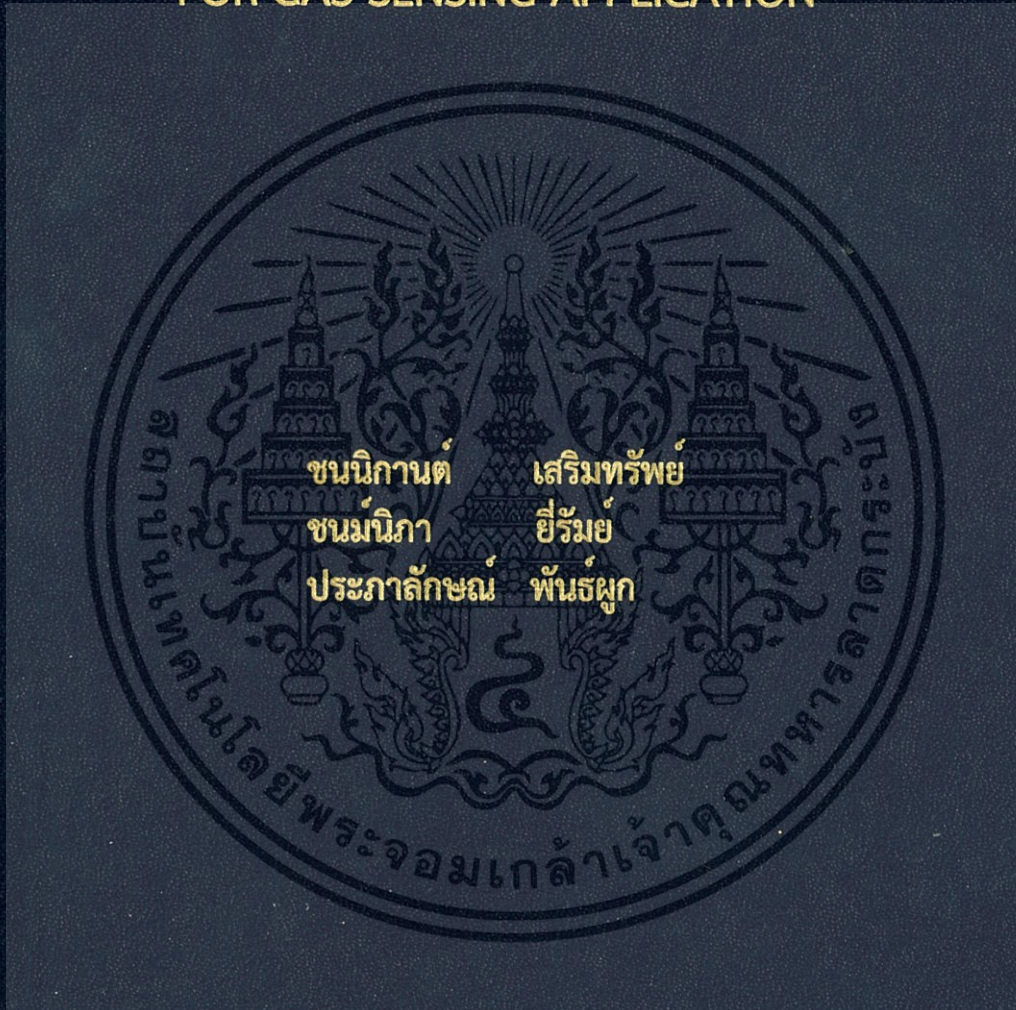


การขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นของแผ่นฟิล์มบางท่อนาโนคาร์บอนชนิด
ผนังหลายชั้นเพื่อการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดแก๊ส

LAYER-BY-LAYER SELF-ASSEMBLY OF MWCNTs
POLYELECTROLYTES ONTO MULTILAYER THIN FILMS
FOR GAS SENSING APPLICATION



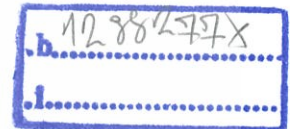
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นของแผ่นฟิล์มบางท่อนาโนคาร์บอนชนิด
ผนังหลายชั้นเพื่อการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดแก๊ส

LAYER-BY-LAYER SELF-ASSEMBLY OF MWCNTs
POLYELECTROLYTES ONTO MULTILAYER THIN FILMS
FOR GAS SENSING APPLICATION



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 149301
รับ เดือน ปี 12 ก.พ. 2561



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LAYER-BY-LAYER SELF-ASSEMBLY OF MWCNTs
POLYELECTROLYTES ONTO MULTILAYER THIN FILMS
FOR GAS SENSING APPLICATION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นของแผ่นฟิล์มบางของท่อนาโนคาร์บอนชนิด
 ผนังหลายชั้นเพื่อการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดแก๊ส
 Layer-by-Layer Self-Assembly of MWCNTs Polyelectrolytes
 onto Multilayer Thin Films for Gas Sensing Application

ชื่อนักศึกษา นางสาวชนิกานต์ เสริมทรัพย์ รหัสนักศึกษา 55050610
 นางสาวชนมณีภา ยี่รัมย์ รหัสนักศึกษา 55050611
 นางสาวประภาลักษณ์ พันธุ์ผูก รหัสนักศึกษา 55050721

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
 ภาควิชา เคมี
 ปีการศึกษา 2558
 อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.เอกรัฐ เดชศรี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
 ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติคุณย์ ประธานกรรมการ	
ดร.ณวสิทธิ์ โชติแสง กรรมการ	
ดร.เอกรัฐ เดชศรี กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นของแผ่นฟิล์มบางของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นเพื่อการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดแก๊ส
ชื่อนักศึกษา	นางสาวชนนิกานต์ เสริมทรัพย์ รหัสนักศึกษา 55050610 นางสาวชนมณีภา ยี่รัมย์ รหัสนักศึกษา 55050611 นางสาวประภาลักษณ์ พันธุ์ผูก รหัสนักศึกษา 55050721
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.เอกรัฐ เดชศรี

บทคัดย่อ

เทคนิคอย่างง่ายของการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นถูกนำไปใช้ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางหลายชั้นของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น แผ่นฟิล์มบางของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นถูกสร้างขึ้นจากการเรียงตัวระหว่างประจุลบของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นสลับชั้นกับประจุบวกของพอลิไดอะลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่แสดงประจุลบถูกเตรียมได้โดยการปรับปรุงพื้นผิวแบบการเกิดพันธะโควาเลนต์บนผิวท่อด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นนี้เป็นเทคนิคทั่วไปที่มีศักยภาพในการสร้างฟิล์มบางสำหรับวัสดุแต่งประกอบของท่อนาโนคาร์บอน และยังสามารถเป็นวิธีง่ายๆ ในการเตรียมฟิล์มบางวัสดุแต่งประกอบอื่นๆ ทั่วไป ฟิล์มบางหลายชั้นจะถูกสังเคราะห์คุณสมบัติทั้งเชิงแสง และคุณสมบัติเชิงการนำไฟฟ้า โดยคุณสมบัติทางการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางจะถูกประเมินค่า โดยการใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัด และคุณสมบัติเชิงแสงจะถูกประเมินค่าโดยการใช้ยูวี วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี โดยท่อคาร์บอนในระดับนาโนที่อยู่ในรูปของวัสดุแต่งประกอบฟิล์มบางสามารถที่จะพัฒนาการนำไฟฟ้าและสามารถจะนำไปสร้างเป็นอิเล็กทรอนิกส์สำหรับใช้เป็นตัวรับรู้ที่วัดค่าการนำไฟฟ้า

คำสำคัญ : การปรับปรุงพื้นผิวแบบโควาเลนต์ เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น แอมโมเนีย

Title	Layer-by-Layer Self-Assembly of MWCNTs Polyelectrolytes onto Multilayer Thin Films for Gas Sensing Application
Students	Miss Chonnikarn Sermsub student ID 55050610 Miss Chonnipa Yeerum student ID 55050611 Miss Prapaluk Punpook student ID 55050721
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2015
Advisor	Dr. Ekarat Detsri

Abstract

A simple layer-by-layer (LbL) deposition technique was used to fabricate the multilayer thin films of multi-walled carbon nanotube (MWCNTs). The multilayer of MWCNTs thin films were fabricated by alternate deposition of each anionic MWCNTs and cationic poly(diallyldimethylammonium chloride). The anionic MWCNTs were prepared by covalent surface modification via oxidation reaction. This LbL technique was found to be very interesting for the fabrication of thin carbon nanotubes films of controlled composition and architecture. The multilayer thin films were characterized for their electrical and optical properties using a multimeter setup and by UV-visible spectroscopy, respectively. The CNTs present in the multilayer thin films were found to improve the overall conductivity and allow the fabrication of ammonia sensor which could be used as an electrical sensor.

Keywords : Ammonia, Covalent surface modification, Layer-by-layer technique, Multi-walled carbon nanotubes

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยการได้รับคำแนะนำ คำปรึกษา ความกรุณา และความช่วยเหลือจากบุคคลดังต่อไปนี้

ขอขอบคุณ ดร.เอกรัฐ เดชศรี อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่คอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิด และให้ความช่วยเหลือแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติคุณ และ ดร.ณวสิทธิ์ โชติแสง อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบโครงการพิเศษ ตลอดจนให้คำแนะนำและแนะแนวทางแก้ไขในจุดที่ผิดพลาด

ขอขอบคุณ ดร.การุณย์ สาดอ่อน อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำ รวมทั้งให้ความรู้เพิ่มเติมเกี่ยวกับโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการยืมอุปกรณ์เครื่องแก้วและสารเคมี รวมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการต่างๆ

ขอขอบคุณหน่วยสังเคราะห์ภาพระดับนาโน (Center of Nanoimaging; CNI) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ซึ่งเป็นผู้ตรวจสอบสารตัวอย่างในโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณรุ่นพี่ และเพื่อนๆ สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้ความช่วยเหลือในขั้นตอนการปฏิบัติการ และให้คำแนะนำตลอดการทำโครงการพิเศษ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนในทุกๆด้าน อีกทั้งยังเป็นแรงบันดาลใจ แรงผลักดันให้ผู้จัดทำมีความทุ่มเทอย่างสุดความสามารถในการทำโครงการพิเศษสำเร็จให้ลุล่วงไปได้อย่างสมบูรณ์

ชนิกานต์	เสริมทรัพย์
ชนม์นิภา	ยี่รัมย์
ประกาลักษณ์	พันธ์ผูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology).....	3
2.2 วัสดุนาโน (Nanomaterials).....	4
2.2.1 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube).....	5
2.2.1.1 ประเภทของท่อนาโนคาร์บอน.....	6
2.2.1.2 คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน.....	8
2.2.1.3 การปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอน.....	9
2.2.2 อนุภาคเงินระดับนาโน (Silver nanoparticles).....	13
2.2.2.1 คุณสมบัติของอนุภาคเงินระดับนาโน.....	14
2.2.2.2 การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน.....	16
2.3 เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique).....	17
2.3.1 โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte).....	18
2.4 แก๊สแอมโมเนีย (Ammonia gas).....	19
2.4.1 ข้อมูลเฉพาะเกี่ยวกับแก๊สแอมโมเนีย.....	20
2.4.2 โครงสร้างทางเคมีของแก๊สแอมโมเนีย.....	20
2.4.3 สมบัติของแก๊สแอมโมเนีย.....	20
2.4.4 อันตรายจากแก๊สแอมโมเนีย.....	21
2.4.5 ประโยชน์ของแอมโมเนีย.....	22
2.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	22
2.5.1 UV-visible spectrophotometer.....	22
2.5.2 Fourier transform infrared spectrophotometer.....	24
2.5.3 Transmission electron microscope.....	24
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	32
3.1 การปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น	32
3.1.1 สารเคมี	32
3.1.2 การปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น	33
3.1.3 การศึกษากระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว (MWCNTs-COOH)	33
3.1.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว	34
3.2 การศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของท่อนาโนคาร์บอน ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น	34
3.2.1 สารเคมี	34
3.2.2 การเตรียมแผ่นกระจกให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ	35
3.2.3 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางในการจุ่ม สารละลายท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว	36
3.2.4 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมคลอไรด์สำหรับการ ขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH	36
3.2.5 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ร่วมกับ สารละลาย PDADMAC	37
3.3 การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน (Silver Nanoparticle) ด้วยปฏิกิริยารีดักชัน	38
3.3.1 สารเคมี	38
3.3.2 การศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลิสไตรีนซัลโฟนิค แอซิดโคมาอิกแอซิด (COPSS) ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน.....	39
3.4 การศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินระดับนาโน ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น	40
3.4.1 สารเคมี	40
3.4.2 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ COPSSS สำหรับการขึ้นรูป แผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน	41
3.4.3 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ มีความเข้มข้นของ COPSS แตกต่างกัน สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง ขนาดนาโน	41
3.5 การสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวร่วมกับ สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น	42
3.5.1 สารเคมี	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.5.2 การสร้างแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ COPSS มีความเข้มข้นแตกต่างกัน	43
3.6 การตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia gas) โดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance)	43
3.6.1 สารเคมี	43
3.6.2 การศึกษาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียโดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า.....	44
3.6.3 การศึกษาแผ่นฟิล์มบางระหว่าง MWCNTs-COOH ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียโดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า.....	45
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	46
4.1 การปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน	46
4.1.1 ผลการศึกษาการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่ปรับปรุงพื้นผิว	50
4.1.2 ผลการศึกษารูปร่าง ขนาด และลักษณะการกระจายตัวของ MWCNTs ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	51
4.1.3 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของ MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy.....	52
4.2 การศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนของท่อนาโนคาร์บอนที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น	53
4.2.1 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางในการจุ่มสารละลาย MWCNTs-COOH	54
4.2.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมคลอไรด์สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH.....	55
4.2.2.1 การศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในรูปแบบของสารละลาย	55
4.2.2.2 การศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในรูปแบบของการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง	56
4.2.3 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH และประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า.....	57
4.3 การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนด้วยวิธีการทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน	59
4.3.1 ผลการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย COPSS ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4 การศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินระดับนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น	61
4.4.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ COPSS สำหรับการขึ้นรูปแบบฟิล์มบาง	61
4.4.2 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่มีความเข้มข้นของ COPSS แตกต่างกัน สำหรับการขึ้นรูปแบบฟิล์มบางขนาดนาโน	62
4.4.2.1 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 mM	62
4.4.2.2 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ความเข้มข้น COPSS 0.1 mM	63
4.5 ผลการสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของ MWCNTs-COOH ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น	65
4.5.1 ผลการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน MWCNTs-COOH ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ความเข้มข้น COPSS 0.01 mM	65
4.5.2 ผลการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 mM	67
4.6 การศึกษาการวิเคราะห์แก๊สแอมโมเนียโดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance)	69
4.6.1 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียโดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า	69
4.6.1.1 ผลการศึกษาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 3 ชั้นในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า	69
4.6.1.2 ผลการศึกษาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 7 ชั้นในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า	70
4.6.1.3 ผลการศึกษาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้นในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า	71
4.6.2 การศึกษาแผ่นฟิล์มบางคอมโพสิตระหว่าง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น กับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียโดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า	73
4.6.2.1 ผลการศึกษาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้นร่วมกับสารละลาย AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 mM โดยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.6.2.2 ผลการศึกษาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น ร่วมกับสารละลาย AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 mM โดยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า.....	75
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	79
5.1 สรุปผลการวิจัย	79
5.1 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	80
เอกสารอ้างอิง	81
ภาคผนวก.....	86
ประวัติผู้วิจัย.....	89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างโพลีไอเล็กโตรไลต์ที่มีประจุลบ (Polyanion).....	18
2.2 ตัวอย่างโพลีไอเล็กโตรไลต์ที่มีประจุบวก (Polycation).....	19
2.3 แสดงผลการสัมผัสแอมโมเนียที่มีผลต่อมนุษย์ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียต่างๆ	21
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น	32
3.2 ตัวแปรที่ศึกษาและเทคนิคในการวิเคราะห์	34
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว.....	35
3.4 สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน	39
3.5 อัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs)	39
3.6 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาสภาวะต่างๆ ในการสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินระดับนาโน.....	40
3.7 สารเคมีที่ใช้ในการสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน	42
3.8 สารเคมีที่ใช้ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย	44
4.1 แสดงแถบการสั่นของพันธะต่างๆ จากสเปกตรัม FTIR.....	53
4.2 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่ความหนาของชั้นต่างๆ.....	59
4.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด.....	60
4.4 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีความหนาชั้นฟิล์มต่างๆ ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 mM	66
4.5 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวนชั้นต่างๆ ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 mM.....	68
4.6 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 3 ชั้นในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	70
4.7 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 7 ชั้นในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ	71
4.8 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้นในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ	72
4.9 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้นร่วมกับ สารละลาย AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 mM ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ	75
4.10 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้นร่วมกับ สารละลาย AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 mM ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ขนาดวัตถุต่างๆ ในหน่วยนาโนเมตร	4
2.2 การม้วนแผ่นแกรฟีนของ (a) ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว และ (b) ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น	5
2.3 ภาพท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว	6
2.4 ท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดจากการม้วนแผ่นแกรฟีนแต่ละแบบ	7
2.5 รูปทรงของท่อนาโนคาร์บอนที่มีตำหนิ	7
2.6 ภาพท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น	8
2.7 ลักษณะการห่อหุ้มท่อนาโนคาร์บอนของพอลิเมอร์ โดยภาพ (a) เป็นการห่อหุ้มแบบสองเกลียว (b) เป็นการห่อหุ้มแบบสามเกลียว และ (c) เป็นการห่อหุ้มแบบสลับกันไปมา	11
2.8 การกระจายตัวของ SWCNTs ใน (A) สารละลาย ZnO ₂ และ (B) น้ำกลั่น เมื่อตั้งสารละลายทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง	11
2.9 การกระจายของ SWCNTs เนื่องมาจากแรงผลักระหว่างประจุบวกของ ZnO ₂	12
2.10 การเกิดปฏิกิริยา Anionic polymerization กับสไตรีนมอนอเมอร์ของ ท่อนาโนคาร์บอน ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีการตัดแปรหมู่ฟังก์ชัน	13
2.11 Surface plasmon resonance ของอนุภาคนาโนทรงกลม	14
2.12 สีของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่มีขนาดต่างๆกัน	15
2.13 การสร้างฟิล์มบางนาโนด้วยเทคนิค Layer-by-Layer	18
2.14 แสดงโครงสร้างของแก๊สแอมโมเนีย	20
2.15 แสดงส่วนประกอบของเครื่อง UV-visible spectrophotometer	23
2.16 แสดงส่วนประกอบของเครื่อง FT-IR	24
2.17 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	25
3.1 แผนผังการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน	33
3.2 แผนผังการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว	34
3.3 การเตรียมแผ่นกระจกให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ	36
3.4 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางในการจุ่มสารละลายท่อนาโนคาร์บอน ชนิดผนังหลายชั้นที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว	37
3.5 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมคลอไรด์ สำหรับการ ขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH	38
3.6 การศึกษาจำนวนชั้นแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ร่วมกับสารละลาย PDADMAC	38
3.7 แผนผังการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย COPSS ในการสังเคราะห์ อนุภาคเงินระดับนาโน	40
3.8 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ COPSS สำหรับการขึ้นรูป แผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน	41
3.9 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่มีความ เข้มข้นของ COPSS แตกต่างกัน สำหรับขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง	42

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 การสร้างแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน ที่ COPSS มีความเข้มข้นแตกต่างกัน.....	43
3.11 ระเบียบการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia gas)	44
3.12 การศึกษาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย โดยวิธีการวัด ค่าความต้านทานไฟฟ้า	45
3.13 การศึกษาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียโดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า.....	46
4.1 รูปแบบการปรับปรุงพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน	47
4.2 กลไกการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นด้วยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน	49
4.3 กลไกการปรับปรุงพื้นผิวแผ่นกราฟีนด้วยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน	50
4.4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย MWCNTs-COOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ และภาพการกระจายของ MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวในน้ำ.....	50
4.5 ภาพ TEM โดยที่ (a) MWCNTs ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว และ (b) MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิว	51
4.6 สเปกตรัม FTIR ของ (a) MWCNTs-COOH และ (b) Pristine MWCNTs.....	52
4.7 (a) ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH และ (b) แผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ขนาดนาโน โดยจุ่มในเวลาที่แตกต่างกัน.....	54
4.8 ค่าการดูดกลืนแสงสารละลาย MWCNTs-COOH และภาพสารละลาย MWCNTs-COOH ที่ความเข้มข้นของ NaCl ที่แตกต่างกัน.....	55
4.9 แสดงกลไกการเติมโซเดียมคลอไรด์ในสารละลาย MWCNTs-COOH.....	56
4.10 (a) ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่ความเข้มข้นของ NaCl แตกต่างกัน และ (b) ภาพแผ่นฟิล์มบางMWCNTs-COOH ที่ความเข้มข้นของ NaCl แตกต่างกัน	57
4.11 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มแตกต่างกัน.....	58
4.12 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีความหนาของฟิล์มบางแตกต่างกัน	58
4.13 ภาพแผ่นฟิล์มบางMWCNTs-COOH ที่จำนวนชั้นแตกต่างกัน	59
4.14 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินนาโนที่ความเข้มข้น COPSS แตกต่างกัน.....	60
4.15 (a) ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินระดับนาโน และ (b) ภาพแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินระดับนาโนโดยการจุ่มในเวลา 20 นาที ที่ COPSS ความเข้มข้นต่างๆ	62
4.16 (a) ค่าการดูดกลืนของแผ่นฟิล์มบาง AgNPs และ (b) ภาพแผ่นฟิล์มบาง AgNPs ที่ความเข้มข้น COPSS 0.01 มิลลิโมลาร์ ในเวลาการจุ่มที่แตกต่างกัน.....	63

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 (a) ค่าการดูดกลืนของแผ่นฟิล์มบาง AgNPs และ (b) ภาพแผ่นฟิล์มบาง AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ในเวลาการจุ่มที่แตกต่างกัน	64
4.18 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ชั้นต่างๆ ร่วมกับสารละลาย AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์	65
4.19 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร และค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ชั้นต่างๆ ร่วมกับสารละลาย AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์.....	66
4.20 ภาพแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่จำนวนชั้นต่างๆ ร่วมกับ AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์	66
4.21 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ชั้นต่างๆ ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์	67
4.22 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร และค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ชั้นต่างๆ ร่วมกับสารละลาย AgNPs ที่ความเข้มข้น COPSS 0.1 มิลลิโมลาร์	68
4.23 ภาพแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่จำนวนชั้นต่างๆ ร่วมกับ AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์.....	68
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 3 ชั้น.....	70
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 7 ชั้น.....	71
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น.....	72
4.27 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีความหนาของชั้นจำนวน 3, 7 และ 11 ชั้น.....	73
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น ร่วมกับสารละลาย AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์.....	74
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น ร่วมกับสารละลาย AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์	75
4.30 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น ร่วมกับสารละลาย AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 และ 0.1 มิลลิโมลาร์.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

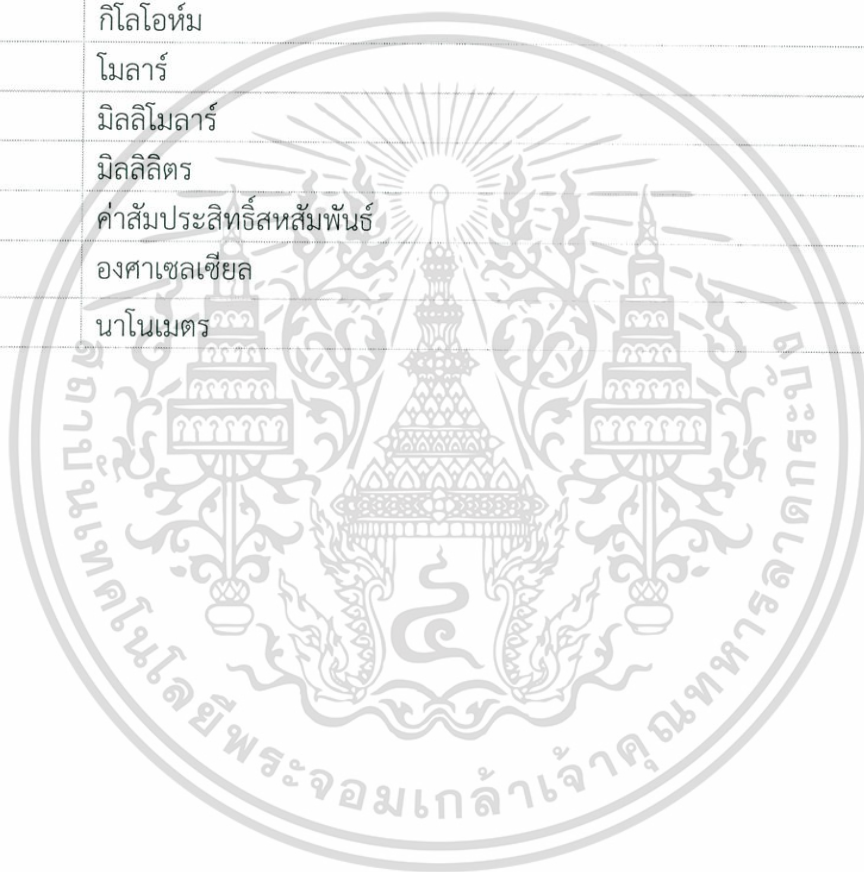
- 4.31 ความน่าจะเป็นในการเกิดปฏิกิริยาของสารวิเคราะห์ (A) สารตัวอย่างสัมผัสกับ MWCNTs โดยตรง (B) สารตัวอย่างสัมผัสทั้ง MWCNTs และ Nylon-6 (C) สารตัวอย่างสัมผัสกับพอลิเมอร์ Nylon-6 โดยตรง..... 78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
MWCNTs	ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น
MWCNTs-COOH	ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรด
AgNPs	อนุภาคเงินระดับนาโน
COPSS	โพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาอิกแอซิด
DI water	น้ำปราศจากไอออน
PSS	โพลีไซเตียมสไตรีนซัลโฟเนต
PDADMAC	โพลีไดแอลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์
k Ω	กิโลโอห์ม
M	โมลาร์
mM	มิลลิโมลาร์
ml	มิลลิลิตร
R ²	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
°C	องศาเซลเซียส
nm	นาโนเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

แอมโมเนีย (Ammonia; NH_3) เป็นแก๊สที่พบทั่วไปในบรรยากาศ สามารถเกิดขึ้นเองได้จากกระบวนการเน่าเปื่อย การย่อยสลายของซากพืช ซากสัตว์ มูลสัตว์ และสิ่งปฏิกูลต่างๆ ตามธรรมชาติ รวมทั้งน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และยังอาจพบแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่ำๆ ในควันทูบหรืออีกด้วย [1] และปัจจุบันแอมโมเนียได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากทั้งต่อภาคเกษตรกรรมและภาคอุตสาหกรรม สำหรับการใช้อัมโมเนียในอุตสาหกรรมที่พบได้บ่อย คือ อุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งและอุตสาหกรรมการผลิตปุ๋ย หากเกิดการรั่วไหลของแก๊สแอมโมเนียจากโรงงานอุตสาหกรรมจะทำให้แก๊สแอมโมเนียรวมตัวกับความชื้นในอากาศเกิดเป็นควันทูบสีขาวของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide; NH_4OH) เนื่องจากแก๊สแอมโมเนียมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี ซึ่งแก๊สแอมโมเนียที่พบตามธรรมชาติหรือเกิดการรั่วไหลจากโรงงานอุตสาหกรรม จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตเป็นจำนวนมาก เนื่องจากแก๊สแอมโมเนียเป็นแก๊สที่ไม่มีสี มีกลิ่นรุนแรง และมีฤทธิ์กัดกร่อนสูง [2] แอมโมเนียจึงจัดเป็นแก๊สพิษชนิดหนึ่ง ซึ่งความเป็นพิษของแก๊สแอมโมเนียที่มีต่อร่างกายจะเกิดทั้งในลักษณะที่เป็นอาการแบบเฉียบพลัน ถ้าสัมผัสหรือสูดดมแก๊สแอมโมเนียที่มีความเข้มข้นต่ำหรือเกิดอาการแบบระยะยาว ถ้าสัมผัสหรือสูดดมแก๊สแอมโมเนียที่มีความเข้มข้นสูง เช่น ทำให้เกิดเป็นโรคหอบหืด เป็นต้น ฉะนั้นในงานวิจัยนี้จึงสร้างวิธีการทดลองในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย โดยใช้เทคนิคการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) ของแผ่นฟิล์มบางในระดับนาโนที่เกิดจากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotube; MWCNTs) โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-layer technique) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่าย รวดเร็ว และมีราคาถูก

ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube; CNTs) [3] เป็นวัสดุรูปทรงกระบอกกลวง ซึ่งเกิดจากอะตอมของธาตุคาร์บอนเชื่อมโยงกันเป็นตาข่ายรูปหกเหลี่ยมแล้วม้วนตัวเป็นท่อ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ระหว่าง 0.4-4.0 นาโนเมตร และมีความยาวของท่อประมาณ 10 ไมโครเมตร ท่อนาโนคาร์บอนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว (Single-walled carbon nanotube; SWCNTs) และท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กกล้า มีน้ำหนักเบา และมีความยืดหยุ่นสูง ในขณะเดียวกันท่อนาโนคาร์บอนมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี รวมทั้งยังมีคุณสมบัติในการนำความร้อนได้ดีอีกด้วย จึงทำให้ในปัจจุบันได้มีการนำท่อนาโนคาร์บอนมาใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น ใช้ทำตัวเก็บประจุ แบตเตอรี่ อุปกรณ์ทางไฟฟ้าหรือทำเป็นเส้นใยเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุแต่งประกอบ เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงได้นำท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย โดยการทำให้ท่อนาโนคาร์บอนให้อยู่ในรูปของสารละลาย แต่เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนยังมีปัญหาเนื่องจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals force) ระหว่างท่อด้วยกัน ส่งผลให้การกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในน้ำหรือในตัวทำละลายได้ไม่ดี ซึ่งยากต่อการนำไปใช้ในเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบโควาเลนต์ (Covalent surface modification) [4] โดยการทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บนพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนด้วยการเติมกรดไนตริก (HNO_3) และ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอน เช่น หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group; $-\text{COOH}$) ซึ่งพบว่าจากการใช้ตัวออกซิไดซ์ดังกล่าวเป็นการเพิ่มขั้วให้แก่ท่อนาโนคาร์บอน จึงทำให้ท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวได้ดีในน้ำหรือในตัวทำละลาย แล้วทำการสร้างฟิล์มบางท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น โดยที่เราสามารถควบคุมจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางได้จากนั้นนำฟิล์มบางท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นมาตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยวิธีการวัดค่าความต้านไฟฟ้า (Resistance)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อกระจายท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น โดยวิธีการปรับปรุงพื้นผิวแบบโคเวเลนต์ (Covalent surface modification)
- 2) เพื่อศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนด้วยวิธีทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4) เป็นตัวรีดิวซ์และโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาอิกแอซิด (COPSS) เป็นสารรักษาเสถียรภาพ
- 3) เพื่อศึกษาการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNTs), อนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) และท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นร่วมกับอนุภาคเงินระดับนาโน (MWCNTs/AgNPs) โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-layer technique)
- 4) เพื่อศึกษาการตอบสนองของชั้นฟิล์มบาง MWCNTs และ MWCNTs/AgNPs ที่มีผลต่อแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia gas) โดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance)

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) หาความเข้มข้นของตัวรักษาเสถียรภาพ COPSS ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน
- 2) ทาสภาวะต่างๆที่เหมาะสมในการสร้างแผ่นฟิล์มบางท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNTs), อนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) และท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นร่วมกับอนุภาคเงินระดับนาโน (MWCNTs/AgNPs) โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น
- 3) ศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia gas) โดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สร้างท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่มีความสามารถในการกระจายตัวได้ดีในน้ำ โดยใช้กรดแก่ (HNO_3 , H_2SO_4) เป็นตัวออกซิไดซ์ในการช่วยปรับปรุงพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น
 - 2) สังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนด้วยวิธีทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4) เป็นตัวรีดิวซ์ และโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาอิกแอซิดเป็นสารรักษาเสถียรภาพ
 - 3) นำอนุภาคเงินระดับนาโนมายึดติดบนท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ปรับปรุงพื้นผิวเพื่อนำไปใช้ตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia gas) โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น
 - 4) สามารถนำแผ่นฟิล์มบางท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNTs), อนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) และท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นร่วมกับอนุภาคเงินระดับนาโน (MWCNTs/AgNPs) มาตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia gas) ด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าได้
- ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

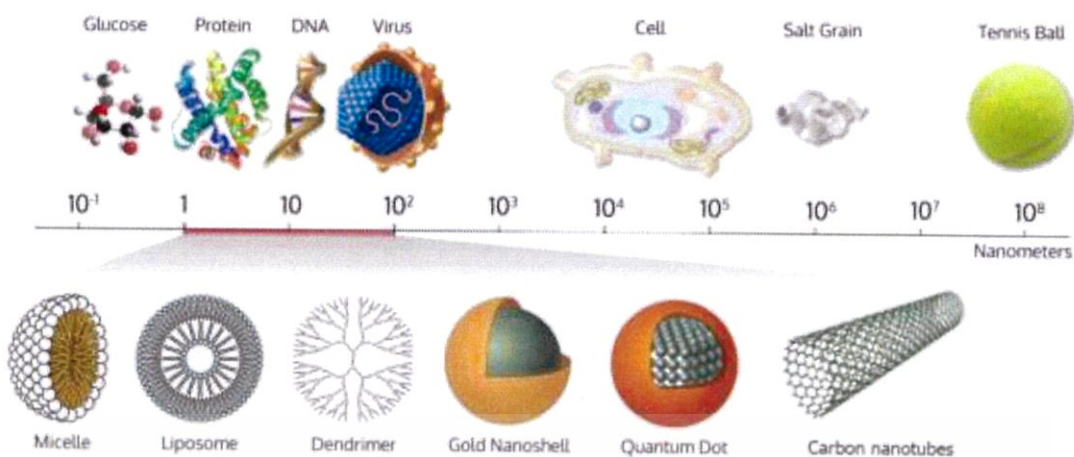
2.1 นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology)

นาโนเทคโนโลยีเป็นสาขาวิชาที่ใหม่ (Multidisciplinary) ที่ต้องอาศัยความรู้วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีจากหลายสาขาวิชารวมเข้าด้วยกัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ในงานทางวัสดุศาสตร์ (Nanomaterial) อิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics) และวิทยาศาสตร์ชีวภาพ (Nanobiotechnology) ก่อให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ที่ได้รับการออกแบบ และการควบคุมตั้งแต่การจัดเรียงอะตอมหรือโมเลกุล ที่มีขนาดหนึ่งในพันล้านส่วนของหนึ่งเมตรไปจนกลายเป็นชิ้นส่วนขนาดใหญ่ คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotubes; CNTs) เป็นวัสดุที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีคุณสมบัติหนึ่งคือสามารถดูดซับแก๊สหรือสารเคมี เช่น ไนโตรเจน, ไฮโดรเจน, อาร์กอน, แอมโมเนีย, เอทานอล, เมทานอล เป็นต้น ซึ่งสามารถเลือกนำมาประยุกต์ใช้ทำเป็นเซนเซอร์เคมีได้ [5]

นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) คือ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้าง หรือการวิเคราะห์ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1-100 นาโนเมตร) รวมถึงการออกแบบหรือการประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้สร้างหรือวิเคราะห์วัสดุ ในระดับที่เล็กมากๆ เช่น การจัดอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติพิเศษขึ้นไม่ว่าทางด้าน ฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ [6]

จุดเริ่มต้นของนาโนเทคโนโลยีนั้นเริ่มต้นจาก ศาสตราจารย์ริชาร์ด ฟิลลิปส์ ฟاینแมน (Richard Phillips Feynman) นักฟิสิกส์ชาวอเมริกัน ที่ได้กล่าวถึงความเป็นไปได้ในการจัดการกับสิ่งของในระดับอะตอม เรื่อง "There's Plenty of Room at the Bottom" ที่สถาบันเทคโนโลยีแคลิฟอร์เนีย เมื่อปี ค.ศ. 1959 จากคำบรรยายของฟاینแมนในครั้งนั้นได้จุดประกายให้นักวิทยาศาสตร์เริ่มหันมาสนใจ และสร้างอุปกรณ์ในการจัดการในระดับอะตอม ซึ่งแนวคิดนี้ ทำให้ฟاینแมนได้รับการยกย่องให้เป็น "บิดาแห่งนาโนเทคโนโลยี" ต่อมาในปี ค.ศ.1981 เกร็ด บินนิง (Gerd Binnig) และ ไฮน์ริช โรห์เธอร์ (Heinrich Rohrer) จากบริษัทไอบีเอ็ม ซูริก ได้ประดิษฐ์เครื่องมือที่สามารถมองเห็นการจัดเรียงอะตอมของธาตุต่างๆ สำเร็จเป็นครั้งแรก นั่นคือ กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning tunneling microscope; STM) ซึ่งผลงานชิ้นนี้ทำให้นักฟิสิกส์ทั้งสองท่านได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1986 [7] ด้วยการพัฒนาความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี ทำให้เราทราบว่าเมื่อวัตถุต่างๆ มีโครงสร้างในระดับนาโนเมตรแล้ว จะส่งผลให้วัตถุมีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างไปจากเดิม ทำให้เกิดคุณสมบัติพิเศษที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ เช่น การนำท่อนาโนคาร์บอนมาใช้เป็นอุปกรณ์ สำหรับตรวจวัดทางด้านเคมี โดยเฉพาะการตรวจวัดแก๊สต่างๆ ซึ่งอาศัยลักษณะสมบัติเฉพาะของท่อนาโนคาร์บอน ในการนำไฟฟ้า การนำความร้อน และลักษณะสมบัติทางกล ตลอดจนลักษณะสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) [8] ที่ไวต่อการทำปฏิกิริยากับแก๊สที่เข้ามาสัมผัสกับผนังท่อนาโนคาร์บอน ทำให้สามารถตรวจวัดแก๊สต่างๆ เช่น ฮีเลียม ไนโตรเจน ไฮโดรเจน เป็นต้น รวมไปถึงแก๊สอินทรีย์ที่ระเหยได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ขนาดวัตถุต่างๆ ในหน่วยนาโนเมตร [9]

จากรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงขนาดของนาโนเทคโนโลยีในช่วง 1 ถึง 100 นาโนเมตร เป็นสิ่งที่มีขนาดเล็กมากๆ ที่คนเราไม่สามารถมองเห็นได้ ดังนั้นในการมองเห็นสิ่งเหล่านี้จะต้องอาศัยเครื่องมือเฉพาะ เช่น กล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกน (Scanning probe microscopy; SPM), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope) เป็นต้น

วิทยาศาสตร์นาโน (Nanoscience) คือ วิทยาศาสตร์แขนงหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวัสดุอินทรีย์ อนินทรีย์ และรวมไปถึงสารชีวโมเลกุล ที่มีโครงสร้างสามมิติ ยาว กว้าง สูง ด้านใดด้านหนึ่งอยู่ระหว่าง 1-100 นาโนเมตร โดยวัสดุชนิดใดก็ตาม ถ้ามีมิติทั้งสามเล็กกว่า 100 นาโนเมตร วัสดุนั้นก็จะถูกเรียกว่า สาม-ดี วัสดุนาโน (3-D nanomaterial) ถ้ามีแค่ สอง หรือ หนึ่งมิติ ที่เล็กกว่า 100 นาโนเมตร ก็จะถูกเรียกว่าวัสดุ สอง-ดี (2-D) และ หนึ่ง-ดี (1-D) ตามลำดับ คุณสมบัติของวัสดุนาโนจะแตกต่างจากวัสดุขนาดใหญ่ (Bulk materials) ไม่ว่าจะเป็คุณสมบัติ ทางฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพล้วนแล้วแต่มีคุณสมบัติเฉพาะตัว ดังนั้นถ้าพูดถึงวิทยาศาสตร์นาโนก็จะเป็นการสร้างหรือศึกษาวัสดุที่มีโครงสร้างในระดับนาโนเมตร โดยผลลัพธ์ที่ได้ก็คือ จะได้วัสดุนิดใหม่หรือรู้คุณสมบัติที่แตกต่างและน่าสนใจ โดยคุณสมบัติเหล่านั้นจะถูกอธิบายด้วยทฤษฎีทางควอนตัม (Quantum theory) [6]

