็นพิษต่ำ ระเหยง่าย นำมาใช้ในอุตสาหกรรมและเภสัชกรรม ถ้ามีความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 80 จะมีฤทธิ์การฆ่าเชื้อ (Antiseptic) สามารถใช้เป็นยาเสพติดประเภทสารระเหยได้

หากรับประทาน จะเกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ระคายเคืองต่อเยื่อบุทางเดินอาหาร ถ้าได้รับปริมาณมาก จะเกิดอาการทางระบบประสาท เช่น ง่วงซึม เติบโซเซ หมดสติ กดระบบทางเดินหายใจ ภาวะเลือดเป็นกรด ตับและไตถูกทำลาย และอาจถึงขั้นเสียชีวิตได้

หากสัมผัสทางผิวหนังเป็นเวลานาน ผิวหนังเกิดการอักเสบ ถ้าเข้าดวงตาจะระคายเคืองต่อเยื่อตา

หากสูดดม จะระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ กดระบบประสาท ทำให้เกิดอาการตื่นเต้น หรือหงุดหงิดคล้ายอาการเสพติดยา ถ้าได้รับปริมาณมาก จะเกิดอาการอ่อนเพลีย หมดแรง ปวดศีรษะ แต่ถ้าได้รับปริมาณสูงมากเกินกว่าที่กำหนดไว้สูงสุด จะเกิดอาการวิงเวียนศีรษะ มึนงง สับสน และหมดสติ

2.4 ก๊าซเซนเซอร์ (Gas sensor)

เป็นอุปกรณ์ทำจากวัสดุที่สามารถใช้ตรวจจับ ทำปฏิกิริยาและตอบสนองต่อโมเลกุลของก๊าซที่ต้องการ แล้วทำการประมวลผลข้อมูลและแปลงออกมาเป็นค่าสัญญาณทางไฟฟ้า

2.4.1 หลักการทำงานพื้นฐาน

วัสดุก๊าซเซนเซอร์สามารถตรวจจับโมเลกุลของก๊าซได้ โดยการรับรู้หรือการจดจำ และทำปฏิกิริยาแล้วตอบสนองได้ โดยการดูดซับโมเลกุล (Adsorption) แบ่งเป็น 2 แบบ

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน ที่เรียกว่า แรงแวนเดอวาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งมาจากการรวมกันของแรงกระจายลอนดอน (London Dispersion Forces) กับแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Forces) ทำให้ค่าพลังงานคายความร้อนต่ำลง ส่งผลให้ดูดซับได้เพียงที่อุณหภูมิต่ำ และเกิดการผันกลับของกระบวนการ จึงสามารถกำจัดสารที่ถูกดูดซับออกไปจากผิววัสดุดูดซับได้ง่าย และดูดซับกันได้หลายชั้น (Multilayer) โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

เกิดจากวัสดุดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับทำปฏิกิริยารวมกัน ทำให้สารที่ถูกดูดซับเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี คือ ถูกทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลเดิม แล้วจัดเรียงเป็นสารประกอบตัวใหม่ และยึดเหนี่ยวกันโดยพันธะที่แข็งแรงอย่างพันธะเคมีโควาเลนต์ (Covalent Bond) แล้วมีพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ค่าพลังงานคายความร้อนสูง ส่งผลให้ดูดซับที่อุณหภูมิสูงได้ จึงสามารถกำจัดสารที่ถูกดูดซับออกไปจากผิววัสดุดูดซับได้ยาก และดูดซับได้เพียงแบบชั้นเดียว (Monolayer)

2.4.2 สมบัติพื้นฐาน

เป็นคุณสมบัติที่พึงควรมีของก๊าซเซนเซอร์ ผู้สร้างหรือพัฒนาก๊าซเซนเซอร์ต้องคำนึงถึงเสมอ

1. Response การตอบสนอง

ก๊าซเซนเซอร์ตรวจจับโมเลกุลของก๊าซได้แล้ว ต้องทำปฏิกิริยาตอบสนองทันที

2. Sensitivity ความไว

ก๊าซเซนเซอร์ตรวจจับโมเลกุลของก๊าซได้แล้ว ต้องบอกถึงความแตกต่างของปริมาณก๊าซในแต่ละบริเวณได้

3. Selectivity ความจำเพาะ

ก๊าซเซนเซอร์ตรวจจับโมเลกุลของก๊าซได้แล้ว ต้องจำแนกความแตกต่างของก๊าซที่ต้องการและไม่ต้องการได้ แล้วเลือกจับแล้วตอบสนองต่อโมเลกุลของก๊าซที่ต้องการ

4. Recovery การฟื้นตัว

ก๊าซเซนเซอร์ตรวจจับโมเลกุลของก๊าซเป็นจำนวนหลายครั้ง การตอบสนองต้องเท่าเดิมหรือใกล้เคียงกับการตรวจจับครั้งแรก จึงสามารถนำกลับมาใช้ตรวจจับใหม่ได้

2.4.3 ก๊าซเซนเซอร์วัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

จากการศึกษาสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งประเภทและผลกระทบ พบว่าเป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม การตรวจหาสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสิ่งแวดล้อม หรืออุตสาหกรรมโรงงาน หรือผลิตภัณฑ์จึงได้รับความนิยมนิยมและสำคัญมากขึ้นในการพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดก๊าซ การพัฒนาวัสดุสำหรับเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซ ต้องมีคุณสมบัติพิเศษ ประสิทธิภาพการตรวจวัดสูง พกพาสะดวกและใช้พลังงานต่ำ

2.4.4 ก๊าซเซนเซอร์จากท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์

ปัจจุบันเซนเซอร์ตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีข้อจำกัดบางอย่าง เช่น มีความจำเพาะไม่ดี และอุณหภูมิในการทำงานสูง ทำให้เพิ่มการใช้พลังงานและพกพาไม่สะดวก

พอลิเมอร์เป็นวัสดุตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ที่อุณหภูมิห้อง มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ดี เนื่องจากโครงสร้างของพอลิเมอร์มีรูพรุนและเส้นใย ทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถดูดซับโมเลกุลได้มากขึ้น จึงนำมาประยุกต์ในการพัฒนาก๊าซเซนเซอร์ โดยใช้วัสดุท่อนาโนคาร์บอนที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าและตรวจจับก๊าซได้ดี ผสมกับพอลิเมอร์ที่เป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่าย เพื่อเพิ่มความไวและความจำเพาะของก๊าซเซนเซอร์

2.4.5 ค่าความสามารถในการละลายแบบเฮนเซน (Hansen Solubility Parameter, HSP)

คือ ค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล สามารถนำมาพิจารณาความเข้ากันของการละลายของสารทำละลายและสารถูกละลายได้ โดยคำนวณค่าองค์ประกอบของความสามารถในการละลายแบบเฮนเซนจากโครงสร้างทางเคมี คือ การละลายของอันตรกิริยาของส่วนที่ไม่มีขั้ว (δ_d) ส่วนที่มีขั้ว (δ_p) และส่วนพันธะไฮโดรเจน (δ_h) ตามสมการ (1) และ (2)

$$(R_a)^2 = 4(\delta_{d2} - \delta_{d1})^2 + (\delta_{p2} - \delta_{p1})^2 + (\delta_{h2} - \delta_{h1})^2 \quad (1)$$

$$RED = R_a / R_0 \quad (2)$$

1 คือ สารถูกละลาย 2 คือ สารทำละลาย

R_a คือ ค่าความสามารถในการละลายแบบเฮนเซนของสารทำละลายและสารถูกละลาย

R_0 คือ รัศมีอันตรกิริยา (Interaction radius)

RED คือ ระยะทางพลังงานสัมพันธ์ (Relative energy distance) โดยพิจารณาเป็น 3 แบบ

1. $RED < 1$ มีความเข้ากันของการละลายของสารทำละลายและสารถูกละลายอย่างดี
2. $RED = 1$ มีความเข้ากันของการละลายของสารทำละลายและสารถูกละลายบางส่วน
3. $RED > 1$ ไม่มีความเข้ากันของการละลายของสารทำละลายและสารถูกละลาย

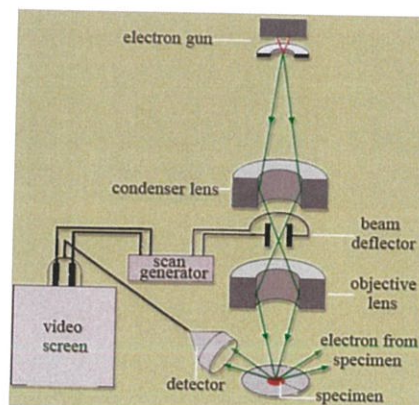
2.5 เทคนิคและเครื่องมือการวิเคราะห์

2.5.1 เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope)

เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนในการสร้างภาพขยายของวัตถุ เพื่อตรวจสอบโครงสร้างของวัตถุ แทนแสงธรรมดา ด้วยกำลังขยายและความละเอียดมากกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบทั่วไป เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้นกว่าแสงธรรมดา แบ่งออกเป็น 2 แบบ

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

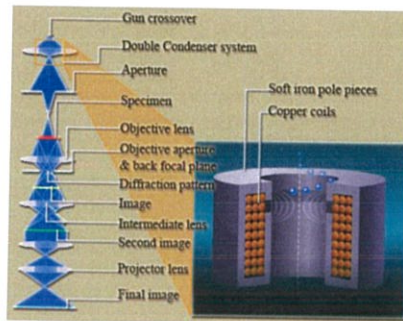
ศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผิวภายนอกของวัตถุ (สัณฐานวิทยา) ลำแสงอิเล็กตรอนส่องกราดตกกระทบลงบนผิวของวัตถุ ภาพที่ได้ออกมาจึงเป็น 3 มิติ มีกำลังขยายไม่ค่อยสูง (10 นาโนเมตร) โดยมีหลักการทำงาน คือ แหล่งกำเนิดแสงอย่างปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) ยิงอิเล็กตรอน (Primary electron) ผ่านเลนส์รวมแสง (Condenser lens) กลายเป็นลำอิเล็กตรอนและขนาดของลำอิเล็กตรอนมีผลต่อความคมชัดของภาพ จากนั้นปรับระยะโฟกัสของภาพผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ตกกระทบลงบนผิวของตัวอย่างกลายเป็นอิเล็กตรอน (Secondary electron) และสัญญาณจะถูกบันทึกแล้วแปลงเป็นสัญญาณอีกรูปแบบ สร้างเป็นภาพขึ้นมา



