

แก๊สเซนเซอร์สำหรับตรวจจับวัตถุระเบิดโดยใช้วิธีลอกแบบโมเลกุลพอลิเมอร์

GAS SENSOR FOR EXPLOSIVE MATERIAL DETECTION USING MOLECULAR  
IMPRINTED POLYMER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2564

KMITL-2021-EN-D-318-041

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GAS SENSOR FOR EXPLOSIVE MATERIAL DETECTION USING MOLECULAR  
IMPRINTED POLYMER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN BIOMEDICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2021  
KMITL-2021-EN-D-318-041

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แก๊สเซนเซอร์สำหรับตรวจจับวัตถุระเบิดโดยใช้วิธีลอกแบบ โมเลกุลพอลิเมอร์
นักศึกษา	นางสาวทศวรรณ พุทธสกุล
รหัสประจำตัว	59601311
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมชีวการแพทย์
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.จักร แสงมา

### บทคัดย่อ

ในประเทศไทยอุปกรณ์ระเบิดส่วนใหญ่ที่ผลิตโดยผู้ก่อการร้ายใช้สารไตรไนโตรโทลูอิน (TNT) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักในการระเบิด การตรวจจับ TNT และการป้องกันการระเบิดสามารถช่วยชีวิตพลเรือนจำนวนมากได้ แต่เนื่องจากความดันไอของ TNT ต่ำ จึงต้องใช้วิธีการตรวจจับที่มีความไวสูง ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิคการลอกแบบโมเลกุลร่วมกับไวรัสเดงกี (DENV-2) ซึ่งประทับบนพื้นผิวของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต เทคนิคนี้สามารถสร้างบริเวณจับซับสเตรตและโมเลกุลแม่แบบในโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้อย่างดี จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพในการจดจำโมเลกุลแม่แบบได้อย่างจำเพาะเจาะจง นอกจากนี้เรายังนำเสนอวิธีการตรวจจับไอของวัตถุระเบิดด้วยโพลีอะคริลาไมด์ไฮโดรเจลเป็นแก๊สเซนเซอร์เคมีไฟฟ้าสำหรับการตรวจจับวัตถุระเบิด สัญญาณไซคลิกโวลแทมเมทรีจะถูกบันทึกจากสารตัวอย่าง ได้แก่ TNT, pentaerythritol tetranitrate (PETN) และไอระเหยสารประกอบที่ไม่ใช่วัตถุระเบิด พบว่าการคำนวณอนุพันธ์ของเวลาของสัญญาณนั้นมีลักษณะเฉพาะสำหรับสารเคมีแต่ละชนิดมากกว่าสัญญาณที่ไม่ผ่านการหาอนุพันธ์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ในการตรวจจับวัตถุระเบิด แนวทางในการสร้างเซ็นเซอร์แบบเจลและการวิเคราะห์ข้อมูลนี้มีแนวโน้มที่ดี และต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องเพิ่มเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Gas Sensor for Explosive Material Detection Using Molecular Imprinted Polymer
Student	Miss.Tasawan Puttasakul
Student ID.	59601311
Degree	Doctor of Engineering
Program	Biomedical Engineering
Year	2021
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Chuchart Pintavirooj
Thesis Co-Advisor	Assist.Prof.Dr.Chak Sangma

## ABSTRACT

In Thailand, most of the bomb devices produced by terrorists use trinitrotoluene (TNT) as the main explosive material. Detecting TNT and preventing detonation could save many civilians. Due to its low vapor pressure, TNT requires an extremely high sensitivity method for detection. In this thesis, we propose an application of molecular imprinted polymer in combination with dengue virus (DENV-2) was imprinted on polymer nanocomposites surface. This technique can create more TNT binding sites on the polymer structure. Thus, increasing the efficiency of template recognition. Moreover, we present a method for explosive vapor detection by polyacrylamide hydrogel as an electrochemical gas sensor for explosive material detection. Cyclic voltammetry signals were collected from samples including TNT, pentaerythritol tetranitrate (PETN) and non-explosive vapors. It was found that a time-derivative calculation of the signal was unique to each chemical, rather than the signal itself, demonstrating utility for the detection of explosive material. This approach for making a gel-based sensor and data analysis looks promising and requires further validation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.จักร แสงมา ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ดร.วรรณนิสา สุขจี และ ดร.ชมพูนุช ต้นเจริญ ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะ แนวทางการออกแบบการทดลอง และวิธีการทดลอง

ขอขอบคุณ รศ.ดร.มนัส สังวรศิลป์ ดร.ธเนศ อังศุวัฒนากุล ผศ.ยุพธนา ปิติธีรภาพ ดร.ฐปณีย์ เขมานวงค์ และ Dr.Jamie O'Reilly ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยรังสิต ที่ให้ทุนในการศึกษาปริญญาเอกในครั้งนี้

ขอขอบคุณศูนย์เครือข่ายการวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยี นาโนเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ด้านการวิจัยตัวเร่งปฏิกิริยาและวัสดุนาโน เพื่อพลังงานและสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ใช้ ห้องปฏิบัติการ และอุปกรณ์เครื่องมือในการทำวิจัย

สุดท้ายต้องขอขอบคุณครอบครัว และสามีของข้าพเจ้า คุณกุลชาติ เย็นฉ่ำ ที่เป็นเสมือน คู่คิดและกำเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และ ถ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ทศวรรษ พุทธสกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัดถูระเบิด และการตรวจจับวัดถูระเบิด.....	4
2.2 พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล.....	10
2.3 หลักการทางเคมีไฟฟ้า.....	12
2.4 ไฮโดรเจล.....	25
2.5 ทบทวนวรรณกรรม.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การตรวจจับไอของ TNT.....	30
3.1 การใช้เทคนิคพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลสร้างเซ็นเซอร์ทางเคมีไฟฟ้าเพื่อตรวจจับTNT.....	30
3.1.1 การเตรียมการลอกแบบโมเลกุลบนอิเล็กโทรด.....	30
3.1.2 การวัดทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี .....	32
3.2 การตรวจจับไอของ TNT ด้วยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับ DENV-2 โดยใช้อิเล็กโทรดแบบซีทรี.....	34
3.2.1 การเตรียมการลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับไวรัส DENV-2 บนอิเล็กโทรดแบบซีทรี.....	34
3.2.2 ระบบตรวจจับไอของ TNT ด้วยแก๊สเซ็นเซอร์ IDE.....	36
3.3 การตรวจจับสารประกอบวัตถุระเบิดด้วยไฮโดรเจล.....	37
3.3.1 การเตรียมโพลีอะคริลาไมด์ไฮโดรเจล.....	37
3.3.2 การตรวจจับไอของสารประกอบวัตถุระเบิด.....	38
3.3.3 การวัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคลิเนียร์สวீปโวลแทมเมตรี.....	40
บทที่ 4 การทดลอง และผลการทดลอง.....	42
4.1 ผลการตรวจจับ TNT ด้วยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุลโดยใช้เซ็นเซอร์เคมีไฟฟ้า.....	42
4.2 ผลการตรวจจับไอของ TNT ด้วยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับ DENV-2 โดยใช้อิเล็กโทรดแบบซีทรี.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการตรวจจับสารประกอบวัฏธูระเบิดด้วยไฮโดรเจล.....	48
4.3.1 การศึกษาคุณสมบัติของ PAAM gel.....	49
4.3.2 การตรวจจับไอของสารประกอบวัฏธูระเบิด และสารชนิดอื่นๆ.....	51
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	57
บรรณานุกรม.....	59
ประวัติผู้เขียน.....	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบที่สามารถใช้เป็นไบโอเซนเซอร์.....	10
4.1 ค่า LOD ที่ได้รับจากเซ็นเซอร์ MIP-TNT.....	45
4.2 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของการผสมอะคลิลาไมด์ และพื้นที่ผิวจำเพาะ เฉพาะของ PAAM hydrogel.....	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การตรวจหาวัตถุระเบิด.....	5
2.2 องค์ประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางเคมี.....	6
2.3 หลักการของไปโอเซนเซอร์.....	9
2.4 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบ.....	11
2.5 การเคลื่อนที่ของไอออนแบบไมเกรชัน.....	13
2.6 แสดงการนำพามวลจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าอิเล็กโทรดด้วยการแพร่.....	14
2.7 การนำพามวลจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าอิเล็กโทรดด้วยการพา.....	15
2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาแบบเทคนิคโพลารोगราฟิ.....	18
2.9 โพลารोगรามของเทคนิคโพลารोगราฟิ.....	19
2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา เมื่อมีการหยุดปรอท.....	19
2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับศักย์ไฟฟ้า โดยการทำแทสต์โพลารोगราฟิ...	19
2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของเทคนิคแอมเพอโรเมทรี....	20
2.13 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี.....	20
2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของพัลส์โวลแทมเมทรีแบบพัลส์ ปกติ.....	21
2.15 กราฟแสดงโวลแทมโมแกรมของพัลส์โวลแทมเมทรีแบบพัลส์ปกติ.....	21
2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของพัลส์โวลแทมเมทรีแบบดิฟเฟอรัล เรนเชียลพัลส์.....	22
2.17 กราฟแสดงโวลแทมโมแกรมของพัลส์โวลแทมเมทรีแบบพัลส์ดิฟเฟอรัลเรนเชียล พัลส์.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของพัลส์โวลแทมเมทรีแบบสแควร์ เวฟ.....	22
2.19 กราฟแสดงโวลแทมโมแกรมของพัลส์โวลแทมเมทรีสแควร์เวฟ.....	23
2.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของเทคนิคสทริปปิงโวลแทมเมทรี...	23
2.21 โวลแทมโมแกรมที่ได้ของเทคนิคสทริปปิงโวลแทมเมทรี.....	23
2.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของเทคนิคไซคลิกโวลแทม เมทรี.....	24
2.23 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี.....	24
2.24 โครงสร้างของไฮโดรเจลประเภทต่างๆ แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์.....	26
3.1 อิเล็กโทรดทอง (AuE).....	30
3.2 ขั้นตอนการลอกแบบโมเลกุล.....	31
3.3 โครงสร้างของ TNT (ก) และ PETN (ข).....	33
3.4 การตรวจจับสารละลาย TNT ด้วยเทคนิคการวัดทางไฟฟ้าเคมี.....	33
3.5 IDE ที่สร้างจากการพิมพ์สกรีนด้วยทองคำบนกระจกสไลด์.....	34
3.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของ IDE.....	34
3.7 การเตรียมการลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับไวรัส DENV-2 บน IDE.....	35
3.8 ระบบตรวจจับไอของ TNT ด้วยแก๊สเซ็นเซอร์ IDE.....	36
3.9 การเตรียม PAAM hydrogel.....	38
3.10 ระบบการไหลของแก๊สสำหรับการตรวจจับวัตถุระเบิด.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 ระบบตรวจจับไอของสารประกอบวัฏระเบิด.....	39
3.12 การวาง PAAM gel บนอิเล็กโทรด.....	40
4.1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ NIP (ก) และ MIP-TNT (ข).....	43
4.2 แผนภาพ CV ของ NIP (ก) และ MIP-TNT (ค) ที่ตอบสนองต่อความเข้มข้นที่แตกต่างกันของ TNT และค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของ NIP (ข) และ MIP-TNT (ง).....	44
4.3 ค่า R2 และ Stop ของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของ MIP-TNT.....	44
4.4 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ ขงกราฟีนออกไซด์ (ก) กราฟีนออกไซด์ผสมโคพอลิเมอร์ (ข) และคอมโพสิต GO และโคพอลิเมอร์ที่ลอกแบบโมเลกุลด้วย TNT ร่วมกับ DENV-2 (ง).....	46
4.5 ความสามารถในการ reproducibility ของแก๊สเซ็นเซอร์ที่ลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับ DENV-2.....	47
4.6 ความสามารถในการ repeatability ของแก๊สเซ็นเซอร์ที่ลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับ DENV-2.....	48
4.7 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของของ PAAM hydrogel (ก) - (จ) ภาพตัดขวางของ PAAM hydrogel ที่ความเข้มข้นของส่วนผสมอะคลิลาไมด์ในเนื้อเจล 5%, 10%, 15%, 20% และ 25% ตามลำดับ (ฉ) - (ญ) ส่วนพื้นผิวบนของ PAAM hydrogel ที่ความเข้มข้นของส่วนผสมอะคลิลาไมด์ในเนื้อเจล 5%, 10%, 15%, 20% และ 25% ตามลำดับ.....	50
4.8 กระแสไฟฟ้าของ PAAM hydrogel ที่มีความเข้มข้นของเนื้อเจลที่ต่างกัน (ก) กระแสไฟฟ้าทุกๆ 2 นาที ในช่วงที่มีการดูดซับไอของ TNT เป็นเวลา 10 นาที (ข) กระแสไฟฟ้าที่เวลา 10 นาที.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 สัญญาณของกระแสไฟฟ้า และอนุพันธ์ของแต่ละสารตัวอย่างของสารประกอบวัตถุระเบิด (ก) สัญญาณจากการวัดต่อเนืองทางเวลาของ TNT, DNT และเอทานอล (ข) สัญญาณจากการวัดต่อเนืองทางเวลาของ TNT, UREA และ PETN (ค) สัญญาณอนุพันธ์ของ TNT, DNT และเอทานอล (ง) สัญญาณอนุพันธ์ของ TNT, UREA และ PETN.....	53
4.10 อนุพันธ์สูงสุดของแต่ละสารตัวอย่างของสารประกอบวัตถุระเบิด และสารระเหยอื่นๆ.....	54
4.11 ระบบการไหลของแก๊สสำหรับการตรวจสอบผลกระทบของอุณหภูมิของสารประกอบวัตถุระเบิด.....	55
4.12 ผลกระทบของอุณหภูมิของไอสารประกอบวัตถุระเบิดต่อสัญญาณของเซ็นเซอร์ PAAM hydrogel ที่ได้จาก (ก) ไอของ TNT (ข) ไอของ DNT.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การก่อการร้ายนับเป็นภัยคุกคามต่อความมั่นคงของประเทศต่าง ๆ ในโลกปัจจุบัน อาวุธประเภทหนึ่งที่ถูกก่อการร้ายใช้แพร่หลายในการทำสงคราม คือระเบิดแสวงเครื่อง (Improvised Explosive Devices: IED) ซึ่งมีหลายรูปแบบ รูปแบบหนึ่ง ที่สร้างความสูญเสียแก่ฝ่ายรัฐและประชาชนทั่วไปในหลายพื้นที่ของโลก ได้แก่ ระเบิดแสวงเครื่องที่ฝังใต้พื้นถนน นับเป็นระเบิดแสวงเครื่องที่ตรวจจับได้ยากจึงเป็นปัญหาทางเทคนิคที่มีความสำคัญ และหลายประเทศได้ทุ่มเททรัพยากรเพื่อวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับต่อต้านอาวุธชนิดนี้ ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการค้นหาวัตถุระเบิดแสวงเครื่องที่ฝังใต้พื้นถนนจึงเป็นเรื่องที่ได้รับความสนใจ และมีการติดตามเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่อง การบาดเจ็บของพลเรือนส่วนใหญ่เกิดจากการระเบิดของอุปกรณ์ระเบิดที่ถูกก่อการร้ายใช้ แม้ว่าอันตรายนี้มักจะเกิดขึ้นในพื้นที่ที่มีความละเอียดอ่อน แต่ก็ยากที่จะหลีกเลี่ยงเนื่องจากอุปกรณ์นี้สามารถซ่อนได้อย่างง่ายดาย การค้นหาระเบิดเป็นหนึ่งในหลายมาตรการเพื่อป้องกันการบาดเจ็บเหล่านี้ การตรวจจับวัตถุระเบิดที่ใช้ในการทำอุปกรณ์ระเบิดถือเป็นพื้นที่วิจัยที่กำลังดำเนินอยู่ การตรวจจับวัตถุระเบิดสามารถทำได้หลายวิธี เช่น สุนัขดมกลิ่นรังสีเอกซ์ได้ถูกนำมาใช้เป็นเวลาหลายปีในการค้นหาวัตถุระเบิด และสิ่งของอื่น ๆ ที่ทำขึ้นในกระเป๋า และภาชนะบรรจุสินค้า, บุคลากรทางทหารที่ใช้เครื่องตรวจจับไอออนพกพา และอื่น ๆ เป็นต้น

ในประเทศไทยระเบิดส่วนใหญ่ที่ผลิตโดยผู้ก่อการร้ายประกอบด้วยไตรไนโตรโทลูอิน (2,4,6-Trinitrotoluene, TNT) เป็นวัสดุหลักในการระเบิด ซึ่ง TNT มีความดันไอต่ำมาก ( $4.8 \times 10^{-6}$  Torr ที่  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  [1]) จึงต้องใช้วิธีการตรวจจับที่มีความไวสูง กลุ่มงานวิจัยบางกลุ่มได้รายงานเทคนิคการตรวจจับ TNT เช่น แก๊ส และสารละลายโครมาโตกราฟี [2], แมสสเปกโตรเมตรี [3], โมบิลิตีส์เปกโทรสโกปี [4], ฟลูออเรสเซนซ์ และสี [5-8] และเทคนิคไฟฟ้าเคมี [9-13] วิธีที่ไวที่สุดวิธีหนึ่งในการตรวจจับไอของ TNT โดยตรงคือเทคนิคเคมีไฟฟ้า วิธีนี้ขึ้นอยู่กับการวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า อันเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่พื้นผิวอิเล็กโทรด เมื่อมีการตรวจจับวัตถุระเบิด อย่างไรก็ตามการตรวจจับไอจำเป็นต้องมีปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดขึ้นในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ นอกจากนี้ยังมีการนำเทคนิคการลอกแบบโมเลกุล (Molecular Imprinted Polymer, MIP) มาใช้เพื่อตรวจจับ TNT ซึ่งเทคนิคนี้สามารถสร้างบริเวณจับซับสเตรตและโมเลกุลแม่แบบในโครงสร้างของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพในการจดจำโมเลกุลแม่แบบได้อย่างจำเพาะเจาะจง [16-17]

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษา และออกแบบวิจัยโดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วน คือ 1. สร้างเซนเซอร์ด้วยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุล โดยใช้ TNT เป็นแม่แบบโมเลกุล เพื่อทดสอบการตรวจจับสารละลาย TNT โดยใช้วิธีการวัดทางเคมีไฟฟ้า 2. สร้างระบบตรวจจับไอของ TNT และสร้างเซนเซอร์ด้วยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุลร่วมกับไวรัส DENV-2 เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการตรวจจับไอของ TNT และ 3. ศึกษาวัสดุที่มีความเป็นรูพรุนเพื่อใช้ในการดูดซับไอของ TNT และนำสัญญาณที่วัดได้มาวิเคราะห์เพื่อสามารถตรวจจับไอของ TNT ได้อย่างเฉพาะเจาะจง

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจเทคโนโลยีการตรวจจับไอของวัตถุระเบิด
2. เพื่อศึกษาการตรวจจับไอของวัตถุระเบิดด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า
3. เพื่อศึกษาการตรวจจับไอของวัตถุระเบิดด้วยไบโอเซนเซอร์
4. สร้างเซนเซอร์ที่สามารถตรวจจับไอของ TNT ที่มีความดันไอต่ำได้
5. โครงสร้างของวัสดุที่ใช้จะต้องมีความเป็นรูพรุนสูง เพื่อใช้ในการตรวจจับไอของ TNT
6. สร้างเซนเซอร์ที่สามารถตรวจจับไอที่มีความจำเพาะเจาะจงกับ TNT

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. เทคนิคการลอกแบบโมเลกุลสามารถตรวจจับ TNT ได้อย่างเฉพาะเจาะจง
2. การเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการตรวจจับ TNT ด้วยไวรัส DENV-2 ร่วมกับเทคนิคการลอกแบบโมเลกุลสามารถตรวจจับไอของ TNT ที่มีความดันไอต่ำๆได้
3. วัสดุที่มีความเป็นรูพรุนจะสามารถดูดซับไอของ TNT ที่มีความดันไอต่ำๆได้

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การตรวจจับไอของสารประกอบวัตถุระเบิด ซึ่งใช้หลักการของการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบ โดยใช้สารประกอบวัตถุระเบิด TNT เป็นโมเลกุลแม่แบบ โดยนำ TNT ผสมกับไวรัส DENV-2 ซึ่งไวรัส DENV-2 มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ จะช่วยเพิ่มขนาดของพื้นที่ผิวในการตรวจจับไอของสารประกอบวัตถุระเบิด ซึ่งเทคนิคนี้สามารถสร้างบริเวณจับซับสเตรตและโมเลกุลแม่แบบในโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพในการจดจำโมเลกุลแม่แบบได้อย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเพาะเจาะจง และนอกจากนี้วัสดุที่มีรูพรุนที่เป็นของแข็งจำนวนมากสามารถดูดซับไอของ TNT ได้ ในการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับ TNT ที่ใช้ไฟฟ้าเคมี ความดันไอของ TNT ต่ำมากจะต้องถูกดูดซับ และละลายบนพื้นผิวก่อนการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า วัสดุที่เหมาะสมในกรณีนี้คือเจลโพลีเมอร์ที่มีอิเล็กโทรไลต์ โพลีอะคริลาไมด์เจลทำหน้าที่ดูดซับก๊าซเนื่องจากมีโครงสร้างพรุน ไฮโดรเจลของวัสดุนี้ถูกนำไปใช้ในการตรวจจับวัสดุที่ระเหยได้ในสารละลายเป็นเซ็นเซอร์ไฟฟ้าเคมี

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. สร้างระบบตรวจจับไอของ TNT
2. สร้างเซ็นเซอร์สำหรับตรวจจับไอของ TNT
3. ใช้เทคนิคการลอกแบบโมเลกุลสำหรับสร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับไอของ TNT
4. ใช้โพลีอะคริลาไมด์เจลในการดูดซับไอของ TNT

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาการตรวจจับไอของ TNT มีขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุระเบิด
2. ค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ และเทคนิคต่างๆสำหรับการตรวจจับไอของวัสดุระเบิด
3. วิเคราะห์และสรุปผลการค้นคว้า และศึกษางานวิจัย
4. สร้างเซ็นเซอร์ที่ใช้เทคนิคการลอกแบบโมเลกุล และใช้วิธีการทางเคมีไฟฟ้าเพื่อวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นขณะตรวจจับสารละลาย TNT และวัสดุระเบิดชนิดอื่นๆ
5. สร้างเซ็นเซอร์ที่ใช้เทคนิคการลอกแบบโมเลกุลร่วมกับไวรัส DENV-2 เพื่อตรวจจับไอของ TNT
6. ศึกษาและสร้างวัสดุที่มีความเป็นรูพรุน เพื่อดูดซับไอของ TNT
7. สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะนำเสนอวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ วัฏระเบิด และการตรวจจับวัฏระเบิด การตรวจจับไอระเหยของวัฏระเบิด พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล หลักการทางเคมีไฟฟ้า การวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า และไฮโดรเจล

### 2.1 วัฏระเบิด และการตรวจจับวัฏระเบิด

วัฏระเบิด คือสารประกอบทางเคมี ที่มีสถานะต่างๆทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ที่เมื่อได้รับปฏิกิริยาภายนอกทั้ง ความร้อน เปลวไฟ การกระทบ การเสียดสี หรือคลื่นการระเบิด แล้วจะเปลี่ยนแปลงสภาพจากเดิมกลายเป็นก๊าซปริมาณมากมายจำนวนมาก กระจายออกทุกทิศทาง การขยายตัวของก๊าซที่เกิดจากการระเบิด ก่อให้เกิดแสงสว่าง เปลวไฟ ความร้อน และแรงดันมหาศาล

องค์ประกอบระเบิด โดยทั่วไปมี 2 ส่วนหลัก คือ 1. เชื้อเพลิง (Fuel) เป็นวัตถุที่เกิดการลุกไหม้ 2. สารออกซิไดเซอร์ (Oxidizer) หรือสารที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) เนื่องจากการเผาไหม้สารหรือวัตถุที่เปิดโล่งสามารถใช้ก๊าซออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศ แต่การเผาไหม้วัสดุในวัตถุปิดผนึกไม่มีอากาศจำเป็นต้องอาศัยก๊าซออกซิเจนจากสารที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น ปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรต จากสูตรเคมี  $NH_4NO_3$  หากพิจารณาเฉพาะส่วนของไนเตรต ( $NO_3$ ) จะเห็นได้ชัดเจนว่า ไนโตรเจน 1 อะตอมประกอบด้วยออกซิเจนถึง 3 อะตอม ดังนั้นสารนี้จึงเหมาะที่จะใช้เป็นแหล่งจ่ายก๊าซออกซิเจน สำหรับระเบิดยุคใหม่ เช่น ระเบิดทีเอ็นที (TNT) ผลิตจากสารไตรไนโตรโทลูอีน (trinitrotoluene,  $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$ ) ซึ่งโมเลกุลของสารเคมีมีทั้งแหล่งให้ก๊าซออกซิเจน และส่วนที่เป็นเชื้อเพลิงครบสมบูรณ์ใน 1 โมเลกุล