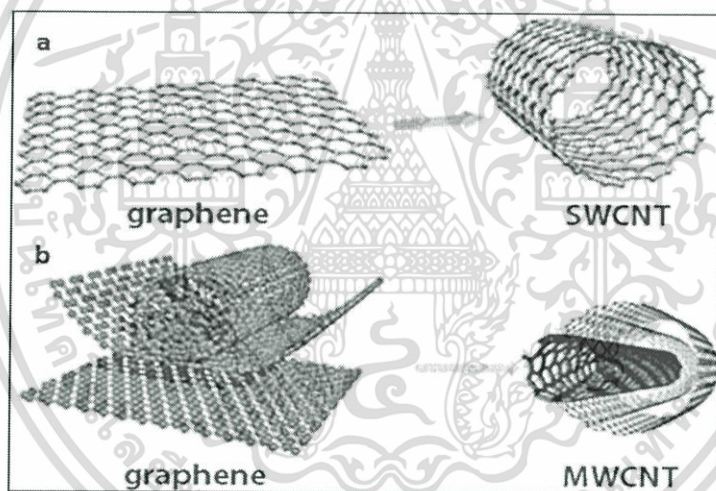
2.2 วัสดุนาโน (Nanomaterials)

เป็นวัสดุที่สามารถเป็นได้ทั้ง โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์และคอมโพสิต ซึ่งถูกสังเคราะห์ขึ้นมาโดยการตัดแปลงการจัดเรียงตัวของ อะตอมหรือโมเลกุลให้มีช่วงขนาด 0.1-100 นาโนเมตร ซึ่งเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นผม ประมาณ 1 แสนเท่า สมบัติ และพฤติกรรมต่างๆ ของวัสดุนาโนเหล่านี้ เช่น สมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกล และสมบัติทางแม่เหล็ก มีความแตกต่างจากวัสดุนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในระดับที่เรา ค้นเคย วัสดุนาโนสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็นหลายกลุ่มตามการประยุกต์ใช้สอยที่สำคัญ ได้แก่ ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes), อนุภาคนาโน (Nanoparticles), นาโนคอมโพสิต (Nanocomposites) และฟิล์มบางนาโน (Nanofilms) เป็นต้น [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube; CNTs)

การค้นพบท่อนาโนคาร์บอนครั้งแรกเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นชื่อ ซุมิโอะ อิจิมา (Sumio Iijima) ขณะที่เขาใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงมาตรวจสอบเขม่าสีดำที่ได้จากการเตรียมฟูลเลอรีนจากวิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc discharge) แล้วสังเกตเห็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกับรากไม้ เป็นเส้นยาวบางจับกันเป็นกลุ่ม โดยมีโครงสร้างของอะตอมเป็นระเบียบ และสมมาตร โดยให้ชื่อว่าท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes) ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนที่ค้นพบครั้งแรกนั้นคือ ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes; MWCNTs) จากนั้นในปี 1993 อิจิมา และทีมวิจัยสามารถสร้างท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (Single walled carbon nanotubes; SWCNTs) ขึ้นมาได้จึงทำให้ท่อนาโนคาร์บอนได้รับความสนใจในการศึกษา การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนให้มีขนาด และคุณสมบัติตามที่ต้องการ รวมทั้งการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ เช่น การนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต การนำไปประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือใช้ในระบบขนส่งยาแบบใหม่ เป็นต้น [11] ท่อนาโนคาร์บอนเกิดจากอะตอมของคาร์บอนจัดเรียงตัวกันเป็นแบบวงหกเหลี่ยมต่อกันคล้ายแผ่นแกรไฟีนที่ม้วนเป็นท่อเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bonding) ซึ่งอาจเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า โครงสร้างรังผึ้ง



รูปที่ 2.2 การม้วนแผ่นแกรไฟีนของ (a) ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว และ (b) ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น [12]

จากรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอนที่มีลักษณะการม้วนของแผ่นแกรไฟีนเป็นท่อทรงกระบอกของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว และท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น โดยจะโค้งตัวม้วนเป็นแกนจากด้านหนึ่งไปบรรจบอีกด้านหนึ่ง ซึ่งนักเคมีมีแนวความคิดว่าท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีลักษณะเป็น Monoelemental polymer (พอลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยธาตุเพียงชนิดเดียว ซึ่งแตกต่างจากพอลิเมอร์ที่พบโดยทั่วไปที่จะพบอะตอมของธาตุอื่นด้วย) [12]

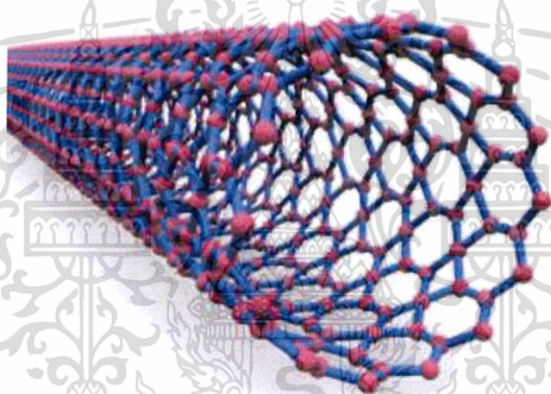
ท่อนาโนคาร์บอนยังมีคุณสมบัติที่แข็งแรงและเหนียวกว่าเหล็กกล้า สามารถนำไฟฟ้าหรือกลายเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ซึ่งขึ้นอยู่กับทิศทางของแนวการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนบนผนังท่อนาโนคาร์บอน [13] ปัจจุบัน ได้มีการนำท่อนาโนคาร์บอนมาใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ ที่ใช้สมบัติในระดับจุลภาคของสาร เช่น กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแบบกราด รวมทั้งการใช้เป็นส่วนผสมกับวัสดุเอกซสารนี้เป็นเอกซสารที่สว่างไว้มากสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่น่าจะเหมาะให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อื่น เช่น พอลิเมอร์ เพื่อให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ยังมีการพัฒนาไปสู่สิ่งที่เรียกว่า สายนาโน (Nanowire) ซึ่งจะสามารถใช้เป็นชิ้นส่วนทรานซิสเตอร์หรือประตูสัญญาณตรรกะ (Logic gates) อันจะทำให้เกิดการปฏิวัติกระบวนการผลิต ในระบบอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ [14]

2.2.1.1 ประเภทของท่อนาโนคาร์บอน

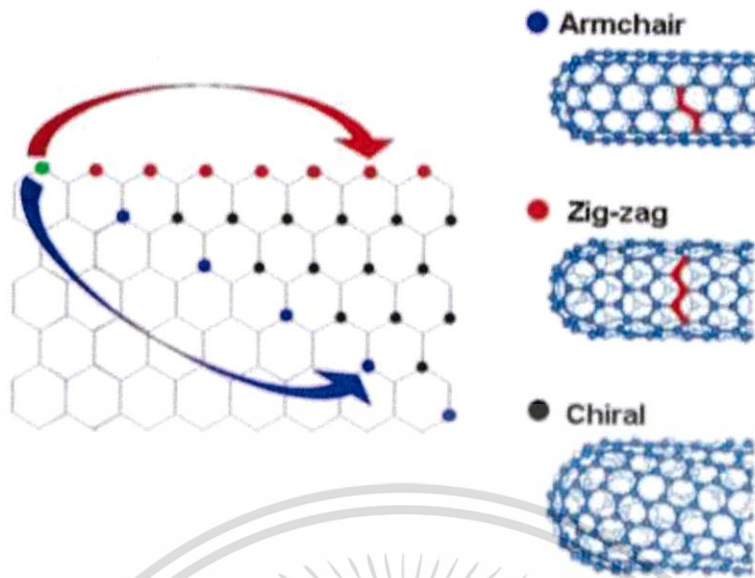
ท่อนาโนคาร์บอนแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามจำนวนชั้นของผนังท่อ คือ ถ้าท่อนาโนคาร์บอนมีผนังชั้นเดียว เรียกว่า ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว (Single-walled nanotubes; SWCNTs) ส่วนท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้น เรียกว่า ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (Multi-walled nanotubes; MWCNTs) โดยท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น มีการยึดติดกันระหว่างชั้นด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals force) ส่วนใหญ่แล้วท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.4 นาโนเมตรไปจนถึงหลายร้อยนาโนเมตร และมีความยาวตั้งแต่นาโนเมตรไปจนถึงเซนติเมตร [15]

(1) ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว (Single-walled nanotubes; SWCNTs)



รูปที่ 2.3 ภาพท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว [16]

จากรูปที่ 2.3 เป็นภาพของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวจะมีลักษณะโครงสร้างที่คล้ายกับแผ่นแกรฟีน (Graphene sheet) ม้วนตัวเกิดเป็นท่อทรงกระบอกกลวง ท่อนาโนคาร์บอนจึงมีผนังของอะตอมคาร์บอนที่จัดเรียงพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม ซึ่งการม้วนแผ่นแกรฟีนขึ้นมาเพื่อต่อกันเป็นท่อนาโนคาร์บอนจะมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันอยู่ 3 แบบ คือ Armchair, Zig-zag และ Chiral [16]



รูปที่ 2.4 ท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดจากการม้วนแผ่นแกรฟีนแต่ละแบบ [17]

จากรูปที่ 2.4 เมื่อม้วนแผ่นแกรฟีนโดยให้คาร์บอนอะตอมที่อยู่ตรงตำแหน่งจุดสีเขียวไปเชื่อมต่อกับคาร์บอนอะตอมที่อยู่ตรงตำแหน่งจุดสีน้ำเงินจุดใดก็ได้ จะทำให้เกิดเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่มีโครงสร้างแบบ Armchair แต่ถ้าม้วนไปเชื่อมต่อกับคาร์บอนอะตอมที่อยู่ตรงตำแหน่งจุดสีแดงจะได้ท่อนาโนคาร์บอนแบบ Zig-zag ส่วนการม้วนไปเชื่อมต่อกับคาร์บอนอะตอมที่อยู่ตรงตำแหน่งจุดสีดำจะได้ท่อนาโนคาร์บอนแบบ Chiral

โดยท่อนาโนคาร์บอนที่มีโครงสร้างแบบ Armchair มีการนำไฟฟ้าแบบโลหะ ส่วนท่อนาโนคาร์บอนที่มีโครงสร้างแบบ Zig-zag และ Chiral มีการนำไฟฟ้าแบบกึ่งตัวนำ [17]



(a) ขดแบบลวดสปริง

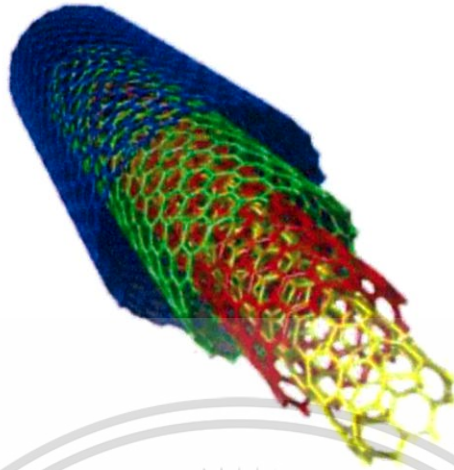
(b) ขดแบบขนมโดนัท

รูปที่ 2.5 รูปทรงของท่อนาโนคาร์บอนที่มีตำหนิ [18]

ในบางครั้งการม้วนของแผ่นแกรฟีนเพื่อให้เกิดเป็นท่อกว้างจะทำให้อะตอมคาร์บอนอาจจับกันเกิดเป็นรูปร่างแหวนห้าเหลี่ยมหรือเจ็ดเหลี่ยมได้ [18] ซึ่งถือว่าเป็นตำแหน่งที่มีตำหนิ (Defects) และส่งผลให้รูปทรงของท่อบิดโค้งงอเป็นรูปต่างๆได้ ดังรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (Multi-walled nanotubes; MWCNTs)



รูปที่ 2.6 ภาพท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น [16]

จากรูปที่ 2.6 เป็นภาพของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นจะมีลักษณะเหมือนแผ่นแกรไฟีนที่ม้วนเป็นท่อกลวงซ้อนกันตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป เป็นท่อทรงกระบอก อะตอมตามผนังของท่อมีการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ลักษณะการซ้อนกันจะเหมือนกับการซ้อนท่อเล็กในท่อใหญ่ ความยาว ความสมบูรณ์ของการเรียงตัว และการม้วนเกลียวที่แตกต่างกัน ไม่สามารถควบคุมอย่างแม่นยำได้ ซึ่งมีปริมาณจุดบกพร่องที่ค่อนข้างสูง ทำให้ความแข็งแรงของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นต่ำกว่าท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว [16]

2.2.1.2 คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษหลายประการ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน เช่น ชนิดของท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และลักษณะการม้วนตัวของท่อ เป็นต้น

(1) สมบัติเชิงกล

ท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็งแรงมากกว่าเพชร และแกรไฟท์ เพชรนั้นมีความแข็งแรงมากด้วย โครงสร้างแบบโครงตาข่าย จากการเชื่อมต่อระหว่างพันธะอะตอมคาร์บอนที่มีสี่ตำแหน่งอย่างลงตัว ในขณะที่โครงสร้างของแกรไฟท์นั้นมีคาร์บอนหนึ่งอะตอมเชื่อมพันธะกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกัน และอีกหนึ่งพันธะที่เหลือจะยึดกับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของแกรไฟท์จะมีความแข็งแรงมากเพชร แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนัก และสามารถเลื่อนได้ ด้วยลักษณะโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอนที่มีพันธะอะตอมคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร (สั้นกว่าเพชร) จึงทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็งแรงมากกว่าเพชรและแกรไฟท์ [19]

(2) สมบัติทางกายภาพ

ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว (SWCNTs) มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.7 ถึง 2 นาโนเมตร ส่วนท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNTs) มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออยู่ในช่วง 10 ถึง 300 นาโนเมตร และมีช่องว่างระหว่างชั้นของแต่ละท่อประมาณ 0.34-0.36 นาโนเมตร ความยาวท่อนาโนคาร์บอนทั่วไปอยู่ในระดับไมโครเมตร แต่สามารถทำให้ยาวถึง 20 เซนติเมตรได้ [19] การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี 2004 มีการรายงานว่านักวิทยาศาสตร์ในกลุ่มของลิ (Li) สามารถสร้างท่อ นาโนคาร์บอนที่มีความยาว 100 เมตรได้สำเร็จ ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีอัตราความยาวต่อเส้นผ่าน ศูนย์กลางสูงมาก ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงหรือการนำท่อนาโนคาร์บอนไปใช้ งานบางอย่างได้โดยตรง [19]

ท่อนาโนคาร์บอนมีน้ำหนักเบาโดยมีค่าความหนาแน่นเพียง 1.33-1.4 กรัมต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมที่มีความหนาแน่น 2.7 กรัมต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนยังเป็นโมเลกุลคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวมากถึง 1,250 ตารางกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จึงทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา [19]

(3) สมบัติทางไฟฟ้า

ท่อนาโนคาร์บอนมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดงสามารถ และท่อนาโนคาร์บอนเป็นได้ทั้งสารกึ่งตัวนำหรือเซมิคอนดักเตอร์ และเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดหรือซูเปอร์ คอนดักเตอร์ โดยขึ้นอยู่กับกระบวนการสังเคราะห์การจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนตามผนังของท่อ สัดส่วนองค์ประกอบ และวัสดุชนิดอื่นที่ผสมลงไปในการสร้างท่อนาโน [19]

การที่ท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะโครงสร้างผนังท่อที่แตกต่างกันนั้น ทำให้การ นำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนต่างกัน โดยโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอนแบบ Armchair จะแสดงสมบัติ ทางไฟฟ้าเหมือนตัวนำไฟฟ้า ในขณะที่โครงสร้างแบบ Zig-zag และ Chiral จะแสดงสมบัติทางไฟฟ้า เหมือนกึ่งตัวนำไฟฟ้า

(4) สมบัติทางความร้อน

การนำความร้อนของท่อนาโนคาร์บอนมีค่าสูงประมาณ 200 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (W/m.K) และบางรายงานกล่าวว่ามีค่าการนำความร้อนสูงถึง 6,000 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ซึ่งมากกว่า เพชร และแกรไฟต์ ซึ่งมีค่าประมาณ 2,000 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน หลายเท่านอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอน ยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 750 องศาเซลเซียส ในสภาวะปกติ และ 2,800 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะ สูญญากาศด้วย [19]

(5) สมบัติควอนตัม

เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนเป็นโครงสร้างที่เล็กมากในระดับนาโน ทำให้ท่อนาโน คาร์บอนมีคุณสมบัติควอนตัมด้วย คือ สามารถควบคุมการไหลของอิเล็กตรอนแบบไม่ต่อเนื่อง โดย สามารถควบคุมการไหลที่ละกลุ่มของอิเล็กตรอนหรือควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทีละตัวก็ได้ จึงได้มีการนำมาใช้งานในการผลิตเป็นทรานซิสเตอร์ที่มีความเร็วสูง และมีความต้านทานต่ำมาก รวมทั้งมีการพัฒนาที่จะนำท่อนาโนคาร์บอนไปใช้แทนโลหะในส่วนที่เป็นขั้วในตัวหลอดสำหรับจ่ายลำ อิเล็กตรอนในการประดิษฐ์จอภาพแบบรังสีแคโทดที่ใช้ในจอทีวีหรือจอคอมพิวเตอร์ [20]

นอกจากนี้ ท่อนาโนคาร์บอนยังมีคุณสมบัติเด่นอีกหลายประการ อย่างเช่น เป็นได้ทั้งตัวนำไฟฟ้า และกึ่งตัวนำไฟฟ้า สามารถยึดจับโมเลกุล และดูดซับแก๊สได้เป็นอย่างดี เป็นต้น

2.2.1.3 การปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนคุณสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติเชิงกลที่โดดเด่น แต่ในทางกลับกันท่อนาโนคาร์บอนมีความสามารถในการกระตัวที่ต่ำ เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่สร้างแรงดึงดูดกับเมทริกซ์ แต่ท่อนาโนคาร์บอนมีแรงแวน เดอร์วาลส์ (Van der waals force) ระหว่างท่อด้วยกันเองที่เกิดจากไพอิเล็กตรอน (π - π interreccion) จึงมีวิธีการที่ช่วยให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการกระจายตัวได้ดีขึ้น โดยอาศัยการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโน

เอกลักษณะเป็นอย่างไรจึงมีผลอย่างไรต่อการใช้งานในเชิงวิศวกรรม และข้อดีข้อเสียของวัสดุนี้น่าสนใจ การค้า

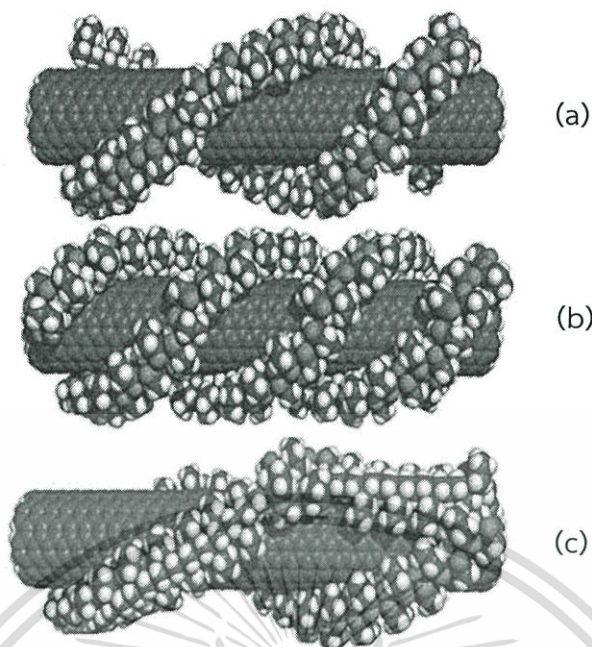
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนด้วยวิธีทางเคมีทั้งชนิดที่เกิดพันธะโคเวเลนต์ (Covalent surface modification) หรือไม่เกิดพันธะโคเวเลนต์ (Non-covalent surface modification) [21]

(1) การปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนโดยไม่เกิดพันธะโคเวเลนต์ (Non-covalent surface modification)

ในปัจจุบันวิธีการตัดแปรหมู่ฟังก์ชันชนิดนี้กำลังเป็นที่สนใจอย่างมากในการพัฒนาวัสดุคอมโพสิต เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ทำลายโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอน ทำให้สมบัติต่างๆของท่อนาโนคาร์บอนไม่เปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ตามการปรับปรุงพื้นผิวดังนี้ยังคงมีปัญหาในเรื่องประสิทธิภาพในการรับและส่งผ่านแรง เนื่องจากการเชื่อมต่อกันระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและเมทริกซ์ไม่ได้เกิดการสร้างพันธะซึ่งกันและกัน โดยเกิดเพียงแรงกระทำระหว่างกัน เช่น พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding), แรงกระทำระหว่างไพอิเล็กตรอน (π - π interrection), การยึดเหนี่ยวกันด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force), แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals) และแรงกระทำระหว่างขั้ว (Hydrophobic and Hydrophilic interaction) เป็นต้น [22]

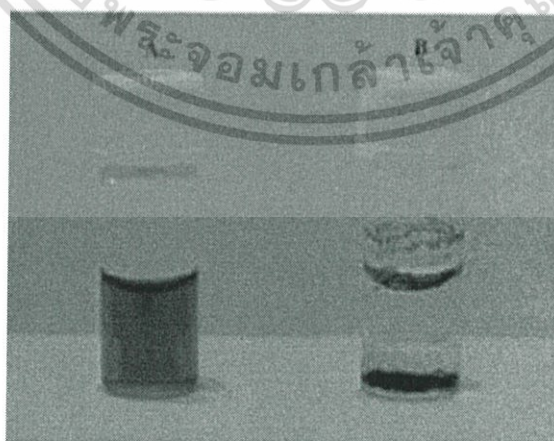
จากงานวิจัยของ O'Connell และคณะ [23] ได้ใช้วิธี Non-covalent surface modification เพื่อช่วยในการกระจาย SWCNTs ในสารละลาย โดยการเติม SWCNTs ลงในน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิว Sodium dodecyl sulfate (SDS) จากนั้นนำสารละลายผสมไปผสมด้วยเครื่องผสมแบบแรงเฉือน (Shear mixer) และเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) เพื่อช่วยให้ SWCNTs เกิดการกระจายตัวในสารละลาย แล้วเติมสารละลาย Poly(vinyl pyrrolidone; PVP) ลงไป โดย PVP ทำหน้าที่ห่อหุ้ม SWCNTs ที่กระจายตัวอยู่ในสารละลายผสม จากนั้นจะกำจัด PVP ที่มากเกินไปด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยงความเร็วสูง (Ultracentrifugation) เมื่อศึกษาสัญญาณด้วยเครื่อง AFM พบว่าท่อนาโนคาร์บอนถูกเคลือบด้วยชั้นพอลิเมอร์ของ PVP และ SWCNTs มีการกระจายตัวดีและไม่เกาะกันเป็นกลุ่ม เมื่อทดสอบการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในตัวทำละลาย พบว่าท่อนาโนคาร์บอนสามารถแขวนลอยในตัวทำละลาย โดยไม่เกิดการตกตะกอนเมื่อเวลาผ่านไป 1 เดือน จากผลดังกล่าวสันนิษฐานว่าพอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มท่อนาโนคาร์บอนช่วยลดแรงแวนเดอร์วาลส์ที่เกิดขึ้นระหว่างท่อนาโนคาร์บอนด้วยกันเอง ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีการกระจายได้ดีขึ้น โดลักษณะการห่อหุ้มท่อนาโนคาร์บอนด้วยพอลิเมอร์ แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะการห่อหุ้มท่อนาโนคาร์บอนของพอลิเมอร์ โดยภาพ (a) เป็นการห่อหุ้มแบบสองเกลียว (b) เป็นการห่อหุ้มแบบสามเกลียว และ (c) เป็นการห่อหุ้มแบบสลับกันไปมา [23]

จากรูปที่ 2.7 จะเป็นลักษณะการห่อหุ้มท่อนาโนคาร์บอนด้วยพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นการยึดจับกันแบบนอน-โคเวเลนต์ ด้วยอันตรกิริยาแบบ π - π ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ และอันตรกิริยาการถ่ายโอนประจุพอลิเมอร์ [24]

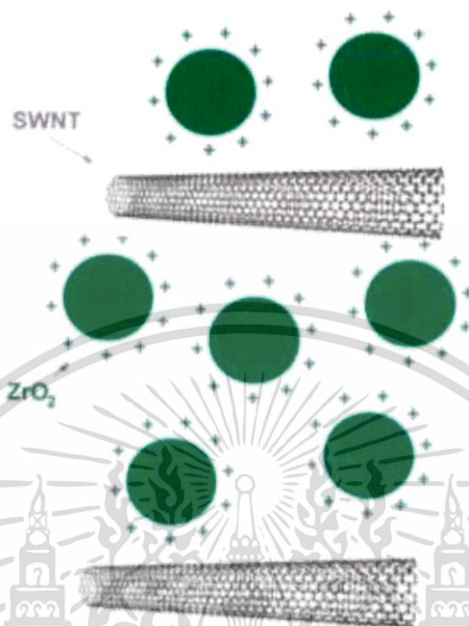
จากงานวิจัยของ Jin Zhu และคณะ [25] ได้ใช้วิธี Non-covalent surface modification โดยการเติม SWCNTs ลงในน้ำกลั่นและเติม SWCNTs ลงในสารละลาย ZnO₂ จากนั้นนำสารละลายผสมทั้งสองชนิดนี้ไปทำการโซนิเคตด้วยเครื่อง Ultrasonic เพื่อให้ SWCNTs เกิดการกระจายในสารละลาย และตั้งสารละลายทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การกระจายตัวของ SWCNTs ใน (A) สารละลาย ZnO₂ และ (B) น้ำกลั่น เมื่อตั้งสารละลายทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.8 อธิบายได้ว่า เมื่อตั้งสารละลายทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง พบว่ารูปที่ 2.8(A) คือ SWCNTs กระจายตัวอยู่ในสารละลาย ZnO_2 ได้ เนื่องจาก SWCNTs ถูกเคลือบด้วยอนุภาคของ ZnO_2 และรูปที่ 2.8(B) คือ SWCNTs ตกตะกอน เนื่องจาก SWCNTs ไม่ถูกเคลือบด้วยอนุภาค ZnO_2



รูปที่ 2.9 การกระจายของ SWCNTs เนื่องมาจากแรงผลักระหว่างประจุบวกของ ZnO_2 [25]

จากรูปที่ 2.8 อธิบายได้ว่าเมื่อ SWCNTs ถูกเคลือบด้วย ZnO_2 จะทำให้ SWCNTs กระจายตัวอยู่ในสารละลาย ZnO_2 ได้ เนื่องจากประจุบวกของ ZnO_2 จะไปลดแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน

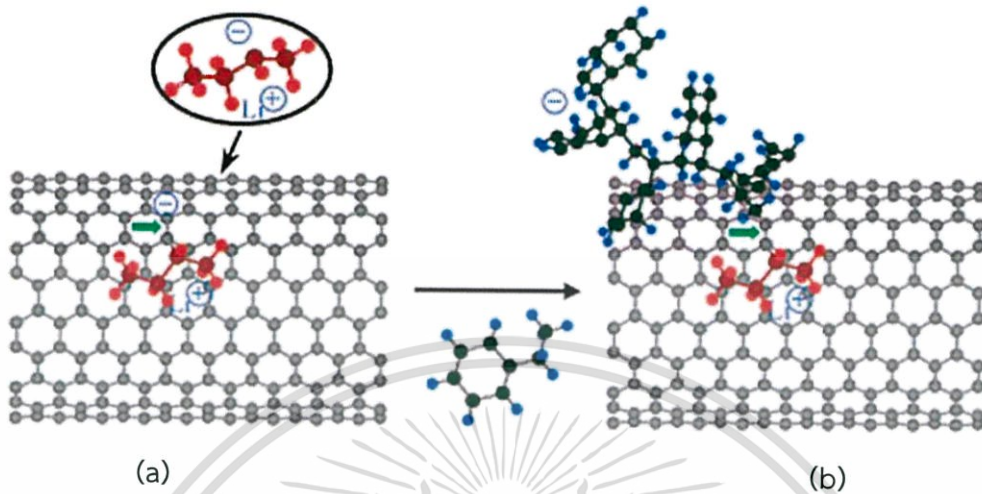
(2) การปรับปรุงพื้นผิวแบบโควาเลนต์ (Covalent surface modification)

การปรับปรุงพื้นผิววิธีนี้ เป็นการตัดแปรหมู่ฟังก์ชันที่บริเวณพื้นผิว ทำให้โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนเกิดจุดบกพร่องขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอน โดยหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นจะช่วยทำให้การยึดติดระหว่างท่อนาโนคาร์บอน และ Matrix ดีขึ้น ส่งผลให้ท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวได้ดีขึ้น โดยการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการตัดแปรหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน, การเกิดปฏิกิริยาการเติม (Addition reaction) ที่พื้นผิวท่อนาโนคาร์บอน และการเกิดปฏิกิริยาแทนที่ของ Fluorinate CNTs เป็นต้น ซึ่งเมื่อผ่านการตัดแปรหมู่ฟังก์ชันแล้วจะทำให้โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนบางส่วนถูกทำลาย ดังนั้นการปรับปรุงพื้นผิววิธีนี้ควรคำนึงถึงวัตถุประสงค์ในการใช้งานด้วย [21]

จากงานวิจัยของ G. Viswanathan และคณะ [26] ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยา In-situ polymerization ของสายโซ่พอลิสไตรีนลงบนพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอน โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยา Anionic polymerization โดยการนำท่อนาโนคาร์บอนมากกระจายตัวใน Cyclohexane จากนั้นเติม Butyllithium ในปริมาณมากเกินไป ทำให้เกิด Carbanion ที่บริเวณพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอน ส่งผลให้เกิดการจับตัวกันของท่อนาโนคาร์บอนลดลง เนื่องจากเกิดการผลักรันระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุลบที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอน โดยประจุลบดังกล่าวยังสามารถทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยา Polymerization ของสไตรีนมอนอเมอร์ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.10 การเกิดปฏิกิริยา Anionic polymerization กับสไตรีนมอนอเมอร์ของท่อนาโนคาร์บอน ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีการตัดแปรรูปร่าง [26]

จากรูปที่ 2.10 เป็นการสร้าง Carbanion และการเกิดปฏิกิริยา Polymerization โดยที่รูปที่ 2.10(a) แสดงให้เห็นถึงการเติม Butyllithium ลงไปในสารละลาย SWCNTs ทำให้ Butyllithium เกิดพันธะที่ผนังท่อนาโน โดยการแลกเปลี่ยนประจุ และรูปที่ 2.10(b) แสดงให้เห็นว่า Carbanion จะไปทำลายพันธะคู่ในพอลิสไตรีน และเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับสไตรีนมอนอเมอร์

จากงานวิจัยของ V. Datsyuk และคณะ [27] ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของท่อนาโนคาร์บอนโดยการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันคือ กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (20.2 wt%), กรดไนตริกเข้มข้น (65 wt%), กรดซัลฟูริกเข้มข้น (96 wt%) ผสมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30 wt%) ในอัตราส่วน 70:30 และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (25 wt%) ผสมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30 wt%) ในอัตราส่วน 50:50 เป็นต้น พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวและมีการให้ความร้อนแบบรีฟลักซ์ ทำปฏิกิริยาจุดบกพร่องบนพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนเป็นจำนวนมาก และท่อนาโนคาร์บอนที่ได้มีขนาดสั้นลง การใช้สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้นผสมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่ามีปริมาณหมู่คาร์บอกซิลิกน้อยกว่าการใช้กรดไนตริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่จะไม่เกิดจุดบกพร่องปรากฏอยู่บริเวณพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอน

2.2.2 อนุภาคเงินระดับนาโน (Silver nanoparticles; AgNPs)

เป็นที่รู้จักกันอย่างดี มานานกว่า 100 ปีพอกๆ กับทอง และทองแดง สมบัติของเงินที่สำคัญคือ ที่เกี่ยวกับการนำความร้อน และนำไฟฟ้า ในด้านสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการใช้เป็นตัวทำลายหรือยับยั้งการเจริญของเชื้อโรค สำหรับอนุภาคเงินระดับนาโน พบว่า จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้งาน ซึ่งเป็นผลมาจาก การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร ปัจจุบันได้มีความพยายามที่จะนำอนุภาคเงินระดับนาโนมาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องหนัง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติในการต่อต้านเชื้อโรคที่มีความปลอดภัย และมีประสิทธิภาพสูง [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

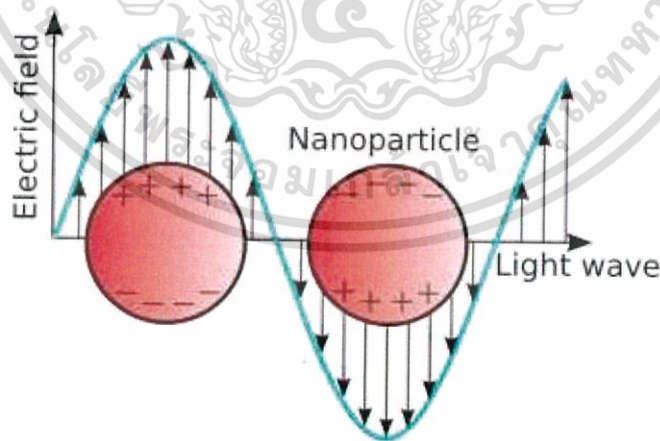
อนุภาคเงินระดับนาโนมีอัตราส่วนพื้นผิวต่อปริมาตรสูงจึงมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี นอกจากนี้อนุภาคเงินระดับนาโนมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโน เช่น ทรงกลม (Nanosphere) ลูกบาศก์ (Nanocube) แท่ง (Nanorod) หรือแผ่น (Nanoplate) เป็นต้น [29] ปัจจุบันได้มีการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนในการประยุกต์ใช้งานในลักษณะต่าง ๆ กัน ซึ่งในด้านอุตสาหกรรมเคมี มีการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเพื่อใช้เป็นตัวตัววัดสารที่ต้องการวิเคราะห์ เช่น ตะกั่ว โปรท แก๊สพิษ เป็นต้น

2.2.2.1 คุณสมบัติของอนุภาคเงินระดับนาโน

อนุภาคเงินระดับนาโน เป็นอนุภาคที่มีคุณสมบัติเด่นเฉพาะตัว ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางการนำไฟฟ้า และคุณสมบัติทางความร้อน เป็นต้น

(1) สมบัติทางแสงของอนุภาคเงินระดับนาโน

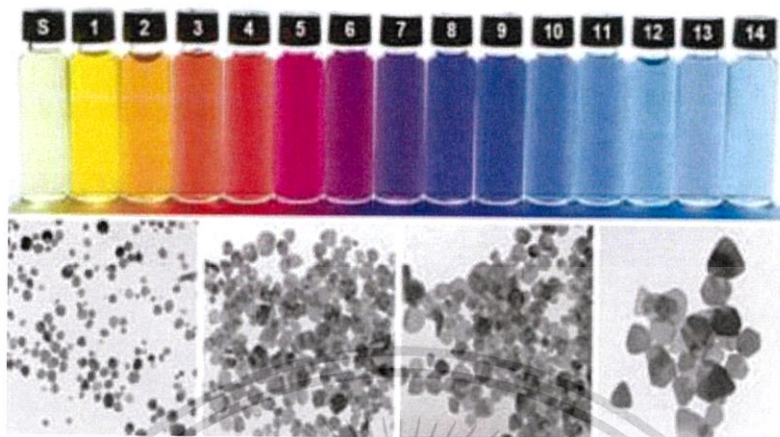
คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินระดับนาโนจะมีสีที่แตกต่างไปจากวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า เช่น อนุภาคนาโนแบบก้อนใหญ่จะมีสีเงินวาว แต่ถ้าย่อขนาดเงินให้เล็กลงไปเรื่อยๆจนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงที่มากทกระทบมากๆจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface plasmon resonance; SPR) ซึ่งเป็นคลื่นความหนาแน่นของประจุที่เกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอนอิสระที่มีลักษณะการสั่นพร้อมเพียงกันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยผิวต่อของโลหะกับสารไดอิเล็กทริก เช่น ระหว่างเงินกับอากาศหรือสารละลาย [30] อันตรกิริยาที่แสงกระทำต่ออนุภาคเงินระดับนาโนมีอยู่ 2 แบบ คือ แสงตกกระทบแล้วสะท้อนกลับไปด้วยความยาวคลื่นเท่าเดิม เรียกว่า “การกระเจิงแสง (Scattering)” และมีบางโฟตอนที่ถูกดูดกลืนแล้วเปลี่ยนไปเป็นพลังงานการสั่น เรียกว่า “การดูดกลืนแสง (Absorption)” [31] โดยที่สเปกตรัมพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Plasmon resonance spectrum) ของอนุภาคเงินระดับนาโน จะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และสภาพแวดล้อมรอบๆ อนุภาคนาโน อย่างไรก็ตามโลหะส่วนใหญ่จะมีความถี่เรโซแนนซ์อยู่ในช่วงใกล้อินฟราเรด ซึ่งอยู่นอกสเปกตรัมช่วงแสงที่เรามองเห็น



รูปที่ 2.11 กระบวนการสั่นเซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface plasmon resonance) ของอนุภาคนาโนทรงกลม [32]

จากรูปที่ 2.11 เป็นกระบวนการสั่นของเซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface plasmon resonance) ของอนุภาคนาโนทรงกลม กล่าวคือ เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกสั่นเป็นเอกสารที่ส่งวนเวียนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุอยู่ให้เพิ่มใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากการทบทวนอนุภาคระดับนาโนจะทำให้กลุ่มอิเล็กทรอนิกส์บริเวณพื้นผิวของอนุภาคนาโนเกิดการสั่นแบบเรโซแนนซ์



รูปที่ 2.12 สีของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่มีขนาดต่างๆกัน [33]

จากรูปที่ 2.12 การเปลี่ยนสีของคอลลอยด์ในน้ำของอนุภาคเงินระดับนาโนจากสีเหลืองเป็นสีฟ้า เมื่ออนุภาคเงินระดับนาโนเปลี่ยนรูปร่างจากทรงกลมไปเป็นอนุภาคเงินระดับนาโนรูปทรงสามเหลี่ยม ซึ่งการเปลี่ยนสีของคอลลอยด์สามารถอธิบายได้จาก Surface plasmon resonance spectrum เมื่อรูปร่าง และขนาดของอนุภาคเงินระดับนาโนมีรูปร่างที่เปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงของขนาดและรูปร่างของอนุภาคเงินระดับนาโนยืนยันได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM)

(2) การเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคเงินระดับนาโน

อนุภาคเงินระดับนาโน จะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface-to-volume) สูงมาก เมื่อสัดส่วนของอะตอมผิวหน้าจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง การที่วัสดุนาโนมีอะตอมจำนวนมากอยู่ที่บริเวณผิวหน้า จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวหน้าวัสดุได้ง่าย และยังเป็นส่งเสริมให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เนื่องจากอิทธิพลของเคมีผิวหน้าที่เห็นได้อย่างชัดเจน คือ การนำไปใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเคมี [34] ฉะนั้นอนุภาคระดับนาโนจึงมีพื้นที่ผิวสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวได้ง่าย