ภาพที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(<https://pslc.ws/macrog/pan.htm> [16])

2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) ศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างภายในของวัตถุ ลำแสงอิเล็กตรอนส่องผ่านตัววัตถุ ภาพที่ได้ออกมาจึงเป็น 2 มิติ มีกำลังขยายค่อนข้างสูงมาก (0.1 นาโนเมตร) แต่ต้องใช้ตัวอย่างบางมาก (1 – 100 นาโนเมตร) จึงต้องใช้แผ่นเหล็กแทนเลนส์แก้ว โดยมีหลักการทำงาน คือ แหล่งกำเนิดแสงอย่างปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) ยิงอิเล็กตรอน ผ่านเลนส์รวมแสง กลายเป็นลำอิเล็กตรอนและขนาดของลำอิเล็กตรอนมีผลต่อความคมชัดของภาพ ลำอิเล็กตรอนผ่านตัวอย่างที่จะศึกษา (Specimen) แล้วเกิดการกระเจิงอนุภาค จากนั้นปรับระยะโฟกัสของภาพผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ สุดท้ายขยายภาพด้วยเลนส์ทอดภาพไปสู่จอรับ (Project lens) และปรับระยะโฟกัสของลำอิเล็กตรอนให้ยาวพอที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสงได้

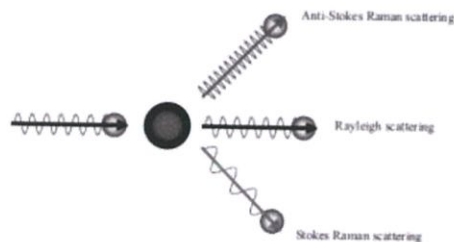


ภาพที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

(<https://pslc.ws/macrog/pan.htm> [16])

2.5.2 เทคนิครามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy)

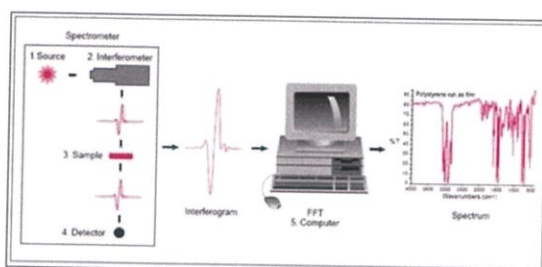
ศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึก พันธะต่างๆของวัตถุ โดยมีหลักการทำงาน คือ ยิงเลเซอร์ที่ความเข้มสูงไปที่ตัวอย่างชนกับโมเลกุลของสาร แล้วจะถูกกระตุ้นให้เกิดการกระเจิงแสง ถ้าแสงที่กระเจิงมีความยาวคลื่นเดียวกับแสงเลเซอร์ ชนกับโมเลกุลของสารแล้วเปลี่ยนทิศทางแต่พลังงานไม่เปลี่ยน เรียกว่า Rayleigh Scattering การกระเจิงแบบเรย์เลห์หรือการชนแบบยืดหยุ่น แต่มีความยาวคลื่นต่างจากแสงเลเซอร์และมีปริมาณน้อย ชนกับโมเลกุลของสารแล้วเปลี่ยนทิศทางและพลังงาน เรียกว่า Raman Scattering การกระเจิงแบบรามานหรือการชนแบบไม่ยืดหยุ่น [17]



ภาพที่ 2.8 แสดงการเกิดการกระเจิงแสงของเทคนิคทางรามาน

2.5.3 เทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared spectroscopy, FTIR)

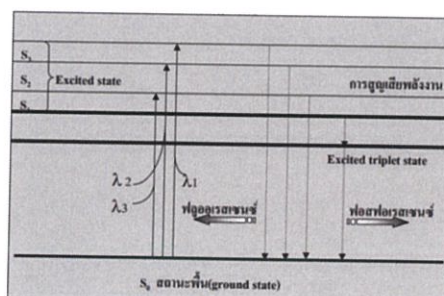
ศึกษาวิเคราะห์พันธะหมู่ฟังก์ชันต่างๆ โครงสร้างและองค์ประกอบของโมเลกุลสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ หาสารปนเปื้อนมาในตัวอย่าง โดยมีหลักการทำงาน คือ โมเลกุลได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงความถี่ของการสั่น (Stretching) หรือการหมุน (Bending) ของพันธะในโมเลกุล โมเลกุลจะดูดกลืนแสงและเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ของโมเลกุล จากนั้นวัดค่าความเข้มแสงต่อความถี่หรือความยาวคลื่น ได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นสเปกตรัม (Spectrum) ในแต่ละพันธะของหมู่ฟังก์ชันแสดงค่าความถี่หรือความยาวคลื่นเฉพาะต่างกัน [18]



ภาพที่ 2.9 แสดงลักษณะการทำงานของเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยแสงช่วงอินฟราเรด

2.5.4 เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโคปี (Fluorescence spectroscopy)

ศึกษาวิเคราะห์การจำแนกชนิดและสมบัติของสารตัวอย่างในปริมาณที่น้อยได้ โดยมีหลักการทำงาน คือ โมเลกุลถูกกระตุ้นจากแหล่งกำเนิดแสง และมีการสั่นภายในโมเลกุลจากระดับชั้นพลังงานสถานะพื้น (Ground state) สู่ระดับชั้นพลังงานสูงขึ้นไป (Excited state) หรือก็คือ การดูดพลังงาน (Excite energy) แต่โมเลกุลที่ไปอยู่ชั้นพลังงานสูงขึ้นไปจะไม่เสถียร แล้วปล่อยพลังงานและตกกลับมาชั้นพลังงานต่ำกว่า พลังงานที่ปล่อยของโมเลกุลจากระดับพลังงานกระตุ้นชั้นที่หนึ่งตกกลับลงสู่ระดับชั้นพลังงานสถานะพื้นจะเกิดการคายโฟตอน (Emission photon) ทำให้เกิดสเปกตรัมในช่วงฟลูออเรสเซนซ์ ที่ค่าพลังงานกระตุ้นจำเพาะของสารแต่ละชนิด [19]

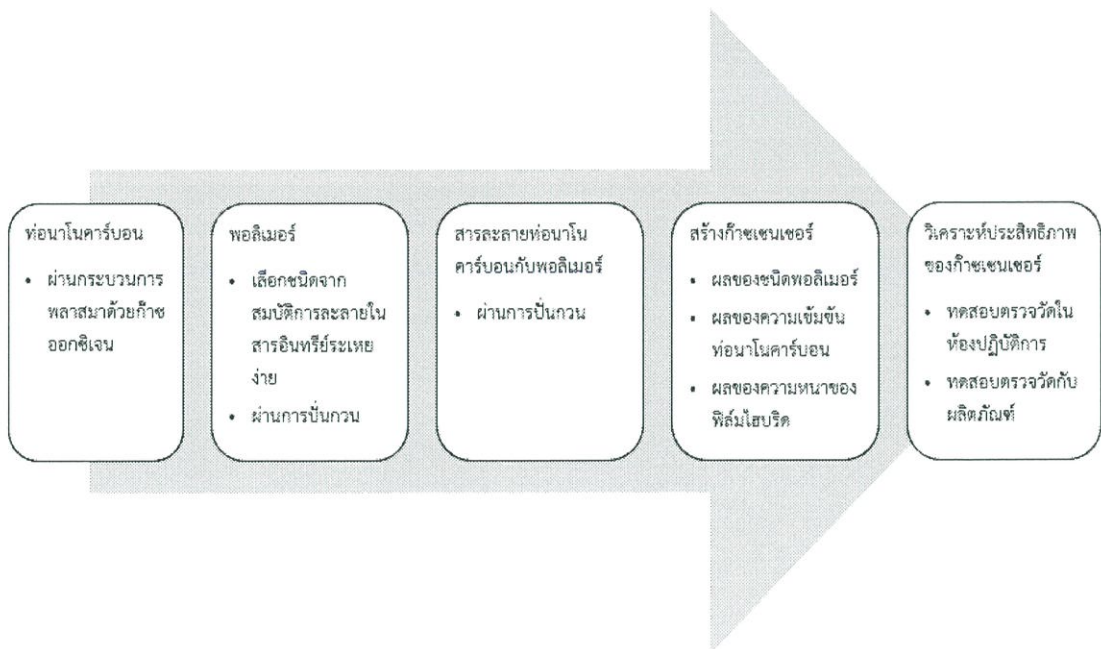


ภาพที่ 2.10 แสดงการเปล่งแสงจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของเทคนิคการวัดการเรืองแสงของสารช่วงฟลูออเรสเซนซ์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงวัสดุ สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย การเตรียม และวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยมีหัวข้อต่อไปนี้ คือ การเปรียบเทียบค่าความสามารถในการละลาย แบบเฮนเซนระหว่าง ไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ การเตรียมก๊าซเซนเซอร์จาก ท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ การทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายใน ห้องปฏิบัติการ และการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายกับผลิตภัณฑ์ โดย ภาพรวมของงานวิจัย แสดงในภาพ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนภาพแสดงภาพรวมของวิธีการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด

3.1 การเปรียบเทียบค่าความสามารถในการละลายแบบเฮนเซนระหว่างไอระเหยอะซีโตนกับพอลิเมออร์แต่ละชนิด

ค่าความสามารถในการละลายแบบเฮนเซน สามารถคำนวณหาตามสมการ (3.1) และ (3.2)

$$(R_a)^2 = 4(\delta d_2 - \delta d_1)^2 + (\delta p_2 - \delta p_1)^2 + (\delta h_2 - \delta h_1)^2 \quad (3.1)$$

$$RED = R_a / R_0 \quad (3.2)$$

1 คือ สารถูกละลาย 2 คือ สารทำละลาย

R_a คือ ค่าความสามารถในการละลายแบบเฮนเซนของสารทำละลายและสารถูกละลาย

R_0 คือ รัศมีอันตรกิริยา (Interaction radius)

RED คือ ระยะทางพลังงานสัมพัทธ์ (Relative energy distance) โดยพิจารณาเป็น 3 แบบ

1. $RED < 1$ มีความเข้ากันของการละลายของสารทำละลายและสารถูกละลายอย่างดี
2. $RED = 1$ มีความเข้ากันของการละลายของสารทำละลายและสารถูกละลายบางส่วน
3. $RED > 1$ ไม่มีความเข้ากันของการละลายของสารทำละลายและสารถูกละลาย