#### 2.1.1 การตรวจจับวัฏระเบิด (Explosive detection)

การตรวจจับวัฏระเบิดสามารถทำได้หลายวิธี เช่น สุนัขดมกลิ่นรังสีเอกซ์ได้ถูกนำมาใช้เป็นเวลาหลายปีในการค้นหาวัฏระเบิดและสิ่งของอื่น ๆ ที่ทำขึ้นในกระเปาะและภาชนะบรรจุสินค้า บุคลากรทางทหารที่ใช้เครื่องตรวจจับไอออนพวกาและอื่น ๆ การตรวจหาสารเคมีวัฏระเบิดอาศัยการตรวจหาไอของวัฏระเบิด โดยอุปกรณ์ตรวจจับจะต้องดูดอากาศที่มีไอของวัฏระเบิดเข้าไปภายในเครื่อง แล้วใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น ไอออนโมบิลิตีส์เปกโทรมetri, แมสสเปกโทรมetri, แก๊สโครมาโทกราฟี เป็นต้น

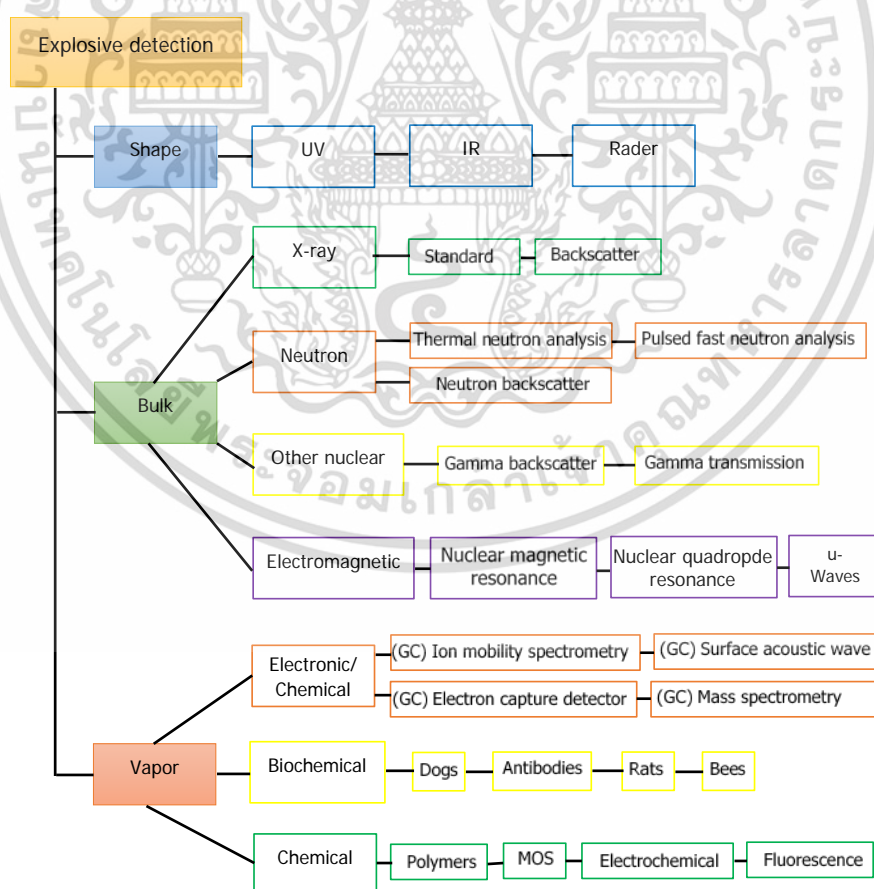
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจหาวัตถุระเบิดมี 3 (Krausa 2008) รูปแบบ คือ

1. **Bulk explosive** เป็นการตรวจหาวัตถุระเบิดโดยอาศัยการตรวจหาชิ้นส่วนของวัตถุระเบิด หรือส่วนประกอบที่อยู่ในลูกระเบิด เช่น นาฬิกา สวิตช์ วัตถุระเบิด ขนวน เศษโลหะ ด้วยเทคโนโลยีต่างๆ เช่น เครื่อง X-ray หรือการตรวจหาวัตถุระเบิดด้วยเทคโนโลยีนิวเคลียร์ซึ่งจะเน้นถึงการตรวจคุณลักษณะของสารพิษที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในวัตถุระเบิดนั้น เช่น การตรวจหาโลหะหนัก การหาโครงสร้าง โมเลกุล โครงสร้างผลึก หรือการหาความหนาแน่นของธาตุไนโตรเจน คาร์บอน และออกซิเจน เป็นต้น

2. **Shape** เป็นการตรวจหาวัตถุระเบิดโดยการอาศัยคลื่นแม่เหล็ก หรือพลังงานของสารระเบิดที่ได้ปลดปล่อยออกมาจากตัวของสารระเบิดเอง แล้วใช้เครื่องมือที่ใช้หลักการตรวจจับพลังงานเหล่านี้ เช่น เครื่องที่ใช้หลักการทาง UV, IR และ Rader

3. **Vapor phase** เป็นการตรวจหาวัตถุระเบิดจากไอระเหยของสารระเบิด ซึ่งองค์ประกอบสำคัญของสารระเบิดมักจะเป็นสารระเหย (Volatile compound) ซึ่งจะมีไอระเหยออกมาข้างนอกหรือติดอยู่ตามผิวของวัตถุระเบิด หรือภาชนะที่หุ้มห่อ สามารถใช้เทคโนโลยีในการตรวจวิเคราะห์หาสารระเบิดเหล่านี้ได้



รูปที่ 2.1 การตรวจหาวัตถุระเบิด [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 เซนเซอร์ตรวจจับไอระเหยของวัตถุระเบิด (Explosive vapor sensor)

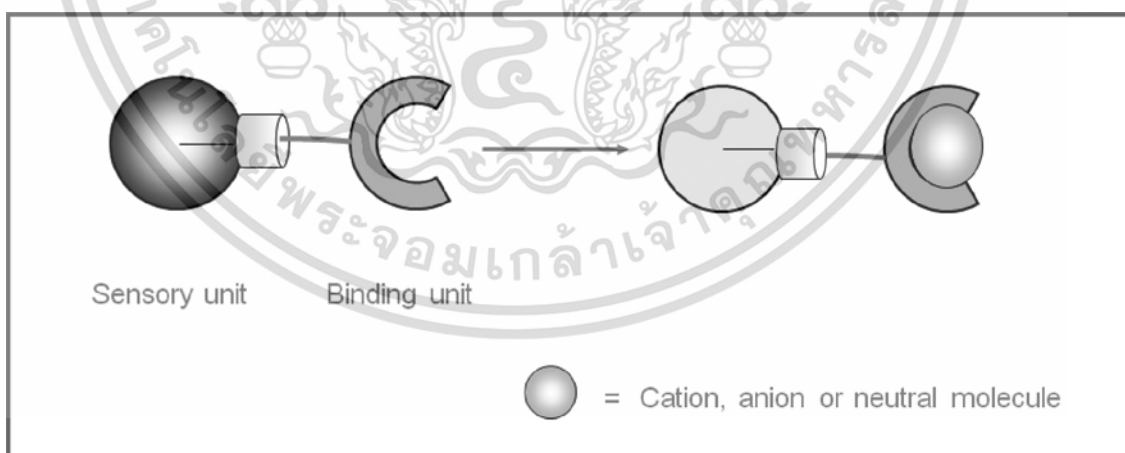
เซนเซอร์ คือ ชุดอุปกรณ์ ระบบ หรือวงจร ที่ทำหน้าที่ในการตรวจวัด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการรับรู้ของมนุษย์ และตรวจจับการเปลี่ยนแปลง คุณสมบัติ หรือ ลักษณะของสารเป้าหมายที่เป็นเป้าหมายในการวิเคราะห์ (Analytical Target) และแสดงผลในลักษณะของสัญญาณที่สามารถตรวจวัด ในเชิงปริมาณได้ ทั้งสัญญาณไฟฟ้า สัญญาณกลศาสตร์ และสัญญาณเชิงแสง อุปกรณ์เซนเซอร์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามคุณสมบัติในการตรวจวัด ประกอบด้วย

#### 2.1.2.1 เซนเซอร์ด้านกายภาพ (Physical Sensor)

เซนเซอร์ที่ใช้ ในการตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ เช่น เซนเซอร์ในการจับภาพ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น

#### 2.1.2.2 เซนเซอร์ด้านเคมี (Chemical Sensor)

เซนเซอร์ที่ใช้ในการ ตรวจวัดสารเคมีต่างๆ โดยอาศัยปฏิกิริยาจำเพาะทางเคมี และมีการแปลงเป็นข้อมูลหรือสัญญาณที่สามารถอ่านวิเคราะห์ได้ เช่น เซนเซอร์ตรวจวัดสารเคมีปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม หรือดินและน้ำ โดยเซนเซอร์ทางเคมีจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบพื้นฐาน 2 ส่วน ดังรูปที่ 2.2 คือ 1. ส่วนจับโมเลกุลซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโมเลกุลโฮสต์ โดยส่วนจับนี้จะต้องมีความจำเพาะเจาะจง (Selectivity) กับสารที่เราต้องการวิเคราะห์ 2. ส่วนให้สัญญาณซึ่งจะทำการแปลงสัญญาณการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของการจับกันระหว่างโฮสต์และเกสต์ ให้เป็นสัญญาณที่สามารถตรวจวัดด้วยเครื่องมือทาง วิทยาศาสตร์ ตัวตรวจจับอาจแบ่งได้ตามตัวแปรสัญญาณ ดังนี้



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางเคมี [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. อุปกรณ์เชิงแสง (Optical devices) ซึ่งจะเปลี่ยนสัญญาณที่ได้จากการจับกันของ โมเลกุลตัวรับกับสารที่ต้องการตรวจวัดให้เป็นสัญญาณทางแสง กลุ่มนี้อาจแบ่งตามประเภทของสมบัติ ทางแสงที่ใช้ในเซ็นเซอร์เคมี ดังนี้

- การดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่วัดได้ในสื่อโปร่งใสที่เกิดจากการดูดซับของตัว วิเคราะห์หรือโดยปฏิกิริยาที่มีตัวบ่งชี้ที่เหมาะสม
- การสะท้อนกลับ (Reflectance) วัดจากสื่อที่ไม่โปร่งแสงโดยปกติจะใช้ตัวบ่งชี้ที่ ไม่ได้ใช้งาน
- การเรืองแสง (Luminescence) ขึ้นอยู่กับการวัดความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมา จากปฏิกิริยาทางเคมีในระบบรับสัญญาณ
- การเรืองแสง (Fluorescence) วัดเป็นผลการปลดปล่อยจากการฉายรังสี นอกจากนี้ การเลือกใช้เรืองแสงอาจเป็นพื้นฐานของอุปกรณ์ดังกล่าว
- ดัชนีการหักเหแสง (Refractive index) ซึ่งวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบ ของสารละลาย ซึ่งอาจรวมถึงผลสะท้อน Resonance พื้นผิว
- ผลกระทบจากความร้อน (Optothermal effect) ซึ่งขึ้นอยู่กับการวัดความร้อนที่ เกิดจากการดูดกลืนแสง
- การกระเจิงแสง (Light scattering) ขึ้นอยู่กับผลกระทบที่เกิดจากอนุภาคที่มีขนาด แนนอนในตัวอย่าง

2. อุปกรณ์เชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical devices) จะเปลี่ยนผลเกี่ยวกับ ปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า อาจแบ่งกลุ่มย่อยต่อไปนี้เป็น

- Voltammetric sensors รวมถึงอุปกรณ์ amperometric ซึ่งมีการวัดค่า กระแสไฟฟ้าในโหมดไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสสลับ.
- Potentiometric sensor ซึ่งสามารถวัดค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้าที่ใช้วัดค่าได้ (ion-selective electrode, redox electrode, metal/metal oxide electrode) เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง
- ทรานซิสเตอร์ที่ทำให้เกิดความรู้สึกไวต่อสารเคมี (CHEMFET) ซึ่งผลจากการทำงาน ร่วมกันระหว่างตัววิเคราะห์และสารเคลือบผิวที่ใช้งานอยู่จะเปลี่ยนเป็นกระแสของ source-drain current
- Potentiometric solid electrolyte gas sensors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3. อุปกรณ์เชิงไฟฟ้า (Electrical devices)** การวัดไม่มีกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าเกิดขึ้น แต่สัญญาณเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดจากการทำงานร่วมกันของตัววิเคราะห์ เช่น

- Metal oxide semiconductor sensors ที่ใช้เป็นเครื่องตรวจจับก๊าซส่วนใหญ่โดยอาศัยกระบวนการรีดอกซ์แบบย้อนกลับของส่วนประกอบของก๊าซ analyte
- Organic semiconductor sensors ซึ่งขึ้นอยู่กับการทำงานของคอมเพล็กซ์การถ่ายเทประจุซึ่งจะปรับเปลี่ยนความหนาแน่นของตัวเก็บประจุ
- Electrolytic conductivity sensors
- Electric permittivity sensors

**4. อุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงมวล (Mass sensitive devices)**

- อุปกรณ์ที่จับการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าของการสั่นของผลึกแร่ (piezoelectric devices)
- Surface acoustic wave devices ขึ้นอยู่กับการปรับเปลี่ยนความเร็วในการแพร่คลื่นของคลื่นเสียงที่เกิดจากการสะสมของอนุภาคที่แน่นอนของตัววิเคราะห์

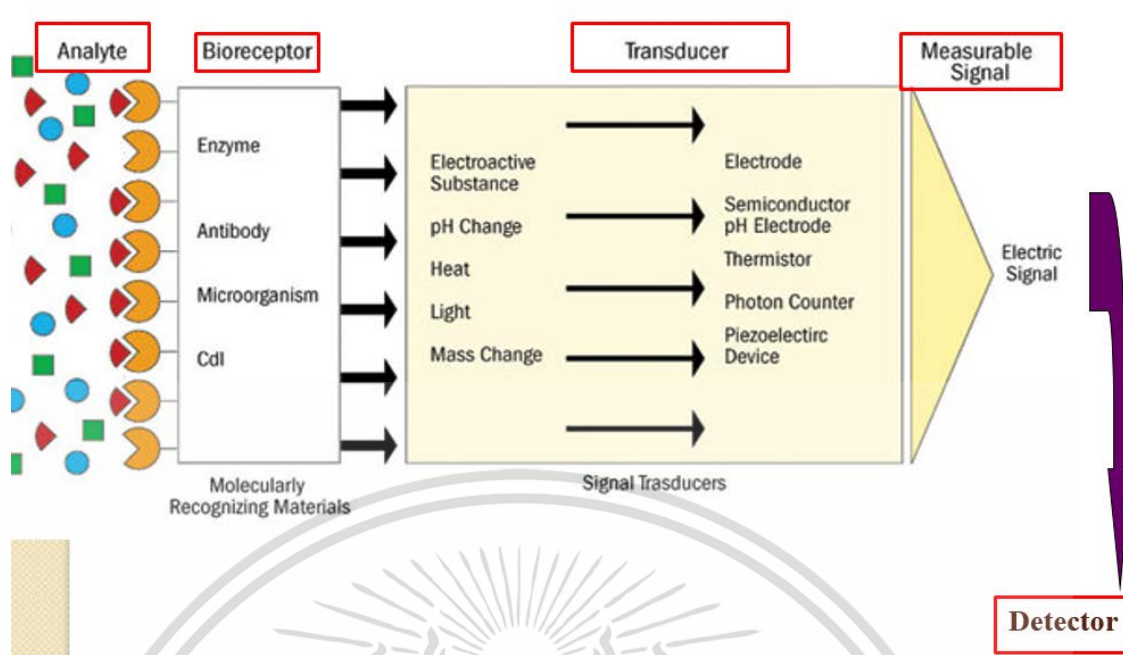
**5. อุปกรณ์เชิงแม่เหล็ก (Magnetic devices)** ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ paramagnetic ของก๊าซที่กำลังวิเคราะห์

**6. อุปกรณ์เชิงอุณหภูมิ (Thermometric devices)** โดยวัดความร้อนที่เกิดขึ้น

**7. การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพอื่นๆ ที่เกิดขึ้น**

**2.1.2.3) เซนเซอร์ทางชีวภาพ (Biosensor)** เป็นอุปกรณ์การตรวจวัดทางชีวภาพโดยการใช้สารชีวภาพเปลี่ยนปริมาณสารที่ต้องการตรวจวัด (Converts) ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (Electrical signal) ที่สามารถตรวจวัดได้ ไบโอสเซนเซอร์ เป็นอุปกรณ์ (Devices) ที่ประกอบไปด้วย 2 ส่วนประกอบหลักคือ 1 ส่วนทางชีวภาพ (Biological molecule) และ 2 ส่วนทางด้าน การเปลี่ยนสัญญาณ (Transducer) ดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 หลักการของไบโอเซนเซอร์ [28]

ส่วนประกอบทั้ง 2 ส่วน ของไบโอเซนเซอร์ได้แก่

1. สารทางชีวภาพ (Biological elements) ได้แก่ เอนไซม์ จุลินทรีย์ เนื้อเยื่อพืชและสัตว์ แอนติเจนและแอนติบอดี เมื่อสารชีวภาพได้รับสารที่มีความเลือกเฉพาะที่ต้องการวัด (Analyte) จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ พร้อมกับส่งสัญญาณให้ส่วนถัดไป
2. ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) เพื่อทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณที่ได้รับซึ่งอาจจะเป็นสัญญาณทางฟิสิกส์ ทางเคมี และชีวเคมี ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เพื่อส่งต่อไปยังส่วนของการวัดสัญญาณ (Elaborate) ต่อไป

การผสมผสานส่วนของสารชีวภาพและทรานสดิวเซอร์สามารถเลือกได้หลากหลาย ซึ่งมีทั้งปรากฏในงานวิจัยและไม่ปรากฏในงานวิจัย ในตารางที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของไบโอเซนเซอร์ที่สามารถนำไปประยุกต์ได้โดยใช้แนวคิดของไบโอเซนเซอร์ ซึ่งอาจจะปรากฏในงานวิจัยในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

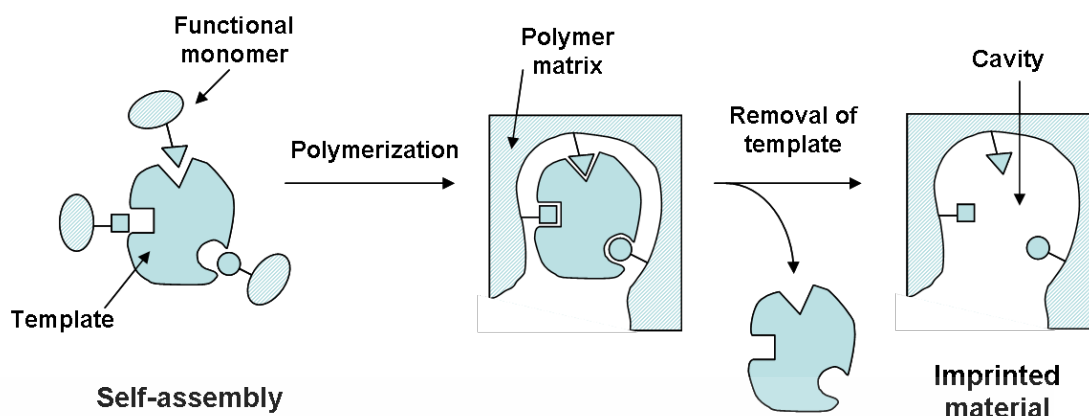
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบที่สามารถใช้เป็นไบโอเซนเซอร์

Biological elements	Transducers
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ สิ่งมีชีวิต (Organism)</li> <li>■ เนื้อเยื่อ (Tissue)</li> <li>■ เซลล์ (Cells)</li> <li>■ ออร์แกเนลล์ (Organelles)</li> <li>■ เมมเบรน (Membranes)</li> <li>■ เอนไซม์ (Enzymes)</li> <li>■ ส่วนประกอบของเอนไซม์ (Enzyme components)</li> <li>■ รีเซพเตอร์ (Receptors)</li> <li>■ แอนติบอดี (Antibodies)</li> <li>■ กรดนิวคลีอิก (Nucleic acids)</li> <li>■ โมเลกุลสารอินทรีย์ (Organic molecules)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ โปเทนชิโอเมทรี (Potentiometry)</li> <li>■ แอมเปอร์โรเมทรี (Amperometry)</li> <li>■ คอนดักโทเมทรี (Conductometry)</li> <li>■ อิมพีดิเมทริก (Impedimetric)</li> <li>■ ออปติคอล (Optical)</li> <li>■ แคลอริเมทริก (Calorimetric)</li> <li>■ อะคูสติก (Acoustic)</li> <li>■ เมคานิคอล (Mechanical)</li> <li>■ โมเลกุลอิเล็กทรอนิกส์ (Molecular electronic)</li> </ul>

## 2.2 พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล (Molecularly imprinted polymer, MIP)

พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ถูกใช้สำหรับการเลือกจับโมเลกุลอย่างจำเพาะเจาะจง ด้วยการลอกแบบพอลิเมอร์ หลักการการจับโมเลกุลของสาร คือ จะเลือกจับเฉพาะสารที่มีขนาด รูปร่าง และหมู่ฟังก์ชันโมเลกุลเหมือนหรือจำเพาะกับรอยพิมพ์ที่อยู่บนผิวของพอลิเมอร์ [18] กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์ลอกแบบประกอบด้วย สารแม่แบบ (Template) โมโนเมอร์ (Monomer) สารเชื่อมขวาง (Cross-linking) และตัวริเริ่ม (Initiator) ซึ่งเตรียมได้โดยการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยผสมสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือแม่แบบกับโมโนเมอร์ เพื่อใช้เป็นรอยพิมพ์แม่แบบ หลังจากนั้นทำการเชื่อมขวาง และเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยตัวริเริ่มปฏิกิริยาเกิดเป็นเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งแรงที่ใช้จับระหว่างสารแม่แบบกับโมโนเมอร์จะเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจน และอันตรกิริยาไพ-ไพ ( $\pi$ - $\pi$  interaction) หลังจากนั้นทำการล้างตัวแม่แบบออก ซึ่งจะทำให้เกิดช่องว่างของแม่แบบที่มีความจำเพาะเจาะจงต่อแม่แบบ ด้วยขนาด รูปร่าง และหมู่ฟังก์ชัน

โมเลกุลแม่แบบ [19] ดังแบบจำลองในรูปที่ 2.4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบ

### 2.2.1 กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์ลอกแบบ

การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยทั่วไปแล้วสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ (Chain addition polymerization) และปฏิกิริยาแบบควบแน่นหรือแบบขั้น (Condensation หรือ Step growth polymerization) โดยที่ปฏิกิริยาแต่ละประเภทจะเกี่ยวข้องกับสารตั้งต้นโมโนเมอร์ที่มีโครงสร้างต่างกันอย่างชัดเจน โดยปฏิกิริยาแบบลูกโซ่มักจะเกิดกับโมโนเมอร์ที่มีพันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอน เช่น เอธิลีน โพรพิลีน ไวนิลคลอไรด์ และสไตรีน ในขณะที่ปฏิกิริยาแบบควบแน่นจะเกิดปฏิกิริยากับโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันตั้งแต่ 2 หมู่ขึ้นไป เช่น กรดเทเรพธาลิก เป็นต้น การสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบเป็นการเตรียมด้วยกระบวนการเตรียมแบบพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่อนุมูลอิสระ (Free radical chain polymerization) ซึ่งอนุมูลอิสระ หมายถึง อะตอม โมเลกุล หรือไอออน ที่มีอิเล็กตรอนไม่เป็นคู่ (Unpair electron) อยู่ในวงอิเล็กตรอนวงนอกสุด (Valence orbital) พอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่ที่เริ่มต้นด้วยหมู่ไอออนิกหรือโควาเลนต์ปฏิกิริยาที่เป็นอนุมูลอิสระ เรียกว่า พอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่อนุมูลอิสระซึ่งลักษณะเด่นของปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ คือการที่ปฏิกิริยาขั้นแผ่ขยายสามารถเกิดได้รวดเร็วมาก เตรียมได้ง่าย ซึ่งขั้นตอนการเตรียมถูกแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ ได้แก่ ขั้นริเริ่ม (Initiation) ขั้นแผ่ขยาย (Propagation) และขั้นยุติ (Termination) ตามลำดับ

#### 2.2.1.1 ขั้นริเริ่ม (Initiation)

ประกอบด้วยเกิดการเกิดอนุมูลอิสระและปฏิกิริยาอนุมูลอิสระกับโมโนเมอร์กลายเป็นหมู่ริเริ่มต้น (Chain initiating species) ซึ่งการเกิดอนุมูลอิสระเกิดจากการแยกสลายของพันธะเดี่ยวระหว่างอะตอมในสารประกอบ เรียกว่า โฮโมลิซิส (Homolysis) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการให้ความร้อน ตัวริเริ่มปฏิกิริยา ที่เรียกว่า การแยกสลายด้วยความร้อน (Thermolysis) ตัวของของตัวริเริ่มปฏิกิริยา เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) เทอเชียรีบิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (t-butyl