(3) จุดหลอมเหลว

อนุภาคเงินระดับนาโนจะมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าอนุภาคเงินแบบก้อน เนื่องจากอนุภาคนาโน มีปริมาณอะตอมผิวหน้ามาก โดยที่อะตอมผิวหน้าจะมีระดับพลังงานที่ใช้ในการยึดติดกันน้อยกว่าที่พบในอนุภาคแบบก้อนและจากอิทธิพลเคลวิน (Kelvin effect) จะพบว่าอนุภาคนาโนจะมีความดันไอสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้ระเหยได้ง่ายขึ้น [35]

อนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) สามารถสังเคราะห์ได้หลายแบบ เช่น ทรงกลม ทรงกระบอก พีระมิด และอื่นๆ แต่ที่สังเคราะห์ได้ง่ายจะเป็นพวกที่มีรูปร่างทรงกลม ซึ่งในวิธีการวิเคราะห์นั้นมีหลากหลายวิธี เช่น การสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical reduction) การสังเคราะห์ด้วยวิธีการยิงดวยเลเซอร์ (Laser ablation) การสังเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical reaction) และการสังเคราะห์ทางแสง (Photochemical reaction) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.2 การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน

การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน สามารถแบ่งวิธีการสังเคราะห์ที่ได้ ดังนี้

(1) การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนด้วยวิธีทางเคมี (Chemical reduction)

การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนด้วยวิธีทางเคมี จะประกอบด้วย 3 อย่างที่สำคัญ คือ

1. สารตั้งต้นหรือเกลือโลหะ (Metal salt)
2. ตัวรีดิวซ์ (Reducing agent)
3. สารเพิ่มความเสถียร (Stablizing agent)

ตัวรีดิวซ์ทางเคมีที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium borohydride; NaBH_4) และโซเดียมซิเตรต (Sodium citrate; $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$) เป็นต้น ซึ่งการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้เป็นเทคนิคที่ง่ายไม่ยุ่งยาก และสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคเงินระดับนาโนได้ โดยที่ขนาด รูปร่างของอนุภาคเงินระดับนาโนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเข้มข้นของสารเพิ่มความเสถียร เป็นต้น [36] ซึ่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์อนุภาคเงินเป็นดังสมการต่อไปนี้



(2) การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนด้วยวิธีการยิงด้วยเลเซอร์ (Laser ablation)

ทำการสังเคราะห์ด้วยการยิงเลเซอร์ไปที่สารละลายผสมซิลเวอร์ไนเตรทกับสารลดแรงตึงผิว จากนั้นพื้นผิวของอนุภาคเงินจะมีการดูดกลืนพลังงานที่มากกระทบ ทำให้เกิดความร้อนขึ้นบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเงิน ส่งผลให้มีการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอของเงินแล้วเกิดการควบแน่นเกิดเป็นอนุภาคเงินระดับนาโน นอกจากนี้ขนาดของอนุภาคเงินระดับนาโนควบคุมด้วยพลังงานของแสงเลเซอร์ ซึ่งการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้ถ้าใช้แสงเลเซอร์ที่มีพลังงานสูงในการสังเคราะห์จะมีผลทำให้อนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์มีลักษณะโค้งงอ [37]

จากงานวิจัยของ Takeshi Tsuji, Kenzo Iryo และคณะ [38] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนด้วยเทคนิคการใช้แสงเลเซอร์ โดยจะใช้แสงเลเซอร์ Nd:YAG ที่ความยาวคลื่น 1064, 532, หรือ 355 นาโนเมตร ไปที่เป้าซิลเวอร์ที่อยู่ในสารละลาย Sodium dodecyl sulfate (SDS) ซึ่งเป็นสารรักษาเสถียรภาพ พบว่าอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้เป็นรูปทรงกลม โดยแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 1064 นาโนเมตร อนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง น้อยกว่า 0.1 นาโนเมตร, แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร อนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.28 นาโนเมตร และแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 355 นาโนเมตร อนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.52 นาโนเมตร ฉะนั้นถ้าใช้แสงเลเซอร์ที่มีพลังงานสูงทำให้อนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเล็กกว่าการสังเคราะห์ด้วยแสงเลเซอร์ที่มีพลังงานต่ำ

(3) การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนด้วยวิธีทางแสง (Photochemical reation)

เป็นเทคนิคการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนด้วยการฉายแสงยูวีไปยังสารละลายผสมซิลเวอร์ไนเตรต, สารรักษาเสถียรภาพ และตัวรีดิวซ์ ซึ่งกลไกการเกิดอนุภาคนาโนเกิดจากแสงไปกระตุ้น Ag^+ ให้ไปยังสภาวะกระตุ้น จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวไปเป็น Ag^0

จากงานวิจัยของ Sasanand, P.Gopal, K.G และคณะ [39] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน เพื่อใช้เปรียบเทียบสีการเป็นตัวรับรู้แอมโมเนีย ในการสังเคราะห์อนุภาคเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังบริษัทอื่นหรือใช้ในการค้า

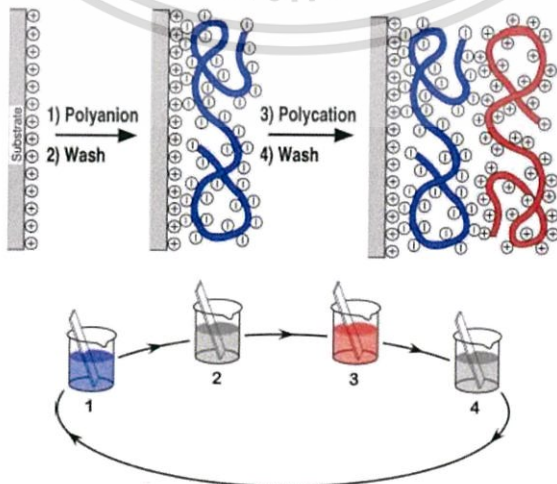
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับนาโนโดยทั่วไปจะใช้วิธีการรีดิวซ์ทางเคมี เช่น โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4) ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองโดยใช้แสงจากหลอดยูวี ซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนทำได้โดยการผสม 25 มิลลิลิตร ของ 10 มิลลิโมลาร์ สารละลาย para-Methoxyamphetamine (PMA) กับ 25 มิลลิลิตร ของ 10 มิลลิโมลาร์ สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) และทำการปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำสารละลายไปสัมผัสกับแสงยูวี พบว่าสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูอย่างช้าๆ จนสุดท้ายจะได้สารละลายสีม่วง โดยใช้เวลาสัมผัสกับแสงยูวีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเก็บไว้ในขวดสีทึบ ทำการศึกษาอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometry พบว่าอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้แสงยูวีจะได้สารละลายสีม่วง เกิดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ส่วนอนุภาคเงินระดับนาโนส่วนอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ด้วยตัวรีดิวซ์โซเดียมโบโรไฮไดรด์จะได้สารละลายสีเหลืองมีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร เมื่อศึกษาด้วยเครื่อง TEM พบว่าอนุภาคเงินระดับนาโนมีรูปร่างทรงกลม และมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 8 นาโนเมตร จากนั้นนำอนุภาคเงินระดับนาโนไปประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรู้แอมโมเนีย พบว่าสามารถตรวจวัดแอมโมเนียได้ในช่วง 5-100 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่าเมื่อเติมแอมโมเนีย 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ในช่วงแสงสีม่วง และเมื่อเติมแอมโมเนีย 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 460 นาโนเมตร ในช่วงแสงสีเหลือง

2.3 เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer Technique)

เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นเป็นเทคนิคการสร้างฟิล์มบางหลายชั้นที่เกิดจากการเรียงตัวของสารที่มีประจุต่างชนิดสลับกันไปมา [40] ซึ่งเทคนิคนี้สามารถตรวจสอบผลได้อย่างแม่นยำ รวดเร็ว และมีราคาถูก อีกทั้งยังสามารถเลือกใช้วัสดุได้อย่างกว้างขวางในการทำฟิล์มบาง ซึ่งทำให้นักวิจัยประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ในงานต่างๆ เช่น การเปลี่ยนสีของชั้นฟิล์ม (Electrochromism) การทำปฏิกิริยาการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า และการตรวจวัดทางชีวภาพ (Bio sensing) เป็นต้น [41]

เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นซึ่งเป็นเทคนิคที่อาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตระหว่างขั้วสเตรทที่พื้นผิวมีประจุตรงข้ามกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) ทำให้เกิดชั้นของสารบนขั้วสเตรท โดยความหนาของแต่ละชั้นจะมีความหนายู่ในระดับนาโนเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 2.13 การสร้างฟิล์มบางนาโนด้วยเทคนิค Layer-by-Layer [41] โยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.13 เป็นการสร้างฟิล์มบางด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นโดยชั้นแรกจะจุ่มซับสเตรทไปจุ่มลงในสารละลายโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวก แล้วนำซับสเตรทไปล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดสารเคลือบที่ไม่ได้เกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวของซับสเตรท จากนั้นนำไปจุ่มในสารละลายโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุลบ จำนวนชั้นของโพลีอิเล็กโทรไลต์ขึ้นอยู่กับสมบัติที่ต้องการและการนำไปใช้ประโยชน์

การสร้างฟิล์มบางด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นจะเกิดพฤติกรรมได้ 2 แบบ [40] คือ

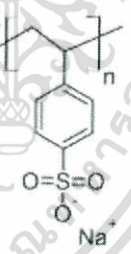
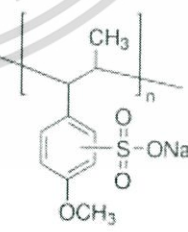
1. พื้นผิวของซับสเตรทสามารถเกิดการดูดซับสารตัวอย่างที่มีประจุตรงกันข้ามในชั้นถัดไปได้ ถ้าพื้นผิวยังมีประจุตรงกันข้ามกับสารตัวอย่างอยู่

2. พื้นผิวของซับสเตรทไม่สามารถเกิดการดูดซับสารตัวอย่างที่มีประจุตรงกันข้ามในชั้นถัดไปได้ ในกรณีที่พื้นผิวของตัวอย่างอิมมิดด้วยสารตัวอย่างชนิดหนึ่งที่ถูกดูดซับแล้วจึงเกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตกับสารตัวอย่างในชั้นถัดไป ทำให้ได้เป็นโมโนเมออร์เลเยอร์ (Monolayer)

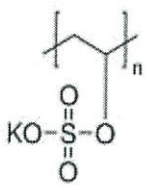
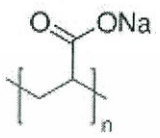
2.3.1 โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte)

โพลีอิเล็กโทรไลต์เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีหน่วยซ้ำกันแบบกลุ่ม กลุ่มเหล่านี้จะแยกจากกันเมื่ออยู่ในตัวทำละลายที่เป็นน้ำ ทำให้คุณสมบัติของโพลีอิเล็กโทรไลต์มีลักษณะผสมคล้ายกับอิเล็กโทรไลต์ของเกลือ และพอลิเมอร์ที่เป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง [42] สารละลายโพลีอิเล็กโทรไลต์สามารถนำไฟฟ้าได้และมีความหนืด โดยที่โพลีอิเล็กโทรไลต์ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ โพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวก (Polycation) และโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุลบ (Polyanion)

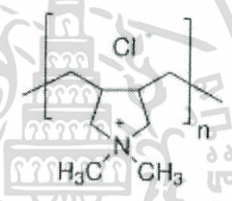
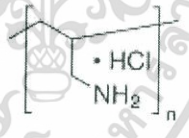
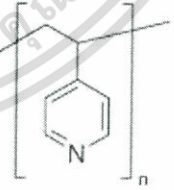
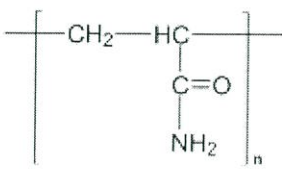
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุลบ (Polyanion)

ชื่อพอลิเมอร์	สูตรโครงสร้าง
Poly(Sodium styrene sulfonate)	
Poly(sodium anethole sulfonic acid)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อพอลิเมอร์	สูตรโครงสร้าง
Poly(vinyl sulfate) potassium	
Poly(sodium acrylic acid sodium)	

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวก (Polycation)

ชื่อพอลิเมอร์	สูตรโครงสร้าง
poly(dimethyl diallyl ammonium chloride)	
Poly(allylamine hydrochloride)	
Poly(4-Vinyl Pyridine)	
Polyacrylamide	

2.4 แก๊สแอมโมเนีย (Ammonia gas)

แก๊สแอมโมเนียเป็นแก๊สเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติตามวัฏจักรไนโตรเจน มนุษย์รู้จักแอมโมเนียมาตั้งแต่สมัยอียิปต์โบราณ และสามารถเตรียมขึ้นได้จากกระบวนการทางเคมี ถูกเตรียมขึ้นครั้งแรกในปี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับมูลค่าเป็นค่าใช้จ่ายในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

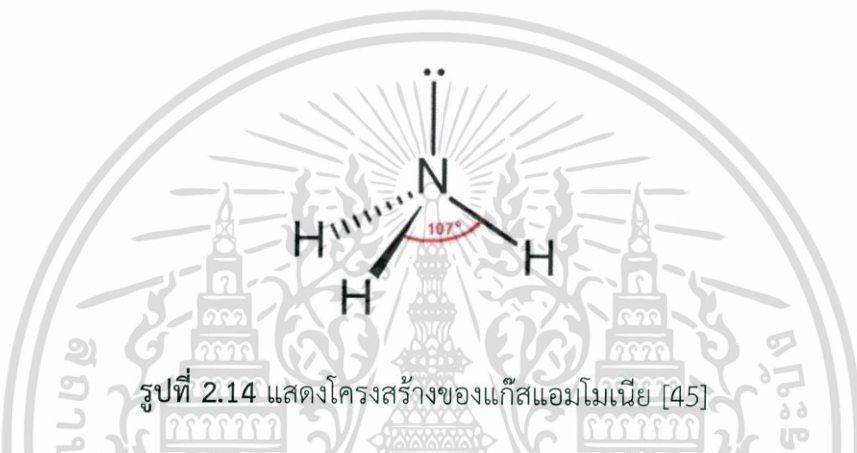
ค.ศ. 1774 โดย J.B. Priestley [43] แก๊สแอมโมเนียเป็นสารไม่มีสี มีกลิ่นฉุนรุนแรง ซึ่งทำให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ ถ้าอยู่ใต้ความกดดันอุณหภูมิต่ำจะมีสภาพเป็นของเหลว (Liquid fied)

2.4.1 ข้อมูลเฉพาะเกี่ยวกับแก๊สแอมโมเนีย

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแก๊สแอมโมเนีย มีดังนี้ [44]

1. แอมโมเนีย เป็นสารอนินทรีย์ประกอบด้วยธาตุไนโตรเจนและไฮโดรเจนสูตรเคมี NH_3 น้ำหนักโมเลกุล 17.03 กรัมต่อโมล
2. ชื่อเรียกอื่น คือ Ammonia anhydrous, Mfol, Nitrosil, Aqua-ammonia
3. แอมโมเนีย จัดอยู่ในหมู่สินค้าอันตราย ใน Class 2.3 คือ เป็นก๊าซพิษและกัดกร่อน จัดเป็นวัตถุอันตรายชนิดที่ 3 ตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ.2535 รหัสทะเบียน วอ.3005

2.4.2 โครงสร้างทางเคมีของแก๊สแอมโมเนีย



รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างของแก๊สแอมโมเนีย [45]

จากรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างโมเลกุลของแก๊สแอมโมเนียมีลักษณะถูกอัดเป็นพีระมิดฐานสามเหลี่ยมมีลักษณะเป็นไดโพล (Dipole) และทำให้มันเป็นขั้ว ดังนั้นแอมโมเนียจึงละลายในน้ำได้ดีมาก อะตอมไนโตรเจนในโมเลกุลจะมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (Lone electron pair) และทำให้แอมโมเนียมีฤทธิ์เป็นเบสในสารละลายน้ำ (Aqueous solution) ที่เป็นกรดหรือเป็นกลางมันสามารถจะมีพันธะกับไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำ (H_2O) แล้วเกิดเป็นประจุบวกของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) [45]

2.4.3 สมบัติของแก๊สแอมโมเนีย

แก๊สแอมโมเนียมีสมบัติหลายประการ ดังนี้

(1) สมบัติทางกายภาพ

แก๊สแอมโมเนียมีน้ำหนักเบากว่าอากาศ สามารถละลายน้ำได้ดี แต่ถ้าแก๊สแอมโมเนียรวมตัวกับความชื้นในอากาศ ทำให้เกิดเป็นหมอกควันสีขาวของแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ ซึ่งหนักกว่าอากาศ ดังนั้นเมื่อเกิดการรั่วของแอมโมเนียในอากาศจึงมีทั้งแก๊สแอมโมเนียที่เบา และหนักกว่าอากาศปนกันอยู่ [46]

(2) สมบัติทางเคมีของแก๊สแอมโมเนีย

(2.1) แอมโมเนียมีสมบัติเป็นต่าง เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดจะได้เกลือ เช่น การทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกจะได้แอมโมเนียมคลอไรด์ แต่ถ้าทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกจะได้แอมโมเนียมไนเตรท เป็นต้น

(2.2) การทำปฏิกิริยาแล้วได้สารอื่น เช่น การทำปฏิกิริยากับคลอโรมีเทนได้เมทิลเอมีนแต่ถ้าทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอนิกจะได้เป็นสารประกอบเอไมด์ เป็นต้น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) ค่าความไวไฟ (Flammability)

(3.1) ค่าความไวไฟ เท่ากับ 1 คือมีความสามารถทำให้เกิดอัคคีภัยได้น้อยมาก

(3.2) อุณหภูมิที่สามารถลุกติดไฟได้เองคือ 651 °C

(3.3) ความเข้มข้นที่ลุกติดไฟได้ : ต่ำสุด 16 % (LFT)

สูงสุด 25 % (LFT)

2.4.4 อันตรายจากแก๊สแอมโมเนีย

แก๊สแอมโมเนียส่งผลกระทบต่อมนุษย์ ต่อสัตว์ และต่อสิ่งแวดล้อม ดังนี้ [46]

(1) ต่อมนุษย์

(1.1) แอมโมเนียมีฤทธิ์กัดกร่อนและทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังที่สัมผัส

(1.2) หากสูดดมเพียงเล็กน้อยจะทำให้น้ำตาไหล

(1.3) หากสูดดมมากจะออกฤทธิ์กระตุ้นหัวใจเสี่ยงต่อหัวใจวายได้ง่าย

(1.5) การสัมผัสกับแอมโมเนียเข้มข้นทำให้เกิดเวียนศีรษะ ตาลาย และเกิดอาการทาง

ระบบประสาทส่วนกลาง

ตารางที่ 2.3 แสดงผลการสัมผัสแอมโมเนียที่มีผลต่อมนุษย์ที่ความเข้มข้นแก๊สแอมโมเนียต่างๆ [46]

ความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนีย (ppm)	ผลที่เกิดขึ้นกับคนที่ไม่มีกำบัง	ระยะเวลาที่สัมผัส
5	บางคนอาจได้กลิ่น	
25	เริ่มได้กลิ่นของแอมโมเนีย	
35	ความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้	8 ชั่วโมงต่อวัน
50-100	คนส่วนใหญ่เริ่มเกิดการระคายเคือง	ทนได้นานถึง 2 ชั่วโมง
400-700	ระคายเคืองปานกลางต่อจมูก ตา และลำคอ	การสัมผัส 1 ชั่วโมงไม่เป็นสาเหตุให้เกิดอาการที่รุนแรง
1,000-2,000	ไออย่างรุนแรง ระคายเคืองอย่างรุนแรงต่อ จมูก ตา และลำคอ	ทำลายตาและระบบทางเดินหายใจภายในเวลาไม่กี่นาที ถ้าสัมผัสถึง 30 นาทีจะทำให้เกิดอาการระคายเคืองที่รุนแรง
3,000-4,000	ไออย่างรุนแรง ระคายเคืองอย่างรุนแรงต่อ จมูก ตา และลำคอ	อาจตายได้ภายใน 30 นาที
5,000-12,000	เกิดอาการหดเกร็งของกล้ามเนื้อหัวใจ ทำให้ขาดออกซิเจนอย่างรวดเร็ว	ตายภายในไม่กี่นาที

(2) ต่อสัตว์

(2.1) แอมโมเนียที่พบในแหล่งน้ำจะเกิดจากการย่อยสลายอินทรีย์ไนโตรเจน ปุ๋ย และเศษอาหารจนกลายเป็นแอมโมเนียอิสระ (NH_3) และแอมโมเนียไอออน (NH_4^+) แอมโมเนียอิสระเป็นรูปที่เป็นพิษมากกว่าแอมโมเนียไอออนมักทำให้สัตว์น้ำตายอย่างเฉียบพลัน เนื่องจากระดับแอมโมเนียเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกระแสเลือดและเนื้อเยื่อสูงขึ้น ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างในเลือดจึงสูงขึ้น ส่งผลต่อปฏิกิริยาชีวเคมีทำงานผิดปกติลดความสามารถในการลำเลียงออกซิเจน และทำให้เสียชีวิตในที่สุด

(3) ต่อลิ่งแวนดัล้อม

(3.1) หากลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำสูงขึ้น ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) ลดลง ห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศเปลี่ยนแปลง

(3.2) หากมีการปนเปื้อนในอากาศจะเปลี่ยนเป็นสารประกอบกลุ่มไนโตรเจนและละอองไอแอมโมเนียมีฤทธิ์กัดกร่อนโลหะได้

2.4.5 ประโยชน์ของแอมโมเนีย

1. แอมโมเนียเป็นสารที่นิยมใช้สำหรับการทำความเย็น ซึ่งมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับสารอื่นๆ

2. แอมโมเนียมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมย้อมผ้า ยา เส้นใยสังเคราะห์ พลาสติก ปุ๋ย วัตถุระเบิด อุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง โรงกลั่นน้ำมัน และไอคริม

3. ใช้ในวงการแพทย์สำหรับสูดดม ช่วยอาการเป็นลม หน้ามืด วิงเวียนศีรษะ

เนื่องจากปัจจุบันมีระบบอุตสาหกรรมความเย็นเพิ่มขึ้น และแอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมาเป็นเวลานาน เพราะแอมโมเนียยังคงเป็นสารทำความเย็นที่ดีที่สุด ในขณะนี้ เนื่องจากราคาถูก มีประสิทธิภาพในเรื่องความเย็นที่ดี และไม่ทำลายชั้นโอโซนของโลก ดังนั้นเราควรศึกษา และทำความเข้าใจในคุณสมบัติต่างๆของสารทำความเย็นชนิดนี้เพื่อลดความเสี่ยงจากอันตราย และเพื่อความปลอดภัยในชีวิต รวมทั้งทรัพย์สินของประชาชน [46]

2.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.5.1 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-visible spectrophotometer)

เป็นเครื่องมือที่วัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ต และช่วงคลื่นแสงที่มองเห็นได้เรียกว่ายูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer) [47] ซึ่งคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยน สถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่า ต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิด และปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ [48]

เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงมีส่วนประกอบของเครื่องดังนี้ [49]

(1) Light source

สามารถให้แสงในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่อง และคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอด้วย หลอดกำเนิดแสงมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา จึงต้องเลือกใช้ให้ถูกต้องเหมาะสมกับของเหลวที่นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง

(2) Monochromator

ส่วนประกอบนี้เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสง โดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียว ใช้ฟิลเตอร์ (กระจกสี) ปริซึม (Prism) หรือ เกรตติง (Grating)

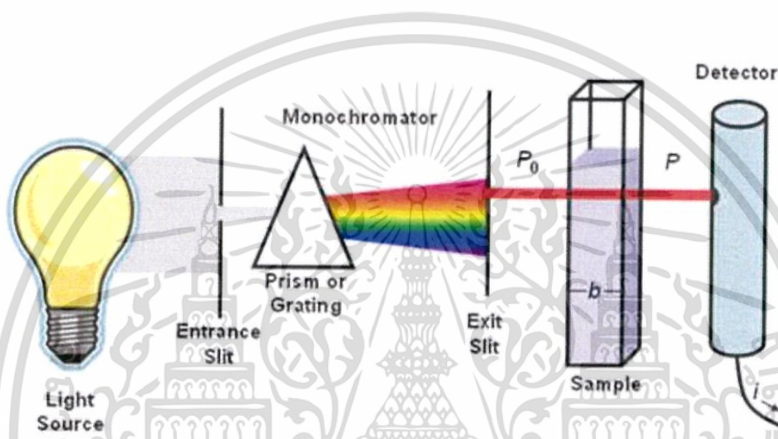
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) Cell sample

บางครั้งอาจเรียกว่า คิวเวทท์ (Cuvettes) รูปแบบที่ใช้กันทั่วไปได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดา จะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะเนื้อแก้วธรรมดาถูกดูดกลืนแสงในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควอर्टซ์ (Quartz) ใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล

(4) Detector

ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้าเครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีความไวสูง คือแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อยก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ เครื่องวัดแสงที่ยังนิยมกันอยู่ในปัจจุบัน คือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tube) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (Silicon diode detector)



รูปที่ 2.15 แสดงส่วนประกอบของเครื่อง UV-visible spectrophotometer [50]

จากรูปที่ 2.15 อธิบายได้ว่าเมื่อแสง จากแหล่งกำเนิดแสง (Light source) เดินทางไปยังโมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) ซึ่งโมโนโครมาเตอร์มีหน้าที่ในการควบคุมแสงและกระจายออกเป็นช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ก่อนผ่านสารละลายตัวอย่าง (Cell compartment) และเข้าสู่เครื่องตรวจจับ (Detector) โดยจะเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า และถูกประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์

การจำแนกประเภทของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

(1) ชนิดลำแสงเดี่ยว (Single-Beam spectrophotometer) : เมื่อลำรังสีออกจากแหล่งกำเนิดรังสีจะผ่านเลนส์ โมโนโครเมเตอร์ที่เป็น Grating ผ่านสารตัวอย่าง แล้วจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ เนื่องจากสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ใช้ลำรังสีเพียงลำเดียวผ่านจากโมโนโครเมเตอร์ไปสู่สารละลายที่ต้องการวัด ดังนั้นลำรังสีนี้จะเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเลย การวัดแต่ละครั้งจึงต้องใช้เซลล์ 2 เซลล์ให้ลำรังสีผ่านสลับกัน

(2) ชนิดลำแสงคู่ (Double-Beam Spectrophotometer) : ลำรังสีจะผ่านโมโนโครมาเตอร์ 2 ครั้งด้วยกัน ทำให้ได้ลำรังสีความยาวคลื่นเดียวอย่างมีประสิทธิภาพ และความละเอียดมากขึ้น เมื่อออกจาก Exit slit แล้วลำรังสีจะไปสู่อุปกรณ์ตัดลำรังสี (Beam chopper) ก็จะสะท้อนไปผ่านสารตัวอย่าง ในขณะที่เดียวกันลำรังสีจะผ่านไปผ่านสารอ้างอิง ด้วยวิธีนี้ลำรังสีลำเดียวที่ผ่านโมโนโครมาเตอร์จะถูกอุปกรณ์ตัดลำรังสีแยกออกเป็นลำรังสีสองลำที่มีความเข้มเท่ากันตลอดเวลา เมื่อลำรังสีทั้ง

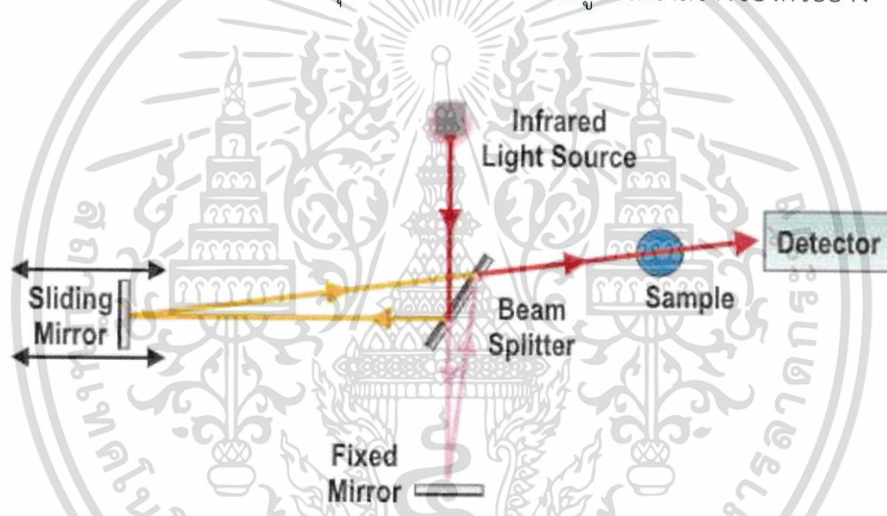
สองนี้ไปตกกระทบ Phototube ความแตกต่างของความเข้มจะกลายเป็นสัญญาณส่งต่อไปยังอุปกรณ์บันทึกสัญญาณต่อไป

2.5.2 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)

FT-IR spectrometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ $12,800$ ถึง 10 cm^{-1} ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง, ของเหลว และก๊าซ [12] เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วง Visible radiation กับ Microwave radiation โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งเป็น 3 ช่วงได้แก่ [51]

- (1) Near Infrared ($12,800 - 4,000\text{ cm}^{-1}$)
- (2) Middle Infrared ($4,000 - 200\text{ cm}^{-1}$)
- (3) Far Infrared ($200 - 10\text{ cm}^{-1}$)

เครื่อง FT-IR spectrometer วิเคราะห์ตัวอย่าง ใช้เวลาน้อย และไม่สิ้นเปลืองสารเคมี จึงนิยมนำมาใช้เพื่อการตรวจสอบสารในเชิงคุณภาพหรือเพื่อยืนยันสูตรโครงสร้างของตัวอย่าง



รูปที่ 2.16 แสดงส่วนประกอบของเครื่อง FT-IR spectrometer [52]

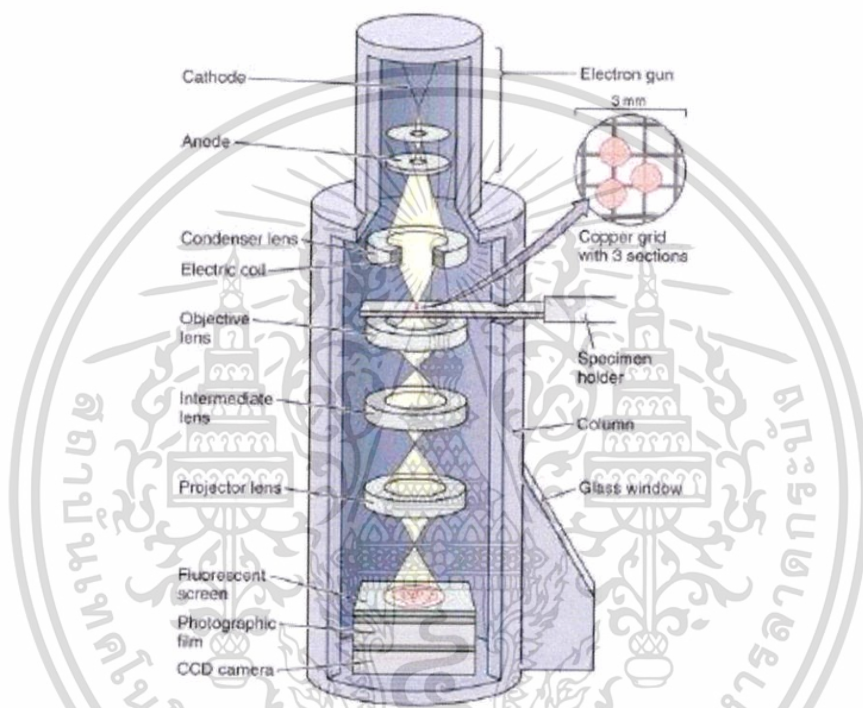
จากรูปที่ 2.16 อธิบายได้ว่าเมื่อมีคลื่นรังสีอินฟราเรด ผ่านเข้าไปยังอินเทอร์โพโรมิเตอร์ ลำแสงจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่เป็น Beam splitter ลำแสงครึ่งหนึ่งจะผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ และกระจกที่เคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วคงที่ เมื่อลำแสงสะท้อนกลับไปที่ Beam splitter จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันหรือการแทรกสอดแบบหักล้างของแต่ละความยาวคลื่น เมื่อแสงผ่านสารตัวอย่างไปยังตัววัดสัญญาณที่อ่านได้ทุกความถี่พร้อมกันกับช่วงสแกนของกระจก โดยที่อัตราการสแกนวัดสัญญาณ และความเร็วของกระจกที่เคลื่อนที่ได้จะถูกควบคุมให้มีความถูกต้อง และคงที่เรียกสัญญาณอ้างอิงจากตัววัดสัญญาณที่เกิดจากหลอด He - Ne laser ว่า Internal reference laser สัญญาณที่ตัววัดสัญญาณอ่านได้จะอยู่ในรูปอินเทอร์โพแกรมถูกเก็บไว้ [52]

2.5.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM)

ประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2474 โดยเอิร์นท รุสกา และคณะ โดยวัตถุที่นำมาส่องต้องมีขนาดเล็กและเฉือนให้บางมาก ๆ ประมาณ 60 ถึง 90 ไมโครเมตร เหมาะสำหรับการศึกษาคอนกรีตภายในของเซลล์ ภาพที่ปรากฏบนจอเรืองแสงเป็นภาพ 2 มิติ มีกำลังขยายสูงมากถึงการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

500,000 ถึง 1,000,000 เท่า นอกจากจะใช้ศึกษาสิ่งมีชีวิต ยังใช้สำหรับส่องรูปผลึกของสารต่าง ๆ ในกราววิเคราะห์ทางเคมีได้ [53]

โดยปกติแล้วมนุษย์จะสามารถมองเห็นได้ในช่วงความยาวคลื่นของแสงซึ่งสามารถเห็นสิ่งที่เล็กที่สุดได้ไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร ส่วนวัตถุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรนั้นมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้ กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจึงได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นแต่ก็ยังมีขีดจำกัดในเรื่องการมองเห็นเพราะว่าสามารถมองเห็นความละเอียดได้สูงสุดในช่วงแสงที่มนุษย์มองเห็น (400 – 700 นาโนเมตร) ซึ่งไม่สามารถดูความละเอียดในระดับนาโนเมตรได้ ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง [54]



รูปที่ 2.17 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [55]

จากรูปที่ 2.17 อธิบายได้ว่าประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งทำหน้าที่ในการผลิตอิเล็กตรอนที่เกิดจาก Filament ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกบีบให้เป็นลำอิเล็กตรอนด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) ซึ่งทำหน้าที่เป็น Condenser lens ซึ่งสามารถปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กใหญ่ได้ตามต้องการลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่าง (Specimen) ที่บางมากๆ (60-90 nm) สามารถที่จะให้อิเล็กตรอนทะลุผ่านไปได้อิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างจะวิ่งไปยังเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ซึ่งทำหน้าที่ปรับโฟกัส และสร้างภาพที่ Intermediate image ขึ้น และจะถูกขยายสัญญาณภาพด้วย Projector lens ลงบนฉากเรืองแสง (Fluorescence screen) เกิดเป็นภาพ 2 มิติขึ้น ภาพที่ได้จะมีสีดำและถูกบันทึกด้วยกล้อง CCD (Charge coupled device) [55]

ตัวอย่างที่จะตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านต้องเตรียมตัวอย่างให้อยู่ในรูปของแผ่นบาง เช่น ฟิล์มบาง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การยัดติดอนุภาคเงินนาโนลงบนท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยารีดักชันทางเคมี : การศึกษาพื้นผิว, สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางแสง

(Deposition of silver nanoparticles on carbon nanotube by chemical reduction method : Evaluation of surface, thermal and optical properties)

Farbod Alimohammadi และคณะ [56] ได้ศึกษาพื้นผิว, สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางแสงของ CNTs ที่มีการยัดติดด้วย AgNPs โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน เริ่มจากการกระจายตัว CNTs ในสารละลายอะซิโตน จากนั้นเติมสารละลาย AgNO_3 และทำการสั่นด้วยความถี่สูงที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพิ่มอุณหภูมิให้ถึง 50°C และเติมสารไดเมทิลฟอร์มามิเด (DMF) เพื่อใช้เป็นตัวรีดิวซ์

ผลจากการศึกษาด้านโครงสร้าง โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR และ RAS พบว่า Ag-CNTs ปรากฏเลขคลื่นที่ 1384 cm^{-1} เนื่องจากการยัดติดของ Ag บน CNTs และผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค RAS Ag-MWCNTs ปรากฏเลขคลื่นที่ 2695 , 1584 และ 1334 cm^{-1} เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยจะมีเลขคลื่นที่ต่ำลง เนื่องจากการถ่ายโอนประจุ และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างพื้นผิว AgNPs และ MWCNTs การศึกษาคุณสมบัติทางความร้อน โดยการวิเคราะห์ด้วย เทคนิค TGA ภายใต้อากาศออกซิเจน เสถียรภาพทางความร้อนของ CNTs จะลดลง เนื่องจากการมี AgNPs เป็นตัวเร่งในการไหม้ของออกซิเจนออกจากอะตอม ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำ และทำให้ Ag-CNTs สลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า Pristine CNTs ภายใต้อากาศไนโตรเจน เสถียรภาพทางความร้อนของ CNTs จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการมี AgNPs เป็นตัวยับยั้งการระบายความร้อน CNTs ที่มีการเพิ่มขึ้นความหนาของพื้นผิว ทำให้ AgNPs มีมวลน้อยกว่า Pristine CNTs การศึกษา Zeta potential โดยการกระจายตัว CNTs ในสารละลายอะซิโตน พบว่า Ag-CNTs แสดงค่า Zeta potential ลดจาก -31.63 mv เป็น -30.97 mv เนื่องจากการยัดติดระหว่าง AgNPs และ CNTs ในปฏิกิริยารีดักชัน จะแสดงผลของ Ag-CNTs ในค่าเชิงบวกมากกว่า Pristine CNTs ในน้ำ การศึกษารูปร่าง ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM พบว่า AgNPs มีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน เมื่อนำไปยัดติดกับ CNTs จึงเกิดความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิว และในการศึกษาทางแสง ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค RS พบว่า Ag-MWCNTs ปรากฏความเข้มของแสงสะท้อนในช่วง 200 nm ที่สูงกว่า Pristine CNTs เนื่องจากการนำไฟฟ้า และค่าดัชนีการหักเหแสงที่สูง

2.6.2 การตรวจวัดไอแอมโมเนียและการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุแต่งประกอบเส้นใยขนาดนาโนท่อคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นและพอลิอะนิลีน ที่เตรียมจากซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์

(Ammonia vapor sensing and electrical properties of fibrous multi-walled carbon nanotube/polyaniline nanocomposites prepared in presence of cetyl-trimethylammonium bromide)