ยกตัวอย่างเช่น ค่าความสามารถในการละลายแบบเฮนเซนระหว่างอะซีโตนกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethylmethacrylate, PMMA) แสดงในตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าความสามารถในการละลายแบบเฮนเซนระหว่างอะซีโตนกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต

ตัวอย่าง	δd	δp	δh	R_0
Acetone	15.5	10.4	7	-
PMMA	18.1	10.5	5.1	9.5

คำนวณตามสมการ (3.1)

$$(R_a)^2 = 4(18.1 - 15.5)^2 + (10.5 - 10.4)^2 + (5.1 - 7)^2 = 30.66$$

$$R_a = 5.5$$

แทนค่าลงและคำนวณตามสมการ (3.2)

$$RED = 5.5 / 9.5 = 0.57$$

ตามทฤษฎี ถ้า $RED < 1$ มีความเข้ากันของการละลายของสารทำละลายและสารถูกละลายอย่างดี หมายความว่า อะซีโตนกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตสามารถละลายเข้ากันได้ดี

3.2 การเตรียมสารละลายท่อนานาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์

3.2.1 การปรับสภาพผิวผนังท่อนานาโนคาร์บอน

เป็นการปรับสภาพผิวด้วยกระบวนการพลาสมาจากก๊าซออกซิเจน เพื่อเพิ่มหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนเพื่อให้สามารถยึดติดกับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น โดยใช้เครื่องทำความสะอาดพลาสมา (Plasma cleaner) ตามเงื่อนไขแสดงในตาราง 3.2 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขของการปรับสภาพผิวด้วยกระบวนการพลาสมาด้วยก๊าซออกซิเจน

เงื่อนไข	รายละเอียด
น้ำหนัก	0.3 กรัม
ความต่างศักย์	740 โวลต์
กระแสไฟฟ้า	40 มิลลิแอมแปร์
กำลังไฟฟ้า	29.6 วัตต์
ระยะเวลา	90 นาที

3.2.2 การเตรียมสารละลายท่อนานาโนคาร์บอน

1. เตรียมสารละลายท่อนานาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับสภาพผิวผนังในข้อ (3.2.1) ในโทลูอีนที่ความเข้มข้น 0.5%(w/v)
2. นำไปละลายเข้ากันด้วยเครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic cleaner) เป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง

3.2.3 การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์

1. เตรียมสารละลายพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ในโทลูอีน (Toluene) ที่ความเข้มข้น 5%(w/v)
- 2 นำไปปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลายให้ความร้อน (Hotplate and Magnetic Stirrer) เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง

3.3 การเตรียมก๊าซเซนเซอร์จากท่อนานาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ

การเตรียมก๊าซเซนเซอร์ด้วยกระบวนการเคลือบแบบไฟฟ้าเคมี

- 1 การเตรียมก๊าซเซนเซอร์เพื่อศึกษาผลจากความเข้มข้นของท่อนานาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์
 - 1.1) นำสารละลายท่อนานาโนคาร์บอนผสมรวมกับสารละลายพอลิเมอร์ ที่ความเข้มข้น อัตราส่วนท่อนานาโนคาร์บอนต่อพอลิเมอร์ 0.75 – 3.5 ตามเงื่อนไขแสดงในตารางที่ 3.3 ดังนี้

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขของความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์

สารตัวอย่าง	อัตราส่วน CNTs ต่อพอลิเมอร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
C _{0.75}	0.75:1
C ₁	1:1
C _{1.5}	1.5:1
C _{2.5}	2.5:1
C _{3.5}	3.5:1

1.2) ปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลายพร้อมเตาความร้อน เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

1.3) ทำความสะอาดแผ่นรองรับ Print circuit board (PCB) ด้วยเครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic cleaner) เพื่อใช้เป็นฐานรองรับของก๊าซเซนเซอร์ ในสารละลายต่างๆ ตามขั้นตอน ดังนี้

(1) สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) ละลายในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol, IPA) กับน้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI water) อัตราส่วน 70 : 30 เป็นเวลา 10 นาที

(2) สารละลายอะซิโตน (Acetone) เป็นเวลา 10 นาที

(3) สารละลายเมทานอล (Methanol) เป็นเวลา 10 นาที

(4) น้ำปราศจากไอออน เป็นเวลา 10 นาที

1.4) นำสารละลายที่เสร็จจากการปั่นกวนแล้ว มาเคลือบลงแผ่นรองรับ PCB ด้วยกระบวนการเคลือบแบบไฟฟ้าเคมี (Electrochemical assisted deposition, ECAD) คือ กระบวนการที่รวมลักษณะการสร้างฟิล์มทั้งเชิงกายภาพและเคมี โดยหยดสารละลายลงไป แรงทางไฟฟ้าจะนำพาท่อนาโนคาร์บอนติดลงบนขั้วของแผ่นรองรับ PCB ระหว่างขอบเขตศักย์ไฟฟ้าที่กำหนดไว้ หรือก็คือ หยดสารละลายภายใต้สนามไฟฟ้าลงบนแผ่นรองรับ PCB เพื่อให้ท่อนาโนคาร์บอนติดลงบนขั้วได้ดีขึ้น [20]

2 การเตรียมก๊าซเซนเซอร์เพื่อศึกษาผลจากพารามิเตอร์ของวิธี ECAD

2.1) ทำความสะอาดแผ่นรองรับ PCB โดยวิธีทำตาม 1.3) ของข้อ 1

2.2) นำความเข้มข้นของสารละลายที่ดีที่สุดจากข้อ 1 มาเคลือบลงแผ่นรองรับ PCB ด้วยกระบวนการเคลือบแบบไฟฟ้าเคมี ตามพารามิเตอร์ ดังนี้

2.2.1 จำนวนการหยดสารละลายไฮบริดที่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์
ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขจำนวนการหยด

สารตัวอย่าง	จำนวนการหยด (ไมโครลิตร)
D ₁	1
D ₂	2
D ₃	3
D ₄	4
D ₅	5

2.2.2 ขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้า

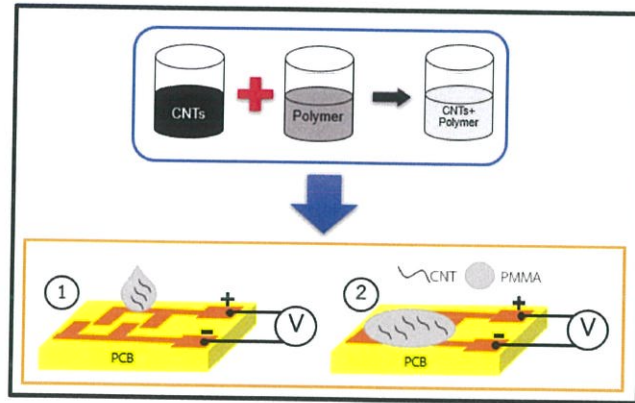
ตารางที่ 3.5 เงื่อนไขขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้า

สารตัวอย่าง	ขอบเขตศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
V ₃	-3 to 3
V ₁	-1 to 1

2.2.3 อัตราสแกนเรท

ตารางที่ 3.6 เงื่อนไขค่าสแกนเรท

สารตัวอย่าง	อัตราสแกนเรท (โวลต์ต่อวินาที)
S _{0.1}	0.1
S _{0.05}	0.05



ภาพที่ 3.2 แผนภาพแสดงการเตรียมวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการเคลือบแบบเคมีไฟฟ้า

3.4 การทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายในห้องปฏิบัติการ

3.4.1 วิธีดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพในห้องปฏิบัติการ

(1) ชั่งน้ำหนักสารอินทรีย์ระเหยง่าย 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดแก้วสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย

(2) ปรับความดันภายในแชมเบอร์สำหรับการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยปล่อยก๊าซไนโตรเจนในอัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 10 นาที

(3) จากนั้นปล่อยไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายเข้าสู่แชมเบอร์ ด้วยเทคนิค bubbling ในอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 10 นาที

(4) สูดท้ายหยุดปล่อยไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย และปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่แชมเบอร์อีกครั้ง เป็นเวลาประมาณ 10 นาที เพื่อช่วยในการไล่ไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายออกจากแชมเบอร์

(5) ชั่งน้ำหนักสารอินทรีย์ระเหยง่ายอีกครั้ง เพื่อคำนวณหาปริมาณที่หายไป

(6) คำนวณหาค่าการตอบสนองต่อไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Sensor response, S) ซึ่งอยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า บันทึกด้วยเครื่อง FLUKE คำนวณตามสมการ ดังนี้

$$S = \frac{R - R_0}{R_0} \quad (3.3)$$

R คือ ค่าความต้านทานของตัวก๊าซเซนเซอร์ที่สามารถวัดได้ หน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

R_0 คือ ค่าความต้านทานเริ่มต้นของตัวก๊าซเซนเซอร์ หน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

3.4.2 วิธีคำนวณหาความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

สามารถคำนวณตามสมการในแต่ละขั้นตอน ดังต่อไปนี้

$$PV = RTn_{ch} \quad (3.4)$$

จากสมการ (3.4) แปลงเป็น

$$n_{ch} = \frac{PV}{RT} \quad (3.5)$$

n_{ch} คือ จำนวนโมลของก๊าซไนโตรเจนที่ปรับความดันในแชมเบอร์ หน่วยเป็น โมล (n)

P คือ ความดันที่ใช้ภายในแชมเบอร์ เท่ากับ 101.325 กิโลปาสกาล (kPa)

V คือ ปริมาตรของแชมเบอร์ เท่ากับ 10.79×10^3 ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ เท่ากับ $8.314 \text{ cm}^3 \text{ MPa} / \text{K mol}$

T คือ อุณหภูมิที่ใช้ภายในแชมเบอร์ หน่วยเป็น องศาฟาเรนไฮต์ ($^{\circ}\text{F}$)

$$M_{voc} = d_{voc} \times V_{voc} \quad (3.6)$$

จากสมการ (3.6) แปลงเป็น

$$V_{voc} = \frac{M_{voc}}{d_{voc}} \quad (3.7)$$

M_{voc} คือ น้ำหนักของสารอินทรีย์ระเหยง่าย หน่วยเป็น กรัม (g)

d_{voc} คือ ความหนาแน่นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย หน่วยเป็น กรัมต่อตารางเซนติเมตร (g/cm^3)

V_{voc} คือ ปริมาตรของสารอินทรีย์ระเหยง่าย หน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3)