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

hydroperoxide) และเอโซบิสไอโซบิวทีโรไนไตรล์ (Azobisisobutyronitrile) อุณหภูมิการแยกสลายให้อนุมูลอิสระของตัวริเริ่มปฏิกิริยาดังกล่าวอยู่ในช่วง 50 – 100 องศาเซลเซียสทำให้เกิดอนุมูลอิสระ

### 2.2.1.2 ขั้นแผ่ขยาย (Propagation)

สายโซ่พอลิเมอร์จะขยายด้วยโมโนเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระเป็นหมู่เริ่มต้นสายโซ่ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับโมโนเมอร์ต่อไปเรื่อยๆ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแต่ละครั้งจะเกิดโซ่อนุมูลอิสระ (Chain radicals) ใหม่ขึ้น โซ่อนุมูลอิสระใหม่นี้มีสมบัติเหมือนกับโซ่อนุมูลอิสระเดิมทุก และการยกเว้นแต่จำนวนโมโนเมอร์ในโซ่เพิ่มมากขึ้นครั้งละ 1 โมเลกุล

### 2.2.1.3 ขั้นยุติ (Termination)

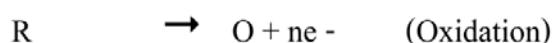
พอลิเมอร์สิ้นสุดปฏิกิริยาการแผ่ขยายจากอนุมูลอิสระจะสิ้นสุดโดยปฏิกิริยาระหว่างสายโซ่อนุมูลอิสระ 2 โมเลกุล (Bimolecular reaction) โดยอาจเกิดปฏิกิริยาแบบรวมตัวกัน (Combination) ของโซ่อนุมูลอิสระ 2 โมเลกุล ได้เป็นสายโซ่พอลิเมอร์ 1 โมเลกุล

## 2.3 หลักการทางเคมีไฟฟ้า

เป็นความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เซลล์เคมีไฟฟ้าจะต้องประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลักที่สำคัญ ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ซึ่งปริมาณทางไฟฟ้ามีการส่งผ่านจากปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้าทำงานเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ส่วนที่สองคืออุปกรณ์ ทางเคมีไฟฟ้า ทำหน้าที่ตรวจรับหรือให้สัญญาณปริมาณทางไฟฟ้าและส่วนที่สามคือสารละลายที่มีเกลืออิเล็กโทรไลต์ละลายอยู่เพื่อการนำไฟฟ้าในสารละลาย

โดยทั่วไปหัววัดเคมีไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าด้วยสมบัติดังต่อไปนี้

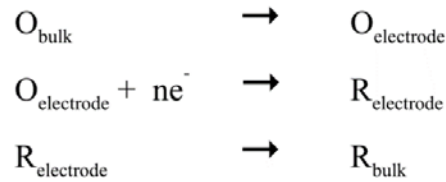
1. ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) คือ ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือรีดักชัน ตัวอย่างเช่น สมการต่อไปนี้



โดย O เป็นสารออกซิไดซ์เกิดปฏิกิริยารีดักชัน และ R เป็นสารรีดิวซ์เกิดปฏิกิริยา

ออกซิเดชัน  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปฏิกิริยา Heterogeneous คือ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากับสารละลาย ด้วยกระบวนการถ่ายเทมวลและอิเล็กตรอน ดังสมการต่อไปนี้



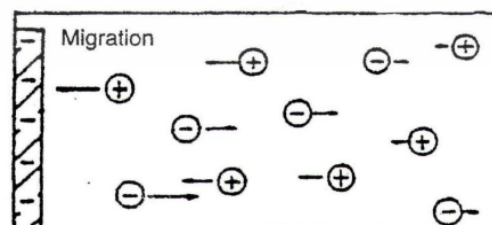
3. กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดังกล่าว หรือกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดังกล่าว จะมีการส่งผ่านสู่เซลล์เคมีไฟฟ้า
4. ปริมาณกระแสไฟฟ้าจะถูกควบคุมด้วยกระบวนการถ่ายเทมวล ซึ่งมีด้วยกัน 3 ลักษณะ คือ ไมเกรชัน (Migration) การแพร่ (Diffusion) และการพา (Convection) รวมถึงจลศาสตร์ของปฏิกิริยาการถ่ายเทอิเล็กตรอน

### 2.3.1 การถ่ายเทมวลในสารละลาย (Mass transfer)

มวลในสารละลายซึ่งอาจจะเป็นไอออนหรือโมเลกุลถูกพาไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ด้วยกันคือ ไมเกรชัน การแพร่ และการพา กระบวนการถ่ายเทมวลทั้ง 3 กลไกนี้เกิดขึ้นกับ ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ตัวอย่างต่างๆ ที่ใช้อธิบายต่อไปนี้จะแสดงเฉพาะขั้วแอโนดเท่านั้น

#### 2.3.1.1 ไมเกรชัน (Migration)

ไมเกรชัน เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือสปีชีส์ต่างๆ ที่มีประจุเข้าหาขั้วไฟฟ้าตามแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตหรือภายใต้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากศักย์ไฟฟ้าภายนอกที่ให้กับขั้วไฟฟ้า คือพวกที่มีประจุบวกเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าลบและพวกที่มีประจุไฟฟ้าลบเคลื่อนที่ไปยัง ขั้วไฟฟ้าบวก ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของไอออนแบบไมเกรชัน [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

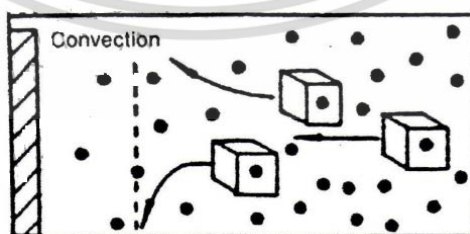
กระแสที่เกิดขึ้นเรียกว่า กระแสไมเกรชัน ซึ่งเป็นกระแสที่ไม่มีความสำคัญในการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า บางวิธีวิเคราะห์ต้องต้องมีการกำจัดเคลื่อนที่แบบนี้ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกือหนุน (Supporting electrolyte) ซึ่งเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แก่ และเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยต้องเติมในปริมาณที่เข้มข้นมากกว่าสารละลายตัวอย่าง 50 ถึง 100 เท่า ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดต่อไปในวิธีวิเคราะห์ที่ต้องมีการลดกระแสไมเกรชัน

### 2.3.1.2 การแพร่ (Diffusion)

เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือสปีชีส์ต่างๆ ที่มีประจุเข้าหาขั้วไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้เอง เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นโดยเคลื่อนที่จากบริเวณที่สารละลายมีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่สารละลายมีความเข้มข้นต่ำกว่าเพื่อลดความแตกต่างของ ความเข้มข้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนสารละลายไปยังขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสที่เรียกว่า กระแสแพร่ จัดเป็นกระแสฟาราดีก (Faradaic current) กระแสการแพร่ขึ้นกับอัตราการเคลื่อนที่ของไอออนและอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า จัดเป็นกระแสที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า

ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่ ได้แก่

1. ความเข้มข้นของสาร สารที่มีความเข้มข้นสูงจะแพร่ได้มาก
2. อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การแพร่เป็นไปได้เร็วขึ้น
3. ความดัน การเพิ่มความดันช่วยให้โมเลกุล หรือไอออนของสารเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น
4. สิ่งเจือปนอื่นๆ สิ่งเจือปนที่ปนอยู่ในสารจะเป็นอุปสรรคขัดขวางทำให้การแพร่เกิดได้ช้าลง
5. การดูดติดของสารอื่น โมเลกุลหรือไอออนของสารที่แพร่ถูกดูดติดด้วย องค์กรประกอบของสารต่างๆ จะทำให้ความสามารถในการแพร่ลดลง

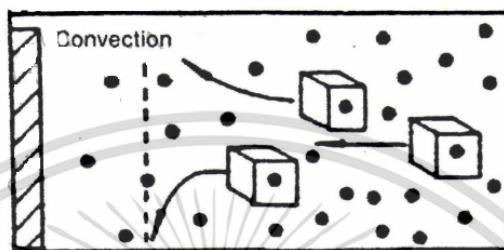


รูปที่ 2.6 แสดงการนำพามวลจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าอิเล็กโทรดด้วยการแพร่ [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1.3 การพา (Convection)

การพาเป็นการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงทางกายภาพทำให้เกิดการไหลเวียนของสารละลาย เช่นการคน หรือการกวนสารละลาย การหมุน หรือการสั่นของอิเล็กโทรด หรือเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นของสาร ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบการพาเรียกว่า การพา โดยธรรมชาติ (Natural convection) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การนำพามวลจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าอิเล็กโทรดด้วยการพา [29]

กระแสที่เกิดขึ้นเรียกว่า กระแสการพาหรือกระแสคอนเวกชัน (Convection current) ซึ่งเป็นกระแสที่ไม่ค่อยมีความสำคัญเท่าใดนักในการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า บางวิธีวิเคราะห์อาจ ต้องมีการกำจัดเคลื่อนที่แบบนี้โดยการหยุดคนหรือกวนสารละลายขณะการวัด

### 2.3.2 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

กระบวนการที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆได้ 2 ประเภทดังนี้

1. ในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างอิเล็กโทรดกับสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์โดยผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อิเล็กโทรดหนึ่งและปฏิกิริยารีดักชันที่อีกอิเล็กโทรดหนึ่ง กระบวนการแบบนี้เรียกว่า กระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic current process) และ กระแสที่เกิดขึ้น เรียกว่า กระแสฟาราเดอิก (Faradaic current,  $I_{far}$ ) เมื่อวัดกระแสฟาราเดอิกที่เกิดขึ้นจากสารที่ต้องการวิเคราะห์ซึ่งถูกรีดิวซ์ หรือถูกออกซิไดซ์ที่อิเล็กโทรดทำให้ทราบจำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยา และสามารถนำไปหาปริมาณสารที่ต้องการวิเคราะห์ได้ตามหลักปริมาณสารสัมพันธ์ ดังนั้นกระแสฟาราเดอิกจึงจัดเป็นสัญญาณการวิเคราะห์ (Analytical signal) ชนิดหนึ่งที่ถูกวัดในเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้าซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดอิกที่กล่าวว่า “ปริมาณของประจุ (อิเล็กตรอน) ที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเป็นสัดส่วนตรงกับ กระแส”

2. กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ (Adsorption) ของไอออนที่มีประจุตรงข้ามกับอิเล็กโทรดที่ผิวหน้าอิเล็กโทรดแต่ไม่ข้ามรอยต่อระหว่างอิเล็กโทรดกับสารละลายและไม่มีปฏิกิริยาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถ่ายโอนอิเล็กตรอนเกิดขึ้น กระบวนการนี้ทำให้บริเวณรอยต่อเปรียบ เหมือนตัวเก็บประจุ (Electric capacitor) จึงเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการ อัดประจุ (Charging process) หรือ กระบวนการนอนฟาราเดอิก (Nonfaradaic process) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ

องค์ประกอบของสารละลายที่ไม่ใช่องค์ประกอบที่ต้องการวิเคราะห์มักเกิดกระบวนการอัดประจุ ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นจึงเป็นสัญญาณรบกวนของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์เชิงไฟฟ้าเคมี ดังนั้นต้องนำกระแสที่วัดได้ ( $I$ ) มาหักลบด้วยกระแสนอนฟาราเดอิก ( $I_{\text{chg}}$ ) จึงจะได้กระแสที่เกิดจากปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนของสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือกระแสฟาราเดอิก ( $I_{\text{far}}$ ) ดังสมการต่อไปนี้

$$I_{\text{far}} = I - I_{\text{chg}}$$

### 2.3.3 การวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า (สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล 2018)

#### 2.3.3.1 เซลล์โวลแทมเมตรี

เซลล์โวลแทมเมตรี เป็นเทคนิคที่มักใช้เรียกเซลล์เคมีไฟฟ้าในกลุ่มการวิเคราะห์โวลแทมเมตรี ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่แตกต่างไปจากการทำโพเทนชิอเมตรี ตรงที่ว่า ขั้วไฟฟ้าในการทำโวลแทมเมตรี ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ขั้วไฟฟ้าใช้งาน และขั้วไฟฟ้าช่วย หรือขั้วไฟฟ้าร่วม ที่จุ่มอยู่ในสารละลายที่มีสารตัวอย่างที่ต้องการ วิเคราะห์ และสารอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งมักเรียกว่าเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ช่วยหรือเกื้อหนุน (Supporting electrolyte) โดยสาร อิเล็กโทรไลต์ช่วยมักใช้ในปริมาณที่มากเกินไป

ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ในการทำโวลแทมเมตรี ประกอบด้วย

1. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เป็นขั้วที่จำเป็นต้องมีเพื่อใช้ในการเทียบศักย์ไฟฟ้า เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จากวงจร เป็นค่าของความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว จึงเรียกได้ว่าเป็นค่า ศักย์ไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative potential) ในการใช้งานจะมีค่าศักย์ขั้วไฟฟ้าคงที่ตลอดการทดลอง และควบคุมค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้าใช้งานด้วย โดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าอ้างอิงจะมีใช้กันหลายชนิด เช่น ขั้วไฟฟ้าคาโลเมล ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ เป็นต้น

2. ขั้วไฟฟ้าร่วม หรือขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode) ขั้วไฟฟ้าช่วย ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เป็นขั้วที่รับพลังงานไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ส่งต่อผ่านสารละลายไปยังขั้วไฟฟ้าใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งาน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตัวอย่างระหว่าง การวิเคราะห์ขั้วไฟฟ้าร่วมนี้มักมีพื้นที่ผิวมากๆ เพื่อให้การนำไฟฟ้า เป็นไปได้ดี และลดการเกิด ศักย์จากโอห์มของวงจร

3. ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) ขั้วไฟฟ้าใช้งาน ในกลุ่มการวิเคราะห์โวลแทมเมตรี ขั้วไฟฟ้าใช้งานจะแตกต่างจากการวิเคราะห์อื่น คือขนาดของขั้วไฟฟ้าต้องเล็ก เพื่อให้พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าในการสัมผัสกับสารตัวอย่างมีน้อย เกิดสภาวะของโพลาริเซชันตลอดการวิเคราะห์ โดยส่วนใหญ่จะนิยมที่ทำมา จากแพลตินัม (Pt) หรือคาร์บอน (C) หรือปรอท (Hg) เป็นต้น ซึ่งขั้วไฟฟ้าใช้งานที่ดีควรจะให้ค่า สัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่สูง รวมทั้งมีการตอบสนองที่คงที่ เชื่อถือได้ตลอดอายุการใช้งาน และ สิ่งที่ควรพิจารณาในการเลือกวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าใช้งาน คือ ลักษณะของปฏิกิริยารีดอกซ์ของสาร ตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์และกระแสพื้นในช่วงศักย์ไฟฟ้าที่ใช้งาน โดยปัจจัยย่อยอื่นๆ ที่นำมาพิจารณาด้วย เช่น ช่วงของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้งานได้ ค่าการนำไฟฟ้า ราคา ความยากง่ายในการหา และ ความเป็นพิษ เป็นต้น

### 2.3.3.2 เทคนิคโวลแทมเมตรี

โวลแทมเมตรี เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมี ที่ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่เข้าไปในวงจร และวัดกระแสที่เกิดขึ้น เซลล์เคมีไฟฟ้าของเทคนิคโวลแทมเมตรีจัดเป็นเซลล์อิเล็กโทรไลต์ สำหรับขั้วไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเทคนิคนี้ จะแตกต่างจากเทคนิคโพเทนชิอเมตรี คือ มีการใช้ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode) ซึ่งส่วนมากมักเป็นขั้วไฟฟ้าช่วยแพลตินัม (Platinum wire auxiliary electrode) นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้าใช้งานสำหรับเทคนิคนี้มักเป็นขั้วไฟฟ้าจุลภาค ทั้งนี้เพื่อให้เกิด โพลาริเซชันที่ขั้วไฟฟ้าใช้งานและเทคนิคที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์โดยใช้โวลแทมเมตรี คือ

1. Chronoamperometry
2. Current-Sample Polarography
3. Pulse Voltammetry
  - Normal Pulse Voltammetry
  - Differential Pulse Voltammetry
  - Square-Wave Voltammetry
  - Staircase Voltammetry
4. AC Polarography

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Linear Sweep Polarography

6. Cyclic Voltammetry

7. Stripping Voltammetry

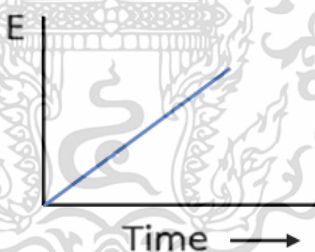
- Anodic Stripping Voltammetry

- Cathodic Stripping Voltammetry

- Potentiometric Stripping Analysis

### 2.3.3.2 เทคนิคการวิเคราะห์ในกลุ่มโวลแทมเมตรี

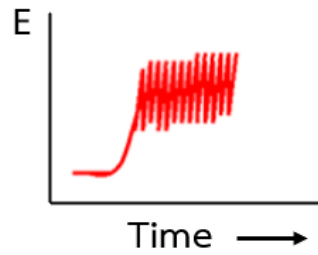
1. โพลารอกราฟี (Polarography) โพลารอกราฟี เป็นเทคนิคของกลุ่มโวลแทมเมตรี (เป็นเทคนิคแรกของกาวิเคราะห์ โดยโวลแทมเมตรี) ที่มีการใช้ขั้วไฟฟ้าแบบหยดปรอทเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน เทคนิคนี้เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายและเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด สำหรับการวิเคราะห์โดยโพลารอกราฟีนี้ ศักย์ที่ให้กับขั้วไฟฟ้า จะเป็นแบบ Linear-scan นั่นคือ ให้ศักย์กับวงจรในอัตราเร็วที่คงที่หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการเพิ่มศักย์อย่างเป็นเส้นตรงตามเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาแบบเทคนิคโพลารอกราฟี [30]

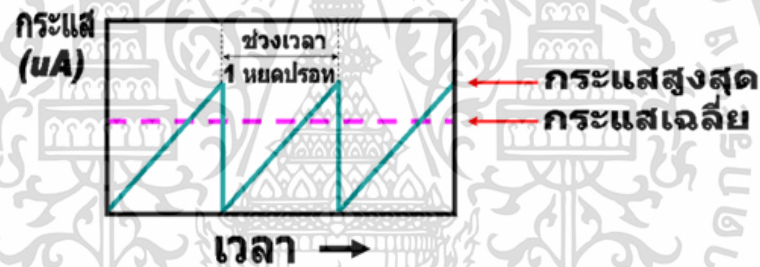
สำหรับศักย์ที่ให้กับวงจรจะต้องเลือกให้เหมาะสมโดยใช้ Voltammetric analyzer เป็นตัวควบคุมรวมถึงวัดกระแสที่เกิดขึ้นด้วย โพลารแกรมของวิธีโพลารอกราฟี แสดงดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



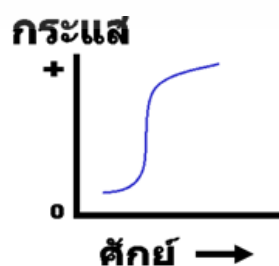
รูปที่ 2.9 โพลารแกรมของเทคนิคโพลารกราฟี [30]

สาเหตุที่โพลารแกรมที่ได้เป็นแบบฟันเลื่อย ก็เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสระหว่างการหยุดปรอทเกิดการแกว่งของกระแสขึ้น โดยกระแสเริ่มเกิดเมื่อมีการปล่อยปรอทจาก ปลายหลอดรูเล็กและกระแสขึ้นสูงสุด เมื่อปรอทถูกปล่อยออกมาเต็มหยุดพร้อมที่จะหยุดลงในสารละลาย ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา เมื่อมีการหยุดปรอท [30]

อย่างไรก็ตาม เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีการพัฒนาวิธีโพลารกราฟีแบบใหม่ที่เรียกว่า การทำแทสต์โพลารกราฟี โดยการควบคุมบันทึกกระแสก่อนที่จะหยุดออกมาจากปลายหลอดรูเล็กในแต่ละหยุด ทำให้โพลารแกรมที่ได้ไม่เกิดสภาพของฟันเลื่อย ดังรูปที่ 2.11



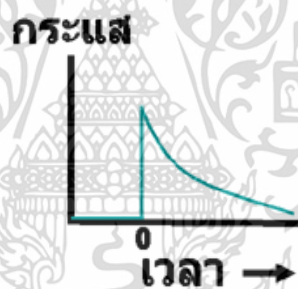
รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับศักย์ไฟฟ้า โดยการทำให้แทสต์โพลารกราฟี [30]  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แอมแปร์เมทรี เป็นเทคนิคการวิเคราะห์โดยให้ศักย์คงที่แก่ขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยค่าศักย์ที่ให้แก่วงจรนั้น ต้องมีค่าที่เพียงพอ ที่จะทำให้อาตรวอย่างสามารถเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้สำหรับค่าศักย์ที่ให้แก่วงจร แสดงได้ดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของเทคนิคแอมเพอโรเมทรี [30]

กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิคแอมแปร์เมทรี แสดงได้ดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี [30]

จากรูป จะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปกระแสจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลง หรืออาจไม่มีสารตั้งต้นเหลืออยู่เลยก็เป็นได้ความสัมพันธ์ของค่ากระแสที่ลดลงต่อเวลาที่เพิ่มขึ้นแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการ

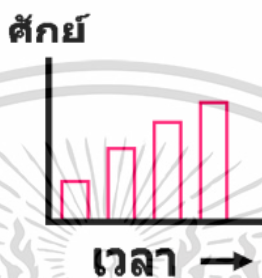
$$i(t) = kt^{-1/2}$$

โดยที่  $i$  คือ กระแส  
 $t$  คือ เวลา  
 $k$  คือ ค่าคงที่

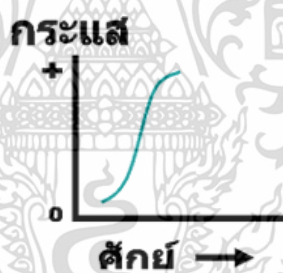
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. พัลส์โวลแทมเมทรี (Pulse Voltammetry)

- พัลส์ปกติ (normal pulse) เป็นการให้ศักย์กับวงจรไฟฟ้าในช่วงเวลาสั้น ๆ ต่อทุกหยดของปรอท โดยศักย์ที่ให้นี้มีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอกับเวลา สำหรับการวัดกระแสต้องวัดในช่วงเวลาที่หยดปรอทใกล้จะหยดออกจากปลายแก้ว ซึ่งรูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของพัลส์โวลแทมเมทรีแบบพัลส์ปกติ และรูปที่ 2.15 แสดงโวลแทมโมแกรมของ พัลส์โวลแทมเมทรีแบบพัลส์ปกติ



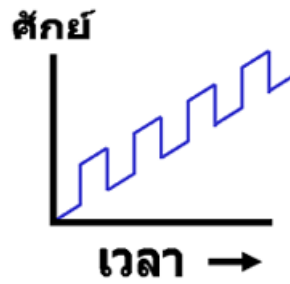
รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของพัลส์โวลแทมเมทรีแบบพัลส์ปกติ [30]



รูปที่ 2.15 กราฟแสดงโวลแทมโมแกรมของพัลส์โวลแทมเมทรีแบบพัลส์ปกติ [30]

- ดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ (Differential-pulse Voltammetry) เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมทรีเป็นเทคนิคที่มีประโยชน์อย่างมากในการตรวจวัดสารอินทรีย์ และ สารอนินทรีย์ที่มีปริมาณน้อยๆ สำหรับสัญญาณกระตุ้นในลักษณะของดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์เป็นการเพิ่มศักย์ที่คงที่ในลักษณะของพัลส์ให้กับขั้วไฟฟ้าที่รับศักย์ปกติ ในรูปลิเนียร์สแกนอยู่แล้ว รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของพัลส์โวลแทมเมทรีแบบดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ และ รูปที่ 2.17 แสดงโวลแทมโมแกรมของพัลส์โวลแทมเมทรีแบบดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

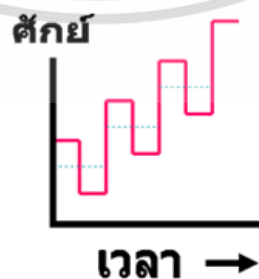


รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของพัลส์โวลแทจเมทรีแบบดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ [30]



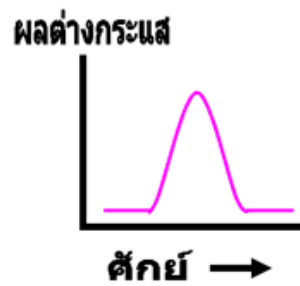
รูปที่ 2.17 กราฟแสดงโวลแทจโมแกรมของพัลส์โวลแทจเมทรีแบบพัลส์ดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ [30]

