

การตรวจจับสารวัตถุระเบิดด้วยเทคนิค QCM  
Explosive detection by QCM technique



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2560

การตรวจจับสารวัตถุระเบิดด้วยเทคนิค QCM

Explosive detection by QCM technique



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจจับสารวัตถุระเบิดด้วยเทคนิค QCM  
Explosive detection by QCM technique



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์                      ปีการศึกษา 2560

สาขาวิชา                              วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะ                                      วิศวกรรมศาสตร์

    สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง                                      การตรวจจับสารวัตถุระเบิดด้วยเทคนิค QCM

    Explosive detection by QCM technique

ผู้จัดทำ                                  นางสาว ธนัชญา นาควิโรจน์                      รหัสประจำตัว 57010575

    นางสาว ปวีตรา ภัทรสมเจตน์                      รหัสประจำตัว 57010579

ปริญญาานิพนธ์นี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การตรวจจับสารวัตถุระเบิดด้วยเทคนิค QCM

นางสาวธัญญา นาควิโรจน์, นางสาวปวีตรา ภัทรสมเจตน์

อาจารย์ที่ปรึกษา: รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอเกี่ยวกับการตรวจจับไอระเหยของวัตถุระเบิด ตัวอย่างเช่น ไตรไนโตรโทลูอีน ซีโฟร์ อาร์ดีเอ็กซ์ และแอมโมเนียมไนเตรต ด้วยการใช้ควอตซ์คริสตัล ไมโครบาลานซ์มาประยุกต์ด้วยการเคลือบฟิล์มอ็อกไซด์เป็นวัสดุความไวสูงเพื่อตรวจจับโมเลกุลของสารตั้งต้นวัตถุระเบิด โดยควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์คือเซนเซอร์วัดมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ที่อาศัยหลักการวัดมวลโดยใช้การเปลี่ยนแปลงความถี่พื้นฐานของผลึกควอตซ์ที่เกิดจากการตัดผลึกตามแนวขวางเป็นแผ่นบางในแบบ AT-CUT ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นของการเปลี่ยนแปลงมวลเนื่องจากการดูดซึมและการปล่อยโมเลกุลบนพื้นผิวและความถี่ที่เปลี่ยนไปจะเป็นไปตามสมการของเซอเบร์รี่ โดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์จะขึ้นกับปริมาณมวลของโมเลกุลที่เกาะบนผิวของฟิล์มและปริมาณของสารตั้งต้นวัตถุระเบิดที่ตรวจวัด เทคนิคนี้เป็นส่วนหนึ่งในการตรวจวัดหากลิ่นไอระเหยของสารวัตถุระเบิดโดยใช้วิธีการเก็บตัวอย่าง การใช้วิธีนี้เหมาะกับการปิดล้อมตรวจค้นเพื่อหาร่องรอยระเบิด, การตรวจวัตถุต้องสงสัย, การตรวจพื้นที่ต้องสงสัย โดยการที่ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีนี้เนื่องจากเล็งเห็นถึงความสำคัญของการเปลี่ยนแปลงกระบวนการต่างๆทั้งทางฟิสิกส์และทางเคมีจะมีเรื่องของมวลเข้ามาเกี่ยวข้องและมีข้อดีคือราคาไม่สูงมากเมื่อเทียบกับวิธีตรวจวัดอื่นๆ

**คำสำคัญ** – ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์, สารวัตถุระเบิด, เซนเซอร์เคมี

# Explosive detection by QCM technique

Thanatchaya Nakavirote, Pavitra Phatarasomjed

Advisor: Assoc.Prof.Dr.Toempong Phetchakul

Department of Electronics Engineering

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Bangkok, Thailand

## Abstract

This project presents about explosive vapor detection such as Trinitrotoluene, C4 and Ammonium Nitrate by applying Quartz Crystal Microbalance coated with organic film. The film acts as sensitive layer for detecting explosive molecule. Quartz Crystal Microbalance is a mass sensor that measured mass per unit area by using the change of AT-Cut quartz resonance frequency. The linear relation between the changed mass by absorbing and releasing molecule on the surface and the shifted frequency are following on the Sauerbrey's equation. The changing of Quartz Crystal Microbalance frequency is depend on quantity of molecule on the film surface and quantity of explosive material. This method is a part of remote explosives sense testing technique. This technique is suitable for finding a bomb, detecting suspect objects, and investigating suspect areas. This method is used because we realize the importance of changing in both chemical and physical processes will be related with a mass. One advantage of this method is inexpensive when compared to the other detection methods.

*Keywords—QCM; Explosive material; chemical sensor;*

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สามารถที่จะสำเร็จได้ด้วยดีต้องขอขอบคุณคณาจารย์โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล และพี่ๆ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ แนวทางในการทำปริญญานิพนธ์นี้ รวมทั้งให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ การใช้ห้องปฏิบัติการขอบคุณเพื่อนๆ ชั้นปีที่ 4 ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำปริญญานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความช่วยเหลือและหวังว่าโครงการเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านไม่มากนักน้อย หากผิดพลาดประการใด ต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย



ธัญญา นาควิโรจน์

ปวีตรา ภัทรสมเจตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VI
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 เซนเซอร์วัดมวลที่มีพื้นฐานมาจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	4
2.2 หลักการของ Thickness Shear Mode Resonator.....	7
2.3 วงจรออสซิลเลเตอร์.....	7
2.4 วัสดุระเบิด.....	8
2.4.1 การแบ่งประเภทวัสดุระเบิด.....	8
2.4.2 วัสดุระเบิดทางการทหารที่ได้รับความนิยม.....	9
2.4.2.1 TNT (Trinitrotoluene).....	9
2.4.2.2 แอมโมเนียมไนเตรท (Ammonium Nitrate).....	9
2.4.2.3 RDX และคอมโพสิชัน-4 (Composition-4 หรือ C-4).....	11
2.5 Sensitive Material.....	12
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>15</b>
3.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบที่ใช้ในการตรวจวัดไอระเหยของ TNT.....	15
3.1.1 เครื่องมือตรวจวัด 16	
3.1.2 วงจรกำเนิดความถี่ที่ใช้ในการทดลอง 16	
3.1.3 อุปกรณ์วัดสัญญาณความถี่ 17	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.3.1 ออสซิลโลสโคป 17	
3.1.4 เครื่องวัดความถี่แบบดิจิทัล 188	
3.2 การทดลอง.....	18
3.2.1 การทดลองบันทึกค่าความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์เมื่อใช้คริสตัล.....	18
ความถี่ที่ค่าต่างๆ	
3.2.2 การเตรียมสารเพื่อสร้างฟิล์มเคลือบเซนเซอร์วัดมวลควอตซ์คริสตัล.....	19
ไมโครบาลานซ์ (QCM) เพื่อใช้ในการตรวจวัดสารตั้งต้นวัตถุระเบิดชนิดต่างๆ	
3.2.3 การตรวจวัดสารวัตถุระเบิดโดยใช้เซนเซอร์วัดมวลควอตซ์คริสตัล.....	22
ไมโครบาลานซ์(QCM) ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether	
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....</b>	<b>24</b>
4.1 ผลการทดลองที่ 3.2.1 บันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL.....	24
OSCILLATOR CIRCUIT โดยผู้ทดลองและผลการทดลองวัดความถี่ของวงจรแบบต่อเนื่อง	
4.1.1 ผลการทดลองบันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR.....	24
CIRCUIT ที่ใช้ความถี่ 4 MHz	
4.1.2 ผลการทดลองบันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR.....	25
CIRCUIT ที่ใช้ความถี่ 6 MHz	
4.1.3 ผลการทดลองบันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR.....	25
CIRCUIT ที่ใช้ความถี่ 8 MHz	
4.1.4 ผลการทดลองบันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR.....	26
CIRCUIT ที่ใช้ความถี่ 10 MHz	
4.2 ผลการทดลอง บันทึกค่าความถี่ของ QCM ที่เคลือบด้วยฟิล์ม 18-crown-6 ether.....	26
เมื่อตรวจวัดสารตั้งต้นวัตถุระเบิด	
4.2.1 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มในอากาศและในสถานะที่มี.....	26
TNT เจือปน	
4.2.2 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether ใน.....	27
อากาศและในสถานะที่มี TNT เจือปน	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ผลการทดลอง บันทึกราคาความถี่ของ Quartz Crystal Microbalanced ที่เคลือบด้วย.....28	
ฟิล์มของ 18-crown-6 ether ที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อตรวจวัด TNT ที่ปริมาณเท่าๆกัน	
4.3.1 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มบางในอากาศและในสถานะที่มี.....28	
TNT เจือปน	
4.3.2 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether.....29	
ที่ความเข้มข้นต่างๆ	
4.3.3 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether.....31	
ในอากาศและในสถานะที่มี TNT เจือปน	
4.4 ผลการทดลอง บันทึกราคาความถี่ของ Quartz Crystal Microbalanced ที่เคลือบด้วย.....32	
ฟิล์มของ 18-crown-6 ether เมื่อตรวจวัด TNT ที่ปริมาณแตกต่างกัน	
4.5 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether.....35	
ในสถานะที่มี RDX เจือปน	
4.6 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether.....36	
ในสถานะที่มี C4 เจือปน	
4.7 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether.....36	
ในสถานะที่มี Anfo เจือปน	
4.8 ผลการทดลอง บันทึกราคาความถี่ของ Quartz Crystal Microbalanced ที่เคลือบด้วย.....39	
ฟิล์มของ 18-crown-6 ether เมื่อตรวจวัดสารตั้งต้นวัตถุระเบิดแบบเป็น Cycle	
4.8.1 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบฟิล์มบางในสถานะที่มี TNT เจือปน.....39	
แบบเป็น Cycle	
4.8.2 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบฟิล์มบางในสถานะที่มี RDX เจือปน.....39	
แบบเป็น Cycle	
4.8.3 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบฟิล์มบางในสถานะที่มี C4 เจือปน.....40	
แบบเป็น Cycle	
4.8.4 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบฟิล์มบางในสถานะที่มี Anfo เจือปน.....40	
แบบเป็น Cycle	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	42
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	42
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	44
บรรณานุกรม.....	45



# สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแต่ละชนิดที่นิยมใช้ในปัจจุบัน.....	4
2.2 โครงสร้างการตัดผลึกแบบ x-cut, y-cut และ z-cut.....	5
2.3 การตัดผลึกตามแนวระนาบแบบต่างๆ.....	5
2.4 IC-compatible crystal oscillator circuit.....	7
2.5 โครงสร้างของ TNT.....	9
2.6 รูปร่างของวัตถุระเบิดชนิดแอมโมเนียมไนเตรท (Ammonium Nitrate).....	10
2.7 รูปร่างของระเบิดชนิดคอมโปสิชัน-4 (Composition-4 : C4).....	12
2.8 โครงสร้างของ 18-Crown-6 ether(a) และ 2,4,6-TRINITROTOLUENE (b).....	12
2.9 แสดงถึงปฏิกิริยาไนเตรชันที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์ไตรไนโตรโทลูอีน (TNT).....	13
2.10 แสดงถึงปฏิกิริยาการจับกันของ18-crown-6 ether กับ ไตรไนโตรโทลูอีน (TNT).....	14
3.1 ระบบตรวจวัดไอระเหยของสารวัตถุระเบิดที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้.....	15
3.2 โครงสร้างควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์(QCM).....	16
3.3 IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT.....	17
3.4 ออสซิลโลสโคป.....	17
3.5 เครื่องนับความถี่แบบดิจิตอล ยี่ห้อ Ascel Electronic รุ่น AE20401.....	18
3.6 การทดลองหาจรรยาและค่าความถี่ที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้เป็น QCM เซนเซอร์.....	18
3.7 QCM ที่ยังไม่ถูกเคลือบผิวและโครงสร้างของ QCM หลังจากที่ถูกเคลือบฟิล์มแล้ว.....	20
3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารเคลือบ QCM.....	20
3.9 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มเคลือบผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์.....	21
3.10 เครื่องซังสาร.....	21
3.11 Ultrasonic bath.....	22
4.1 คลื่นความถี่จาก Oscilloscope เมื่อใช้คริสตัลความถี่ 4 MHz.....	24
4.2 คลื่นความถี่จาก Oscilloscope เมื่อใช้คริสตัลความถี่ 6 MHz.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 คลื่นความถี่จาก Oscilloscope เมื่อใช้คริสตัลความถี่ 8 MHz.....	25
4.4 คลื่นความถี่จาก Oscilloscope เมื่อใช้คริสตัลความถี่ 10 MHz.....	26
4.5 กราฟแสดงความแตกต่างของการวัดในอากาศกับตรวจวัด TNT โดย QCM ที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มบาง	27
4.6 กราฟแสดงความแตกต่างของการตรวจวัดในอากาศกับตรวจวัด TNT โดย QCM ที่เคลือบฟิล์ม	27
4.7 กราฟแสดงความแตกต่างของการตรวจวัดในอากาศกับตรวจวัด TNT โดย QCM ที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มบาง.....	29
4.8 กราฟแสดงค่าความถี่ที่เปลี่ยนไป ( $\Delta f$ ) ของ QCM ที่เคลือบด้วย 18-Crown-6 ether ที่ความเข้มข้นต่างๆในอากาศและในสภาวะที่มี TNT เจือปน	29
4.9 กราฟแสดงความแตกต่างของการตรวจวัดในอากาศกับตรวจวัด TNT โดย QCM ที่เคลือบฟิล์ม.....	31
4.10 กราฟแสดงการตรวจวัด TNT ด้วย QCM เซนเซอร์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether ที่ปริมาณ TNT ต่างๆ	34
4.11 กราฟแสดงความแตกต่างของการตรวจวัดในสภาวะที่มี RDX เจือปนโดย QCM ที่เคลือบและไม่ได้เคลือบฟิล์มบาง.....	35
4.12 กราฟแสดงความแตกต่างของการตรวจวัดในสภาวะที่มี C4 เจือปนโดย QCM ที่เคลือบและไม่ได้เคลือบฟิล์มบาง.....	36
4.13 กราฟแสดงความแตกต่างของการตรวจวัดในสภาวะที่มี ANFO เจือปนโดย QCM ที่เคลือบและไม่ได้เคลือบฟิล์มบาง.....	36
4.14 โครงสร้างของ RDX.....	38
4.11 โครงสร้างของ TNT.....	38
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เปลี่ยนไปเทียบกับเวลาในสภาวะที่มี TNT แบบเป็น cycle.....	39
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เปลี่ยนไปเทียบกับเวลาในสภาวะที่มี RDX แบบเป็น cycle.....	39
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เปลี่ยนไปเทียบกับเวลาในสภาวะที่มี C4 แบบเป็น cycle.....	40
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เปลี่ยนไปเทียบกับเวลาในสภาวะที่มี ANFO แบบเป็น cycle.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันวัตถุระเบิดนั้นถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งใน การทหาร การก่อการร้าย หรือ แม้แต่ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ โดยวัตถุระเบิดที่นิยมใช้กันหลักๆ ได้แก่ TNT , C4 , ANFO และ RDX แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ TNT เนื่องจากใช้งานได้ง่ายและสามารถสร้างแรงระเบิดได้ดี ซึ่ง การใช้วัตถุระเบิดต่างๆเหล่านี้อย่างไม่ควบคุม อาจทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ทั้ง ชีวิต ทรัพย์สิน รวมถึงสภาพแวดล้อมได้โดยตรงจากทั้ง การระเบิดและการปนเปื้อนของสารตั้งต้นต่างๆ ซึ่งจากปัจจัย ต่างๆเหล่านี้ทำให้ผู้วิจัยอยากที่จะพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับกับวัตถุระเบิดหรือสารตั้งต้นวัตถุ ระเบิดได้ ซึ่งในปัจจุบันการตรวจหาวัตถุระเบิดและสารตั้งต้นของวัตถุระเบิดนั้นมีมากมายหลากหลาย วิธีอาทิเช่นการตรวจหาโดยใช้ระบบเรดาร์ทะลุทะลวงผิวดินที่เรียกว่า GPR (GROUND PENETRATION RADAR) หรือการตรวจหาด้วยการใช้สถานี X-Ray เคลื่อนที่โดยการใช้อยานพาหนะที่ ติดอุปกรณ์ X-Ray (ระบบ Z-backscatter) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีในการตรวจหา นั้นจะมีข้อดีข้อเสียที่ แตกต่างกันไป แต่ในงานวิจัยฉบับนี้จะเน้นในการตรวจหากลิ่นไอของสารระเบิดโดยการเก็บตัวอย่าง (Remote Explosive Scent Tracing- REST) ซึ่งเทคนิคนี้จะใช้การสำรวจที่ด้วยการใช้สุนัขและหนู หรือใช้จมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Nose) หรือเซ็นเซอร์ความไวสูง (Highly Sensitive Sensor) ในการตรวจสอบระเบิดและวัตถุระเบิด ซึ่งเหมาะกับการงานปิดล้อมตรวจค้นเพื่อหาร่องรอยระเบิด, การตรวจวัตถุต้องสงสัย, การตรวจพื้นที่ต้องสงสัย

โดยวิธีการที่ผู้วิจัยได้เลือกใช้ในการตรวจวัดหากลิ่นไอของสารระเบิดคือวิธีการตรวจหากลิ่น ไอสารระเบิดโดยการเก็บตัวอย่าง (Remote Explosive Scent Tracing- REST) ด้วยการประยุกต์ใช้ ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์มาใช้เนื่องจากเล็งเห็นว่าความสำคัญของการเปลี่ยนแปลงของ กระบวนการต่างๆทั้งทางฟิสิกส์และทางเคมี โดยส่วนใหญ่จะมีที่มาจากจากการเปลี่ยนแปลงของมวลเข้า มาเกี่ยวข้องและมีราคาไม่สูงมากเมื่อเทียบกับวิธีตรวจวัดอื่นๆ โดยควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (Quartz crystal microbalance; QCM) เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งอาศัย หลักการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการสั่นของควอตซ์คริสตัลเรโซเนเตอร์ เมื่อมีการยึดติด การหลุดออก ของมวลหรือการเกิดความเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวของเรโซเนเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในสิ่งแวดล้อมที่หลากหลาย เช่น ภายใต้อากาศสุญญากาศ สภาพแวดล้อมที่เป็นแก๊ส(ใช้เป็นแก๊สเซนเซอร์ซึ่งมีการนำไปใช้เป็นครั้งแรก) และในปัจจุบันได้มีการนำไปใช้ภายใต้อากาศแวดล้อมที่เป็นของเหลวอีกด้วย เนื่องจากสามารถนำไปใช้ได้ในสิ่งแวดล้อมที่หลากหลาย ทำให้ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์มีการนำไปใช้ประโยชน์ในหลายด้าน เนื่องจากความสามารถตามธรรมชาติของQCMที่มีการตรวจวิเคราะห์ในเวลาจริง (มีความเป็นReal Time)

ในรายงานฉบับนี้ได้ทำการศึกษาการนำควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์มาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดหาสารตั้งต้นของวัตถุระเบิด โดยการวัดมวลของสารตั้งต้นของวัตถุระเบิดที่ตกสะสมบนควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ Crown Ether ที่ทำงานร่วมกับวงจรกำเนิดความถี่คริสตัลลออสซิลเลเตอร์แบบสัญญาณรบกวนต่ำ และบันทึกผลการทดลองด้วยโปรแกรมเก็บข้อมูลที่พัฒนาขึ้น ซึ่งสามารถแสดงผลการตอบสนองขณะมวลตกสะสมได้เลย (Real time)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ด้านคุณลักษณะและความสามารถในการใช้งาน
2. เพื่อนำควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ ไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเซนเซอร์ตรวจสอบสารตั้งต้นวัตถุระเบิด

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาคุณลักษณะและหลักการทำงานพื้นฐานของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์
2. ศึกษาคุณสมบัติสารตั้งต้นวัตถุระเบิด ( c4, Rdx, TNT, Anfo )
2. ทดลองวงจรและเซนเซอร์ที่จะนำไปใช้ในการตรวจวัดสารตั้งต้นวัตถุระเบิด
3. รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการตรวจวัดสารตั้งต้นวัตถุระเบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัย

รายละเอียด	ระยะเวลาในการดำเนินการ											
	มกราคม			กุมภาพันธ์			มีนาคม			เมษายน		
1. เคลือบผิว QCM			↔									
2. ศึกษาคุณลักษณะของสารตั้งต้นวัตถุระเบิด ได้แก่ TNT, C4 , Anfo และ Rdx				↔								
3. ทำการวัดไอระเหยของ TNT, C4, Anfo และ Rdx ด้วย QCM							↔	↔	↔			
4. วิเคราะห์ผลการวัด										↔	↔	
5. สรุปผลโครงการ												↔
6. จัดทำรายงาน												↔

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำอุปกรณ์ เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์และวิธีการต่างๆ มาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดมลความไวสูงได้
2. มีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีและหลักการพื้นฐานควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์
3. มีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีและนำควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ไปใช้ในการตรวจวัดมลความไวสูง
4. สามารถนำความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีและนำควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดสารตั้งต้นของวัตถุระเบิดชนิดอื่นๆได้อีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

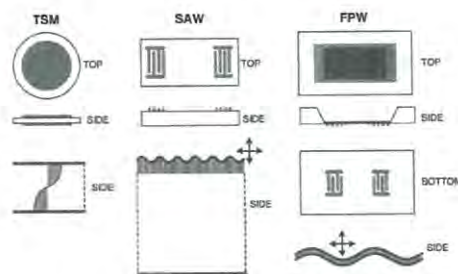
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เซนเซอร์วัดมวลที่มีพื้นฐานมาจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

เซนเซอร์วัดมวลจัดเป็นเซนเซอร์ทางเคมีชนิดหนึ่งซึ่งนิยมใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ โดยหลักการเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของมวลผ่านการเปลี่ยนแปลงของ oscillator เนื่องจากเซนเซอร์วัดมวลเป็นวัสดุที่มีขนาดเล็ก, มีความไวสูงและมีเสถียรภาพที่ดี ซึ่งเรียกว่าวัสดุชนิดนี้ว่า วัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยวัสดุดังกล่าวมีหลากหลายประเภทและนิยมมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีราคาไม่สูง สามารถตรวจวัดแรงกลต่างๆ เช่น แรงดัน ความเร่ง การสั่น แรงเครียด หรือแรงกระทำอื่นๆ โดยเปลี่ยนพลังงานกลต่างๆให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ในทางตรงกันข้าม เมื่อให้พลังงานไฟฟ้าแก่วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริก วัสดุนั้นก็จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้เช่นกัน โดยคุณสมบัตินี้จะเกิดขึ้นเฉพาะในวัสดุที่มีขั้วทางไฟฟ้าเท่านั้น สามารถพบได้ทั้งในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ แต่ที่นิยมนำมาใช้เป็นเซนเซอร์มากที่สุดคือ ควอตซ์ เนื่องจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกผลึกเดี่ยวมีค่าคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกค่อนข้างสูงและเสถียร โดยการทำให้เซนเซอร์จะเลือกใช้ผลึกควอตซ์ที่มีการตัดผลึกแบบ AT-CUT เพราะพื้นที่หน้าตัดกว้างเหมาะแก่การนำมาใช้เป็นเซนเซอร์ ผลึกควอตซ์ที่มีการตัดผลึกแบบ AT-CUT เมื่อได้รับสัญญาณทางไฟฟ้าจะสั่นในลักษณะที่เรียกว่า Thickness Shear Mode (TSM)

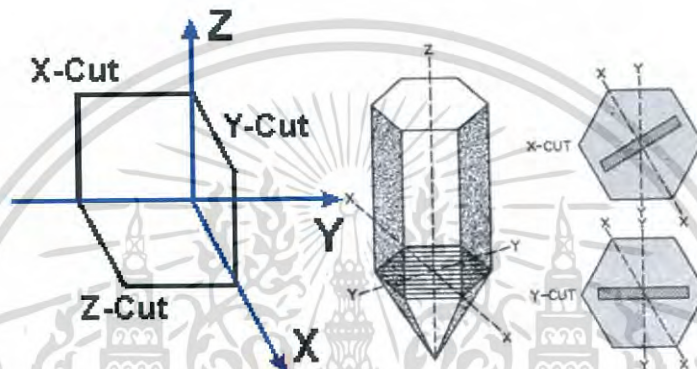
ความเหมาะสมของการเลือกใช้เซนเซอร์ชนิดนี้และชั้นของวัสดุที่มีคุณสมบัติมีความไวทางเคมีจะเห็นได้จากการที่สัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์นั้นจะเปลี่ยนแปลงชัดเจนเมื่อมวลนั้นสามารถทำปฏิกิริยากับวัสดุที่มีความไวทางเคมีนั้นๆได้ ในทางตรงข้าม ถ้ามวลที่ตรวจวัดไม่สามารถทำปฏิกิริยากับวัสดุที่มีความไว ก็จะทำให้พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของเซนเซอร์นั้นเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย



รูปที่ 2.1 ลักษณะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแต่ละชนิดที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

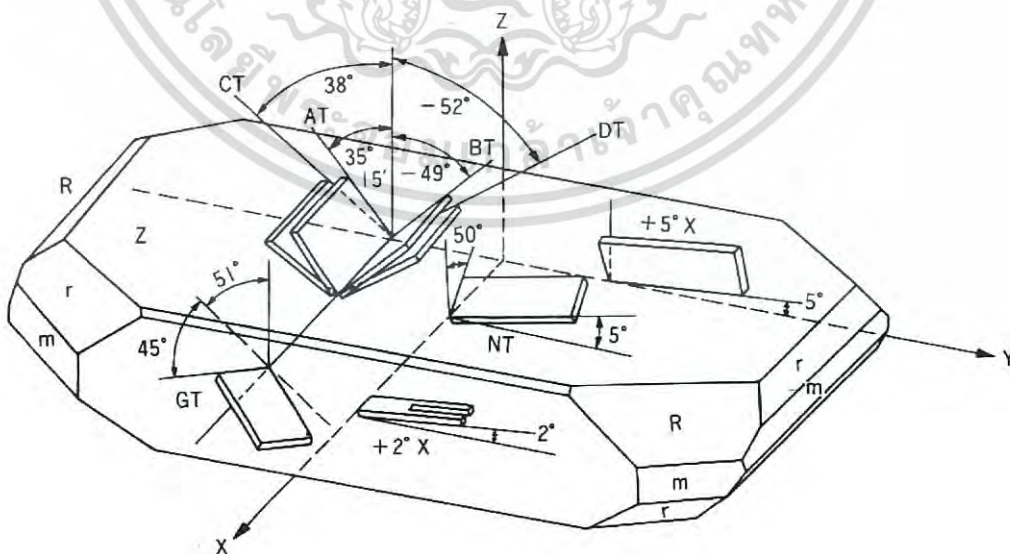
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควอตซ์ คือวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดหนึ่งที่ยินมนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์มากที่สุด โดยผลึกควอตซ์มีลักษณะเป็นผลึกหกเหลี่ยม และแกนสมมาตรไม่ผ่านศูนย์กลางของผลึก ผลึกควอตซ์มีการตัดหลายแบบเพื่อนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน หลักการตัดผลึกควอตซ์ในเบื้องต้นแบ่งได้ 2 ประเภท คือการตัดควอตซ์ตามแนวแกนและตามระนาบสามมิติ โดยการตัดควอตซ์ตามแนวแกนคือการตัดควอตซ์ในแนวแกน x, y หรือ z เพียงแกนใดแกนหนึ่งเท่านั้น ซึ่งจะเรียกการตัดแบบนี้ว่า x-cut , y-cut และ z-cut โดยจะมีลักษณะตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างการตัดผลึกแบบ x-cut , y-cut และ z-cut

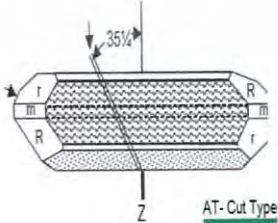
ส่วนการตัดควอตซ์ตามระนาบสามมิตินั้นมีการตัดออกมาใช้มากมายหลายแบบ ตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างการตัดผลึกตามแนวระนาบแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานฉบับนี้จะพูดถึงการใช้ควอตซ์ที่ถูกตัดแบบ AT-CUT มาใช้งานซึ่งการตัดผลึกแบบนี้ทำให้ผลึกมีการสั่นในแบบ Thickness Shear Mode ซึ่งจะกล่าวถึงในตอนถัดไป

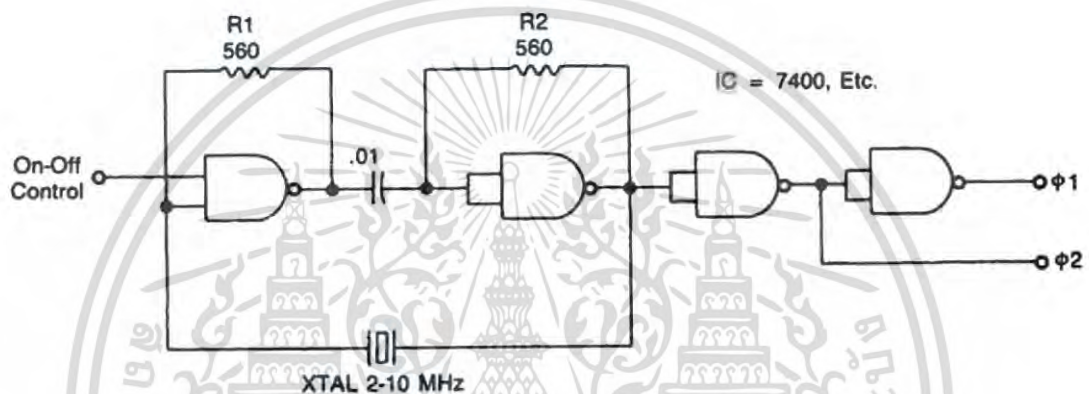
CRYSTAL CUT	ย่านความถี่ที่ทำงาน (MHZ)	โหมดการสั่น	รายละเอียด
AT	0.5 - 300	Thickness shear	<p>การตัดผลึกแบบAT-CUT เป็นการตัดผลึกที่นิยมใช้มากที่สุดที่ถูกพัฒนาขึ้นในปี 1934 โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีย่านความถี่การใช้งานในช่วง 500 kHz ถึงประมาณ 300 MHz โดยการตัดคริสตัลแบบAT-CUTจะเป็นการตัดผลึกที่แกน X ของคริสตัลโดยจะตัดให้เป็นแผ่นบางที่ทำมุมอยู่ในช่วง<math>35^{\circ} 5'</math> จนถึง<math>35^{\circ} 25'</math> กับแกน Z โดยค่าของความถี่ที่ได้นั้น จะขึ้นกับมุมลึบตาที่ตัดและทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิ <math>-55^{\circ}\text{C}</math> จนถึง <math>125^{\circ}\text{C}</math> แต่ช่วงอุณหภูมิที่ทำงานได้ดีที่สุดคือ <math>25-35^{\circ}\text{C}</math> มีความไวต่อความเครียดเชิงกลสูง โดยจะทำงานที่ความถี่พื้นฐานในช่วง 1 – 30 MHz และที่ 3<sup>rd</sup> overtoneจะอยู่ที่ 30 – 90 MHz และ 5<sup>th</sup> overtone จะอยู่ที่ 90 – 150 MHz ข้อดีของการตัดแบบ AT-CUT คือ มีความไวค่อนข้างสูง มีเสถียรภาพของความถี่สูง มีช่วงการทำงานกว้างสัญญาณรบกวนต่ำ และ ต้นทุนรวมถึงกระบวนการผลิตไม่สูงและยากมาก โดยภาพของการตัดผลึกแบบAT-CUT เป็นดังนี้</p>  <p>The diagram shows a cross-section of an AT-cut quartz crystal. It is a rectangular block with a central horizontal axis labeled 'Z'. The top and bottom surfaces are labeled 'r' and 'm' respectively. The side surfaces are labeled 'R'. A dashed line indicates the angle of the cut, which is 35.5 degrees relative to the Z-axis. The text 'AT-Cut Type' is written below the diagram.</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 หลักการของ Thickness Shear Mode Resonator (TSM)

Thickness Shear Mode Resonator นั้นจะสั่นในลักษณะของการรับแรงต้านข้างที่เกิดจากแรงเฉือนของควอตซ์ โดยมีมวล ( $M$ ) หรือความหนาของฟิล์ม ( $t$ ) และความยาวคลื่นที่เกิดขึ้น ( $\lambda$ ) ทำให้เกิดคาบการสั่น ( $n$ ) ที่ความถี่คงที่ค่าหนึ่ง

## 2.3 วงจรออสซิลเลเตอร์



รูปที่ 2.4 IC-compatible crystal oscillator circuit

วงจรกำเนิดสัญญาณหรือวงจรออสซิลเลเตอร์ (Waveform Generator or Oscillator) เป็นวงจรหนึ่งที่มีความสำคัญในทางอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสาร โดยจะแบ่งได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ คือ วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal waveform) และวงจรกำเนิดสัญญาณรูปอื่นๆ ที่ไม่ใช่ไซน์ (Non - Sinusoidal waveform)

โดยการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ที่ง่ายที่สุด ทำได้โดยใช้วงจรขยายที่มีอัตราขยายสูงเช่น Op-Amp ต่อกับเครือข่าย RC หรือ LC ในลักษณะป้อนกลับแบบบวก (Positive Feedback) ความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ลักษณะนี้ควบคุมได้โดยการปรับค่าความต้านทาน ( $R$ ) และค่าความเก็บประจุ ( $C$ ) บางตัวในวงจร ทั้งนี้จะต้องให้สอดคล้องกับเงื่อนไขเฉพาะที่จะทำให้เกิดการแกว่ง (Oscillation) ขนาดของสัญญาณไซน์ ที่ถูกสร้างขึ้นจะถูกจำกัดโดยย่านการทำงานเชิงเส้นของวงจรขยายที่ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ลักษณะนี้จึงถูกเรียกว่าเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเชิงเส้น (Linear Oscillators)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรอซึเลเตอร์แต่ละแบบจะกำเนิดสัญญาณออกมาตามรูปแบบของวงจรที่ใช้ในการกำเนิดสัญญาณ โดยส่วนใหญ่สัญญาณจะมีขนาดและความถี่คงที่ โดยแบ่งออกได้หลายแบบตามอุปกรณ์ที่ใช้งาน ซึ่งวงจรรกำเนิดความถี่แบบคริสตัล(Crystal) ใช้ในงานย่านความถี่สูง เสถียรภาพของความถี่ดี ข้อเสีย คือ เปลี่ยนแปลงความถี่ได้ยาก จะต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับการใช้งาน

## 2.4 วัตถุระเบิด

สารที่อยู่ในสถานะใดๆไม่ว่าจะเป็นของแข็ง, ของเหลวหรือ ก๊าซ เมื่อได้รับการกระทบ, เสียตสีหรือได้รับความร้อนที่ส่วนใดส่วนหนึ่งจนเพียงพอแล้ว โมลของสารนั้นทั้งก่อนก็จะเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นสารอื่นที่มีความเสถียรมากกว่าเดิมในทันที สารที่เกิดใหม่ทั้งหมดนี้มักจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้น และมีสถานะเกือบทั้งหมดเป็นแก๊ส อีกทั้งยังเกิดความร้อนและมักมีเปลวไฟเกิดขึ้นด้วย ดังนั้นการระเบิด (Explosion) จึงเป็นผลที่ได้จากการที่วัตถุระเบิดนั้นได้ปลดปล่อยพลังงานออกอย่างรวดเร็วจนเกิดกำลังผลักดันขึ้นอย่างรุนแรง

### 2.4.1 การแบ่งประเภทของวัตถุระเบิด

วัตถุระเบิดที่ใช้ทางการทหารเป็นสารชนิดหนึ่ง ซึ่งเกิดปฏิกิริยาทางเคมี เมื่อได้รับความร้อน การเสียตสี การกระทบ หรือได้รับแรงกระตุ้นอย่างเหมาะสม ทำให้เกิดเป็นสารชนิดใหม่ขึ้น หรือกลายเป็นแก๊สจำนวนมากๆ สามารถแยกชนิดของวัตถุระเบิดแรงต่ำและวัตถุระเบิดแรงสูงด้วยอัตราความเร็วในการระเบิด (เป็น ฟุต หรือเมตร/วินาที) ซึ่งผลจากการระเบิดนี้เป็นลักษณะเฉพาะของวัตถุระเบิดแต่ละชนิด

วัตถุระเบิดแรงต่ำ เช่นดินดำและดินควันน้อย เกิดจากการเผาไหม้จากสถานะของแข็งไปเป็นแก๊สอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอ ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ในทางการทหารใช้วัตถุระเบิดแรงต่ำเป็นหลักโดยใช้เป็นดินขับในกระสุนและใช้สำหรับเป็นไส้ขนวน เช่น ขนวนฝักแควเวลาอัตราเร็วในการระเบิดจนถึง 400 เมตร หรือ 1,312 ฟุต/วินาที

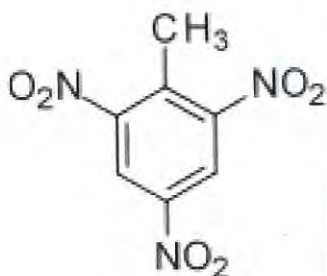
วัตถุระเบิดแรงสูง เช่นดินระเบิด ทีเอ็นที และดินระเบิดไดนาไมท์ เกิดจากการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นแก๊สในทันทีทันใด ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า “การระเบิด” วัตถุระเบิดแรงสูงจะระเบิดขึ้นด้วยความร้อน หรือด้วยการกระทบกระเทือนอย่างแรงซึ่งทำให้เกิดคลื่นระเบิดขึ้น คลื่นระเบิดนี้จะเคลื่อนที่ผ่านวัตถุในทันทีทันใดทำให้วัตถุระเบิดเปลี่ยนสภาพจากของแข็งเป็นแก๊ส แก๊สที่เกิดขึ้นทันทีทันใดและการขยายตัวอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการแตกหักและสามารถที่จะผลักดันสิ่งต่อต้านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดใหญ่ซึ่งอยู่ในทิศทางของมันได้ การระเบิดของวัตถุระเบิดมีอัตราเร็วเป็นฟุต/วินาที การใช้งานทางการทหารใช้ในการทำลาย, ใช้เป็นดินระเบิดในกระสุนปืนใหญ่และลูกระเบิดที่ทิ้งจากเครื่องบิน ซึ่งมีอัตราในการระเบิดตั้งแต่ 1,000 เมตร หรือ 3,280 ฟุต/วินาที จนถึง 8,500 เมตร หรือ 27,888 ฟุต/วินาที

## 2.4.2 วัตถุระเบิดทางการทหารที่ได้รับความนิยม

### 2.4.2.1 TNT (Trinitrotoluene)

TNT หรือ "ไตรไนโตรโทลูอีน"(Trinitrotoluene) มีสูตรทางเคมีคือ  $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$  ใช้เป็นตัวเร่งในการสังเคราะห์เคมีที่ใช้เป็นวัตถุระเบิด ซึ่งสารเคมีดังกล่าวนี้ มีการสังเคราะห์ขึ้นเป็นครั้งแรก โดย โจเซฟ วิลแบรนต์ (Joseph Wilbrand) เมื่อ ค.ศ. 1863 และมีการผลิตเป็นปริมาณมากครั้งแรกในเยอรมนี เมื่อ ค.ศ. 1891 ด้วยการที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง ทำให้ที่เอ็นทีเป็นเกณฑ์มาตรฐานในการวัดความเข้มของระเบิดและวัตถุระเบิดอื่นๆ โดยเทียบประสิทธิภาพกับที่เอ็นที เรียกว่า "TNT equivalent" โดย TNT เป็นดินระเบิดแรงสูงซึ่งมีอัตราเร็วในการระเบิด 22,600 ฟุต/วินาที มีความไวต่อการระเบิดน้อยที่สุดในจำนวนวัตถุระเบิดแรงสูงทางการทหาร ดินระเบิด TNT มีความคงทนในทุก ๆ สภาพอากาศ และไม่กระทบกระเทือนต่อความชื้นและเป็นดินระเบิดชนิดหนึ่งในบรรดาวัตถุระเบิดทางการทหารซึ่งมีความทนทานต่อการใช้ได้น้ำ TNT มีลักษณะเป็นผลึกสีเหลือง เรียวคล้ายเข็ม ละลายในน้ำได้น้อยแต่จะละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น ether, acetone, benzene และ pyridine เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า  $80.35^{\circ}C$  ซึ่ง TNT มีความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์เมื่อสัมผัสผิวหนังหนึ่งอาจจะทำให้เกิดอาการแพ้ได้ มีความสามารถในการละลายน้ำเท่ากับ 130 มิลลิกรัม/ลิตร ที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}C$  และเมื่อนำสารละลายนี้ไปต้ม จะเกิดการระเบิดอย่างรุนแรง ดินระเบิด TNT โดยส่วนใหญ่จะบรรจุมาในลักษณะเป็นแท่ง 4 ขนาด คือ 1/4ปอนด์, 1/2 ปอนด์, 1 ปอนด์ และ 8ปอนด์ ซึ่งแต่ละขนาดก็จะมีเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกันไป



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ TNT

#### 2.4.2.2 แอมโมเนียมไนเตรท (Ammonium Nitrate)

ปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรท (ammonium nitrate) และกลุ่มไนเตรตต่างๆเช่น แคลเซียมแอมโมเนียมไนเตรท (calcium ammonium nitrate) มีลักษณะเป็นผงสีขาว คล้ายน้ำตาลทราย จัดอยู่ในกลุ่มวัตถุระเบิด ใช้ทำระเบิดแรงดันสูง นิยมใช้ในการทำระเบิดแสงเครื่อง การนำปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรตมาใช้เป็นวัตถุระเบิดในการทำระเบิดโดยนำไปผสมกับเชื้อเพลิง หรือที่นิยมเรียกกันว่า ระเบิด ANFO ซึ่งย่อจาก Ammonium Nitrate-Fuel Oil เป็นส่วนผสมระหว่างสารแอมโมเนียมไนเตรทและน้ำมันเชื้อเพลิง มักจะเป็นน้ำมันดีเซล , น้ำมันเครื่อง แต่สามารถใช้น้ำมันก๊าดได้ เนื่องจากเป็นระเบิดที่ใช้งานง่าย และมีราคาถูก จึงนิยมใช้มากในเมืองถ่านหิน เหมืองแร่โลหะ และอื่นๆ เนื่องจากระเบิดแบบนี้ใช้ปุ๋ยเคมีเป็นส่วนประกอบ จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อว่า ระเบิดปุ๋ย (fertilizer bomb) แอมโมเนียมไนเตรท เป็นวัตถุระเบิดที่มีความไวในการระเบิดน้อยที่สุดในบรรดาวัตถุระเบิดทางทหาร จึงต้องมีดินขยายการระเบิดในการระเบิด เนื่องจาก ดินระเบิดแอมโมเนียมไนเตรท มีความไวในการระเบิดน้อย จึงนำมาใช้ผสมสำหรับการใช้เป็นดินระเบิดตัด หรือระเบิดแตกหัก ส่วนมากจะนำไปใช้ในด้านอุตสาหกรรมเหมืองแร่ หรือการขุดดินแอมโมเนียมไนเตรทจะขึ้นเมื่อสัมผัสอากาศ ดังนั้นจึงต้องบรรจุให้ดีเพื่อป้องกันมิให้อากาศเข้าได้ ฉะนั้นวัตถุระเบิดชนิดนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ใต้น้ำ นอกจากจะมีการป้องกันอย่างเฉพาะเจาะจง โดยกลไกการระเบิดของวัตถุระเบิดชนิดนี้เริ่มต้นจากการระเบิดของเชื้อปะทุ และปลดปล่อย คลื่นระเบิด (detonation wave) ซึ่งมีความเร็วประมาณ 3.2-4.8 กิโลเมตร/วินาทีออกมา ส่งผลให้สารแอมโมเนียมไนเตรทในเม็ดปุ๋ยระเบิดกลายเป็นแก๊สทันที และจุดเชื้อเพลิงให้ลุกไหม้ พลังงานจากคลื่นระเบิดที่ทะลุผ่านสารแอมโมเนียมไนเตรททำให้โมเลกุลสลายตัว อะตอมออกซิเจนถูกปลดปล่อยออกมา และรวมตัวเป็นก๊าซออกซิเจนซึ่งเร่งปฏิกิริยาหรือกระบวนการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ เพื่อให้เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว จะได้ผลิตผลต่อเนื่องเป็นแก๊สร้อนต่างๆโดยแก๊สร้อนที่เกิดในเวลาสั้นๆ ไม่ช้ากว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สั้นนี้ ทำให้เกิดคลื่นความดัน (pressure wave) ซึ่งเคลื่อนที่เร็วเท่าอัตราเร็วเสียง (330 เมตร หรือ 1,100 ฟุต/วินาที) คลื่นนี้อาจทำอันตรายต่อชีวิต วัตถุ สิ่งของต่างๆ โดยรอบ นอกจากนี้ ความร้อนสูงซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ยังทำให้วัตถุโดยรอบติดไฟได้



รูปที่ 2.6 รูปร่างของวัตถุระเบิดชนิดแอมโมเนียมไนเตรต (ammonium nitrate)

#### 2.4.2.3 RDX และคอมโปสิชัน-4 (Composition-4 หรือ C-4)

C-4 เป็นระเบิดพลาสติก (Plastic Explosive หรือ Plastique) ซึ่งมีลักษณะพิเศษคือเป็นวัสดุเหนียวคล้ายดินน้ำมันสามารถปั้นเป็นรูปต่างๆได้ ที่รู้จักกันดีอีกอย่างคือ Semtex โดยระเบิดพลาสติกชนิดแรกคือ Gelignite คิดค้นขึ้นโดย Alfred Noble ในค.ศ.1875 ต่อมาได้รับการพัฒนาในสงครามโลกครั้งที่สองเป็น Noble 808 และถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในการจารกรรมทำลายกองทัพนาซี ซึ่งได้มีการพัฒนาสาร RDX ขึ้นมาคำว่า RDX ย่อมาจาก Research Development Explosive หรือ Royal Demolition Explosive ซึ่งมีชื่อทางการว่า Cyclotrimethylene-Trinitramine เป็นวัตถุระเบิดที่มีความไวในการระเบิดมาก และมีอำนาจในการทำลายสูง RDX ใช้เป็นวัตถุระเบิดหลักในเชื้อปะทุไฟฟ้า M6 และเชื้อปะทุขบวนการ M7 ดินระเบิดชนิดนี้ถ้าทำให้หมดความไวในการระเบิดแล้ว สามารถใช้เป็นดินระเบิดชนิดอื่นๆ เช่น ดินระเบิดคอมโปสิชัน เอ, บี หรือ คอมโปสิชัน ซี กล่าวคือระเบิดซีไฟร์ (C-4) ย่อมาจากคำว่า Composition 4 ซึ่งหมายถึงส่วนประกอบ 4 อย่างประกอบด้วย RDX 91% , di-2-ethylhexyl sebacate 5.3 % , Polyisobutylene (พอลิไอโซบิวทิลีน) 2.1% และน้ำมัน (Motor oil) 1.6% โดย RDX คือวัตถุระเบิดหลักที่ผสมอยู่ใน C-4 โดยผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับส่วนผสมอื่นๆเพื่อให้ไม่ระเบิดได้ง่ายเมื่อถูกความร้อนหรือได้รับการกระแทก อีกทั้งยังมีความอ่อนนิ่มจนทำให้สามารถปั้นได้ ในการผลิต C-4 จะใช้สาร RDX ในรูปผงละลายกับน้ำ แล้วเติมตัวประสานคือ Polyisobutylene ผสมกับสาร Di-2-ethylhexyl sebacate จนละลายเข้าด้วยกันแล้วทำการผสมน้ำมันเพื่อช่วยให้ขึ้นรูปเป็นก้อนได้ง่าย เมื่อเอาภาคลั่นและทำให้น้ำระเหยไปจะได้วัสดุที่มีรูปร่างคล้ายดินน้ำมัน C-4 จะระเบิดได้เมื่อมีพลังงานเข้าไปกระตุ้น (kick-off) ให้เกิดกระบวนการทางเคมี ถ้านำไม้ขีดไฟไปเผา C-4 ก็จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างช้าๆเหมือนไฟติดดินน้ำมัน หรือแม้แต่การเอาปืนไปยิง C-4 ก็ไม่ระเบิด มันจะระเบิดต่อเมื่อมีตัวจุด (detonator) ซึ่งใช้กระแสไฟฟ้า เมื่อ C-4 ระเบิดนั้นจะเกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรง ปล່อยแก๊สหลายชนิดออกไปในทุกทิศทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ไนโตรเจน โดย C-4 ในปริมาณต่ำกว่า 1 ปอนด์สามารถทำให้มนุษย์เสียชีวิตได้อย่างง่ายดาย รถบรรทุกสามารถพังทลายได้ด้วย C-4 ปริมาณครึ่งกิโลกรัม ซึ่งระเบิดพลาสติกต่าง ๆ นั้น เหมาะสำหรับการระเบิดทำลายเนื่องจากสามารถปั้นในเข้ากับโครงสร้างที่ต้องการทำลายได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการระเบิดที่รุนแรงและหนักแน่นด้วย ความเร็วสูงมาก อย่างไรก็ตาม ไม่เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีราคาแพงกว่าวัสดุระเบิดอื่นๆมาก

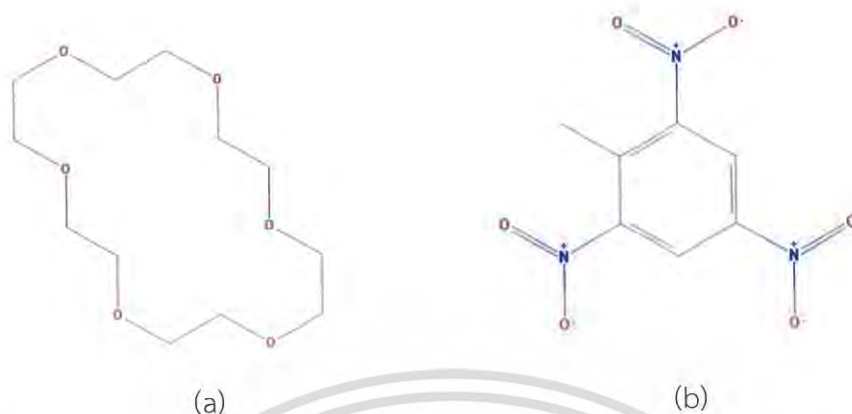


รูปที่ 2.7 รูปร่างของระเบิดชนิดคอมโพสิชัน-4 (Composition-4 : C-4)

## 2.5 Sensitive Material

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้ฟิล์มบางของ 18-Crown-6 ether ซึ่งมีโครงสร้างตามรูปที่ 2.10 และใช้สารที่มีลักษณะเป็นโพลีเมอร์คือ Polymethylmethacrylate (PMMA) มาใช้ในการสร้างเนื้อฟิล์มเพื่อยึดเกาะกับผิว QCM โดยสมบัติต่างๆของสารทั้ง 2 ชนิดมีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



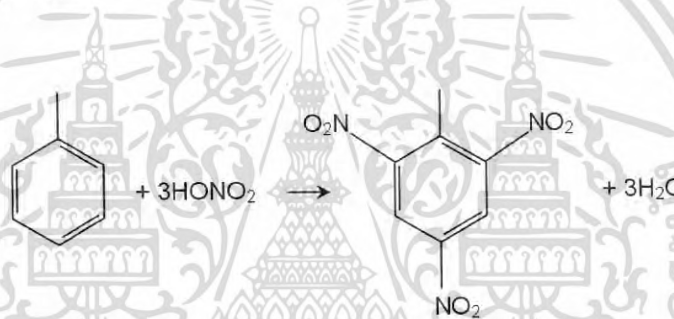
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของ 18-Crown-6 ether(a) และ 2,4,6-TRINITROTOLUENE (b)

สารประเภท crown ether นั้นเป็นสารที่ถูกค้นพบในช่วงปลายทศวรรษที่ 1960 ชาลส์ เพเดอร์สัน (Charles J. Pederson) นักเคมีชาวอเมริกันได้สังเคราะห์โมเลกุลหน้าตาแปลกประหลาดขึ้นมา และเขาตั้งชื่อมันว่า “คราวน์อีเทอร์” (Crown ether) เพราะรูปร่างทางเคมีที่มีความคล้ายคลึงกับมงกุฎ ไม่เพียงแต่รูปร่างของโมเลกุลที่มีลักษณะไม่เหมือนใคร สมบัติบางประการของคราวน์อีเธอร์ยังโดดเด่นจนน่าจับตามองอีกด้วยโมเลกุลรูปมงกุฎที่เขาสังเคราะห์ขึ้นสามารถนำไปครอบไอออนของโลหะ เช่น โซเดียมหรือโพแทสเซียมพร้อมกับตรึงโลหะชนิดนั้นๆ ให้อยู่ภายในช่องว่างโดยไม่หลุดหายไปไหนซึ่งไม่เคยมีสารเคมีชนิดใดแสดงสมบัติเช่นนี้มาก่อน โดยคราวน์อีเทอร์มีส่วนประกอบของอะตอมที่ให้อิเล็กตรอน (donor atom) คือ ออกซิเจน จึงทำให้เหมาะกับการจับไอออนของโลหะได้ดี โดย 18-crown-6 ether นั้น เป็น สารประกอบโคออร์ดิเนชันชนิดหนึ่งซึ่งเรียกว่า แมโครไซคลิกพอลิอีเทอร์ (macrocyclic polyethers) ซึ่งมีคุณสมบัติในการทำหน้าที่เป็นโฮสต์ในการจับกับโลหะได้อย่างเหมาะสมเนื่องจาก ประกอบด้วยหน่วย  $-OCH_2CH_2-$  ซ้ำๆกันเป็นวง ในทางเคมีจะเรียกคุณสมบัติในการจับโลหะที่เกิดขึ้นแบบนี้ “ลิแกนด์” โดยลิแกนด์ คือ คือ ไอออนหรือโมเลกุลที่ล้อมรอบและสามารถจะเชื่อมต่อกับอะตอมหรือไอออนกลางซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นโลหะ หรือเป็นสารที่มีอะตอมของธาตุที่มี อิเล็กตรอนคู่อิสระอยู่ เช่น  $O, F, Br, OH, SCN, S^{2-}, CO, NH_3, H_2O$  เป็นต้น

พันธะระหว่างลิแกนด์ และอะตอมกลางเป็นพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ (ใช้คู่อิเล็กตรอนของลิแกนด์ สร้างพันธะ) ด้วยคุณสมบัตินี้สามารถทำให้ 18-crown-6 ether จับกับไอออนของโลหะ หรือ สารที่มีอิเล็กตรอนคู่อิสระอยู่ ซึ่งด้วยเหตุผลนี้ 18-crown-6 ether จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการตรวจวัด TNT เนื่องจาก TNT นั้นเป็นสารประกอบชนิดไนโตรอะโรมาติก ที่เกิดจากการที่ โทลูอิน

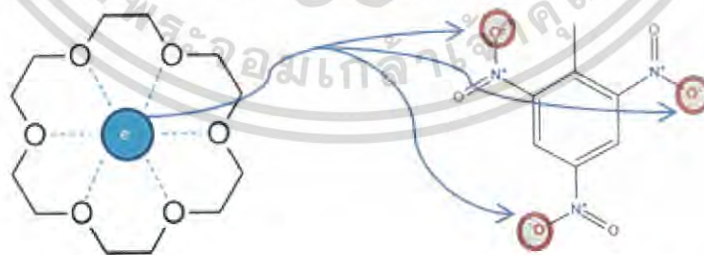
(Toluene) ถูกกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไนเตรชันโดยสารรีเอเจนต์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยานี้ คือ กรดไนโอริก (Nitric acid) ไม่ว่การณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรึงเข้มข้นและกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ซึ่งปฏิกิริยาไนเตรชันคือการแทนที่ด้วยหมู่ไนโตรเป็นปฏิกิริยาที่ไฮโดรเจนของเบนซีนถูกแทนที่ด้วยหมู่ไนโตร ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่สำคัญของสารประกอบอะโรมาติก เนื่องจากสามารถรีดิวซ์หมู่ไนโตรให้เป็นอะมิโนและฟังก์ชันอื่นๆ ที่อนุพันธ์จากหมู่อะมิโนได้ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยานี้เมื่อเกิดขึ้นกับโทลูอินคือ การแทนที่ด้วยไนโตรเนียม ไอออน นั่นเอง ซึ่งถ้าเกิดปฏิกิริยานี้เพียงครั้งเดียวจะได้สารประกอบที่มีชื่อว่า โมโนไนโตรโทลูอิน และเมื่อเติมสารรีเอเจนต์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไนเตรชันอีก 2 ครั้ง จะได้สารประกอบที่มีชื่อว่า ไดไนโตรโทลูอิน และ ไตรไนโตรโทลูอิน ตามลำดับ โดยปฏิกิริยาไนเตรชันที่ทำให้เกิดไตรไนโตรโทลูอินเป็นดังภาพที่ 2.12 โดยเราจะสังเกตเห็นได้ว่า TNT นั้นมีหมู่เมทิลของโทลูอินที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้หลายตัวรวมถึงไนโตรเนียม ไอออนเกิดขึ้นถึง 3 ตำแหน่ง ซึ่งไอออนและหมู่เมทิลเหล่านี้สามารถจับหรือเกิดพันธะกับ 18-crown-6 ether ได้นั่นเอง



รูปที่ 2.9 แสดงถึงปฏิกิริยาไนเตรชันที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์ไตรไนโตรโทลูอิน (TNT)

ซึ่งการจับกันของ 18-crown-6 ether กับ 2,4,6 trinitrotoluene สามารถเขียนเป็นภาพที่สามารถเข้าใจได้ง่ายดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.10 แสดงถึงปฏิกิริยาการจับกันของ 18-crown-6 ether กับ ไตรไนโตรโทลูอิน (TNT)

โดยการสร้างฟิล์มบางของ 18-Crown-6 ether ลงยังพื้นผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์นั้น ผู้วิจัยได้เลือกใช้การเคลือบด้วยวิธีการจุ่มเนื่องจากตัวคริสตัลนั้นบางมาก ๆ จึงทำให้เกิดการแตกหักได้ง่าย ซึ่งถ้าเลือกใช้วิธีอื่น อาทิเช่น การพิมพ์สกรีน (Printed Screen Coating) หรือ กระบวนการหมุนเคลือบ (spin coating) อาจจะทำให้คริสตัลเกิดความเสียหายได้ โดยการเคลือบไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยวิธีการจุ่ม (Dip coating) นั้นเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการศึกษาวิจัยทางวิศวกรรมเคมีและnanomaterial ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากใช้เทคนิคจุ่มเคลือบเพื่อสร้างฟิล์มบาง โดยส่วนมากจะใช้เทคนิคนี้ในการทำเซนเซอร์ชนิดMultilayer sensor coatings และใช้ในการสร้างวัสดุขนาดเล็กหรือนanomaterials เช่น วัสดุประเภท Hydrogels , Sol-Gel nanoparticle , self-assembled monolayers และ Layer-by-layer nanoparticle assemblies. เป็นต้น โดยขั้นตอนของการเคลือบด้วยวิธีการจุ่มที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้นั้น จะกล่าวถึงในบทต่อไป



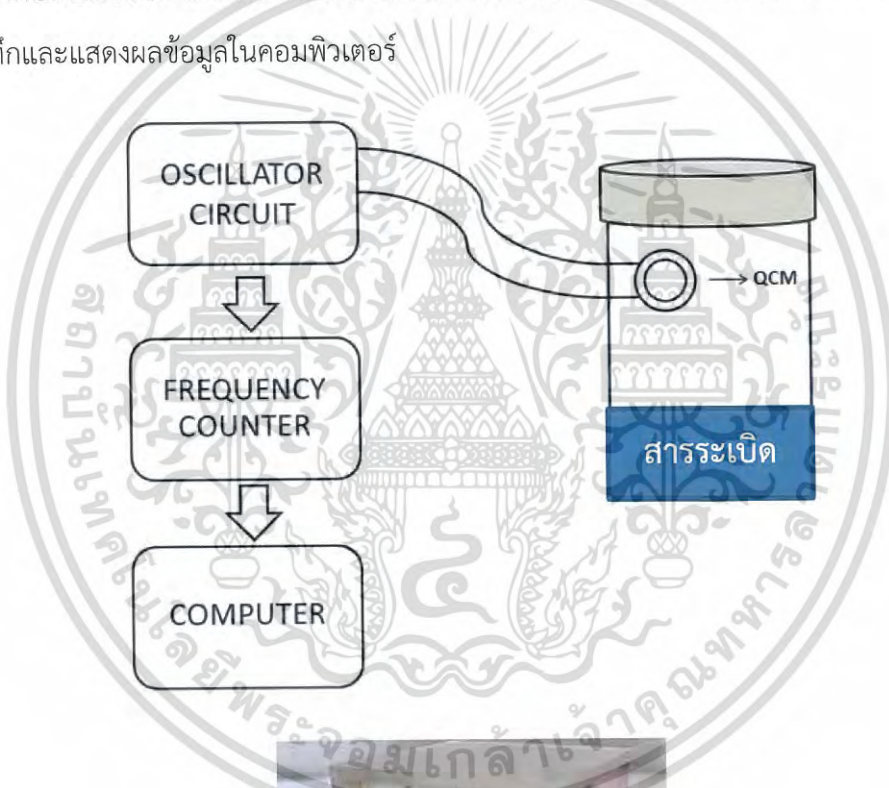
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบที่ใช้ในการตรวจวัดไอระเหยของสารวัตถุระเบิด

ภาพรวมของระบบตรวจวัดที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นไปดังภาพที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย แคมเบอ์ปิดขนาด 250 ลบ.ซม. ที่มีควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ติดอยู่ด้านบน และ TNT อยู่ด้านล่าง ซึ่ง QCM Sensor จะต่อกับวงจรกำเนิดความถี่เพื่อกำหนดสัญญาณความถี่ให้กับ QCM และอีกด้านหนึ่งจะต่อเข้ากับเครื่องนับค่าความถี่ เพื่อนำค่าความถี่ที่ได้จากเซนเซอร์ และเชื่อมต่อผ่านสายUSB เพื่อบันทึกและแสดงผลข้อมูลในคอมพิวเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 3.1 ระบบตรวจวัดไอระเหยสารวัตถุระเบิดที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 เครื่องมือตรวจวัด

เครื่องมือตรวจวัด (sensor) คืออุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณทางกายภาพและแปลงเป็นสัญญาณที่สามารถอ่านได้โดยผู้สังเกตการณ์ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนองานวิจัยที่ได้นำควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (QCM) ซึ่งเป็นเซนเซอร์วัดมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่มาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยของสารตั้งต้นวัตถุระเบิด ซึ่งควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (QCM) มีโครงสร้างดังรูปที่3.2

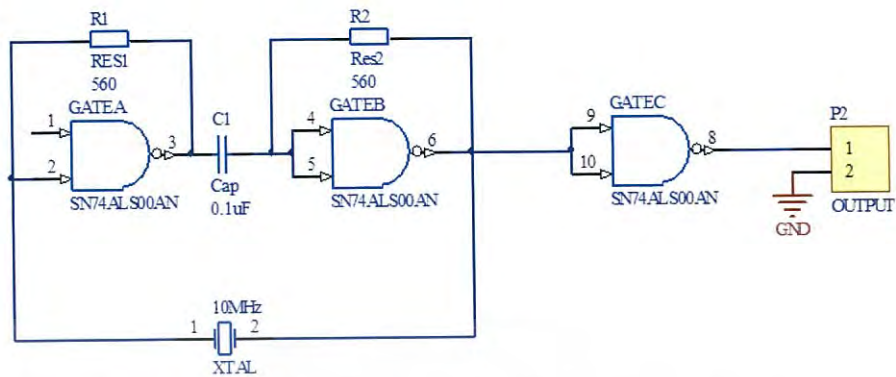


รูปที่ 3.2 โครงสร้างควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (QCM)

โดยทั่วไปผลึกควอตซ์นั้นจะไม่มีประจุไฟฟ้าจึงต้องทำให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าโดยการใช้โลหะมาเคลือบบนพื้นผิวเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดการนำไฟฟ้าในตัวของผลึกควอตซ์ได้ ส่วนในระบบการวัดของงานวิจัยชิ้นนี้นั้น ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (QCM) จะถูกต่อเข้ากับวงจรออสซิลเลเตอร์ กำเนิดความถี่เรโซแนนซ์ (ความถี่ธรรมชาติ) แก่ QCM เพื่อนำค่าความถี่ที่เกิดขึ้นมาใช้ในการเก็บข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด

### 3.1.2 วงจรกำเนิดความถี่ที่ใช้ในการทดลอง

วงจรที่เลือกใช้ในโครงงานฉบับนี้ คือวงจร IC-compatible crystal oscillator เป็นวงจรออสซิลเลเตอร์กำเนิดสัญญาณแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular waveform) ประกอบไปด้วย NAND gates ที่มีตัวต้านทานต่อกราวน์เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้ NAND gates ทำงานได้ปกติ และมี ตัวเก็บประจุ ทำหน้าที่เป็น DC Blocking ไม่ให้ไปกวนสัญญาณความถี่จากคริสตัล โดยวงจรนี้จะทำงานที่ ค่าเรโซแนนซ์ ของคริสตัลนั้นๆ โดยความถี่ของคริสตัลที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 1-12MHz ผู้ทดลองได้เลือกใช้วงจรนี้เนื่องจากสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 0°C -70°C และมีสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้น้อย เอกสารเนื่องจากตัว IC ถูกซื้อมาแล้ว จึงเหมาะในการนำมาประยุกต์ทำเป็นเครื่องมือวัดต่อไป โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



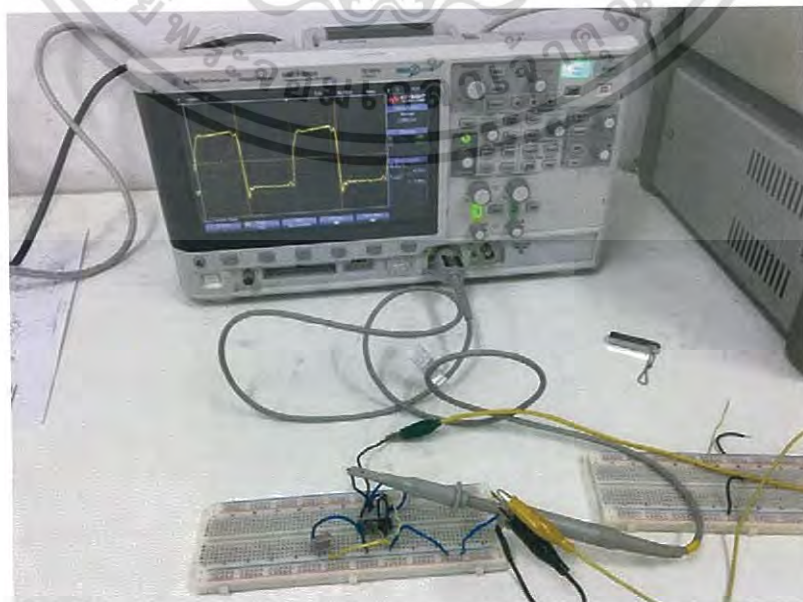
รูปที่ 3.3 IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT

### 3.1.3 อุปกรณ์วัดสัญญาณความถี่

#### 3.1.3.1 ออสซิลโลสโคป (Cathode Ray Oscilloscope;CRO)

เป็นเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในการวัดแสดงรูปและวิเคราะห์คลื่นสัญญาณต่างๆ ออกมาเป็นภาพปรากฏบนจอภาพให้เห็น โดยจะแสดงภาพออกมา เช่น การวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า การวัดความถี่ของสัญญาณ การวัดเฟสของสัญญาณ การวัดคาบของสัญญาณ และรวมถึงการวัดสัญญาณพัลส์ การอ่านค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเป็น Peak-To-Peak และค่าเวลาเป็นวินาที เป็นต้น

หลักการทำงานของออสซิลโลสโคป คือ จะใช้หลักการเบี่ยงเบนของลำอิเล็กตรอนภายในหลอดภาพรังสีแคโทด (Cathode Ray Tube;CRT) ด้วยระบบการเบี่ยงเบนทางไฟฟ้าสถิต หน้าที่หลักของออสซิลโลสโคป คือ รับสัญญาณ , แสดงภาพของสัญญาณที่รับและวิเคราะห์สัญญาณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ 3.4 ออสซิลโลสโคป อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 เครื่องวัดความถี่แบบดิจิตอล (Digital Frequency Counter)

เครื่องวัดความถี่แบบดิจิตอล (Digital Frequency Counter) ทำหน้าที่ วัดความถี่ กำหนดที่ได้จากวงจร Oscillator โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องนับความถี่แบบดิจิตอล ยี่ห้อ Ascel Electronic รุ่น AE20401 ซึ่งมาพร้อมกับซอฟต์แวร์ที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและแสดงผลได้แบบเรียลไทม์ (Real time) ดังรูป 3.5

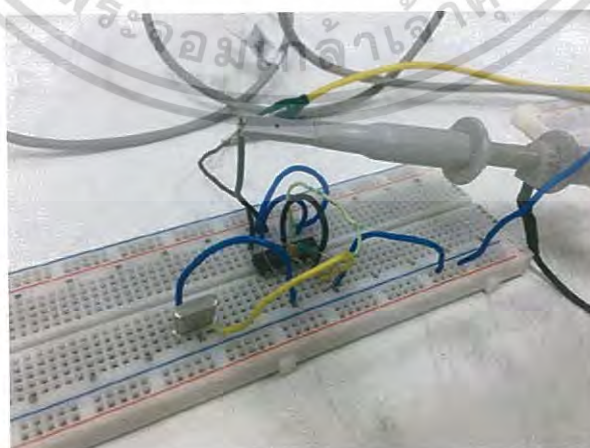


รูปที่ 3.5 เครื่องนับความถี่แบบดิจิตอล ยี่ห้อ Ascel Electronic รุ่น AE20401

## 3.2 การทดลอง

### 3.2.1 การทดลองบันทึกค่าความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์เมื่อใช้คริสตัลความถี่ที่ค่าต่างๆ

ในขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบวงจรออสซิลเลเตอร์ที่จะนำมาใช้ในการกำเนิดความถี่ให้กับคริสตัลเพื่อนำมาทำเป็นควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ โดยจะทดลองที่คริสตัลที่ค่าความถี่ต่างๆ เพื่อหาย่านการใช้งานที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 3.6 การทดลองหาวงจรและค่าความถี่ที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้เป็น QCM เซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

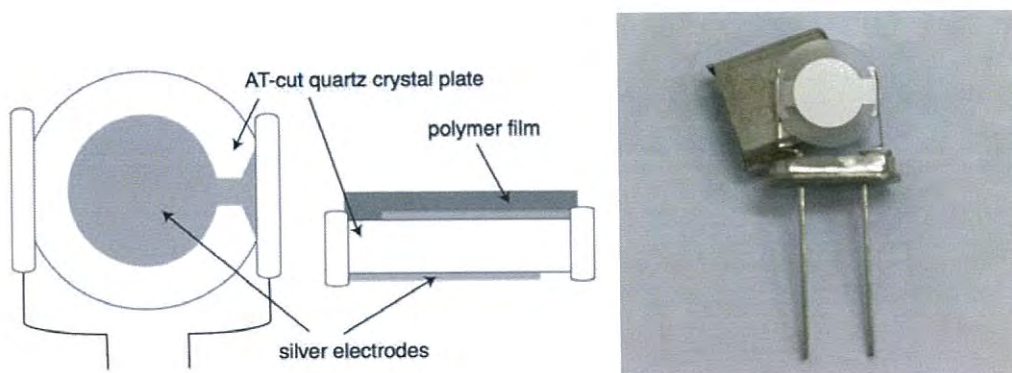
โดยวิธีการทดลองมีดังต่อไปนี้

1. ตัวอย่างรูป 3.3 โดยใช้วงจรออสซิลเลเตอร์แต่ละความถี่ของควอตซ์คริสตัลดังนี้
  - ควอตซ์คริสตัลความถี่ 4 MHz
  - ควอตซ์คริสตัลความถี่ 6 MHz
  - ควอตซ์คริสตัลความถี่ 8 MHz
  - ควอตซ์คริสตัลความถี่ 10 MHz
2. จัดระบบบันทึกค่าความถี่ต่างๆโดยใช้วงจร Oscillator ที่มีคริสตัลความถี่ 4 , 6 , 8 , 10 MHz ตามลำดับโดยต่อกับเครื่องนับความถี่ เพื่ออ่านและบันทึกค่าความถี่
3. ต่อสาย USB เพื่อติดต่อข้อมูลจากเครื่องนับความถี่แบบดิจิตอลไปยังหน้า จอคอมพิวเตอร์ และต่อออสซิลอสโคปเพื่อดูสัญญาณความถี่ที่เกิดขึ้นว่ามีลักษณะแบบใด
4. เปิด Switch อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดเพื่อเริ่มการทดลอง
5. ตรวจสอบการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องนับความถี่แบบดิจิตอลกับ คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ ที่ติดตั้งว่าได้เชื่อมต่อกันอยู่หรือยัง
6. เริ่มบันทึกค่าความถี่โดยหลังจากบันทึกเสร็จค่าความถี่จะถูกบันทึกเป็นไฟล์ Excel จากนั้นนำค่าความถี่ที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความถี่
7. สรุปและวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่าความถี่ที่เหมาะสมในการใช้งานเพื่อทดลองในตอนต่อไป

### 3.2.2 การเตรียมสารเพื่อสร้างฟิล์มเคลือบเซนเซอร์วัดมวลควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (QCM) เพื่อใช้ในการตรวจวัดสารตั้งต้นวัตถุระเบิดชนิดต่างๆ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนของการเตรียมฟิล์มของ 18-crown-6 ether เพื่อที่จะเคลือบไปยังผิวหน้าของ ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (QCM) โดยภาพของ QCM ก่อนทำการเคลือบผิว และโครงสร้างของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (QCM) หลังจากเคลือบฟิล์มแล้วจะแสดงดังรูปที่ 3.12 โดยการที่เราต้องเคลือบผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (QCM) ด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether นั้น เพื่อให้เซนเซอร์นั้นสามารถเลือกตรวจวัดเฉพาะไอระเหยของ TNT เท่านั้นตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่ 18-crown-6 ether นั้นไม่สามารถเกาะบนผิวของ QCM ได้ ทางผู้วิจัยจึงใช้สารที่มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ซึ่งก็คือ โพลีเมททิลเมธาไคลเต มาเพื่อช่วยยึดให้ 18-crown-6 ether สามารถเกาะอยู่บนผิวของคริสตัลได้ โดยการเคลือบด้วยวิธีการจุ่ม (Dip-coating) นั้นเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการศึกษาวิจัยทางวิศวกรรมเคมีและ nanomaterial ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากใช้เทคนิคจุ่มเคลือบเพื่อสร้างฟิล์มบางโดยขั้นตอนการเตรียมสารมีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



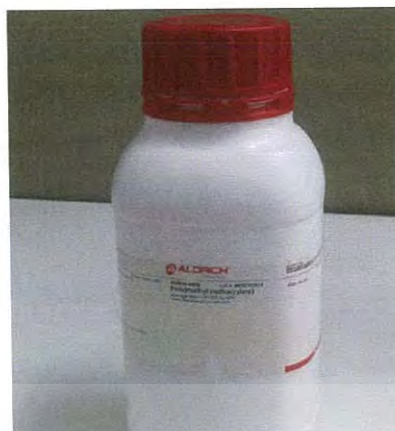
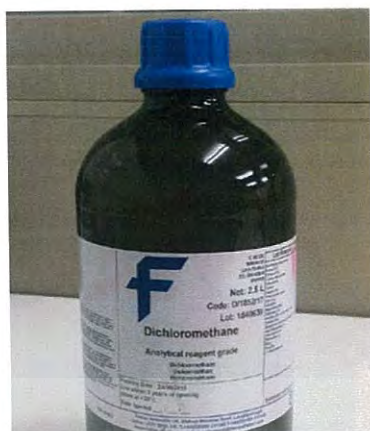
รูปที่ 3.7 QCM ที่ยังไม่ถูกเคลือบผิวและโครงสร้างของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (QCM) หลังจากเคลือบฟิล์มแล้ว

1. เตรียมสารละลายที่ความเข้มข้นตามต้องการโดยใช้
  - ไดคลอโรมีเทน 50 มิลลิลิตร
  - โพลีเมททิลเมทาไคเลต 0.5 กรัม
  - และใช้ 18 - crown - 6 ether ที่ปริมาณต่างๆ เป็นตัวกำหนดความเข้มข้นตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารเคลือบ QCM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Dichloromethane (b) Polymethyl Methacrylate (PMMA)  
(c) 18-Crown-6 ether

รูปที่ 3.9 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มเคลือบผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์

2. หลังจากเตรียมสารในบีกเกอร์แล้วนำไปเขย่าให้เข้ากันด้วย ultrasonic bath เป็นเวลา 15 นาที ก็จะได้สารละลายที่พร้อมสำหรับการเคลือบผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์



รูปที่ 3.10 เครื่องชั่งสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 Ultrasonic bath

3. เปิดกระป๋องคริสตัลออกและทำการทำความสะอาดผิวหน้าคริสตัลด้วยแอลกอฮอล์บริสุทธิ์
4. ทำการเคลือบเซนเซอร์ด้วยวิธีการจุ่มลงไปในการละลายที่เตรียมไว้

โดยหลังจากเคลือบเสร็จนำมาตรวจสอบหาความถี่เริ่มต้นของ QCM อีกครั้งเพื่อตรวจสอบว่ามวลของฟิล์มบางทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเพียงใดเพื่อที่จะได้ทราบค่าความถี่เริ่มต้นก่อนทำการทดลอง

### 3.2.3 การตรวจวัดสารวัดถูระเบิดโดยใช้เซนเซอร์วัดมวลควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (QCM) ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาว่า QCM ที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง 18-crown-6 ether นั้นมีผลอย่างไรต่อการตรวจวัด และมีผลอย่างไรต่อเซนเซอร์ ซึ่งจะใช้สารวัดถูระเบิด ที่ปริมาณเท่ากันที่ 4.6 กรัม

1. เตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้น  $10^{-3}$  M ,  $2 \times 10^{-3}$  M,  $4 \times 10^{-3}$  M,  $10^{-2}$  M โดยใช้
  - ไตคลอโรมีเทน 50 มิลลิลิตร
  - 18 – crown – 6 ether 0.0132g, 0.0264 g, 0.0528 g and 0.132 g ตามลำดับ
  - โพลีเมททิลเมทาไคเลต 0.5 กรัม

2. หลังจากเตรียมสารในบีกเกอร์แล้วนำไปเขย่าให้เข้ากันด้วย ultrasonic bath เป็นเวลา

15 นาที ก็จะได้สารละลายที่พร้อมสำหรับการเคลือบผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เปิดครอบป้องกันคริสตัลออกและทำการเคลือบผิวหน้าคริสตัลด้วย แอลกอฮอล์บริสุทธิ์
4. ทำการเคลือบเซนเซอร์ด้วยวิธีการจุ่มลงไปในส่วนละลายที่เตรียมไว้
5. นำเซนเซอร์มาต่อเข้ากับระบบวัดเพื่อทดสอบด้วยการวัดสารวัดถูระเบิดที่ปริมาณเท่าๆกัน คือ 4.6 กรัม
6. บันทึกผลตั้งแต่เริ่มต้นจนค่าความถี่ค่อยๆคงที่(เซนเซอร์ถึงจุดอิ่มตัว)แล้วนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟเพื่อสรุปผลการทดลองในตอนต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการทดลองที่ 3.2.1 บันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT โดยผู้ทดลองและผลการทดลองวัดความถี่ของวงจรแบบต่อเนื่อง

ในการทดลองตอนนี้เป็นการทดสอบวงจร IC-compatible crystal oscillator เป็นวงจร ออสซิลเลเตอร์กำเนิดสัญญาณแบบสี่เหลี่ยม(Rectangular waveform) โดยมีย่านการทำงานที่ความถี่ พื้นฐานอยู่ที่ 1 – 12 MHz. โดยทดลองออสซิลเลต คริสตัลที่ความถี่ต่างกันโดยผลที่ได้เป็นดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 ผลการทดลองบันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT ที่ใช้ความถี่ 4 MHz



รูปที่ 4.1 คลื่นความถี่จาก Oscilloscope เมื่อใช้คริสตัลความถี่ 4 MHz

จากรูปที่ 4.1 จะพบว่า ออสซิลเลตโคปสามารถจับสัญญาณความถี่ได้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยม (Square Wave) และอ่านความถี่ได้ที่ 4.00 MHz. ซึ่งตรงกับค่าของคริสตัลที่เราได้ออสซิลเลตสัญญาณให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

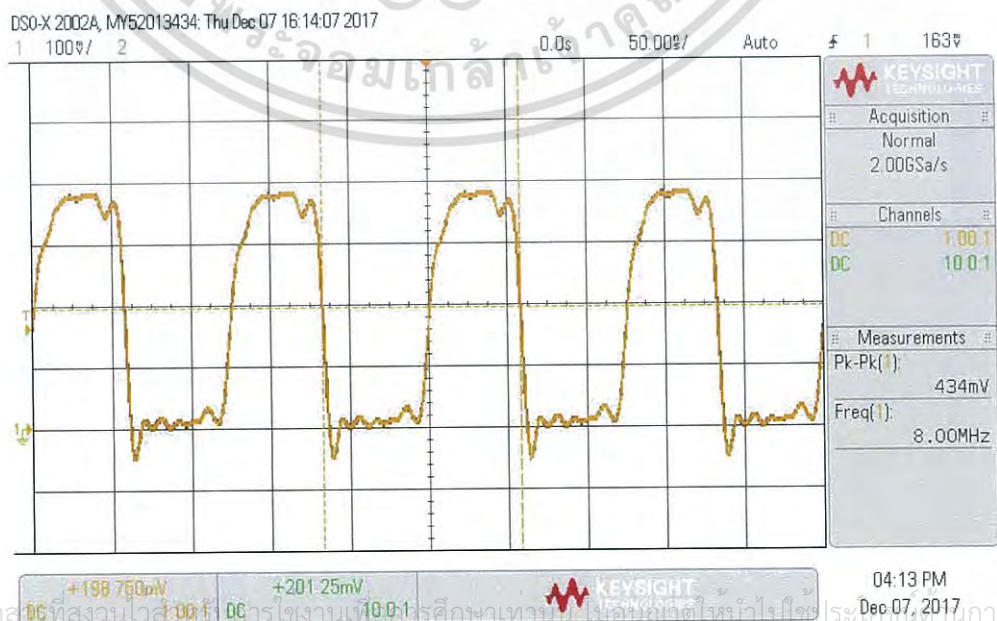
#### 4.1.2 ผลการทดลองที่ 3.2.1 บันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT ที่ใช้ความถี่ 6 MHz



รูปที่ 4.2 คลื่นความถี่จาก Oscilloscope เมื่อใช้คริสตัลความถี่ 6 MHz

จากรูปที่ 4.2 จะพบว่า ออสซิลโลสโคปสามารถจับสัญญาณความถี่ได้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยม (Square Wave) และอ่านความถี่ได้ที่ 6.00 MHz. ซึ่งตรงกับค่าของคริสตัลที่เราได้ออสซิลเลตสัญญาณให้

#### 4.1.3 ผลการทดลองที่ 3.2.1 บันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT ที่ใช้ความถี่ 8 MHz



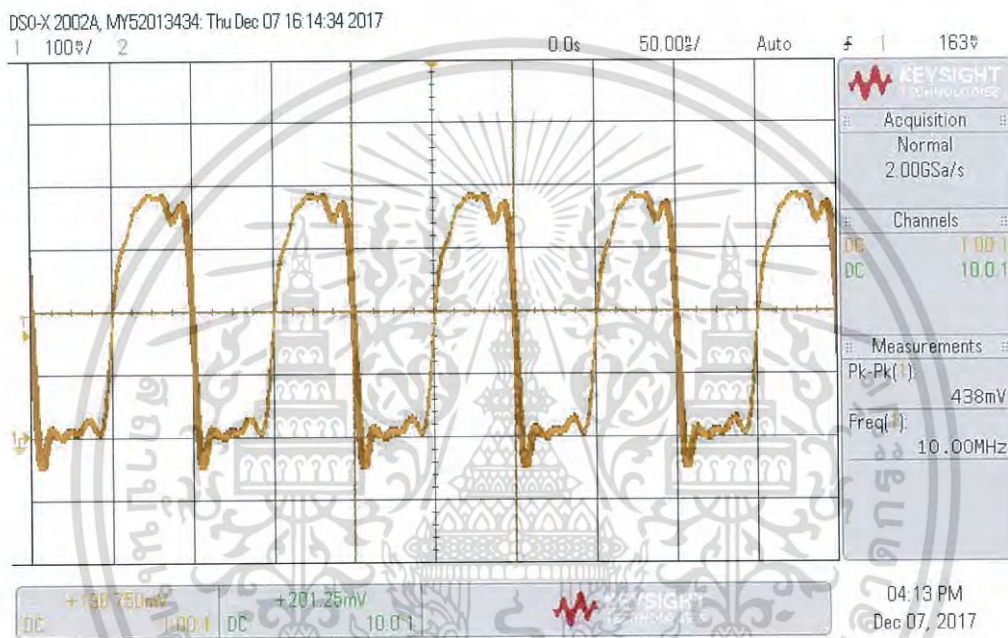
รูปที่ 4.3 คลื่นความถี่จาก Oscilloscope เมื่อใช้คริสตัลความถี่ 8 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 จะพบว่า ออสซิลโลสโคปสามารถจับสัญญาณความถี่ยังอยู่ในรูปสี่เหลี่ยม (Square Wave) แต่ยอดของกราฟสัญญาณค่อนข้างแหลมจนเข้าใกล้ที่จะเป็นรูปซายน์ เนื่องจากความถี่เพิ่มขึ้น และอ่านความถี่ได้ที่ 8.00 MHz. ซึ่งตรงกับค่าของคริสตัลที่เราได้ออสซิลเลตสัญญาณให้

#### 4.1.4 ผลการทดลองที่ 3.2.1 บันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT ที่ใช้ความถี่ 10 MHz



รูปที่ 4.4 คลื่นความถี่จาก Oscilloscope เมื่อใช้คริสตัลความถี่ 10 MHz

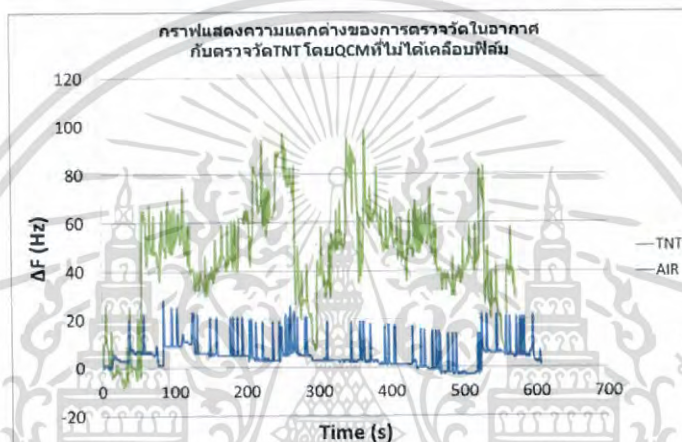
จากรูปที่ 4.4 จะพบว่า ออสซิลโลสโคปสามารถจับสัญญาณความถี่ยอดของกราฟสัญญาณค่อนข้างแหลมจนเข้าใกล้ที่จะเป็นรูปซายน์ เนื่องจากความถี่เพิ่มขึ้นใกล้ถึงค่าสูงสุดที่วงจรสามารถออสซิลเลตได้ และอ่านความถี่ได้ที่ 10.00 MHz. ซึ่งตรงกับค่าของคริสตัลที่เราได้ออสซิลเลตสัญญาณ

#### 4.2 ผลการทดลอง บันทึกค่าความถี่ของ Quartz Crystal Microbalanced ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether เมื่อตรวจวัดสารตั้งต้นวัตถุระเบิด

##### 4.2.1 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มบางในอากาศและในสภาวะที่มี TNT เจือปน

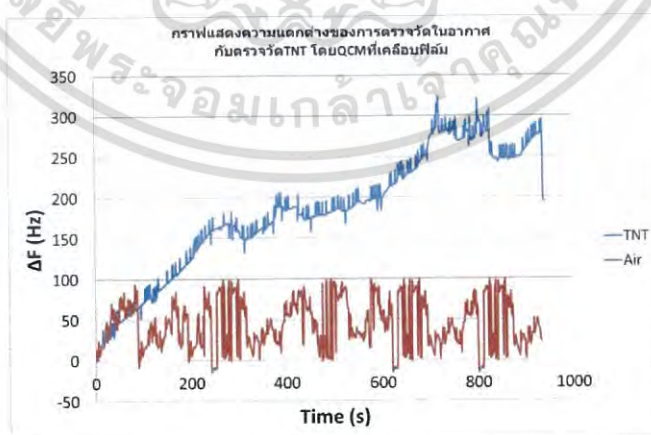
จากการทดลองการตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มบางในอากาศและในสภาวะที่มี TNT เจือปน รูปที่ 4.5 แสดงถึงการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของ QCM ที่ไม่ได้ผ่านการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลือบฟิล์มในการตรวจวัดในอากาศและการตรวจวัดไอระเหยของ TNT จะพบว่าในอากาศ ความถี่ที่เปลี่ยนไปจะมีค่าน้อยมากโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 10 Hz. เท่านั้น ในส่วนของการตรวจวัดในอากาศที่มีไอระเหยของ TNT ปนอยู่นั้นจะพบว่าค่าความถี่จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นแต่แกว่งโดยความถี่ที่เปลี่ยนไปอยู่ในช่วง 20-80 Hz. โดยความถี่ที่เปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยนี้เกิดจากการที่โมเลกุลของสารนั้นไม่สามารถจับกับผิวของ QCM ได้ดี โดย TNT ทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจริงแต่เซนเซอร์ทำงานได้ไม่เสถียรแม้ว่าความถี่จะเปลี่ยนเพิ่มขึ้น แต่ไม่สามารถระบุได้ว่าโมเลกุลใดเกาะบนพื้นผิวจึงทำให้เกิดค่าที่แกว่งๆ ในย่านที่กว้างขึ้นซึ่งเป็นการยากที่จะนำมาใช้ในการตรวจวัด



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความแตกต่างของการตรวจวัดในอากาศกับการตรวจวัด TNT โดย QCM ที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มบาง

#### 4.2.2 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether ในอากาศและในสถานะที่มี TNT เจือปน



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความแตกต่างของการตรวจวัดในอากาศกับการตรวจวัด TNT โดย QCM ที่เคลือบฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

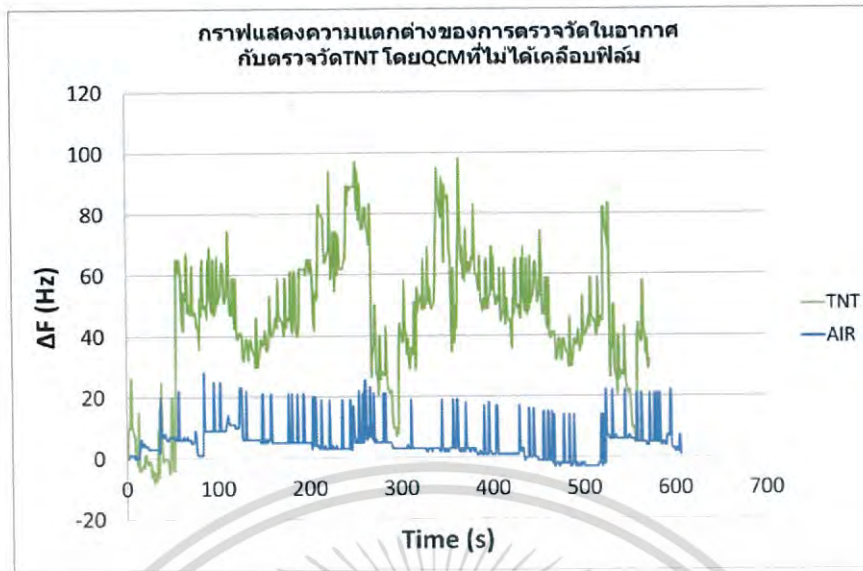
ค่าความถี่ที่เปลี่ยนไปของ QCM ที่เคลือบฟิล์มบางของการตรวจวัดในอากาศกับตรวจวัดใน TNT เป็นดังรูปที่ 4.3 ในการตรวจวัดในอากาศปกติค่าความถี่จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและแกว่งอยู่ในช่วง 0-100 Hz. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 50Hz. ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการวัดโดยใช้ QCM ที่ไม่ได้เคลือบนั้นจะพบว่า การเปลี่ยนแปลงของความถี่มีมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีผลทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงมากขึ้นแต่ไม่มีรูปแบบการตกสะสมบนผิวที่ชัดเจนเพราะไม่สามารถเจาะจงได้ว่ามวลที่มาเกาะบนผิวคืออะไรซึ่งในกรณีที่วัดในสถานะที่มีไอระเหยของ TNT จะพบผลลัพธ์ที่ดีกว่า โดยค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงในสถานะที่มี TNT นั้น จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นจนถึงจุดอิ่มตัวของเซนเซอร์ หมายความว่าฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether สามารถทำให้ QCM ตรวจจับกับ TNT ได้ดี ทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงมากขึ้น

จึงสรุปได้ว่าปริมาณของ TNT ที่สะสมบนผิวของ QCM จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นและทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงมากขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวของเซนเซอร์ได้

#### 4.3 ผลการทดลอง บันทึกค่าความถี่ของ Quartz Crystal Microbalanced ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether ที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อตรวจวัด TNT ที่ปริมาณเท่าๆกัน

##### 4.3.1 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มบางในอากาศและในสถานะที่มี TNT เจือปน

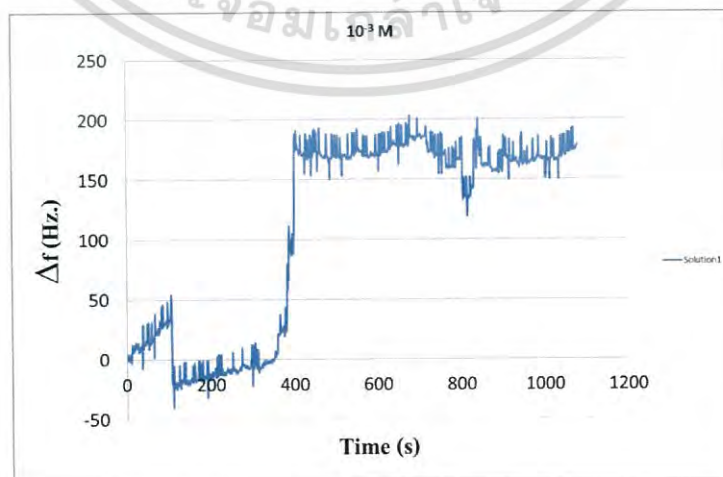
จากการทดลองการตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มบางในอากาศและในสถานะที่มี TNT เจือปน รูปที่ 5 แสดงถึงการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของ QCM ที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบฟิล์มในการตรวจวัดในอากาศและการตรวจวัดไอระเหยของ TNT จะพบว่าในอากาศ ความถี่ที่เปลี่ยนไปจะมีค่าน้อยมาก โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 10 Hz. เท่านั้น ในส่วนของการตรวจวัดในอากาศที่มีไอระเหยของ TNT ปนอยู่นั้นจะพบว่าค่าความถี่จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นแต่แกว่งโดยความถี่ที่เปลี่ยนไปอยู่ในช่วง 20-80 Hz. โดยความถี่ที่เปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยนี้เกิดจากการที่โมเลกุลของสารนั้นไม่สามารถจับกับผิวของ QCM ได้ดี โดย TNT ทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจริงแต่เซนเซอร์ทำงานได้ไม่เสถียรแม้ว่าความถี่จะเปลี่ยนเพิ่มขึ้น แต่ไม่สามารถระบุได้ว่าโมเลกุลไหนเกาะบนพื้นผิวจึงทำให้เกิดค่าที่แกว่งๆ ในย่านที่กว้างขึ้นซึ่งเป็นการยากที่จะนำมาใช้ในการตรวจวัด



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความแตกต่างของการตรวจวัดในอากาศกับตรวจวัดTNTโดยQCMที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มบาง

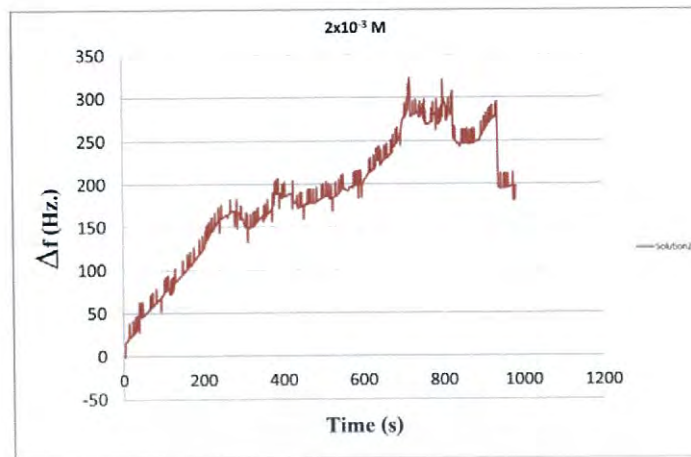
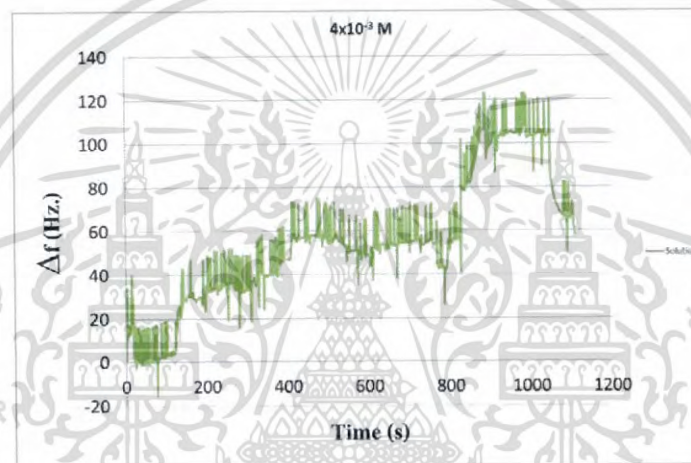
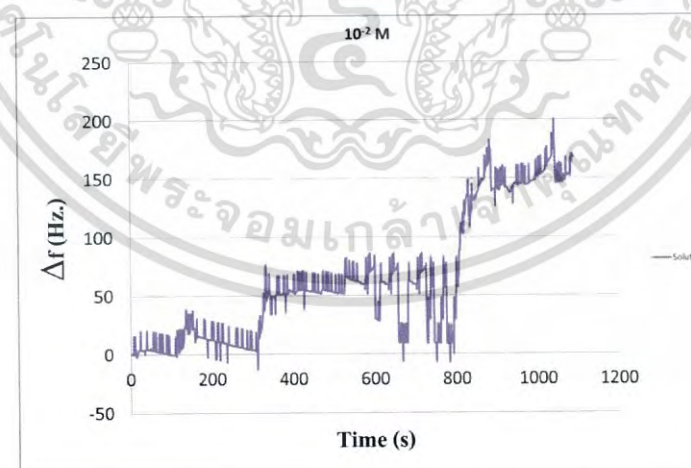
#### 4.3.2 การตรวจวัดโดยใช้QCMที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ในขั้นตอนนี้จะใช้ TNT ที่ปริมาณเท่ากันที่ 4.6 กรัม โดยเปลี่ยนความเข้มข้นตามที่กำหนด คือ  $10^{-3}$  M ,  $2 \times 10^{-3}$  M,  $4 \times 10^{-3}$  M,  $10^{-2}$  M เพื่อเป็นการศึกษาเพื่อหาว่าความเข้มข้นของ 18-crown-6 ether นั้นมีผลอย่างไรต่อการตรวจวัดTNT และมีผลอย่างไรต่อเซนเซอร์ โดยผลการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 4.11



(a)  $10^{-3}$  M.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

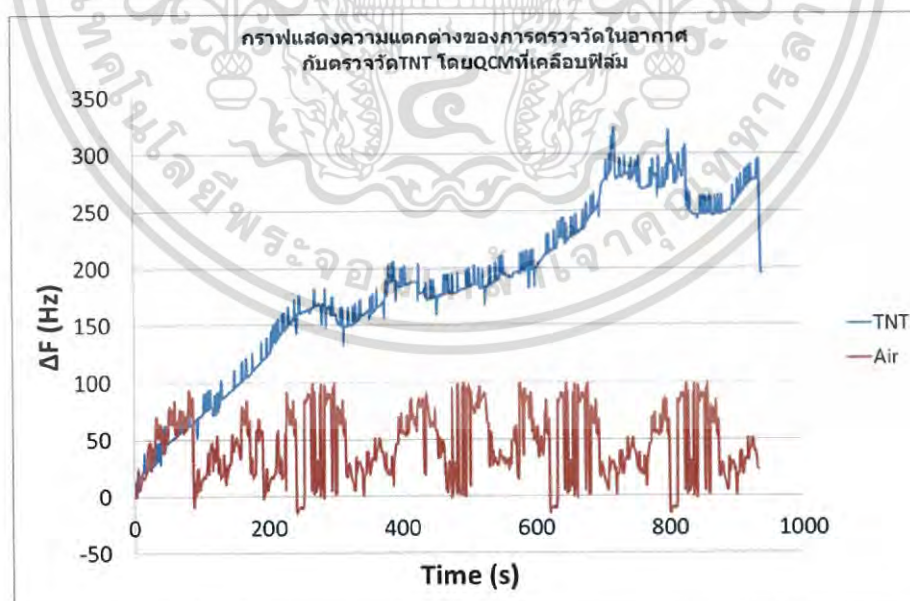
(b.)  $2 \times 10^{-3} \text{ M}$ .(c.)  $4 \times 10^{-3} \text{ M}$ .(d.)  $10^{-2} \text{ M}$ .

รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta f$ ) ของ QCM ที่เคลือบด้วย 18-Crown-6 ether ที่ความเข้มข้นต่างๆในอากาศและในสถานะที่มี TNT เจือปน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มบางที่มี 18-crown-6 ether ที่เคลือบบนผิวของ QCM ทำหน้าที่ในการเลือกจับกับโมเลกุลของ TNT ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น ความเข้มข้นของ 18-crown-6 ether คือตัวแปรที่ต้องการศึกษา โดยในรูปที่ 4.2 จะแสดงถึงการตอบสนองของความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปของเซนเซอร์แต่ละตัวที่มีความเข้มข้นของ 18-crown-6 ether ต่างกัน โดยที่ความเข้มข้น  $10^{-3}$  M. ค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปจะอยู่ในช่วง 150-200 Hz. ระยะเวลาที่เซนเซอร์ใช้ในการวัดจนถึงจุดอิ่มตัวอยู่ที่ 400 วินาที และที่ความเข้มข้น  $2 \times 10^{-3}$  M. ระยะเวลาที่เซนเซอร์ใช้ในการวัดจนถึงจุดอิ่มตัวของเซนเซอร์อยู่ที่ 700 วินาที โดยค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปจะอยู่ในช่วงประมาณ 200-300 Hz. ซึ่งสูงกว่าในความเข้มข้นแรก ซึ่งหมายความว่าความเข้มข้นของ 18-crown-6 ether มากขึ้นจะส่งผลให้สามารถจับกับโมเลกุลของ TNT ได้มากขึ้น แสดงว่าเมื่อมวลมากขึ้น ความถี่ก็จะเปลี่ยนมากขึ้น ส่วนที่ความเข้มข้น  $4 \times 10^{-3}$  M. และ  $10^{-2}$  M. จากกราฟพบว่าผลการทดลองนั้นมีความถี่เปลี่ยนแปลงมากขึ้นแต่ยังไม่ถึงจุดอิ่มตัวซึ่งใช้เวลาในการตรวจวัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของ 18-crown-6 ether มากขึ้น ทำให้จับโมเลกุลของ TNT ได้มากขึ้น เวลาที่ใช้ในการตรวจวัดจนกว่าเซนเซอร์จะถึงจุดอิ่มตัวนานขึ้นจึงสรุปได้ว่าที่จุดอิ่มตัวของเซนเซอร์ที่มีความเข้มข้นสูง ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปจะมากกว่าฟิล์มที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า

#### 4.3.3 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether ในอากาศและในสถานะที่มี TNT เจือปน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการตรวจวัดความถี่ที่แตกต่างกันของการตรวจวัดในอากาศกับตรวจวัด TNT โดย QCM ที่เคลือบฟิล์ม

ค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปของ QCM ที่เคลือบฟิล์มบางของการตรวจวัดในอากาศกับตรวจวัดในสถานะที่มี TNT เป็นดังรูปที่ 4.3 ในการตรวจวัดในอากาศปกติค่าความถี่จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและค่าความถี่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกว่งอยู่ในช่วง 0-100 Hz. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 50Hz. ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการวัดโดยใช้ QCM ที่ไม่ได้เคลือบนั้นจะพบว่า การเปลี่ยนแปลงของความถี่มากขึ้น แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีผลทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงมากขึ้นแต่ไม่มีรูปแบบการตกสะสมบนผิวที่ชัดเจนเพราะไม่สามารถเจาะจงได้ว่ามวลที่มาเกาะบนผิวคืออะไรซึ่งในกรณีนี้วัดในสภาวะที่มีไอระเหยของ TNT จะพบผลลัพธ์ที่ดีกว่า โดยค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงในสภาวะที่มี TNT นั้น จะค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นจนถึงจุดอิ่มตัวของเซนเซอร์ หมายความว่าฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether สามารถทำให้ QCM ตรวจจับกับ TNT ได้ดี ทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงมากขึ้น

จึงสรุปได้ว่าปริมาณของ TNT ที่สะสมบนผิวของ QCM จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นและทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงมากขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวของเซนเซอร์ได้

#### 4.4 ผลการทดลอง บันทึกค่าความถี่ของ Quartz Crystal Microbalanced ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether เมื่อตรวจวัด TNT ที่ปริมาณแตกต่างกัน

หลังจากการทดลองคุณสมบัติของฟิล์มในสองตอนที่ผ่านมานั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้ฟิล์มของ 18-crown-6 ether ที่มีความเข้มข้น  $2 \times 10^{-3}$  โมลาร์ที่เคลือบสองครั้งเพราะมีช่วงเวลาที่ตอบสนองต่อ TNT ได้อย่างเหมาะสมและตรวจวัดโมเลกุล TNT ได้ดีพอๆกับที่เคลือบสามครั้ง จึงมีความเหมาะสมในการใช้งานมากที่สุด จากนั้นจะทดสอบเพื่อหาว่า TNT ที่ปริมาณต่าง ๆ กันจะให้ผลการวัดที่เซนเซอร์ตัวเดียวกัน แตกต่างหรือไม่โดยใช้ TNT ที่ปริมาณ 2 กรัม, 4 กรัม, 6 กรัม, 8 กรัม และ 10 กรัม โดยผลการตรวจวัดที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 4.10

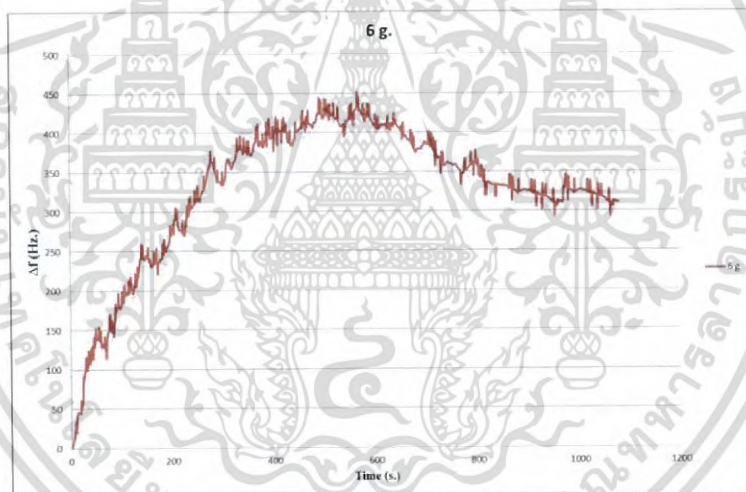


(a) กราฟแสดงการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรวจวัด TNT ที่ปริมาณ 2 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

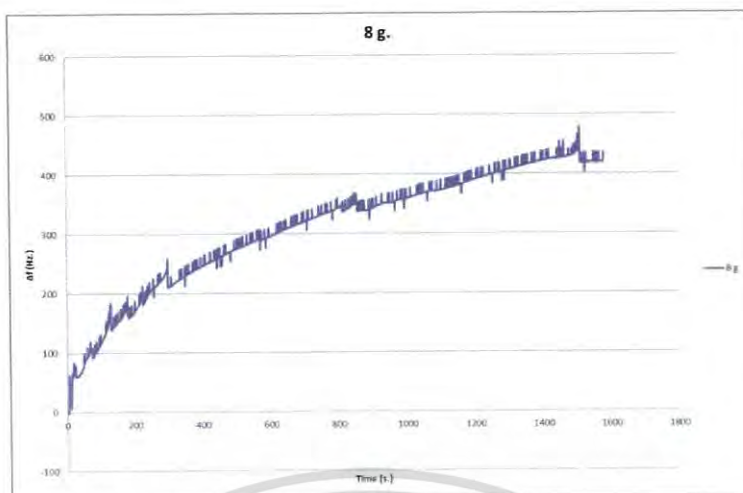


(b) กราฟแสดงการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรวจวัด TNT ที่ปริมาณ 4 กรัม



(c) กราฟแสดงการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรวจวัด TNT ที่ปริมาณ 6 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) กราฟแสดงการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรวจวัด TNT ที่ปริมาณ 8 กรัม



(e) กราฟแสดงการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรวจวัด TNT ที่ปริมาณ 10 กรัม

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการตรวจวัด TNT ด้วย QCM เซนเซอร์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether ที่ปริมาณ TNT ต่างๆ

จากผลการทดลองตรวจวัด TNT ที่ปริมาณต่างๆ เพื่อทดสอบว่าการตรวจวัด TNT ที่ปริมาณแตกต่างกันนั้นเซนเซอร์มีผลตอบสนองอย่างไรเพื่อหาแนวโน้มเพื่อพัฒนาเซนเซอร์และความเหมาะสมในการใช้งานจริงต่อไป โดยในการตรวจวัดที่ TNT ปริมาณ 2 กรัม จะพบว่าความถี่ที่เปลี่ยนไปจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการตรวจวัดเพิ่มขึ้นซึ่งหมายความว่าสามารถตรวจวัดได้แต่ความถี่ที่เปลี่ยนไปที่เพิ่มขึ้นนั้นมีค่าสูงสุดเพียง 50 Hz. ซึ่งหมายความว่าตรวจวัดเจอในปริมาณที่น้อยมากๆ โดยเมื่อนำค่าความถี่นี้มาคำนวณด้วยสมการของ Sauerbrey จะได้มวลที่เปลี่ยนแปลงไปเพียงแค่

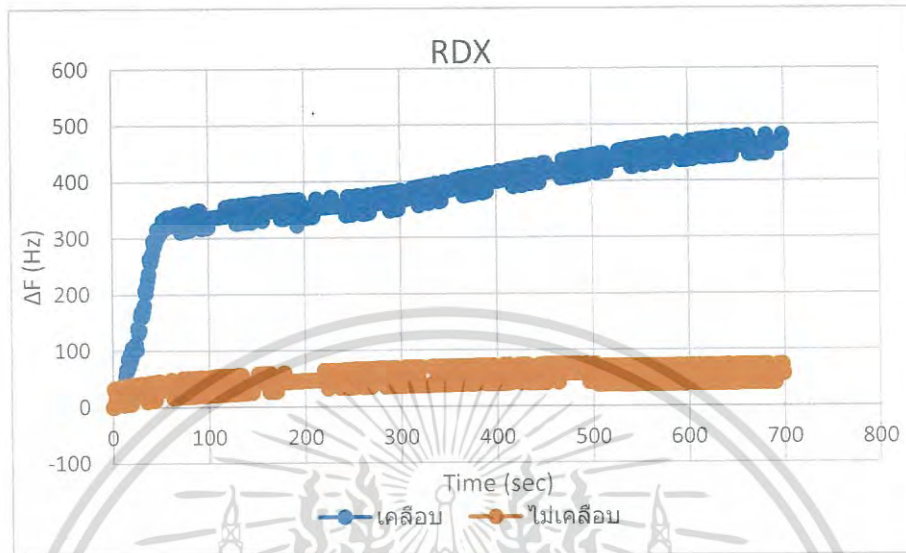
0.04 กรัม เท่านั้นซึ่งน้อยมากๆ เนื่องจาก QCM เป็นเซนเซอร์วัดมวลที่มีขนาดเล็กมากๆ และมีความไวไม่มากนัก ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละเอียดสูงมากเมื่อปริมาณของ TNT มีน้อยมากทำให้ไอระเหยที่เกิดขึ้นนั้นมีความหนาแน่นน้อยมาก เมื่อเทียบกับขนาดของแชมเบอร์และพื้นที่หน้าตัดของเซนเซอร์ รวมถึงปริมาณความเข้มข้นของฟิล์ม จึงทำให้ไม่สามารถตรวจเจอปริมาณจริงๆได้ทั้งหมด ในกรณีที่ตรวจวัด TNT ที่ปริมาณ 4 กรัม 6 กรัม 8 กรัม และ 10 กรัม ก็จะเป็นไปในลักษณะเดียวกันกล่าวคือเมื่อเวลาเพิ่มความถี่ที่เปลี่ยนไปก็จะเพิ่มขึ้นซึ่งเพิ่มขึ้นไปจนถึงจุดอิ่มตัว โดยความถี่ที่เปลี่ยนไปของการวัด TNT ที่ปริมาณ 4 กรัมนี้ อยู่ที่ประมาณ 400 Hz. และใช้เวลาในการตรวจวัดประมาณ 900 วินาที ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ การตรวจวัด TNT ที่ 2 กรัมแล้วนั้นผลจะแตกต่างกันชัดเจน โดยจะสังเกตได้ว่าเซนเซอร์จะใช้เวลาในการ ถึงจุดอิ่มตัวนานขึ้นเมื่อปริมาณของมวลที่ตรวจวัดนั้นเพิ่มขึ้น ทำให้เห็นความถี่ที่เปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนขึ้นโดยเมื่อนำค่าความถี่นี้มาคำนวณด้วยสมการของ Sauerbrey จะได้มวลที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นถึง 0.34 กรัม และในการตรวจวัดที่ TNT ปริมาณ 6 กรัม ความถี่ที่เปลี่ยนไปของการวัด TNT ที่ปริมาณ 6 กรัมนี้ อยู่ที่ประมาณ 450 Hz. และใช้เวลาในการตรวจวัดประมาณ 900 วินาที เช่นกัน โดยเมื่อนำ ค่าความถี่นี้มาคำนวณด้วยสมการของ Sauerbrey จะได้มวลที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 0.38 กรัมและในการตรวจวัดที่ TNT ปริมาณ 8 กรัม ความถี่ที่เปลี่ยนไปของการวัด TNT ที่ปริมาณ 8 กรัมนี้ อยู่ที่ประมาณ 480 Hz. และใช้เวลาในการตรวจวัดประมาณ 1,400 วินาที โดยเมื่อนำ ค่าความถี่นี้มาคำนวณด้วยสมการของ Sauerbrey จะได้มวลที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 0.4 กรัม และในการตรวจวัดที่ TNT ปริมาณ 10 กรัม ความถี่ที่เปลี่ยนไปสูงสุดของการวัด TNT ที่ปริมาณ 10 กรัมนี้ อยู่ที่ประมาณ 500 Hz. และใช้เวลาในการตรวจวัดประมาณ 2,400 วินาที โดยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเนื่องจากยังไม่ถึงจุดอิ่มตัวของเซนเซอร์ แต่ใช้เวลานานมากในการทดสอบ โดยเมื่อนำค่าความถี่นี้มาคำนวณด้วยสมการของ Sauerbrey จะได้มวลที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 0.44 กรัม

ซึ่งจากผลการทดลองในตอนนี้อาจสรุปได้ว่า QCM เซนเซอร์ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether นี้ สามารถตรวจวัดไอระเหยของ TNT ที่ปริมาณต่างๆกันโดยความถี่ที่เปลี่ยนไปในการตรวจวัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณมวลที่ตรวจวัดเพิ่มขึ้นและเมื่อเวลาในการตรวจวัดเพิ่มขึ้น โดยความถี่ที่เพิ่มขึ้นนั้นสามารถนำมาคำนวณกลับเป็นปริมาณไอระเหยที่สะสมบนพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นได้โดย ลักษณะความสัมพันธ์ของปริมาณความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปกับปริมาณมวลที่ตกสะสมบนพื้นผิวนั้น เป็นไปตามทฤษฎีของ QCM หรือตามสมการของ Sauerbrey ซึ่งจากข้อสรุปนี้จึงสามารถพิสูจน์ได้ว่าการประยุกต์ใช้คริสตัลเพื่อเป็นเซนเซอร์วัดมวลที่เรียกว่า ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์นั้นสามารถใช้งานได้จริงในการตรวจวัดไอระเหยของ 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) ที่ปริมาณต่างๆได้

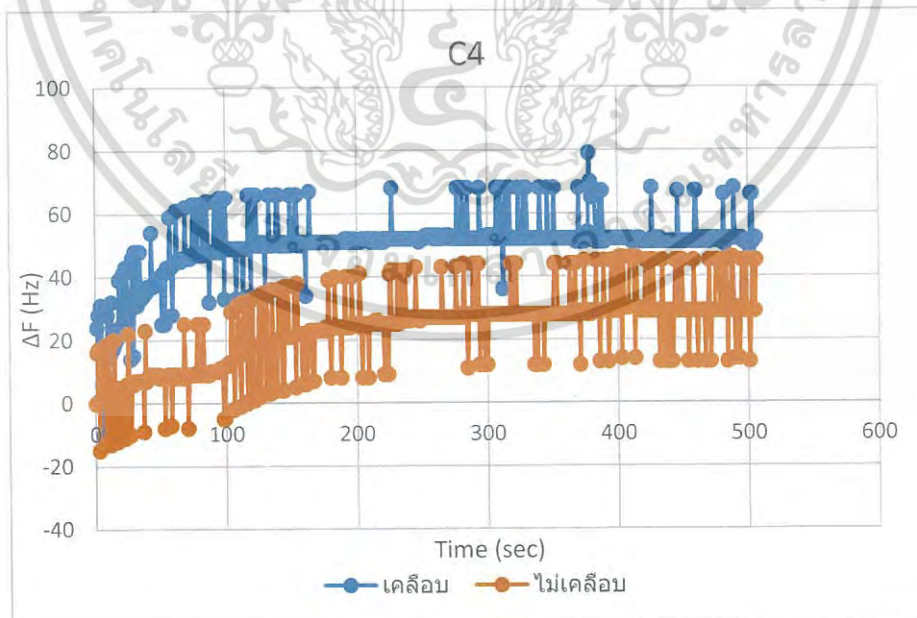
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether ในสภาวะที่มี RDX เจือปน



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความแตกต่างของการตรวจวัดในสภาวะที่มี RDX เจือปนโดย QCM ที่เคลือบและไม่เคลือบฟิล์มบาง

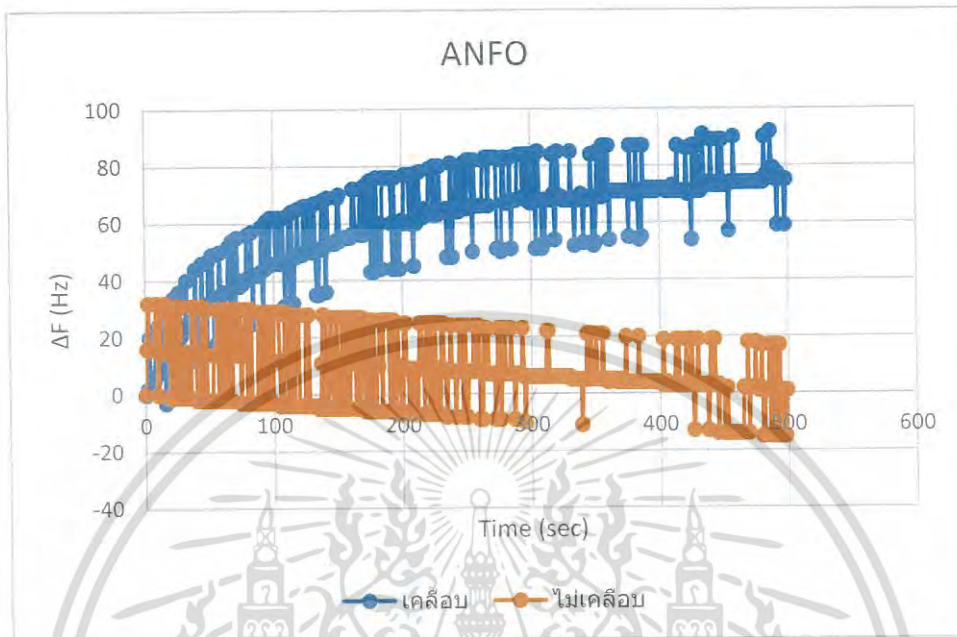
#### 4.6 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether ในสภาวะที่มี C4 เจือปน



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความแตกต่างของการตรวจวัดในสภาวะที่มี C4 เจือปนโดย QCM ที่เคลือบและไม่เคลือบฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether ในสถานะที่มี Anfo เจือปน



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความแตกต่างของการตรวจวัดในสถานะที่มี Anfo เจือปนโดย QCM ที่เคลือบและไม่เคลือบฟิล์มบาง

18-Crown-6 Ether มีส่วนประกอบของอะตอมที่ให้อิเล็กตรอน (donor atom) คือ ออกซิเจน จึงทำให้สามารถจับไอออนของโลหะได้ดี โดย 18-crown-6 ether นั้น เป็น สารประกอบโคออร์ดิเนชันชนิดหนึ่งที่เรียกว่า แมโครไซคลิกพอลิเอเทอร์ (macrocyclic polyethers) ซึ่งมีคุณสมบัติในการทำหน้าที่เป็นโฮสต์ในการจับกับโลหะได้อย่างเหมาะสม เนื่องจาก ประกอบด้วยหน่วย  $-OCH_2CH_2-$  ซ้ำกันเป็นวง ในทางเคมีจะเรียกคุณสมบัติในการจับโลหะที่เกิดขึ้นแบบนี้ว่า ลิแกนด์ (ligand)

ลิแกนด์ (ligand) คือ ไอออนหรือโมเลกุลที่ล้อมรอบและสามารถจะเชื่อมต่อกับอะตอมหรือไอออนกลางซึ่งโดยทั่วไปเป็นโลหะ หรือเป็นสารที่มีอะตอมของธาตุซึ่งมีอิเล็กตรอนคู่อิสระอยู่ เช่น  $O$ ,  $F^-$ ,  $Br^-$ ,  $OH^-$ ,  $SCN^-$ ,  $S^{2-}$ ,  $CO$ ,  $NH_3$ ,  $H_2O$  เป็นต้น

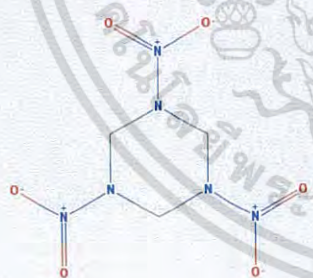
พันธะระหว่างลิแกนด์ และอะตอมกลางเป็นพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ (Coordinate covalent) ใช้คู่อิเล็กตรอนของลิแกนด์ สร้างพันธะ ด้วยคุณสมบัตินี้สามารถทำให้ 18-crown-6 ether จับกับไอออนของโลหะหรือสารที่มีอิเล็กตรอนคู่อิสระอยู่ ซึ่งถ้าดูจากโครงสร้างของสารที่นำมาตรวจวัดทั้ง 4 ชนิดจะพบว่าสามารถแบ่งสารวัดระบุเปิดได้เป็นสองแบบ คือ วัดระบุเปิดชนิดที่ไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

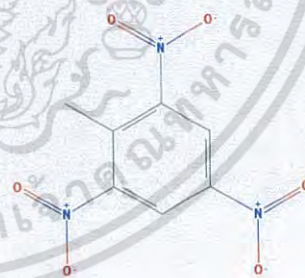
เป็นสารประกอบ ซึ่งได้แก่ TNT และ RDX และวัตถุระเบิดชนิดที่เป็นสารประกอบคือ ระเบิด Composition-4 (C4) และ ANFO (Ammoniumnitrate + Fuel oil)

จากรูปที่ 4.6 และ 4.11 เป็นกราฟแสดงความแตกต่างของการตรวจวัดในสภาวะที่มี TNT และ RDX เจือปนโดย QCM ที่เคลือบและไม่ได้เคลือบฟิล์มบาง พบว่ากราฟที่เปรียบเทียบแบบเคลือบและไม่ได้เคลือบของทั้งสองสารมีความคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ รูปที่ 4.6 ในการตรวจวัดในอากาศปกติค่าความถี่จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและแกว่งอยู่ในช่วง 0-100 Hz. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 50Hz. ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟวัดโดยใช้ QCM ที่ไม่ได้เคลือบนั้นจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่มีมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีผลทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงมากขึ้น ในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 4.7 กราฟที่เคลือบเริ่มปรากฏแนวโน้มที่วินาทีที่ 50 และถึงจุดอิ่มตัวที่วินาทีที่ 700 ในส่วนของกราฟที่ไม่ได้เคลือบมีค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 0-100 Hz เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 50 Hz เช่นเดียวกับกราฟในรูปที่ 4.6

โดยเมื่อดูที่โครงสร้างของสารระเบิดชนิดที่ไม่ได้เป็นสารประกอบ ซึ่งได้แก่ TNT และ RDX จะพบว่าสารทั้งสองชนิดมีโครงสร้างคล้ายกันดังรูปที่ ต่างกันเพียงวงเบนซีนตรงกลางของพันธะเท่านั้น แต่สิ่งที่เหมือนกันคือ อิเล็กตรอนอิสระจึงทำให้ผลการตรวจวัดคล้ายกัน ฟิล์มมีการตอบสนองไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4.14 โครงสร้างของ RDX



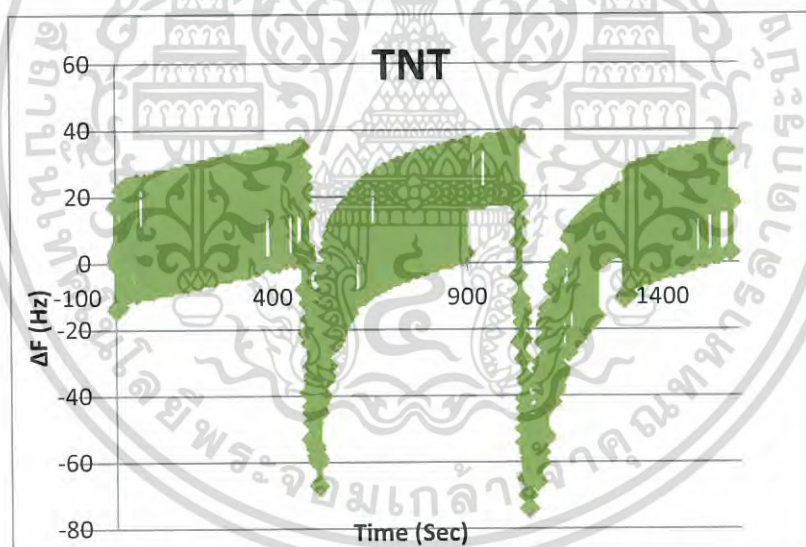
รูปที่ 4.15 โครงสร้างของ TNT

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 เป็นกราฟแสดงความแตกต่างของการวัดในสภาวะที่มี C4 และ Anfo เจือปน โดยกราฟในรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงให้เห็นว่าคริสตัลที่เคลือบและไม่ได้เคลือบมีค่าความถี่เปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับกราฟของ TNT และ RDX

วัตถุระเบิดชนิดที่เป็นสารประกอบ C4 เกิดจากการรวมกันของสาร 4 ชนิดได้แก่ RDX-91 % , Di (2-ethylhexyl) sebacate - 5.3 % , Polyisobutylene - 2.1 % และ Motor oil - 1.6 % ในส่วนของ ANFO เกิดจากการนำเอาสารแอมโมเนียมไนเตรตมาผสมกับ Motor oil ซึ่งจะพบว่าสารระเบิดทั้ง 2 ชนิดนั้นมีส่วนผสมหนึ่งที่เหมือนกันคือ น้ำมันเครื่อง ซึ่งน้ำมันเครื่องเป็นสารประกอบชนิดไฮโดรคาร์บอน เมื่อนำมาผสมกับสารที่มีอิเล็กตรอนอิสระอย่าง RDX และ แอมโมเนียมไนเตรต จะทำให้เกิดพันธะระหว่างคาร์บอนและอิเล็กตรอนอิสระนั้นๆ ทำให้สารระเบิดทั้ง 2 ชนิดมีความอึดตัว จึงไม่สามารถจับตัวกับ 18-crown-6 ether ได้

#### 4.8 ผลการทดลอง บันทึกค่าความถี่ของ Quartz Crystal Microbalanced ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether เมื่อตรวจวัดสารตั้งต้นวัตถุระเบิดแบบเป็น Cycle

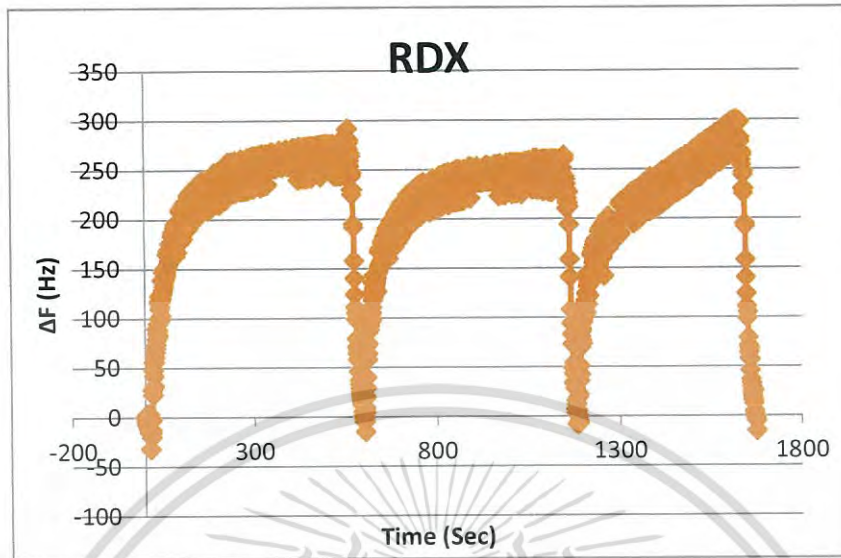
##### 4.8.1 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบฟิล์มบางในสถานะที่มี TNT เจือปนแบบเป็น Cycle



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลาในสถานะที่มี TNT แบบเป็น cycle

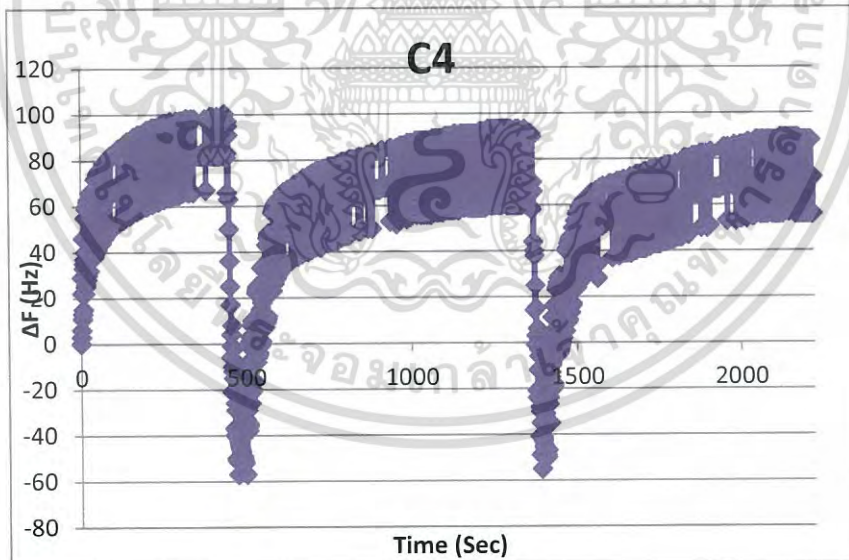
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.8.2 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบฟิล์มบางในสภาวะที่มี RDX เจือปนแบบเป็น Cycle



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลาในสภาวะที่มี RDX แบบเป็น cycle

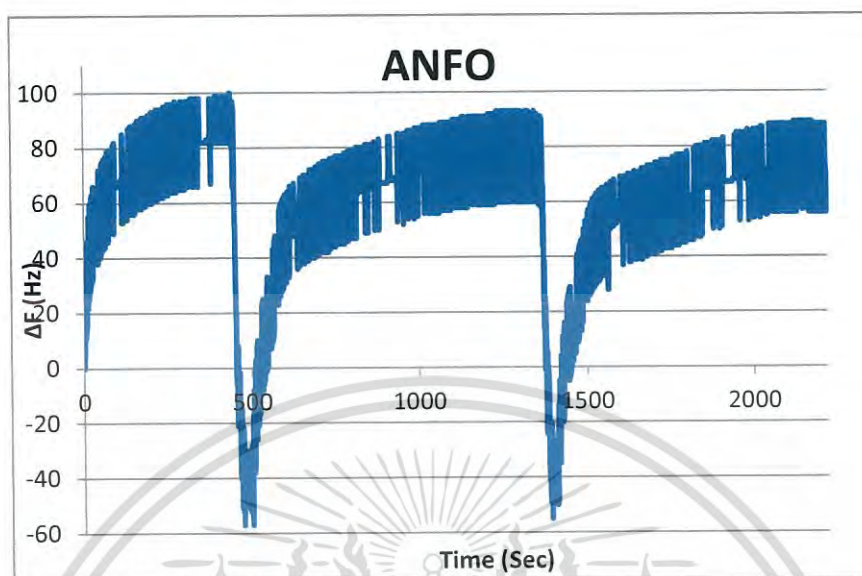
#### 4.8.3 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบฟิล์มบางในสภาวะที่มี C4 เจือปนแบบเป็น Cycle



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลาในสภาวะที่มี C4 แบบเป็น cycle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.8.4 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบฟิล์มบางในสถานะที่มี Anfo เจือปนแบบเป็น Cycle



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลาในสถานะที่มี ANFO แบบเป็น cycle

เมื่อทำการวัดไอระเหยในช่องเวลาที่ไม่ได้ปิดแก๊ส ความถี่ที่วัดได้มีค่าลดลงอย่างช้าๆ สารตั้งต้นวัฏธะเปิดแต่ละชนิดมีช่วงเวลาอิ่มตัวต่างกัน

ขณะที่อิ่มตัวมีความถี่ค่อนข้างคงที่ ทั้งไว้สักระยะหนึ่ง แล้วจึงทำการปิดแก๊สเข้าไปเคลียร์เพื่อเริ่ม cycle ใหม่ ทำให้ความถี่พุ่งสูงขึ้นภายในเวลารวดเร็ว มีค่าคงที่ จึงทำการวัดซ้ำใหม่อีกรอบ ไปเรื่อยๆ เห็นเป็น cycle อย่างชัดเจนตามที่แสดงดังกราฟ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองพบว่าระบบควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ฟิล์มของ 18-crown-6 ether มาเคลือบไปยังผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์เพื่อตรวจวัดไอระเหยของ วัตถุระเบิดชนิด 2,4,6 trinitrotoluene (TNT) ที่ตกสะสมบนควอตซ์คริสตัลจากค่าความถี่ที่ใช้ในวงจร ออสซิลเลเตอร์แบบ IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT ที่เชื่อมต่อกับเครื่องนับ ความถี่แบบดิจิทัลที่เก็บค่าความถี่ที่อ่านได้ทุกๆ 1 วินาทีซึ่งมาพร้อมกับซอฟต์แวร์ที่สามารถใช้ในการ เก็บข้อมูลและแสดงการตรวจวัดได้แบบเรียลไทม์ (Real time) งานนั้นนำข้อมูลที่เก็บได้มา ประมวลผลผ่านคอมพิวเตอร์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เปลี่ยนไปกับเวลา

จากการทดลองบันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT เมื่อใช้คริสตัลความถี่ 4, 6, 8 และ 10 เมกกะเฮิร์ต พบว่าลักษณะกราฟรวมถึงความถี่ที่ได้ จากวงจรมีความเสถียรและมีประสิทธิภาพสามารถใช้ในการทดลองได้ดี

จากนั้นได้ทดลองบันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT ที่ใช้ความถี่ 10 เมกกะเฮิร์ต บันทึกค่าความถี่ทุกๆ 1 วินาที ด้วยโปรแกรม เมื่อบันทึก ค่าความถี่กำหนดของควอตซ์คริสตัล พบว่า ความถี่กำหนดนั้นสั้นในช่วงสั้นๆแค่ 5 เฮิร์ต จึงสรุปได้ว่า วงจรที่ใช้นี้มีประสิทธิภาพ

ขั้นตอนของการเตรียมเซนเซอร์ด้วยการเคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether เพื่อใช้ในการ ตรวจวัดไอระเหยของวัตถุระเบิดชนิด 2,4,6 trinitrotoluene (TNT) ซึ่งผลการทดลองของการ ตรวจวัดกับ 2,4,6 trinitrotoluene (TNT) และการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มจะเป็นไปดังต่อไปนี้ โดยในตอนแรกจะเป็นการศึกษาเพื่อหาว่าควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether ที่ความเข้มข้นต่างๆ นั้นมีผลอย่างไรต่อการตรวจวัด 2,4,6 trinitrotoluene (TNT) โดยจากผลการทดลองจะพบว่าเมื่อใช้ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ตรวจวัดในสภาวะที่เป็นอากาศ กับสภาวะที่มี TNT เจือปนทั้งคริสตัลในแบบที่เคลือบและไม่ได้เคลือบฟิล์มบาง จะพบว่าฟิล์มของ 18-crown-6 ether นั้นสามารถช่วยให้เซนเซอร์ตรวจวัดอย่างเฉพาะเจาะจงกับ 2,4,6 trinitrotoluene ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนถัดมาจะเป็นการทดสอบเซนเซอร์ที่เคลือบฟิล์มของ 18-crown-6 ether ที่ความเข้มข้นต่างๆ จะพบว่าที่ความเข้มข้นมากขึ้นทำให้จับโมเลกุลของ TNT ได้มากขึ้น และเวลาที่ใช้ในการตรวจวัดจนกว่าเซนเซอร์จะถึงจุดอิ่มตัวนานขึ้น จึงสรุปได้ว่าเซนเซอร์ที่เคลือบฟิล์มที่มีความเข้มข้นสูง ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปจะมากขึ้นและเวลาที่ใช้ในการตรวจวัดก็จะมากขึ้นตาม ซึ่งจากข้อสรุปนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ฟิล์มที่มีความเข้มข้นที่  $2 \times 10^{-3}$  โมลาร์ มาใช้งานต่อไปเนื่องจากตรวจวัดได้ดีในช่วงเวลาที่เหมาะสม

ในส่วนถัดมาเป็นการตรวจวัด TNT ที่ปริมาณต่างๆ กันโดยใช้เซนเซอร์ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน จะพบว่าเมื่อปริมาณของ TNT เพิ่มขึ้น ความถี่ที่เปลี่ยนไปก็จะเพิ่มขึ้น และเวลาที่ตรวจวัดก็จะเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งจากข้อสรุปเหล่านี้จึงสามารถพิสูจน์ได้ว่าการประยุกต์ใช้คริสตัลเพื่อเป็นเซนเซอร์วัดมวลที่เรียกว่า ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์นั้นสามารถใช้งานได้จริงในการตรวจวัดไอระเหยของ 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) ได้

ในตอนที่ผ่านมา จากการทดสอบเซนเซอร์ที่เคลือบฟิล์มของ 18-crown-6 ether เพื่อใช้ในการตรวจวัดไอระเหยของวัตถุระเบิดชนิด 2,4,6 trinitrotoluene (TNT) ที่ความเข้มข้นต่างๆ จะพบว่าที่ความเข้มข้นมากขึ้นทำให้จับโมเลกุลของ TNT ได้มากขึ้น และเวลาที่ใช้ในการตรวจวัดจนกว่าเซนเซอร์จะถึงจุดอิ่มตัวนานขึ้น จึงสรุปได้ว่าเซนเซอร์ที่เคลือบฟิล์มที่มีความเข้มข้นสูง ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปจะมากขึ้นและเวลาที่ใช้ในการตรวจวัดก็จะมากขึ้นตาม ซึ่งจากข้อสรุปนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ฟิล์มที่มีความเข้มข้นที่  $2 \times 10^{-3}$  โมลาร์ มาใช้งานต่อไปในตอนที่ถัดมาเนื่องจากตรวจวัดได้ดีในช่วงเวลาที่เหมาะสม

จากการทดลองการตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether ในสถานะที่มีสารตั้งต้นวัตถุระเบิดเจือปน สามารถแบ่งสารดังกล่าวนี้ได้เป็น 2 ประเภท วัตถุระเบิดชนิดที่ไม่ได้เป็นสารประกอบ ซึ่งได้แก่ TNT และ RDX และวัตถุระเบิดชนิดที่เป็นสารประกอบ คือ ระเบิด Composition-4 (C4) และ ANFO (Ammoniumnitrate + Fuel oil) ซึ่ง TNT และ RDX มีโครงสร้างที่แตกต่างกันในส่วนของวงเบนซีนเท่านั้น เลยส่งผลให้ทั้ง TNT และ RDX สามารถตรวจจับสารได้มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันดังกราฟรูปที่ 4.6 และ 4.11 มีความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคริสตัลที่เคลือบและไม่เคลือบอย่างชัดเจน ต่างจาก C4 และ Anfo สารระเบิดทั้ง 2 ชนิดนั้นมีส่วนผสมหนึ่งที่เหมือนกันคือ น้ำมันเครื่อง ซึ่งน้ำมันเครื่องเป็นสารประกอบชนิดไฮโดรคาร์บอน เมื่อนำมาผสมกับสารที่มีอิเล็กตรอนอิสระอย่าง RDX และ แอมโมเนียมไนเตรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้เกิดพันธะระหว่างคาร์บอนและอิเล็กตรอนอิสระนั้นๆ ทำให้สารระเบิดทั้ง 2 ชนิดมีความอึดตัว จึงไม่สามารถจับตัวกับ 18-crown-6 ether ได้ หรือจับได้น้อยเมื่อเทียบกับ TNT และ RDX

ในการทดลองสุดท้าย ทำการตรวจวัดค่าความถี่ของ Quartz Crystal Microbalanced ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether เมื่อตรวจวัดสารตั้งต้นวัตถุระเบิดแบบเป็น Cycle เพื่อพิสูจน์ว่า QCM เป็นไปตามคุณสมบัติที่ดีของเซนเซอร์ซึ่งได้แก่ ความเที่ยงตรง , ความแม่นยำ , มีความไวในการตอบสนองที่ดี และมีคุณสมบัติในการทำซ้ำที่ดี เมื่อพิจารณาจากผลการวัด กราฟทั้ง 4 มีความแม่นยำและทำซ้ำได้ดี ทุกๆ cycle เซนเซอร์ยังคงวัดค่าได้เช่นเดิม เมื่อพิจารณาชุดข้อมูลที่ได้อาจการวัดเป็นไปตามทฤษฎี ค่าความถี่เปลี่ยนแปลงอย่างมีรูปแบบ เปลี่ยนแปลงความถี่ไม่เกิน 20 HZ และในเทอมที่ผ่านมาเราสามารถเข้าใจความไวของการตอบสนองของเซนเซอร์จากการที่เปรียบเทียบระหว่างคริสตัลที่ไม่เคลือบฟิล์มและเคลือบฟิล์ม ผู้วิจัยเคลือบเพื่อให้เซนเซอร์มีความไวในการตอบสนองที่มากขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- ทำการทดลองเพิ่มเติมในระบบเปิดเพิ่มเติม
- เนื่องจากควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์เป็นเซนเซอร์ที่มีความไวสูงมาก ๆ จึงทำให้เกิดสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้ง่าย ควรหาวิธีป้องกันเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น
- ควรทดลองตรวจวัดเพิ่มในสถานะอื่นๆที่ไม่ใช่แก๊ส เช่น ในของเหลว เป็นต้น

## บรรณานุกรม

- [1] J. Janata, "Principles of Chemical Sensors Second Edition", Springer Science+Business Media, LLC 2009
- [2] Rudolf F. Graf, " Oscillator circuits" Published 1996 by [Newnes](#) in [Boston, Mass.](#) Written in [English](#)
- [3] โรงเรียนนาวิกโยธินทหารเรือ, "วิชาทหารช่าง หลักสูตรชั้นนายเรืออาวุโส นย." , 2009
- [4] P.Phuvanatai, T.Phetchakul, "A using of Quartz Crystal Microbalance for 2, 4, 6-Trinitrotolurene (TNT) Vapor Detection" , ACDT Conferences Proceedings, 2017, pp.151-154
- [5] P. Phuvanatai and T. Phetchakul, "Quartz Crystal Microbalance Coated with 18-Crown-6 Ether Film for 2,4,6-Trinitrotolurene (TNT) Vapor Detection", Key Engineering Materials, Vol. 748, pp. 358-362, 2017
- [6] T.Phetchakul, P.Phuvanatai, "A study on 2, 4, 6-trinitrotolurene (TNT) vapor detection by using a quartz crystal microbalance with 18-crown-6 ether film" , AIP Conference Proceedings 1858, pp.020004, 2017