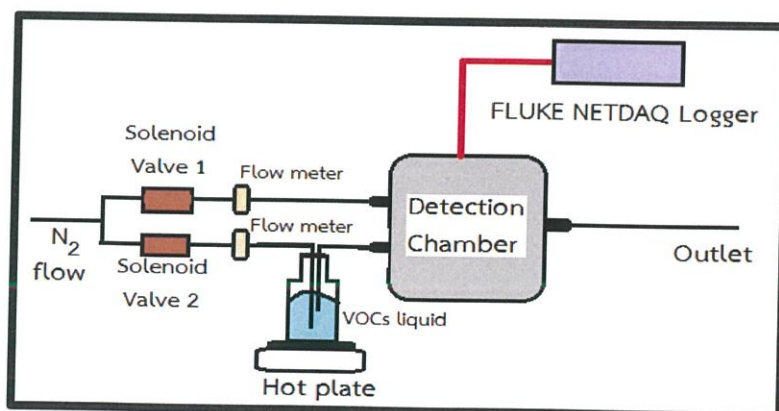
$$n_{voc} = \frac{d_{voc} \times V_{voc}}{MW_{voc}} \quad (3.8)$$

n_{voc} คือ จำนวนโมลของสารอินทรีย์ระเหยง่าย หน่วยเป็น โมล (mol)

MW_{voc} คือ มวลโมเลกุลของสารอินทรีย์ระเหยง่าย หน่วยเป็น กรัมต่อโมล (g/mol)

$$C = \frac{n_{voc}}{n_{ch}} \quad (3.9)$$

C คือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย



ภาพที่ 3.3 แผนภาพแสดงระบบการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายในห้องปฏิบัติการ

3.5 การทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายกับผลิตภัณฑ์

เป็นวิธีดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดเดียวกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยตรวจวัดไอระเหยของน้ำยาล้างเล็บ 2 ตัวอย่าง ดังนี้

- (1) ชั่งน้ำหนักน้ำยาล้างเล็บในบีกเกอร์ ใส่ขวดแก้วสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัด
- (2) ปรับความดันภายในแชมเบอร์สำหรับการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยปล่อยก๊าซไนโตรเจนในอัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 10 นาที
- (3) จากนั้นปล่อยไอของน้ำยาล้างเล็บเข้าสู่แชมเบอร์ ด้วยเทคนิค bubbling ในอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 10 นาที
- (4) สูดหายใจหยุดปล่อยไอ น้ำยาล้างเล็บ และปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่แชมเบอร์อีกครั้ง เป็นเวลาประมาณ 10 นาที เพื่อช่วยในการไล่ไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายออกจากแชมเบอร์
- (5) ชั่งน้ำหนักน้ำยาล้างเล็บในบีกเกอร์อีกครั้ง เพื่อคำนวณหาน้ำหนักสารที่หายไป
- (6) คำนวณหาค่าการตอบสนองต่อไอ น้ำยาล้างเล็บ (Sensor response, S) ซึ่งอยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า บันทึกด้วยเครื่อง FLUKE คำนวณตามสมการ 3.3
- (7) คำนวณหาความเข้มข้นของน้ำยาล้างเล็บตามสมการตั้งแต่ 3.4 ถึง 3.9

เครื่องมือชนิดต่างๆ ทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุก๊าซเซนเซอร์และการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 เครื่องมือชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุก๊าซเซนเซอร์และการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย

เป้าหมาย	สมบัติ	เทคนิควิเคราะห์
วัสดุก๊าซเซนเซอร์ ➤ MWCNT/PMMA hybrid	สัณฐานวิทยา	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด แบบ cross section
	โครงสร้างคาร์บอน ความเป็นผลึก และความสมบูรณ์	เทคนิครามานสเปกโตรสโคปี
	หมู่ฟังก์ชัน	เทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี
	ค่า emission spectra และการ บวมตัวของพอลิเมอร์	เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรสโคปี
การตรวจวัดไอระเหย อะซีโตน	การตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์	ระบบการตรวจวัดก๊าซเซนเซอร์

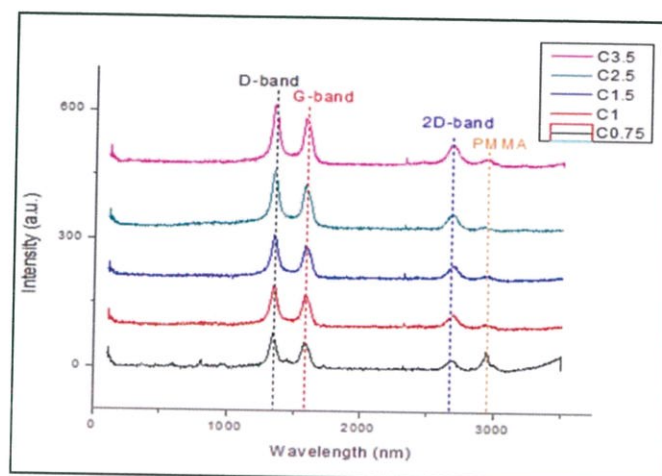
บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลของความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์

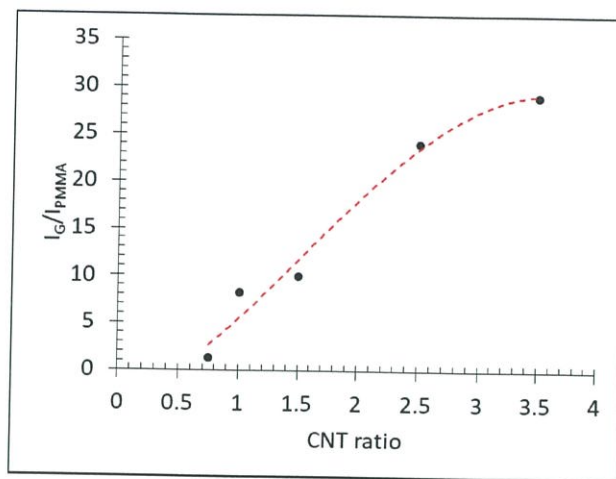
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี

ภาพที่ 4.1 แสดงรามานสเปกตรัมของ $C_{0.75}$ (0.75:1), C_1 (1:1), $C_{1.5}$ (1.5:1), $C_{2.5}$ (2.5:1) และ $C_{3.5}$ (3.5:1) ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องรามานสเปกโตรสโกปี



ภาพที่ 4.1 แสดงรามานสเปกตรัมของเงื่อนไขความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอน

ภาพที่ 4.1 แสดงค่า I_G/I_{PMMA} ของ $C_{0.75}$ (0.75:1), C_1 (1:1), $C_{1.5}$ (1.5:1), $C_{2.5}$ (2.5:1) และ $C_{3.5}$ (3.5:1) ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องรามานสเปกโตรสโกปี



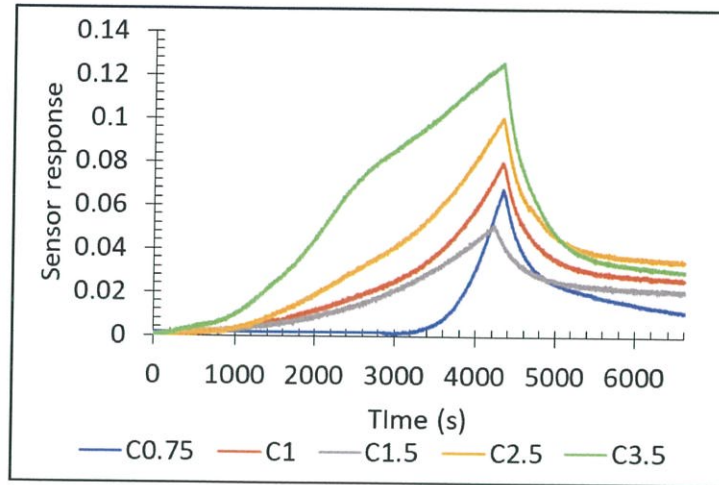
ภาพที่ 4.2 แสดงค่า I_G/I_{PMMA} ของผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี

จากภาพที่ 4.1 พบว่าทุกตัวอย่างมีพีคหลัก 4 พีค โดยแต่ละพีคแสดงถึงลักษณะสำคัญของท่อนาโนคาร์บอนและ PMMA โดย 3 พีคแรกแสดงลักษณะของท่อนาโนคาร์บอน โดยเทียบได้กับ Disorder-band (D-band) (1346 cm^{-1}) แสดงถึงความไม่สมบูรณ์ของแผ่นกราฟไฟต์และคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบที่เจือปนอยู่ Graphitic-band (G-band) (1585 cm^{-1}) แสดงถึงความเป็นระเบียบของกราฟไฟต์ และ 2D-band (2680 cm^{-1}) นอกจากนี้พีคที่ตำแหน่ง 2951 cm^{-1} แสดงถึงสมบัติของ PMMA แสดงให้เห็นว่าทุกตัวอย่างประกอบด้วยท่อนาโนคาร์บอนและ PMMA

นอกจากนี้ภาพที่ 4.2 แสดงอัตราส่วนระหว่างความเข้มของพีค G band ต่อพีคของ PMMA band (I_G/I_{PMMA}) พบว่า เมื่ออัตราส่วนของท่อนาโนคาร์บอนต่อพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ค่า I_G/I_{PMMA} ก็เพิ่มขึ้นตามเช่นกัน แสดงว่าที่อัตราส่วนสูงสุด จะมีความเข้มข้นท่อนาโนคาร์บอนมากที่สุด และที่อัตราส่วนต่ำสุด จะมีความเข้มข้นท่อนาโนคาร์บอนน้อยสุด ตามที่คาดการณ์ไว้

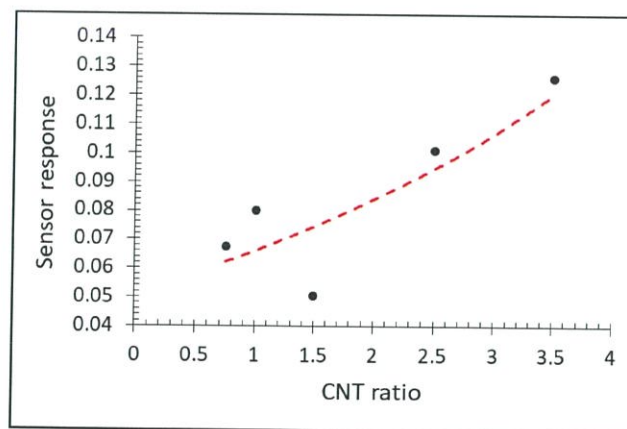
4.1.2 ผลการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตน

ภาพที่ 4.3 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนของอัตราส่วนท่อนาโนคาร์บอนต่อพอลิเมอร์ $C_{0.75}$ (0.75:1), C_1 (1:1), $C_{1.5}$ (1.5:1), $C_{2.5}$ (2.5:1) และ $C_{3.5}$ (3.5:1) ที่วิเคราะห์ด้วยระบบการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย



ภาพที่ 4.3 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนของก๊าซเซนเซอร์จากเงื่อนไขความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอน

ภาพที่ 4.4 แสดงผลแนวโน้มการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนของอัตราส่วนท่อนาโนคาร์บอนต่อพอลิเมอร์ $C_{0.75}$ (0.75:1), C_1 (1:1), $C_{1.5}$ (1.5:1), $C_{2.5}$ (2.5:1) และ $C_{3.5}$ (3.5:1) ที่วิเคราะห์ด้วยระบบการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย



ภาพที่ 4.4 แสดงผลแนวโน้มการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนกับเงื่อนไขความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอน

ตารางที่ 4.1 แสดงเวลาการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนของอัตราส่วนท่อนาโนคาร์บอนต่อพอลิเมอร์ $C_{0.75}$ (0.75:1), C_1 (1:1), $C_{1.5}$ (1.5:1), $C_{2.5}$ (2.5:1) และ $C_{3.5}$ (3.5:1) ที่วิเคราะห์ด้วยระบบการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย

ตารางที่ 4.1 เวลาการตอบสนองและเวลาการคืนตัวของก๊าซเซนเซอร์

ก๊าซเซนเซอร์ (CNT:Polymer)	เวลาการตอบสนอง Response time (s)	เวลาการคืนตัว Recovery time (s)
C _{0.75} (0.75:1)	4269	-
C ₁ (1:1)	4211	-
C _{1.5} (1.5:1)	3836	-
C _{2.5} (2.5:1)	4159	-
C _{3.5} (3.5:1)	3915	-

ก่อนการตรวจวัดไอระเหยอะซีโตนจะทำการปรับระบบการตรวจวัดด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำการพาไอระเหยอะซีโตนเข้าไปในระบบการตรวจวัดด้วยก๊าซเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากภาพที่ 4.3 พบว่ามีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่อสัมผัสกับไอระเหยอะซีโตน จากนั้นค่าความต้านทานลดลงเมื่อทำการไล่ไอระเหยอะซีโตนด้วยก๊าซไนโตรเจน โดยก๊าซเซนเซอร์จากเงื่อนไข C_{3.5} อัตราส่วน CNT:Polymer คือ 3.5:1 มีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนได้ดีที่สุด ตามด้วย C_{2.5} อัตราส่วน CNT:Polymer คือ 2.5:1, C₁ อัตราส่วน CNT:Polymer คือ 1:1, C_{0.75} อัตราส่วน CNT:Polymer คือ 0.75:1 และ C_{1.5} อัตราส่วน CNT:Polymer คือ 1.5:1 ตามลำดับ ซึ่งค่าความต้านทานของทุกเงื่อนไขไม่สามารถกลับคืนสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นได้ เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนไม่สามารถกำจัดไอระเหยอะซีโตนออกไปจากพื้นผิวของก๊าซเซนเซอร์ได้หมด อีกทั้งพบว่าเกิด สัญญาณรบกวนในช่วงที่ปรับระบบของเงื่อนไข C_{0.75} คาดว่าเกิดจากก๊าซเซนเซอร์เอง หรือมีก๊าซอื่นปะปนอยู่กับก๊าซไนโตรเจน เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนในวัสดุกับค่าการตอบสนองพบว่าความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น การตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนจะมากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.4 แต่ที่เงื่อนไข C_{1.5} มีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนน้อยที่สุด อาจเกิดจากการละลายท่อนาโนคาร์บอนในสารละลายโทลูอินไม่ดี ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนจับรวมตัวกันเป็นก้อน ไม่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ค่าการตอบสนองไม่เป็นไปตามแนวโน้ม

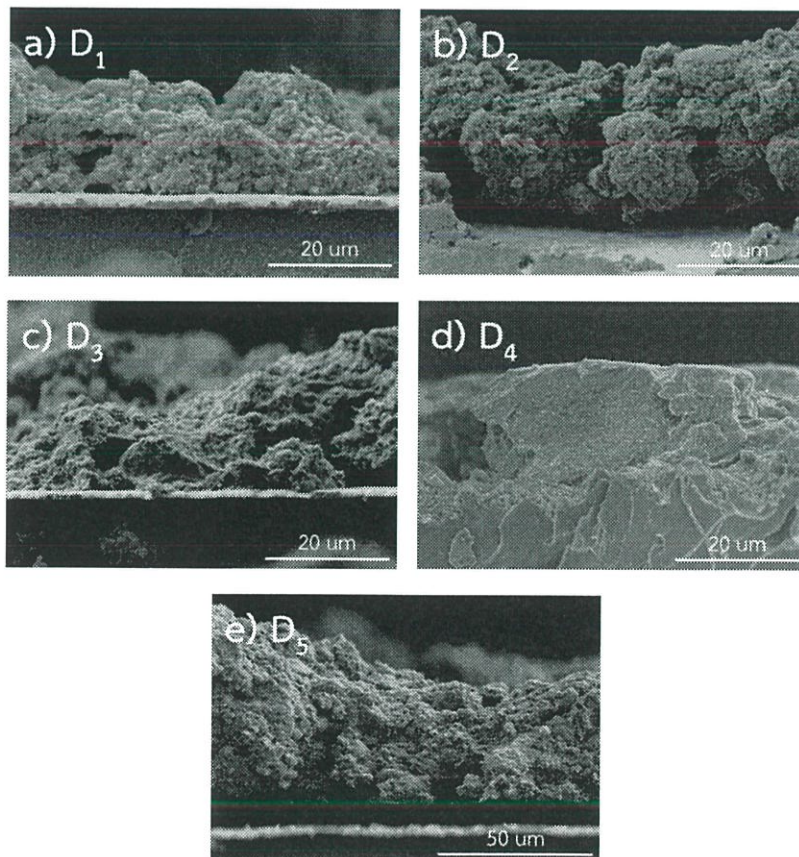
ค่าเวลาการตอบสนอง (Response time) ของก๊าซเซนเซอร์แต่ละชนิด คำนวณได้จากเวลาที่ใช้ในการตอบสนองที่ระดับ 90% เทียบกับค่าการตอบสนองสูงสุด ในขณะที่ค่าเวลาการคืนตัว (Recovery time) ของก๊าซเซนเซอร์ คำนวณได้จากเวลาที่ใช้ในการกลับคืนสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ดังที่แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าที่เงื่อนไข C_{1.5} มีเวลาตอบสนองน้อยที่สุด คือ ตอบสนองเร็วที่สุด แต่มีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนน้อยที่สุด ต่างจากเงื่อนไข C_{3.5} มีเวลา

ตอบสนองน้อยกว่า คือ ตอบสนองช้ากว่าเงื่อนไข $C_{1.5}$ แต่มีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนมากที่สุด และดูแนวโน้มเวลาการตอบสนองจากรายที่ 4.1 พบว่า ความเข้มข้นของอนุภาคคาร์บอนเพิ่มขึ้น เวลาตอบสนองน้อยลง คือ ตอบสนองเร็วขึ้น แสดงว่า เงื่อนไข $C_{3.5}$ มีเวลาการตอบสนองที่ดีที่สุด และเวลาการคืนตัวของทุกเงื่อนไขไม่สามารถคำนวณได้ เนื่องจากค่าความต้านทานไม่สามารถกลับคืนสู่จุดเริ่มต้นได้ในเวลาที่กำหนดไว้ และในโครงการพิเศษนี้จะเลือกเงื่อนไขที่มีผลการตอบสนองและเวลาการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนดีที่สุด คือ $C_{3.5}$

4.2 ผลของพารามิเตอร์ของ ECAD

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ของจำนวนการหยุด

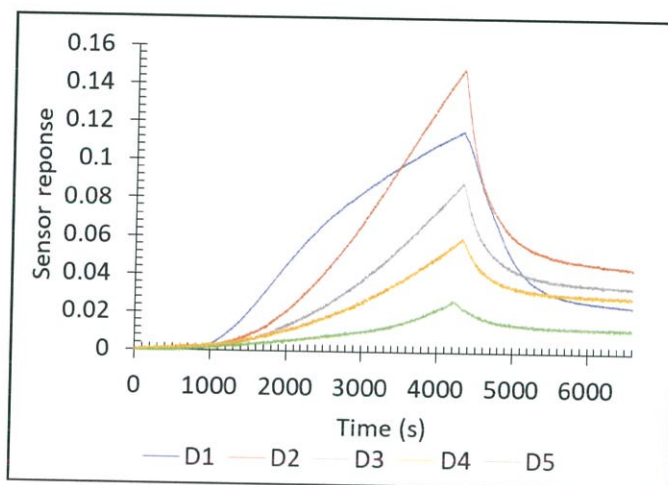
ภาพที่ 4.5 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนกับพารามิเตอร์จำนวนการหยุด D1 (1 หยุด), D2 (2 หยุด), D3 (3 หยุด), D4 (4 หยุด) และ D5 (5 หยุด) ที่วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)



ภาพที่ 4.5 แสดงภาพ SEM ของพารามิเตอร์จำนวนการหยุด a) D₁ b) D₂ c) D₃ d) D₄ และ e) D₅

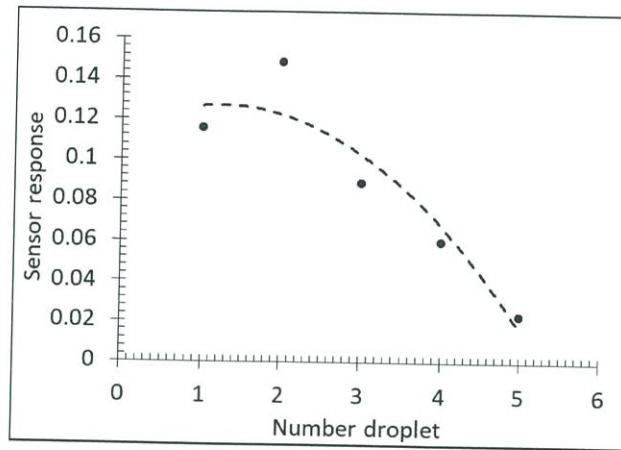
จากภาพที่ 4.5 แสดงภาพ SEM ของพารามิเตอร์จำนวนการหยด a) D₁ b) D₂ c) D₃ d) D₄ และ e) D₅ พบว่าความหนาของฟิล์มไฮบริดมีลักษณะเป็นก้อนท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์กระจายตัวไม่สม่ำเสมอทั่วแผ่นรองรับ PCB จึงไม่สามารถสรุปความหนาของฟิล์มไฮบริดได้