- สแควร์เวฟ (Square-wave) สแควร์เวฟโวลแทจเมทรี จะให้สัญญาณกระตุ้น (ศักย์ที่ต่างจากพัลส์ทั้งสองแบบที่กล่าวมาคือ ให้สัญญาณกระตุ้นกับวงจรไฟฟ้าเป็นช่วงๆ) สำหรับวิธีนี้จะให้หยุดปรอทแค่หนึ่งหยุดเป็นชั่วโมงทำงานและเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นช่วงเวลาสั้นๆ รูปแบบสัญญาณกระตุ้น แบบพัลส์สแควร์เวฟแสดงดังรูปที่ 2.18 และรูปที่ 2.19 แสดงโวลแทจโมแกรมของพัลส์โวลแทจเมทรีสแควร์เวฟ



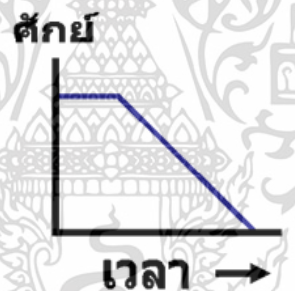
รูปที่ 2.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของพัลส์โวลแทจเมทรีแบบสแควร์เวฟ [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

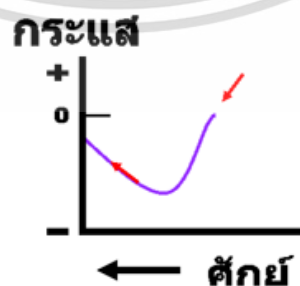


รูปที่ 2.19 กราฟแสดงโวลแทมโมแกรมของพัลส์โวลแทมเมทรีสแควร์เวฟ [30]

- สทริปปิงโวลแทมเมตรี (stripping voltammetry) เป็นเทคนิคที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าสูงมาก นั่นคือสามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างโลหะปริมาณน้อย ๆ ได้โดยเทคนิคนี้จะเพิ่มขึ้นตอนที่ทำให้สารตัวอย่างมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์โดยวิธีโวลแทมเมตรีต่อไป รูปแบบสัญญาณกระตุ้นแบบสทริปปิง แสดงได้ดังรูป 2.20 และโวลแทมโมแกรมที่ได้ของเทคนิคสทริปปิงโวลแทมเมตรีแสดงดังรูปที่ 2.21



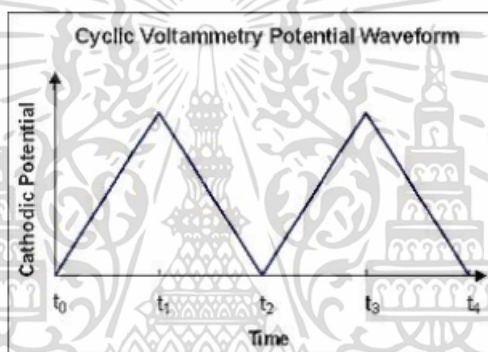
รูปที่ 2.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของเทคนิคสทริปปิงโวลแทมเมตรี [30]



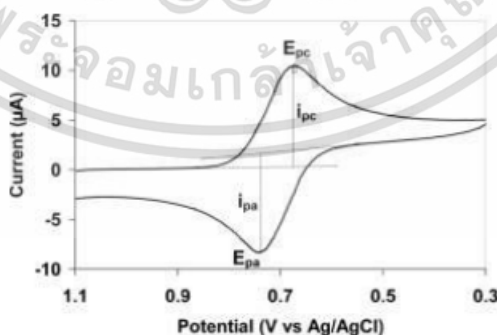
รูปที่ 2.21 โวลแทมโมแกรมที่ได้ของเทคนิคสทริปปิงโวลแทมเมตรี [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไชคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic Voltammetry) เป็นเทคนิคที่ให้ศักย์ไฟฟ้าในลักษณะสามเหลี่ยมหน้าจั่วแก่ขั้วไฟฟ้าทำงาน เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างมากเพื่อใช้ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าของสารบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำงาน ตลอดจนใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของ การวิเคราะห์โดยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าอื่นๆต่อไป การบันทึกกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการให้ศักย์ไฟฟ้า แก่ขั้วทำงานโดยจะทำการพลอตค่ากระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่าไชคลิกโวลแทมโมแกรม (Cyclic voltammogram) การให้ศักย์ไฟฟ้าในไชคลิกโวลแทมเมทรีจะเป็นการให้ศักย์ไฟฟ้าตามค่า Scan rate เมื่อเทียบกับเวลาจนถึงจุดสูงสุดและลดศักย์ไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามด้วย Scan rate เดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.22 และไชคลิกโวลแทมโมแกรมของเทคนิคไชคลิกโวลแทมเมทรีแสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของเทคนิคไชคลิกโวลแทมเมทรี [30]



รูปที่ 2.23 แสดงไชคลิกโวลแทมโมแกรมของเทคนิคไชคลิกโวลแทมเมทรี [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ไฮโดรเจล (Hydrogel)

ไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ชนิดไฮโดรฟิลิกที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ โครงสร้างของไฮโดรเจลประกอบด้วย 2 ส่วนหลักได้แก่ส่วนที่สามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับโมเลกุลของน้ำหรือเรียกว่าส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic group) ระหว่างสายโซ่มีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ โคเวเลนต์พันธะไฮโดรเจน หรืออันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่างๆในสายโซ่ ประกอบกันเป็นสายโซ่ยาวจำนวนมากมาย และโมเลกุลมีการพันตัวกันหรือขดตัวกันอยู่ ทำให้ภายในโครงสร้างโดยรวม เกิดรูพรุนขนาดเล็กๆ มากมาย สมบัติเด่นของไฮโดรเจลคือสามารถดูดซับน้ำไว้ภายในโครงสร้าง ที่มีลักษณะเป็นร่างตาข่าย (Crosslinked network structure) (ได้มากกว่า 20%) พร้อมกับสามารถ พองตัวหรือขยายตัวออกได้ และยังสามารถหดตัวได้เมื่อมีการสูญเสียโมเลกุลของน้ำออกไป นอกจากนี้ยังไม่สามารถละลายในตัวทำละลายทุกชนิด การจำแนกประเภทของไฮโดรเจลสามารถแบ่งได้ 4 ประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะของการสังเคราะห์ และการประยุกต์ใช้ ที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

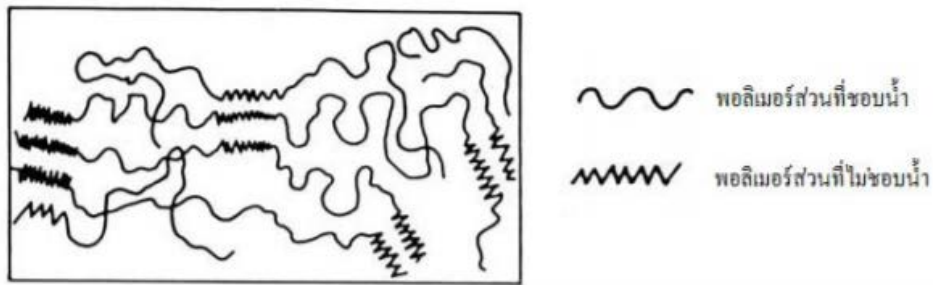
1. ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม (Cast Film) ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์มมักนำไปเพื่อเคลือบพื้นผิวของวัสดุต่างๆ ไฮโดรเจลชนิดนี้มีโครงสร้างภายในที่ประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะช่วยป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายต่างๆได้ โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูป 2.24 (ก)

2. ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked Network) ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่ายเตรียมจากการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerisation) ระหว่างสารละลายผสมของโมโนเมอร์ (Monomer) ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) และตัวเชื่อมตอสายโซ่ (Crosslinking agent) หรือในบางกรณีอาจเติมตัวทำละลายลงไปด้วย จากนั้นเทลงในแม่พิมพ์ โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูป 2.24 (ข)

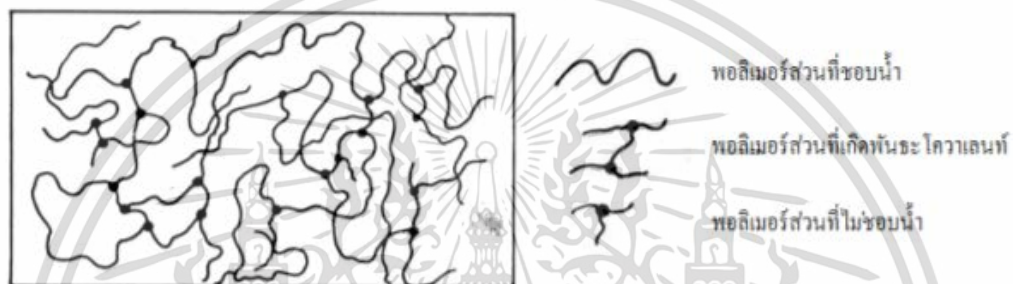
3. ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว (Surface Grafted Polymer) ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิวทำได้โดยการให้ไฮโดรเจลเกิดพันธะบนพอลิเมอร์อื่นที่ไม่สามารถละลายน้ำ เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลให้ตรงกับความต้องการเพื่อเหมาะกับการประยุกต์ใช้งานได้ เช่น ปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น โดยทำให้เกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า หรือการทำให้ไฮโดรเจลที่ละลายน้ำได้กลายเป็นไฮโดรเจลที่ไม่ละลายน้ำ โดยเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถละลายในน้ำ เป็นต้น โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูป 2.24 (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม (Cast Film)



ข. ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked Network)



ค. ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว (Surface Grafted Polymer)



ง. ไฮโดรเจลโครงร่างตาข่ายพอลิเมอร์ชนิดแทรกสอด (IPN)



รูปที่ 2.24 โครงสร้างของไฮโดรเจลประเภทต่างๆ แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ไฮโดรเจลโครงร่างตาข่ายพอลิเมอร์ชนิดแทรกสอด (Interpenetrating Polymer Network, IPN) ไฮโดรเจลแบบ IPN เป็นไฮโดรเจลที่มีโครงร่างตาข่าย 2 ชนิดแทรกกันอยู่ไม่สามารถแยก ออกจากกันได้ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีความแข็งแรงมากขึ้น หรือมีสมบัติอื่นที่ตรงกับความต้องการในการประยุกต์ใช้งานได้ดีขึ้น โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูป 2.24 (ง) นอกจากนี้ยังมีไฮโดรเจลชนิดที่เป็นแบบกึ่งอินเทอร์เพเนตรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (semilPN) คือไฮโดรเจลที่มีพอลิเมอร์โครงร่างตาข่ายกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีโครงร่างตาข่ายสอดแทรกกันอยู่ ซึ่งทั้งสองเทคนิคเป็นการปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลอีกทางหนึ่งเพื่อให้ตรงต่อการประยุกต์ใช้ งานในแต่ละแบบ

#### 2.4.1 คุณสมบัติของไฮโดรเจล

1. การดูดน้ำหรือการบวมตัวของไฮโดรเจล ไฮโดรเจลสามารถดูดซึมน้ำได้โดยการเกิดปฏิกิริยาหรืออันตรกิริยาทางเคมีระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำกับโมเลกุลของน้ำ และในระหว่างการบวมตัว ไฮโดรเจลสามารถคงรูปร่างอยู่ได้โดยไม่ละลายในน้ำ เนื่องจากมีโครงสร้างทางเคมีเป็นโครงร่างตาข่าย

2. การดูดซึมโลหะหนัก (Heavy metal adsorption) ไฮโดรเจลสังเคราะห์เป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับใช้กำจัดหรือแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมก่อนทิ้งลงสู่แม่น้ำ โดยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะหนักกับวัสดุพอลิเมอร์และการแลกเปลี่ยนไอออน การเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนโลหะหนักกับพอลิเมอร์เรียกว่าโพลีคีเลตโทเจน โดยไอออนโลหะหนักจะคีเลตกับอะตอมที่ให้อิเล็กตรอนของพอลิเมอร์เช่น ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ออกซิเจน และฟอสฟอรัสโดยสร้างพันธะโคออดิเนตโคเวเลนต์ ซึ่งพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ส่วนมากจะมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล เอมีด เอมีน และแอมโมเนียอยู่ในโครงสร้างด้วย ซึ่งสามารถจับหรือเกิดโพลีคีเลตโทเจนกับไอออนโลหะหนักได้ดี

#### 2.4.2 ประโยชน์จากไฮโดรเจล

จากการที่ไฮโดรเจลมีสมบัติเด่นในเรื่องของความสามารถในการดูดซึม และการยอมให้โมเลกุลต่างๆ เช่น น้ำ แก๊สออกซิเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โปรตีน ยา เป็นต้น สามารถแพร่ผ่านได้ จึงมีการนำไฮโดรเจลมาประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ ได้แก่ ด้านเกษตรกรรม ระบบขนส่งยา ระบบการนำส่งโปรตีน วัสดุตกแต่งบาดแผล เครื่องสำอาง วิศวกรรมเนื้อเยื่อ ชีวการแพทย์และใช้เป็นตัวดูดซึมในการดูดซึมโลหะหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ด้านสุขอนามัยและการแพทย์จะนำมาผลิตเป็นผ้าอ้อมสำเร็จรูปและผ้าอนามัย ด้วยสมบัติเด่นของไฮโดรเจลที่ช่วยดูดซึมของเหลวไว้ได้นานแต่ปล่อยน้ำออกได้ยากเช่น ปัสสาวะ จึงทำให้ไม่เกิดการเปียกชื้น ในด้านการแพทย์ไฮโดรเจลถูกนำมาประยุกต์ใช้หลากหลาย เนื่องจากมีความเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อหรือร่างกายมนุษย์ (Biocompatibility) เช่น การนำมาทำคอนแทคเลนส์ซึ่งจะช่วยเพิ่มความชุ่มชื้นและลดการระคายเคืองแก่ดวงตา หรือใช้เป็น วัสดุปิดแผล ช่วยดูดซึมของเหลวต่างๆที่ไหลออกมาจากบาดแผลและใช้ในการรักษาความชุ่มชื้นของบาดแผลให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมอีกทั้งในขณะเดียวกัน ออกซิเจนสามารถผ่านรูพรุนของไฮโดรเจล ทำให้ร่างกายสามารถสร้างเนื้อเยื่อได้ดีกว่าปกติและใช้เป็นสารในการนำส่งยา (Drug delivery)

2. ด้านการเกษตร จะนำมาประยุกต์เป็นวัสดุอุ้มน้ำเพื่อเพิ่มความชุ่มชื้นในดิน ทำให้พืชสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะที่ขาดแคลนน้ำ โดยไฮโดรเจลจะค่อยๆ ปล่อยน้ำที่ดูดซึมน้ำไว้ออกมา นอกจากนี้ไฮโดรเจลยังช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำในดิน เนื่องจากสามารถดูดซึมน้ำและธาตุต่างๆได้ แต่โดยส่วนใหญ่ไฮโดรเจลที่นำมาใช้ในด้านเกษตรนั้น เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์จากปิโตรเคมีซึ่งย่อยสลายได้ยาก

## 2.5 ทบทวนวรรณกรรม

ในประเทศไทยระเบิดส่วนใหญ่ที่ผลิตโดยผู้ก่อการร้ายประกอบด้วย TNT เป็นวัสดุหลักในการระเบิด ซึ่ง TNT มีความดันไอต่ำมาก จึงต้องใช้วิธีการตรวจจับไอที่มีความไวสูง กลุ่มงานวิจัยบางกลุ่มได้รายงานเทคนิคการตรวจจับ TNT เช่น แก๊สและสารละลายโครมาโตกราฟี [2], แมสสเปกโตรเมตรี [3], โมบิลิตี้สเปกโทรสโกปี [4], ฟลูออเรสเซนซ์ และการตรวจจับวัตถุระเบิดด้วยสี [5-8] และเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า [9-13] วิธีที่ไวที่สุดวิธีหนึ่งในการตรวจจับไอของ TNT โดยตรงคือเทคนิคเคมีไฟฟ้า วิธีนี้ขึ้นอยู่กับ การวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า อันเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่พื้นผิวอิเล็กโทรด เมื่อมีการตรวจจับวัตถุระเบิด อย่างไรก็ตามการตรวจจับไอจำเป็นต้องมีปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดขึ้นในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ วัสดุที่มีรูพรุนที่เป็นของแข็งจำนวนมากสามารถดูดซับไอของ TNT [14, 15] ได้ แต่ไม่เหมาะสำหรับการวัดทางเคมีไฟฟ้า ในทางกลับกันวิธีการทางเคมีไฟฟ้าหลายวิธีใช้ได้ดีสำหรับการตรวจจับ TNT ในสารละลายเท่านั้น นอกจากนี้ยังมีการนำเทคนิคการลอกแบบโมเลกุล (Molecular Imprinted Polymer: MIP) มาใช้เพื่อตรวจจับ TNT ซึ่งเทคนิคนี้สามารถสร้างบริเวณจับซับสเตรตและโมเลกุลแม่แบบในโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพในการจดจำโมเลกุลแม่แบบได้อย่างจำเพาะเจาะจง [16-17] ในการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับ TNT ที่ใช้เทคนิคการวัดด้วยเคมีไฟฟ้า ความดันไอของ TNT ต่ำมากจะต้องถูกดูดซับ และละลายบนพื้นผิวก่อนการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า วัสดุที่เหมาะสมในกรณีนี้คือเจลพอลิเมอร์ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีอิเล็กทรอนิกส์ โพลีอะคริลาไมด์เจลทำหน้าที่ดูดซับก๊าซเนื่องจากมีโครงสร้างพรุน [18, 19] ไฮโดรเจลของวัสดุนี้ถูกนำไปใช้ในการตรวจจับวัสดุที่ระเบิดได้ในสารละลายเป็นชั้นเซ็นเซอร์ไฟฟ้าเคมี [20] อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่มีรายงานเกี่ยวกับการใช้โพลีอะคริลาไมด์ไฮโดรเจล สำหรับการตรวจจับแก๊ส TNT เนื่องจากเจลโพลีเมอร์เป็นวัสดุดูดซับก๊าซที่ไม่เฉพาะเจาะจง ยิ่งไปกว่านั้นหากไม่มีฟังก์ชันพิเศษใด ๆ ของวัสดุจะได้รับการดูดซับต่ำและการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเล็กน้อย ในกรณีนี้มีหลักฐานว่าอาจใช้เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณแทนการปรับเปลี่ยนวัสดุตรวจจับเพื่อปรับปรุงทั้งการคัดเลือกและความไว ตัวอย่างเช่นการวิเคราะห์พื้นที่ใต้กราฟของพีคสูงสุดถูกนำไปใช้เพื่อแยกแยะสัญญาณ TNT ขนาดเล็กในการตรวจจับการติดตาม TNT [21] หรือใช้การประมวลผลสัญญาณเพื่อจัดการข้อมูลการทดลองในจุ่มอิเล็กโทรนิคส์ที่ใช้ตัวนำไฟฟ้าและก๊าซเซ็นเซอร์ทินออกไซด์ชนิดฟิล์มหนา [22, 23] และการประยุกต์ใช้การสร้างแบบจำลองทางสถิติของสัญญาณเพื่อลดเวลาตอบสนองของเซ็นเซอร์ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ [24, 25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การตรวจจับไอของ TNT

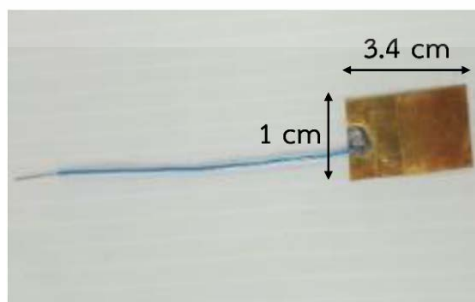
ในบทนี้จะกล่าวถึงการตรวจจับ TNT โดยอธิบายถึงขั้นตอนวิธีการออกแบบและสร้าง เซนเซอร์ การวัด และการออกแบบการทดลองการตรวจจับ TNT ซึ่งการออกแบบวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1. สร้างเซนเซอร์ด้วยเทคนิคพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล โดยใช้ TNT เป็นโมเลกุลแม่แบบ เพื่อทดสอบการตรวจจับสารละลาย TNT โดยใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า 2. สร้างระบบตรวจจับไอของ TNT และสร้างเซนเซอร์ด้วยเทคนิคพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับไวรัสเดงกีซีโรไทป์ 2 (Dengue virus serotype 2 : DENV-2) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการตรวจจับไอของ TNT และ 3. ศึกษาวัสดุที่มีความเป็นรูพรุนเพื่อใช้ในการดูดซับไอของสารประกอบวัตถุระเบิด และนำสัญญาณเคมีไฟฟ้าที่วัดได้มาวิเคราะห์เพื่อสามารถตรวจจับไอของ TNT ได้อย่างจำเพาะเจาะจง

#### 3.1 การใช้เทคนิคพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลสร้างเซนเซอร์ทางเคมีไฟฟ้าเพื่อตรวจจับ TNT

##### 3.1.1 การเตรียมการลอกแบบโมเลกุลบนอิเล็กโทรด

##### 3.1.1.1 การเตรียมอิเล็กโทรดทอง (Gold electrode preparation)

การลอกแบบโมเลกุลจะกระทำบนอิเล็กโทรดทอง (AuE) ขนาดกว้าง 1.0 เซนติเมตร และความยาว 3.4 เซนติเมตร ดังแสดงรูปที่ 3.1 ซึ่งจะถูกใช้เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) ขั้นตอนแรกนำ AuE ทำความสะอาดโดยการขัดด้วยผงอลูมิเนียมออกไซด์ (ขนาดเกรน 0.3  $\mu\text{m}$ ) จากนั้นนำไปผ่านการโซนิเคชัน (Sonication) ด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water: DI) เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำ AuE แช่ในสารละลายผสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) และน้ำ DI (1: 2) เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งก่อนเริ่มกระบวนการลอกแบบโมเลกุลด้วยพอลิเมอร์



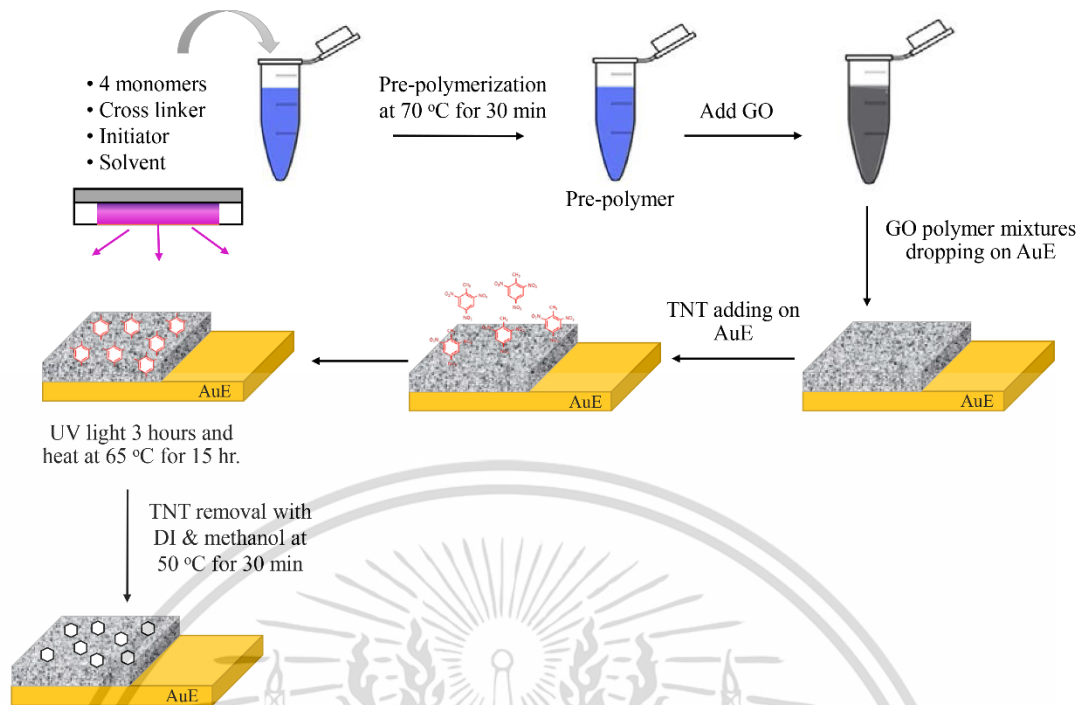
รูปที่ 3.1 อิเล็กโทรดทอง (AuE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1.2 กระบวนการพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล (Molecular imprinted polymer : MIP)