Mohd Omaish Ansari และคณะ [57] ได้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุแต่งประกอบเส้นใย MWCNTs และ Pani ที่ขนาดระดับนาโน โดยเตรียมในซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ด้วยวิธี In-situ Oxidation polymerization กับอะนิลีนที่มีจำนวน MWCNTs แตกต่างกัน โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (PPS) เป็นตัวออกซิไดซ์ ในอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่าง อะนิลีน:CTAB:PPS เป็น $1:1:0.5\text{ M}$ จากนั้นทำการกระจายตัว MWCNTs ในปริมาณที่แตกต่างกันลงในสารละลาย CTAB โดยไม่ผ่านการใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้กรด HCl เข้มข้น 1 M และสั่นด้วยคลื่นความถี่สูงเป็นเวลา 5 ชั่วโมง เติมน้ำละลาย Stock A 25 mL ปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการดูดซับผิวของอะนิลีนที่เหมาะสมใน MWCNTs และเติมน้ำละลาย Stock B 100 mL เพื่อให้เกิดการรวมตัวของอะนิลีน สารละลายผสมจะถูกปั่นกวนตลอด 24 ชั่วโมง จะได้สารละลายที่มีสีดำนเข้ม จากนั้นนำมากรองและล้างจนสารละลายไม่มีสี เพื่อเอากรดส่วนเกิน และ PSS ออก ล้างด้วยเมทานอล เพื่อเอาหน่วยย่อยของ Pani ออก สุดท้ายอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากการศึกษาคุณลักษณะของวัสดุแต่งประกอบขนาดนาโน Pani@MWCNTs โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่า การเป็นผลึกของ Pani@MWCNTs-4 จะแสดงพีคสูงสุดที่ $2\theta = 25^\circ$ ซึ่งมีความสอดคล้องกับโซ่พอลิเมอร์ในช่วงขนาดที่ระนาบ (200) และจะแสดงความเป็นผลึกมากขึ้น เมื่อนำ MWCNTs ใช้ร่วมกับ Pani ส่งผลทำให้เกิดสายโซ่ของอะนิลีนมากขึ้น พีคที่มีความเด่นชัดใน $2\theta = 25^\circ$ เกิดจากการซ้อนทับกันของพีค Pani และ MWCNTs ทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น การศึกษาคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ด้วยวิธีการตรวจวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วตามแนวเส้นตรง (4-in-line probe method) พบว่า การรวมตัวกันระหว่าง MWCNTs และ Pani มีผลต่อการนำไฟฟ้ากระแสตรงของ Pani ในช่วงเริ่มต้น เนื่องจาก MWCNTs เมื่อปริมาณ MWCNTs เพิ่มขึ้น การศึกษาการรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิให้คงที่ และวัฏจักรการรักษาเสถียรภาพ พบว่าที่ Pani@MWCNTs-4 ที่ปริมาณ MWCNTs 0.5 g ให้ผลดีที่สุด จึงนำมาใช้ในการตรวจวัดไอแอมโมเนีย โดยใช้ความเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งผลการตรวจวัดแสดงค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง ทำให้สารประกอบขนาดนาโน Pani@MWCNTs มีการตอบสนองที่ดีในการตรวจวัดแอมโมเนีย

2.6.3 การขึ้นรูปฟิล์มวัสดุแต่งประกอบขนาดนาโนพอลิเอทิลีนอิมินร่วมกับท่อคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นด้วยเทคนิคขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น และศึกษาพฤติกรรมความว่องไวต่อความชื้น (Layer-by-Layer assembly and humidity sensitive behavior of poly(ethylenimine)/multiwall carbon nanotube composite films)

Haihu Yu และคณะ [58] ได้ศึกษาการขึ้นรูปฟิล์มวัสดุแต่งประกอบพอลิเอทิลีนอิมิน (PEI) ร่วมกับ MWCNTs ที่มีขนาดระดับนาโน ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น ในขั้นตอนแรกจะทำการขจัดตัวเร่ง และสัณฐานของอนุภาคคาร์บอน โดย MWCNTs จะมีการปรับปรุงด้วยกรด HCl และจะถูกออกซิไดซ์ด้วย H_2SO_4 และ HNO_3 นำ MWCNTs มาทำการกระจายตัว โดยการสั่นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (sonicate) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลาย PEI ความเข้มข้น 50% โดยมวล เจือจางด้วยน้ำ DI ให้เหลือความเข้มข้น 1% โดยมวล แล้วทำการสร้างฟิล์มบางโดยการนำกระจกที่มีสภาพผิวเป็นลบจุ่มลงในสารละลาย PEI เป็นเวลา 10 นาที ล้างด้วยน้ำ DI และจุ่มลงในสารละลาย MWCNTs เป็นเวลา 10 นาที ล้างด้วยน้ำ DI จุ่มสลับจนได้จำนวนชั้นที่ต้องการแล้วล้างด้วยน้ำ DI เป็นขั้นตอนสุดท้าย

จากการศึกษาคุณลักษณะของ MWCNTs ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน จากการวิเคราะห์ FTIR และ UV-visible พบว่า MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวจะแสดงเลขคลื่นที่ 1723 cm^{-1} ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่ามีหมู่ คาร์บอกซิลิก เกิดขึ้นบน MWCNTs ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์ม PEI/MWCNTs มีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้น และแสดงว่า PEI/MWCNTs มีการขึ้นรูปฟิล์มเป็นชั้นขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากนั้นนำมาวัดความว่องไวต่อความชื้นโดยดูค่าความต้านทานระหว่างขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง ผลปรากฏว่าความต้านทานเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์ ในช่วง 5-97 % RH และที่ช่วง 5-85 % RH เกิดจากการดูดซับด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับ MWCNTs และเมื่อเกิดการดูดซับของโมเลกุลจะทำให้เกิดการลดการนำไฟฟ้าของแผ่นวัสดุ ข้อมูลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความชื้นของฟิล์มหลายชั้นมีการตอบสนอง และการคืนสภาพที่เวลา 2 และ 30 วินาที ตามลำดับ

2.6.4 การเติมแต่งอนุภาคเงินนาโนบนแผ่นกราฟีนออกไซด์ให้มีความสม่ำเสมอ และนำการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย

(Uniform decoration of silver nanoparticle on exfoliated graphene oxide sheet and its ammonia gas detection)

T. Kavinkumar และคณะ [59] ได้นำเสนอการใช้วัสดุแต่งประกอบ AgNPs-GO เพื่อใช้สำหรับตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่หนึ่ง การสังเคราะห์วัสดุแต่งประกอบ AgNP-GO โดยใช้วิธีการปรับปรุงของ Hummers นำ GO ผสมในน้ำและทำให้เกิดการกระจายตัวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonication) เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำมาผสมในสารละลาย AgNO_3 ที่ความเข้มข้น 0.1 และ 0.6 M เติมวิตามินซี 5 mM อย่างช้าๆ ภายใต้การสั่นของคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonication) เป็นเวลา 30 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่นและนำไปกรองแบบสุญญากาศ ส่วนที่สองเป็นการสังเคราะห์ rGO โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยไฮดราซีนไฮเดรต ทำการผสม GO และน้ำ DI เติมไฮดราซีนไฮเดรตลงในสารละลายผสม ทำการปั่นจนสารละลาย และให้ความร้อน $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่วนที่สามเป็นการเตรียมตัวตรวจไอประเภทไอแก้ว นำไอแก้วนำแสงโพลีเมทิลเมทาโครเลตชนิดมัลติโหมด (PMMA) ตัดเอาส่วนที่หุ้มออกและทำความสะอาดด้วยเอทานอล การสร้างวัสดุแต่งประกอบ rGO, 0.1 M และ 0.6 M AgNP-GO โดยการเคลือบส่วนที่เอาที่หุ้มออก ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบ และทำให้แห้งในอากาศ จากนั้นทำการเคลือบซ้ำโดยควบคุมความหนาของชั้นตัวตรวจวัด และทำการตรวจวัดแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 0-500 ppm ใช้เวลาในการตรวจวัด 10 นาที ที่อุณหภูมิ $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 74 %

จากการศึกษาโดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่า GO มีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ 10.571° ซึ่งเป็นการแสดงหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจน เป็นการบ่งบอกว่ากราฟไฟต์ทั้งหมดถูกออกซิไดซ์ RGO จะแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ 23.81° ซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่ระหว่างชั้นในขนาด 0.373 nm และเกิดการหายไปของ 10.571° ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนถูกกำจัดออกจาก GO แล้ว วัสดุแต่งประกอบ 0.1 และ 0.6 M AgNPs-GO มีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ 38.21° , 44.41° , 64.51° และ 77.51° มีระนาบผลึกของ AgNPs ในลักษณะ Face centered cubic ที่ (111), (200), (220) และ (300) ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ 0.1 M AgNPs-GO กับ 0.6 M AgNPs-GO พิสูจน์ได้ว่าเกิดการก่อตัวผลึกที่สูงของ AgNPs จากการตอบสนองของวัสดุแต่งประกอบ rGO, 0.1 M และ 0.6 M AgNP-GO ที่เคลือบบน PMMA ในการตรวจวัดแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 0-500 ppm พบว่า ความเข้มของแสงที่แสดงผลออกมาจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นแอมโมเนีย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเกิดจากการเกิดปฏิกิริยสัมพันธ์ระหว่างแอมโมเนียกับวัสดุตรวจวัด ความว่องไวในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียของตัวตรวจวัด GO และ RGO จะให้ผลที่คล้ายกัน แต่ที่ตัวตรวจวัด 0.1 M AgNPs-GO จะมีความว่องไวเป็น 1.5 และ 2.2 เท่า ซึ่งสูงกว่าตัวตรวจวัด 0.6 M AgNPs-GO และ RGO ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.5 การสังเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพสูงของแอลดีไฮด์ จากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น โดยใช้ระบบตัวกลางแลคเคส ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น

(Highly efficient synthesis of aldehydes by layer by layer multi-walled carbon nanotube (MWCNTs) laccase mediator systems)

Davide Piccinino และคณะ [60] ได้นำเสนอการสร้างท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNTs) โดยตรึงเอนไซม์แลคเคสที่ได้จากเห็ดทางโคงวงลงบนผนังท่อด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นที่แตกต่างกัน 2 วิธี วิธีที่หนึ่ง คือการดูดซับโดยตรงของ MWCNTs ดังเดิมที่เคลือบด้วย PDDA และมีเอนไซม์(ตัวเร่งที่ 2) เป็นชั้นที่สองวิธีที่สอง คือการดูดซับกับ MWCNTs ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่เคลือบด้วย PDDA ต่อกับเอนไซม์ (ตัวเร่งที่ 3) ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสาม มีวิธีที่แตกต่างกันคือตัวเร่งที่ 1 ซึ่งเป็น MWCNTs ที่มีความชอบน้ำ เตรียมได้จากการนำ MWCNTs เติมลงในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 5 จากนั้นทำการ Sonicated และปั่นเหวี่ยงตามลำดับ ทั้งส่วนใส จะทำให้ได้สารผสม MWCNTs ที่มีแลคเคสอยู่ ส่วนตัวเร่งที่ 2 เตรียมได้จากการเติมตัวเร่งที่ 1 ลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มี PDDA อยู่จากนั้นทำการ Sonicated และปั่นเหวี่ยงตามลำดับ ทั้งส่วนใส จะทำให้ได้สาร MWCNTs/Lac/PDDA ส่วนตัวเร่งที่ 3 เริ่มจากการเตรียมออกซิไดซ์ MWCNTs ก่อนโดยนำ MWCNTs ผสมกับกรดซัลฟิวริกต่อกรดไนตริกอัตราส่วน 3:3 โดยปริมาตร ทำการ Sonicated จากนั้นปรับค่าพีเอชของสารให้ได้พีเอชเท่า 7 จากนั้นนำออกซิไดซ์ MWCNTs ผสมกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และ PDDA จากนั้นทำการ Sonicated และปั่นเหวี่ยง ตามลำดับ ทั้งส่วนใส จะทำให้ได้สาร MWCNTs/PDDA ออกมา จากนั้นนำสารตัวเร่งทั้งสามไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพและมีความจำเพาะในการสังเคราะห์แอลดีไฮด์ โดยมี TEMPO และ ABTS เป็นสารตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์

จากการศึกษาเตรียมสารตัวเร่งโดยการตรึงเอนไซม์แลคเคสลงบนผนังท่อคาร์บอนนาโนพบว่าสารทั้งสองจะยึดติดกันด้วยแรงอันตรกิริยาของ π - π หรือเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ และเมื่อศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งใหม่โดยการวิเคราะห์ด้วย SEM และ AFM พบว่า ตัวเร่งทั้งสาม เกิดการครอบคลุมบนพื้นผิวท่อคาร์บอนนาโนด้วยแลคเคสมีความสูง และความกว้างที่เพิ่มขึ้นกว่า MWCNTs ดังเดิม และพบว่าประสิทธิภาพของตัวเร่งที่ 2 ในการเกิดปฏิกิริยาดีกว่าตัวเร่งที่ 3

2.6.6 ตัวตรวจวัดแก๊สสำหรับการตรวจจับแอมโมเนีย โดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ถูกเคลือบด้วยพอลิอะนิลีน

(Gas sensor for ammonia detection based on polyaniline-coated multiwall carbon nanotubes)

Lifang He และคณะ [61] ได้ศึกษาการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย โดยการวัดค่านำไฟฟ้า มีการใช้ตัวตรวจวัดที่มีปริมาณ PANI แตกต่างกัน จะแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ 1.การเคลือบ MWCNTs ร่วมกับ PANI โดยทำการสังเคราะห์ PANI ด้วยวิธี in-situ polymerization ทำการผสมสารละลาย 0.1 M HCl ที่มี MWCNTs 5 mg ในปริมาณสัดส่วนมอโนเมอร์ของอะนิลีนแตกต่างกัน จากนั้นทำการสั่นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonicated) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเติมแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (อัตราส่วน 1:1 M / อะนิลีน : APS) ละลายในสารละลาย 1 M HCl 5 mL จะเกิดการแยกกันของการเกิด Polymerization ทั้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 0-5 °C พร้อมกับปั่นกวอนอะนิลีนให้เกิดการ Polymerized อย่างเต็มที่ หลังจากได้ผลิตภัณฑ์มาจะทำการรวบรวมโดยการกรอง ล้างด้วยน้ำ DI และอะซิโตน แล้วทำให้แห้งในชั้นบรรยากาศ 2.การเตรียมตัวตรวจวัดแก๊ส สร้างตัวตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง จะทำการเตรียมตัวตรวจวัด 3 ประเภท (1) PANI (2) MWCNTs (3) PANI-coted MWCNTs

จากการศึกษาคุณลักษณะของตัวตรวจวัดจากการวิเคราะห์ด้วย TGA พบว่า น้ำหนักที่สูญเสียของ PANI จะอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200°C แสดงถึงกระบวนการแตกตัวให้โปรตอน และจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิมากกว่า 300°C MWCNTs จะมีความเสถียรภาพสูงถึง 650°C และจะถูกออกซิไดซ์อย่างสมบูรณ์เมื่อสูงกว่า 750°C ทั้งนี้ความเสถียรภาพทางความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการยึดติด PANI บน MWCNTs จากผลแสดงการตรวจวัดแอมโมเนียที่อุณหภูมิต้อง สามารถสรุปได้ว่า PANI-coted MWCNTs มีการตอบสนองตามอัตราส่วนน้ำหนักของมอนอเมอร์อะนิลีนที่เพิ่มขึ้น โดย MWCNTs/33 % Wt/PANI แสดงการตอบสนองในเชิงเส้นตรงในช่วง 0.2-15 ppm มีความไว และการตอบสนองที่สูงและรวดเร็ว จึงเหมาะสมที่จะให้เป็นตัวตรวจจับแอมโมเนีย

2.6.7 การตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียด้วยวัสดุแต่งประกอบท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นร่วมกับพอลิเมอร์นำไฟฟ้า : การศึกษาวิธีการใหม่สำหรับกระบวนการคืนสภาพอย่างสมบูรณ์

(MWCNT-conducting polymer composite based ammonia gas sensor : A new approach for complete recovery process)

Sakshi Sharma และคณะ [62] ได้ศึกษาการตรวจวัดแอมโมเนียที่มีความไวสูง โดยใช้ MWCNTs และพอลิเมอร์เป็นวัสดุแต่งประกอบ ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้เลือกใช้จะช่วยเริ่มการนำไฟฟ้า มี 2 ชนิด คือ 1.Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-polystyrene sulfonic acid 2.Polyaniline ในส่วนการทดลองจะแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1.การทำให้ MWCNTs มีความบริสุทธิ์ โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C จากนั้นนำไปสั่นด้วยคลื่นความถี่ 37 kHz (50 W) และการปรับปรุงพื้นผิวของ MWCNTs โดยใช้กรด HNO_3 เป็นตัวออกซิไดซ์ โดยที่การปรับปรุงพื้นผิวจะเป็นการเพิ่มการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ และ MWCNTs ด้วยการเกิดอันตรกิริยากับพันธะคู่ที่ซ้อนกัน (π - π Stacking interaction) 2.การเตรียมวัสดุแต่งประกอบ MWCNTs และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า โดยการสร้าง MWCNTs ร่วมกับ PEDOT : PSS และ PANI ด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating method) และ 3.การสร้างตัวตรวจวัด และการตรวจวัดแอมโมเนีย โดยการใช้เงิน และ MWCNTs-พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเป็นตัวขั้วอิเล็กโทรด การทำงานของตัวตรวจวัดจะวัดความเปลี่ยนแปลงความต้านทานของขั้วทั้งสอง

จากการศึกษาคุณลักษณะด้วย FTIR และ TEM พบว่า สเปกตรัมของ MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้วจะแสดงเลขคลื่นที่ 3430 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ O-H stretching เลขคลื่นที่ 1710 cm^{-1} ของพันธะ C=O stretching จากภาพ TEM ได้แสดงการครอบคลุมบนพอลิเมอร์นำไฟฟ้าทั้งสอง (PEDOT : PSS และ PANI) บน MWCNTs อย่างชัดเจน จากการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียพบว่า วัสดุแต่งประกอบ MWCNTs-PEDOT : PSS มีความไวและการทำซ้ำที่ดีเยี่ยม เวลาในการตอบสนองน้อย เนื่องจากมีความเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี นอกจากนี้ยังสามารถทดสอบแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่ำ (1-6 ppm) โดยมีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นตรง แต่มีค่าการอิ่มตัวที่สูงกว่า ($> 35\text{ ppm}$) มีการเพิ่มประสิทธิภาพการคืนสภาพอย่างสมบูรณ์ด้วยการใช้ความร้อน และสนามไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะลดเวลาจาก 48 ชม. ให้เหลือ 20 นาที ซึ่งเกิดจากการลดการดูดซับทางเคมีของแอมโมเนียบนพื้นผิว MWCNTs อย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.8 การตรวจวัดแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ซิงค์ออกไซด์กราฟไฟต์และท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว

(Room temperature ammonia sensors based on zinc oxide and functionalized graphite and multi-walled carbon nanotubes)

Jean-Marc Tulliani และคณะ [63] ได้ศึกษาการใช้วัสดุตัวตรวจวัดที่แตกต่างกันในการตรวจวัดแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้สมบัติทางไฟฟ้าภายใต้สภาวะไอน้ำ และสภาวะที่มีแก๊สแอมโมเนีย ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการตรวจวัด คือ ZnO จะถูกนำประยุกต์ใช้ร่วมกับวัสดุอื่นๆ ด้วยกันทั้งหมด 3 วิธี ดังนี้ วิธีที่หนึ่งการทำ Screen-printed ที่มีเจอร์เมเนียม (Pd) ลงบน MWCNTs ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวมาแล้ว วิธีที่สองการอัดกันของ ZnO กับ MWCNTs ในแนวเดียวกัน โดย MWCNTs จะผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยไนโตรเจน (N) และกลุ่มฟลูออรีน (F) และวิธีที่สามการยึดติดระหว่างกราฟไฟต์ที่ผ่านการเคลือบพื้นผิวด้วยไนโตรเจน (N) และฟลูออรีน (F) กับ ZnO

จากการศึกษาพบว่าตัวตรวจวัดที่สามารถวัดความชื้นได้ดีเพียงตัวเดียว คือ ZnO ร่วมกับ Pd-doped COOH-MWCNTs ในขณะที่ตัวอื่น ๆ ไม่มีความไวต่อการตรวจวัดความชื้น และในสภาวะแก๊สแอมโมเนีย ตัวตรวจวัดทุกตัวให้ค่าความต้านทานที่ลดลง ณ อุณหภูมิห้อง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการคืนสภาพของตัวตรวจวัด วัสดุ ZnO ร่วมกับ F/N-MWCNTs และวัสดุ ZnO ร่วมกับ F/N-graphite จะตรวจวัดได้ที่ความเข้มข้นต่ำสุดที่ 45 ppm และ ZnO ร่วมกับ Pd-doped COOH-MWCNTs จะตรวจวัดได้ที่ความเข้มข้นต่ำสุดที่ 50 ppm จากการศึกษาผู้ทำงานวิจัยได้พบว่า ผลที่ได้เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ยังไม่ได้ค่าที่ดีนัก แต่ในการศึกษาเบื้องต้นพบว่าตัวตรวจวัดที่ทำขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้ง่าย และมีต้นทุนต่ำ ประกอบกับสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดแอมโมเนียได้จริง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 6 ส่วนหลักๆ ดังนี้ ส่วนที่หนึ่ง เป็นการปรับปรุงพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนแบบโคเวเลนต์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ส่วนที่สอง คือการศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว (MWCNTs-COOH) ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) ได้แก่ การศึกษาเวลา, ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่เหมาะสมในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนและการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง ส่วนที่สาม คือ การสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนด้วยปฏิกิริยารีดักชัน โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium borohydride; NaBH₄) เป็นตัวรีดิวซ์ และโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาอิกแอซิด (COPSS) เป็นสารรักษาเสถียรภาพ ส่วนที่สี่ คือการศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นได้แก่ การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ COPSS สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน และการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ที่มีความเข้มข้นของ COPSS แตกต่างกันสำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน ส่วนที่ห้า คือ การสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว (MWCNTs-COOH) ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น และในส่วนสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์หาแก๊สแอมโมเนีย โดยใช้วิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

3.1 การปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes; MWCNTs)

3.1.1 สารเคมี

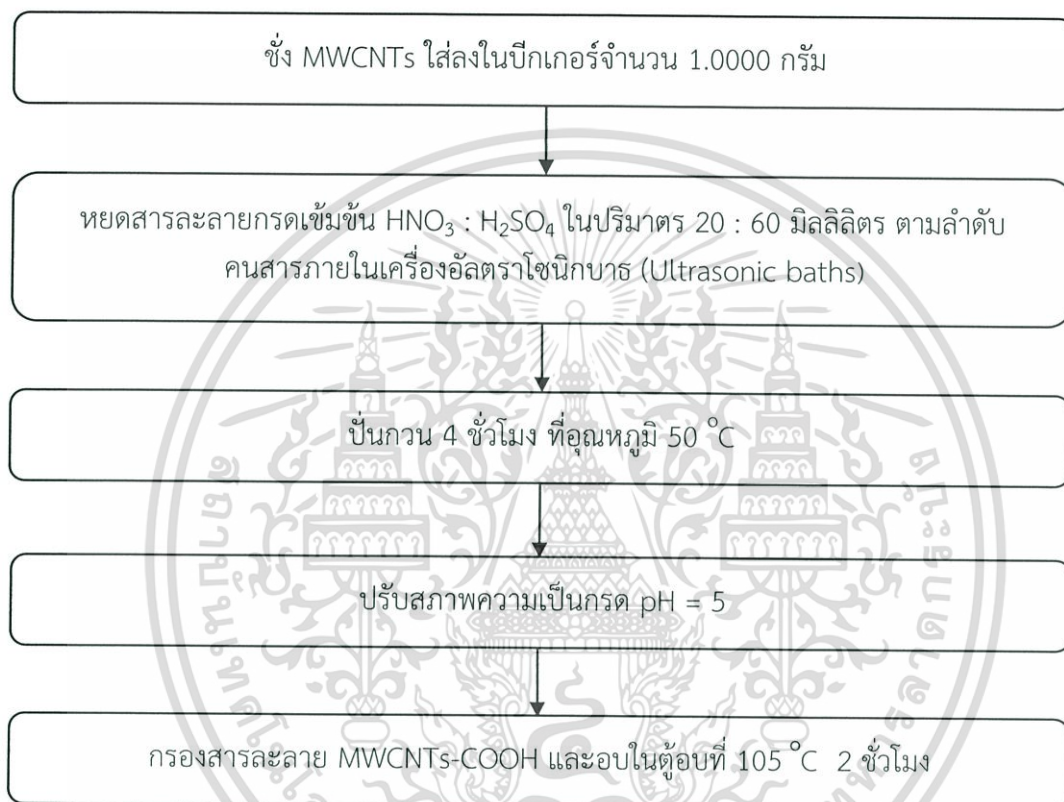
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น

สารเคมี	สูตรทางเคมี/ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต/ ประเทศ
ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น, Multi-walled carbon nanotubes	MWCNTs	Sigma- Aldrich/USA
กรดไนตริกเข้มข้น 65%, Nitric acid	HNO ₃	Carol Erba/ USA
กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 96%, Sulfuric acid	H ₂ SO ₄	Carol Erba/ USA
น้ำปราศจากไอออน, Deionized water	DI water	RHK-Group/ Thailand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น

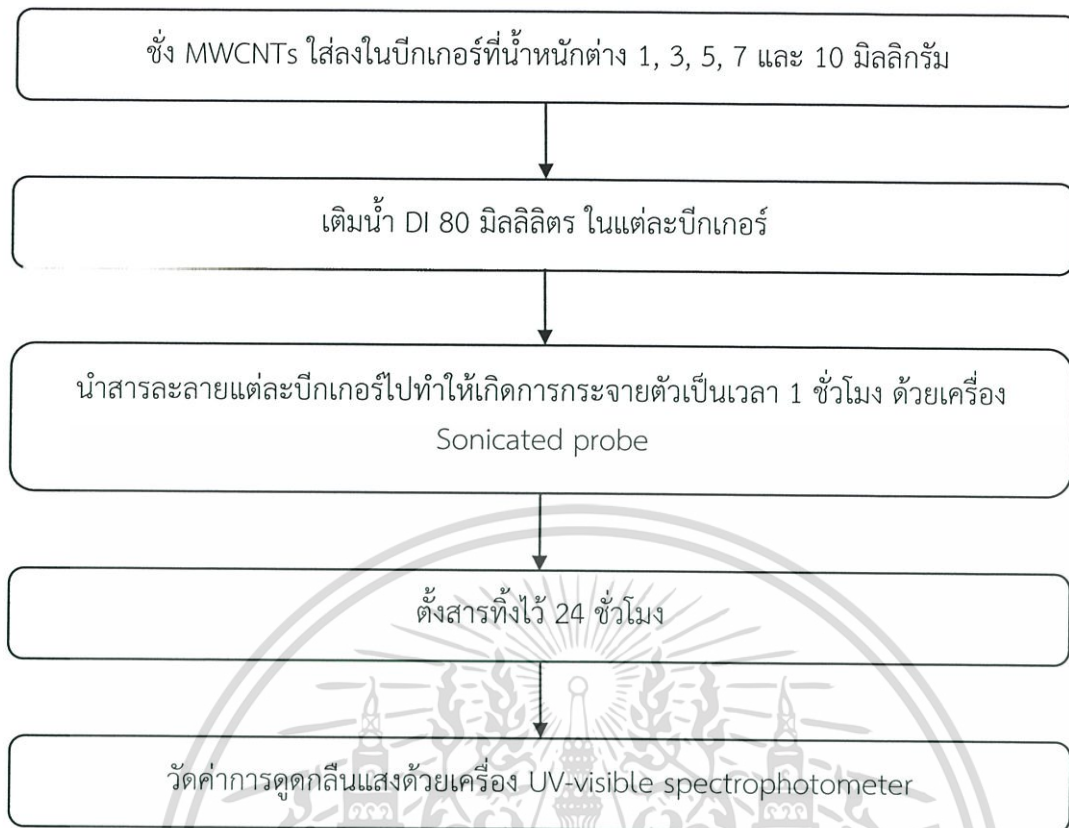
ซึ่ง MWCNTs ใส่ลงในบีกเกอร์จำนวน 1 กรัม หยอดสารละลายกรดเข้มข้นของกรดไนตริก และกรดซัลฟูริก ในอัตราส่วน 1:3 โดยปริมาตรพร้อมคนสารให้เข้ากันภายในเครื่องอัลตราโซนิกบาส (Ultrasonic baths) จากนั้นนำไปปั่นกวนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 °C ปรับสภาพความเป็นกรดของสารละลายจนได้ค่า pH ประมาณ 5 แล้วกรองสารละลาย MWCNTs-COOH และนำตะกอนผงไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C ในตู้อบสุญญากาศเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNTs) ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

3.1.3 การศึกษากระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes; MWCNTs) ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว

ซึ่ง MWCNTs-COOH จำนวน 1, 3, 5, 7 และ 10 มิลลิกรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำปราศจากไอออน (DI water) ลงบีกเกอร์ละ 80 มิลลิลิตร จากนั้นทำให้เกิดการกระจายตัวของสารละลายด้วยเครื่อง Sonicated probe (50% amplitude 30 s pulse 5 s relaxation cycle) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งสารทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อสังเกตการณ์การกระจายตัวของ MWCNTs-COOH แล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยทำการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 1000-200 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว

3.1.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotube; MWCNTs) ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ศึกษาและเทคนิคในการวิเคราะห์

ตัวแปรที่ศึกษา	เทคนิควิเคราะห์
ลักษณะและขนาดของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNTs) ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว	TEM
ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNTs)	FTIR
ศึกษาค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNTs) ที่ได้ทำการกระจายตัวแล้ว	UV-visible spectrophotometer

3.2 การศึกษาสถานะต่างๆในการสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว (MWCNTs-COOH) ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer Technique)

3.2.1 สารเคมี

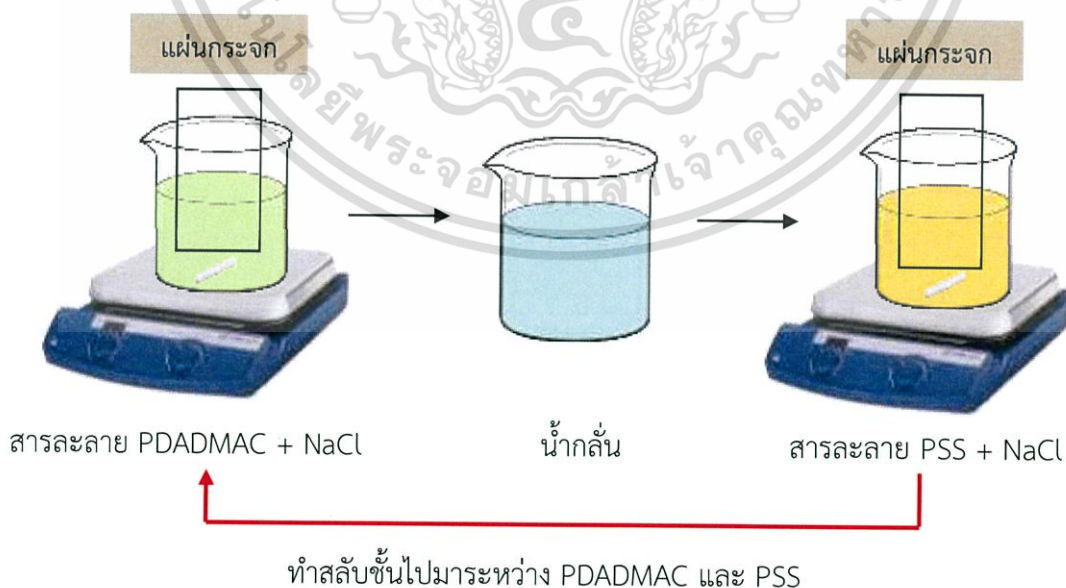
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว

สารเคมี	สูตรทางเคมี/ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต/ ประเทศ
สารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว	MWCNTs-COOH	-
โพลีโซเดียมสไตรีนซัลโฟเนต, Poly(sodium 4-styrenesulfonate)	PSS	Sigma-Aldrich/ USA
โพลีไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียม คลอไรด์, PDADMAC	PDADMAC	Sigma-Aldrich/ USA
โซเดียมคลอไรด์, Sodium chloride	NaCl	Rankem/India
น้ำปราศจากไอออน, Deionized water	DI water	RHK-Group/ Thailand

3.2.2 การเตรียมแผ่นกระจกให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ

เตรียมสารละลายไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC) ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ และสารละลายโพลีโซเดียมสไตรีนซัลโฟเนต (PSS) ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ พร้อมทั้งโซเดียมคลอไรด์ 1 มิลลิโมลาร์ ลงในสารละลายทั้ง 2 ชนิด นำแผ่นกระจกจุ่มลงในสารละลาย PDADMAC เป็นขั้นแรก เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นไปจุ่มลงในสารละลาย PSS เป็นขั้นที่สอง เป็นเวลา 5 นาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น จุ่มสารสลับไปมา จนได้จำนวนชั้นที่ต้องการ เมื่อถึงขั้นสุดท้ายให้ล้างแผ่นกระจกด้วยน้ำกลั่นแล้วทิ้งไว้ให้แห้งซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองได้ดังรูปที่ 3.3

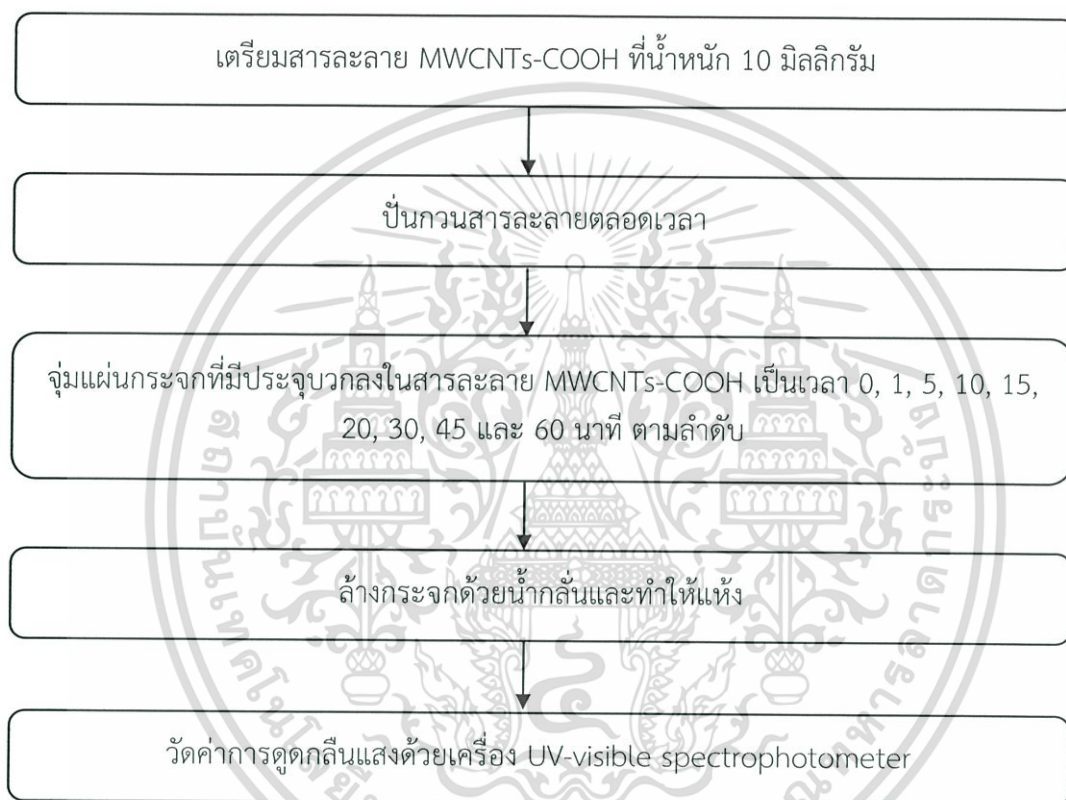


รูปที่ 3.3 การเตรียมแผ่นกระจกให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางในการจุ่มสารละลายท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว (MWCNTs-COOH)

นำแผ่นกระจกที่ปรับสภาพพื้นผิวแล้วที่มีประจุบวก (จากตอนที่ 3.2.1) จุ่มลงในสารละลายท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว (MWCNTs-COOH) (จากตอนที่ 3.1.3) น้ำหนัก MWCNTs-COOH 10 มิลลิกรัม ที่เวลา 0, 1, 5, 10, 15, 20, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ โดยทำการปั่นกววนสารละลายตลอดเวลาจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยทำการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-400 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองได้ดังรูปที่ 3.4



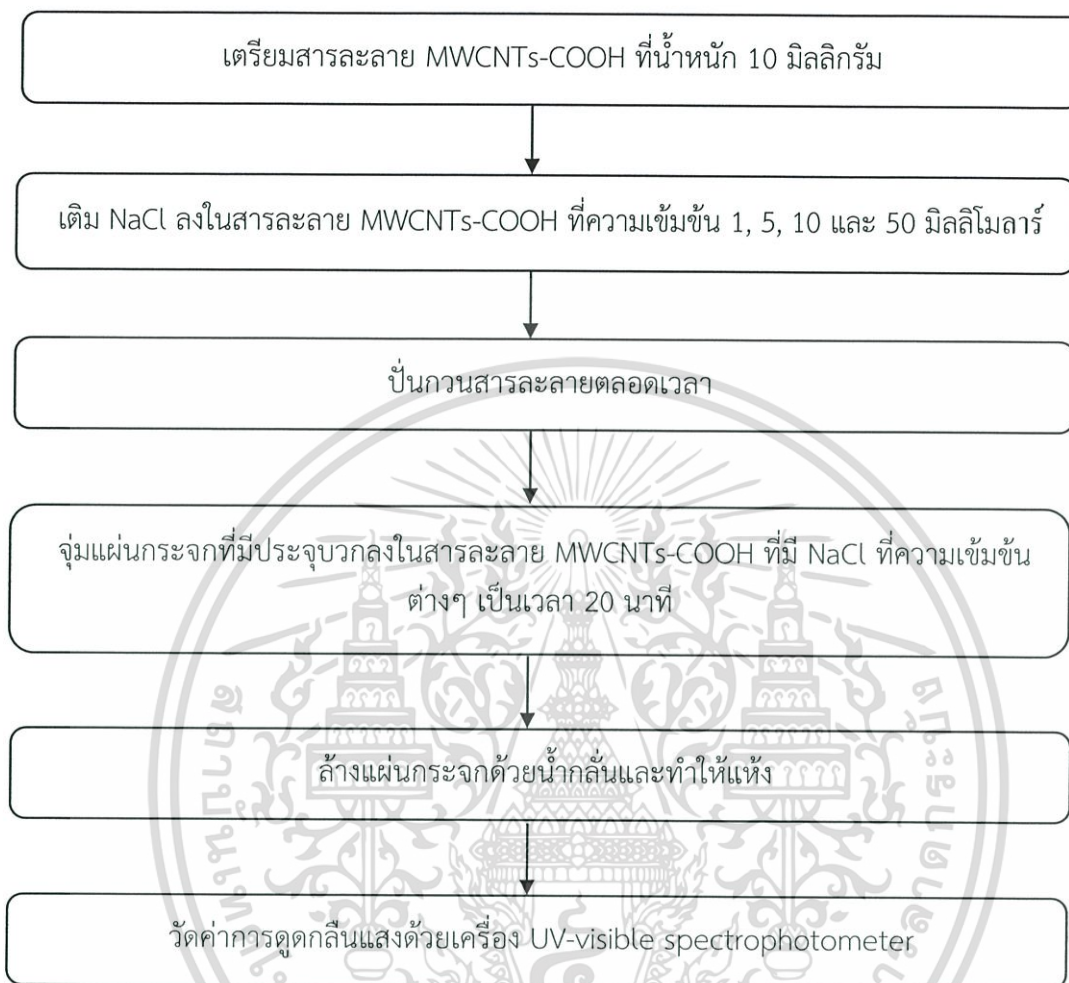
รูปที่ 3.4 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางในการจุ่มสารละลายท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว (MWCNTs-COOH)

3.2.4 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH

เตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว (MWCNTs-COOH) ที่น้ำหนัก 10 มิลลิกรัม พร้อมทั้งใส่โซเดียมคลอไรด์ลงในสารละลาย MWCNTs-COOH ให้มีความเข้มข้น 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ทำการปั่นกววนสารละลายตลอดเวลา แล้วนำแผ่นกระจกที่ปรับสภาพพื้นผิวแล้วที่มีประจุบวกจุ่มลงในสารละลายท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว (MWCNTs-COOH) ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นล้างกระจกด้วยน้ำกลั่น แล้วทำให้แห้ง และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

spectrophotometer โดยทำการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-400 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3.5

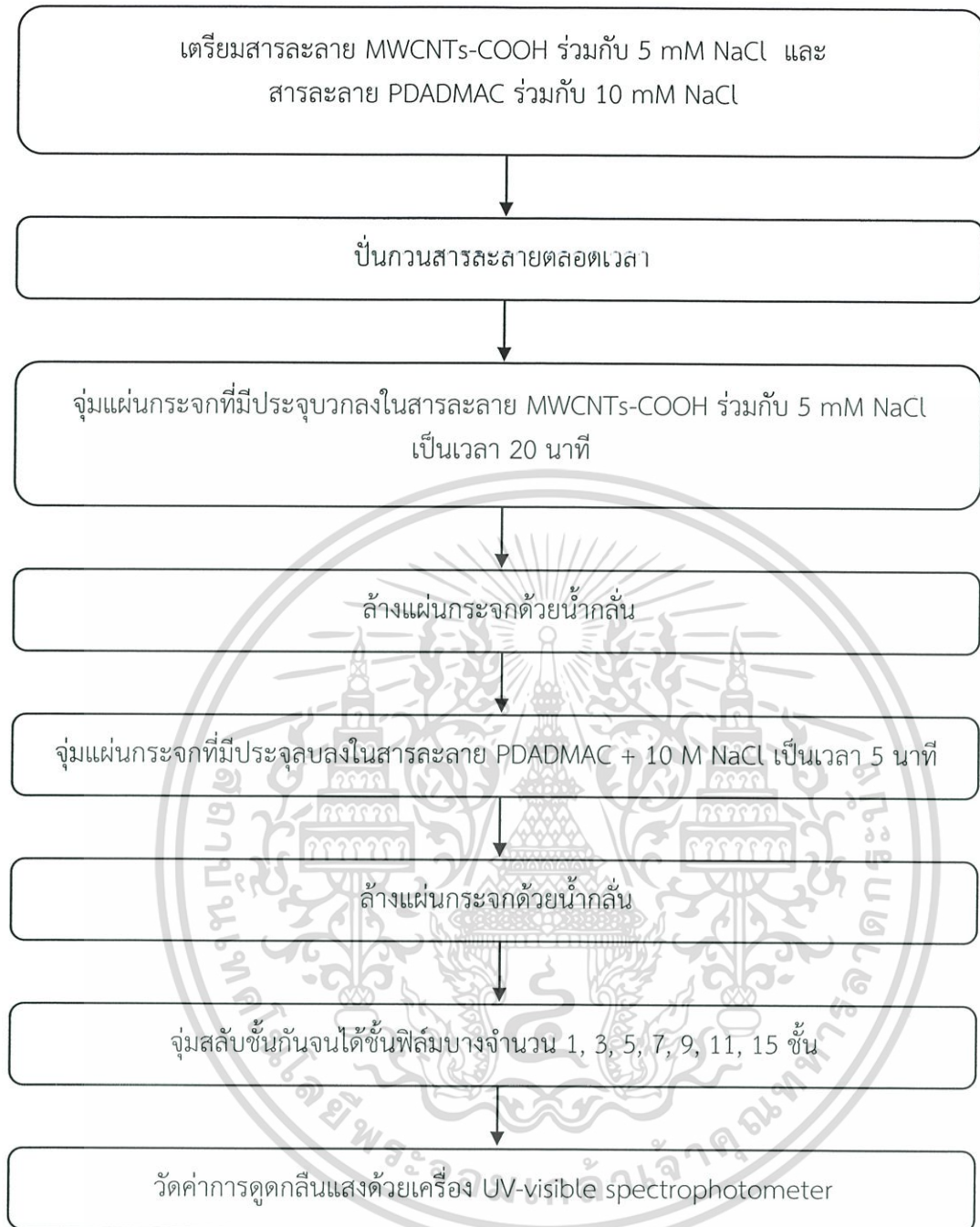


รูปที่ 3.5 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH

3.2.5 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ร่วมกับสารละลาย PDADMAC

นำสารละลายท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว (MWCNTs-COOH) จำนวน 10 มิลลิกรัมร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ เทลงบีกเกอร์พร้อมปั่นกวนสารละลายตลอดเวลา นำแผ่นกระจกที่ปรับสภาพพื้นผิวแล้ว ที่มีประจุบวกจุ่มลงในสารละลาย MWCNTs-COOH ที่มี NaCl เป็นเวลา 20 นาที และล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นจุ่มลงในสารละลาย PDADMAC ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 5 นาที และล้างด้วยน้ำกลั่น จุ่มสลับกันจนได้จำนวน 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15 ชั้น ตามลำดับ ทำให้แห้งและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยทำการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-400 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองได้ดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 การศึกษาจำนวนชั้นแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ร่วมกับสารละลาย PDADMAC

3.3 การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน (Silver nanoparticle; AgNPs) ด้วยปฏิกิริยารีดักชัน

3.3.1 สารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน

สารเคมี	สูตรทางเคมี / ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต/ ประเทศ
ซิลเวอร์ไนเตรท, Silver nitrate	AgNO ₃	Carol Erba/USA
โซเดียมโบโรไฮไดรด์, Sodium borohydride	NaBH ₄	Sigma-Aldrich/ USA
โพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมา อิกแอซิด	COPSS	Sigma-Aldrich/ USA
น้ำปราศจากไอออน, Deionized water	DI water	RHK-Group/ Thailand

3.3.2 การศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาอิกแอซิด (COPSS) ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน

เติมน้ำ DI แต่ละบีกเกอร์ ปิเปตสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO₃) ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ 1 มิลลิลิตร และสารละลาย COPSS ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ลงแต่ละบีกเกอร์ ปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที ปิเปตสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH₄) ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในแต่ละบีกเกอร์ ปริมาตรตามสัดส่วนดังตารางที่ 3.5 ปั่นกวนสารละลายผสมเป็นเวลา 10 นาที ตั้งสารทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง และนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยทำการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3.7

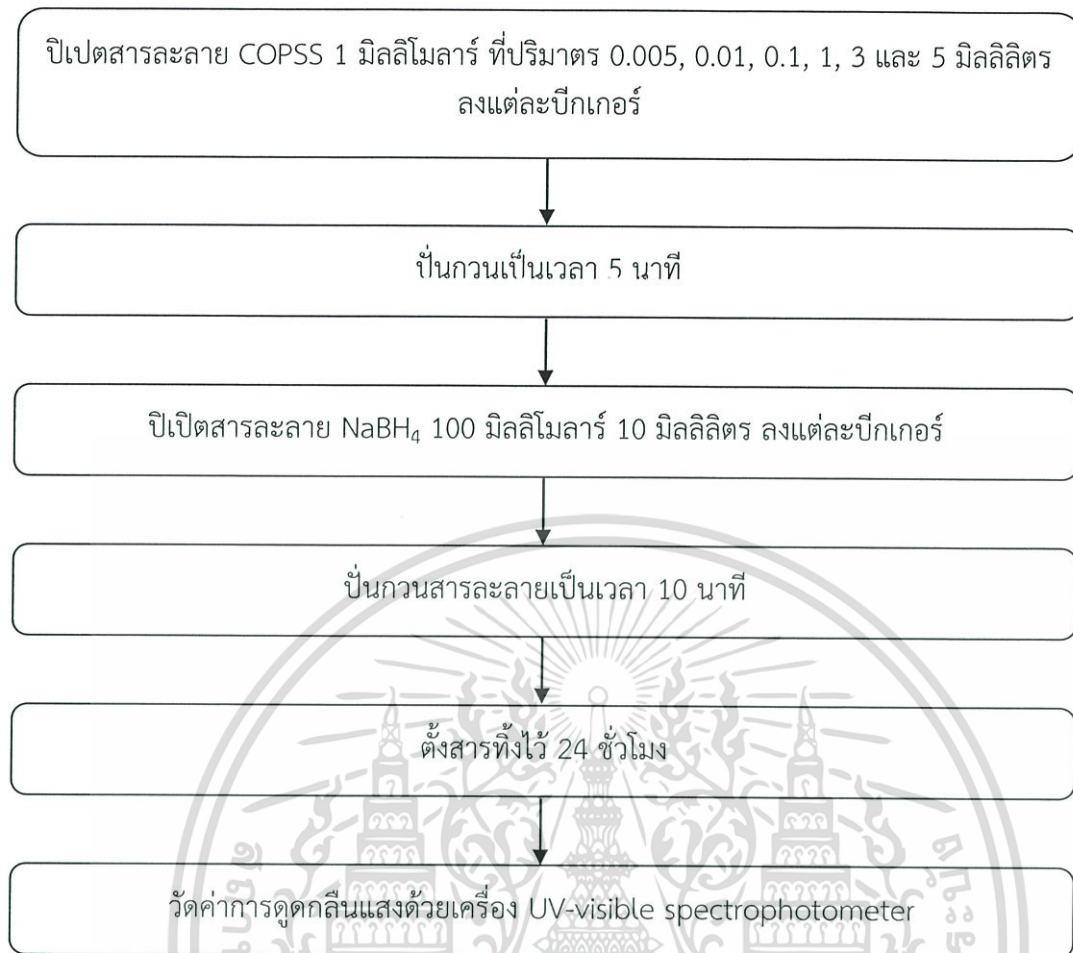
ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs)

สารเคมี	AgNO ₃ : COPSS : NaBH ₄ (mM)					
	1:0.005:10	1:0.01:10	1:0.1:10	1:1:10	1:3:10	1:5:10
100 mM AgNO ₃ (ml)	1	1	1	1	1	1
100 mM COPSS (ml)	0.005	0.010	0.100	1.000	3.000	5.000
100 mM NaBH ₄ (ml)	10	10	10	10	10	10
H ₂ O (ml)	88.995	88.99	88.90	88	86	84
Total (ml)	100	100	100	100	100	100

เติมน้ำ DI ลงแต่ละบีกเกอร์

ปิเปตสารละลาย AgNO₃ 100 มิลลิโมลาร์ 1 มิลลิลิตร ลงแต่ละบีกเกอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แผนผังการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาอิกแอซิดในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน

3.4 การศึกษาสถานะต่างๆในการสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

3.4.1 สารเคมี

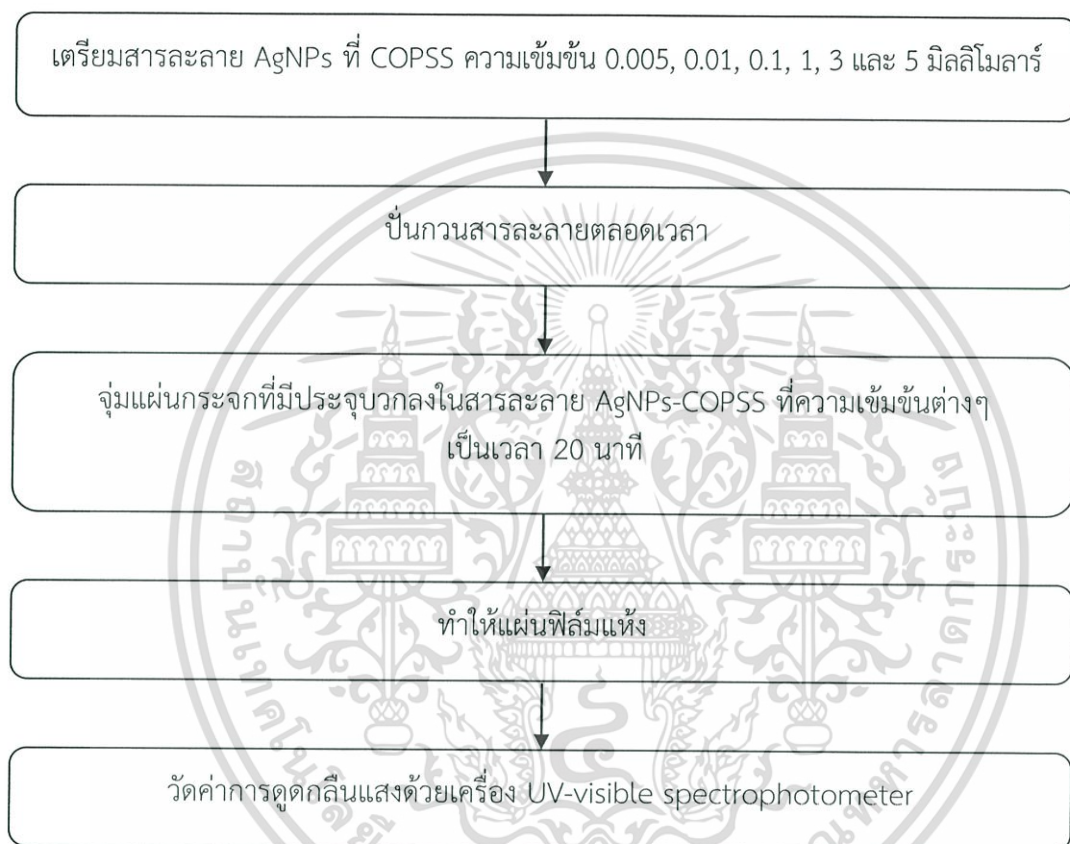
ตารางที่ 3.6 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาสถานะต่างๆ ในการสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินระดับนาโน

สารเคมี	สูตรทางเคมี /ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต/ ประเทศ
สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน	AgNPs	-
โพลีไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียม คลอไรด์, PDADMAC	PDADMAC	Sigma-Aldrich/ USA
โซเดียมคลอไรด์, Sodium chloride	NaCl	Rankem/India
น้ำปราศจากไอออน, Deionized water	DI water	RHK-Group/ Thailand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ COPSS สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

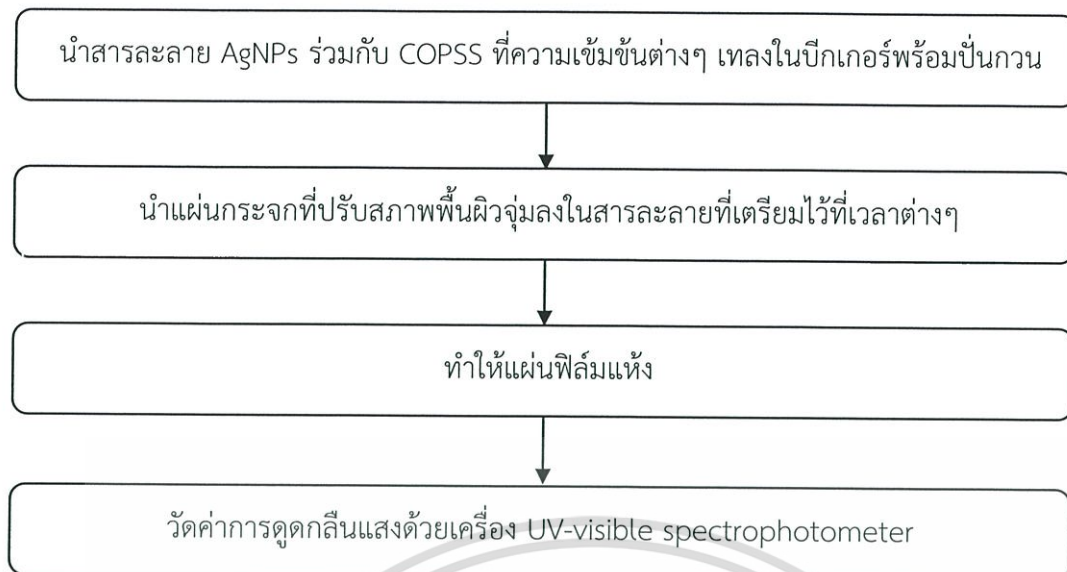
นำสารละลายอนุภาคเงินในระดับนาโน (AgNPs) ที่มีสารละลาย COPSS ที่ความเข้มข้น 0.005, 0.01, 0.1, 1, 3 และ 5 มิลลิโมลาร์ (จากตอนที่ 3.3.2) เทลงปิกเกอร์พร้อมปั่นกวนสารละลายตลอดเวลา จากนั้นนำแผ่นกระจกที่ปรับสภาพผิวที่มีประจุบวกจุ่มลงในสารละลาย AgNPs-COPSS ที่ความเข้มข้นต่างๆ เป็นเวลา 20 นาที แล้วทำให้แห้ง และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยทำการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ COPSS สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

3.4.3 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ที่มีความเข้มข้นของ COPSS แตกต่างกัน สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

นำสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ที่ความเข้มข้นสารละลาย COPSS 0.01 และ 0.1 มิลลิโมลาร์ (จากตอนที่ 3.3.2) เทลงในปิกเกอร์พร้อมปั่นกวนสารละลายตลอดเวลา นำแผ่นกระจกที่ปรับสภาพพื้นผิวที่มีประจุบวก จุ่มลงในสารละลายที่เตรียมไว้ที่เวลา 20, 30, 60 และ 120 นาที ตามลำดับ ทำให้แผ่นฟิล์มแห้ง และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยทำการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ที่มีความเข้มข้นของ COPSS แตกต่างกัน สำหรับชั้นรูปแผ่นฟิล์มบาง

3.5 การสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว (MWCNTs-COOH) ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

3.5.1 สารเคมี

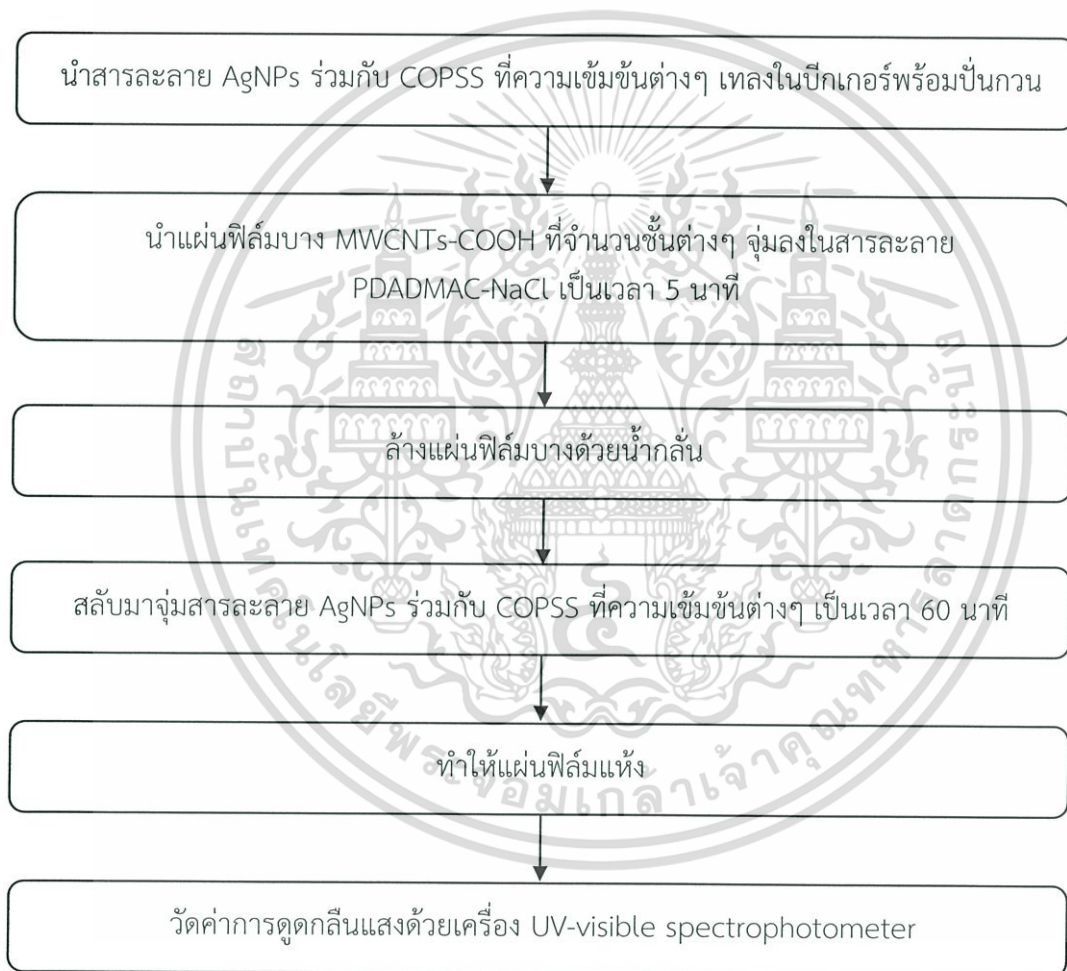
ตารางที่ 3.7 สารเคมีที่ใช้ในการสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน

สารเคมี	สูตรทางเคมี / ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต/ ประเทศ
สารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว	MWCNTs-COOH	-
สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน	AgNPs	-
โพลีไดแอลลิลไธเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์	PDADMAC	Sigma-Aldrich/ USA
โซเดียมคลอไรด์, Sodium chloride	NaCl	Rankem/India
น้ำปราศจากไอออน, Deionized water	DI water	RHK-Group/ Thailand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การสร้างแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ที่ COPSS มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

นำสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนมีสารละลาย COPSS ความเข้มข้น 0.01 และ 0.1 มิลลิโมลาร์ (จากตอนที่ 3.2.2) เทลงในปิกเกอร์ และปั่นกวนสารละลายตลอดเวลา จากนั้นจุ่มแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15 ชั้นตามลำดับ (จากตอนที่ 3.3.5) ลงในสารละลาย PDADMAC ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ร่วมกับ NaCl ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ถ้างแผ่นฟิล์มบางด้วยน้ำกลั่น แล้วนำมาจุ่มที่สารละลาย AgNPs-COPSS ที่ COPSS ความเข้มข้นต่างๆ เป็นเวลา 60 นาที ทำให้แห้ง และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยทำการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การสร้างแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินนาโน (AgNPs) ที่ COPSS มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

3.6 การตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia gas) โดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance)

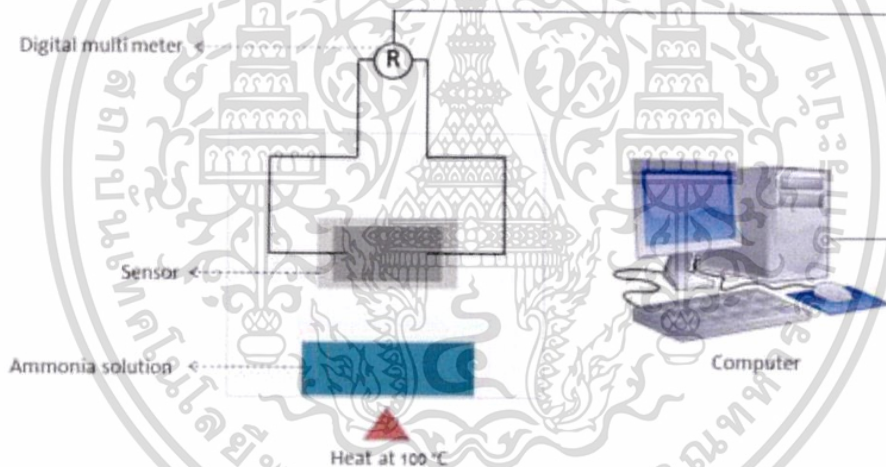
3.6.1 สารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.8 สารเคมีที่ใช้ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย

สารเคมี	สูตรทางเคมี / ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต/ ประเทศ
สารละลายแอมโมเนีย 30%, Ammonia solution	NH ₃	Carol Erba/USA
น้ำปราศจากไอออน, Deionized water	DI water	RHK-Group/ Thailand

นำแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่จำนวนชั้นต่างๆ และแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่ชั้น 3, 5, 7 เคลือบด้วยสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนมาเป็นวัสดุในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ พร้อมทั้งให้ความร้อนกับสารละลายแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียจะแสดงค่าออกมาในรูปแบบของค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) โดยใช้เครื่องมือวัดมัลติมิเตอร์ รุ่นยูที 61 บี (Multimeter รุ่น UT61B) ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองได้ดังรูปที่ 3.11

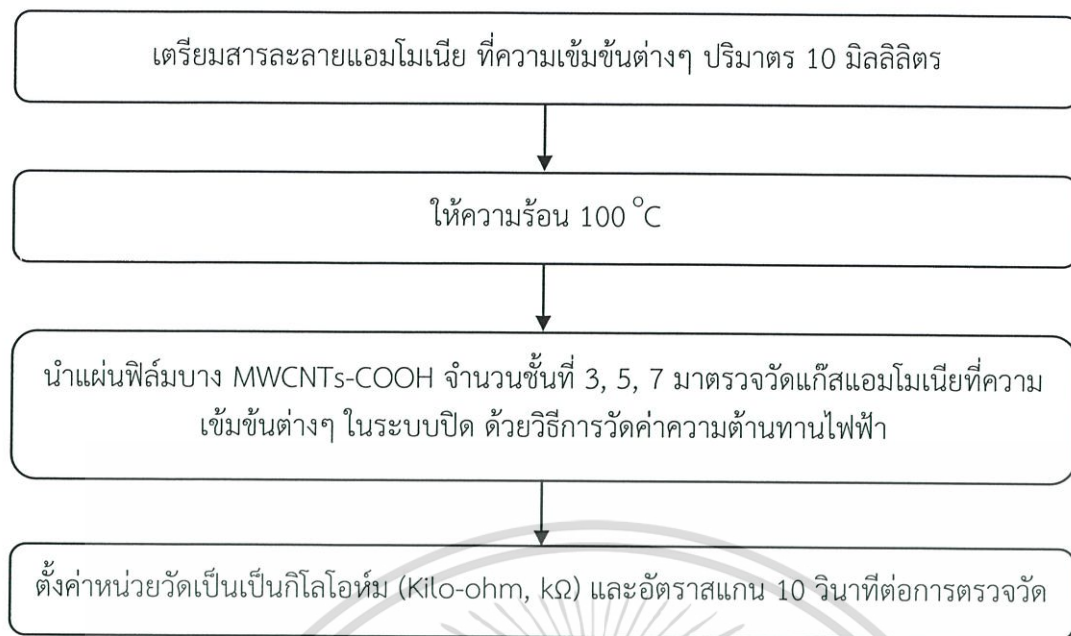


รูปที่ 3.11 ระบบการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia gas)

3.6.2 การศึกษาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียโดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

เตรียมสารละลายแอมโมเนีย (Ammonia solution) ความเข้มข้น 0.01, 0.1, 0.5, 1, 10, 20, 30, 50 และ 100 มิลลิโมลาร์ ปริมาตรละ 10 มิลลิลิตร พร้อมทั้งให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียส นำแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวนชั้นที่ 3, 7 และ 11 (จากตอนที่ 3.2.5) มาตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ ในระบบปิด ด้วยเครื่องมือวัดมัลติมิเตอร์ รุ่นยูที 61 บี (Multimeter รุ่น UT61B) โดยตั้งค่าหน่วยการวัดเป็นกิโลโอห์ม (Kilo-ohm, kΩ) และอัตราสแกน 10 วินาทีต่อการตรวจวัด ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3.12

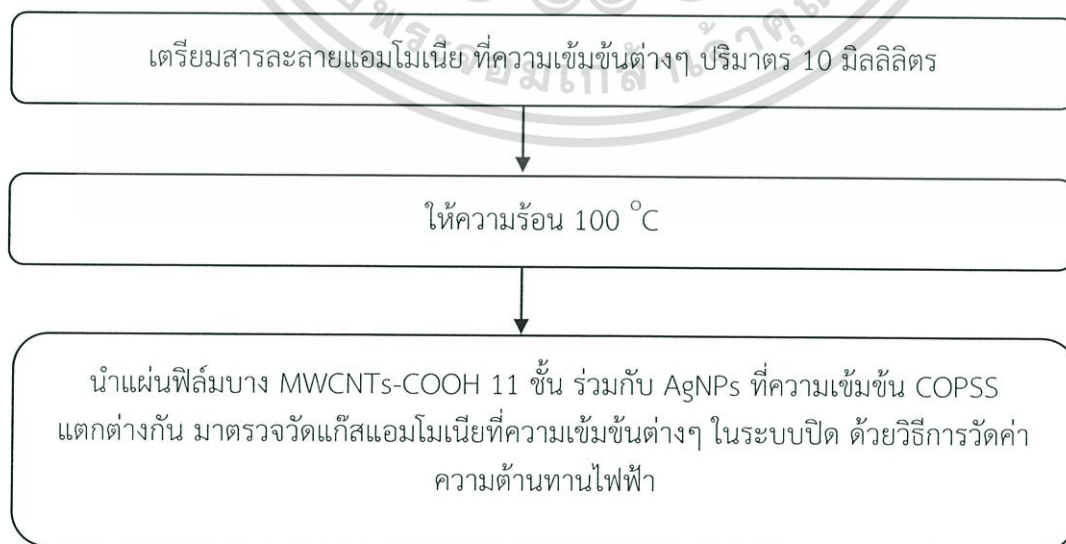
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 การศึกษาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียโดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

3.6.3 การศึกษาแผ่นฟิล์มบางระหว่าง MWCNTs-COOH ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียโดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

เตรียมสารละลายแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 0.01, 0.1, 0.5, 1, 10, 20, 30, 50 และ 100 มิลลิโมลาร์ ปริมาตรละ 10 มิลลิลิตร พร้อมทั้งให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียส นำแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH 11 ชั้น ร่วมกับ AgNPs ที่ความเข้มข้น COPSS 0.01 และ 0.1 มิลลิโมลาร์ (จากตอนที่ 3.2.5) มาตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ ในระบบปิด ด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์ รุ่นยี่ห้อ 61 บี (Multimeter รุ่น UT61B) โดยตั้งค่าหน่วยการวัดเป็นกิโลโอห์ม (Kilo-ohm, kΩ) ในอัตราสแกน 10 วินาทีต่อการตรวจวัด ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3.13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งค่าหน่วยวัดเป็นเป็นกิโลโอห์ม (Kilo-ohm, $k\Omega$) และอัตราสแกน 10 วินาทีต่อการตรวจวัด

รูปที่ 3.13 การศึกษาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียโดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

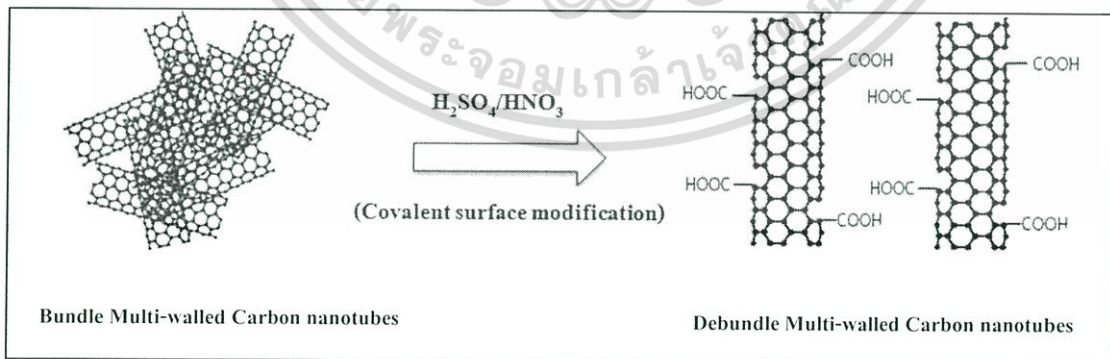
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการทดลองและอภิปรายผลในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ ได้ 6 ส่วน ดังต่อไปนี้ ส่วนที่หนึ่งเป็นผลการทดลอง และการอภิปรายผลเกี่ยวกับการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNTs) ส่วนที่สองเป็นการอภิปรายผลเกี่ยวกับการสร้างแผ่นฟิล์มบางของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ปรับปรุงพื้นผิว (MWCNTs-COOH) ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) ส่วนที่สามเป็นการอภิปรายผลเกี่ยวกับการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน (Silver nanoparticle) ส่วนที่สี่เป็นการอภิปรายผลเกี่ยวกับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางของอนุภาคเงินระดับนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น ส่วนที่ห้าเป็นการอภิปรายผลเกี่ยวกับการสร้างแผ่นฟิล์มบางของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ปรับปรุงพื้นผิวร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น และส่วนสุดท้ายเป็นผลการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia gas) ของแผ่นฟิล์มบางท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ปรับปรุงพื้นผิว และแผ่นฟิล์มบางของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ปรับปรุงพื้นผิวร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน

4.1 การปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (Multi-walled Carbon nanotubes; MWCNTs) ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ในงานวิจัยนี้มีความต้องการที่จะนำท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNTs) มากระจายตัวในตัวทำละลายที่เป็นของเหลว แต่ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นกระจายตัวในน้ำหรือของเหลวได้ไม่ดี จึงได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ด้วยการปรับรูปแบบโคเวเลนต์ (Covalent surface modification) โดยใช้กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก ในอัตราส่วน 1:3 โดยปริมาตร เป็นตัวออกซิไดซ์พื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนโดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ซึ่งแสดงการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นดังรูปที่ 4.1



เมื่อ  คือ ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น
 $COOH$ คือ หมู่คาร์บอกซิล

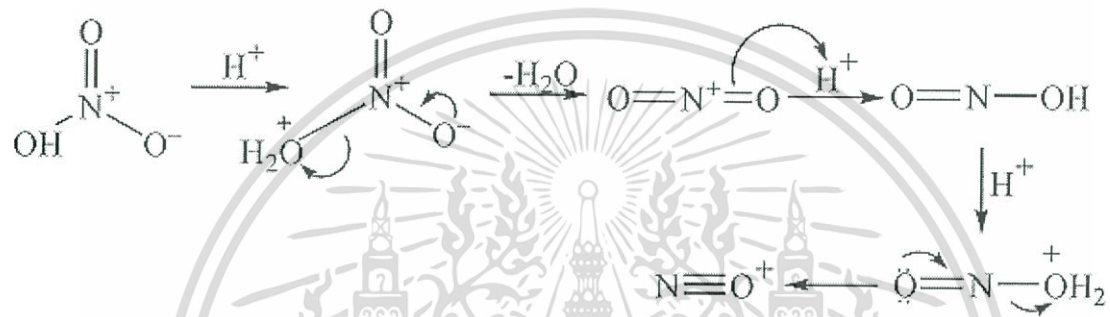
รูปที่ 4.1 รูปแบบการปรับปรุงพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

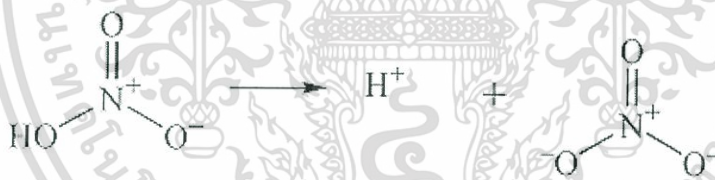
จากรูปที่ 4.1 อธิบายได้ว่า เมื่อท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก ทำให้มีหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group; COOH) เกาะบนพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนด้วยพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) ส่งผลให้ท่อนาโนคาร์บอนมีการกระจายตัวในน้ำหรือของเหลวได้ เนื่องจากมีหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group; CO) และหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group; OH) จึงทำให้ MWCNTs-COOH กระจายตัวในน้ำหรือของเหลวได้ดี

กลไกการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นด้วยกรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก เนื่องจากกรดไนตริกเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงกว่ากรดซัลฟิวริก จึงสามารถเขียนกลไกการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอน ดังนี้

ขั้นที่ 1

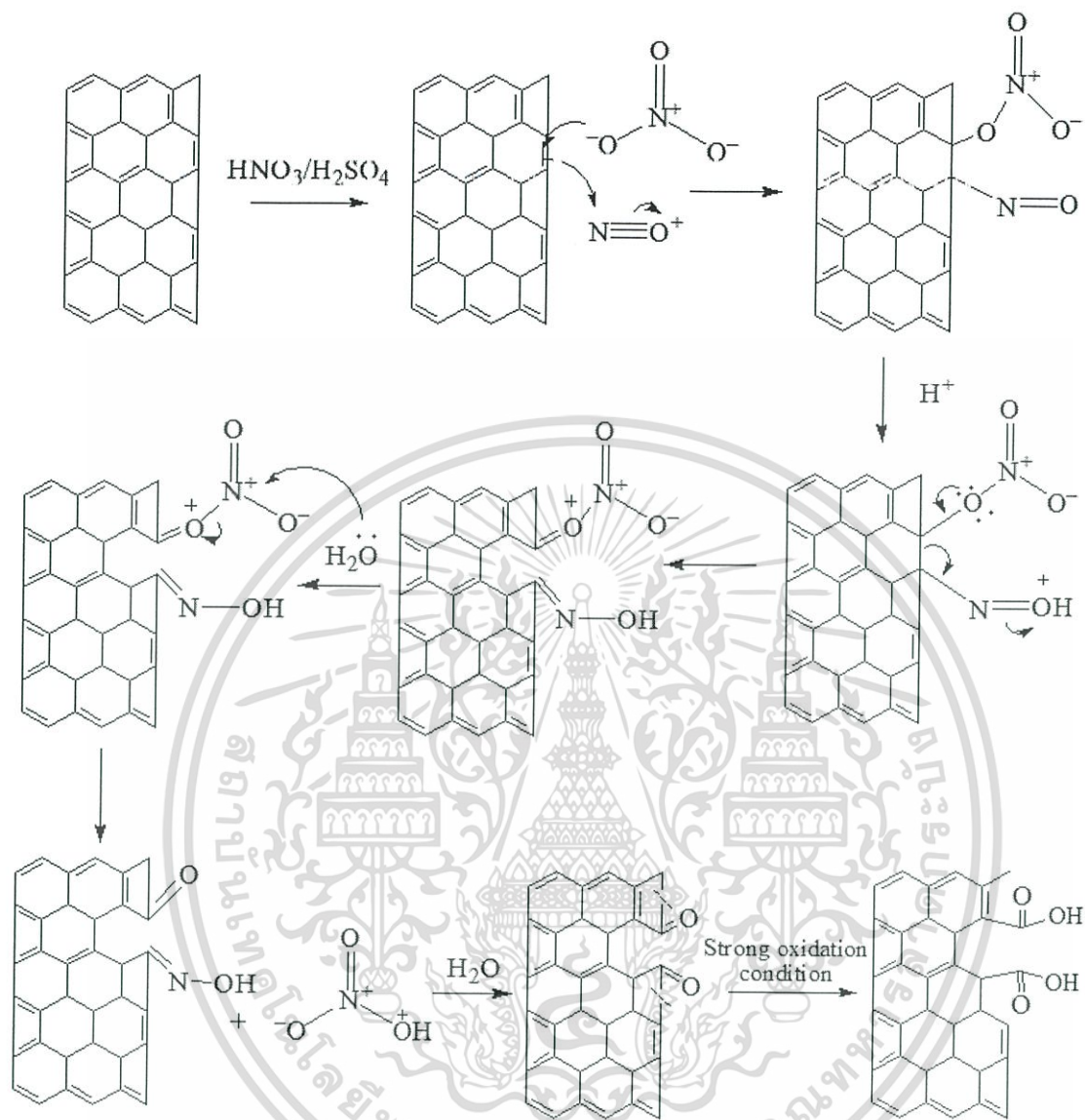


ขั้นที่ 2



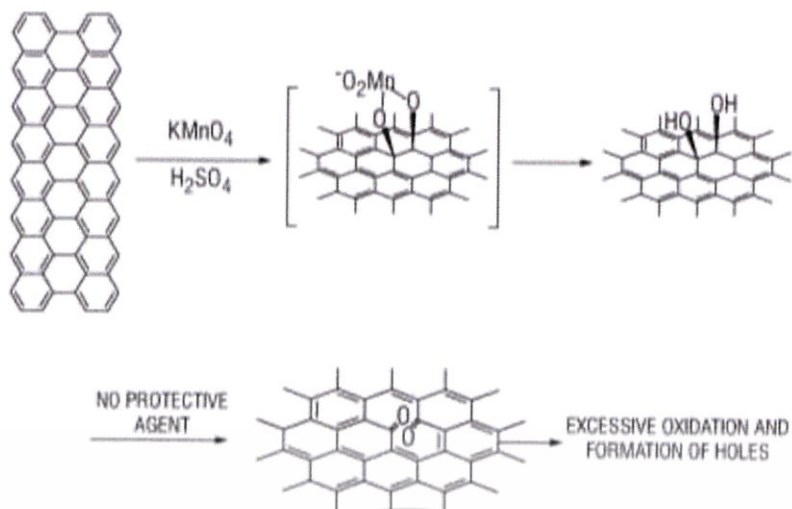
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นที่ 3



รูปที่ 4.2 กลไกการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นด้วยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

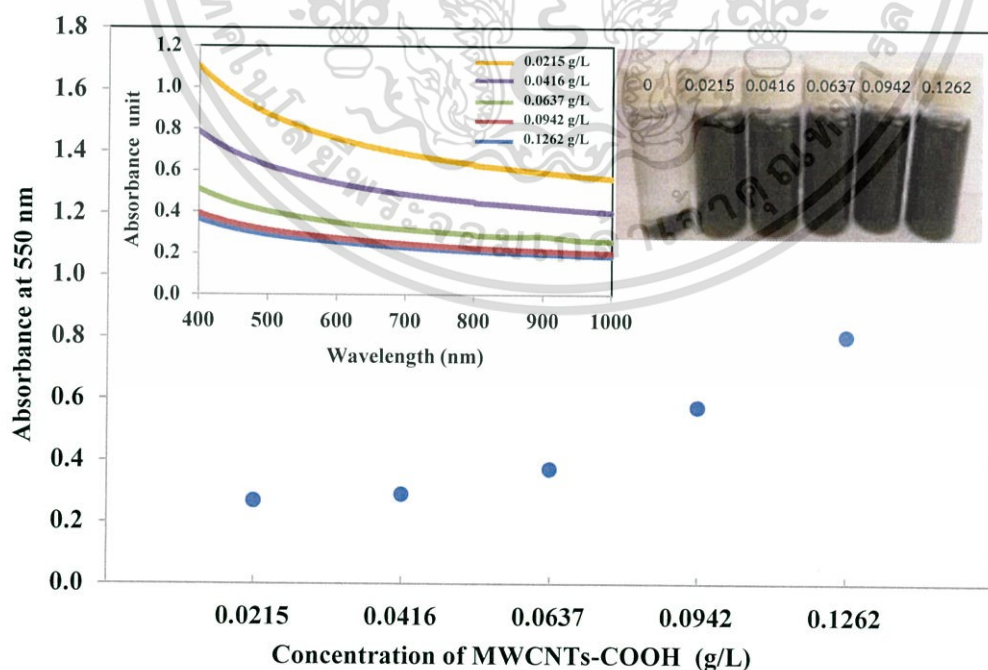
จากงานวิจัย Jame M. Tour และคณะ [64] ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวแผ่นกราฟีนด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยการใช้กรด $\text{KMnO}_4 : \text{H}_2\text{SO}_4$ ในสัดส่วน 1:3 โดยปริมาตร กลไกการปรับปรุงพื้นผิวของแผ่นกราฟีนแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กลไกการปรับปรุงพื้นผิวแผ่นกราฟีนด้วยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

4.1.1 ผลการศึกษาการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes; MWCNTs) ที่ปรับปรุงพื้นผิว

ในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองโดยการเตรียมสารละลาย MWCNTs-COOH ที่ความเข้มข้น 0.0215, 0.0416, 0.0637, 0.0942, 0.1262 กรัมต่อลิตร หรือซึ่ง MWCNTs-COOH มา 1, 3, 5, 7 และ 10 มิลลิกรัม ผสมกับน้ำปราศจากไอออน (DI water) 80 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายไปทำให้เกิดการกระจายตัวด้วยเครื่อง Sonicated probe เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งสารทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อสังเกตการกระจายตัวของ MWCNTs-COOH แล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.4



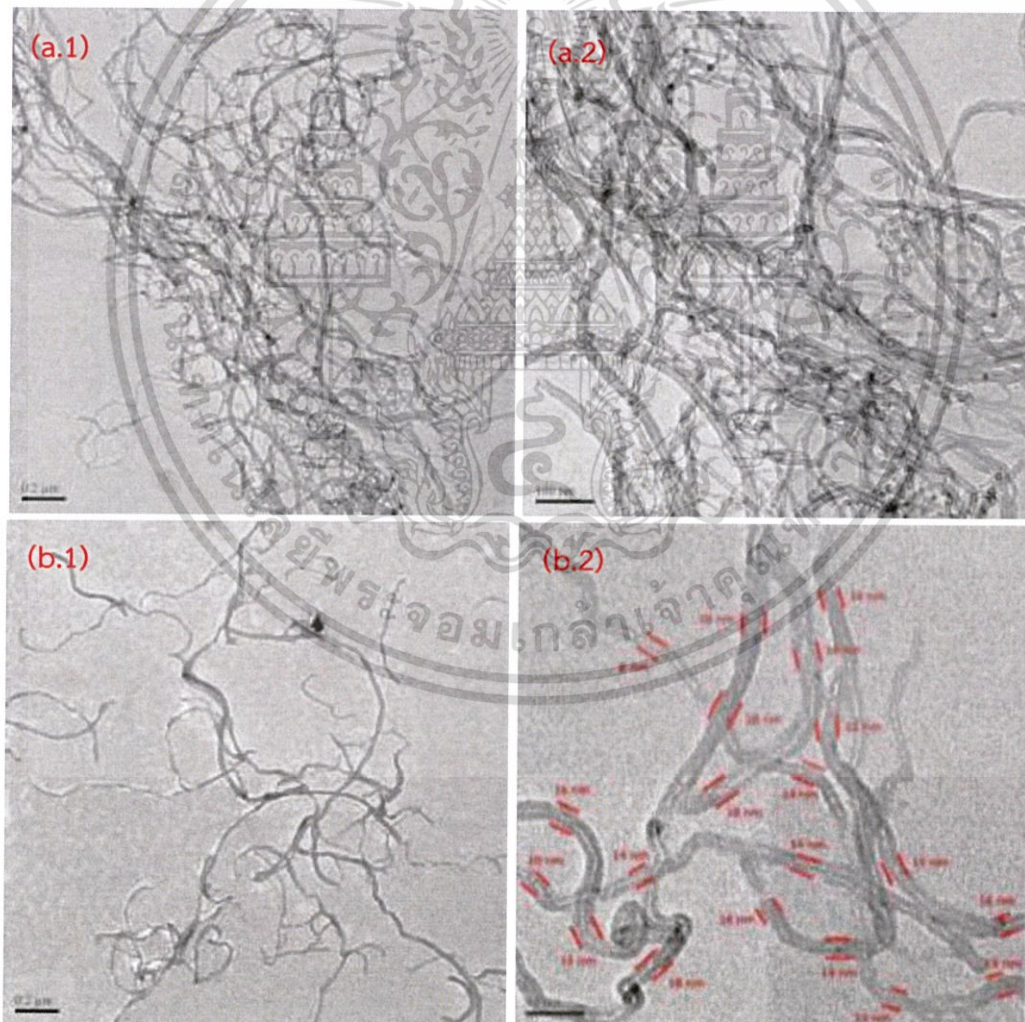
รูปที่ 4.4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย MWCNTs-COOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ และภาพการกระจายของ MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวในน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 อธิบายได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย MWCNTs-COOH เพิ่มขึ้น การกระจายตัวของ MWCNTs-COOH ในน้ำก็มากขึ้น จากกราฟการดูดกลืนแสงจะพบว่าสารละลาย MWCNTs-COOH ที่ความเข้มข้น 0.1262 กรัมต่อลิตร มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด แสดงว่า MWCNTs-COOH สามารถกระจายตัวในน้ำได้มากที่สุด เนื่องจากการโซนิเคตเป็นการสั่นด้วยคลื่นความถี่สูงส่งผลให้ MWCNTs-COOH เกิดการกระจายตัวได้ดีในน้ำหรือของเหลว ดังนั้นความเข้มข้นของ MWCNTs-COOH ที่เหมาะสมในการปรับปรุงพื้นผิว MWCNTs ในน้ำ 80 มิลลิลิตร คือ 0.1262 กรัมต่อลิตรหรือ 10 มิลลิกรัม

4.1.2 ผลการศึกษารูปร่าง ขนาด และลักษณะการกระจายตัวของ MWCNTs ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

ในการทดลองนี้ได้นำท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรดผสมที่ความเข้มข้น 0.1262 กรัมต่อลิตรหรือ 10 มิลลิกรัม ในน้ำ 80 มิลลิลิตร หยดลงบนกริด (Grid) แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ภาพ TEM โดยที่ (a) MWCNTs ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว และ (b) MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิว

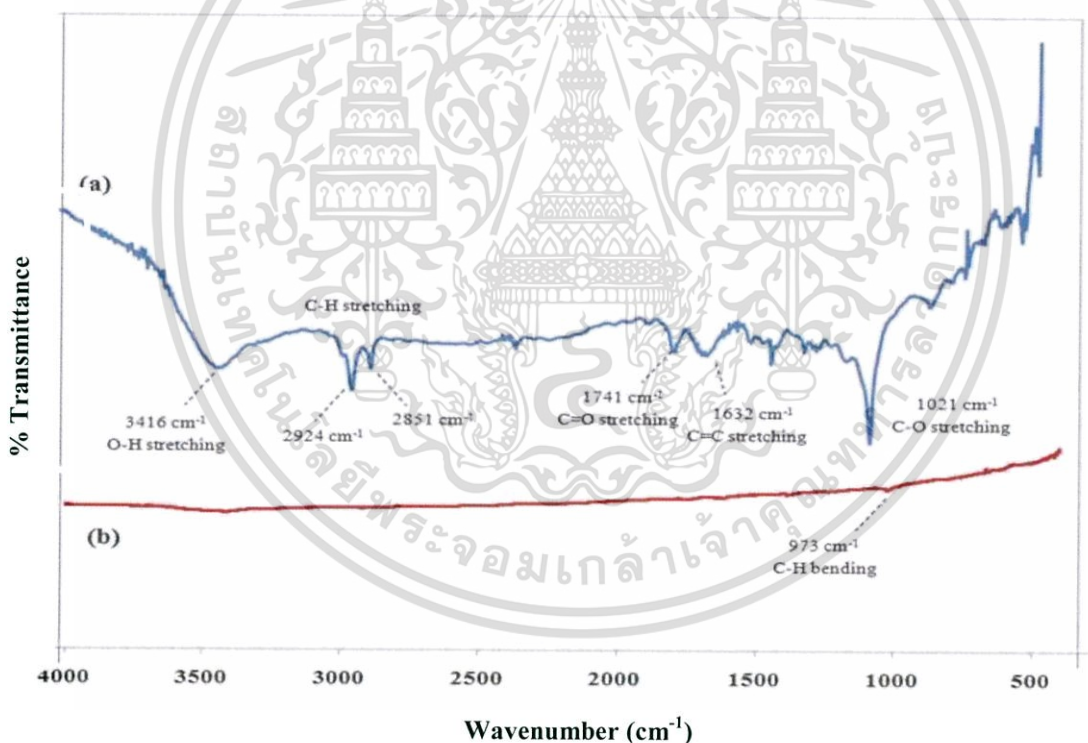
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) รูปที่ 4.5(a) แสดงให้เห็นว่า MWCNTs ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มอยู่ในสารละลาย เนื่องจากเกิดแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals forces) ระหว่างท่อนาโนคาร์บอนด้วยกันเอง โดยความกว้างของท่อนาโนคาร์บอนที่ยังไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวนั้นมีความกว้างของท่อวงนอกเท่ากับ 10 ± 1 นาโนเมตร และมีความยาวของท่อ ประมาณ 3 ถึง 6 ไมโครเมตร (อ้างอิงข้อมูลจากสารเคมี Sigma-Aldrich, USA)

จากรูปที่ 4.5(b) แสดงให้เห็นว่า MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดการกระจายตัวอยู่ในสารละลาย เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันมาสร้างพันธะโคเวเลนต์ที่ผิวท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะไปลดการเกิดแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างท่อนาโนคาร์บอน ส่งผลให้ท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวในน้ำหรือของเหลวได้ดีโดยมีความกว้างของท่อวงนอกเฉลี่ยเท่ากับ 14.6 ± 0.6 นาโนเมตร

4.1.3 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของ MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

ในการทดลองนี้เป็นการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ MWCNTs ก่อน และหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรดผสม แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 สเปกตรัม FTIR ของ (a) MWCNTs-COOH และ (b) Pristine MWCNTs

จากรูปที่ 4.6 สามารถอธิบายได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงแถบการสั่นของพันธะต่างๆ จากสเปกตรัม FTIR

Pristine MWCNTs		MWCNTs-COOH	
Bond	Wavenumber (cm ⁻¹)	Bond	Wavenumber (cm ⁻¹)
C-H bending	973	O-H stretching	3,416
-	-	C-H stretching	2,924 , 2,851
-	-	C=O stretching	1,741
-	-	C=C stretching	1,632
-	-	C-O stretching	1,021

จากรูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของท่อนาโนคาร์บอนที่ยังไม่ผ่าน และผ่านการปรับปรุงพื้นผิว พบว่า ท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (a) ด้วยกรดไนตริก (HNO₃) ผสมกับกรดซัลฟูริก (H₂SO₄) จะแสดงตำแหน่งเลขคลื่นที่ 3,416 cm⁻¹ ของพันธะ O-H stretching หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล, ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1,741 cm⁻¹ ของพันธะ C=O stretching หมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล, ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1,632 cm⁻¹ ของพันธะ C=C stretching, ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1,021 cm⁻¹ ของพันธะ C-O stretching และตำแหน่งเลขคลื่นที่ 2,924, 2,851 cm⁻¹ ของพันธะ C-H stretching ในส่วนของสเปกตรัมท่อนาโนคาร์บอนที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (b) จะแสดงตำแหน่งเลขคลื่นที่ 973 cm⁻¹ ตรงกับพันธะ C-H bending ที่ชัดเจนเพียงพีคเดียว ดังนั้นทำให้รู้ว่าท่อนาโนคาร์บอนได้ถูกการปรับปรุงพื้นผิวแล้วจริง

จากงานวิจัยของ ทิยานันท์ เจือโกวิน และคณะ [65] เมื่อพิจารณาสเปกตรัม MWCNTs-COOH ท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้กรดผสมซัลฟูริก และกรดไนตริก (H₂SO₄/HNO₃) พบว่าในกรดผสมจะเกิดไอออนของไนโตรเนียม (NO₂⁺) ขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้



ซึ่งไนโตรเนียม (NO₂⁺) จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนบริเวณพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนจึงทำให้ในสเปกตรัมท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (MWCNTs-COOH) ปรากฏหมู่ฟังก์ชัน O-H ขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมท่อนาโนคาร์บอนที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (Pristine MWCNTs) ซึ่งไม่มีค่าเกิดขึ้นที่เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชัน O-H เกิดขึ้นเลย ดังนั้นจึงแสดงได้ว่าสเปกตรัม (MWCNTs-COOH) ท่อนาโนคาร์บอนได้ถูกออกซิไดซ์ (Oxidize) ด้วยกรดเพราะปริมาณหมู่ฟังก์ชัน O-H ที่เพิ่มขึ้น

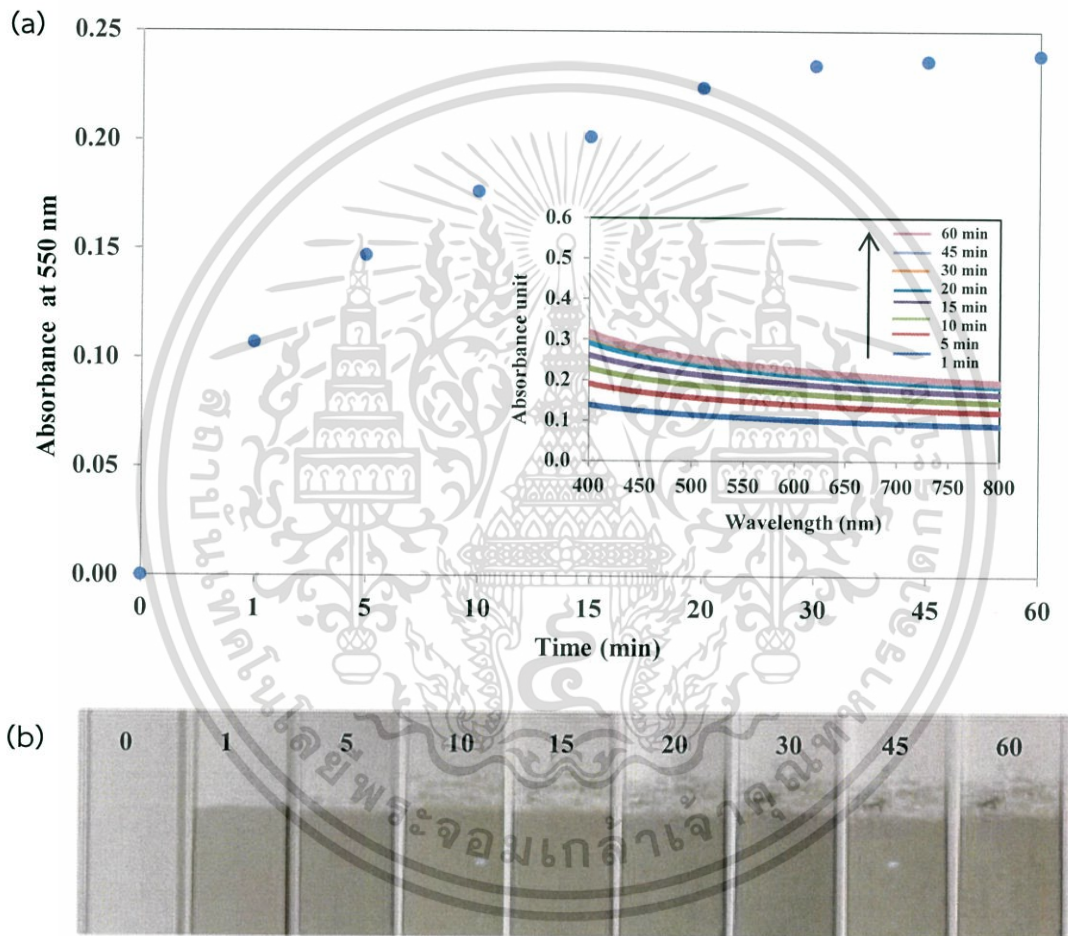
4.2 การศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนของท่อนาโนคาร์บอนที่ปรับปรุงพื้นผิว (MWCNTs-COOH) ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) ซึ่งแบ่งผลการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ ส่วนที่หนึ่ง คือ ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางในการลุ่มสารละลาย MWCNTs-COOH ส่วนไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สอง คือ ผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH และส่วนสุดท้าย คือ ผลการศึกษาจำนวนชั้นแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ร่วมกับสารละลาย PDADMAC

4.2.1 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางในการจุ่มสารละลาย MWCNTs-COOH

ในการทดลองนี้ทำการทดลองโดยการนำแผ่นกระจกที่ปรับสภาพผิวจุ่มลงในสารละลาย MWCNTs-COOH ที่มีความเข้มข้น 0.1262 กรัมต่อลิตร ที่เวลา 0, 1, 5, 10, 15, 20, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ แล้วทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง พร้อมสลับกับการจุ่มสารละลายในเวลาที่เพิ่มขึ้น แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 (a) ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH และ (b) แผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ขนาดนาโน โดยจุ่มในเวลาที่แตกต่างกัน

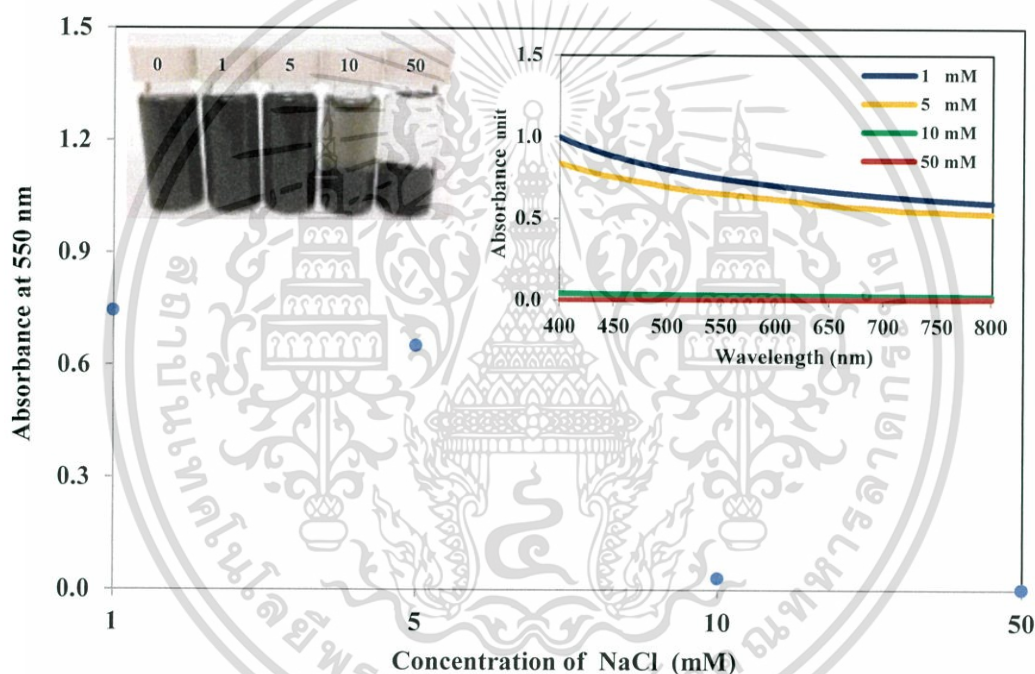
จากรูปที่ 4.7 สามารถอธิบายได้ว่า ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวในระยะเวลาช่วง 1-20 นาทีแรกของการจุ่ม พบว่าแผ่นฟิล์มบางที่ได้มีค่าการดูดกลืนแสงที่สูงขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลาที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำการจุ่มแผ่นฟิล์มบางหลังจาก 20 นาที จะเห็นได้ว่าค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางเริ่มมีค่าคงที่ เนื่องจากพื้นที่ผิวบนกระจกที่ปรับสภาพผิวแล้วเกิดการยึดเกาะกับ MWCNTs-COOH จนอึดตัว และไม่สามารถเกิดการสร้างฟิล์มบางเพิ่มได้อีก ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการเคลือบแผ่นฟิล์มบางด้วย MWCNTs ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิว คือ 20 นาที

4.2.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH

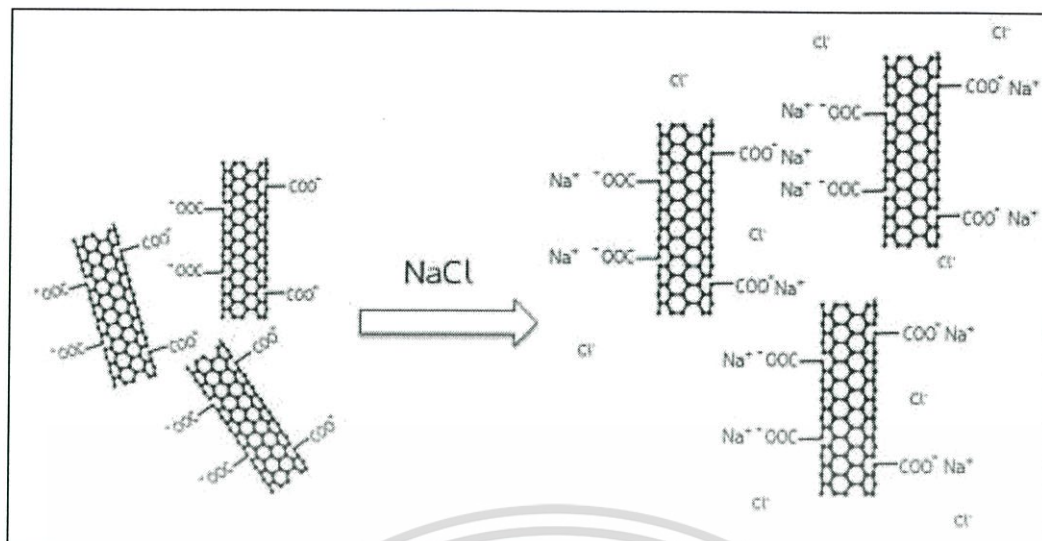
เนื่องจากสารละลาย MWCNTs-COOH เกาะติดแผ่นฟิล์มบางได้น้อย จึงมีการนำโซเดียมคลอไรด์มาผสมกับสารละลาย MWCNTs-COOH เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการจุ่มสารละลาย MWCNTs-COOH และเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะของ MWCNTs-COOH บนแผ่นฟิล์มบางได้ดียิ่งขึ้น จากการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์

4.2.2.1 การศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในรูปแบบของสารละลาย

เตรียมสารละลาย MWCNTs-COOH และเติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ผสมเข้าไปให้มีความเข้มข้น 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ จากนั้นศึกษาความเป็นสารละลายของ MWCNTs-COOH โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ค่าการดูดกลืนแสงสารละลาย MWCNTs-COOH และภาพสารละลาย MWCNTs-COOH ที่ความเข้มข้นของ NaCl ที่แตกต่างกัน

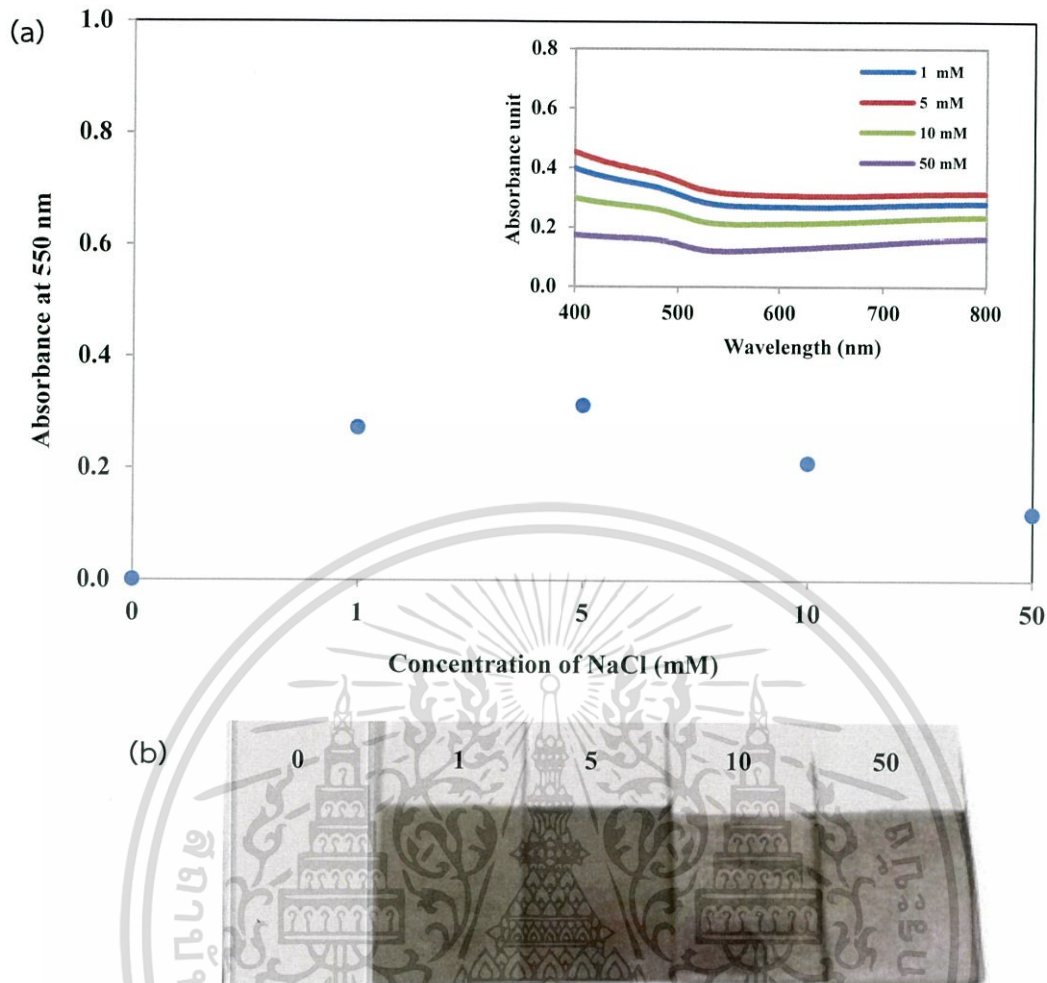


รูปที่ 4.9 แสดงกลไกการเติมโซเดียมคลอไรด์ในสารละลาย MWCNTs-COOH

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 อธิบายได้ว่า เมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์ลงในสารละลาย MWCNTs-COOH ผลปรากฏว่าสารละลายเริ่มตกตะกอนที่ความเข้มข้น 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงลดลง เนื่องจากทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้สารตกตะกอนเมื่อเพิ่มปริมาณของโซเดียมคลอไรด์มากขึ้น

4.2.2.2 การศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในรูปแบบของการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง

นำกระจกที่ปรับสภาพผิวจุ่มลงในสารละลาย MWCNTs-COOH ที่มีความเข้มข้นของ NaCl 1, 5, 10 และ 50 มิลลิโมลาร์ จากนั้นศึกษาการขึ้นรูปของแผ่นฟิล์มบาง โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง แสดงผลการทดลองรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 (a) ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่ความเข้มข้นของ NaCl แตกต่างกัน และ (b) ภาพแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่ความเข้มข้นของ NaCl แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.10 อธิบายได้ว่า เมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์ลงในสารละลาย MWCNTs-COOH แล้วนำไปสร้างเป็นแผ่นฟิล์มบาง พบว่าโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 1 ถึง 5 มิลลิโมลาร์ ทำให้แผ่นฟิล์มบางมีค่าการดูดกลืนแสงสูงขึ้นตามลำดับ และจะเห็นว่าสีของแผ่นฟิล์มบางนั้นมีความเข้มข้น เนื่องจาก NaCl ได้ลดแรงผลักระหว่างประจุ (Electrostatic repulsion) ของท่อ MWCNTs-COOH ทำให้เกิดการยึดเกาะกับกระจกที่ปรับสภาพผิวแล้วได้ดียิ่งขึ้น

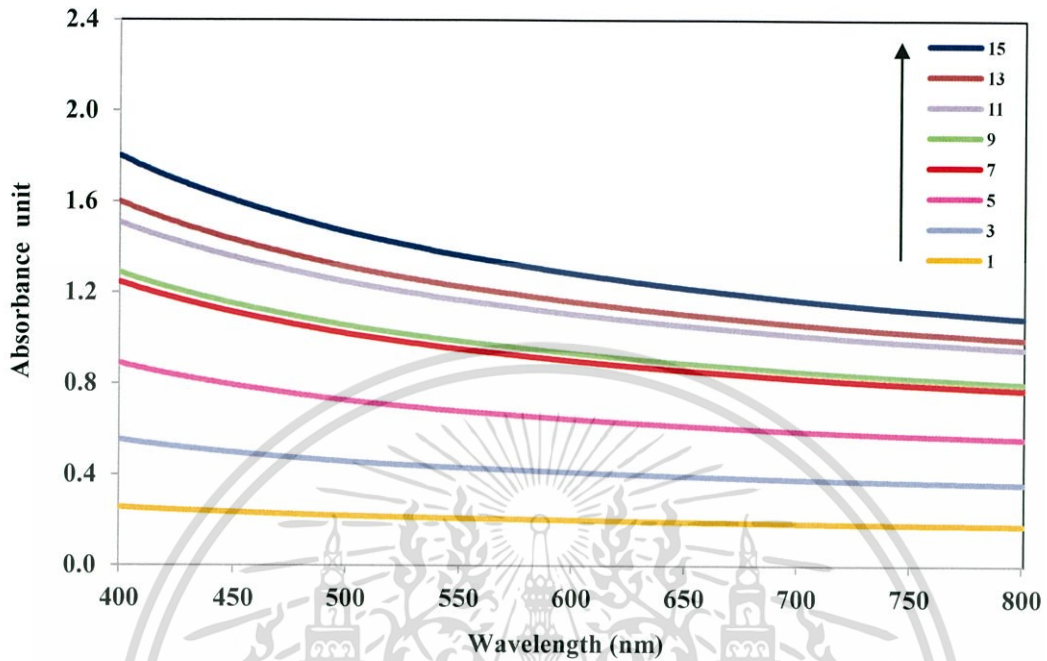
ส่วนโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 10 ถึง 50 มิลลิโมลาร์ มีค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำลงตามลำดับ ซึ่งเห็นได้จากการเกิดตะกอนในสารละลายที่มีการทดลองในก่อนหน้านี้นี้ ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่าง MWCNTs-COOH กับกระจกน้อยลง ส่งผลให้การยึดเกาะของสารไม่ติดตามความเข้มข้นของ NaCl ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสมในการเติมลงสารละลาย MWCNTs-COOH เพื่อนำมาสร้างฟิล์มบาง MWCNTs-COONa คือ 5 มิลลิโมลาร์

4.2.3 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH และประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า

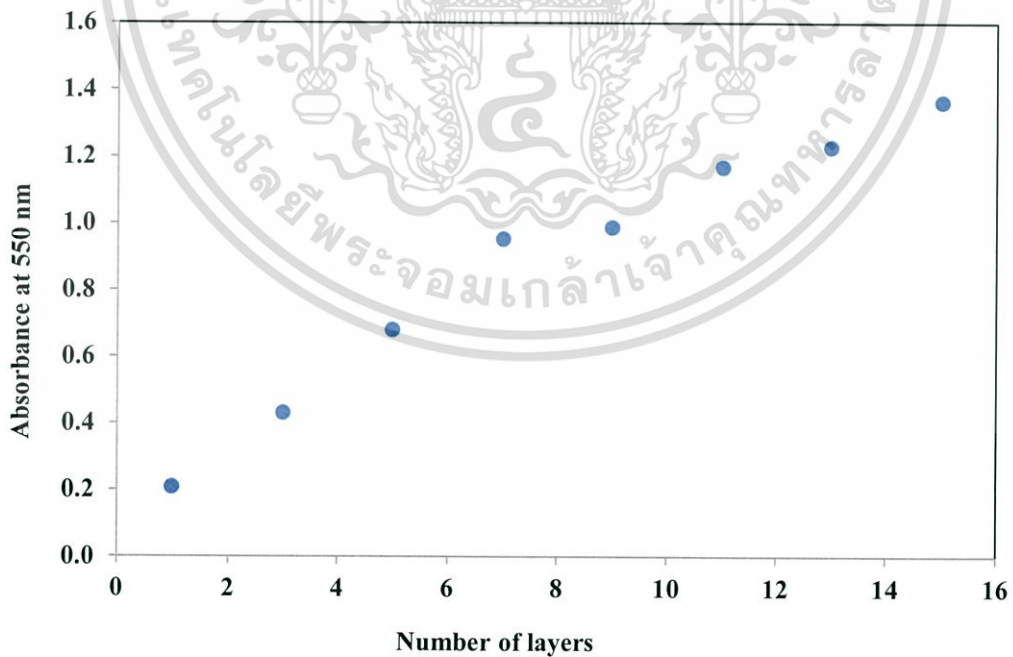
ทำการทดลองโดยการนำกระจกที่ปรับสภาพพื้นผิวจุ่มสลักับสารละลาย MWCNTs-COOH ที่เติม NaCl กับสารละลาย PDADMAC ให้ได้จำนวน 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15 ชั้นแล้วนำมาวัดค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดกลืนแสง และวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.11 และ 4.12

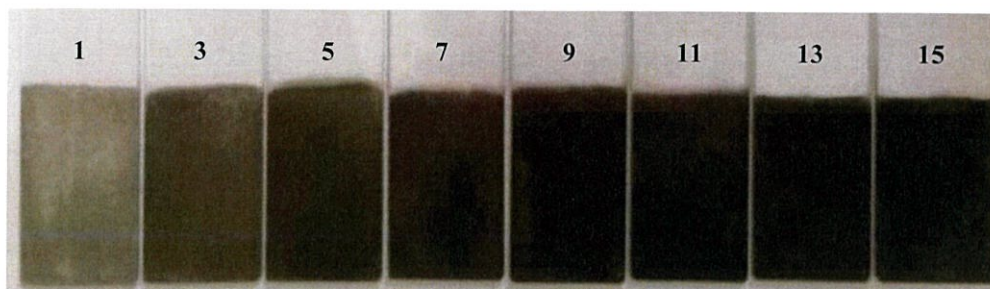


รูปที่ 4.11 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางแตกต่างกัน



รูปที่ 4.12 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ภาพแผ่นฟิล์มบางMWCNTs-COOH ที่จำนวนชั้นแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่จำนวนชั้นต่างๆ

จำนวนชั้น	ค่าความต้านทานไฟฟ้า(k Ω) (n=3)
1	132.26 \pm 9.67
3	21.57 \pm 1.00
5	19.48 \pm 0.84
7	17.62 \pm 1.22
9	9.65 \pm 0.45
11	6.12 \pm 0.40
13	5.51 \pm 0.16
15	4.03 \pm 0.35

จากรูป 4.11 และ 4.12 เมื่อทำการวิเคราะห์ที่ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีจำนวนชั้นของฟิล์มบาง เท่ากับ 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15 ชั้น พบว่าค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นฟิล์ม เนื่องจากได้ทำการทดลองที่อยู่ในสภาวะเดียวกันทั้งหมด ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย, ชนิดของสารละลาย, พื้นที่ผิวของแผ่นกระจก และระยะเวลาการจุ่มสาร ทำให้เมื่อทำการขึ้นรูปฟิล์มบางแบบชั้นต่อชั้น จึงเกิดการยึดเกาะในแต่ละชั้นที่เท่ากันและมีค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นเป็นเท่าต่อเท่า นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางยังมีผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้า ดังตารางที่ 4.1 เนื่องจาก MWCNTs เป็นตัวนำไฟฟ้า เมื่อมีปริมาณ MWCNTs มากขึ้นบนแผ่นฟิล์มบาง จึงส่งผลให้มีค่าความต้านทานที่ลดลง ซึ่งหมายความว่าค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบางจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นของแผ่นฟิล์มบาง

4.3 การสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโน (Silver nanoparticle; AgNPs) ด้วยวิธีการทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน

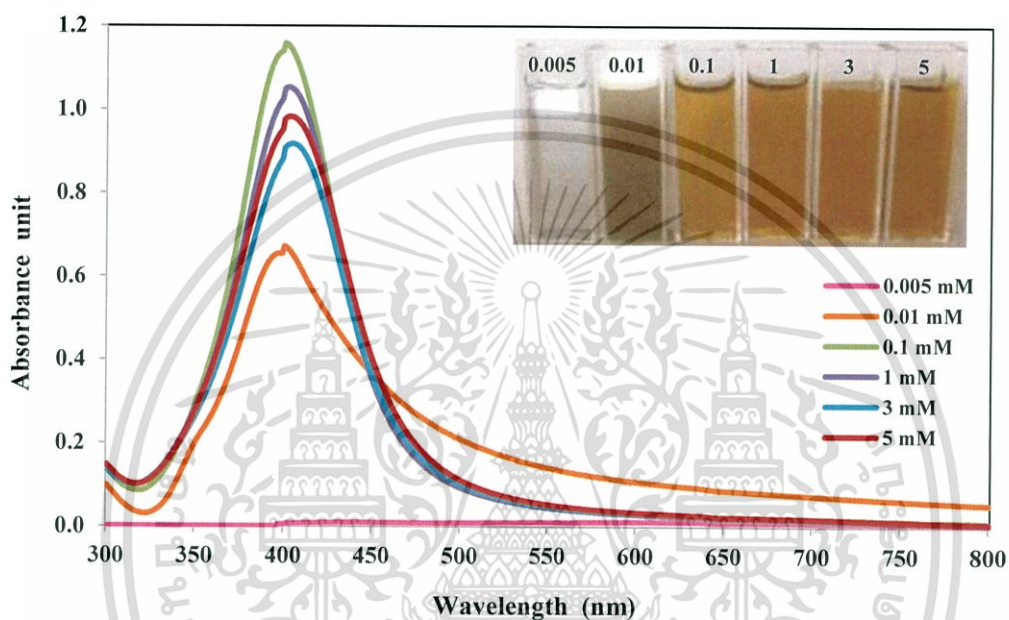
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโนด้วยการทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium borohydride; NaBH₄) เป็นตัวรีดิวซ์ และโพลิสไตรีนซัลโฟเนต (COPSS) เป็นสารรักษาเสถียรภาพ ทั้งนี้ได้มีการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาอีกแอซิดในการช่วยรักษาเสถียรภาพของอนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ขึ้น

4.3.1 ผลการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย COPSS ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs)

ได้ทำการทดลองโดยการเติมสารละลาย COPSS ปริมาตร 0.005, 0.01, 0.1, 1, 3 และ 5 มิลลิลิตร เพื่อดูประสิทธิภาพในการรักษาเสถียรภาพของอนุภาคเงินระดับนาโน โดยนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ความเข้มข้น COPSS ต่างกัน

จากรูปที่ 4.14 สามารถสรุปค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ COPSS ความเข้มข้นแตกต่างกัน ดังผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด

ความเข้มข้นของ COPSS (mM)	ความยาวคลื่นสูงสุด (nm)
0.005	-
0.01	411
0.1	400
1	402
3	403
5	404

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

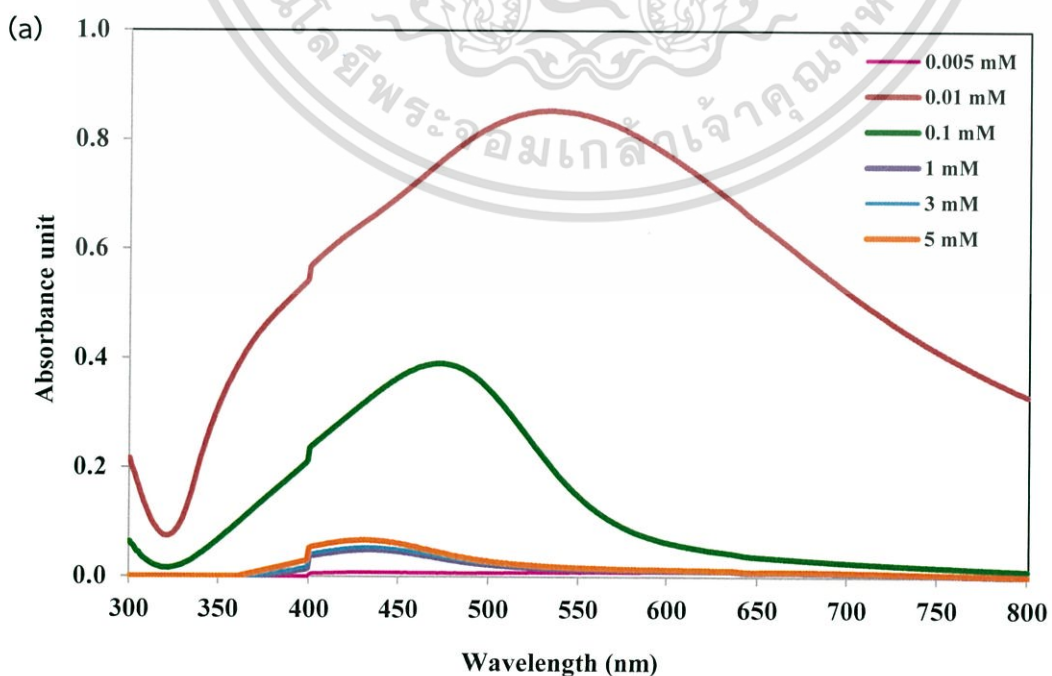
จากรูปที่ 4.14 อธิบายได้ว่า การเพิ่มความเข้มข้นของ COPSS (สารรักษาเสถียรภาพ) จะทำให้อนุภาคคอลลอยด์ของอนุภาคเงินระดับนาโนเพิ่มมากขึ้น จากสเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ สารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ความเข้มข้น COPSS แตกต่างกัน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ COPSS จะทำให้ขนาดอนุภาคเงินนาโนมีขนาดเล็กลง สเปกตรัมมีการเลื่อนไปทางสีน้ำเงิน (Blue shift) แต่ที่ความเข้มข้นที่ต่ำกว่าและสูงกว่า 0.1 mM จะมีค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำกว่า และขนาดของพีกกว้างขึ้นเนื่องจากการกระจายตัวของขนาดที่ใหญ่ และเล็กเกินไปของอนุภาคเงินระดับนาโนทำให้ส่งผลต่อแรงสั้นของพันธะ สรุปได้ว่าความเข้มข้น COPSS ที่ 0.1 mM อนุภาคระดับนาโนแสดงแถบการดูดกลืนที่ดีที่สุด และลักษณะของพีกที่แคบที่สุด เนื่องมาจากมีการกระจายตัวของขนาดอย่างหนาแน่น และแรงสั้นของพันธะที่มากที่สุด

4.4 การศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของอนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

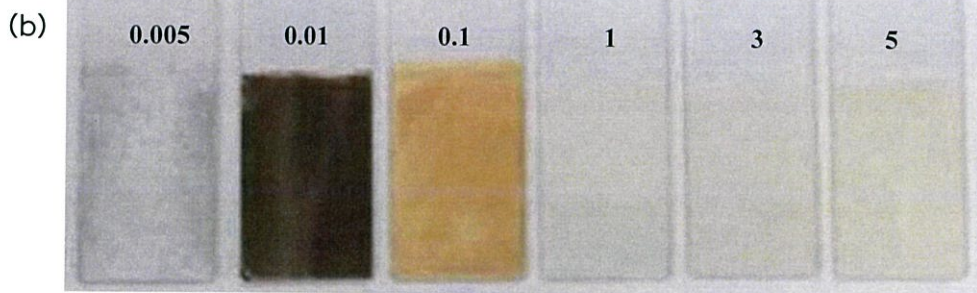
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างฟิล์มบางของอนุภาคเงินระดับนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นซึ่งแบ่งผลการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่หนึ่ง คือ ผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ COPSS ที่ช่วยให้อนุภาคเงินระดับนาโนยึดเกาะบนแผ่นกระจกที่ปรับสภาพพื้นผิว สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง และส่วนที่สอง คือ ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่มีความเข้มข้นของ COPSS แตกต่างกัน สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง

4.4.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ COPSS สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง

ในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินระดับนาโน ที่ความเข้มข้น 0.005, 0.01, 0.1, 1, 3 และ 5 มิลลิโมลาร์ บนแผ่นกระจกที่ปรับสภาพพื้นผิวในเวลา 20 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 (a) ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินระดับนาโน และ (b) ภาพแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินระดับนาโนโดยการจุ่มในเวลา 20 นาที ที่ COPSS ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.15 อธิบายได้ว่า เมื่อ COPSS ความเข้มข้น 0.005 มิลลิโมลาร์ จะเกิดการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางของอนุภาคเงินระดับนาโนที่ไม่ดี เนื่องจากความเข้มข้นของ COPSS ที่น้อยเกินไป ทำให้เกิดประจุลบ (Anion) ไปล้อมรอบอนุภาคเงินได้น้อยลงเช่นกัน ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างกระจกที่ปรับสภาพผิวกับอนุภาคเงินระดับนาโนไม่เพียงพอ การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางจึงไม่ดี

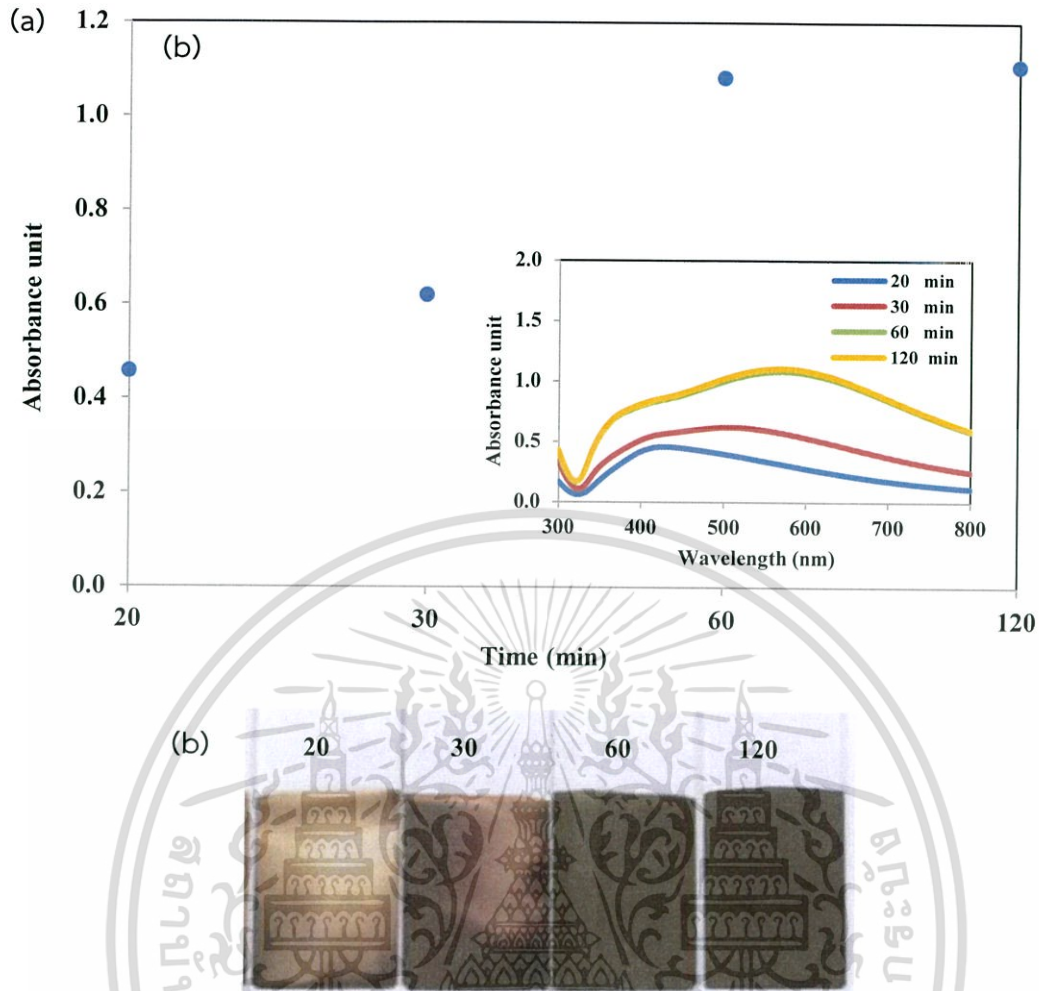
ส่วน COPSS ที่ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 มิลลิโมลาร์ อธิบายได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของ COPSS มีมากเกินไป ทำให้เกิดประจุลบไปล้อมรอบที่อนุภาคเงินระดับนาโนที่สังเคราะห์ในจำนวนมาก เกิดการผลักรันระหว่างอนุภาคเงินระดับนาโนที่มากขึ้น เนื่องจากมีประจุที่เหมือนกัน ส่งผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเงินระดับนาโนกับกระจกน้อยลง การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินระดับนาโนจึงไม่ดี ดังนั้นความเข้มข้นที่เหมาะสมของ COPSS ที่ทำให้อนุภาคเงินระดับนาโนยึดเกาะบนแผ่นกระจกที่ปรับสภาพได้ดีที่สุด คือ 0.01 และ 0.1 มิลลิโมลาร์

4.4.2 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ที่มีความเข้มข้นของ COPSS แตกต่างกัน สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

ในการทดลองนี้ทำการทดลองโดยการนำแผ่นกระจกที่ปรับสภาพผิวจุ่มลงในสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่มี COPSS เป็นตัวรักษาเสถียรภาพในความเข้มข้น 0.01 และ 0.1 มิลลิโมลาร์ ที่เวลาต่างๆ เพื่อศึกษาการขึ้นรูปของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน และประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้า

4.4.2.1 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์

นำ Primer จุ่มลงในสารละลาย COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ ที่เวลา 20, 30, 60 และ 120 นาที แล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงสลับกับจุ่มสารละลายตามเวลาที่กำหนด แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.16



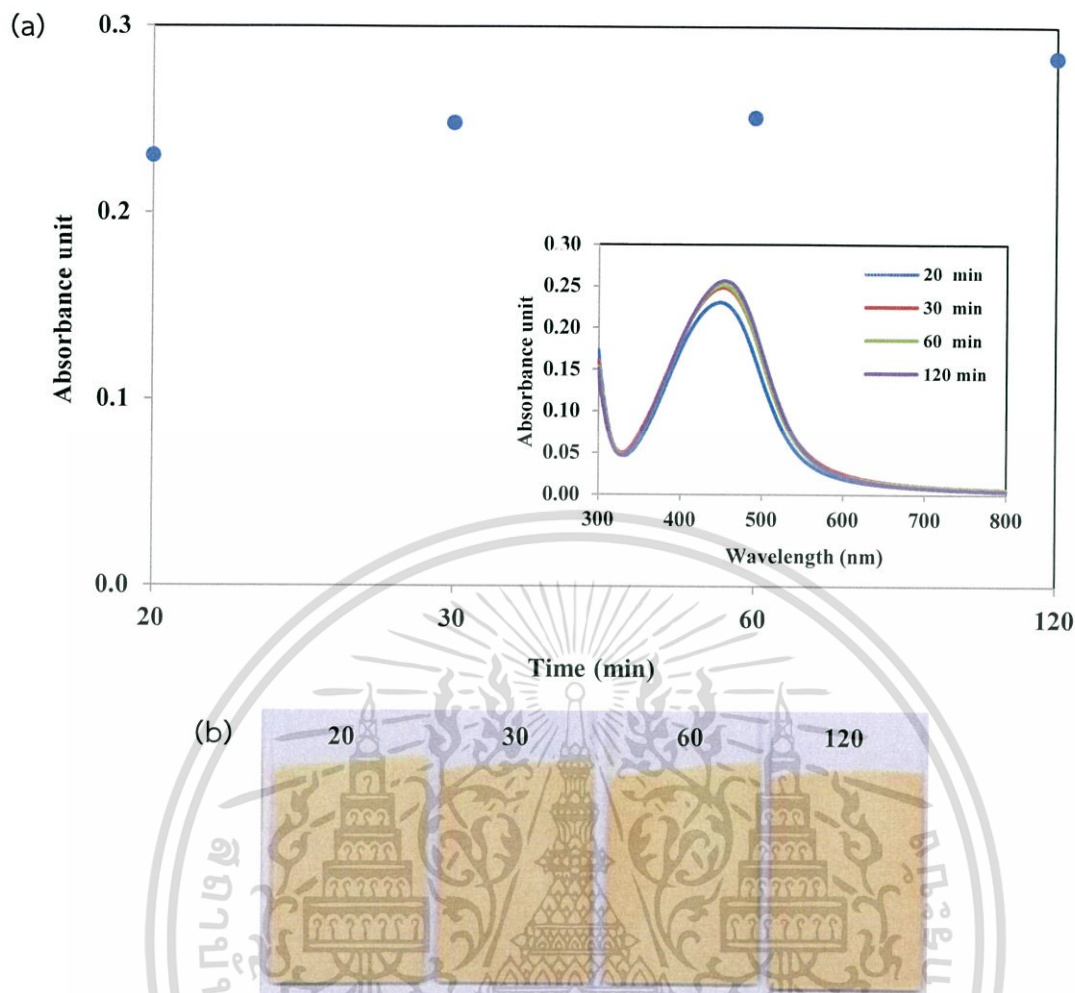
รูปที่ 4.16 (a) ค่าการดูดกลืนของแผ่นฟิล์มบาง AgNPs และ (b) ภาพแผ่นฟิล์มบาง AgNPs ที่ความเข้มข้น COPSS 0.01 มิลลิโมลาร์ ในเวลาการจุ่มที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.16 อธิบายได้ว่า ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินระดับนาโนที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ โดยใช้เวลาในการจุ่มแผ่นฟิล์มบางแตกต่างกัน พบว่าในช่วง 60 นาทีแรกของการจุ่ม แผ่นฟิล์มบางที่ได้จะมีค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่เมื่อจุ่มแผ่นฟิล์มบางโดยใช้เวลานาน 60 นาที แผ่นฟิล์มบางจะมีค่าการดูดกลืนแสงที่เริ่มคงที่ เนื่องจากพื้นที่ผิวบนกระจกที่ปรับสภาพผิวเกิดการอิ่มตัวจากการยึดเกาะของอนุภาคเงินระดับนาโน ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมในการเคลือบแผ่นฟิล์มบางด้วยสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ คือ 60 นาที และเมื่อนำแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินนาโนที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าพบว่าแผ่นฟิล์มตรวจวัดค่าความต้านทานไม่ได้ ฉะนั้นแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินระดับนาโนจึงไม่นำไฟฟ้า เนื่องจาก COPSS มีสภาพเป็นฉนวนไฟฟ้า

4.4.2.2 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ที่ความเข้มข้น COPSS 0.1 มิลลิโมลาร์

นำ Primer จุ่มลงในสารละลาย COPSS ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ที่เวลา 20, 30, 60 และ 120 นาที แล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงสลับกับจุ่มสารละลายตามเวลาที่กำหนด แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 (a) ค่าการดูดกลืนของแผ่นฟิล์มบาง AgNPs และ (b) ภาพแผ่นฟิล์มบาง AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ในเวลาการจุ่มที่ต่างกัน

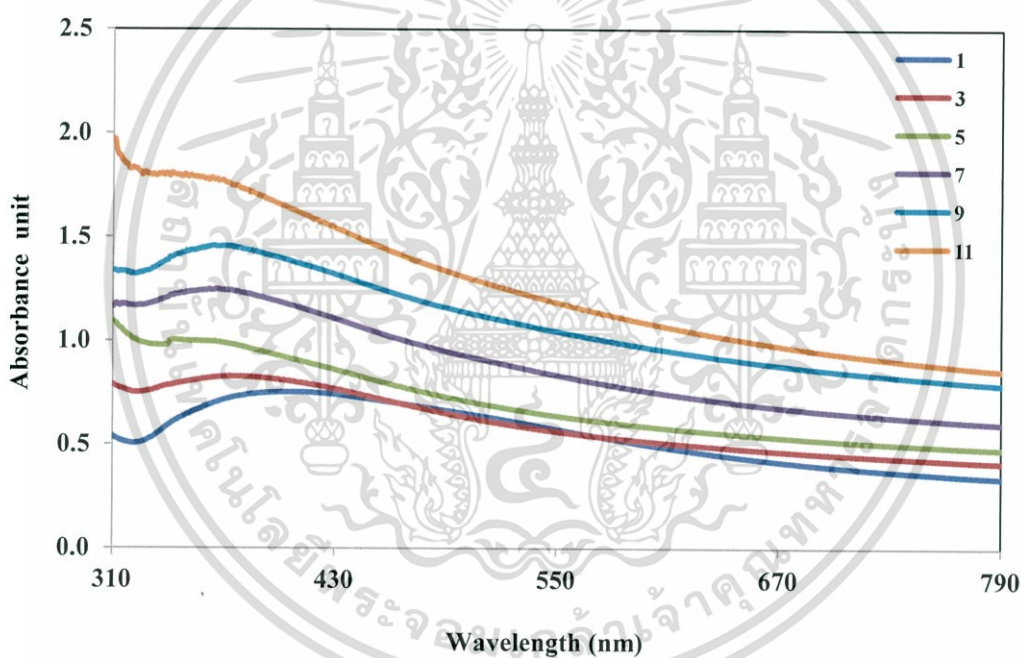
จากรูปที่ 4.17 อธิบายได้ว่า ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินระดับนาโนที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ โดยใช้เวลาจุ่มแผ่นฟิล์มบางแตกต่างกัน พบว่า เมื่อจุ่มแผ่นฟิล์มบางโดยใช้เวลาเกิน 20 นาที แผ่นฟิล์มบางจะมีการดูดกลืนแสงที่คงที่ เนื่องจากพื้นที่ผิวบนกระจกที่ปรับสภาพผิว เกิดการอิมิตัวจากการยึดเกาะของอนุภาคเงินระดับนาโน ในที่นี้จะเห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงเริ่มคงที่ตั้งแต่เวลาแรกที่ทำการศึกษา ดังนั้นจึงเลือกเวลาที่ 60 นาที เพื่อใช้เปรียบเทียบที่ความเข้มข้น COPSS 0.01 มิลลิโมลาร์ ในการศึกษาครั้งต่อไปและเมื่อนำแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินระดับนาโนที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ วัดค่าความต้านทานไฟฟ้า พบว่าแผ่นฟิล์มตรวจวัดค่าความต้านทานไม่ได้ ฉะนั้นแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินระดับนาโนนั้นไม่นำไฟฟ้าเนื่องจาก COPSS มีสภาพเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี จึงทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านได้

4.5 ผลการสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนของ MWCNTs-COOH ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

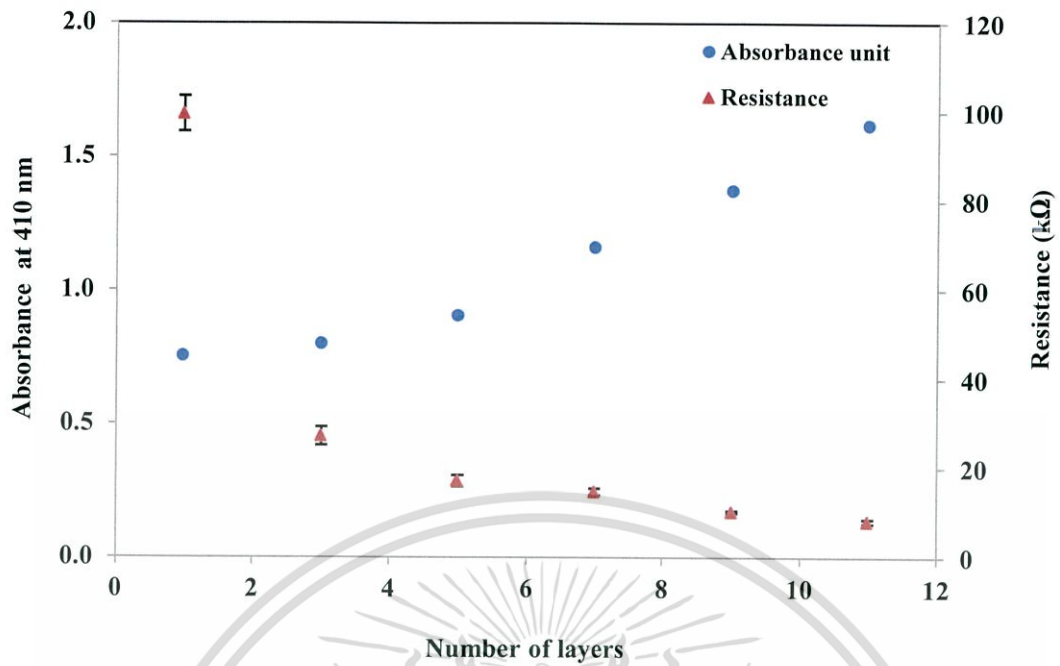
วิเคราะห์โดยการนำแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่จำนวนชั้นฟิล์มต่างๆ กลุ่มสารละลาย PDADMAC แล้วนำไปจุ่มกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 และ 0.1 มิลลิโมลาร์ และวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง

4.5.1 ผลการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน MWCNTs-COOH ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ที่ความเข้มข้น COPSS 0.01 มิลลิโมลาร์

นำแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 ชั้น กลุ่มสารละลาย PDADMAC แล้วนำไปจุ่มร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ จากนั้นนำไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง และวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.18 และ 4.19



รูปที่ 4.18 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่จำนวนชั้นต่างๆ ร่วมกับสารละลาย AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์



รูปที่ 4.19 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร และค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่จำนวนชั้นต่างๆ ร่วมกับสารละลาย AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์



รูปที่ 4.20 ภาพแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่จำนวนชั้นต่างๆ ร่วมกับ AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์

ตารางที่ 4.4 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มต่างๆ ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์

จำนวนชั้น	ค่าความต้านทานไฟฟ้า (kΩ) (n=3)
1	99.59 ± 3.99
3	27.22 ± 2.07
5	17.20 ± 1.28
7	14.72 ± 0.74
9	10.26 ± 0.27
11	8.13 ± 0.48

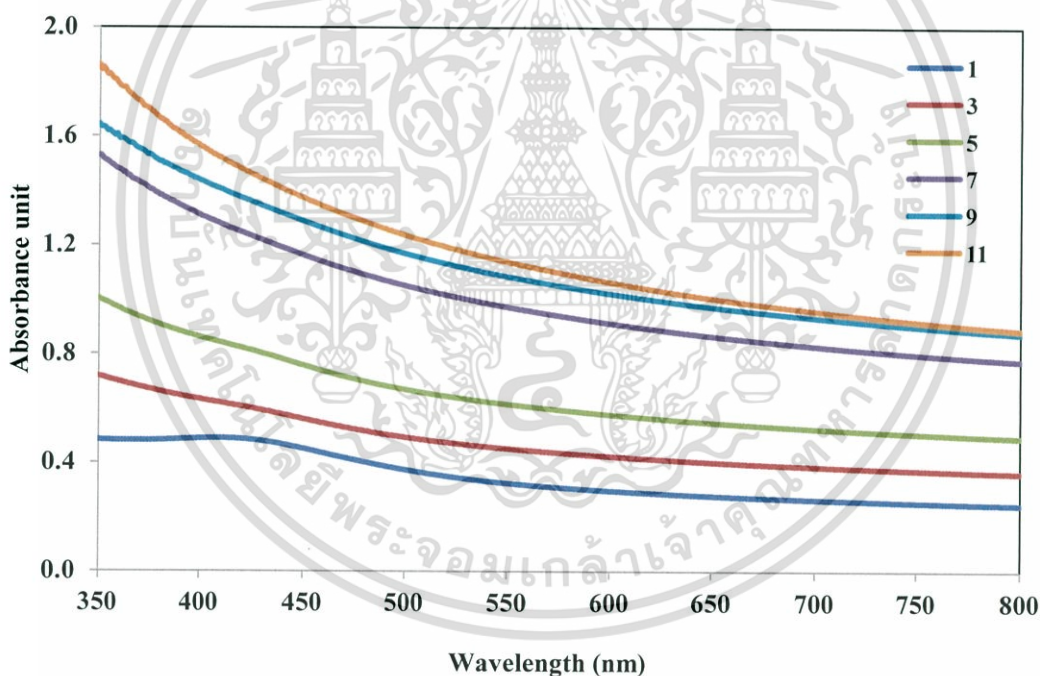
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.18 และ 4.19 อธิบายได้ว่า เมื่อสร้างแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 ชั้น ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยค่าการดูดกลืนแสง พบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นฟิล์มบาง MWCNTs/AgNPs และเมื่อนำแผ่นฟิล์มบางวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลงตามความหนาของชั้นฟิล์มบาง MWCNTs/AgNPs เนื่องจากแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินระดับนาโนตรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าไม่ได้ ดังนั้นค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs/AgNPs จะแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นเท่านั้น ดังตารางที่ 4.4

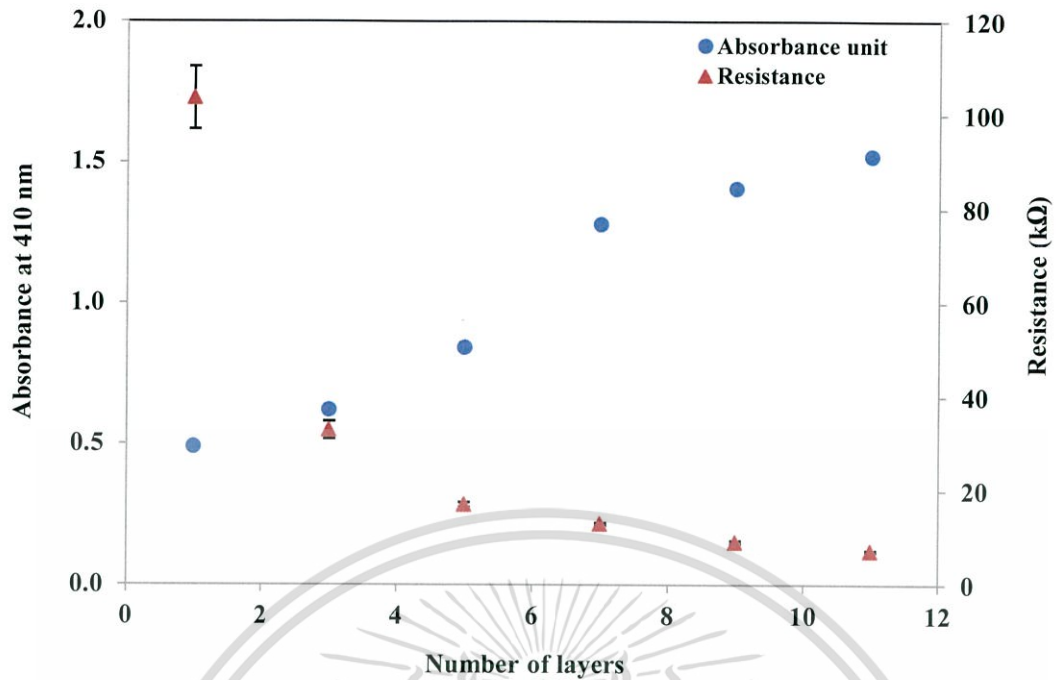
4.5.2 ผลการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ร่วมกับสารละลาย

อนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์

นำแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 ชั้น จุ่มสารละลาย PDADMAC แล้วนำไปจุ่มร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ จากนั้นนำไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงและวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.21, 4.22 และ 4.23



รูปที่ 4.21 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่จำนวนชั้นต่างๆ ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์



รูปที่ 4.22 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร และค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่จำนวนชั้นต่างๆ ร่วมกับสารละลาย AgNPs ที่ความเข้มข้น COPSS 0.1 มิลลิโมลาร์



รูปที่ 4.23 ภาพแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่จำนวนชั้นต่างๆ ร่วมกับ AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์

ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวนชั้นต่างๆ ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์

จำนวนชั้น	ค่าความต้านทานไฟฟ้า (kΩ) (n=3)
1	103.70 ± 6.65
3	32.93 ± 1.88
5	17.02 ± 0.51
7	12.91 ± 0.26
9	9.05 ± 0.34
11	7.17 ± 0.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 อธิบายได้ว่า เมื่อสร้างแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์ม 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 ชั้น ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยค่าการดูดกลืนแสง พบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นของฟิล์มบาง MWCNTs/AgNPs และเมื่อนำแผ่นฟิล์มบางวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลงตามจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs/AgNPs เนื่องจากแผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินระดับนาโนตรงวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าไม่ได้ ดังนั้นค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs/AgNPs จะแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นเท่านั้น ดังตารางที่ 4.5

เมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs/AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 และ 0.1 มิลลิโมลาร์ พบว่าค่าการดูดกลืนของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs/AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ มีค่าการดูดกลืนแสงสูงกว่าแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs/AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์

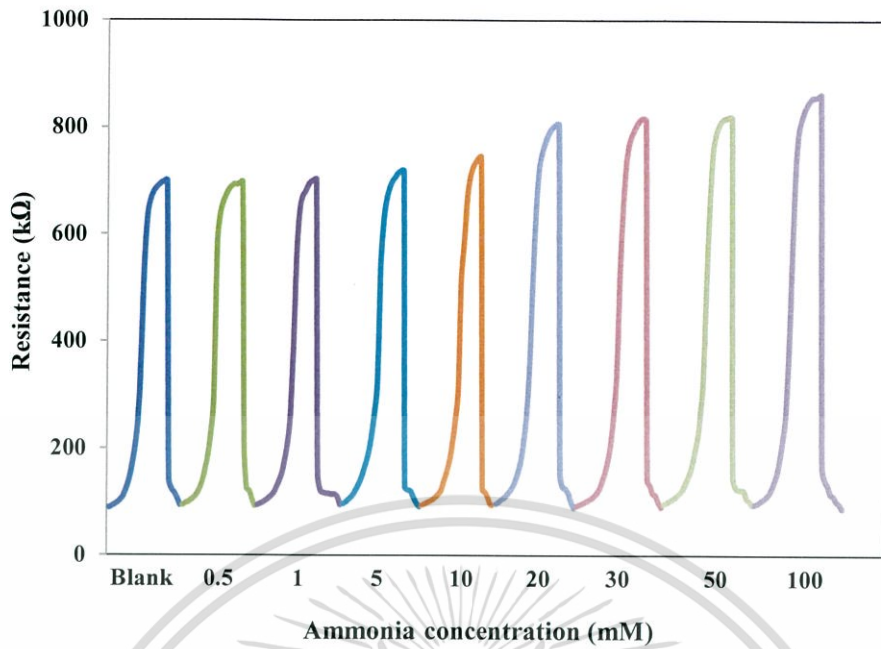
4.6 การศึกษาการวิเคราะห์แก๊สแอมโมเนีย (Ammonia gas) โดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance)

4.6.1 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia gas) โดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

ทำการทดลองโดยการนำแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH มีจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง 3, 7 และ 9 ชั้น มาตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

4.6.1.1 ผลการศึกษาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 3 ชั้นในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia gas) โดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

วิเคราะห์โดยการนำแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 3 ชั้นมาตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 0.5, 1, 5, 10, 20, 30, 50 และ 100 มิลลิโมลาร์ โดยให้อุณหภูมิ 100 °C แก่สารละลายแอมโมเนียตลอดการทดลอง และทำการตรวจวัดด้วยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 3 ชั้น

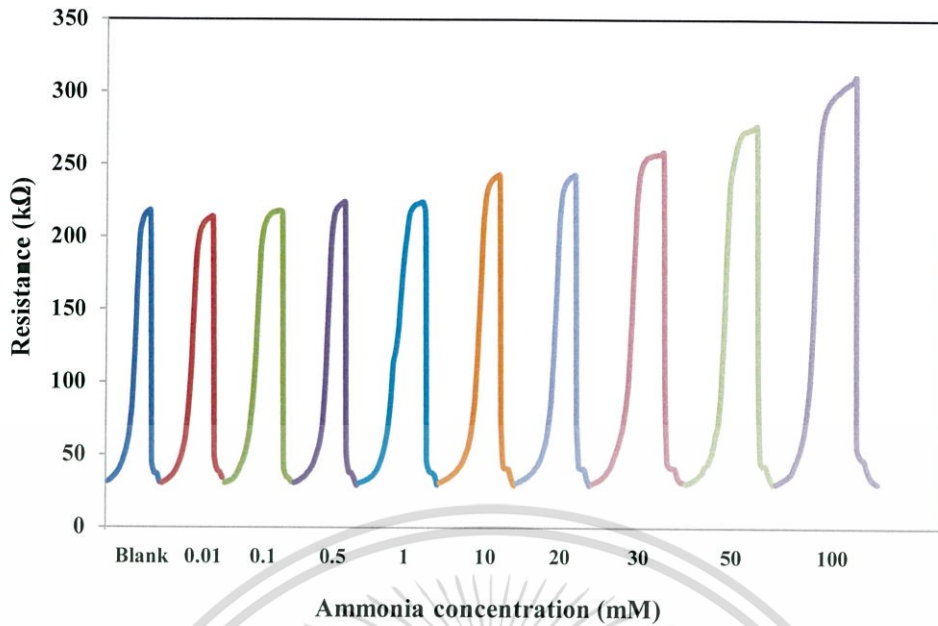
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 3 ชั้น ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ

Ammonia concentration (mM)	ค่าความต้านทานไฟฟ้า (kΩ)
0.5	-
1	1
5	8
10	44
20	103
30	116
50	119
100	160

4.6.1.2 ผลการศึกษาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 7 ชั้น ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia gas) โดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

วิเคราะห์โดยการนำแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 7 ชั้นมาตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 20, 30, 50 และ 100 มิลลิโมลาร์ โดยให้อุณหภูมิ 100 °C แก๊สละลายแอมโมเนียตลอดการทดลอง และทำการตรวจวัดด้วยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 7 ชั้น

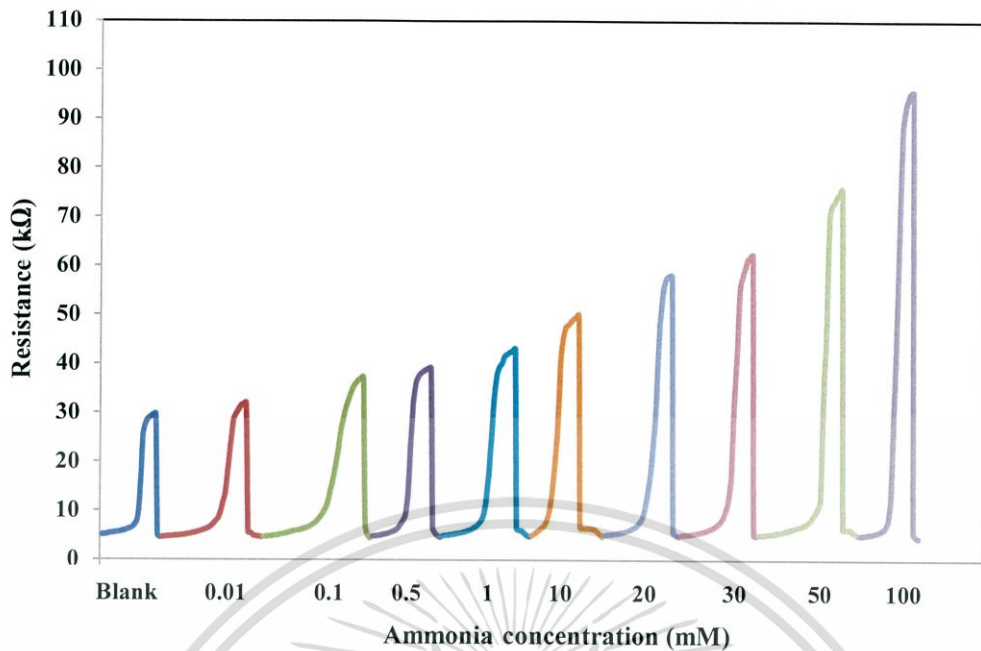
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 7 ชั้น ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ

Ammonia concentration (mM)	ค่าความต้านทานไฟฟ้า (kΩ)
0.01	-
0.1	-
0.5	6.5
1	6.7
10	23.9
20	27.7
30	39.9
50	57.4
100	79.0

4.6.1.3 ผลการศึกษาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia gas) โดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

วิเคราะห์โดยการนำแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้นมาตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 20, 30, 50 และ 100 มิลลิโมลาร์ โดยให้อุณหภูมิ 100 °C แก่สารละลายแอมโมเนียตลอดการทดลอง และทำการตรวจวัดด้วยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



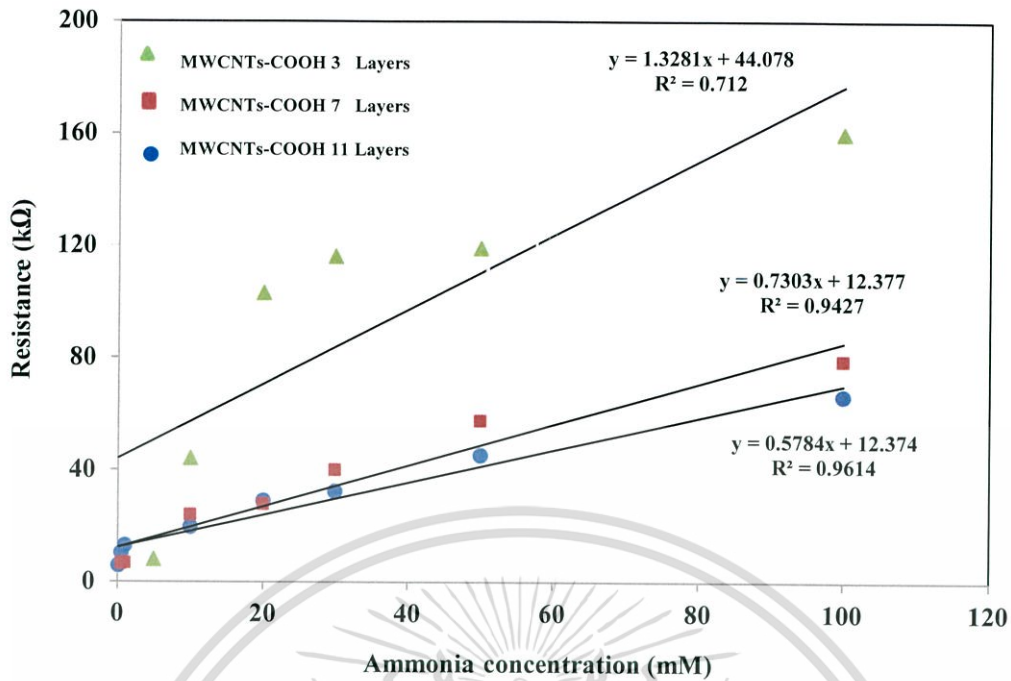
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ

Ammonia concentration (mM)	ค่าความต้านทานไฟฟ้า (kΩ)
0.01	2.34
0.1	5.87
0.5	10.29
1	12.89
10	19.59
20	28.88
30	32.29
50	45.19
100	66.39

เมื่อทำการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง 3, 7 และ 11 ชั้น จากนั้นให้นำค่าความต้านทานไฟฟ้าของแต่ละชั้นฟิล์มที่ตรวจวัดได้มาสร้างกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีจำนวนชั้น 3, 7 และ 11 ชั้น

จากผลการศึกษานับจำนวนชั้นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง 3, 7 และ 11 ชั้น ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า พบว่า

ความเข้มข้นต่ำสุดของแก๊สแอมโมเนียที่ฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีจำนวน 3 ชั้น ตรวจวัดได้คือ 5 มิลลิโมลาร์ และมีค่า $R^2 = 0.712$ ในช่วงความเข้มข้น 5-100 มิลลิโมลาร์

ความเข้มข้นต่ำสุดของแก๊สแอมโมเนียที่ฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีจำนวน 7 ชั้น ตรวจวัดได้คือ 0.5 มิลลิโมลาร์ และมีค่า $R^2 = 0.942$ ในช่วงความเข้มข้น 0.5-100 มิลลิโมลาร์

ความเข้มข้นต่ำสุดของแก๊สแอมโมเนียที่ฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีจำนวน 11 ชั้น ตรวจวัดได้คือ 0.1 มิลลิโมลาร์ และมีค่า $R^2 = 0.961$ ในช่วงความเข้มข้น 0.1-100 มิลลิโมลาร์

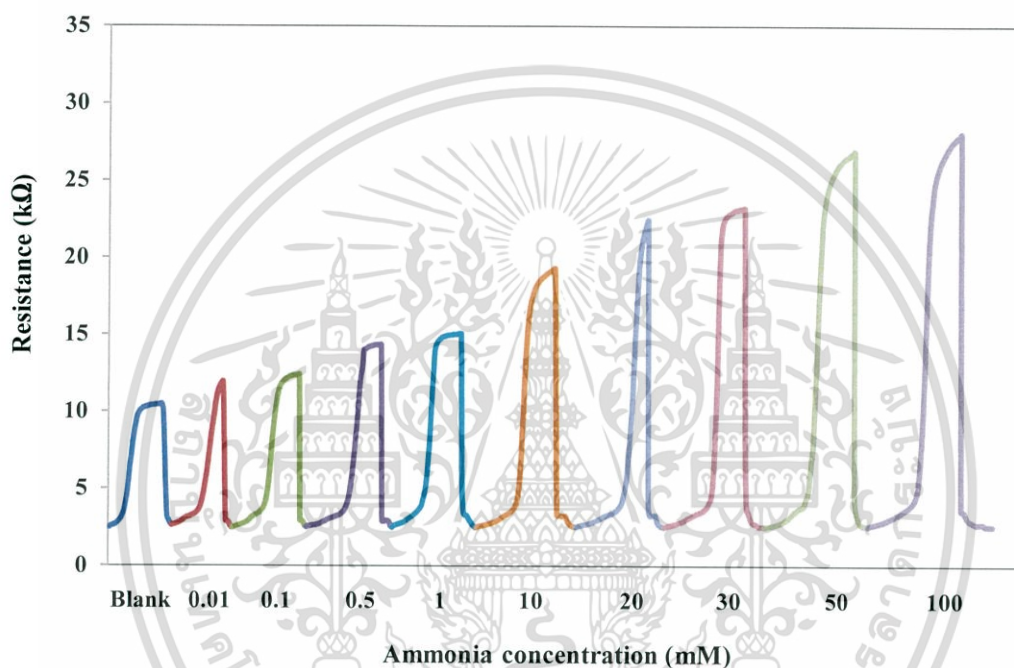
จากรูปที่ 4.27 อธิบายได้ว่าแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น สามารถตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่มีความเข้มข้นต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง 3 และ 7 ชั้น ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น ร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนสำหรับตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียต่อไป

4.6.2 การศึกษาแผ่นฟิล์มบางคอมโพสิตระหว่าง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น กับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia gas) โดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

ทำการทดลองโดยการนำแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้นร่วมกับสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ความเข้มข้น COPSS 0.01 และ 0.1 มิลลิโมลาร์ มาตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

4.6.2.1 ผลการศึกษาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น ร่วมกับสารละลาย AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ โดยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

วิเคราะห์โดยการนำแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น ร่วมกับสารละลาย AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ มาตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 20, 30, 50 และ 100 มิลลิโมลาร์ โดยให้อุณหภูมิ 100 °C แก่สารละลายแอมโมเนียตลอดการทดลอง และทำการตรวจวัดด้วยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น ร่วมกับสารละลาย AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น ร่วมกับสารละลาย AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ

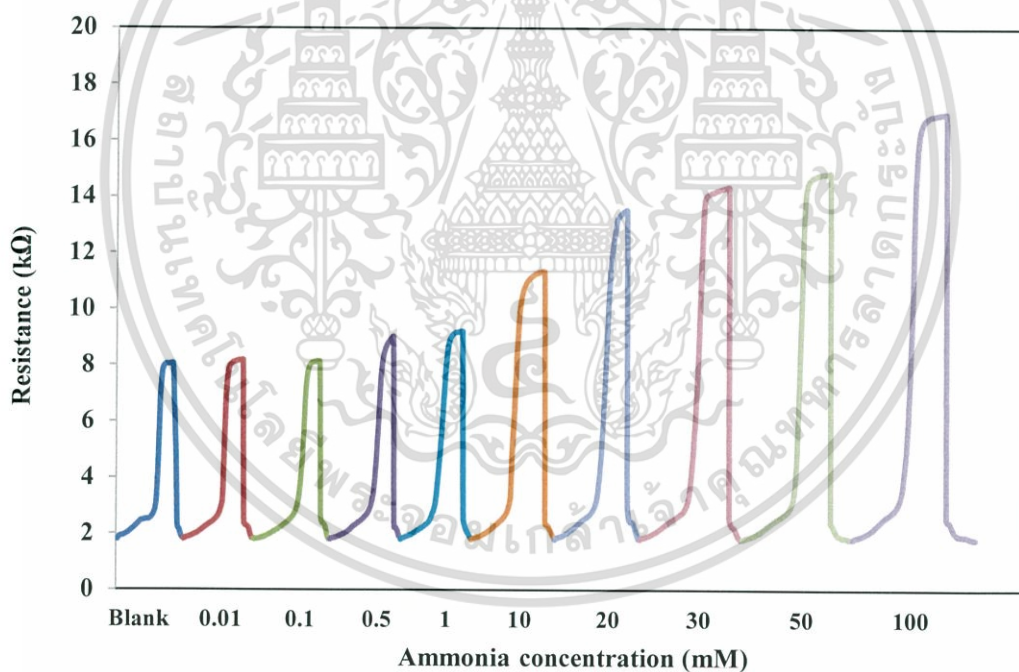
Ammonia concentration (mM)	ค่าความต้านทานไฟฟ้า (kΩ)
0.01	1.69
0.1	1.97
0.5	3.97
1	4.51
10	8.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ammonia concentration (mM)	ค่าความต้านทานไฟฟ้า (k Ω)
20	11.74
30	12.55
50	15.22
100	16.70

4.6.2.2 ผลการศึกษาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น ร่วมกับสารละลาย AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ โดยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

วิเคราะห์โดยการนำแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่มีจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง 11 ชั้น กับสารละลาย AgNPs ที่ความเข้มข้น COPSS 0.1 มิลลิโมลาร์ มาตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 20, 30, 50 และ 100 มิลลิโมลาร์ โดยให้อุณหภูมิ 100 °C แก่สารละลายแอมโมเนียตลอดการทดลอง และทำการตรวจวัดด้วยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.29

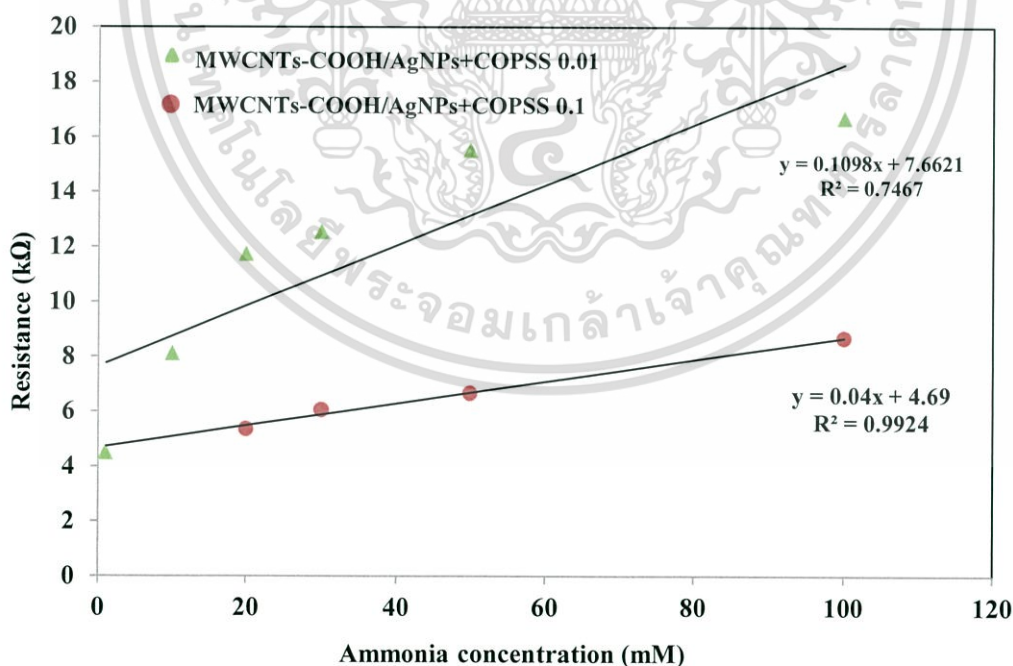


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น ร่วมกับสารละลาย AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น กับสารละลาย AgNPs ที่ความเข้มข้น COPSS 0.1 มิลลิโมลาร์ ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย ที่ความเข้มข้นต่างๆ

Ammonia concentration (mM)	ค่าความต้านทานไฟฟ้า (k Ω)
0.01	0.03
0.1	0.07
0.5	0.82
1	1.08
20	5.36
30	6.06
50	6.66
100	8.68

เมื่อทำการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง MWCNTs-COOH/AgNPs จากนั้นให้นำค่าความต้านทานไฟฟ้าของแต่ละชั้นฟิล์มที่ตรวจวัดได้มาสร้างกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนีย



รูปที่ 4.30 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH จำนวน 11 ชั้น ร่วมกับสารละลาย AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้น 0.01 และ 0.1 มิลลิโมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

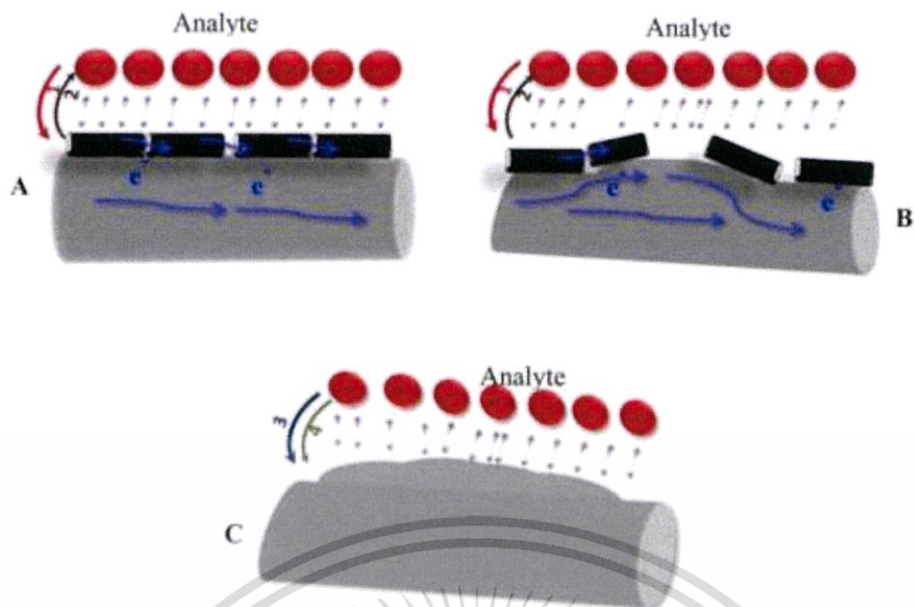
จากผลการศึกษาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH/AgNPs ที่ COPSS ความเข้มข้นแตกต่างกัน ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่า

ความเข้มข้นต่ำสุดของแก๊สแอมโมเนียที่ฟิล์มบาง MWCNTs-COOH/AgNPs ที่ COPSS 0.01 มิลลิโมลาร์ ตรวจวัดได้ คือ 1 มิลลิโมลาร์ และมีค่า $R^2 = 0.7467$ ในช่วงความเข้มข้น 1-100 มิลลิโมลาร์

ความเข้มข้นต่ำสุดของแก๊สแอมโมเนียที่ฟิล์มบาง MWCNTs-COOH/AgNPs ที่ COPSS 0.1 มิลลิโมลาร์ ตรวจวัดได้ คือ 20 มิลลิโมลาร์ และมีค่า $R^2 = 0.9924$ ในช่วงความเข้มข้น 20-100 มิลลิโมลาร์

จากผลการทดลองการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียด้วยวิธีการวัดค่าความต้านทาน พบว่าความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามความเข้มข้นที่มากขึ้นของแอมโมเนีย ทั้งนี้เกิดจากพอลิเมอร์ภายในแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนเกิดการบวมตัวขึ้น โดยที่แก๊สแอมโมเนียจะถูกดูดซับเข้าไปภายในสายพอลิเมอร์และเกิดการขยายตัว ภายหลังพอลิเมอร์เกิดการบวมตัว ส่งผลให้ MWCNTs ที่เคลือบอยู่บนพอลิเมอร์เกิดการสูญเสียระยะห่างระหว่างท่อ ทำให้ไม่เกิดการไหลผ่านของอิเล็กตรอน ค่าความต้านทานที่วัดได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการนำไฟฟ้าลดลง

ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Neeta L. Lala และคณะ [66] ศึกษาความสามารถตัวตรวจวัดแก๊ส ความน่าจะเป็นในการเกิดปฏิกิริยาของสารวิเคราะห์ มีตัววงจร 3 แบบ คือ A สารตัวอย่างสัมผัสกับ MWCNTs โดยตรง กล่าวคือ เมื่อเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอน จะทำให้มีการเคลื่อนที่ของระดับพลังงานศักย์ (Fermi-level) ของอิเล็กตรอนภายใน MWCNTs และด้วย MWCNTs เป็นตัวนำไฟฟ้า จึงทำให้เกิดการไหลผ่านของกระแสได้ B สารตัวอย่างสัมผัสทั้ง MWCNTs และ Nylon-6 คือ เมื่อเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากสารตัวอย่างเข้าสู่ MWCNTs และ Nylon-6 พอลิเมอร์จะเกิดการบวมตัวเนื่องมาจากการดูดซับแก๊สเข้าไปส่งผลต่อระยะห่างของ MWCNTs โดยระยะห่างของท่อเกิดการสูญเสียการเชื่อมต่อ ทำให้การนำไฟฟ้าลดลง แต่เนื่องจาก Nylon-6 เป็นฉนวนไฟฟ้า กระแสที่วัดได้จึงเกิดจาก MWCNTs เพียงตัวเดียว C สารตัวอย่างสัมผัสกับพอลิเมอร์ Nylon-6 โดยตรง ผลปรากฏว่าพอลิเมอร์เกิดการบวมตัวโดยการดูดซับแก๊สเข้าไป แต่ Nylon-6 เป็นฉนวนไฟฟ้า จึงไม่สามารถตรวจวัดทางไฟฟ้าได้



รูปที่ 4.31 ความน่าจะเป็นในการเกิดปฏิกิริยาของสารวิเคราะห์ (A) สารตัวอย่างสัมผัสกับ MWCNTs โดยตรง (B) สารตัวอย่างสัมผัสทั้ง MWCNTs และ Nylon-6 (C) สารตัวอย่างสัมผัสกับพอลิเมอร์ Nylon-6 โดยตรง [66]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNTs), สังเคราะห์อนุภาคเงินในระดับนาโน (AgNPs) และได้ทำการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-layer technique) เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์แก๊สแอมโมเนีย โดยใช้วิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) ในขั้นแรกเริ่มจากการปรับปรุงพื้นผิว MWCNTs ด้วยกรดแก่ (HNO_3 , H_2SO_4) และนำไปวิเคราะห์ TEM พบว่า MWCNTs สามารถกระจายตัวอยู่ในน้ำได้ และจากการวิเคราะห์ด้วย FTIR พบว่า โครงสร้างของ MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวจะมีการสั่นของพันธะ O-H stretching หมู่มากขึ้นไฮดรอกซิล และพันธะ C=O stretching หมู่มากขึ้นคาร์บอนิล ซึ่งเป็นสิ่งที่บ่งบอกได้ว่า MWCNTs ถูกเติมหมู่มากขึ้นด้วยกรดแล้ว จากนั้นนำ MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวมาสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน ได้ทำการวิเคราะห์โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง ทำให้ได้เวลาที่เหมาะสมในการจุ่มสารละลาย MWCNTs ซึ่งเวลาที่เหมาะสม เท่ากับ 20 นาที ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมคลอไรด์ สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง ซึ่งความเข้มข้นที่เหมาะสม เท่ากับ 5 มิลลิโมลาร์ และศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ที่จำนวนชั้น 1, 3, 5, 7, 9, 11 และ 15 พบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในการเพิ่มจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางส่งผลให้ค่าความต้านทานมีค่าลดลง แสดงว่า ค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบางจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนด้วยวิธีรีดักชัน โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4) เป็นตัวรีดิวซ์ และโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาอิกแอซิด (COPSS) เป็นสารรักษาเสถียรภาพ โดยได้ทำการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย COPSS ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน พบว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสม เท่ากับ 0.01, 0.1, 1, 3 และ 5 มิลลิโมลาร์ จากนั้นนำสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนมาสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน ได้ทำการวิเคราะห์โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง ทำให้ได้ความเข้มข้นของ COPSS ที่เหมาะสมสำหรับขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง เท่ากับ 0.01 และ 0.1 มิลลิโมลาร์ และมีการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการจุ่มสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโน โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาต่างๆ ซึ่งเวลาที่เหมาะสม เท่ากับ 60 นาที แต่เมื่อนำไปวัดค่าความต้านทานพบว่าแผ่นฟิล์มตรวจวัดค่าความต้านทานไม่ได้ฉะนั้น แผ่นฟิล์มบางอนุภาคเงินระดับนาโนจึงไม่นำไฟฟ้า

นำสารละลายอนุภาคเงินระดับนาโนที่ความเข้มข้น COPSS แตกต่าง ๆ มายัดติดบนแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs 11 ชั้น ทำการวิเคราะห์โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง พบว่ามีการดูดกลืนแสงในช่วงการดูดกลืนของอนุภาคเงินระดับนาโน

ในขั้นตอนสุดท้ายได้นำแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs และ MWCNTs/AgNPs มาเป็นตัววิเคราะห์หาแก๊สแอมโมเนีย โดยใช้วิธีการวัดค่าความต้านทาน ในหน่วยกิโลโอห์ม ($\text{k}\Omega$) ในอัตราสแกน 10 วินาที ต่อการตรวจวัด ซึ่งได้แสดงกราฟมาตรฐานของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs ที่ชั้นต่างๆ , MWCNTs ที่จำนวน 11 ชั้น/AgNPs/COPSS 0.01 และ MWCNTs ที่จำนวน 11 ชั้น/AgNPs/COPSS 0.1 ดังนี้

ชั้นที่ 3 ($R^2 = 0.1720$) ในช่วง 5-100 มิลลิโอมลาร์ ซึ่งสามารถวัดได้ที่ความเข้มข้นต่ำสุด 5 มิลลิโอมลาร์, ชั้นที่ 7 ($R^2 = 0.9427$) ในช่วง 0.5-100 มิลลิโอมลาร์ ซึ่งสามารถวัดได้ที่ความเข้มข้นต่ำสุด 0.5 มิลลิโอมลาร์ และชั้นที่ 11 ($R^2 = 0.9614$) ในช่วง 0.1-100 มิลลิโอมลาร์ ซึ่งสามารถวัดได้ที่ความเข้มข้นต่ำสุด 0.1 มิลลิโอมลาร์

MWCNTs ที่ความหนา 11 ชั้น/AgNPs/COPSS 0.01 ($R^2 = 0.7460$) ในช่วง 1-100 มิลลิโอมลาร์ ซึ่งสามารถวัดได้ที่ความเข้มข้นต่ำสุด 1 มิลลิโอมลาร์ และ MWCNTs ที่จำนวน 11 ชั้น/AgNPs/ COPSS 0.1 ($R^2 = 0.9920$) ในช่วง 20-100 มิลลิโอมลาร์ ซึ่งสามารถวัดได้ที่ความเข้มข้นต่ำสุด 20 มิลลิโอมลาร์

ดังนั้นแผ่นฟิล์มบางที่สามารถเป็นตัวตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่ำสุดได้ดี คือ แผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COOH ชั้นที่ 11

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNTs), สังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) และการสร้างแผ่นฟิล์มบางของ MWCNTs และแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs/AgNPs โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์แก๊สแอมโมเนีย โดยใช้วิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า พบปัญหาและเทคนิคบางประการ ที่สามารถนำไปปรับปรุงการทดลอง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่ โดยปัญหา และข้อเสนอแนะมีดังนี้

1) ก่อนจะนำสารละลายท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นไปสร้างแผ่นฟิล์มบาง ควรนำไปกระจายตัวด้วยเครื่อง Sonicated probe ก่อนเพื่อเป็นการกระตุ้นสารละลาย จะให้ทำให้สารละลายเกาะบนแผ่นฟิล์มได้ดียิ่งขึ้น

2) ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นทุกๆ ชั้นควรล้างด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด ไม่ให้มีตะกอนเกาะติดบนแผ่นกระจกเพราะอาจทำให้แผ่นฟิล์มไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เกิดความคลาดเคลื่อนต่อค่าการดูดกลืนแสง ค่าความต้านทานไฟฟ้า และการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย

3) ในขั้นตอนการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย เนื่องจากแผ่นฟิล์มบางมีความไวต่อการตรวจวัดมาก จึงทำให้เมื่อทำการตรวจวัดที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงขึ้นเรื่อยๆ แล้วกลับมาวัดที่ความเข้มข้นที่ต่ำลง ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้สูงขึ้น เนื่องจากมีแอมโมเนียหลงเหลืออยู่ ยังระเหยไปไม่หมด ทำให้ค่าที่วัดออกมาเกิดความคลาดเคลื่อนจึงควรใช้ไอร์ความร้อนมาช่วยในการระเหยของแก๊สแอมโมเนีย ก็จะทำให้ความคลาดเคลื่อนลดลงบ้างได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] แอมโมเนีย. [Online]. Available : http://www.thairefriger.or.th/download/thairefriger_or_th/ammonia.pdf. เข้าถึงเมื่อวันที่ 19 พ.ค. 2559
- [2] แอมโมเนีย. [Online]. Available : http://www.summacheeva.org/index_thaitox_ammonia.htm. เข้าถึงเมื่อวันที่ 19 พ.ค. 2559
- [3] ท่อนาโนคาร์บอน. [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit3-8.Html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 19 พ.ค. 2559
- [4] การปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอน. [Online]. Available : <http://ejournals.swu.ac.th/index.php/SWUJournal/article/viewFile/7374/6787>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 19 พ.ค. 2559
- [5] นาโนเทคโนโลยี. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/นาโนเทคโนโลยี>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 19 พ.ค. 2559
- [6] นาโนเทคโนโลยี. [Online]. Available : <http://nstda.or.th/rural/public/100%20articles-stkc/33.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 19 พ.ค. 2559
- [7] นาโนเทคโนโลยี. [Online]. Available : http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nanodatabas/info2.php?cat_id=3&p_id=282. เข้าถึงเมื่อวันที่ 19 พ.ค. 2559
- [8] Nanotechnology. [Online]. Available : <https://ocg.cancer.gov/e-newsletter-issue/issue-11/translating-cancer-targets-nanotechnology-based-therapeutics>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 19 พ.ค. 2559
- [9] วัสดุนาโน. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/วัสดุนาโน>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 19 พ.ค. 2559
- [10] ท่อนาโนคาร์บอน. [Online]. Available : <http://chemistry.ipst.ac.th/2014/09/ท่อนาโนคาร์บอน>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 19 พ.ค. 2559
- [11] Carbon nanotube. [Online]. Available : <http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledg/student/Nano%20Tech49/Nanocarbon%20tube.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 พ.ค. 2559
- [12] สุขุม เอกวารีย์. 2553. “เซ็นเซอร์แอลกอฮอล์ด้วยท่อนาโนคาร์บอน.” ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [13] Carbon nanotube. [Online]. Available : <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=32&chap=8&page=t32-8-infodetail04.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 พ.ค. 2559
- [14] วิกิจ ชื่นใจดี. 2549. “การสร้างแอมโมเนียเซ็นเซอร์โดยใช้ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์.” ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [15] อัสสุชล แสงนวล. 2555. “แอลกอฮอล์เซ็นเซอร์ด้วยท่อนาโนคาร์บอน.” ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [16] ชะลอ แก้วพิชัย และ ธีรยุทธ์ ทองห้วน. 2550. “การปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์สำหรับแก๊สเซ็นเซอร์.” ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [17] คาร์บอนนาโนทิวป์. [Online]. Available : <http://chemistry.ipst.ac.th/2014/09/คาร์บอนนาโนทิวป์>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 พ.ค. 2559
- [18] กิตติยา เลาะลี. 2556. “การเตรียมการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะและสมบัติโฟโตคะตะไลติกของแผ่นยางผสมไทเทเนียมออกไซด์ท่อนนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น.” ปรินญาณิพนธ์ วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [19] ท่อนาโนคาร์บอน. [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit3-8.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 พ.ค. 2559
- [20] ภัญฉิลา ละออบประเสริฐสุข, จิตาภา ลากเจริญโกศล และ ญัฐพงศ์ มากมีทรัพย์. 2556. “การดัดแปลงท่อนคาร์บอนนาโนเพื่อเพิ่มสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิไธรีนท่อนคาร์บอนนาโนคอมโพสิต.” ปรินญาณิพนธ์ สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [21] ฐานะพงศ์ ตริตศายุธ, ปวริศร์ศิริวัฒนเมธานนท์และสิริลักษณ์ รุจิพรสกุล. 2557. “การสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นร่วมกับอนุภาคทองในระดับนาโนและกลูต้าไรโอนโดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโดพามีนโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี” ปรินญาณิพนธ์ สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [22] Surface modification of carbon nanotube. [Online]. Available : <http://ejournals.swu.ac.th/index.php/SWUJournal/article/viewFile/7374/6787>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 พ.ค. 2559
- [23] Michael J. O’Connell, et al. 2544. “Reversible water-solubilization of single-walled carbon nanotubes by polymer wrapping.” *Chemical Physics Letters*. 342 : 265-271.
- [24] Carbon Nanotubes Surface Modifications. [Online]. Available : http://www.wiley-vch.de/books/sample/3527328785_c01.pdf. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 พ.ค. 2559
- [25] Jin Zhu, Masako Yudasaka et al. 2547. “Dispersing Carbon Nanotubes in Water: A Noncovalent and Non organic Way.” *Journal of Physical Chemistry B*. 108: 11317-11320.
- [26] Gunaranjan Viswanathan, Nirupama Chakrapaniet al. 2546. “Single-Step in Situ Synthesis of Polymer-Grafted Single-Wall Nanotube Composites.” *Journal of the American Chemistry Society* 125(31) : 9258-9259
- [27] V. Datsyuk, M. Kalyva et al. 2551. “Chemical oxidation of multiwalled carbon nanotubes.” *Carbon*. 833-840.
- [28] อนุภาคเงินนาโน. [Online]. Available : <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=32&chap=8&page=t32-8-infodetail04.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 พ.ค. 2559
- [29] อนุภาคเงินนาโน. [Online]. Available : <http://science.buu.ac.th/ojs246/index.php/sci/article/viewFile/274/369>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 พ.ค. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [30] Silver nanoparticles. [Online]. Available : <http://www.mwit.ac.th/~jeed/r-sp/doc/r-sp-30-06-51.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 พ.ค. 2559
- [31] Surface plasmon resonance. [Online]. Available : http://scijournal.kku.ac.th/files/Vol_41_No_4_P_859-872.pdf. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 พ.ค. 2559
- [32] Surface plasmon resonance. [Online]. Available : [https://www.google.co.th/Surfaceplasmon resonance](https://www.google.co.th/Surfaceplasmon%20resonance). เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 พ.ค. 2559
- [33] อนุภาคเงินระดับนาโน. [Online]. Available : http://thaist.sti.or.th/thaistjournal/images/files/Journal1/1_201-16.pdf. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 พ.ค. 2559
- [34] สมบัติของอนุภาคนาโน. [Online]. Available : http://www.electron.rmutphysics.com/sciencenews/index.php?option=com_content&task=view&id=2730&Itemid=4. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 พ.ค. 2559
- [35] คุณสมบัติของอนุภาคนาโน. [Online]. Available : http://www.electron.rmutphysics.com/sciencenews/index.php?option=com_content&task=view&id=2730&Itemid=4. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 พ.ค. 2559
- [36] ธีรภัทร พุกษาพันธ์, . 2557. “การสังเคราะห์อนุภาคเงินนาโนโดยใช้กรดฮิวมิกเป็นสารรักษาเสถียรภาพและการนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรู้.” ปริญญานิพนธ์ สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [37] Synthesis of silver nanoparticles. [Online]. Available : [http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4326978/Synthesis of silver nanoparticles](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4326978/Synthesis%20of%20silver%20nanoparticles). เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 พ.ค. 2559
- [38] Takeshi Tsuji, Kenzolyo et al. 2545. “Preparation of silver nanoparticles by laser ablation in solution:influence of laser wavelength on particle size.” Applied Surface Science 202: 80–85.
- [39] Goswami GK, Nanda KK et al. 2555. “Green synthesis of biopolymer-silver nanoparticle nanocomposite: an optical sensor for ammonia detection.” International Journal of Biological Macromolecules.583–589.
- [40] Layer-by-Layer. [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Layer_by_layer. เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 พ.ค. 2559
- [41] ยุวันดา เอี่ยมเผ่าจีน. 2554. “การตรึงอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์บนผ้าฝ้ายโดยใช้พอลิस्टไทรรีนซัลโฟนิคแอซิดพอลิอิเล็กโทรไลต์.” วิทยานิพนธ์ สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [42] แอมโมเนีย. [Online]. Available : <http://www.thairefrigeration.com/download/thairefrigeration/ammonia.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 พ.ค. 2559
- [43] แอมโมเนีย. [Online]. Available : <http://www.sahavich.com/?name=knowledge&file=readknowledge&id=1449>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 พ.ค. 2559
- [44] Ammonia. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/ammonia>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 พ.ค. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [45] สมบัติแก๊สแอมโมเนีย. [Online]. Available : <http://php.diw.go.th/safety/wp-content/uploads/2015/01/ammonia.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 พ.ค. 2559
- [46] อันตรายจากแก๊สแอมโมเนีย. [Online]. Available : <http://www.siamchemi.com/แอมโมเนีย>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 พ.ค. 2559
- [47] UV-Visible Spectrophotometer. [Online]. Available : http://www.npc-se.co.th/npc_date/npc_previews.asp?id_head=5&id_sub=17&id=393. เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 พ.ค. 2559
- [48] เครื่องวัดการดูดกลืนแสง. [Online]. Available : http://www.nanotec.or.th/th/page_id=57. เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 พ.ค. 2559
- [49] UV-visible Spectrophotometer. [Online]. Available : http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page4_2.html. เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 พ.ค. 2559
- [50] ส่วนประกอบเครื่องยูวีวิสิเบิล. [Online]. Available : <http://www.diw.go.th/km/article/head.asp?no=33>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 พ.ค. 2559
- [51] ทวีลาภ จิรศรีณยานนท์, ปาริฉัตร โบขุนทด และ ปิยพงศ์ วงศ์คำภู่. 2557. “ผลของแท่งนาโนคาร์บอนที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติเชิงกลของแบเรียมไททาเนตและพอลิไคเมทิลไซลอคเซนนาโนคอมโพสิต.” ปรินญาณีพนธ์ สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [52] เครื่อง FT-IR. [Online]. Available : <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/chemistry/23-2013-09-04-02-40-21>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 พ.ค. 2559
- [53] กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 พ.ค. 2559
- [54] หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน. [Online]. Available : http://mdresearch.kku.ac.th/files/news/filesnews/RIC_SEP_2014.pdf. เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 พ.ค. 2559
- [55] กล้อง TEM. [Online]. Available : http://almonz.blogspot.com/2009_12_01_archive.html. เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 พ.ค. 2559
- [56] FarbodAlimohammadi, MazeyarParvinzadehGashti et al. 2555. “Deposition of silver nanoparticles on carbon nanotube by chemical reduction method: Evaluation of surface, thermal and optical properties.” Superlattices and Microstructures. 50–62.
- [57] Mohd Omaish Ansari, Shahid Pervez Ansari et al. 2557. “Ammonia vapor sensing and electrical properties of fibrous multi-walled carbon nanotube/ polyaniline nanocomposites prepared in presence of cetyltrimethylammonium bromide.” Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2010–2017.
- [58] Haihu Yu, Tong Cao et al. 2549. “Layer-by-Layer assembly and humidity sensitive behavior of poly(ethyleneimine)/ multiwall carbonnanotube composite films.” Sensors and Actuators B: Chemical. 512–515.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [59] T. Kavinkumar and S. Manivannan. 2559. “Uniform decoration of silver nano particle on exfoliated graphene oxide sheets and its ammonia gas detection.” *Ceramics International*. 1769–1776.
- [60] Davide Piccinino, Michela Delfino et al. 2558. “Highly efficient synthesis of aldehydes by layer by layer multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) laccase mediator systems.” *Applied Catalysis A: General*. 77–88.
- [61] Lifang He, Yong Jia et al. 2552. “Gas sensors for ammonia detection based on polyaniline-coated multi-wall carbon nanotubes.” *Materials Science and Engineering : B*. 76–81.
- [62] Sakshi Sharma, Shahir Hussain et al. 2557. “MWCNT-conducting polymer composite based ammonia gas sensors: A new approach for complete recovery process.” *Sensors and Actuators B: Chemical*. 213–219.
- [63] Jean-Marc Tullian, Alessio Cavalieri et al. 2554. “Room temperature ammonia sensors based on zinc oxide and functionalized graphite and multi-walled carbon nanotubes.” *Sensors and Actuators B: Chemical*. 144–154.
- [64] ทิยานันท์ เจือกโ้ว้น. 2557. “ผลของท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดต่อสมบัติโฟโตคะตะไลซิสของไททาเนียมไดออกไซด์.” *วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*
- [65] Oxidized Graphene. [Online]. Available : <http://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US20120129736.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 19 พ.ค. 2559
- [66] Neeta L. Lala, Velmurugan Thavasi et al. 2552. “Preparation of Surface Adsorbed and Impregnated Multi-walled Carbon Nanotube/Nylon-6 Nanofiber Composites and Investigation of their Gas Sensing Ability.” *Sensors*. 86–101.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก การเตรียมสารเคมี

1. การเตรียมสารละลายในการปรับสภาพพื้นผิวของกระจก

1.1 การเตรียมสารละลายโพลีไดแอลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC) ที่ความเข้มข้น 10 mM และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้น 1 M

ปิเปตสารละลาย PDADMAC จำนวน 0.8 ml และชั่ง NaCl จำนวน 58.5 g ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 ml และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

1.2 การเตรียมสารละลายโพลีโซเดียมสไตรีนซัลโฟเนต (PSS) ที่ความเข้มข้น 10 mM และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้น 1 M

ชั่ง PSS จำนวน 2.06 g และชั่ง NaCl จำนวน 58.5 g ละลายด้วยน้ำกลั่น ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 ml และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

2. การเตรียมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ใช้ในการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการสร้างแผ่นฟิล์มบาง

เตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอน (MWCNTs-COOH) ที่ความเข้มข้น 0.1262 M (MWCNTs-COOH 10 g ในน้ำ 80 ml) และเติม NaCl ลงในสารละลาย MWCNTs-COOH ให้มีความเข้มข้น 1, 5, 10 และ 50 mM

ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (mM)	น้ำหนักของโซเดียมคลอไรด์ (g)
1	0.0047
5	0.0234
10	0.0467
50	0.2345

3. การเตรียมสารละลายในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน (AgNPs) ที่ความเข้มข้น COPSS แตกต่างกัน

3.1 การเตรียมสารละลาย Stock ซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ที่ความเข้มข้น 100 mM

ชั่ง AgNO_3 จำนวน 0.4245 g ละลายด้วยน้ำกลั่น ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 25 ml และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมสารละลาย Stock โพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาอิกแอซิด (COPSS) ที่ความเข้มข้น 100 mM

ชั่ง COPSS จำนวน 0.8606 ละลายด้วยน้ำกลั่น ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 25 ml และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

3.3 การเตรียมสารละลาย Stock โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4) ที่ความเข้มข้น 100 mM

ชั่ง NaBH_4 จำนวน 0.3783g ละลายด้วยน้ำกลั่น ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 ml และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

สารเคมี	อัตราส่วน AgNO_3 : COPSS : NaBH_4 (mM)					
	1:0.005:10	1:0.01:10	1:0.1:10	1:1:10	1:3:10	1:5:10
100 mM AgNO_3 (ml)	1	1	1	1	1	1
100 mM COPSS (ml)	0.005	0.01	0.1	1	3	5
100 mM NaBH_4 (ml)	10	10	10	10	10	10
H_2O (ml)	88.995	88.99	88.9	88	86	84
Total (ml)	100	100	100	100	100	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้วิจัย



ชื่อ - สกุล นางสาวชนนิกานต์ เสริมทรัพย์
 วัน เดือน ปีเกิด 04 มิถุนายน 2536
 ประวัติการศึกษา
 ระดับมัธยมศึกษา จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย
 จากโรงเรียนชลกันยานุกูล
 ปีการศึกษา 2554
 ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง
 อีเมลล์ Chonnikarn_sb@hotmail.com



ชื่อ - สกุล นางสาวชนมณีภา ยี่รัมย์
 วัน เดือน ปีเกิด 15 ตุลาคม 2536
 ประวัติการศึกษา
 ระดับมัธยมศึกษา จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย
 จากโรงเรียนสมุทรสาครวิทยาลัย
 ปีการศึกษา 2554
 ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง
 อีเมลล์ Mr.pungkum_monkey_sai@hotmail.com



ชื่อ - สกุล นางสาวประภาลักษณ์ พันธุ์ผูก
 วัน เดือน ปีเกิด 22 กุมภาพันธ์ 2537
 ประวัติการศึกษา
 ระดับมัธยมศึกษา จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย
 จากโรงเรียนชลกันยานุกูล
 ปีการศึกษา 2554
 ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง
 อีเมลล์ Prapaluk.punch@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้