ภาพที่ 4.6 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนกับพารามิเตอร์จำนวนการหยด D1 (1 หยด), D2 (2 หยด), D3 (3 หยด), D4 (4 หยด) และ D5 (5 หยด) ที่วิเคราะห์ด้วยระบบการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย



ภาพที่ 4.6 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนกับพารามิเตอร์จำนวนการหยด

ภาพที่ 4.7 แสดงผลแนวโน้มการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนกับพารามิเตอร์จำนวนการหยด D1 (1 หยด), D2 (2 หยด), D3 (3 หยด), D4 (4 หยด) และ D5 (5 หยด) ที่วิเคราะห์ด้วยระบบการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย

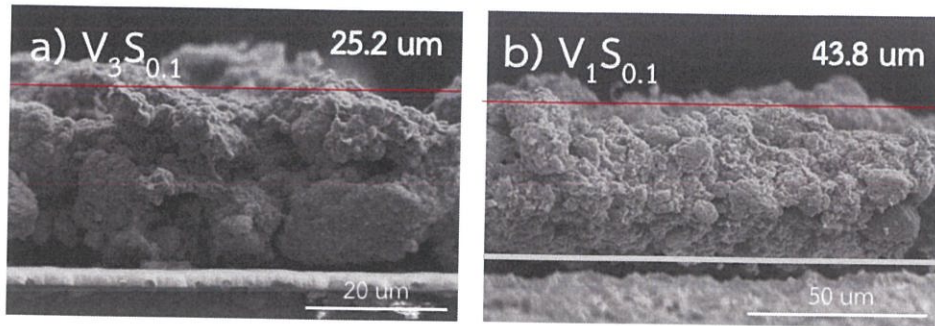


ภาพที่ 4.7 แสดงผลแนวโน้มการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนกับพารามิเตอร์จำนวนการหยด

จากภาพที่ 4.6 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนกับพารามิเตอร์จำนวนการหยด D_1 (1 หยด), D_2 (2 หยด), D_3 (3 หยด), D_4 (4 หยด) และ D_5 (5 หยด) พบว่าก๊าซเซนเซอร์เงื่อนไข D_2 คือ หยดสารละลายท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ลงบนแผ่น PCB จำนวน 2 หยด มีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนดีที่สุด ตามด้วย D_1 , D_3 , D_4 และ D_5 ตามลำดับ ซึ่งค่าความต้านทานของทุกเงื่อนไขไม่สามารถกลับคืนสู่ค่าความต้านทานเริ่มต้นได้เช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของจำนวนหยดกับค่าการตอบสนองพบว่าจำนวนหยดมากขึ้น ค่าการตอบสนองจะน้อยลงดังแสดงในภาพที่ 4.7 แต่ที่เงื่อนไข D_1 จำนวน 1 หยดมีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนน้อยกว่าเงื่อนไข D_2 จำนวน 2 หยด กลับมีผลของค่าความอิมิตัวของก๊าซมากกว่าเงื่อนไขอื่น ซึ่งผลตรงนี้มีควมน่าสนใจอย่างมาก เป็นประเด็นที่ควรทำการศึกษาต่อไป แต่ในโครงการพิเศษนี้จะเลือกเงื่อนไขที่มีการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนมากที่สุดคือ D_2

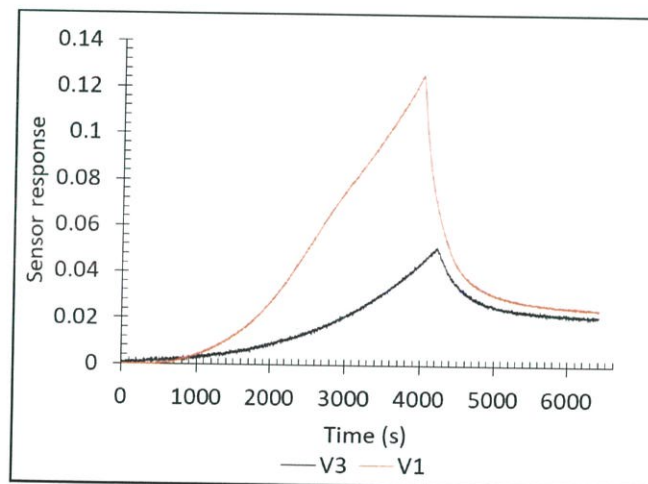
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ของขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้า

ภาพที่ 4.8 แสดงลักษณะฟิล์มของพารามิเตอร์ขอบเขตศักย์ไฟฟ้า V_1 (-1 ถึง 1 โวลต์) และ V_3 (-3 ถึง 3 โวลต์) ที่วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)



ภาพที่ 4.8 แสดงภาพ SEM ของพารามิเตอร์ขอบเขตศักย์ไฟฟ้า a) $V_3S_{0.1}$ และ b) $V_1S_{0.1}$

ภาพที่ 4.8 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนกับพารามิเตอร์ขอบเขตศักย์ไฟฟ้า V_1 (-1 ถึง 1 โวลต์) และ V_3 (-3 ถึง 3 โวลต์) ที่วิเคราะห์ด้วยระบบการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย



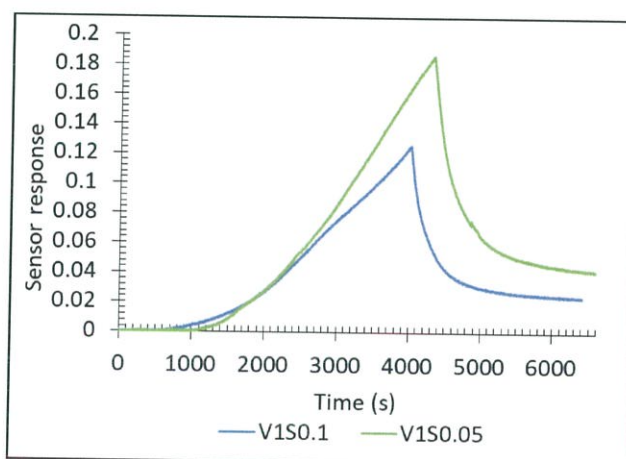
ภาพที่ 4.9 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนกับพารามิเตอร์ขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้า

จากภาพที่ 4.9 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนของก๊าซเซนเซอร์จากเงื่อนไขความหนาจากขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้า V_1 (-1 ถึง 1 โวลต์) และ V_3 (-3 ถึง 3 โวลต์) พบว่าเงื่อนไข V_1 คือ ขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ -1 ถึง 1 โวลต์ มีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนมากกว่าเงื่อนไข V_3 คือ ขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ -3 ถึง 3 โวลต์ เกิดจากความหนาของฟิล์มเงื่อนไข V_1 จากภาพที่ 4.8 a) บางกว่าเงื่อนไข V_3 จากภาพที่ 4.8 b) มีความหนาแน่นน้อยกว่า ทำให้โมเลกุลของไอ

ระเหยอะซิโตนสามารถซึมผ่านเข้าไปได้ง่ายกว่า ส่งผลให้เกิดการบวมตัวของพอลิเมอร์ (Swelling) และค่าการตอบสนองต่อไอระเหยอะซิโตนมากกว่า

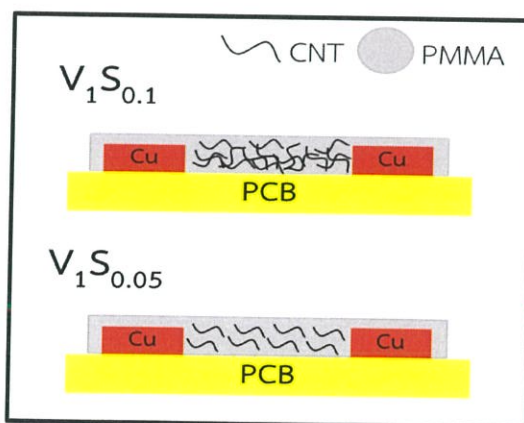
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ของอัตราสแกนเรท

ภาพที่ 4.10 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยอะซิโตนกับพารามิเตอร์อัตราสแกนเรท $S_{0.05}$ (0.05 โวลต์ต่อวินาที) และ $S_{0.1}$ (0.1 โวลต์ต่อวินาที) ที่วิเคราะห์ด้วยระบบการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย



ภาพที่ 4.10 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยอะซิโตนกับพารามิเตอร์อัตราสแกนเรท

ภาพที่ 4.11 แสดงลักษณะการจัดเรียงของท่อนาโนคาร์บอนของพารามิเตอร์อัตราสแกนเรท $S_{0.05}$ (0.05 โวลต์ต่อวินาที) และ $S_{0.1}$ (0.1 โวลต์ต่อวินาที)

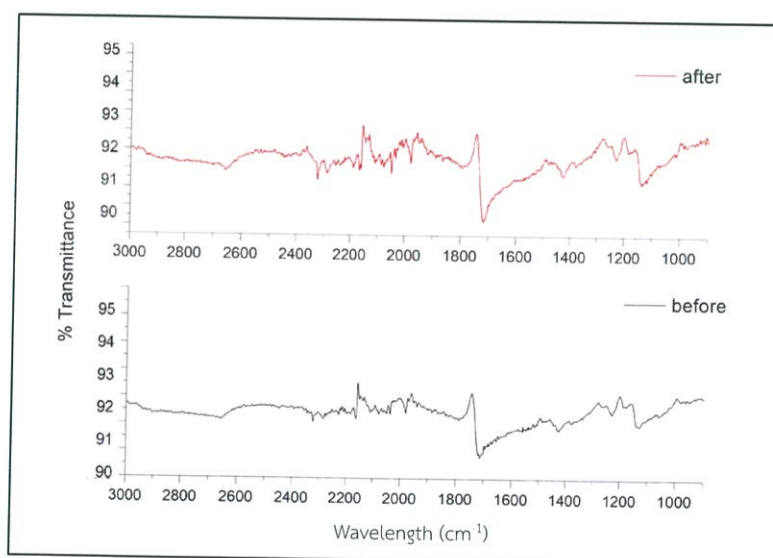


ภาพที่ 4.11 แสดงลักษณะการจัดเรียงของท่อนาโนคาร์บอนของพารามิเตอร์อัตราสแกนเรท

จากภาพที่ 4.10 แสดงผลการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนกับพารามิเตอร์อัตราสแกนเรท $S_{0.05}$ (0.05 โวลต์ต่อวินาที) และ $S_{0.1}$ (0.1 โวลต์ต่อวินาที) พบว่าเงื่อนไข $S_{0.05}$ คือ อัตราสแกนเรท 0.05 โวลต์ต่อวินาที มีค่าการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนดีกว่าเงื่อนไข $S_{0.1}$ คือ อัตราสแกนเรท 0.1 โวลต์ต่อวินาที เกิดจากการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนภายในฟิล์มมีลักษณะเป็นระเบียบกว่า จากภาพที่ 4.11 ทำให้โมเลกุลของไอระเหยอะซีโตนสามารถซึมผ่านเข้าไปได้ง่ายกว่า ส่งผลให้ค่าการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนมากกว่า