การลอกแบบโมเลกุล TNT ด้วยพอลิเมอร์ เริ่มจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยใช้โมโนเมอร์ 4 ชนิดคือ อะคริลาไมด์ (Acrylamide : AAM), เมทาคริลิกแอซิด (Methacrylic acid : MAA), ไวนิลไพโรลิโดน (N-Vinylpyrrolidone : NVP) และเมทิลเมทาคริเลต (Methylmethacrylate : MMA) นอกจากนี้ยังมีการเติม N, N- (1,2- Dihydroxyethylene) bisacrylamide (DHEBA) และ Azobisisobutyronitrile (AIBN) ซึ่งเป็นตัวเชื่อมโยงสายโซ่พอลิเมอร์ (Cross-linkers) และตัวเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ตามลำดับ จากนั้นส่วนประกอบทั้งหมดจะถูกละลายในไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (dimethyl sulfoxide : DMSO) ปริมาตร 300  $\mu\text{L}$  ส่วนผสมทั้งหมดจะถูกละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันก่อนนำไปพอลิเมอร์ไรเซชันในน้ำที่อุณหภูมิ 70  $^{\circ}\text{C}$  จนกระทั่งได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นของเจลมีความหนืดตามต้องการ เรียกว่า พรีพอลิเมอร์ (Pre-polymer) ซึ่งเวลาประมาณ 60-90 นาที จากนั้นนำพรีพอลิเมอร์ผสมกับกราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide : GO) ความเข้มข้น 0.15  $\text{mg/mL}$  ในอัตราส่วน 2 : 3 เรียกสารผสมนี้ว่า วัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต นำวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตปริมาตร 10  $\mu\text{L}$  หยดบน AuE ให้มีพื้นที่ 1x1 ตารางเซนติเมตร ทิ้งไว้ให้แห้งพอหมาดแล้วหยดสารละลาย TNT ความเข้มข้น 1 ppm ตามลงไป จากนั้นปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันจะเกิดภายใต้ นำไปฉายแสง UV เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และอบที่อุณหภูมิ 65  $^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันจะเกิดขึ้นสมบูรณ์ในขั้นตอนนี้ จากนั้นจึงล้างโมเลกุล TNT ออกจากพอลิเมอร์ด้วยสารละลายผสมของน้ำ DI และ Methanol ในอัตราส่วน 2 : 1 เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 50  $^{\circ}\text{C}$  ได้เป็นวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล TNT (MIP-TNT) ขั้นตอนการลอกแบบโมเลกุลแสดงดังรูปที่ 3.2

สำหรับการเตรียมอิเล็กโทรดที่ไม่มีการลอกแบบโมเลกุล (Non-Molecular imprinted polymer : NIP) เพื่อใช้เป็นอิเล็กโทรดควบคุม ทำได้โดยใช้กระบวนการเดียวกันกับการสร้าง MIP-TNT แต่ไม่มีการเติมโมเลกุล TNT ในขั้นตอนการลอกแบบ



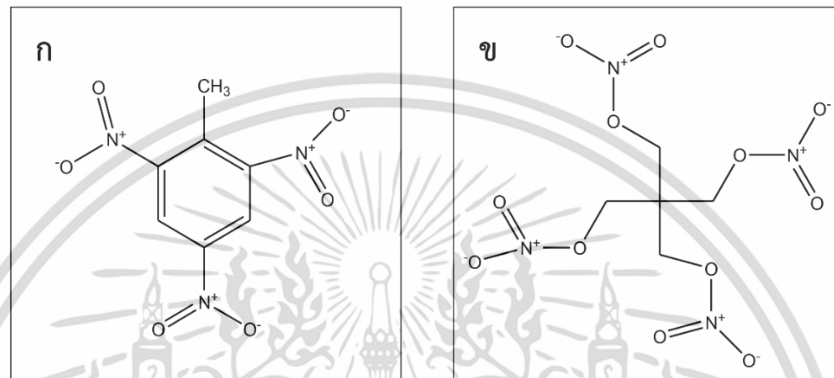
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการลอกแบบโมเลกุลด้วยพอลิเมอร์

### 3.1.2 การวัดทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Electrochemical measurement by cyclic voltammetry technique)

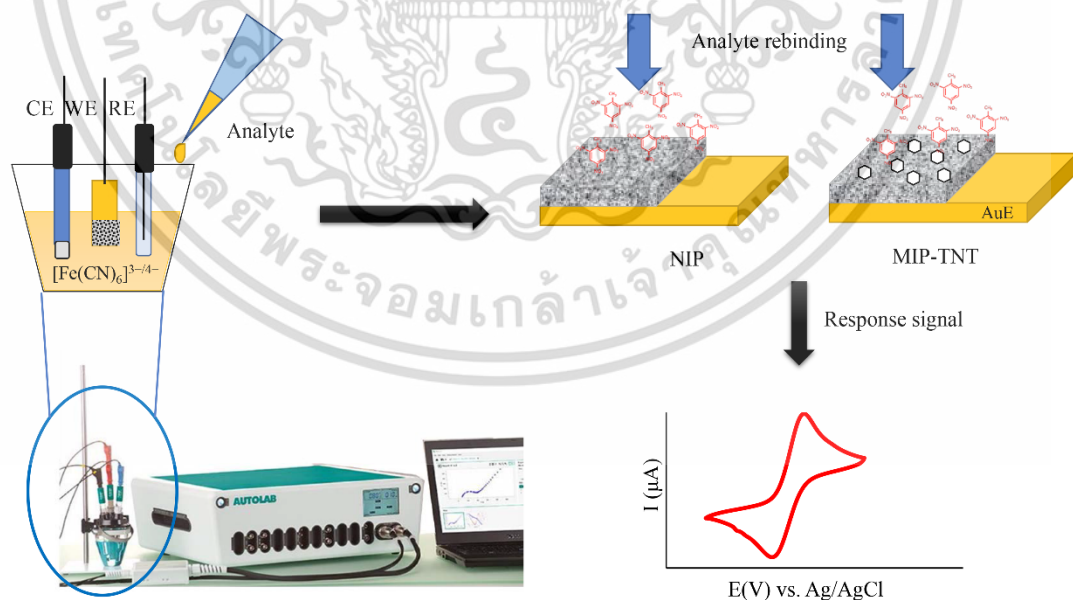
การตรวจจับ TNT ด้วยวิธีนี้วิเคราะห์จากคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้า (การถ่ายโอนอิเล็กตรอน) ของสารรีดอกซ์ แอคทีฟ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าบนพื้นผิวของเซ็นเซอร์เนื่องจากการเกาะของ TNT การวัดทางเคมีไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ทั้งหมดใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Autolab PGSTAT302N, Metrohm Siam, Thailand) โดยใช้ซอฟต์แวร์ Nova 1.11 ตัวอย่างสารละลาย TNT ที่ใช้ในการทดลองนี้ ทำโดยการละลายสาร TNT ในสารละลายรีดอกซ์ แอคทีฟ ซึ่งคือสารผสมระหว่างโพแทสเซียมเฟอร์โรไซยาไนด์ (5 mM  $K_4Fe(CN)_6$ ) และโพแทสเซียมเฟอร์ริไซยาไนด์ (5 mM  $K_3Fe(CN)_6$ ) ในอัตราส่วน 1 : 1 ในสารละลายฟอสเฟต บัฟเฟอร์ ซาลิน (Phosphate buffered saline, PBS) ความเข้มข้น 10 mM ที่ pH 7.40 การวัดด้วยเทคนิค CV ใช้ระบบสามอิเล็กโทรดประกอบด้วยซิลเวอร์ ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode : RE) แผ่นแพลททินัม (Platinum sheet) เป็นขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode : CE) และ AuE เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode : WE) อัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s และสแกนศักย์ไฟฟ้าจาก -0.3 V ถึง 0.6 V โดยทำการวัดและเก็บสัญญาณค่ากระแสไฟฟ้าของสารละลายตัวอย่าง TNT บนเซนเซอร์ MIP-TNT และ NIP สัญญาณไฟฟ้านำมาวิเคราะห์ได้มาจากค่ากระแสไฟฟ้าของสารรีดอกซ์ แอคทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหลังจากเติม TNT ลงไปในระบบ และใช้ Pentaerythritol tetranitrate (PETN) ซึ่งเป็นสารประกอบวัตถุระเบิดหมู่ไนโตรเช่นเดียวกับ TNT แต่มีโครงสร้างต่างกัน ดังรูปที่ 3.3 เป็นตัวควบคุมเชิงลบ (Negative control) ในการทดลองทำโดยการหยดสารละลาย TNT หรือ PETN ปริมาตร 10  $\mu\text{L}$  ลงในสารละลายรีดอกซ์ แอคทีฟ ปริมาตร 20 mL ให้มีความเข้มข้นสุดท้ายเป็น 0, 0.001, 0.01, 0.1 และ 1 ppt ทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง วิธีการตรวจจับ TNT ด้วยเทคนิค CV แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของ TNT (ก) และ PETN (ข)



รูปที่ 3.4 การตรวจจับสารละลาย TNT ด้วยเทคนิคการวัดทางเคมีไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

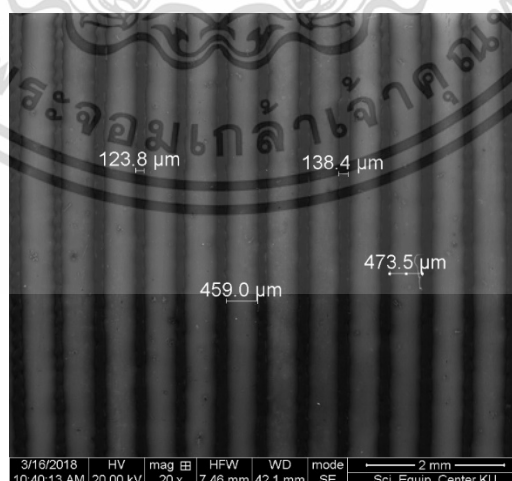
## 3.2 การตรวจจับไอของ TNT ด้วยเทคนิคพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับ DENV-2 โดยใช้อิเล็กโทรดแบบซี่หวี

### 3.2.1 การเตรียมการลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับไวรัส DENV-2 บนอิเล็กโทรดแบบซี่หวี

การตรวจจับไอของ TNT ด้วยวิธีนี้ทำโดยการใช้อิเล็กโทรดแบบซี่หวี (Interdigitated electrode : IDE) ซึ่งสร้างขึ้นด้วยกระบวนการพิมพ์สกรีนแบบอิเล็กโทรดซี่หวีจำนวน 18 คู่ ด้วยทองคำบนแผ่นกระจกขนาด  $15 \times 12 \text{ mm}^2$  จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แก๊สเซ็นเซอร์ IDE ที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงในรูปที่ 3.5 และระยะระหว่างซี่หวีของ IDE จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) แสดงดังรูปที่ 3.6 แสดง



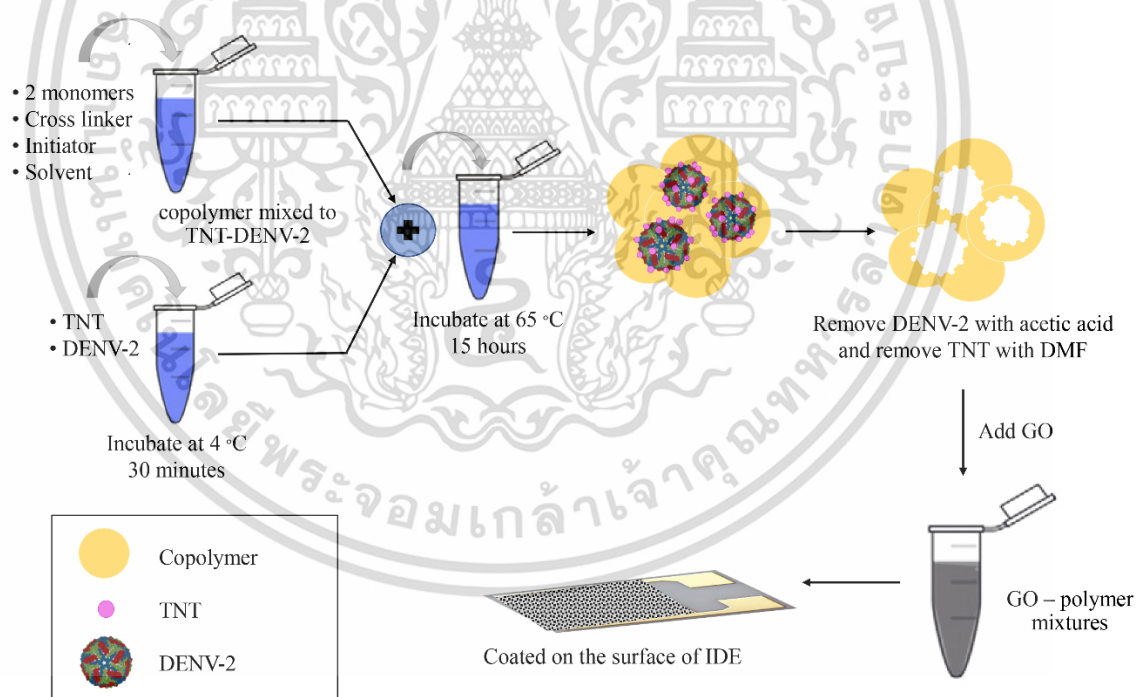
รูปที่ 3.5 IDE ที่สร้างจากการพิมพ์สกรีนด้วยทองคำบนแผ่นกระจก



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ IDE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับ DENV-2 เริ่มจากการนำ TNT ผสมกับ DENV-2 ในอัตราส่วน 2 : 1 และบ่มที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อใช้เป็นโมเลกุลแม่แบบ จากนั้นเตรียมโคพอลิเมอร์โดยจะใช้โมโนเมอร์ 2 ชนิดคือ สไตรีน (Styrene) และเมทาคริลิกแอซิด (Methacrylic acid : MAA) จากนั้นเติม N, N- (1,2-Dihydroxyethylene) bisacrylamide (DHEBA) และ Azobisisobutyronitrile (AIBN) เป็นตัวเชื่อมโยงสายโซ่พอลิเมอร์ และตัวเริ่มปฏิกิริยาตามลำดับ ซึ่งส่วนผสมทั้งหมดถูกละลายให้เข้ากันด้วยไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide : DMSO) ต่อจากนั้นจึงผสมโมเลกุลแม่แบบกับโคพอลิเมอร์ และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง เมื่อปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นสมบูรณ์ จะเกิดเป็นก้อนพอลิเมอร์สีขาวขุ่น นำไปบดให้เป็นผงละเอียด และนำไปแช่ในสารละลาย 10% อะซิติกแอซิด (Acetic acid) เพื่อกำจัด DENV-2 ตามด้วยการแช่ในไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (Dimethylformamide : DMF) เพื่อกำจัด TNT ออกจากโครงสร้างของพอลิเมอร์ จากนั้นนำพอลิเมอร์ที่นำโมเลกุลแม่แบบออกแล้วผสมกับ GO (2 mg/mL) ในอัตราส่วน 25 : 2 และนำไปเคลือบบนพื้นผิวของ IDE ให้ทั่ว ทั้งไว้ให้แห้งก่อนการใช้งาน วิธีการลอกแบบโมเลกุลด้วยพอลิเมอร์บนอิเล็กโทรด IDE แสดงในรูปที่ 3.7

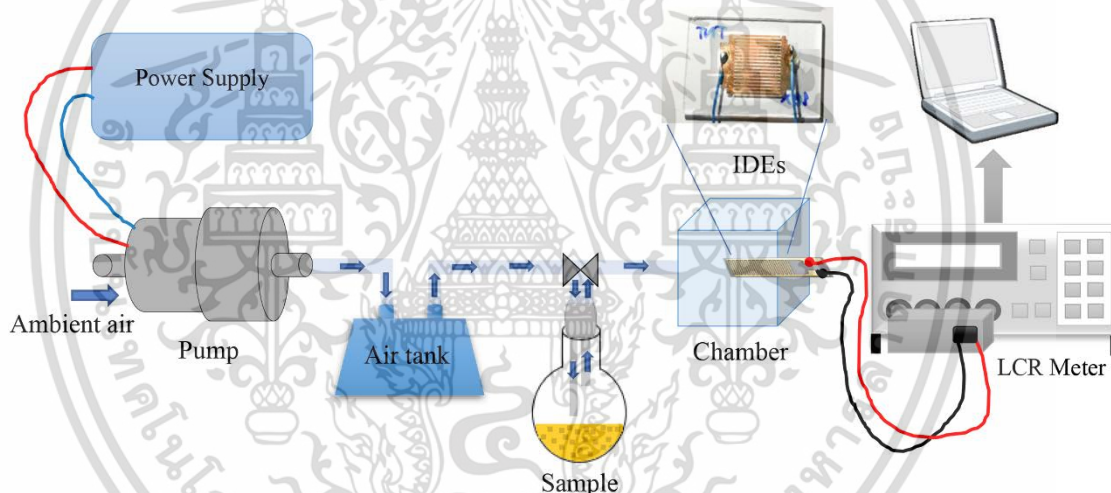


รูปที่ 3.7 การเตรียมการลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับไวรัส DENV-2 บน IDE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 ระบบตรวจจับไอของ TNT ด้วยแก๊สเซ็นเซอร์ IDE

ระบบตรวจจับไอของ TNT ทำขึ้นโดยใช้ IDE ซึ่งถูกเคลือบด้วยวัสดุคอมโพลีเมอร์ลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับ DENV-2 วัตถุประสงค์ของการเปลี่ยนแปลงด้วยเครื่องวัด LCR ระบบตรวจจับไอของ TNT นี้อาศัยอากาศแวดล้อมเป็นตัวกลางในการนำไอของ TNT เข้าสู่ระบบการตรวจจับ ซึ่งระบบการตรวจจับไอของ TNT ประกอบด้วยปั๊มดูดอากาศเพื่อนำอากาศโดยรอบเข้าสู่ระบบโดยมีอัตราการไหล 600 mL/min จากนั้นจึงส่งอากาศโดยรอบเข้าไปในถังพักอากาศเพื่อให้การไหลของอากาศที่ผ่านเข้าไปใน Chamber เป็นลักษณะ Laminar flow จากนั้นอากาศจึงผ่านสารตัวอย่าง TNT ปริมาณ 10 g เข้าสู่ภายใน Chamber ซึ่งมีแก๊สเซ็นเซอร์ IDE ต่ออยู่กับเครื่องวัด LCR (Agilent 4263b) สำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้าภายใต้ความถี่ 100 เฮิรตซ์ ด้วยโปรแกรม LabVIEW ระบบตรวจจับไอของ TNT แสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ระบบตรวจจับไอของ TNT ด้วยแก๊สเซ็นเซอร์ IDE

ในการตรวจจับไอของ TNT นั้น จะทำการดูดอากาศแวดล้อมเข้าไปใน Chamber เป็นเวลา 5 นาที เมื่ออากาศเต็มแล้วจึงเพิ่มสารตัวอย่าง TNT เข้าไปในระบบ และเปิดให้อากาศไหลผ่านอีก 5 นาที บันทึกค่าความจุไฟฟ้าตามเวลาจริงในขณะที่ไอของ TNT ถูกตรวจจับด้วยแก๊สเซ็นเซอร์ IDE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

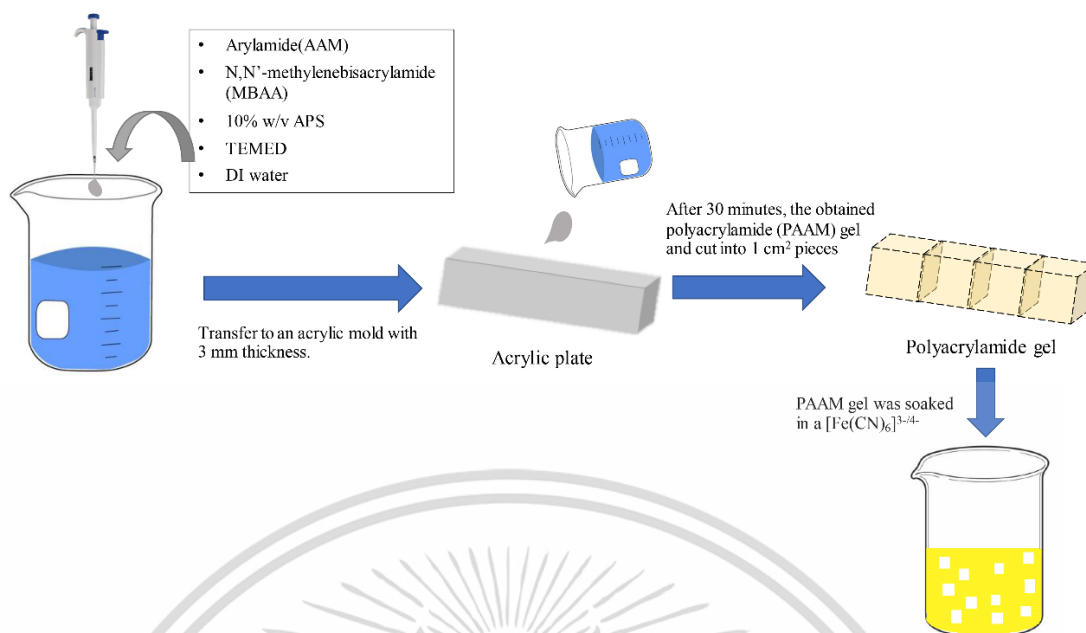
### 3.3 การตรวจจับสารประกอบวัตถุระเบิดด้วยไฮโดรเจล

#### 3.3.1 การเตรียมโพลีอะคริลาไมด์ไฮโดรเจล

พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือโพลีอะคริลาไมด์ Polyacrylamide (PAAM) สังเคราะห์จากโมโนเมอร์ Acrylamide (AAM) และใช้ตัวเชื่อมโยงสายโซ่พอลิเมอร์ N,N'-methylenebisacrylamide (MBAA) ผสมกันในอัตราส่วน 29 : 1 (30% Polyacrylamide gel) จากนั้นเติมแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium persulphate : APS) ความเข้มข้น 10% w/v และ N,N,N',N'-tetramethyl ethylene diamine (TEMED) ซึ่งใช้เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) และตัวเร่งปฏิกิริยาตามลำดับ ส่วนผสมทั้งหมดจะถูกนำไปเทใส่แม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นที่มีขนาด  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  หนา 3 มิลลิเมตร จากนั้นนำแผ่นเจลที่ได้แช่ใน สารละลายผสมในอัตราส่วน 1:1 ของ โพแทสเซียมเฟอร์โรไซยาไนด์ (Potassium ferrocyanide :  $(\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6)$ ) และ โพแทสเซียมเฟอร์ริไซยาไนด์ (Potassium ferricyanide :  $(\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6)$ ) ความเข้มข้นอย่างละ 5 mM ซึ่งเตรียมใน ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาลิน (phosphate buffered saline : PBS) ความเข้มข้น 0.01 M สารละลายผสมนี้ใช้เป็น redox active ในระบบ แสดงดังรูปที่ 3.9

คุณสมบัติของโพลีอะคริลาไมด์ไฮโดรเจล (Polyacrylamide gel : PAAM hydrogel) ที่สำคัญคือสามารถกักเก็บน้ำไว้ได้ค่อนข้างนาน มีความเป็นรูพรุน มีหมู่ฟังก์ชันเอไมด์ (Amide) ซึ่งสามารถใช้ตรวจจับหมู่ไนโตร (Nitro) ในสารประกอบวัตถุระเบิดได้ การที่สารประกอบวัตถุระเบิดส่วนใหญ่ มีความดันไอต่ำมากๆ (ระดับ ppt หรือน้อยกว่า) การเลือกเทคนิคในการวัดร่วมกับตัวตรวจจับที่สร้างขึ้นจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ดังนั้นจึงเลือกใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าสำหรับแสดงค่าการตรวจจับสารที่มีปริมาณน้อย เนื่องจากเทคนิคนี้สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าได้ในระดับนาโนแอมป์ (nA) ได้ โดยที่ค่าความสามารถในการตรวจจับ (Limit of detection) ที่สามารถวัดได้ด้วยเทคนิคนี้อยู่ในระดับต่ำกว่า ppt อย่างไรก็ตามการตรวจจับสารประกอบวัตถุระเบิดในสถานะก๊าซด้วยเทคนิคนี้ ต้องทำในระบบกึ่งของเหลวทั้งหมด เพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวตรวจจับและอิเล็กโทรดได้ ดังนั้นการสร้างตัวตรวจจับให้มีประสิทธิภาพสูง โดยใช้พอลิเมอร์จึงต้องทำให้อยู่ในรูปแบบไฮโดรเจล ซึ่งอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ ด้วยคุณสมบัติของ PAAM hydrogel ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงสามารถใช้ตรวจจับไอของ TNT ในระดับ ppt ได้ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ปริมาณ PAAM hydrogel ที่ต่างกันดังนี้คือ 5%, 10%, 15%, 20% และ 25% เพื่อศึกษาผลของไฮโดรเจลต่อความไวในการตรวจจับไอของ TNT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

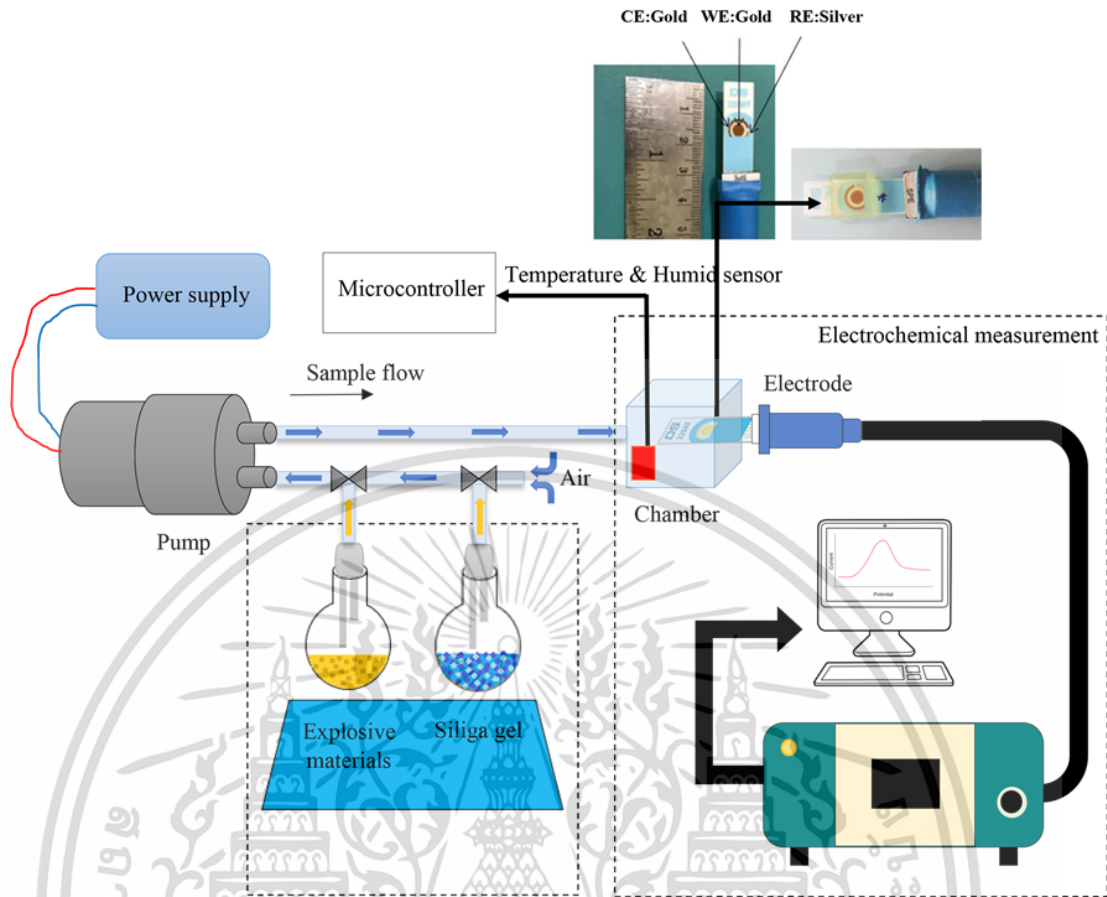


รูปที่ 3.9 การเตรียม PAAM hydrogel

### 3.3.2 การตรวจจับไอของสารประกอบวัตถุระเบิด

การตรวจจับไอของสารประกอบวัตถุระเบิดทำได้โดยใช้ระบบที่ออกแบบเพื่อผ่านไอของสารเข้าไปใน Chamber ซึ่งมีเซ็นเซอร์ต่อเข้ากับเครื่อง Potentiostat สำหรับตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีไฟฟ้าเมื่อมีการดูดซับของไอสารประกอบวัตถุระเบิดบนเซ็นเซอร์ ดังแสดงรูปที่ 3.10 ระบบตรวจจับไอของสารประกอบวัตถุระเบิดประกอบด้วยปั๊มไดอะแฟรมที่วางอยู่ด้านหน้าของ Chamber ทำหน้าที่นำอากาศแวดล้อมผ่านเข้าไปในระบบ โดยอากาศจะเริ่มผ่านซิลิกาเจลซึ่งทำหน้าที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 40-50% ที่อุณหภูมิ 30 °C ด้วยอัตราการไหล 1,000 mL/min จากนั้นจึงผ่านสารประกอบวัตถุระเบิดตัวอย่างก่อนเข้าสู่ปั๊มไดอะแฟรม อากาศแวดล้อมที่มีไอของสารประกอบวัตถุระเบิด หรือไม่มีไอของสารประกอบวัตถุระเบิดจะถูกส่งไปยัง Chamber ที่มีแก๊สเซ็นเซอร์ประกอบด้วย PAAM hydrogel วางอยู่บนอิเล็กโทรดทองแบบพิมพ์สกรีน (DRP-220BT, Metrohm Siam, Thailand) เชื่อมต่อกับเครื่องโพเทนชิโอสแตท (Autolab PGSTAT302N, Metrohm Siam, Thailand) ระบบตรวจจับไอของสารประกอบวัตถุระเบิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 3.11 สารประกอบวัตถุระเบิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 4 ชนิด ดังนี้ TNT, DNT, Urea, PETN และสารตัวอย่างควบคุมอีก 1 ชนิด โดยเลือกสารที่ระเหยได้ดีที่อุณหภูมิห้อง ได้แก่ เอทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ระบบการไหลของแก๊สสำหรับการตรวจจับวัตถุระเบิด



รูปที่ 3.11 ระบบตรวจจับไอของสารประกอบวัตถุระเบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การวัดทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคลิเนียร์สวีปโวลแทมเมตรี (Electrochemical measurement by linear sweep voltammetry technique)

การวัดทางเคมีไฟฟ้าดำเนินการโดยใช้เครื่อง potentiostat โดยเริ่มจากการนำ PAAM hydrogel แขนในสารละลายผสมของ  $(K_3Fe(CN)_6)$  และ  $(K_4Fe(CN)_6)$  ในอัตราส่วน 1 : 1 ปริมาตร 10 mL เพื่อใช้เป็นรีดอกซ์ แอคทีฟ จากนั้นนำ PAAM gel วางบนอิเล็กโทรดทองดังรูปที่ 3.12 อิเล็กโทรดทองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 3 ขั้วไฟฟ้า ดังนี้ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ทำจากทองคำ ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode) ทำจากเงิน การวัดสัญญาณทางเคมีไฟฟ้าใช้เทคนิค linear sweep voltammetry (LSV) กำหนดอัตราเร็วเท่ากับ 0.01 V/s วัดค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วง  $-0.2$  V ถึง 0.6 V ปฏิกริยาออกซิเดชันของ  $(K_3Fe(CN)_6)$  และ  $(K_4Fe(CN)_6)$  เกิดขึ้นในขณะการวัดในโหมด LSV โดยค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จะถูกเก็บเพื่อนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตรวจจับของเซ็นเซอร์ PAAM hydrogel ในการวัดแต่ละครั้งจะทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้น ( $I_0$ ) ของ PAAM hydrogel ก่อนดูดอากาศผ่านสารประกอบวอดูรเบ็ดเข้าในระบบ และหลังจากการดูดซับไอของสารตัวอย่างบน PAAM hydrogel ณ เวลาต่างๆ ( $I_x$ ) ค่ากระแสไฟฟ้างกล่าวจะถูกบันทึก ( $I_x$ ) ทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง นำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์และแสดงผล



รูปที่ 3.12 การวาง PAAM gel บนอิเล็กโทรด

ในการทดลองแต่ละครั้งเซ็นเซอร์จะสัมผัสกับไอสารตัวอย่าง หรืออากาศแวดล้อมเป็นเวลา 6 นาที อัตราเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงสัญญาณทางเคมีไฟฟ้าทุกๆ 2 นาที สามารถหาได้จากการประมาณอนุพันธ์ของสัญญาณฯ โดยใช้ความแตกต่างระหว่างสองค่าที่มีความต่อเนื่องกันจากการดูดซับไอของ PAAM hydrogel ณ เวลาต่างๆ ดังสมการที่ 3.2 ซึ่งเรากำหนด  $f(x)$  ในแต่ละจุดเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณกระแสไฟฟ้าหลังการดูดซับไอของสารตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นจากอากาศแวดล้อม ณ เวลาเริ่มต้น ดังสมการที่ 3.1 และ  $f(x)$  เป็นอนุพันธ์เฉลี่ยภายในช่วงเวลา 2 นาที ( $d$ ) ซึ่งคำนวณจากการลบกันของ  $f(x)$  ซึ่งเป็นสัญญาณนาฬิกาที่  $x$  และ  $f(x+d)$  เป็นสัญญาณนาฬิกาที่  $x+2$  จากนั้นหารด้วย  $d$  (2 min)

$$f(x) = I_{tx} - I_0 \quad (3.1)$$

$$f'(x) = \frac{f(x+d)-f(x)}{d} \quad (3.2)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลอง และผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลอง และผลการทดลองของงานวิจัย ซึ่งจะแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ

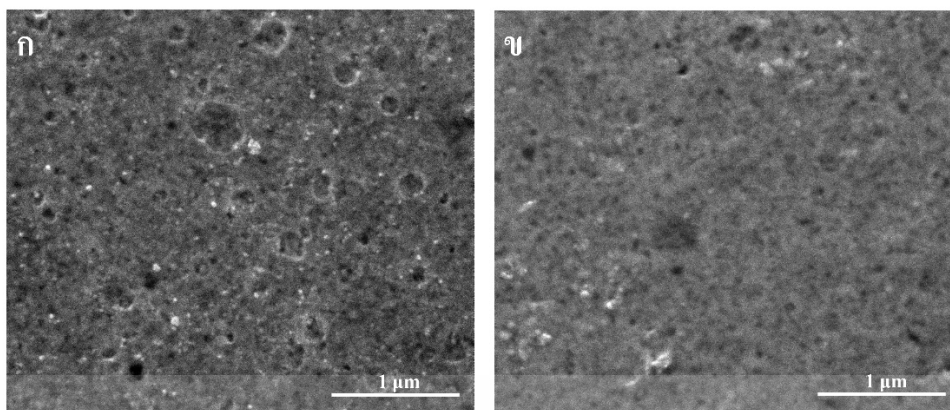
1. การทดลอง และผลการทดลองของการตรวจจับ TNT ด้วยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุลโดยใช้ เซ็นเซอร์ไฟฟ้าเคมี เพื่อทดสอบการตรวจจับสารละลาย TNT
2. การทดลอง และผลการทดลองของการตรวจจับไอของ TNT ด้วยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับ DENV-2 โดยใช้ อิเล็กโทรดแบบซีวี และ
3. การทดลอง และผลการทดลองของการตรวจจับสารประกอบวัตถุระเบิด ด้วยไฮโดรเจล

#### 4.1 ผลการตรวจจับ TNT ด้วยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุลโดยใช้เซ็นเซอร์เคมีไฟฟ้า

การตรวจจับ TNT ด้วยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุลโดยใช้ TNT เป็นแม่แบบ มีจุดประสงค์ เพื่อที่จะตรวจจับ TNT เนื่องจากเทคนิคการลอกแบบโมเลกุลจะสร้าง binding site ในโครงสร้างของ พอลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพในการจดจำโมเลกุลแม่แบบได้อย่างจำเพาะเจาะจง งานวิจัยนี้ได้ทำการลอกแบบโมเลกุลบนพื้นผิวของอิเล็กโทรดแผ่นทอง และวัดสัญญาณด้วยเทคนิค ทางเคมีไฟฟ้าในโหมดไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry, CV) ซึ่งเป็นการวัดค่ากระแสไฟฟ้า โดยได้ทำการทดลองตรวจจับสารละลาย TNT ที่ความเข้มข้น 0, 0.001, 0.01, 0.1 และ 1 ppt ด้วย อิเล็กโทรด 2 แบบ คือ NIP และ MIP-TNT

อย่างไรก็ตามก่อนที่จะทำการทดลองตรวจจับสารละลาย TNT ด้วยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุล นั้น ได้ทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยาของ NIP และ MIP-TNT โดยใช้ Quanta 450 SEM (FEI Company, USA) ที่ศักย์ไฟฟ้าเร่ง 10 kV แสดงดังภาพที่ 4.1 ซึ่งจากรูป 4.1(ก) แสดงรูป ถ่ายของ NIP และ 4.1(ข) แสดงรูปของ MIP-TNT จะเห็นว่าพื้นผิวมีลักษณะขรุขระ ไม่เรียบ และทั้ง NIP และ MIP-TNT ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

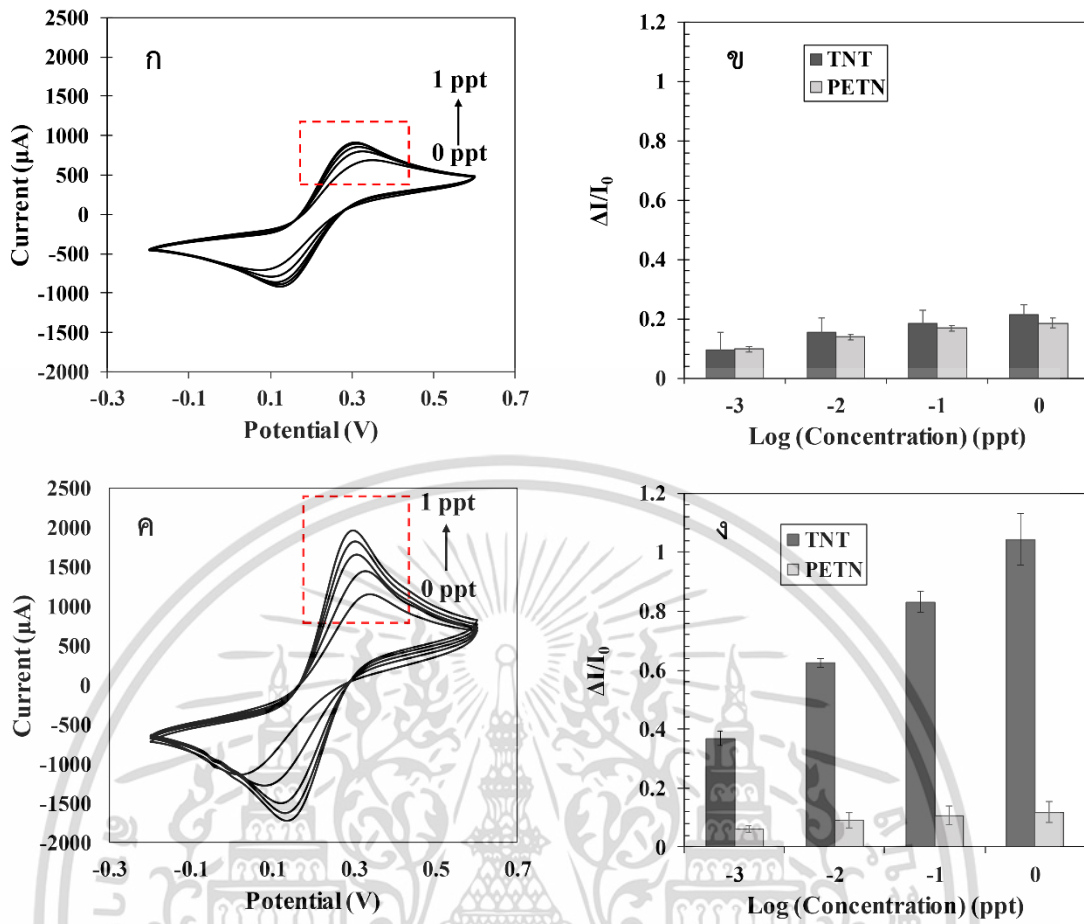


รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ NIP (ก) และ MIP-TNT (ข)

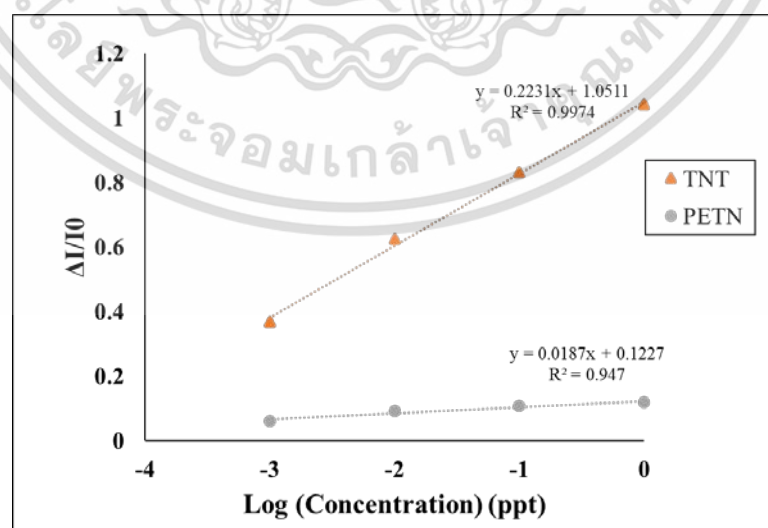
ในการทดลองจะใช้สารประกอบวัตถุระเบิด 2 ตัวคือ TNT และ PENT สำหรับ PETN จะเป็นสารประกอบไนโตรที่ไม่ใช่อะโรมาติกเป็นตัวควบคุมเชิงลบ (Negative control) ในงานวิจัยนี้จะหยดสารละลาย TNT หรือ PETN ในปริมาณ 10  $\mu\text{L}$  ที่ความเข้มข้นต่างๆไปยังอิเล็กโทรไลต์  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-/4-}$  ปริมาณ 20 mL ที่บรรจุอยู่ใน Chamber ความเข้มข้นสุดท้ายของการวิเคราะห์ใน Chamber คือ 0, 0.001, 0.01, 0.1 และ 1 ppt จากนั้นบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดออกซิเดชันสูงสุดของอิเล็กโทรไลต์รีดอกซ์ที่หลังจากเติม TNT หรือ PETN ที่ความเข้มข้นต่างๆ

เมื่อเพิ่มสารละลายตัวอย่างความเข้มข้นที่แตกต่างกันระหว่าง TNT ที่เป็นสารประกอบไนโตรอะโรมาติก และ PETN ที่เป็นสารประกอบไนโตรที่ไม่ใช่อะโรมาติก จากแผนภาพ CV กระแสออกซิเดชันสูงสุดของ MIP-TNT และ NIP จะถูกบันทึกที่ความเข้มข้นต่างๆของการวิเคราะห์ รูปที่ 4.2 (ก) และ 4.2 (ค) แสดงแผนภาพ CV ของ MIP-TNT และเซ็นเซอร์ NIP ซึ่งตอบสนองต่อความเข้มข้นที่ต่างกันของ TNT และ PETN สำหรับรูปที่ 4.2 (ข) และ 4.2 (ง) แสดงกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของเซ็นเซอร์ MIP-TNT และ NIP จากผลการทดลองที่ความเข้มข้นของ TNT และ PETN ที่เพิ่มขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของเซ็นเซอร์ NIP ไม่สามารถแสดงความแตกต่างของ TNT และ PETN ได้อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของ TNT สูงกว่า PETN โดยใช้เซ็นเซอร์ MIP-TNT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แผนภาพ CV ของ NIP (ก) และ MIP-TNT (ค) ที่ตอบสนองต่อความเข้มข้นที่แตกต่างกันของ TNT และค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของ NIP (ข) และ MIP-TNT (ง)



รูปที่ 4.3 ค่า  $R^2$  และ Slope ของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของ MIP-TNT  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่า LOD ที่ได้รับจากเซ็นเซอร์ MIP-TNT

MIP-TNT	R <sup>2</sup>	Slope	Average At Low Concentration	SD At Low Concentration	LOD (ppt)
TNT	0.9974	0.2231	0.3678	0.0266	0.4
PETN	0.947	0.0187	0.0614	0.0115	1.8

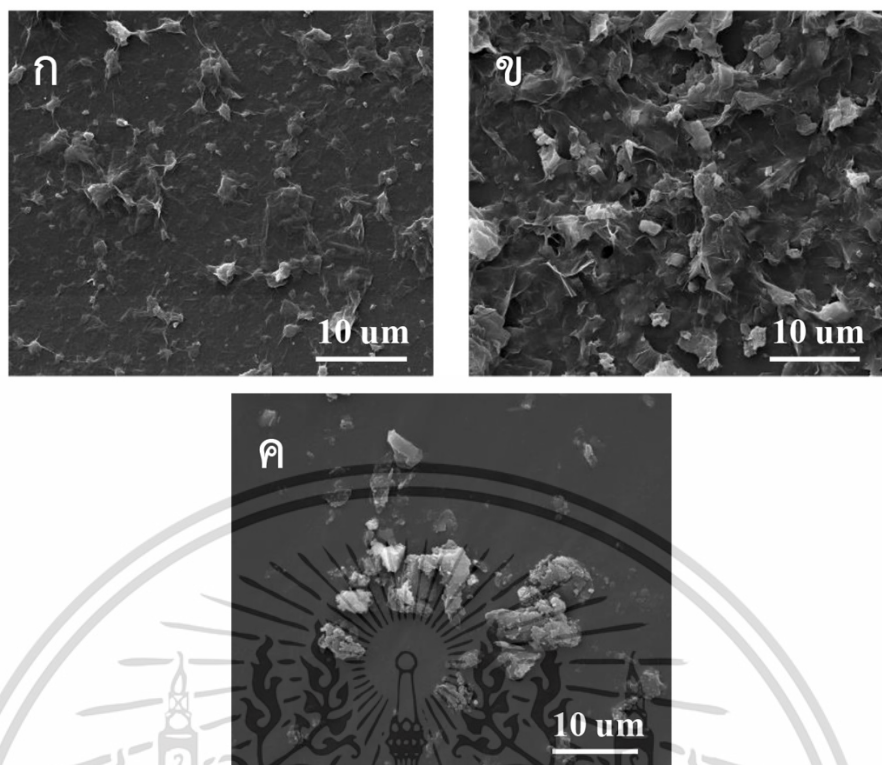
ขีดจำกัดของการตรวจจับ (LOD) ที่ได้รับจากเซ็นเซอร์ MIP-TNT ดังแสดงในสมการที่ 4.1 สำหรับ TNT มีค่า LOD = 0.4 ppt โดยมีช่วงความเชื่อมั่น 95% (n = 3) ที่ 3 log-scale linearity นั้น หมายความว่า การตรวจจับ TNT ด้วยเทคนิคการลอกแบบโมกุลสามารถตรวจจับ TNT ต่ำสุดได้ใน ปริมาณ 0.4 ppt

$$LOD = 3 \times \frac{SD \text{ of low concentration}}{\text{slope of calibration line}} \quad 4.1$$

#### 4.2 ผลการตรวจจับไอของ TNT ด้วยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับ DENV-2 โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์แบบซีทรี

การตรวจจับไอของ TNT ทำโดยการเคลือบพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับ DENV-2 บนพื้นผิวของ IDE แล้ววัดสัญญาณการเปลี่ยนแปลงด้วยเครื่อง LCR เมื่อไอของ TNT เข้าไปในระบบโดยใช้อากาศเป็นแก๊สพาหะ สัญญาณที่วัดได้เป็นการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าตามเวลาจริง งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับ DENV-2 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Quanta 450 FEI SEM ที่ศักย์ไฟฟ้าแรง 20 kV แสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งจากภาพที่ 4.4 (ก) แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของของกราฟีนออกไซด์(GO) ภาพที่ 4.4 (ข) แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ GO ที่ผสมกับโคพอลิเมอร์ และภาพที่ 4.4 (ค) แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของคอมโพสิต GO และโคพอลิเมอร์ที่ลอกแบบโมเลกุลด้วย TNT ร่วมกับ DENV-2 จากภาพจะสังเกตเห็นได้ว่าพื้นผิวของ GO จะมีพื้นผิวเรียบในขณะที่ GO ที่ผสมกับโคพอลิเมอร์มีพื้นผิวขรุขระ และพบว่าคอมโพสิต GO และโคพอลิเมอร์ที่ลอกแบบโมเลกุลด้วย TNT ร่วมกับ DENV-2 จะมีการรวมตัวกันบนพื้นผิวของพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

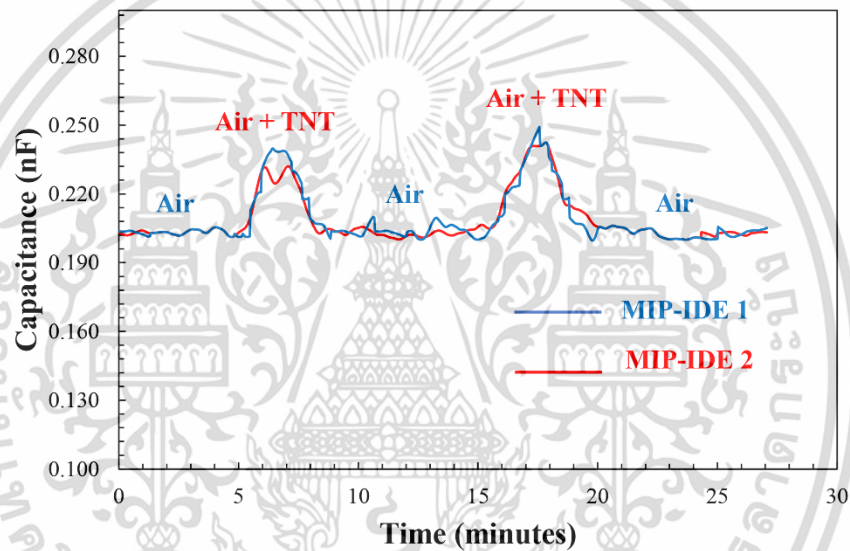


รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ ของกราฟีนออกไซด์ (ก) กราฟีนออกไซด์ผสมโพลีเมอร์ (ข) และคอมโพสิต GO และโพลีเมอร์ที่ลอกแบบโมเลกุลด้วย TNT ร่วมกับ DENV-2 (ง)

ระบบการตรวจจับไอของ TNT นั้น จะมีป้อนที่ดูดอากาศแวดล้อมเข้าสู่ระบบ จากนั้นอากาศจะผ่านสารตัวอย่าง TNT 10 g แล้วเข้าสู่ภายใน Chamber ซึ่งภายใน Chamber จะมีแก๊สเซ็นเซอร์ IDE สำหรับการวัดค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งเซ็นเซอร์จะเชื่อมต่ออยู่กับเครื่องวัด LCR (Agilent 4263b) ซึ่งควบคุมโดยโปรแกรม LabVIEW ค่าความจุไฟฟ้าถูกตรวจสอบภายใต้ความถี่ 100 เฮิร์ตซ์ ซึ่งในการทดลองจะทำการดูดอากาศแวดล้อมให้เต็ม Chamber ก่อนเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงจะใส่สารตัวอย่าง TNT เข้าไปในระบบอีก 5 นาที ซึ่งในขณะที่แก๊สเซ็นเซอร์ IDE สัมผัสกับอากาศ และสัมผัสกับไอของ TNT จะทำการบันทึกค่าความจุไฟฟ้าตามเวลาจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

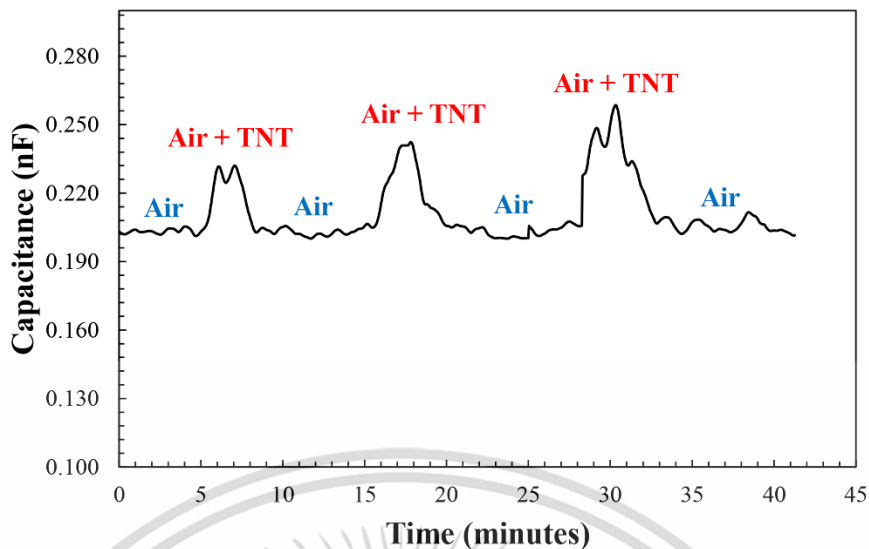
จากรูปที่ 4.5 แสดงความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปหลังจากแก๊สเซนเซอร์ IDE สัมผัสกับอากาศ แวดล้อม และจากนั้นสัมผัสกับไอของ TNT โดยมีอากาศเป็นแก๊สพาหะ ความจุไฟฟ้าจากการวัด 2 ครั้งด้วยแก๊สเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุลด้วย TNT ร่วมกับ DENV-2 (MIP-IDE) 2 อันคือ MIP-IDE 1 และ MIP-IDE 2 เพื่อแสดงความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility) ของการสร้างแก๊สเซนเซอร์ จากผลการทดลองจะเห็นว่าความจุไฟฟ้าของแก๊สเซนเซอร์ทั้ง MIP-IDE 1 และ MIP-IDE 2 มีค่าความจุไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อสัมผัสกับอากาศแวดล้อมจะมีความจุไฟฟ้าประมาณ 0.2 nF ในขณะที่แก๊สเซนเซอร์เมื่อสัมผัสกับไอของ TNT จะมีความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 0.23 nF



รูปที่ 4.5 ความสามารถในการ reproducibility ของแก๊สเซนเซอร์ที่ลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับ DENV-2

จากรูปที่ 4.6 แสดงค่าความจุไฟฟ้าจากการทดลองโดยการให้แก๊สเซนเซอร์สัมผัสกับอากาศเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นสัมผัสกับไอของ TNT อีก 5 นาทีติดต่อกัน 3 ครั้งโดยใช้แก๊สเซนเซอร์ MIP-IDE เดียวกัน จะเห็นได้ว่าความจุไฟฟ้าเมื่อแก๊สเซนเซอร์สัมผัสกับไอของ TNT จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับความจุไฟฟ้าของแก๊สเซนเซอร์เมื่อสัมผัสกับไอของ TNT ก่อนหน้า และเวลาดตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ MIP-IDE เมื่อสัมผัสกับไอของ TNT คือ 2 นาที อย่างไรก็ตามจะเห็นว่ามีความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างความจุไฟฟ้าที่วัดได้หลังจากแก๊สเซนเซอร์ MIP-IDE สัมผัสกับอากาศแวดล้อม และสัมผัสไอของ TNT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ความสามารถในการ repeatability ของแก๊สเซ็นเซอร์ที่ลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับ DENV-2

#### 4.3 ผลการตรวจจับสารประกอบวัตถุระเบิดด้วยไฮโดรเจล

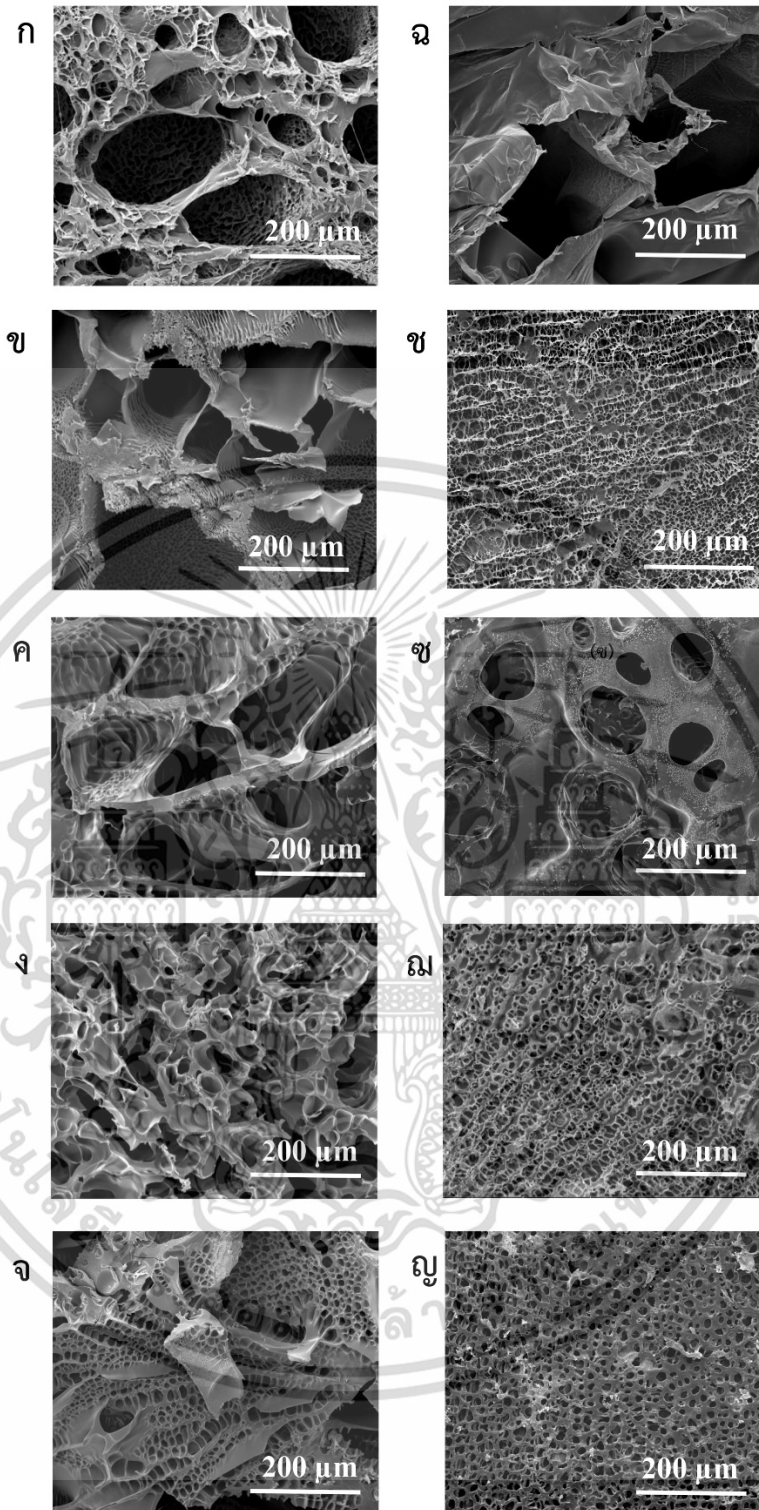
การตรวจจับสารประกอบวัตถุระเบิดด้วยไฮโดรเจล เนื่องจากคุณสมบัติของไฮโดรเจลนั้นเป็นวัสดุที่มีรูพรุนและสามารถดูดซับไอได้ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกนำโพลีอะคริลลาไมด์ไฮโดรเจล (Polyacrylamide hydrogel, PAAM hydrogel) มาทดสอบในการดูดซับไอของสารประกอบวัตถุระเบิด โดยเริ่มด้วยการทดสอบความไวในการตรวจจับไอของ TNT ซึ่งใช้ PAAM hydrogel ที่มีเนื้อเจล 5%, 10%, 15%, 20% และ 25% สำหรับการทดสอบ จากนั้นจะนำ PAAM hydrogel ที่มีการตรวจจับไอของ TNT ที่ดีที่สุดมาทดสอบในการตรวจจับไอของสารตัวอย่างสารประกอบวัตถุระเบิด 4 ตัวอย่าง คือ TNT, DNT, UREA, PETN และสารตัวอย่างอื่นๆที่ระเหยได้ เช่น เอทานอล ซึ่งการวัดจะใช้เทคนิคการวัดด้วยเคมีไฟฟ้าในโหมดลิเนียร์สวิตช์โวลแทมเมทรี (Linear sweep voltammetry, LSV) ซึ่งในการวัดจะนำ PAAM hydrogel วางบนอิเล็กโทรดแบบพิมพ์สกรีน ในการวัดแต่ละครั้งจะทำการวัดกระแสไฟฟ้าของ PAAM hydrogel บนเซ็นเซอร์ก่อนเพื่อเป็นค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้น ( $I_0$ ) และหลังการดูดซับไอของสารตัวอย่างจะถูกบันทึก ( $I_x$ ) และในการทดลองจะทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.1 การศึกษาคุณสมบัติของ PAAM gel

สัณฐานวิทยาของพื้นผิว และพื้นที่ผิวของ PAAM hydrogel จะตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เครื่องวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว และในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ PAAM hydrogel จะถูกแช่ในน้ำที่ปราศจากไอออน (DI water) ก่อนแช่แข็งให้แห้งด้วยเครื่อง Vacuum freeze dryer เพื่อกำจัดน้ำออกในขณะที่รักษารูพรุนภายใน PAAM hydrogel ไว้ การตรวจสอบคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยาของ PAAM hydrogel ใช้เครื่อง Quanta 450 SEM (FEI Company, USA) ที่ศักย์ไฟฟ้าแรง 10 kV สำหรับพื้นที่ผิวจำเพาะของคอมโพสิต และส่วนประกอบถูกวิเคราะห์โดยการดูดซับทางกายภาพของไนโตรเจนด้วยวิธี BET ที่อุณหภูมิ 77.3 K โดยใช้เครื่อง Micromeritics 3Flex surface characterization analyzer (Micromeritics, USA)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับวัตถุระเบิด ดังนั้นวัสดุที่เลือกเป็นเซ็นเซอร์ควรเป็นวัสดุที่มีผลผูกพันกับวัตถุระเบิดได้ดี ดังนั้นจึงพบว่า PAAM hydrogel สามารถใช้เป็นวัสดุตรวจจับวัตถุระเบิดได้ [19] และนำไปใช้ในงานนี้ อย่างไรก็ตามต้องมีการดัดแปลงบางอย่างก่อนที่จะใช้ PAAM hydrogel ในการดูดซับไอ TNT ที่ความเข้มข้นต่ำมาก ยิ่งกว่านั้นเมื่อเรามุ่งเน้นที่จะใช้การวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าที่ต้องการสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นจึงต้องเตรียมเป็นไฮโดรเจล การทดลองหา PAAM hydrogel ที่เหมาะสมซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด ได้ดำเนินการลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ PAAM hydrogel ที่เนื้อเจลต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า PAAM hydrogel แสดงขนาดและโครงสร้างรูพรุนต่าง ๆ ขนาดรูพรุนของ PAAM hydrogel 5% มีขนาดใหญ่กว่าเจลชนิดอื่น รูพรุนของ PAAM hydrogel 20% และ 25% มีขนาดเล็กกลง แต่มีจำนวนรูพรุนต่อพื้นที่ที่สูงขึ้น ขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิวของ PAAM hydrogel ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของส่วนผสมอะคลิลาไมด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากผลในตารางแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของการผสมอะคลิลาไมด์ และพื้นที่ผิวจำเพาะเฉพาะของ PAAM hydrogel จะเห็นได้ว่า PAAM hydrogel 20% จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของของ PAAM hydrogel (ก) - (จ) ภาพตัดขวางของ PAAM hydrogel ที่ความเข้มข้นของส่วนผสมอะคลิลาไมด์ในเนื้อเจล 5%, 10%, 15%, 20% และ 25% ตามลำดับ (ฉ) - (ญ) ส่วนพื้นผิวบนของ PAAM hydrogel ที่ความเข้มข้นของส่วนผสมอะคลิลาไมด์ในเนื้อเจล 5%, 10%, 15%, 20% และ 25% ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

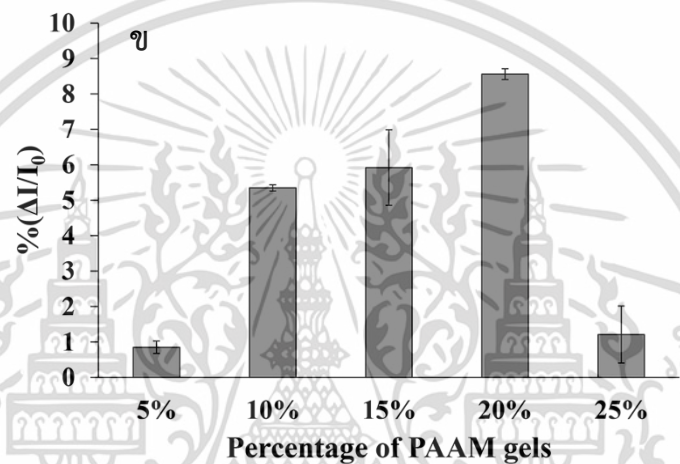
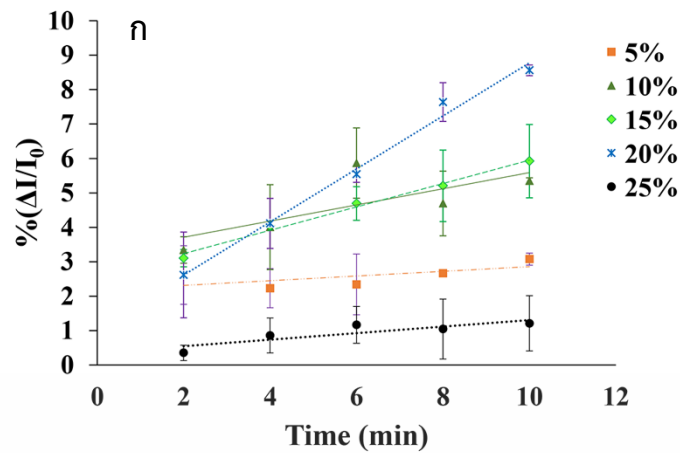
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของการผสมอะคลิลาไมด์ และพื้นที่ผิวจำเพาะเฉพาะของ PAAM hydrogel

Percentage of PAAM hydrogel	BET Surface Area (m <sup>2</sup> /g)
5%	8.4797
10%	8.0018
15%	7.4903
20%	11.3374
25%	8.6426

#### 4.3.2 การตรวจจับไอของสารประกอบวัตถุระเบิด และสารชนิดอื่นๆ

การตรวจจับไอของสารประกอบวัตถุระเบิดนั้นจะให้เทคนิคการวัดทางเคมีไฟฟ้าในโหมด LSV ซึ่งในขั้นแรกจะทำการทดสอบความไวในการตรวจจับไอของ TNT ซึ่งใช้ PAAM hydrogel ที่มีเนื้อเจล 5%, 10%, 15%, 20% และ 25% สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของเปอร์เซ็นต์เจล และการตรวจจับไอของสารประกอบวัตถุระเบิดจากการวัด LSV กระแสไฟฟ้าของออกซิเดชันสูงสุดของคูรีดอกซ์ ( $K_3Fe(CN)_6$ ) และ ( $K_4Fe(CN)_6$ ) จากอิเล็กโทรด PAAM hydrogel ขึ้นอยู่กับประเภทของไอของสารตัวอย่าง ในการทดลองจะเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการดูดซับไอของ TNT ด้วย PAAM hydrogel ที่ความเข้มข้นของเนื้อเจลที่ 5%, 10%, 15%, 20% และ 25% ซึ่งอิเล็กโทรด PAAM hydrogel ที่วัดสัญญาณได้นั้นมีผลที่สอดคล้องกันกับพื้นที่ผิวจำเพาะที่ได้รับ (อธิบายไว้ในส่วนก่อนหน้า) จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่า PAAM hydrogel 20% ให้ความไวสูงสุดสำหรับการตรวจจับไอของ TNT เมื่อเปรียบเทียบกับ PAAM hydrogel อื่น ๆ ดังนั้นจึงใช้เจล PAAM hydrogel ที่ความเข้มข้นของเนื้อเจล 20% ในการทำอิเล็กโทรดสำหรับการทดลองต่อไปนี้

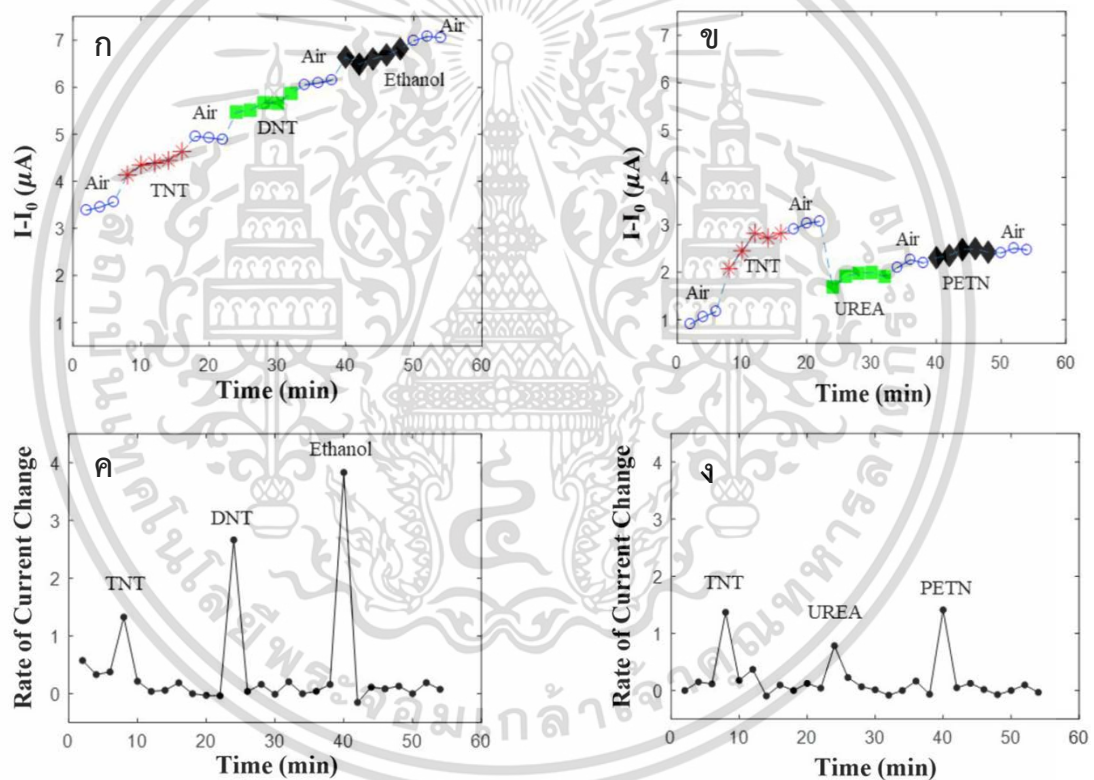
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กระแสไฟฟ้าของ PAAM hydrogel ที่มีความเข้มข้นของเนื้อเจลที่ต่างกัน (ก) กระแสไฟฟ้าทุกๆ 2 นาที ในช่วงที่มีการดูดซับไอของ TNT เป็นเวลา 10 นาที (ข) กระแสไฟฟ้าที่เวลา 10 นาที

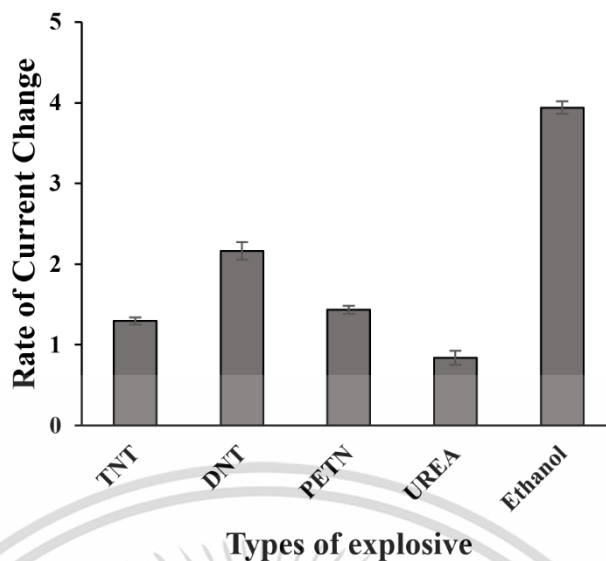
จากเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าในโหมด LSV สารตัวอย่างของสารประกอบวัตถุระเบิดทั้งหมดจะแสดงกระแสสูงสุดที่ศักย์ไฟฟ้า 0.15 V ซึ่งสะท้อนถึงจุดสูงสุดของการเกิดออกซิเดชันของคูรีดอกซ์ ( $K_3Fe(CN)_6$ ) และ ( $K_4Fe(CN)_6$ ) กระแสไฟฟ้าที่สังเกตได้จากสารตัวอย่างของสารประกอบวัตถุระเบิดที่ศักย์ไฟฟ้านี้เมื่อเทียบกับเวลาโดยใช้อิเล็กโทรด PAAM hydrogel 20% แสดงในรูปที่ 4.10 ในทุกกรณีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาดูดซับไอของสารตัวอย่างมากขึ้น โดยปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขึ้นอยู่กับประเภทของไอระเหย และเอทานอลซึ่งเป็นสารประกอบที่ระเหยได้สูงที่สุด ในการทดลองนี้จะให้สัญญาณอนุพันธ์ที่สูงที่สุดด้วย วัตถุระเบิดที่ใช้ในการทดลองนี้คือ DNT, TNT, PETN และ Urea ซึ่งจะมีอนุพันธ์ที่ต่ำกว่า ในกลุ่มวัตถุระเบิด DNT มีความดันไอสูง จึงให้การตอบสนองสูงสุดตามด้วย TNT และ PETN ที่มีความดันไอที่ต่ำซึ่งมีค่าอนุพันธ์ใกล้เคียงกัน และ Urea มีความดันไอที่ต่ำที่สุดจะให้ค่าอนุพันธ์ที่ต่ำที่สุดเช่นกัน อย่างไรก็ตามสำหรับสารประกอบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียวกันค่าอนุพันธ์ในช่วงเวลาเดียวกันเกือบคงที่ จากสิ่งนี้เราจะสามารถใช้ในการเปลี่ยนแปลงปัจจุบันจากการวัดแต่ละครั้งเพื่อระบุสารตัวอย่าง อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ใช้เวลานานกว่าหนึ่งชั่วโมงต่อสารตัวอย่าง ดังนั้นอิเล็กโทรด PAAM hydrogel จะมีความเสี่ยงที่จะแห้งและไม่เสถียร ในการใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณ เราพบว่าค่าอนุพันธ์ของเวลาปัจจุบันที่เพิ่มขึ้น 2 นาทีเป็นฟังก์ชันที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล สัญญาณของกระแสไฟฟ้าจากการดูดซับไอสารตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.9 (ก-ข) และอนุพันธ์ของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.9 (ค-ง) แสดงให้เห็นว่าอนุพันธ์มีความแตกต่างระหว่างแก๊สตามการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นเราพบว่าค่าอนุพันธ์เหล่านี้สามารถทำซ้ำได้สำหรับข้อมูล TNT ดังที่แสดงในรูปที่ 4.9 (ค-ง) โดยมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 3 ในการทดลองทั้งหมด



**รูปที่ 4.9** สัญญาณของกระแสไฟฟ้า และอนุพันธ์ของแต่ละสารตัวอย่างของสารประกอบวัตถุระเบิด (ก) สัญญาณจากการวัดต่อเนื่องทางเวลาของ TNT, DNT และเอทานอล (ข) สัญญาณจากการวัดต่อเนื่องทางเวลาของ TNT, UREA และ PETN (ค) สัญญาณอนุพันธ์ของ TNT, DNT และเอทานอล (ง) สัญญาณอนุพันธ์ของ TNT, UREA และ PETN

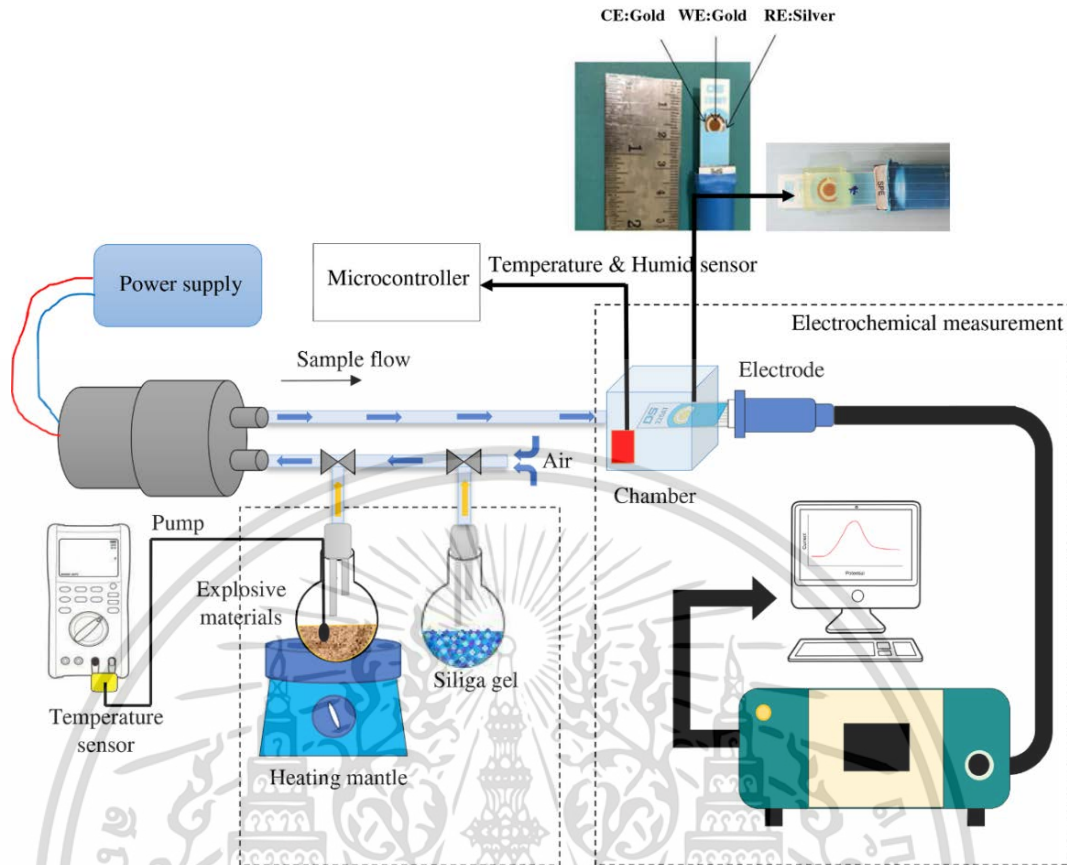
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 อนุพันธ์สูงสุดของแต่ละสารตัวอย่างของสารประกอบวัตถุระเบิด และสารระเหยอื่นๆ

การทดลองเพื่อตรวจสอบผลกระทบของอุณหภูมิได้ดำเนินการกับ TNT และ DNT ที่ 32, 40 และ 55 °C แต่ใช้ PAAM hydrogel เพียงครั้งเดียวในแต่ละอุณหภูมิที่ทดสอบสำหรับการวิเคราะห์แต่ละครั้งเนื่องจากความร้อนอาจทำลายผิวเจลได้ สำหรับระบบการวัดที่มีการเพิ่มอุณหภูมินั้นจะใช้ Heating mantle สำหรับให้ความร้อนกับสารประกอบวัตถุระเบิด และภายในขวดของสารตัวอย่างจะมีการวัดอุณหภูมิด้วยเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ จากนั้นวัดค่ากระแสไฟฟ้าเพื่อสังเกตผลกระทบของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมของเซ็นเซอร์และสภาพการทำงาน นอกจากนี้ยังใช้แทนการทดลองที่ความเข้มข้นของสารวิเคราะห์ที่ต่างกัน ความเข้มข้นของวัตถุระเบิดในอากาศระหว่างการทดลองไม่ทราบพารามิเตอร์ แม้ว่าจะมีการรายงานความดันไอของทีเอ็นทีหรือวัตถุระเบิดอื่น ๆ ที่อื่น [26] การวัดจะดำเนินการภายใต้เงื่อนไขที่ต่างกัน ในงานนี้เราได้ทำการทดลองโดยใช้อุณหภูมิที่ต่างกัน เพื่อแสดงการทดลองที่ความเข้มข้นต่างกันแทนที่การวัดความดันไอโดยตรง ความดันไอของเครื่องวิเคราะห์ที่สูงขึ้นหลังจากคาดว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นและควรสังเกตจากสัญญาณที่สังเกตได้ ด้วยวิธีนี้เราสามารถยืนยันได้ว่าสัญญาณของเรามีสาเหตุหลักมาจากสารประกอบวัตถุระเบิด แสดงระบบการวัดดังรูปที่ 4.11

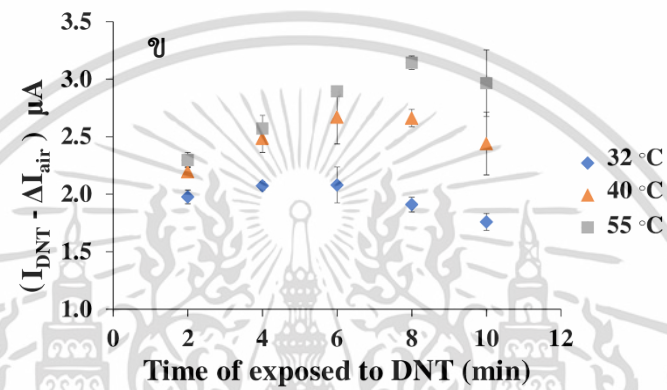
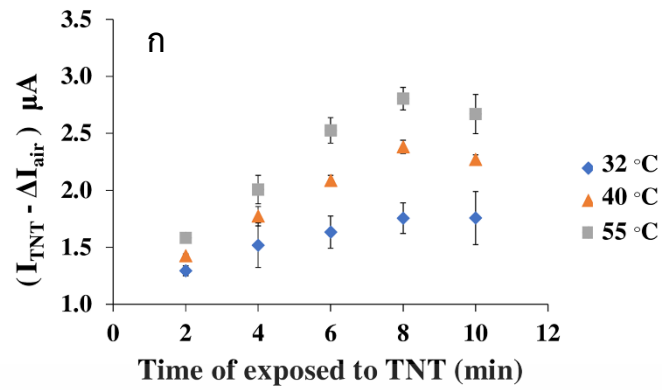
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ระบบการไหลของแก๊สสำหรับการตรวจสอบผลกระทบของอุณหภูมิของสารประกอบวัตถุระเบิด

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.12 แสดงการตอบสนองของแก๊สเซ็นเซอร์ PAAM hydrogel ที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของ TNT ดังรูปที่ 4.12(ก) และ DNT ดังรูปที่ 4.12(ข) แต่ละจุดของสัญญาณเป็นความแตกต่างของกระแสไฟฟ้า ( $\Delta I$ ) ระหว่างกระแสไฟฟ้าของอากาศแวดล้อม และกระแสไฟฟ้าของสารตัวอย่างของสารประกอบวัตถุระเบิด (TNT หรือ DNT) ซึ่งจากผลการทดลองที่อุณหภูมิสูงกว่า 40 °C สัญญาณเริ่มลดลงเมื่อเจลแห้งหลังจากสัมผัสสารตัวอย่างนานกว่า 6 นาที อย่างไรก็ตามผลการตรวจยืนยันว่า TNT และ DNT เป็นส่วนสำคัญของสัญญาณ และเราสามารถใช่ PAAM hydrogel ที่อุณหภูมิสูงได้ แต่ภายในระยะเวลาอันสั้นเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ผลกระทบของอุณหภูมิของไอสารประกอบวัตถุระเบิดต่อสัญญาณของเซ็นเซอร์ PAAM hydrogel ที่ได้จาก (ก) ไอของ TNT (ข) ไอของ DNT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา และมุ่งเน้นการตรวจจับไอของ TNT ซึ่งมีความดันไอที่ต่ำ ซึ่งเทคนิคการลอกแบบโมเลกุลเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการจดจำโมเลกุลแม่แบบได้อย่างจำเพาะเจาะจง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำเทคนิคการลอกแบบโมเลกุลมาใช้ในการตรวจจับไอของ TNT นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวัสดุที่มีความเป็นรูพรุนเพื่อใช้ในการดูดซับไอของ TNT อีกด้วย ซึ่งได้ออกแบบวิจัย โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วน คือ 1. สร้างเซนเซอร์ด้วยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุล โดยใช้ TNT เป็นแม่แบบโมเลกุล เพื่อทดสอบการตรวจจับสารละลาย TNT โดยใช้วิธีการวัดทางเคมีไฟฟ้า 2. สร้างระบบตรวจจับไอของ TNT และสร้างเซนเซอร์ด้วยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุลร่วมกับไวรัส DENV-2 เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการตรวจจับไอของ TNT และ 3. ศึกษาวัสดุที่มีความเป็นรูพรุนเพื่อใช้ในการดูดซับไอของ TNT และนำสัญญาณที่วัดได้มาวิเคราะห์เพื่อสามารถตรวจจับไอของ TNT ได้อย่างเฉพาะเจาะจง

การตรวจจับ TNT ด้วยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุลโดยใช้เซนเซอร์เคมีไฟฟ้า งานวิจัยนี้ได้ทำการลอกแบบโมเลกุล TNT ด้วยคอมโพสิต GO-copolymer ที่เคลือบบนอิเล็กโทรดทองคำสำหรับการตรวจจับ TNT ซึ่งจากผลการทดลองด้วยอิเล็กโทรดที่ไม่มีการลอกแบบโมเลกุล (NIP) ไม่สามารถแยกสัญญาณระหว่าง TNT และ PETN ได้ แต่อิเล็กโทรดที่มีการลอกแบบโมเลกุลโดยมี TNT เป็นแม่แบบ (MIP-TNT) นั้นให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของ TNT สูงกว่า PETN และ MIP-TNT สามารถตรวจจับ TNT ในสารละลายจนถึงระดับ ppt (0.4 ppt) โดยเทคนิคการวัดด้วยเคมีไฟฟ้าในโหมดไซคลิกโวลแทมเมตรี

การตรวจจับไอของ TNT ด้วยเทคนิคการลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับ DENV-2 โดยใช้ อิเล็กโทรดแบบซี่หวี ในการศึกษาครั้งนี้เราได้พัฒนา MIP ที่ใช้เซนเซอร์ก๊าซ IDE โดยใช้การลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับ DENV-2 สำหรับการตรวจจับไอของ TNT ความดันไอของ TNT ที่ถูกมองว่าค่อนข้างต่ำในช่วง ppb [26] การลอกแบบโมเลกุลของ TNT ร่วมกับ DENV-2 จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับไอของ TNT ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสามารถดูดซับไอระเหยที่ระเบิดได้ในระหว่างการตรวจสอบความจุไฟฟ้าของ IDE การเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าที่สูงขึ้น เกิดขึ้นเมื่อสัมผัสกับไอระเหยของ TNT ซึ่งเห็นได้ชัดว่าการตรวจจับไอของ TNT บนพื้นผิว MIP-IDE นั้นสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับอากาศแวดล้อม และเวลาตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ MIP-IDE เมื่อ

สัมผัสกับไอของ TNT คือ 2 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจจับสารประกอบวัตถุระเบิดด้วยไฮโดรเจล ในการศึกษาครั้งนี้เราได้ตรวจสอบการใช้ PAAM hydrogel สำหรับการตรวจจับไอที่ระเบิดได้ ความดันไอของ TNT ที่ต่ำในช่วง ppb [26] ซึ่งสามารถใช้เป็นขีดจำกัดในการตรวจจับของเราได้ PAAM hydrogel มีความพรุนสูง และสามารถดูดซับไอระเหยที่ระเบิดได้ ในขณะที่เรากำลังตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้า ด้วยการใช้โหมด LSV สัญญาณที่เปลี่ยนแปลง ก่อนและหลังที่ PAAM hydrogel สัมผัสกับไอของ TNT หรือไอระเหยของสารเคมีอื่น ๆ สามารถใช้เพื่อระบุตัวอย่างได้ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการดูดซับแก๊สบน PAAM hydrogel ทำให้ปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องมีการทดลองเพิ่มเติมก่อนที่จะสามารถสร้างกลไกพื้นฐานได้ อัตราการเปลี่ยนแปลงที่คำนวณได้ทุก 2 นาที สำหรับการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของแต่ละสารประกอบวัตถุระเบิดตามเวลา มีความเฉพาะเจาะจงมากขึ้นสำหรับการวิเคราะห์เฉพาะ เวลาตอบสนอง 2 นาทีนั้นเร็วมากเมื่อเทียบกับค่าที่กลุ่มอื่นทำได้ โดยใช้วิธีการที่คล้ายกันซึ่งนานกว่านั้นคือ 5 นาที [11, 19] แม้ว่าวิธีนี้จะแสดงความไว และการเลือกที่ต้องการ แต่ก็มีข้อเสียอยู่บ้าง ปัจจุบันเซ็นเซอร์ PAAM hydrogel สามารถใช้ในการตรวจจับแก๊สเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเท่านั้น และอายุการใช้งานของอิเล็กโทรดแบบเจลที่ 1 สัปดาห์ในสารละลาย  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งคือเวลาในการสัมผัสกับแก๊สของ PAAM hydrogel ลดลงเมื่ออุณหภูมิในการทำงานเพิ่มขึ้นเช่นจาก 1 ชั่วโมงที่ 32 °C เป็น 6 นาทีที่ 40 °C ยิ่งไปกว่านั้นในงานวิจัยนี้มีการใช้เจลเพียงชนิดเดียวโดยไม่มีฟังก์ชันการทำงานใดๆ เพื่อให้เลือกใช้กับ TNT อาจเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพโดยใช้เทคนิคการทำงานที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่นแทนที่จะใช้อิเล็กโทรดเพียงตัวเดียวเราสามารถพิจารณาอาร์เรย์อิเล็กโทรดซึ่งมีวัสดุหลายชนิดที่มีความไวแตกต่างกันไปอย่างตัวอย่างเฉพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] J. M. Weiss, A. J. McKay, C. DeRito, C. Watanabe, K. A. Thorn, and E. L. Madsen, 2004. "Development and Application of Pyrolysis Gas Chromatography/Mass Spectrometry for the Analysis of Bound Trinitrotoluene Residues in Soil." **Environmental Science & Technology**. 38(7) : pp. 2167-2174.
- [2] T. Khayamian, M. Tabrizchi, and M. T. Jafari. 2003. "Analysis of 2,4,6-trinitrotoluene, pentaerythritol tetranitrate and cyclo-1,3,5-trimethylene-2,4,6-trinitramine using negative corona discharge ion mobility spectrometry." **Talanta**. 59(2) : pp. 327-333
- [3] W. Lu et al. 2016. "Visual detection of 2,4,6-trinitrotoluene by molecularly imprinted colloidal array photonic crystal," **J Hazard Mater**. 316 : pp. 87-93.
- [4] G. Della Giustina, A. Sonato, E. Gazzola, G. Ruffato, S. Brusa, and F. Romanato, 2016. "SPR Enhanced molecular imprinted sol-gel film: A promising tool for gas-phase TNT detection." **Materials Letters**. 162 : pp. 44-47.
- [5] M. Warzecha et al., 2015. "Detection of nitroaromatic vapours with diketopyrrolopyrrole thin films: exploring the role of structural order and morphology on thin film properties and fluorescence quenching efficiency," **Chem Commun (Camb)**. 51(6) : pp. 1143-1146.
- [6] T. K. Ghorpade et al., 2017. "Pentipycene-tbutylpyrene based poly(arylene-ethynylene)s: Highly sensitive and selective TNT sensor in aqueous as well as vapor phase." **Sensors and Actuators B: Chemical**. vol. 252 : pp. 901-911.
- [7] R. S. Aparna, J. S. Anjali Devi, P. Sachidanandan, and S. George. 2018. "Polyethylene imine capped copper nanoclusters- fluorescent and colorimetric onsite sensor for the trace level detection of TNT," **Sensors and Actuators B: Chemical**. vol. 254 : pp. 811-819.
- [8] X. Tian, H. Peng, Y. Li, C. Yang, Z. Zhou, and Y. Wang. 2017. "Highly sensitive and selective paper sensor based on carbon quantum dots for visual detection of TNT residues in groundwater." **Sensors and Actuators B: Chemical**. vol. 243 : pp. 1002-1009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [9] D. Zhang et al., 2015. "Smartphone-based portable biosensing system using impedance measurement with printed electrodes for 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) detection." **Biosens Bioelectron.** vol. 70 : pp. 81-88.
- [10] A. Diaz Aguilar et al., 2010. "A hybrid nanosensor for TNT vapor detection," **Nano Lett.** 10(2) : pp. 380-384.
- [11] F. Zang, K. Gerasopoulos, X. Z. Fan, A. D. Brown, J. N. Culver, and R. Ghodssi. 2014. "An electrochemical sensor for selective TNT sensing based on Tobacco mosaic virus-like particle binding agents," **Chem Commun (Camb).** 50(85) : pp. 12977-12980.
- [12] Z. Naal, J. H. Park, S. Bernhard, J. P. Shapleigh, C. A. Batt, and H. D. Abruña. 2002. "Amperometric TNT Biosensor Based on the Oriented Immobilization of a Nitroreductase Maltose Binding Protein Fusion," **Analytical Chemistry.** 74(1) : pp. 140-148.
- [13] F. Shahdost-Fard and M. Roushani. 2017. "Designing an ultra-sensitive aptasensor based on an AgNPs/thiol-GQD nanocomposite for TNT detection at femtomolar levels using the electrochemical oxidation of Rutin as a redox probe." **Biosens Bioelectron.** vol. 87 : pp. 724-731.
- [14] S. Khanniche et al., 2017. "Quantitative evaluation of the responses of a gravimetric gas sensor based on mesoporous functionalized silica: Application to 2,4-DNT and TNT detection." **Sensors and Actuators B: Chemical.** vol. 248 : pp. 470-480.
- [15] Z. Guo et al., 2015. "1,3,5-Trinitrotoluene detection by a molecularly imprinted polymer sensor based on electropolymerization of a microporous-metal-organic framework." **Sensors and Actuators B: Chemical.** vol. 207 : pp. 960-966.
- [16] H. Jo et al., 2017. "Electrically conductive graphene/polyacrylamide hydrogels produced by mild chemical reduction for enhanced myoblast growth and differentiation." **Acta Biomater.** vol. 48 : pp. 100-109.
- [17] R. O. Moreno, E. K. Penott-Chang, B. Rojas de Gáscue, and A. J. Müller. 2017. "The effect of the solvent employed in the synthesis of hydrogels of poly (acrylamide-co-methyl methacrylate) on their structure, properties and possible biomedical applications." **European Polymer Journal.** vol. 88 : pp. 148-160,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [18] H. A. Yu, J. Lee, S. W. Lewis, and D. S. Silvester. 2017. "Detection of 2,4,6-Trinitrotoluene Using a Miniaturized, Disposable Electrochemical Sensor with an Ionic Liquid Gel-Polymer Electrolyte Film." **Analytical Chemistry**. 89(8) : pp. 4729-4736.
- [19] P. K. Sekhar and E. L. Brosha. 2015. "Trace Detection of 2, 4, 6-Trinitrotoluene Using Electrochemical Gas Sensor." **IEEE Sensors Journal**. 15(3) : pp. 1624-1629.
- [20] X. Vilanova, E. Llobet, R. Alcubilla, J. E. Sueiras, and X. Correig. 1996. "Analysis of the conductance transient in thick-film tin oxide gas sensors." **Sensors and Actuators B: Chemical**. 31(3) : pp. 175-180.
- [21] R. Gutierrez-Osuna, H. T. Nagle, and S. S. Schiffman. 1999. "Transient response analysis of an electronic nose using multi-exponential models," **Sensors and Actuators B: Chemical**. 61(1) : pp. 170-182.
- [22] F. Yang, Z. Geng, A. Koneru, M. Zhi, H. Li, and N. Wu, "Dynamic Calibration of Electrochemical Sensor for Accelerated Analyte Quantification," **IEEE Sensors Journal**, vol. 13, no. 4, pp. 1192-1199.
- [23] M. K. Muezzinoglu et al., 2009. "Acceleration of chemo-sensory information processing using transient features." **Sensors and Actuators B: Chemical**. 137(2) : pp. 507-512.
- [24] C. Tanchaoren, W. Sukjee, C. Sangma, and T. Wangchareansak. 2015. "Molecularly Imprinted Polymer for explosive detection," **2015 Asian Conference on Defence Technology (ACDT)** : pp. 171-174.
- [25] C. X. Guo, Y. Lei, and C. M. Li. 2011 "Porphyrin Functionalized Graphene for Sensitive Electrochemical Detection of Ultratrace Explosives." **Electroanalysis**. 23 (4) : pp. 885-893.
- [26] Krausa, Michael. 2008. "Chances of and demands on chemical vapor explosives detection." **Fraunhofer-Institut Chemische Technologie**.
- [27] ยุวพร อุปปะ. 2557. "Supramolecular chemistry, Chemical sensors." **วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย** 6(2) : pp. 82-89.
- [28] Sarmishtha GHOSHAL, Debasis MITRA, Sudip ROY, Dwijesh DUTTA MAJUMDER. 2010. "Biosensors and Biochips for Nanomedical Applications: a Review." **Sensors & Transducers Journal**. 113(2) : pp. 1-17.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [29] สุวรรณ ไชยสิทธิ์, (2556) การสังเคราะห์และศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของอนุภาคโคบอลต์ออกไซด์ปรับแต่งด้วยไฟฟ้าที่นอกไซด์เจือฟลูออรีนสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [30] สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้. 2018 “ไฟฟ้าเคมีเชิงบูรณาการ.” มหาวิทยาลัยมหิดล.
- [31] วารุณี ตานันต์และ สายันต์ แสงสุวรรณ. 2557. “พอลิเมอร์ดูดซับน้ำได้มาก: การสังเคราะห์การวิเคราะห์และ การประยุกต์ใช้” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม - สิงหาคม 2557.
- [32] ภูสิทธิ์ ใจกาวิณ. 2552. “การออกแบบและสังเคราะห์แผ่นไฮโดรเจลแบบเบลนด์ สำหรับใช้ในทางชีวเวชเพื่อเป็นวัสดุปิดแผล.” วิทยาสตรมหาบัณฑิต (เคมี). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [33] Williams, D.F. 1981. Biocompatibility of Clinical Implant Materials. 2 Vols. Florida : CRC Press.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวทศวรรณ พุทธสกุล  
วัน เดือน ปีเกิด 22 กรกฎาคม 2528 ที่นครสวรรค์  
ที่อยู่ 80/37 หมู่ที่ 2 หมู่บ้านอารีรมย์ ต.บางพูด อ.เมืองปทุมธานี จ.ปทุมธานี  
12000  
ประวัติการศึกษา 2549 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์-อิเล็กทรอนิกส์ (เกียรตินิยม  
อันดับ2) มหาวิทยาลัยนเรศวร  
2552 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ชีวการแพทย์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ประสบการณ์การทำงาน  
2552-ปัจจุบัน ตำแหน่งอาจารย์ประจำวิทยาลัยวิศวกรรมชีวการแพทย์ มหาวิทยาลัยรังสิต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้