4.3 ผลของการศึกษาประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย

ภาพที่ 4.12 แสดงผลพันธะของฟิล์มไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ก่อนและหลังวัดไอระเหยอะซีโตน ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

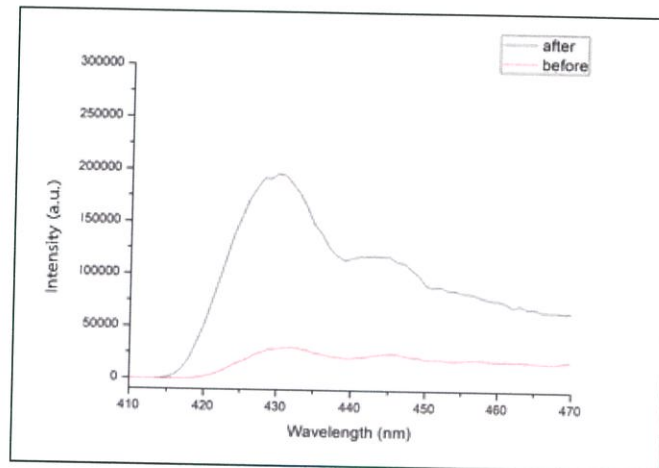


ภาพที่ 4.12 แสดงผลพันธะของฟิล์มไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ก่อนและหลังวัดไอระเหยอะซีโตนจากเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

จากภาพที่ 4.12 แสดงผลพันธะของฟิล์มไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ก่อนและหลังวัดไอระเหยอะซีโตนจากเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี พบว่าเกิดค่าความเปลี่ยนแปลงพีคทั้งหมด 4 พีคหลัก ที่บริเวณตำแหน่ง 1137 cm^{-1} คือ พันธะ C–O (Bending) 1427 cm^{-1} คือ พันธะ C–H (Bending) 1719 cm^{-1} คือ พันธะ C=O (Stretch) และ 2036 cm^{-1} คือ

พันธะ C–O (Stretch) โดยพิกที่ 2036 cm^{-1} (C–O stretch) เป็นพิกที่เกิดขึ้นหลังจากตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน แสดงว่า PMMA เกิดการบวมตัว (Swelling) หลังจากดูดซับไอระเหยอะซีโตน

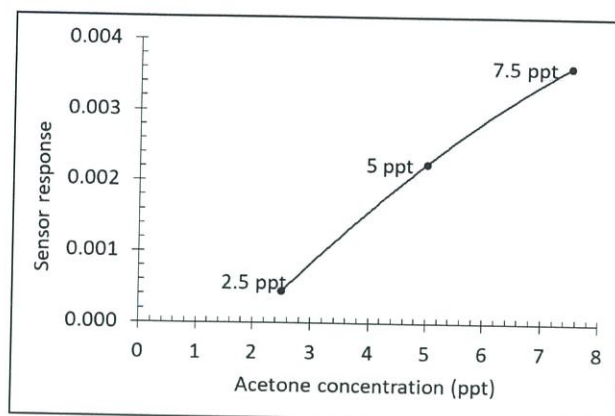
ภาพที่ 4.13 แสดงผลการบวมตัวของพอลิเมอร์ก่อนและหลังวัดไอระเหยอะซีโตน ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโคปี



ภาพที่ 4.13 แสดงผลการบวมตัวของพอลิเมอร์ก่อนและหลังวัดไอระเหยอะซีโตนจากเทคนิคฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโคปี

จากภาพที่ 4.13 แสดงผลการบวมตัวของพอลิเมอร์ก่อนและหลังวัดไอระเหยอะซีโตนจากเทคนิคฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโคปี พบว่าเกิดค่าความเปลี่ยนแปลงในช่วงความยาวคลื่น 410 ถึง 470 นาโนเมตร คือ ค่า Emission intensity เพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้นหลังจากตรวจวัดไอระเหยอะซีโตน ซึ่งเกิดจากการบวมตัว (Swelling) ของ PMMA และการเปลี่ยนรูปของ Backbone ส่งผลให้เส้นสเปกตรัมค่า Emission เพิ่มขึ้น

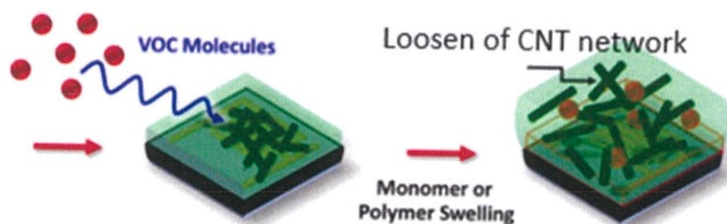
ภาพที่ 4.14 แสดงผลแนวโน้มการตอบสนองต่อไอระเหยอะซีโตนที่ความเข้มข้นของไอระเหยอะซีโตนแตกต่างกัน ที่วิเคราะห์ด้วยระบบการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย



ภาพที่ 4.14 แสดงผลแนวโน้มการตอบสนองต่อไอระเหยอะซิโตนที่ความเข้มข้นของไอระเหยอะซิโตนแตกต่างกัน

จากภาพที่ 4.14 แสดงผลแนวโน้มการตอบสนองต่อไอระเหยอะซิโตนที่ความเข้มข้น 2.5, 5 และ 7.5 ppt (Parts per thousand หนึ่งในพันส่วน) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองกับค่าความเข้มข้นไอระเหยอะซิโตนที่ตรวจวัด มีความสัมพันธ์แปรผันตรงต่อกัน คือ เมื่อค่าความเข้มข้นที่ใช้ตรวจวัดมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ก็จะเพิ่มสูงขึ้น และคำนวณเป็นค่าความไวในการตรวจวัด (Sensitivity) เท่ากับ 0.00064

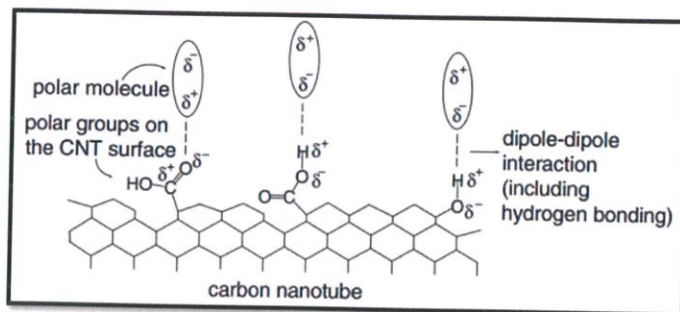
ภาพที่ 4.15 แสดงกลไกที่เกิดการบวมตัวของพอลิเมอร์ของก๊าซเซนเซอร์



ภาพที่ 4.15 แสดงกลไกการบวมตัวของพอลิเมอร์

จากภาพที่ 4.15 แสดงกลไกที่เกิดการบวมตัวของพอลิเมอร์ของก๊าซเซนเซอร์ ดังนี้ เมื่อโมเลกุลไอถูกดูดซับเข้าไปในฟิล์มของก๊าซเซนเซอร์ พอลิเมอร์เกิดการบวมตัว ทำให้ระยะห่างระหว่างท่อนาโนคาร์บอนภายในฟิล์มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น

ภาพที่ 4.16 แสดงกลไกที่เกิดการ charge transfer ระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับโมเลกุลไอทีพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนของก๊าซเซนเซอร์

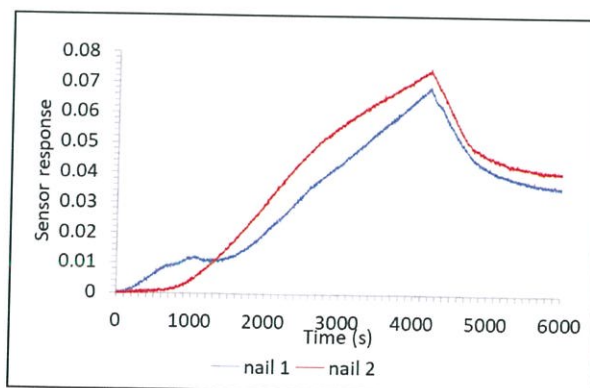


ภาพที่ 4.16 แสดงกลไกการ charge transfer ระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับโมเลกุลไอทีพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอน

จากภาพที่ 4.16 แสดงกลไกที่เกิดการ charge transfer ระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับโมเลกุลไอทีพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนของก๊าซเซนเซอร์ ดังนี้ เมื่อโมเลกุลไอทีถูกดูดซับเข้าไปในฟิล์มของก๊าซเซนเซอร์ ทำให้เกิด charge transfer จากโมเลกุลไอทีไปยังท่อนาโนคาร์บอนที่พื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอน ส่งผลให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

4.4 ผลของการศึกษาประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายกับผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างเล็บ

ภาพที่ 4.17 แสดงผลการตอบสนองต่อไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายในผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างเล็บ ที่วิเคราะห์ด้วยระบบการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่าย



ภาพที่ 4.17 แสดงผลการตอบสนองต่อไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายในผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างเล็บ

จากภาพที่ 4.17 แสดงผลการตอบสนองต่อไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายในผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างเล็บ 2 ตัวอย่าง พบว่าสามารถวัดไอระเหยอะซีโตนในน้ำยาล้างเล็บได้จริง แต่ว่าการคืนตัวของก๊าซ เซนเซอร์ไม่ค่อยดี คือ ไม่สามารถนำกลับมาวัดซ้ำได้ โดยในน้ำยาล้างเล็บนั้น ไม่ได้มีเพียง สารละลายอะซีโตนเพียงเท่านั้น ยังส่วนประกอบอื่นอีกอย่าง น้ำยาล้างเล็บตัวที่ 1 มีส่วนประกอบเพิ่มเติม คือ Propylene glycol ส่วนน้ำยาล้างเล็บตัวที่ 2 มีส่วนประกอบเพิ่มเติม คือ Butyl acetate, Ethyl acetate, Benzophenone-4, Propylene glycol, Panthenol และ Triethanolamine โดยผลที่สามารถยืนยันได้ว่าผลการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์เป็นผลของไอระเหยอะซีโตน คือ การคำนวณค่าความสามารถในการละลายแบบเฮนเซนระหว่างส่วนประกอบตัวอื่นกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต ดังที่แสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งสารละลาย Benzophenone มีค่า RED เท่ากับ 1.19 ถือว่ามีความสามารถในการละลายบางส่วน แต่ Acetone มีค่า RED เท่ากับ 0.57 ถือว่ามีความสามารถในการละลายได้ดี และดีกว่าสารละลาย Benzophenone

ตารางที่ 4.2 ค่าความสามารถในการละลายแบบเฮนเซนระหว่างส่วนประกอบอื่นกับ พอลิเมทิลเมทาคริเลต

ตัวอย่าง	δ_d	δ_p	δ_h	R_0	Ra	RED
PMMA	18.1	10.5	5.1	10.9	-	-
Benzophenone	19.6	8.6	5.7	-	12.97	1.19
Butyl acetate	15.8	3.7	6.3	-	68.84	6.32
Ethyl acetate	15.8	5.3	7.2	-	70.9	6.51
Panthenol	17.6	17.2	13.6	-	248.5	22.8
Propylene glycol	16.8	9.4	23.3	-	280.02	25.69
Triethanolamine	17.3	22.4	23.3	-	121.49	11.15

ภาพที่ 4.18 แสดงลักษณะของผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างเล็บทั้ง 2 ตัวอย่างที่ใช้ในการตรวจวัดไอสารอินทรีย์ระเหยง่ายของโครงการพิเศษนี้



ภาพที่ 4.18 แสดงลักษณะของผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างเล็บ a) nail 1 และ b) nail 2

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้ ได้พัฒนาก๊าซเซนเซอร์ด้วยวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์ เพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดไอของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างเล็บ ในขั้นแรกได้หาข้อมูลส่วนประกอบของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำยาล้างเล็บเพื่อออกแบบวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์ โดยพบว่าองค์ประกอบที่สำคัญในน้ำยาล้างเล็บ คือ อะซิโตน ท่อนาโนคาร์บอนที่นำมาศึกษาเป็นชนิดผนังหลายชั้น ผ่านกระบวนการพลาสมาด้วยออกซิเจนเป็นเวลา 90 นาที เพื่อเพิ่มหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนเพื่อให้สามารถยึดติดกับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น การศึกษาประสิทธิภาพการตรวจวัดไอของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ได้ศึกษาความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนและความหนาของฟิล์มไฮบริด โดยพอลิเมอร์ที่เลือกใช้ในการทดลองพิจารณาจากความสามารถในการละลายกับสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เป็นส่วนประกอบของน้ำยาล้างเล็บ ในการทดลองจึงเลือกใช้พอลิเมอร์ คือ พอลิเมทิลเมทาคริเลต ความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนในพอลิเมอร์ศึกษาในอัตราส่วนท่อนาโนคาร์บอนตั้งแต่ 0.75 ถึง 3.5 และพารามิเตอร์การเตรียมฟิล์มไฮบริดควบคุมโดยจำนวนหยด, ขอบเขตค่าศักย์ไฟฟ้าและสแกนเรท ด้วยกระบวนการเคลือบแบบไฟฟ้าเคมี หลังจากนั้นนำวัสดุไฮบริดไปวิเคราะห์ การทดสอบประสิทธิภาพก๊าซเซนเซอร์ได้ทำการศึกษาความไวในการตอบสนองต่อไอระเหยอะซิโตน และสุดท้ายนำก๊าซเซนเซอร์ที่พัฒนาได้ไปทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างเล็บจริงและนำไปสร้างเป็นก๊าซเซนเซอร์ด้วยกระบวนการเคลือบแบบไฟฟ้าเคมี (electrochemical assisted deposition, ECAD) ที่มีความไวในการตรวจวัด (sensitivity) ตามเงื่อนไขที่ดีที่สุด ดังนี้

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสร้างก๊าซเซนเซอร์ด้วยวัสดุไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์

อัตราส่วนความเข้มข้นท่อนาโนคาร์บอนต่อพอลิเมอร์	3.5 มิลลิกรัมต่อ 1 กรัม
จำนวนการหยดสารละลาย	2 หยด (หยดละ 1 ไมโครลิตร)
ขอบเขตศักย์ไฟฟ้า	-1 ถึง 1 โวลต์
อัตราสแกนเรท	0.05 โวลต์ต่อวินาที

สุดท้ายสามารถนำไปทดสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดไอของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในผลิตภัณฑ์
น้ำยาล้างเล็บได้จริง ซึ่งมีความไวต่อการตอบสนองไอระเหยอะซีโตน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับโครงการพิเศษนี้ คือ ควรวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและความหนาของฟิล์ม
ไฮบริดท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ทุกเงื่อนไขด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(Scanning Electron Microscope, SEM) และวิเคราะห์ความจำเพาะในการตรวจวัด (Selectivity)
ของก๊าซเซนเซอร์

บรรณานุกรม

- [1] Sun, Y. F., Liu, S. B., Meng, F. L., et al., "Metal oxide nanostructures and their gas sensing properties: a review," *Sensors*, vol. 12, pp. 2610-31, (2012).
- [2] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon", *Nature*, vol. 354, pp. 56–58, 1991.
- [3] J. Li, Y. Lu, Q. Ye, M. Cinke, J. Han, and M. Meyyappan, "Carbon Nanotube Sensors for Gas and Organic Vapor Detection," *Nano Lett.*, pp. 1–5, 2003.
- [4] K. Sarangdevot and B. S. Sonigara, "Journal of Chemical and Pharmaceutical Research", *J.Chem. Pharm. Res.*, vol. 7, no. 6, pp. 916–933, 2015.
- [5] P. R. Bandaru, "Electrical Properties and Applications of Carbon Nanotube Structures", *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 7, no. 4, pp. 1239–1267, 2007.
- [6] Qi, P., Vermesh, O., Grecu, M., et al., "Toward large arrays of multiplex functionalized carbon nanotube sensors for highly sensitive and selective molecular detection", *Nano Lett.*, vol. 3, pp. 347–351, (2003).
- [7] Muangrat, W., Chodjarusawad, T., Maolanon, R., et al., "Poly (methyl methacrylate) and thiophene-coated single-walled carbon nanotubes for volatile organic compound discrimination", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, pp. 02BD04 (2016).
- [8] Indiamart. (2561). SWCNT (Ultra Pure). สืบค้นเมื่อ 29 พฤษภาคม 2562, จาก <https://www.indiamart.com/proddetail/swcnt-ultra-pure-10766309488.html>
- [9] EC21. (2554). Sell carbon nanotubes (MWCNT, SWCNT). สืบค้นเมื่อ 29 พฤษภาคม 2562, จาก <https://www.ec21.com/offer-detail/Sell-carbon-nanotubes-MWCNT-SWCNT--13060630.html>
- [10] wikipedia. (2562). Poly (methyl methacrylate). สืบค้นเมื่อ 29 พฤษภาคม 2562, จาก [https://en.wikipedia.org/wiki/Poly\(methyl_methacrylate\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Poly(methyl_methacrylate))

- [11] omnexus. (2562). Selection Guides: PMMA or Acrylic: Guide to Support Your Future 'Transparent' Developments. สืบค้นเมื่อ 29 พฤษภาคม 2562, จาก <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polymethyl-methacrylate-pmma-acrylic-plastic>
- [12] wikipedia. (2562). Polyacrylonitrile. สืบค้นเมื่อ 29 พฤษภาคม 2562, จาก <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyacrylonitrile>
- [13] Polymer Science Learning Center. (2562). Polyacrylonitrile. สืบค้นเมื่อ 29 พฤษภาคม 2562, จาก <https://pslc.ws/macrog/pan.htm>
- [14] wikipedia. (2562). Polyvinyl alcohol. สืบค้นเมื่อ 29 พฤษภาคม 2562, จาก https://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_alcohol
- [15] สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม. (2555). คู่มือวิชาการ เรื่องสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ (Volatile Organic Compounds : VOCs). พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักงานกิจการโรงพิมพ์ องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึกในพระบรมราชูปถัมภ์.
- [16] Electron microscope กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน. สืบค้นเมื่อ 29 พฤษภาคม 2562, จาก <https://pslc.ws/macrog/pan.htm>
- [17] ภก.เมธัส ซอปัติพร, "รามาน สเปกโตรสโคปี หลักการและการประยุกต์การใช้," R&D NEWSLETTER วารสารเพื่อการวิจัยและพัฒนา องค์การเภสัชกรรม, ฉบับที่ 1, หน้า 15-19, (2561).
- [18] ศูนย์นวัตกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2555). FOURIER TRANSFORM INFRARED SPECTROSCOPY (FTIR). สืบค้นเมื่อ 29 พฤษภาคม 2562, จาก http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=41&id=37
- [19] รศ.ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์. (2544). เครื่องมือวิทยาศาสตร์ (SCIENTIFIC INSTRUMENTS). พิมพ์ครั้งที่ 3. ขอนแก่น: หจก. โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา
- [20] Q. Chen, et. al., " Bridging interdigitated electrodes by electrochemical-assisted deposition of graphene oxide for constructing flexible gas sensor", Sensors & Actuators: B. Chemical, Vol.286, pp.591-599, (2019).

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย)

นางสาวภิสรินันท์ เพชรพริ้ม

ชื่อ-นามสกุล (ภาษาอังกฤษ)

Miss Pidsarintun Pejprim

วัน เดือน ปีเกิด

08 มีนาคม 2540

ที่อยู่

437/80 ซ.สวนพลู8 ถ.สาทรใต้ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร
กรุงเทพฯ 10120

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2558 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีวัด
มหาพฤฒาราม ในพระบรมราชินูปถัมภ์

พ.ศ. 2561 วิศวกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง