

การศึกษาการใช้ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ
18-crown-6 ether ในการตรวจวัดไอระเหยของ 2,4,6-Trinitrotolurene
(TNT)

A STUDY ON A USING OF QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE
COATED WITH 18-CROWN-6 ETHER FILM FOR
2, 4, 6-TRINITROTOLUENE (TNT) VAPOR DETECTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560
KMITL-2017-EN-M-001-212

การศึกษาการใช้ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ
18-crown-6 ether ในการตรวจวัดไอระเหยของ 2, 4, 6-Trinitrotoluene
(TNT)

A STUDY ON A USING OF QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE
COATED WITH 18-CROWN-6 ETHER FILM FOR
2, 4, 6-TRINITROTOLUENE (TNT) VAPOR DETECTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY ON A USING OF QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE
COATED WITH 18-CROWN-6 ETHER FILM FOR
2, 4, 6-TRINITROTOLUENE (TNT) VAPOR DETECTION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN DEFENCE ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-EN-M-011-212

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017


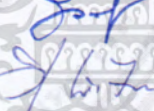

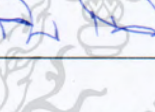
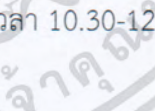
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการใช้ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether ในการตรวจวัดไอระเหยของ 2, 4, 6-Trinitrotolurene (TNT)
Thesis Title A Study on a Using of Quartz Crystal Microbalance Coated with 18-Crown-6 Ether Film for 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) Vapor Detection
นักศึกษา นายปวิศ ภูวนไท
รหัสประจำตัว 55613958
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมป้องกันประเทศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-011-212

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.อัมพร โปธิโย	
รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน	
ผศ.ดร.วีระ เพ็งจันทร์	
รศ.ดร.สมศักดิ์ ชุมช่วย	
รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 18 ธันวาคม พ.ศ. 2560 เวลา 10.30-12.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 5

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 18 ธันวาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการใช้ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18 - crown - 6 ether ในการตรวจวัดไอระเหยของ 2, 4, 6-Trinitrotolurene (TNT)

นักศึกษา

นายปวิศ ภูวนไท

รหัสประจำตัว

55613958

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมป้องกันประเทศ

พ.ศ.

2560

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอในเรื่องของการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมาใช้เป็นเซนเซอร์วัดมวลที่รู้จักกันในชื่อควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์มาประยุกต์ใช้ด้วยการเคลือบฟิล์มออกแกนิกเพื่อใช้ในการตรวจวัดไอระเหยของวัตถุระเบิดชนิด 2, 4, 6 Trinitrotoluene (TNT) โดยเลือกใช้สารออกแกนิกเช่น 18 - crown - 6 ether มาเป็นวัสดุความไวสูงเพื่อตรวจจับเฉพาะกับโมเลกุลของ TNT โดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของมวลของโมเลกุลที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของฟิล์มและปริมาณของ TNT ที่ตรวจวัด โดยในงานวิจัยนี้ จะศึกษาถึงการตอบสนองของฟิล์มที่ความเข้มข้นต่างกัน ความหนาและความเรียบต่างกัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มที่เหมาะสมกับการตรวจวัดไอระเหยของ TNT และนำมาตรวจวัดที่ TNT ที่มีปริมาณแตกต่างกันว่ามีผลตอบสนองต่อเซนเซอร์อย่างไร โดยพบว่าที่ความเข้มข้นของฟิล์มที่ 10^{-3} M ค่าความถี่ที่เปลี่ยนไปจะอยู่ในช่วง 150-200 Hz ระยะเวลาที่เซนเซอร์ใช้ในการวัดจนถึงจุดอิ่มตัวอยู่ที่ 400 วินาที และที่ความเข้มข้น 2×10^{-3} M. ระยะเวลาที่เซนเซอร์ใช้ในการวัดจนถึงจุดอิ่มตัวของเซนเซอร์อยู่ที่ 700 วินาที โดยค่าความถี่ที่เปลี่ยนไปจะอยู่ในช่วงประมาณ 200-300Hz ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นของ 18-crown-6 ether มากขึ้นจะส่งผลให้สามารถจับกับโมเลกุลของ TNT ได้มากขึ้น ส่วนในเรื่องของความหนาและความเรียบของฟิล์มนั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระหว่างการตรวจวัดที่เคลือบ 1 ครั้ง และ 3 ครั้ง พบว่าความถี่ที่เปลี่ยนไปสูงสุดอยู่ที่ 300Hz และ 400Hz ตามลำดับ และใช้เวลาประมาณ 400 และ 1,200 วินาทีตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าเมื่อฟิล์มมีความหนาและเรียบมากขึ้นจะจับโมเลกุลของ TNT ได้มากขึ้นและใช้เวลาในการตรวจวัดนานขึ้น และในการตรวจวัด TNT ที่ปริมาณต่างๆ กันพบว่าที่ TNT 2 กรัม ความถี่จะเปลี่ยนไปประมาณ 50 Hz ใช้เวลาในการตรวจวัด 20 นาที แต่ที่ TNT 10 กรัม ความถี่จะเปลี่ยนไปประมาณ 500 Hz และใช้เวลาในการตรวจวัดประมาณ 40 นาที ซึ่งหมายความว่าความถี่จะเปลี่ยนไปมากขึ้นและเวลาในการตรวจวัดจะนานขึ้นเมื่อ TNT มีปริมาณมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	A STUDY ON A USING OF QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE COATED WITH 18-CROWN-6 ETHER FILM FOR 2,4,6-TRINITROTOLUENE(TNT) VAPOR DETECTION
Student	Mr. Pavaris Phuvanatai
Student ID.	55613958
Degree	Master of Engineering
Program	Defence Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Toempong Petchakul

ABSTRACT

This thesis presents a using of piezoelectric materials for applying to mass sensors, also known as Quartz Crystal Microbalances (QCMs). The 2, 4, 6- trinitrotoluene (TNT) vapor detection by quartz crystal microbalance (QCM) coated with 18-crown-6 ether film is introduced. The film acts as selective or sensitive layer for detecting TNT molecule. The frequency shift response is depend on the amount of mass of molecule adheres on the coated film surface and the TNT vapor concentration. The parameters that we studied are concentration, mass or thickness and smoothness of film. We study the properties of the films that are suitable for detecting vapors of TNT in various concentrations. The frequency changes between of 150-200 Hz at the measurement by using film that has concentration at 10^{-3} M and the measured time until saturation condition is 400 seconds. At a concentration of 2×10^{-3} M, the measured time until saturation point is 700 seconds and the frequency changes between 200-300Hz. It can be concluded that the higher concentration of 18-crow-6. ether try to capture the higher TNT molecules. In terms of thickness and smoothness of the film when comparing the measurements between the coating at 1 and 3 times, the maximum shifted frequency is 300Hz. and 400Hz. respectively. It takes the measurement time approximately 400 seconds and 1,200 seconds respectively. It means that when the film is thicker, the smoothness is better. It will capture more molecules of TNT and takes longer measurement time. For the amount of TNT detection, at TNT 2 g, the maximum frequency shifted is about 50 Hz. and takes the saturation measurement time about 20 minutes. But at TNT 10 g., the maximum frequency shifted is about 500 Hz. and is likely to be much higher. The saturation measurement time is 40 minutes which means that when TNT quantity is more increased, the frequency shifted and the measurement time will be increased too.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุลที่ให้ความอนุเคราะห์ ช่วยเหลือ สนับสนุน ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งและขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. วราวุฒิ เถลัดดา ที่เป็นผู้ชี้แนะในแนวทางเบื้องต้นในงานวิจัยฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ. พลศาสตร์ เลิศประเสริฐ และ พ.ต.อ.กิตติศักดิ์ ยาคุ่มภัย ที่คอยให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการเรียนและการวิจัยในสาขาวิศวกรรมป้องกันประเทศรวมถึงยังช่วยเป็นธุระในการจัดหาสารตั้งต้นวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พิชิต สุดตา ประธานสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำและชี้แนะแนวทางทางด้านเคมีทั้งหมดในงานวิจัยฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศ และ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในอุปกรณ์และสถานที่ที่ใช้ดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายต้องขอขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่ง รวมถึงเพื่อนๆ น้องๆ ของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจที่ดีให้กับข้าพเจ้าตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ปวีศ ภูวนไท

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เซนเซอร์วัดมวลที่มีพื้นฐานมาจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	5
2.2 หลักการของThickness Shear Mode Resonator (TSM).....	12
2.3 หลักการของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ที่ทำงานในสถานะแก๊ส.....	15
2.4 วงจรออสซิลเลเตอร์.....	19
2.5 วัสดุระเบิด.....	21
2.5.1 การแบ่งประเภทของวัสดุระเบิด.....	21
2.5.2 รูปแบบและประเภทของการระเบิด.....	22
2.5.2.1 รูปแบบของการจุดระเบิด.....	22
2.5.2.2 ประเภทของการจุดระเบิด.....	23
2.5.3 วัสดุระเบิดทางการทหารที่ได้รับความนิยม.....	24
2.5.3.1 TNT (Trinitrotoluene).....	24
2.5.3.2 แอมโมเนียไนเตรท(Ammonium Nitrate).....	25
2.5.3.3 RDXและคอมโพสิชัน-4 (Composition-4)(C-4).....	26
2.5.3.4 ไดนาไมต์ (Dynamites).....	27
2.6 Sensitive Material.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบที่ใช้ในการตรวจวัดไอระเหยของTNT.....	33
3.1.1 เครื่องมือตรวจวัด.....	34
3.1.2 วงจรกำเนิดความถี่ที่ใช้ในการทดลอง.....	34
3.1.3 อุปกรณ์วัดสัญญาณความถี่.....	35
3.1.3.1 ออสซิลโลสโคป (Cathode Ray Oscilloscope;CRO).....	35
3.1.3.2 เครื่องวัดความถี่แบบดิจิตอล (Digital Frequency Counter).....	36
3.2 การทดลอง.....	36
3.2.1 การทดลองบันทึกค่าความถี่ของวงจรรออสซิลเลเตอร์เมื่อใช้คริสตัลความถี่ที่ค่าต่างๆ...36	
3.2.2 การบันทึกค่าความถี่เมื่อมีการบวมตัวของผิวหน้าของควอตซ์คริสตัลเพื่อทดสอบคุณสมบัติของคริสตัลที่นำมาพัฒนาใช้เป็นเซนเซอร์วัดมวลควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์(QCM).....	37
3.2.3 การเตรียมสารเพื่อสร้างฟิล์มเคลือบเซนเซอร์วัดมวลควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (QCM)เพื่อใช้ในการตรวจวัดเฉพาะกับ 2,4,6 – Trinitrotoluene (TNT).....	40
3.2.4 การตรวจวัด 2,4,6 – Trinitrotoluene (TNT)โดยใช้เซนเซอร์วัดมวลควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์(QCM)ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ18-crown-6 ether ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	42
3.2.5 การตรวจวัด 2,4,6 – Trinitrotoluene (TNT)โดยใช้เซนเซอร์วัดมวลควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์(QCM)ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether ที่มีความหนาและความเรียบของฟิล์มต่างกัน.....	43
3.2.6 การตรวจวัด 2,4,6 – Trinitrotoluene (TNT)ที่ปริมาณต่างๆโดยใช้เซนเซอร์วัดมวลควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์(QCM)ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether...44	
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	41
4.1 ผลการทดลองที่3.2.1 บันทึกค่าความถี่ของวงจรรอIC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT โดยผู้ทดลองและผลการทดลองวัดความถี่ของวงจรแบบต่อเนื่อง.....	41
4.1.1 ผลการทดลองบันทึกค่าความถี่ของวงจรที่ใช้ความถี่ 4 MHz.....	46
4.1.2 ผลการทดลองบันทึกค่าความถี่ของวงจรที่ใช้ความถี่ 8 MHz.....	47
4.1.3 ผลการทดลองบันทึกค่าความถี่ของวงจรที่ใช้ความถี่ 10 MHz.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.4 ผลการทดลองบันทึกค่าความถี่ของวงจรที่ใช้ความถี่ 11.0592 MHz.....	48
4.1.5 ผลการบันทึกค่าความถี่แบบต่อเนื่องของวงจรIC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR ที่ใช้คริสตัลความถี่ 10 MHz เมื่อบันทึกค่าความถี่ทุกๆ 1 วินาที.....	48
4.2 ผลการทดลอง บันทึกค่าความถี่ของ Quartz Crystal Microbalanced ที่ใช้ความถี่ 10 MHz เมื่อให้การ бурตคสะสมบนผิวหน้าของควอตซ์คริสตัล.....	50
4.3 ผลการทดลอง บันทึกค่าความถี่ของ Quartz Crystal Microbalanced ที่เคลือบด้วยฟิล์ม ของ 18-crown-6 ether ที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อตรวจวัดTNTที่ปริมาณเท่าๆกัน.....	51
4.3.1 การตรวจวัดโดยใช้QCMที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มบางในอากาศและในสภาวะที่มี TNT เจือปน.....	51
4.3.2 การตรวจวัดโดยใช้QCMที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ18-crown-6 ether ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	51
4.3.3 การตรวจวัดโดยใช้QCMที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ18-crown-6 ether ในอากาศ และในสภาวะที่มี TNT เจือปน.....	51
4.4 ผลการทดลอง บันทึกค่าความถี่ของQuartz Crystal Microbalanced ที่เคลือบด้วยฟิล์ม ของ 18-crown-6 ether ที่ความหนาต่างกัน เมื่อตรวจวัดTNTที่ปริมาณเท่าๆกัน.....	56
4.5 ผลการทดลอง บันทึกค่าความถี่ของQuartz Crystal Microbalanced ที่เคลือบด้วยฟิล์ม ของ 18-crown-6 ether เมื่อตรวจวัดTNTที่ปริมาณแตกต่างกัน.....	56
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	64
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	64
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	66
เอกสารอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก.....	69
ภาคผนวก ก.....	70
ภาคผนวก ข.....	73
ภาคผนวก ค.....	76
ภาคผนวก ง.....	111
ประวัติผู้เขียน.....	132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินงาน.....	3
2.1 แสดงถึงคุณสมบัติและลักษณะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแต่ละชนิด.....	7
2.2 แสดงถึงคุณสมบัติและลักษณะของการตัดผลึกตามแนวระนาบแบบต่างๆ.....	9
2.3 แสดงถึงค่า Shear Mode Acoustic Impedance.....	16
4.1 แสดงถึงผลการทดลองตรวจวัดTNTที่ปริมาณต่าง.....	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแต่ละชนิดที่นิยมใช้ในปัจจุบัน.....	6
2.2 โครงสร้างการตัดผลึกแบบ x-cut , y-cut และ z-cut	8
2.3 โครงสร้างการตัดผลึกตามแนวระนาบแบบต่างๆ.....	8
2.4 การสั่นในแบบShear mode ที่เกิดขึ้นในวัสดุที่มีสมบัติ Thickness Shear Mode เมื่อความหนาเพิ่มขึ้น.....	13
2.5 โครงสร้างของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์และการตัดผลึกแบบAT-CUT	18
2.6 แสดงถึงIC-compatible crystal oscillator circuit	20
2.7 โครงสร้างของ TNT	25
2.8 รูปร่างของวัตถุระเบิดชนิดแอมโมเนียมไนเตรต (ammonium nitrate).....	26
2.9 รูปร่างของระเบิดชนิดคอมโพสิชัน-4 (Composition-4)(C-4).....	27
2.10 รูปร่างของระเบิดไดนาไมต์.....	28
2.11 แสดงถึงโครงสร้างของ 18-Crown-6 ether(a) และ 2,4,6-TRINITROTOLUENE (b).....	29
2.12 แสดงถึงปฏิกิริยาไนเตรชันที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์ไตรไนโตรโทลูอีน (TNT).....	30
2.13 แสดงถึงปฏิกิริยาการจับกันของ18-crown-6 ether กับ ไตรไนโตรโทลูอีน (TNT).....	31
3.1 ระบบตรวจวัดไอระเหยของTNTที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้.....	33
3.2 โครงสร้างควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์(QCM).....	34
3.3 IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT.....	35
3.4 ออสซิลโลสโคป.....	35
3.5 เครื่องนับความถี่แบบดิจิตอล ยี่ห้อ Ascel Electronic รุ่น AE20401.....	36
3.6 การทดลองหาจริงและค่าความถี่ที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้เป็น QCM เซนเซอร์.....	37
3.7 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองบันทึกค่าความถี่โดยใช้การตกสะสมของการบวม.....	37
3.8 การบวมที่บรรจุลงในแชมเบอร์.....	38
3.9 ติดตั้งควอตซ์คริสตัลที่ด้านบนของแชมเบอร์.....	38
3.10 ระบบวัดข้อมูลความถี่ที่ใช้คริสตัล 10MHz ในการตกสะสมของการบวม.....	39
3.11 QCM ที่ยังไม่ถูกเคลือบผิวและโครงสร้างของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (QCM)หลังจากที่เคลือบฟิล์มแล้ว.....	40
3.12 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารเคลือบ QCM.....	41
3.13 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มเคลือบผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์.....	41
3.14 เครื่องซังสาร.....	41
3.15 Ultrasonic bath.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 คลื่นความถี่จาก Oscilloscope เมื่อใช้คริสตัลความถี่ 4 MHz.....	46
4.2 คลื่นความถี่จาก Oscilloscope เมื่อใช้คริสตัลความถี่ 8 MHz.....	47
4.3 คลื่นความถี่จาก Oscilloscope เมื่อใช้คริสตัลความถี่ 10 MHz.....	47
4.4 คลื่นความถี่จาก Oscilloscope เมื่อใช้คริสตัลความถี่ 11 MHz.....	48
4.5 ข้อมูลที่ได้ โดยใช้คริสตัล 10 MHz เมื่อบันทึกค่าทุกๆ 1 วินาที.....	49
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความถี่โดยใช้คริสตัล 10 MHz เมื่อบันทึกค่าทุกๆ 1 วินาที.....	49
4.7 ข้อมูลความถี่ที่บันทึกได้ เมื่อให้การบูรตกสะสมบนผิวหน้าของควอตซ์คริสตัล.....	50
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งกับความถี่เมื่อให้การบูรตกสะสมบนผิวหน้าของควอตซ์คริสตัล.....	50
4.9 เปรียบเทียบระหว่างเวลา(s)และ $\Delta m(g)$ บนผิวหน้าควอตซ์คริสตัล.....	51
4.10 กราฟแสดงความแตกต่างของการตรวจวัดในอากาศกับตรวจวัดTNTโดยQCMที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มบาง.....	52
4.11 กราฟแสดงค่าความถี่ที่เปลี่ยนไป(Δf)ของQCMที่เคลือบด้วย18-Crown-6 ether ที่ความเข้มข้นต่างๆในสถานะที่มี TNT เจือปน.....	53
4.12 กราฟแสดงความแตกต่างของการตรวจวัดในอากาศกับตรวจวัดTNTโดยQCMที่เคลือบฟิล์ม.....	55
4.13 รูปแสดงความแตกต่างของQCMที่ไม่ได้เคลือบและเคลือบฟิล์มบางที่ความหนาต่างๆ.....	57
4.14 กราฟแสดงการตรวจวัดTNTด้วยQCMเซนเซอร์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ18-crown-6 ether ที่ความหนาต่างๆ.....	57
4.15 กราฟแสดงการตรวจวัดTNTด้วยQCMเซนเซอร์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ18-crown-6 ether ที่ปริมาณTNTต่างๆ.....	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันวัตถุระเบิดนั้นถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งใน การทหาร การก่อการร้าย หรือ แม้แต่ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ โดยวัตถุระเบิดที่นิยมใช้กันหลักๆ ได้แก่ TNT , C4 , Dynamite , ANFO และ RDX แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ TNT เนื่องจากใช้งานได้ง่ายและสามารถสร้างแรงระเบิดได้ดี ซึ่งการใช้วัตถุระเบิดต่างๆเหล่านี้โดยไม่ควบคุม อาจทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ทั้ง ชีวิต ทรัพย์สินรวมถึงสภาพแวดล้อมได้โดยตรงจากทั้ง การระเบิดและการปนเปื้อนของสารตั้งต้นต่างๆ ซึ่ง จากปัจจัยต่างๆเหล่านี้ทำให้ผู้วิจัยอยากที่จะพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับกับวัตถุระเบิดหรือสาร ตั้งต้นวัตถุระเบิดได้ ซึ่งในปัจจุบันการตรวจหาวัตถุระเบิดและสารตั้งต้นของวัตถุระเบิดนั้นมีมากมาย หลากหลายวิธี อาทิเช่นการตรวจหาโดยใช้ระบบเรดาร์ทะลุทะลวงผิวดินที่เรียกว่าGPR (GROUND PENETRATION RADAR) [11]หรือการตรวจหาด้วยการใช้สถานี X-Ray เคลื่อนที่โดยการใช้ ยานพาหนะที่ติดอุปกรณ์ X-Ray (ระบบ Z-backscatter) [12] เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีในการตรวจหา นั้น จะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป แต่ในงานวิจัยฉบับนี้จะเน้นในการตรวจหากลิ่นไอของสารระเบิดโดย การเก็บตัวอย่าง (Remote Explosive Scent Tracing- REST) ซึ่งเทคนิคนี้จะใช้การสำรวจที่ด้วย การใช้สุนัขและหนูหรือใช้จมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Nose) หรือเซ็นเซอร์ความไวสูง (Highly Sensitive Sensor) [13-17] ในการตรวจสอบระเบิดและวัตถุระเบิด ซึ่งเหมาะกับการงานปิดล้อม ตรวจค้นเพื่อหาร่องรอยระเบิด, 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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในสิ่งแวดล้อมที่หลากหลาย เช่น ภายใต้อากาศสุญญากาศ สภาวะที่มีสิ่งแวดล้อมเป็นแก๊ส(ใช้เป็นแก๊สเซนเซอร์ซึ่งมีการนำไปใช้เป็นครั้งแรก) และในปัจจุบันได้มีการนำไปใช้ภายใต้อากาศแวดล้อมที่เป็นของเหลวอีกด้วย เนื่องจากสามารถนำไปใช้ได้สิ่งแวดล้อมที่หลากหลาย ทำให้ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์มีการนำไปใช้ประโยชน์ในหลายด้าน เนื่องจากความสามารถตามธรรมชาติของQCMที่มีการตรวจวิเคราะห์ในเวลาจริง (มีความเป็นReal Time)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาคำนำควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์มาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดหาสารตั้งต้นของวัฏระเบิด โดยการวัดมวลของสารตั้งต้นของวัฏระเบิดที่ตกสะสมบนควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ18-Crown-6 Ether ที่ทำงานร่วมกับวงจรกำเนิดความถี่คริสตัลอสซิลเลเตอร์แบบสัญญาณรบกวนต่ำ และบันทึกผลการทดลองด้วยโปรแกรมเก็บข้อมูลที่พัฒนาขึ้น ซึ่งสามารถแสดงผลการตอบสนองของมวลตกสะสมได้เลย(Real time)

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ด้านคุณลักษณะและความสามารถในการใช้งาน
2. เพื่อนำควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ ไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเซนเซอร์ตรวจวัดสารตั้งต้นวัฏระเบิด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาคุณลักษณะและหลักการทำงานพื้นฐานของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์
2. ออกแบบวงจรและเซนเซอร์ที่จะนำไปใช้ในการตรวจวัดสารตั้งต้นวัฏระเบิด
3. ทดลองวงจรและเซนเซอร์ที่จะนำไปใช้ในการตรวจวัดสารตั้งต้นวัฏระเบิด
4. รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการตรวจวัดสารตั้งต้นวัฏระเบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินงาน

ช่วงเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
ปี 2556	- ศึกษาคุณลักษณะและหลักการทำงานพื้นฐานของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์และวงจรออสซิลเลเตอร์แบบสัญญาณรบกวนต่ำ
ปี 2557	- ทำการออกแบบวงจรที่นำไปใช้ในการตรวจวัดมวลความไวสูง - ศึกษาคุณลักษณะของTNTและสารที่มีคุณสมบัติในการตรวจวัด TNT เพื่อที่จะนำมาเคลือบผิวของเซนเซอร์
ปี 2558	- ทำการทดลองวงจรที่นำไปใช้ในการตรวจวัดมวลความไวสูง - ปรับปรุงวงจรเพื่อการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดสารตั้งต้นของวัตถุระเบิดชนิด TNT
ปี 2559	- รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการตรวจวัด

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำอุปกรณ์ เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์และวิธีการต่างๆ มาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดมวลความไวสูงได้
2. มีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีและหลักการทำงานพื้นฐานควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์
3. มีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีและนำควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ไปใช้ในการตรวจวัดมวลความไวสูง
4. สามารถนำความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีและนำควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดสารตั้งต้นของวัตถุระเบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การตรวจหากลิ่นไอสารระเบิดโดยการเก็บตัวอย่าง (Remote Explosive Scent Tracing- REST) เป็นการแก้ปัญหาการนำสุนัขเข้าพื้นที่ไม่ได้ โดยการเก็บตัวอย่างไอระเหยในพื้นที่ออกมาให้สุนัขดมข้างนอกแทนเหมาะสำหรับงานปิดล้อมตรวจค้น เพื่อหาร่องรอยระเบิด การตรวจวัดต้องสงสัย การตรวจพื้นที่ต้องสงสัย โดยในงานวิจัยฉบับนี้เลือกวิธีการที่จะตรวจหากลิ่นไอสารระเบิดโดยการเก็บตัวอย่าง (Remote Explosive Scent Tracing- REST) โดยงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการพัฒนาระบบตรวจวัดไอระเหยของวัตถุระเบิดชนิด TNT โดยงานวิจัยฉบับนี้นั้นใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมาประยุกต์เป็นเซนเซอร์วัดมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ จากนั้นได้ประยุกต์ไปเป็นเซนเซอร์ทางเคมีด้วยการเคลือบฟิล์มไปยังผิวของเซนเซอร์เพื่อให้ตรวจวัดได้เฉพาะสารที่มีคุณสมบัติจับตรงกับฟิล์มนั้นๆได้

ในปัจจุบันการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมต่างๆอย่างหลากหลาย เช่น ตัววัดคลื่นเสียงของหัวใจ (ไมโครโฟน), ตัวรับสัญญาณของเครื่องอัลตราซาวด์, Quartz crystal microbalance (QCM) ที่มีการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดสารชีวโมเลกุลจำนวนมาก, ตัวตรวจวัดแรง เป็นต้น

งานวิจัยฉบับนี้สนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับ Quartz crystal microbalance (QCM) เนื่องจากมีราคาที่ไม่สูง ง่ายในท้องตลาดและเป็นวัสดุที่มีความไวสูงมาก จึงเหมาะสมที่จะนำมาพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดมวลในระดับโมเลกุลตามที่ผู้วิจัยต้องการ โดยผู้วิจัยได้นำ Quartz crystal microbalance (QCM) มาพัฒนาเพื่อให้อาจสามารถตรวจหาไอระเหยของ วัตถุระเบิดชนิด TNT ด้วยการเคลือบผิวของ Quartz crystal microbalance (QCM) ด้วยโพลิเมอร์ฟิล์ม ที่มี 18-crown-6 ether เป็นวัสดุที่ใช้จับกับ TNT โดยหลักการและทฤษฎีของ Quartz crystal microbalance (QCM) รวมถึงส่วนประกอบต่างๆของระบบตรวจวัดที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้น และ เหตุผลที่เลือก 18-crown-6 ether มาใช้ในงานวิจัยนี้ จะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

ใจความสำคัญของวิธีการตรวจวัดด้วยควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์คือการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการต่างๆทั้งทางฟิสิกส์และทางเคมี โดยส่วนใหญ่จะมีที่มาจากจากการเปลี่ยนแปลงของมวลเข้ามาเกี่ยวข้องและมีราคาไม่สูงมากเมื่อเทียบกับวิธีตรวจวัดอื่นๆ โดยควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในสิ่งแวดล้อมที่หลากหลาย เช่น ภายใต้สภาวะสุญญากาศ สภาวะที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งแวดลอมเป็นแก๊ส(ใช้เป็นแก๊สเซนเซอร์ซึ่งมีการนำไปใช้เป็นครั้งแรก) และในปัจจุบันได้มีการนำไปใช้ภายใต้สภาวะแวดลอมที่เป็นของเหลวด้วยโดยการตัดของผลึกควอตซ์ตามแนวขวาง(AT cut) จะทำให้ตัวผลึกมีความไวต่อความเครียด(strain)ของสัมประสิทธิ์เชิงกลในความถี่กำหนด ในอดีต Resonators (ตัวควบคุมการสั่นของ Oscillator)ได้ถูกนำมาใช้เป็น Gravimetric sensor (เซนเซอร์เกี่ยวกับการวัดน้ำหนัก) เรียกว่า Quartz Crystal Microbalance(QCM)

จากคุณสมบัติข้างต้นของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์จึงเป็นเหตุผลให้ผู้วิจัยเลือกที่จะประยุกต์ใช้วิธีนี้ในการตรวจวัดหากลืนไอของสารระเหิดเนื่องจากเล็งเห็นว่าสามารถตรวจวัดได้ง่ายในทุกสภาพแวดลอมเนื่องจากสารตั้งต้นวัตถุระเหิดส่วนใหญ่จะเป็นของเหลวไม่ก่แก๊สอีกทั้งยังแสดงผลแบบReal-Time และเมื่อเราเลือกสารที่นำมาเคลือบเซนเซอร์ให้ตรวจวัดแต่เฉพาะสารตั้งต้นที่เราต้องการตรวจวัดก็จะสามารถตรวจวัดมวลของสารตั้งต้นที่ตรวจวัดได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

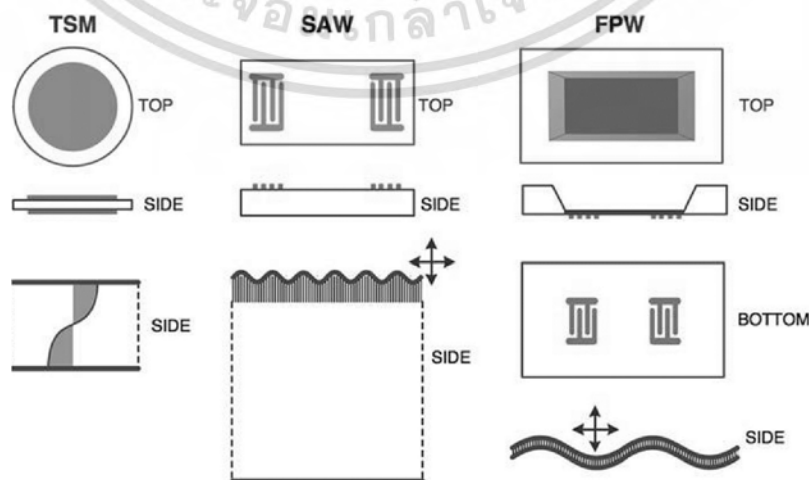
2.1 เซนเซอร์วัดมวลที่มีพื้นฐานมาจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก[2]

เซนเซอร์วัดมวลจัดเป็นเซนเซอร์ทาเคมีชนิดหนึ่งซึ่งนิยมใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ(gravimetry) เนื่องจากวิธีการใช้งานของมัน ซึ่งเมื่อเราพูดถึงเกี่ยวกับ microbalances และ microgravimetry เราจะเรียกวัดที่เรานำมาประยุกต์ใช้ในการวัดนี้ว่าเซนเซอร์ โดยหลักการคือการวัดการเปลี่ยนแปลงของมวลผ่านการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของoscillatorเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีขนาดเล็ก มีความไวสูงและมีเสถียรภาพที่ดี โดยเราจะเรียกวัดชนิดนี้ว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากมีความบาง และสามารถดูดซับแก๊สได้ โดยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีหลากหลายประเภทและนิยมมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีราคาไม่สูงมาก โดยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก[7] คือ อุปกรณ์ตรวจวัดแรงกลต่างๆ เช่น แรงดัน ความเร่ง การสั่น แรงเครียด หรือแรงกระทำอื่นๆ โดยเปลี่ยนพลังงานกลต่างๆเหล่านี้ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ในทางกลับกันเมื่อให้พลังงานไฟฟ้าแก่วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริก วัสดุนั้นก็จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้เช่นกัน สมบัติเพียโซอิเล็กทริก จะเกิดขึ้นในวัสดุที่มีสภาพเป็นขั้วทางไฟฟ้าเท่านั้น วัสดุเพียโซอิเล็กทริก มีทั้งที่พบในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ โดยวัสดุที่พบในธรรมชาติได้แก่ แร่ควอตซ์ แร่ทัวร์มาลีน ส่วนวัสดุสังเคราะห์ได้แก่ เลดเซอร์โคเนียมไททาเนต (Lead zirconia titanate) ซึ่งนิยมเรียกว่า PZT เลดไททาเนต เซอร์โคเนต (Lead titanate zirconate) และแบเรียมไททาเนต(Barium titanate) แต่ที่นิยมนำมาใช้เป็นเซนเซอร์มากที่สุดคือ ควอตซ์ เนื่องจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกผลึกเดี่ยวที่มีค่า

คุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกค่อนข้างสูงและเสถียร โดยการนำผลึกควอตซ์มาใช้เป็นเซนเซอร์นั้นส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหญ่จะใช้การตัดผลึกควอตซ์ในแบบ AT-CUT เนื่องจากทำให้ได้พื้นที่หน้าตัดที่กว้างเหมาะแก่การนำมาประยุกต์เป็นเซนเซอร์โดยผลึกควอตซ์ที่มีลักษณะการตัดผลึกแบบ AT-CUT นี้เมื่อได้รับสัญญาณทางไฟฟ้าจะสั่นในลักษณะที่เรียกว่า Thickness Shear Mode (TSM) ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ได้นำควอตซ์ มาใช้เป็นเซนเซอร์วัดมวลหรือที่นิยมเรียกกันว่า ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (Quartz Crystal Microbalanced) ในเวลาต่อมาได้มีการพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกขึ้นอีกหลายชนิด อาทิเช่น Surface Acoustic Wave (SAW) devices, vibrating beams และ cantilevers ซึ่งมีข้อดีข้อเสียและหลักการต่างกันไปรวมถึงการประยุกต์ใช้วัสดุชนิดอื่นๆมากระทำต่อพื้นผิวของวัสดุวัสดุเพียโซอิเล็กทริกให้เป็นชั้นๆ ซึ่งวัสดุชั้นๆต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติมีความไวทางเคมี เพื่อพัฒนาจากเซนเซอร์วัดมวลที่เป็นเซนเซอร์วิเคราะห์เชิงปริมาณ ให้เป็นเซนเซอร์ที่สามารถวิเคราะห์ทางเคมีได้นั่นเอง ซึ่งในปัจจุบันได้มีการใช้วิธีเหล่านี้้อย่างแพร่หลายเพราะนักวิจัยหลายๆท่านหันมาศึกษาเกี่ยวกับเซนเซอร์ชนิดนี้มากขึ้นอีกทั้งในปัจจุบันยังสามารถพัฒนาให้เซนเซอร์ชนิดนี้ที่จากเดิมสามารถทำงานได้แค่ในอากาศ หรือในสถานะที่เป็นแก๊ส ให้สามารถตรวจวัดในตัวกลางที่ควบคุมการเปลี่ยนของมวลยากๆอย่างในของเหลวแล้วด้วย

ความเหมาะสมของการเลือกใช้เซนเซอร์ชนิดนี้และชั้นของวัสดุที่มีคุณสมบัติมีความไวทางเคมีจะพิจารณาจากลักษณะทั่วไปของลักษณะการตรวจวัดโดยจะเห็นได้จากการที่สัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์นั้นจะเปลี่ยนแปลงชัดเจนก็ต่อเมื่อมวลนั้นสามารถทำปฏิกิริยากับวัสดุที่มีความไวทางเคมีนั้นๆได้ ในทางกลับกัน ถ้ามวลที่ตรวจวัดไม่สามารถทำปฏิกิริยากับวัสดุที่มีความไว ก็จะทำให้พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของเซนเซอร์นั้นเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลยด้วยซ้ำ โดยคุณสมบัติและลักษณะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแต่ละชนิดนั้นจะเปรียบเทียบให้เห็นดังรูปที่ 2.1 และตารางที่ 2.1



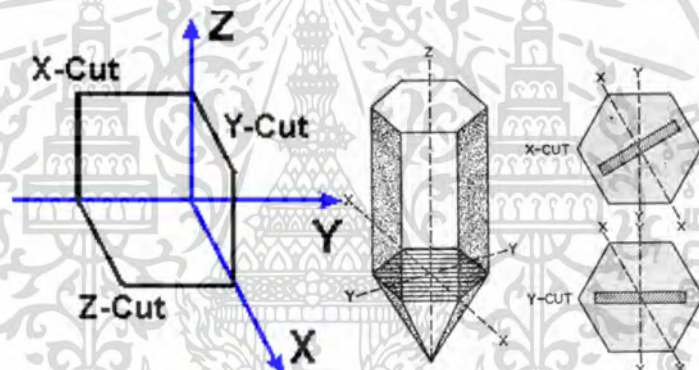
รูปที่ 2.1 ลักษณะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแต่ละชนิดที่นิยมใช้ในปัจจุบัน[1]

ตารางที่ 2.1 แสดงถึงคุณสมบัติและลักษณะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแต่ละชนิด[2]

Device Type	Wave Type	Particle Displacement Relative to Wave Propagation Direction	Transverse Component Displacement Relative to the Sensing Surface	Media	Plate Thickness	Factors Determining Frequency ^a	Typical Frequency (MHz)	Example
TSM	Bulk	Transverse	Parallel	Gas Liquid	$\lambda/2$	Plate thickness	5 to 10	Quartz 6 MHz $v = 3330$ m/s $d = 277 \mu\text{m}$ $\lambda = 555 \mu\text{m}$
SAW	Surface	Transverse, parallel ^b	Normal	Gas	$\gg \lambda$	IDT Finger spacing	30 to 300	Quartz 158 MHz $v = 3160$ m/s $d = 760 \mu\text{m}$ $\lambda = 20 \mu\text{m}$
STW	Surface	Transverse	Parallel	Gas ^c Liquid	$\gg \lambda$	IDT Finger spacing ^d	30 to 300	Quartz 250 MHz $v = 5000$ m/s $d = 500 \mu\text{m}$ $\lambda = 20 \mu\text{m}$
FPW	Plate	Transverse, parallel ^b	Normal	Gas Liquid	$\ll \lambda$	Plate thickness, IDT finger spacing	2 to 7	Zinc oxide ^e 5.5 MHz $v = 550$ m/s $d = 3.5 \mu\text{m}$ $\lambda = 100 \mu\text{m}$
SH-APM	Plate	Transverse	Parallel	Gas ^e Liquid	3 to 10 λ	Plate thickness, IDT finger spacing	25 to 200	Quartz 101 MHz $v = 5060$ m/s $d = 203 \mu\text{m}$ $\lambda = 50 \mu\text{m}$
Device Type	Mass sensitivity increases with ...	Response to Added Mass ^b	S_m (unperturbed) ^e	S_m Example (Hz/MHz)/(ng/cm ²) ^d				
TSM	Decreasing plate thickness (Increasing frequency)	$\Delta F = -C_T F^2 \Delta M$	$S_m = -\frac{2}{\rho \lambda} - \frac{1}{\rho t}$	0.014 (6 MHz quartz plate)				
SAW	Decreasing wavelength (Increasing frequency)	$\Delta F = -C_S F^2 \Delta M$	$S_m = \frac{K(\sigma)}{\rho \lambda} = -\frac{K(\sigma)}{\rho v_R}$	0.20 (158 MHz quartz plate)				
STW	Decreasing wavelength (Increasing frequency) quartz plate Increasing grating thickness	$\Delta F = -C_G F^2 \Delta M$	$S_m = -\frac{K'(\sigma, G)}{\rho \lambda} = -\frac{K'(\sigma, G) F}{\rho v_{STW}}$	0.180 (250 MHz quartz plate)				
FPW ^e	Decreasing plate thickness (Decreasing frequency for constant wavelength)	$\Delta F = -\frac{1}{2M} F \Delta M$	$S_m = -\frac{1}{2M} - \frac{1}{2\rho t} =$	0.38 (5.5 MHz composite plate)				
SH-APM ^f	Decreasing plate thickness (Increasing frequency for constant wavelength)	$\Delta F = -\frac{J}{\rho t} F \Delta M$	$S_m = -\frac{J}{\rho t}$	0.019 (101 MHz quartz plate)				

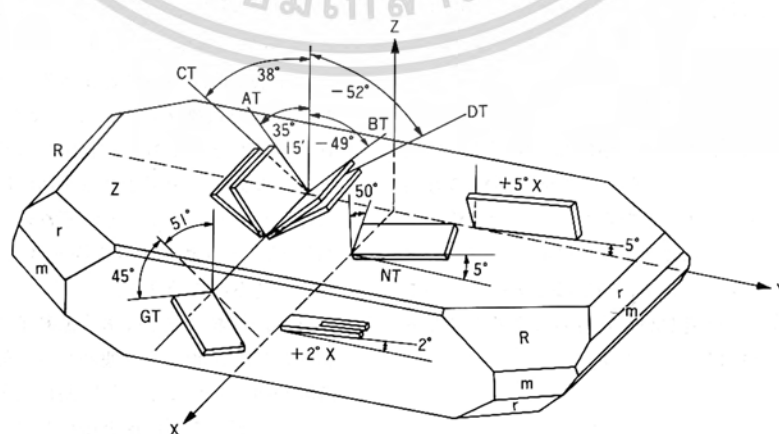
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางมีวัสดุหลายชนิดที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่นิยมนำมาใช้งาน เนื่องจากราคาไม่แพงและเพราะมันมีค่าสัมประสิทธิ์ piezoelectric ค่อนข้างสูง ควอตซ์ คือวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์มากที่สุด โดยโครงสร้างของผลึกควอตซ์มีลักษณะเป็นผลึกที่มีหกเหลี่ยม และแกนสมมาตรไม่ผ่านศูนย์กลางของผลึก โดยค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและคุณสมบัติต่างๆของควอตซ์ อาทิเช่น ลักษณะการสั่น ย่านความถี่ที่ใช้งานได้ อายุการใช้งาน ความเสถียรของความถี่ และ ช่วงอุณหภูมิที่ควอตซ์จะทำงานได้จะขึ้นกับระนาบในการตัด ซึ่งการตัดผลึกควอตซ์นั้นมีหลากหลายแบบขึ้นอยู่กับการนำควอตซ์ไปใช้งาน โดยหลักการตัดผลึกคริสตัลในเบื้องต้นนั้นก็จะแบ่งได้ 2 ประเภทคือการตัดควอตซ์ตามแนวแกนและการตัดควอตซ์ตามระนาบสามมิติ โดยการตัดควอตซ์ตามแนวแกนคือ การตัดควอตซ์ในแนวแกน x, y หรือ z เพียงแกนใดแกนหนึ่ง 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 เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการตัดผลึกในแนวระนาบตามแบบต่างๆที่นิยมใช้ได้แก่การตัดผลึกแบบ AT-CUT, SC-CUT , BT-CUT , GT-CUT , XY-CUT และ IT-CUT ซึ่งแต่ละแบบมีคุณสมบัติต่างๆกันไปโดยจะสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้[1]

ตารางที่ 2.2 แสดงถึงคุณสมบัติและลักษณะของการตัดผลึกตามแนวระนาบแบบต่างๆ

CRYSTAL CUT	ย่านความถี่ที่ทำงาน (MHZ)	โหมดการสั่น	รายละเอียด
AT	0.5 - 300	Thickness shear	<p>การตัดผลึกแบบAT-CUT เป็นการตัดผลึกที่นิยมใช้มากที่สุดที่ถูกพัฒนาขึ้นในปี 1934 โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีย่านความถี่ในการทำงานในช่วง 500 kHz ถึงประมาณ 300 MHz โดยการตัดคริสตัลแบบAT-CUTจะเป็นการตัดผลึกที่แกน X ของคริสตัลโดยจะตัดให้เป็นแผ่นบางที่ทำมุมอยู่ในช่วง$35^{\circ} 5'$ จนถึง$35^{\circ} 25'$ กับแกน Z โดยค่าของความถี่ที่ได้นั้น จะขึ้นกับมุมลึบตาที่ตัดและทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิ -55°C จนถึง 125°C แต่ช่วงอุณหภูมิที่ทำงานได้ดีที่สุดคือ $25-35^{\circ}\text{C}$ มีความไวต่อความเครียดเชิงกลสูง โดยจะทำงานที่ความถี่พื้นฐานในช่วง $1 - 30\text{ MHz}$ และที่ 3^{rd} overtoneจะอยู่ที่ $30 - 90\text{ MHz}$ และ 5^{th} overtone จะอยู่ที่ $90 - 150\text{ MHz}$ ข้อดีของการตัดแบบ AT-CUT คือ มีความไวค่อนข้างสูง มีเสถียรภาพของความถี่สูง มีช่วงการทำงานกว้างสัญญาณรบกวนต่ำ และ ต้นทุนรวมถึงกระบวนการผลิตไม่สูงและยากมาก โดยภาพของการตัดผลึกแบบAT-CUT เป็นดังนี้</p>  <p>The diagram shows a cross-section of a quartz crystal cut at an angle of 35.5 degrees relative to the Z-axis. The crystal is labeled 'AT-Cut Type' and shows the X, Y, and Z axes.</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) แสดงถึงคุณสมบัติและลักษณะของการตัดผลึกตามแนวระนาบแบบต่างๆ

SC	0.5 - 200	Thickness shear	<p>การตัดผลึกแบบSC-CUT มีชื่อเต็มคือ stress compensated cut หรืออีกชื่อหนึ่งคือ double rotated cut ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงปลายปี 1970 โดยนิยมใช้ใน crystal ovens โดยเฉพาะ โดย crystal ovens คือแชมเบอร์ปิดที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิสำหรับคริสตัลเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงความถี่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ คริสตัลแบบSC-CUT จะใช้การตัดที่ทำมุมกับแกนสองแกนที่ไม่เท่ากันคือ $35^{\circ}15'$ และ $21^{\circ}54'$ ทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิ 80°C จนถึง 100°C แต่ช่วงอุณหภูมิที่ทำงานได้ดีที่สุดคือ 92°C ข้อดีของการตัดแบบSC-CUT คือ มีอายุการใช้งานและเสถียรภาพของความถี่รวมทั้งมีสัญญาณรบกวนค่อนข้างต่ำ แต่ข้อเสียของการตัดแบบ SC-CUT คือยากต่อการผลิตเนื่องด้วยมุมที่ใช้ในการตัดผลึกมีถึงสองมุมและมีค่าไม่เท่ากันทำให้ค่าใช้จ่ายในการตัดผลึกนั้นค่อนข้างสูง จากอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดมุมที่ตัดผลึก กระบวนการขัดผิวรวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการบรรจุ อีกทั้งยังมีช่วงการทำงานที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงในระดับนี้ จึงทำให้ไม่ได้รับความนิยมโดยการตัดของ SC-CUT จะแสดงดังภาพด้านล่าง</p> 
BT	0.5 - 200	Thickness shear	<p>การตัดผลึกแบบBT-CUT มีลักษณะการตัดผลึกที่คล้ายกับการตัดแบบAT-CUT แต่ต่างกันตรงที่มีมุมที่ทำกับแกน Z ที่ 49° และมีคุณสมบัติการทำซ้ำที่ดีทำให้ค่าคงที่ของความถี่ที่ $2.536\text{ MHz}\cdot\text{mm}$. แต่ความเสถียรทางอุณหภูมิสู้ในแบบAT-CUT ไม่ได้ แต่สามารถใช้สำหรับงานที่มีความถี่สูงจะทำให้ได้ผลที่ดีกว่าเนื่องจากมีค่าคงที่ของความถี่ที่ค่อนข้างสูง</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) แสดงถึงคุณสมบัติและลักษณะของการตัดผลึกตามแนวระนาบแบบต่างๆ

XY	5 - 100 kHz	Length- width flexure	การตัดผลึกแบบXY-CUT นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับที่ความถี่ต่ำๆ โดยจะมีความถี่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ 32.768kHz. เพราะใช้ในไมโครคอนโทรลเลอร์หลายชนิดใช้เป็นตัวอ้างอิงสัญญาณนาฬิกาให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยข้อดีของการตัดผลึกแบบนี้คือมีค่าความถี่ค่อนข้างต่ำ และมีราคาค่อนข้างถูกมากเมื่อเทียบกับการตัดผลึกแบบอื่น รวมถึงมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำมากๆ
GT	0.1 - 2.5	Width extensional	การตัดผลึกแบบGT-CUT เป็นการตัดผลึกบนระนาบแกน Y ที่ทำมุม $51^{\circ} 7'$ กับแกน Z, โดยมีช่วงอุณหภูมิทำงานอยู่ที่ -25°C ถึง $+75^{\circ}\text{C}$
IT	0.5 - 200	Thickness shear	การตัดผลึกแบบIT-CUT มีลักษณะการตัดผลึกคล้ายกับการตัดผลึกแบบSC-CUTคือมีการตัดแบบdouble rotated cut เหมือนกันแต่การตัดผลึกแบบIT-CUTนั้นถูกพัฒนามาเพื่อใช้กับ crystal ovens ที่ต้องการทำงานที่อุณหภูมิ $80 - 90^{\circ}\text{C}$ โดยเฉพาะ ซึ่งถ้าใช้การตัดผลึกแบบSC-CUT นั้นจะทำให้ควบคุมอุณหภูมิได้ยาก โดยการตัดผลึกแบบIT-CUT มีจุดเปลี่ยนอุณหภูมิอยู่ที่ $85^{\circ}\text{C} - 105^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำให้ไม่มีผลต่อความไวและความแม่นยำเหมือนกับการตัดแบบ SC-CUT

แต่ในงานวิจัยฉบับนี้จะพูดถึงการใช้ ควอตซ์ ที่ถูกตัดในแบบ AT-CUT มาใช้งานซึ่งการตัดผลึกแบบAT-CUTนั้นทำให้ผลึกมีการสั่นในแบบที่เรียกว่า Thickness Shear Mode ซึ่งรายละเอียดจะพูดถึงในตอนถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 หลักการของThickness Shear Mode Resonator (TSM) [2]

Thickness Shear Mode Resonator[1] คือชื่อที่แท้จริงของเซนเซอร์วัดมวลที่นิยมใช้กัน หรือที่เรารู้จักกันในชื่อของ Quartz Crystal Microbalanced ซึ่งก็คือการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีความสามารถในการสั่นพื้นฐานคงที่ มาใช้ในการตรวจวัดในระดับไมโครโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เปลี่ยนไปจากค่าความถี่พื้นฐานกับมวลที่เพิ่มขึ้นหรือความหนาที่เพิ่มขึ้นของตัวออสซิลเลเตอร์ โดยการสั่นของThickness Shear Mode Resonatorนั้นจะสั่นในลักษณะของการรับแรงด้านข้างที่เกิดจากแรงเฉือนของควอตซ์ โดยมีมวล(M)หรือความหนาของผลึก(t)และความยาวคลื่นที่เกิดขึ้น(λ)ทำให้เกิดคาบการสั่น(n) ที่ความถี่ที่ค่าหนึ่งซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\lambda = \frac{2t}{n} \quad (2.1)$$

เมื่อ $n = 1$ จะมีความถี่ที่ค่า F ซึ่งถ้า $n > 1$ จะทำให้คาบในการสั่นเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ต้องเพิ่มความเร็วในการเฉือนผลึกมากขึ้นที่ v จะได้ว่า

$$v = F\lambda \quad (2.2)$$

เมื่อแทน(2.1)ลงในสมการ(2.2) ;

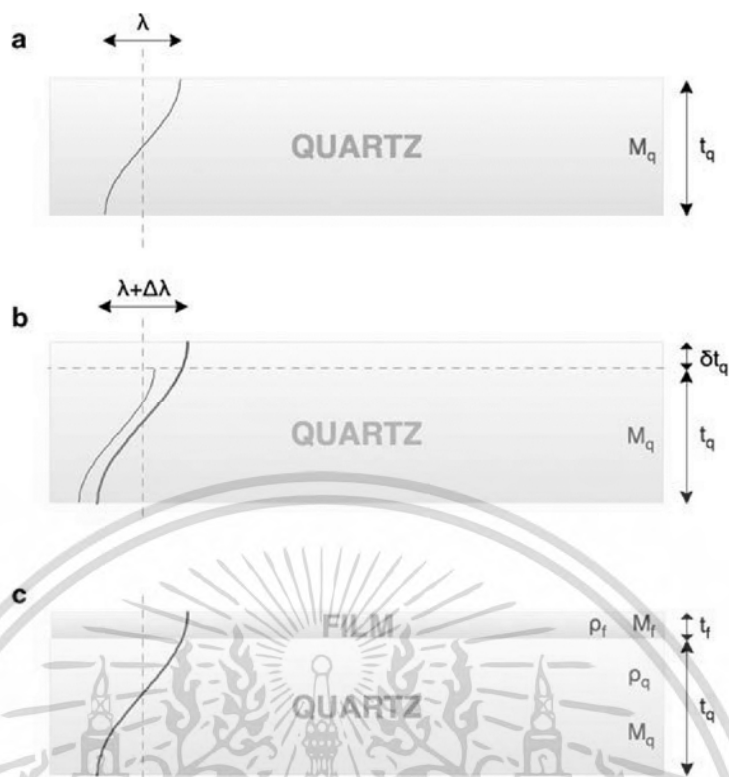
$$F = \frac{v}{2t} \quad (2.3)$$

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความถี่พื้นฐาน เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาที่น้อยมากๆซึ่งเราสามารถหาการเปลี่ยนแปลงของความหนาได้โดยการหาอนุพันธ์ซึ่งแสดงตามสมการที่ 4

$$dF = -\frac{v}{2t^2} dt \quad (2.4)$$

เมื่อนำสมการ(2.4) \div (2.3) ;

$$\frac{dF}{F} = -\frac{dt}{t} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.4 การสั่นในแบบShear mode ที่เกิดขึ้นในวัสดุที่มีสมบัติ Thickness Shear Mode เมื่อความหนาเพิ่มขึ้น[2]

ความสัมพันธ์ของความหนาของคริสตัลที่เพิ่มขึ้นกับความถี่ที่ลดลงจากรูปที่ 2.4 และจากสมการที่(2.5)สามารถเขียนในเทอมของการดูตกสั่นมวลในหนึ่งหน่วยพื้นที่(M)กับมวลที่เปลี่ยนไปได้ว่า

$$\frac{\Delta F}{F} = - \frac{\Delta M}{M} \quad (2.6)$$

จากอนุพัทธ์ข้างต้นนี้ การเพิ่มขึ้นของมวลจากภายนอกถูกสันนิษฐานว่าเป็นเหมือนฟิล์มบางบนผิวของคริสตัล ซึ่งหมายความว่ามวลที่เพิ่มขึ้นมีพฤติกรรมเหมือนกับฟิล์มที่มี คุณสมบัติทุกประการ ทั้งชื่อ อัตราเฉือน เหมือนคริสตัลนั่นเอง ซึ่งถือว่าการเปลี่ยนแปลงของมวลทั้งหมดบนคริสตัลนั้น เท่ากับมวลของฟิล์มนั่นเองหรือจะเขียนแทนได้ว่า $\Delta M_{\text{crystal}} = \Delta M_{\text{film}}$ โดย f จะใช้แทนการเปลี่ยนแปลงของมวลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ของความถี่พื้นฐาน กับ ความหนาแน่นของฟิล์มและความหนาจากการดูตกสั่นมวล จะได้ว่า

$$\frac{\Delta F}{F} = - \frac{\rho_f t_f}{\rho t} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนค่า t จากสมการที่ (2.3) ;
$$\frac{\Delta F}{F} = - \frac{\rho_f t_f 2F}{v\rho} \quad (2.8)$$

$$t_f = - \frac{\Delta F}{2F^2} \frac{v\rho}{\rho_f} \quad (2.9)$$

ซึ่งค่าคงที่ v , ρ และ F คือค่าคุณสมบัติของคริสตัลที่ใช้ส่วนความหนาแน่นของการดุกกลืน(ρ) นั้นทราบอยู่แล้วซึ่งจากสมการข้างต้นทำให้ QCM นั้นสามารถใช้วัดความหนาของฟิล์มได้ และจากสมการที่ (2.8) เราสามารถระบุค่าคงที่ของคริสตัลคือ C_q ซึ่งมีค่าตามสมการที่ (2.10)

$$C_q = \frac{2}{v\rho} \quad (2.10)$$

เนื่องจาก $\rho_f t_f = \Delta M_f$ ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔF กับ ΔM_f คือ $\Delta F = -C_q F^2 \Delta M_f$ เมื่อจัดรูปจะได้ว่า

$$\frac{\Delta F}{F} = -C_q F \Delta M_f \quad (2.11)$$

ซึ่งความสัมพันธ์นี้เป็นที่รู้จักในทัวๆไปว่า สมการของ Sauerbrey ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานในการเปลี่ยนแปลงของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์เพื่อใช้เป็นเซนเซอร์ทางเคมี จากสมมติฐานที่กล่าวมาข้างต้นนี้สมการ Sauerbrey จะเหมาะกับการใช้ในเชิงปริมาณ ซึ่งสมมติฐานของการเพิ่มของ “rigid mass” จะถูกกล่าวถึงในภายหลังเนื่องจากมีข้อจำกัดค่อนข้างเยอะ วัตถุที่เพิ่มขึ้นมาบนพื้นผิวของ QCM จะมีพฤติกรรมที่ค่อนข้างสม่ำเสมอซึ่งต่างจากคุณสมบัติทางกลของควอตซ์อย่างสิ้นเชิง ดังนั้นสมมติฐานของพฤติกรรมต่างๆค่อนข้างอ่อนมากๆ

ปัจจัยอื่นๆอย่างเช่น ตัวกรองสัญญาณ ภาคขยายสัญญาณ ในวงจรไฟฟ้า รวมถึงอุณหภูมิ มีผลต่อความแม่นยำ ด้วยเหตุผลนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ กราฟมาตรฐานในการวัดเชิงปริมาณ และทั้งๆที่มีข้อจำกัดค่อนข้างมาก แต่ QCM ก็ยังเป็นเซนเซอร์ที่มีความไวสูงมากๆ และ อเนกประสงค์มากๆ

ข้อจำกัดของสมการ Sauerbrey จะถูกพูดถึงบ่อยๆว่าปริมาณมวลที่เพิ่มขึ้นจริงนั้นเกินกว่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.11) ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างในการเลือกใช้ควอตซ์ ตัวอย่างเช่น ที่คริสตัลที่มีความถี่พื้นฐานที่ 5 MHz. จะมีค่า $\rho = 2,650 \text{ kgm}^{-3}$, $v = 3,340 \text{ ms}^{-1}$ ทำให้ค่าคงที่ของควอตซ์ (C_q) มีค่าเท่ากับ $C_q = 5.65 \text{ MHz.cm}^2 \text{ kg}^{-1}$ ซึ่งหมายความว่าความถี่ที่เปลี่ยนไป 1 Hz. จะทำให้มีมวลที่เปลี่ยนไปต่อหนึ่งพื้นที่ 17.7 ngcm^{-2} และมีย่านการวัดขึ้นไปสูงถึง $20 \mu\text{gcm}^{-2}$ ซึ่งจะเกิน

ข้อจำกัดของสมการ Sauerbrey

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 หลักการของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ที่ทำงานในสถานะแก๊ส[2]

การสั่นของคริสตัลเกิดจากสนามไฟฟ้า AC ที่เกิดขวางบนพื้นผิวของควอตซ์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ด้าน ซึ่งค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าต่ำมาก ๆ โดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ $10\text{-}20 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ โดยขั้วไฟฟ้า นั้นจะอยู่บนผิวกลิ้งไปกับแผ่นควอตซ์ตามภาพ ซึ่งแม้ว่าตามหลักการ ของรอยต่อแบบไม่สัมผัสของ คริสตัลนั้นจะเป็นไปได้

ขั้วไฟฟ้าของคริสตัลนั้นมีขนาดเล็กมากๆเพื่อที่จะทำให้ไม่เกิดปรากฏการณ์ที่ชื่อว่า “EDGE EFFECT” ซึ่งเป็นแนวของสนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งเกิดขึ้นบริเวณขั้วโลหะทั้ง 2 โดยขั้วโลหะ ทั้ง 2 ด้านจะมีลักษณะคล้ายกับรูกุญแจ หรือที่เรียกว่า “Keyhole Pattern” โดยขั้วทั้ง 2 ด้านนั้นจะทำ มุมกัน 180° ซึ่งลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบนี้ตามทฤษฎีแล้วอาจทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในลักษณะที่เป็น ทรงกระบอกได้ โดยคริสตัลที่ขยายทั่วไปในท้องตลาดนั้น จะมีลักษณะเป็นแผ่นแบนซึ่งมีลักษณะการตัด ผลึกต่างๆกันไป โดยความถี่พื้นฐานของคริสตัลแต่ละตัวจะขึ้นกับความหนาของแผ่นผลึกที่ตัดออกมา ตัวอย่างเช่น คริสตัลที่มีความถี่ธรรมชาติอยู่ที่ 5MHz. จะมีความหนาอยู่ที่ $330 \mu\text{m}$. และที่คริสตัลที่มี ความถี่ธรรมชาติอยู่ที่ 30MHz. จะมีความหนาอยู่ที่ $55 \mu\text{m}$. ซึ่งความหนาของขั้วไฟฟ้าบนคริสตัลก็มี ความหนาเท่าๆกันเพราะไม่มีวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดไหนจะสั่นได้ถ้าไม่มีสนามไฟฟ้าซึ่งหมายความว่า บริเวณที่มีขั้วไฟฟ้าและไม่มีขั้วไฟฟ้า จะเกิดการสะท้อนของพลังงานซึ่งเป็นผลจากคลื่นไฟฟ้าที่เกิด ในแนวตั้งของคริสตัลกระทำกับขั้วโลหะด้านล่าง ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “energy trapping” โดย ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อควอตซ์มีความหนาน้อยกว่า 50nm . ในทางกลับกันถ้าคริสตัลมี ความหนามากๆ มวลก็ทำให้เกินข้อจำกัดของสมการ Sauerbrey คริสตัลก็จะไม่สั่น

มีคลื่น 2 ชนิด ที่สามารถถูกกระตุ้นโดยสนามไฟฟ้า AC คือคลื่นตามยาวและตามขวางแต่ สำหรับควอตซ์ที่บาง $100 - 300 \mu\text{m}$. จะเกิดขึ้นแค่คลื่นตามขวางเท่านั้น การเคลื่อนที่ด้านข้างที่ เกิดขึ้นของจุดบนพื้นผิวและความไวต่อมวลซึ่งเกิดขึ้นตามฟังก์ชันเกาส์เซียนของระยะรัศมีจากจุด ศูนย์กลางของขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะเปลี่ยนไปตามแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า

ทิศทางของการเคลื่อนที่มาจากเงื่อนไขของผลเฉลยจากสมการคลื่นซึ่งเป็นเรื่องปกติของ คริสตัลที่เป็นแผ่นบางซึ่งจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของ QCM นั้นซับซ้อนกว่าการคำนวณโดยทั่วไปด้วย สมการ Sauerbrey มาก

ซึ่งเมื่อพิจารณาอย่างละเอียดมากขึ้นการสั่นของคริสตัลในทิศของแกน z ซึ่งในการใช้เป็น เซนเซอร์ทางเคมีจะต้องการให้มีการตรวจวัดที่เฉพาะเจาะจง โดยการเพิ่มชั้นที่เป็น sensitive layer เข้าไปยังผิวและขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ด้าน กล่าวคือ QCM ที่ใช้เป็นเซนเซอร์ทางเคมีนั้นจะมีจุดเชื่อมต่อของ วัสดุ 3 จุด จุดที่ 1 คือแผ่นควอตซ์กับขั้วโลหะ จุดที่ 2 คือ ขั้วโลหะกับ selective layer และจุดที่ 3 คือ

selective layer กับสารที่เราตรวจวัด ซึ่งที่รอยต่อของวัสดุทั้ง 3 จุด นั้นจะเกิดการสะท้อนและหักเหของพลังงานอะคูสติกที่เกิดจากการสั่นของคริสตัล เช่นเดียวกับการสะท้อนและหักเหของแสงที่ตัวกลางต่างๆที่มีความหนาแน่นต่างกัน

ซึ่งเมื่อพิจารณาที่รอยต่อของควอตซ์และชั้นไฟฟ้า จากสมการ Sauerbrey จะได้สมมติฐานที่ว่าความเร็วเฉือนของคริสตัลจะมีค่าเท่ากับความเร็วเฉือนของชั้นโลหะและฟิล์ม ซึ่งจากสมมติฐานนี้นั้นจะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโดยแท้จริงของความหนาเป็นมวล ซึ่งเป็นข้อด้อยของสมการ Sauerbrey จึงไม่สามารถใช้สมมติฐานเดียวกันได้กับฟิล์ม ซึ่งทำให้ความเร็วเฉือนของฟิล์มนั้นมีค่าตามสมการ (2.12)

$$v = \left(\frac{\mu_f}{\rho_f}\right)^{1/2} \quad (2.12)$$

เมื่อ μ คือโมดูลัสแรงเฉือนของชั้นฟิล์ม ซึ่งเมื่อสมมติว่าไม่มีการสูญเสียจากแรงเสียดทาน จะทำให้ค่าความถี่พื้นฐานเป็นดังนี้

$$\tan\left(\frac{\pi F f}{F}\right) = -(\rho_f v_f / \rho v) \tan\left(\frac{\pi \Delta F f}{F}\right) = -\frac{\rho_f v_f}{\rho v} \quad (2.13)$$

เมื่อ $F f = \omega/2\pi$ คือความถี่พื้นฐานของ QCM หลังจากมี Sensitive layer แล้ว และในส่วนของ $\rho_f v_f$ และ ρv คือค่า acoustic impedances Z_f และ Z ของฟิล์มและคริสตัล อัตราส่วนค่า acoustic impedances ของฟิล์มและคริสตัล ($\zeta = Z_f/Z$) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดของการจับระหว่างฟิล์มและคริสตัล สำหรับค่าความถี่พื้นฐานที่ต่ำที่สุด ค่า ζ ควรจะเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ซึ่งความแตกต่างของควอตซ์กับโลหะแต่ละชนิดนั้นจะมีค่า Shear Mode Acoustic Impedance ต่างกันตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงถึงค่า Shear Mode Acoustic Impedance [2]

Material	Shear Mode Acoustic Impedance ($10^6 \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$)
Aluminum	8.22
Aluminum oxide	24.6
Chromium	29.0
Copper	20.3
Gold	23.2
Graphite	2.71
Indium	10.5
Nickel	26.7
Palladium	24.7
Platinum	36.1
Quartz	8.27
Silicon	12.4
Silver	16.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะพบว่าถ้าเราใช้ควอตซ์ที่มีขั้วโลหะเป็นอะลูมิเนียม จะทำให้อัตราส่วนค่า acoustic impedances ของคริสตัลนั้นเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ($\zeta = 0.99$) และควอตซ์ที่มีขั้วโลหะเป็นทอง ($\zeta = 2.8$) และในทางกลับกัน ถ้าใช้ควอตซ์ที่มีขั้วโลหะแพลทินัมจะได้ $\zeta = 4.36$ ซึ่งทำให้มีค่า Q-factor ต่ำมาก ๆ คริสตัลจึงไม่สั่น ซึ่งควรเลือกโลหะที่เหมาะสมกับการใช้งานนั้นๆ มาใช้งาน

เมื่อ selective layer เกาะยังขั้วและผิวของคริสตัลได้ โครงสร้างทั้งหมดจะทำหน้าที่เป็น multiple resonator ในการสะท้อนและหรือแทรกสอด พลังงานอะคูสติคที่เกิดขึ้นในแต่ละรอยต่อของวัสดุ ตัวอย่างเช่นในการเคลือบ QCM ที่มีขั้วโลหะเป็นทองด้วยโพลิเมอร์รอยต่อระหว่างทองกับโพลิเมอร์จะเป็นจุดที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ กล่าวคือเมื่อมวลเพิ่มขึ้นมากๆ จะส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ไม่เหมาะสมกันอย่างมีนัยสำคัญทำให้คริสตัลไม่สั่น โดยการแก้ multiple resonator นั้นทำได้ยาก เพราะต้องทราบความหนาแน่น รวมถึงความหนา และค่าโมดูลัสของแรงเฉือน

ในส่วนของผลกระทบอื่นๆของการใช้เพียโซอิเล็กทริกเซนเซอร์มาประยุกต์เป็นแก๊สเซนเซอร์สามารถอธิบายได้จาก hydrostatic effect (p), frictional effect (x) และ sorption effect (m) ซึ่งเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งหมดบน QCM แล้วจะได้ผลตามสมการที่ (2.14)

$$-\frac{\Delta F}{F} = \left(\frac{\Delta F}{F}\right)_p + \left(\frac{\Delta F}{F}\right)_x + \left(\frac{\Delta F}{F}\right)_m \quad (2.14)$$

โดยหัวใจสำคัญสำคัญของเซนเซอร์ทางเคมีนั้นจะอยู่ที่ sorption effect โดย hydrostatic effect และ frictional effect จะไม่ถูกนำมาพิจารณาด้วยเนื่องจากไม่มีผลต่อการวัดในสถานะแก๊ส โดยเราพิจารณาที่ผลึกที่ตัดแบบ AT-CUT ที่อุณหภูมิ 50 °C จะได้ว่าตามสมการที่ (2.15)

$$\left(-\frac{\Delta F}{F}\right) \cdot 10^6 = 1.3510^{-3} P_{\text{torr}} + 7.210^{-3} (\pi F \rho_g \eta_g)^{1/2} + 2.26 F \Delta M \quad (2.15)$$

เมื่อ P คือแรงดันแก๊ส, ρ_g และ η_g คือความหนาแน่นและความหนืด, M คือมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น กรัม/หนึ่งหน่วยพื้นที่, F คือความถี่ของคริสตัล

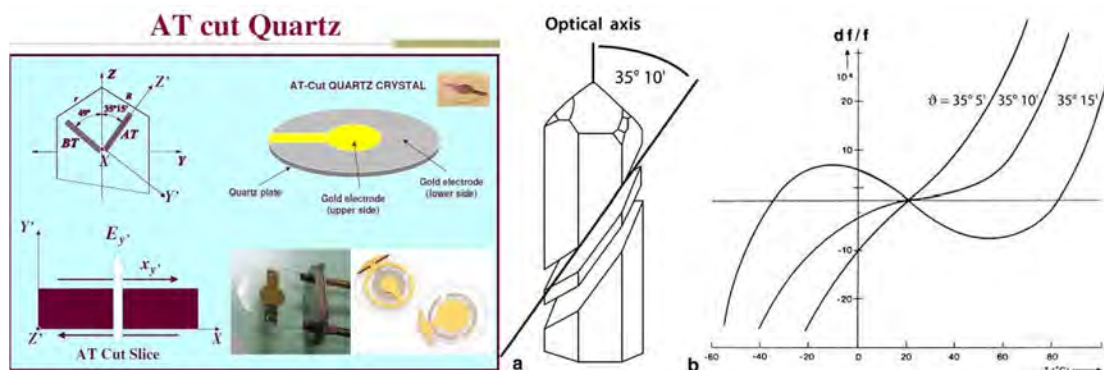
โดยที่คริสตัลแบบ AT-CUT ที่ความถี่ 5 MHz. จะมีความถี่ที่เปลี่ยนไปขณะที่อากาศ 1atm. ไปเป็นสุญญากาศ ($\sim 10^{-6}$ mmHg) จะอยู่ที่ -5Hz. ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะใช้เมื่อเกิด hydrostatic effect และ frictional effect เท่านั้น เมื่อการวัดในสถานะแก๊สเราคำนึงถึงเพียง sorption effect จึงทำให้สมการที่ใช้ในการคำนวณเปลี่ยนไปดังสมการที่ (2.16)

$$\left(-\frac{\Delta F}{F}\right) \cdot 10^6 = 2.26 F \Delta M \quad (2.16)$$

และ สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปกับมวลที่เปลี่ยนแปลงไปในหนึ่งหน่วยพื้นที่ได้ตามสมการที่ (2.17)

$$\Delta F = -2.26 \times 10^{-6} F_0^2 \frac{\Delta m}{A} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์และการตัดผลึกแบบAT-CUT

กล่าวโดยสรุปง่ายๆได้ว่า ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ คือ เซนเซอร์วัดมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่พัฒนาจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดหนึ่งที่ทำด้วยการวัดมวลโดยใช้การเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่พื้นฐานของผลึกควอตซ์ที่เกิดจากการตัดผลึกควอตซ์ตามแนวขวาง(AT-CUT)เป็นแผ่นบางและมีโครงสร้างดังรูป 2.5 โดยความถี่กำหนดของQCMนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีมวลมาเกาะสะสมบนพื้นผิวของควอตซ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นของการเปลี่ยนแปลงของมวล Δm (g) เนื่องจากการดูดซึมและการปล่อยโมเลกุลบนพื้นผิว และความถี่ที่เปลี่ยนไป Δf (Hz) จะเปลี่ยนตามสมการ Sauerbrey's ที่ว่า

$$\Delta f = - \frac{2f_0^2}{A\sqrt{\rho_q\mu_q}}\Delta m \quad (2.18)$$

เมื่อ Δf = ความถี่ที่เปลี่ยนไป (Hz) f_0 = ความถี่พื้นฐานหรือความถี่เริ่มต้น (Hz)
 Δm = มวลที่เปลี่ยนไป (g) A = พื้นที่ผิวของบริเวณที่ตรวจวัด (cm^2)
 ρ_q = ความหนาแน่นของผลึกควอตซ์ ($\rho_q = 2.648 \text{ g/cm}^3$)
 μ_q = โมดูลัสของแรงเฉือนของผลึกควอตซ์แบบAT-Cutz ($\mu_q = 2.947 \times 10^{11} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$)
 เมื่อแทนค่าคงที่ต่างๆลงในสมการจะได้ว่า

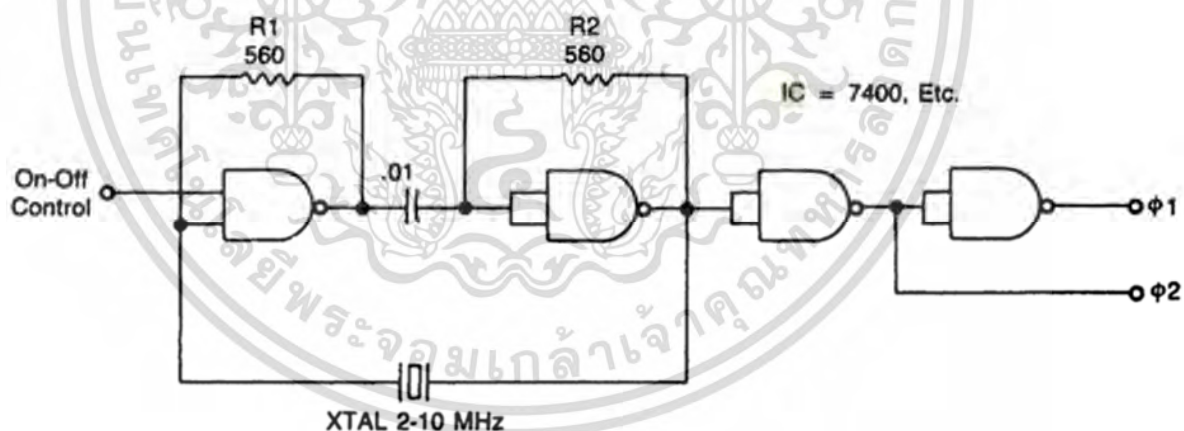
$$\Delta f = -2.26 \times 10^{-6} f_0^2 \frac{\Delta m}{A} \quad (2.19)$$

ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์เป็นเซนเซอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระดับสารเคมีที่มีความสามารถเฉพาะตัว สามารถตรวจสอบสารแต่ละชนิดได้อย่างต่อเนื่องและสามารถใช้งานย้อนกลับได้ ซึ่งควอตซ์คริสตัลที่ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดนั้น จะมีความสามารถในการวัดมวลของสารที่มีขนาดเล็กมากโดยการตอบสนองของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์นี้มีค่าประมาณ 100 เท่าสูงกว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตอบสนองของการปรับสมดุทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีค่า 0.1 มิลลิกรัม ซึ่งหมายความว่าควอตซ์ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ มีความสามารถในการวัดการเปลี่ยนแปลงมวลขนาดเล็กเป็นเศษส่วนชั้นเดียวเท่ากับชั้นเดียวของอะตอม (monolayer) การตรวจวัดมวลความไวสูงและการแสดงผลตามเวลาจริงในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงมวลบนผลึกควอตซ์นั้น ทำให้ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์เป็นเทคนิคที่น่าสนใจมาก

ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์นั้นมีการประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในห้องปฏิบัติการวิจัยและในทั้งทางด้านอุตสาหกรรม,อาหาร,สิ่งแวดล้อม และการวินิจฉัยในการรักษาโรคต่างๆ ตั้งแต่ถูกค้นพบเนื่องจากเป็นวิธีตรวจวัดที่ให้ความถูกต้องแม่นยำสูงและจากหลักการของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ได้นำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจวัดความชื้น โดยผลึกควอตซ์ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของวงจรรอสซิลเลเตอร์ที่ทำหน้าที่ในการกำเนิดความถี่ของวงจรรอสซิลเลเตอร์และความถี่ที่ได้จากวงจรรอสซิลเลเตอร์มีเสถียรภาพทางความถี่ที่ดี

2.4 วงจรรอสซิลเลเตอร์



รูปที่ 2.6 แสดงถึง IC-compatible crystal oscillator circuit[3]

วงจรรกำเนิดสัญญาณหรือวงจรรอสซิลเลเตอร์ (Waveform Generator or Oscillator) เป็นวงจรรหนึ่งที่มีความสำคัญในทางอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสาร โดยจะแบ่งได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ คือวงจรรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ (Sinusoidal waveform) และวงจรรกำเนิดสัญญาณรูปอื่นๆ ที่ไม่ใช่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชายน (Non - Sinusoidal waveform) ซึ่งได้แก่สัญญาณรูปสามเหลี่ยม(Triangular waveform) และสี่เหลี่ยม(Rectangular waveform)

โดยการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณรูปชายนแบบที่ง่ายที่สุด ทำได้โดยใช้วงจรขยายที่มีอัตราขยายสูงเช่น Op-Ampต่อกับเครือข่าย RC หรือ LC ในลักษณะป้อนกลับแบบบวก (Positive Feedback) ความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปชายนลักษณะนี้ควบคุมได้โดยการปรับค่าความต้านทาน (R) และค่าความเก็บประจุ (C) บางตัวในวงจร ทั้งนี้จะต้องให้สอดคล้องกับเงื่อนไขที่จะทำให้เกิดการแกว่ง (Oscillation) ขนาดของสัญญาณชายน ที่ถูกสร้างขึ้นจะถูกจำกัดโดยย่านการทำงานเชิงเส้นของวงจรขยายที่ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณรูปชายนลักษณะนี้จึงถูกเรียกว่าเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเชิงเส้น (Linear Oscillators) ในส่วนวงจรกำเนิดสัญญาณแบบอื่นๆ ที่ไม่ใช่สัญญาณรูปชายน ซึ่งพบได้บ่อย ก็คือวงจรกำเนิดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (Square waveform generators) และวงจรกำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Triangular waveform generators) วงจรกำเนิดสัญญาณเหล่านี้ใช้ วงจรพื้นฐานที่เรียกว่า วงจร Multi-vibrator เป็นส่วนประกอบหลัก เราสามารถสร้างวงจร Multivibratorขึ้นได้โดยใช้เพียง Op-Amp หรือ IC กำเนิดเวลา เช่น IC 555 เป็นต้น ประกอบเข้ากับเครือข่าย RC โดยวงจรกำเนิดสัญญาณที่ไม่ใช่รูปชายนมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วงจรกำเนิดสัญญาณแบบผ่อนคลาย (Relaxation Oscillator) ทั้งนี้เพราะอุปกรณ์ขยายที่ใช้ในวงจรจะทำงานอยู่ในย่าน cut-off หรืออิ่มตัว(saturation) เท่านั้น ในระหว่างที่อุปกรณ์ขยายทำงานอยู่ในย่าน cut-off จะไม่มีกระแสไหล จึงมองได้เสมือนกับว่า อุปกรณ์นั้นอยู่ในลักษณะ ผ่อนคลาย (Relaxing) ซึ่งจะต่างจากวงจรกำเนิดสัญญาณรูปชายน ซึ่งอุปกรณ์ขยายทำงานอยู่ในย่านเชิงเส้น (Linear mode)

โดยวงจรออสซิลเลเตอร์แต่ละแบบนี้จะกำเนิดสัญญาณออกมาตามแต่รูปแบบของวงจรที่ใช้ในการกำเนิดสัญญาณ โดยส่วนใหญ่สัญญาณจะมีขนาดและความถี่ที่คงที่ โดยแบ่งออกได้หลายแบบตามอุปกรณ์ที่ใช้งาน ที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นวงจรกำเนิดความถี่แบบคริสตัล(Crystal) วงจรชนิดนี้มักใช้ในงานย่านความถี่สูง เสถียรภาพของความถี่ดี แต่มีข้อเสีย คือ เปลี่ยนแปลงความถี่ได้ยากซึ่งจะต้องพิจารณาอย่างเหมาะสมในการใช้งาน

2.5 วัตถุระเบิด[4]

คำว่า วัตถุระเบิด (Explosive) นั้น หมายถึงสารใด ๆ จะเป็นของแข็ง, ของเหลวหรือ ก๊าซ ก็ตามหรือสารใด ๆ ก็ตาม เมื่อได้รับการกระทบกระแทกเสียดสีหรือได้รับความร้อนที่ส่วนหนึ่งส่วนใด นั้นจนเพียงพอแล้ว มวลของสารนั้นทั้งก่อนก็จะเกิดปฏิกิริยาแปรเป็นสารอื่นที่มีความเสถียรดีกว่าเดิม ในเวลาฉับพลันทันที สารที่เกิดขึ้นใหม่นี้ส่วนมากหรือเกือบทั้งหมดเป็นก๊าซ ซึ่งมีปริมาตรมากกว่าเดิม พร้อมทั้งเกิดความร้อนขึ้นเป็นจำนวนมากและมักจะมีเปลวไฟเกิดขึ้นด้วยฉะนั้นการระเบิด (Explosion) จึงเป็นผลที่ได้จากการที่วัตถุระเบิดนั้นได้ปลดปล่อยพลังงานออกอย่างรวดเร็วจนเกิด กำลังผลักดันขึ้นอย่างรุนแรง

2.5.1 การแบ่งประเภทของวัตถุระเบิด

วัตถุระเบิดทางทหารเป็นสารชนิดหนึ่ง ซึ่งเกิดปฏิกิริยาทางเคมี เมื่อได้รับความร้อน การเสียดสี การกระทบกระแทก หรือได้รับแรงกระตุ้นเตือนเริ่มแรกอย่างเหมาะสม ทำให้เกิดเป็นสารอย่างใหม่ขึ้น หรือกลายเป็นแก๊สจำนวนมากๆ เราแยกชนิดของวัตถุระเบิดแรงต่ำและวัตถุระเบิดแรงสูงด้วยอัตราความเร็วในการระเบิด (เป็น ฟุต หรือเมตร/วินาที) ซึ่งผลจากการระเบิดนี้เป็น ลักษณะพิเศษของวัตถุระเบิดแต่ละชนิด

วัตถุระเบิดแรงต่ำ เช่นดินดำและดินควินน้อย เกิดจากการเผาไหม้จากของแข็งไปเป็นแก๊สอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอ ในช่วงระยะเวลาหนึ่งและในการไหม้ดังกล่าวนี้จึงทำให้ได้ประโยชน์ในการผลักดันหรือให้แตกร้าวแทนที่จะทำให้เกิดหักหรือแตกต่อวัตถุที่นำระเบิดไปวาง การใช้วัตถุระเบิดแรงต่ำในกิจการทหารนับว่าเป็นหลักคือใช้เป็นดินขับในกระสุนและใช้สำหรับเป็นไส้ขนวน เช่น ขนวนฝักแค เวลาอัตราเร็วในการระเบิดจนถึง 400 เมตร หรือ 1,312 ฟุต/วินาที

วัตถุระเบิดแรงสูง เช่นดินระเบิด ทีเอ็นที และดินระเบิดไดนาไมท์ จะเปลี่ยนสภาพจากของแข็งเป็นแก๊สในทันทีทันใด ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปนี้เรียกว่า “การระเบิด” วัตถุระเบิดแรงสูงจะระเบิดขึ้นด้วยความร้อน หรือด้วยการกระทบกระเทือนอย่างแรงซึ่งทำให้เกิดคลื่นระเบิดขึ้นคลื่นระเบิดนี้จะเคลื่อนที่ผ่านวัตถุจำนวนมากเกือบทันทีทันใดทำให้วัตถุระเบิดเปลี่ยนสภาพจากของแข็งเป็นแก๊ส แก๊สที่เกิดขึ้นทันทีทันใดและการขยายตัวอย่างรวดเร็วนั้นทำให้เกิดอำนาจในการทำให้แตกหักและสามารถที่จะผลักดันสิ่งต่อต้านขนาดใหญ่ซึ่งอยู่ในทิศทางของมันได้ ความเร็วในการระเบิดของวัตถุระเบิดก็คือ อัตราเร็วเป็นฟุต/วินาที การใช้วัตถุระเบิดแรงสูงในกิจการทหารนับว่าเป็นหลักก็คือ ใช้ในกิจการทำลายทางทหารทุกชนิดและใช้เป็นดินระเบิดในกระสุนปืนใหญ่และลูกกระเบิดทั้งจากเครื่องบินมีอัตราในการระเบิดตั้งแต่ 1,000 เมตร หรือ 3,280 ฟุต/วินาที จนถึง 8,500 ม. หรือ 27,888 ฟุต/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 รูปแบบและประเภทของการระเบิด

2.5.2.1 รูปแบบของการจุดระเบิด

รูปแบบการจุดระเบิดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ การจุดระเบิดที่เกิดจากปฏิกิริยาจากการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว(deflagrated) และ ปฏิกิริยาจากการจุดระเบิด (detonated) โดยการจุดระเบิดที่เกิดจากปฏิกิริยาจากการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว(deflagrated) การระเบิดรูปแบบนี้เกิดจากการเผาไหม้ ส่วนใหญ่เกิดจากวัตถุระเบิดแรงต่ำ (low-order explosives) โดยมีออกซิเจนในบรรยากาศเป็นส่วนเสริมหรือเร่งให้พื้นที่ความเสียหายขยายวงมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถเกิดจากการสันดาปหรือการทำปฏิกิริยาทางเคมีของสารกับออกซิเจนในอากาศ ตามปัจจัยดังนี้

1. อัตราส่วนระเบิด(explosive limit)

การระเบิดที่เกิดขึ้นจากปริมาณความหนาแน่นของไอจากสารชนิดใดชนิดหนึ่งที่ปนอยู่ในอากาศ ซึ่งมีเพียงพอที่จะเกิดการเผาไหม้กับออกซิเจน ฉะนั้นเมื่อใดที่อัตราส่วนของไอจากสารมีปริมาณและอยู่ในพื้นที่ที่เหมาะสมแล้ว จะเกิดระเบิดขึ้นทันที เช่น การปล่อยให้ เอธิลแอลกอฮอล์ ระเหยออกจากภาชนะที่บรรจุ หรือให้เกิดไอของกรดน้ำส้มปนอยู่ในอากาศคิดเป็นร้อยละ 4 ของพื้นที่ในห้องที่ปิดประตูหน้าต่างมิดชิด จากทั้ง 2 วิธีนี้จะเกิดระเบิดขึ้นได้จากคุณสมบัติ เฉพาะของสารดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีฝุ่นละอองของสารเคมีบางชนิด ได้แก่ กำมะถัน ปุ๋ยยูเรีย แป้งข้าวโพด หากปล่อยให้ฟุ้งกระจายในอากาศ เมื่อได้ปริมาณออกซิเจนที่เหมาะสมก็จะเกิดการระเบิดเช่นกัน

2. อุณหภูมิติดไฟอัตโนมัติ (autolightion temperature)

สารบางชนิดมีจุดวาบไฟต่ำ ฉะนั้นในอุณหภูมิที่เหมาะสมก็จะลุกติดไฟได้เอง เช่น ไอของบิวเทนเป็นสารที่มีความพร้อมที่จะติดไฟในอุณหภูมิปกติ ฟอสฟอรัสเป็นสารที่ติดไฟในทุกสถานะของอุณหภูมิภายในห้องทึบ หรือทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงร้อนหรือแตะกับสิ่งที่มีอุณหภูมิสูงจะติดไฟทันที

3. การรับและสะสมความร้อนไว้ภายในอย่างต่อเนื่อง (Susceptibility to spontaneous heating)

สารบางชนิดมีคุณสมบัติสะสมความร้อนไว้ในตัว ถ้าไม่สามารถถ่ายเทความร้อนออกไปได้แล้ว ก็จะมีการสันดาปขึ้นได้ เช่น ผงถ่านคาร์บอน ฝุ่น ชีล้อย ผงสบู่

ในส่วนของปฏิกิริยาจากการจุดระเบิด (detonated) คือ การสันดาป อย่างรวดเร็วมาก ภายในพื้นที่จำกัด ทำให้เกิดความกดดันและอุณหภูมิสูงขึ้น มีอัตราความเร็วของแรงอัดอากาศ (shock wave*) ตั้งแต่ 1,800 – 9,000 เมตรต่อวินาที (meter per second: mps)ขึ้นไป ซึ่งถือเป็นอัตราความเร็วที่สูงกว่าวิธีการเผาไหม้อย่างรวดเร็วถึงสามเท่า การจุดระเบิดนี้แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1. การจุดระเบิดด้วยแรงอัด (shock to detonation)

คือ วิธีการทำให้เกิดแรงอัด โดยการใช้เชื้อปะทุเป็นตัวจุดดินระเบิดผ่านชนวนฝึกแค ซึ่งชนวนฝึกแคมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับเชื้อปะทุที่จะนำมาใช้งาน เช่น เชื้อปะทุไฟฟ้าเป็นตัวจุดระเบิดของดินระเบิดหลัก โดยใช้วงจรไฟฟ้าที่มีแบตเตอรี่เป็นตัวให้พลังงาน หรือใช้เครื่องจุดระเบิดทางไกล ได้แก่ แบบ M1 (ไดนาไมท์ทหาร) เป็นอุปกรณ์จุดระเบิดที่จะทำงาน เมื่อเกิดการกระแทกจากแรงอัดระเบิดที่เกิดจากบริเวณใกล้เคียง หรือประเภทถอดสลักนิรภัย เพื่อให้เกิดประกายไฟไปทำการจุดระเบิด ได้แก่ แบบ M1A1 (Bangalore torpedo) ถอดสลักนิรภัยแล้ว จะเกิดการเสียดสีเป็นประกายทำให้เกิดการจุดระเบิด แบบ M1A2 (Bangalore torpedo) ที่ถอดสลักนิรภัยแล้ว เข็มแทงชนวนจะพุ่งกระแทกจอกกระแทกแตกออก ทำให้เกิดประกายไฟจุดระเบิดขึ้น

2. การจุดระเบิดด้วยการเผาไหม้ (burning to detonation)

เกิดจากการเผาไหม้อย่างรวดเร็วจนกระทั่งเปลี่ยนเป็นแรงอัดอากาศ เช่น ดินระเบิดแบบไดนาไมท์แท่ง จะเกิดระเบิดเมื่อสายชนวนที่ต่อไว้ไหม้ไฟ

2.5.2.2 ประเภทของการจุดระเบิด

ประเภทของการจุดระเบิดสามารถแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ได้ดังนี้

1. การระเบิดของปฏิกิริยาเคมี (Chemical explosives)

การระเบิดจากสารประกอบทางเคมี การจุดระเบิดกระทำได้ด้วยวิธีการก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี หรือการลุกไหม้ของสารประกอบทางเคมี ที่ส่งผลให้มีการแตกตัวของสารประกอบนั้น และจะให้ก๊าซและความร้อนจำนวนมาก นอกจากนี้ การจุดระเบิดของสารแบบนี้ยังเกิดต่อเนื่องจากปฏิกิริยาจากปัจจัยอื่นๆ ได้อีก เช่น การหยดน้ำยาเครื่องปรับอากาศลงบนต่างทับทิม จะเกิดปฏิกิริยา ต่อเนื่องจนเกิดการระเบิดและการลุกไหม้ขึ้นได้

2. การระเบิดจากภายในโครงสร้าง (Physical explosives)

การระเบิดเกิดขึ้นจากการสร้างความดันภายในภาชนะ โดยให้เกิดการถ่ายเทความดันแต่น้อยหรือไม่มีการระบายออก จนกระทั่งความดันนั้นขยายตัวกลายเป็นแรงอัดทำให้โครงสร้างของภาชนะนั้นแตกหรือปริขึ้น ส่วนใหญ่มักเกิดจากการระเหยของน้ำที่อยู่ในภาชนะนั้น หรือเกิดจากการให้ความร้อนในระดับอุณหภูมิที่สม่ำเสมอโดยไม่จำกัดเวลา ตัวอย่างเช่น แรงอัดระเบิดที่เกิดจากหม้อน้ำของเครื่องจักรอุตสาหกรรม หรือหม้ออัดความดันในครัว

3. การระเบิดที่เกิดจากการแตกตัวของนิวเคลียร์ (Nuclear explosives)

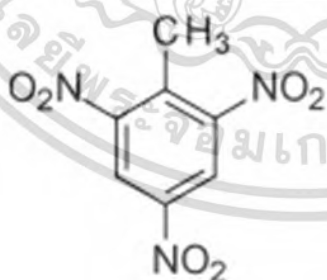
เป็นวิธีการที่นำมาใช้สร้างอาวุธนิวเคลียร์ เกิดจากการแตกตัวของนิวเคลียร์หรืออีกประการหนึ่ง คือเกิดทั้งจากแตกตัวและรวมตัวของนิวเคลียร์ผสมกัน ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานจากภายในนิวเคลียร์เป็นจำนวนมาก และไม่สามารถควบคุมได้พลังงานนี้จะให้กัมมันตรังสีที่เป็นความร้อนแผ่กระจายไปโดยรอบ สามารถสลายวัตถุและสิ่งมีชีวิตทั้งหมดที่อยู่ในรัศมีการระเบิดนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 วัตถุระเบิดทางการทหารที่ได้รับความนิยม

2.5.3.1 TNT (Trinitrotoluene)

TNT ย่อจาก "ไตรไนโตรโทลูอีน"(Trinitrotoluene)เป็นสารเคมีซึ่งมีสูตรคือ $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$ เป็นของแข็งสีเหลืองซึ่งใช้เป็นตัวเร่งในการสังเคราะห์เคมีใช้เป็นวัตถุระเบิด ซึ่งสารเคมีดังกล่าวนี้ มีการสังเคราะห์ขึ้นเป็นครั้งแรก โดย โจเซฟ วิลแบรนต์ (Joseph Wilbrand) เมื่อ ค.ศ. 1863 และการผลิตปริมาณมากครั้งแรก เกิดขึ้นในเยอรมนี เมื่อ ค.ศ. 1891ด้วยการใช้งานอย่างกว้างขวาง ทำให้ที่เอ็นทีเป็นเกณฑ์มาตรฐานในการวัดความเข้มของระเบิด และวัตถุระเบิดอื่นๆ โดยเทียบประสิทธิภาพกับที่เอ็นที เรียกว่า "TNT equivalent" โดยTNTเป็นดินระเบิดแรงสูง ซึ่งมีอัตราเร็ว ในการระเบิด 22,600 ฟุต/วินาที มีความไวต่อการระเบิดน้อยที่สุดในจำนวนวัตถุระเบิดแรงสูงทางทหาร ดินระเบิด TNT มีความคงทนพอสมควรในทุก ๆ สภาพอากาศ และไม่กระทบกระเทือนต่อความชื้นและเป็นดินระเบิดชนิดหนึ่งในบรรดาวัตถุระเบิดทางการทหารซึ่งมีความทนทานต่อการใช้ได้น้ำ TNTมีลักษณะเป็นผลึกสีเหลือง เรียวคล้ายเข็ม ละลายในน้ำได้น้อยแต่จะละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น ether, acetone, benzene และ pyridine เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า $80.35^{\circ}C$ TNT มีความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์เมื่อถูกผิวหนังจะทำให้เกิดการแพ้ได้ความสามารถในการละลายน้ำ: 130 มก/ลิตร ที่อุณหภูมิ $20^{\circ}C$ และเมื่อนำสารละลายนี้ไปต้ม จะเกิดการระเบิดอย่างรุนแรง) ดินระเบิด TNT โดยส่วนใหญ่จะบรรจุมาในลักษณะเป็นแท่ง ๔ ขนาด คือ 1/4 ปอนด์, 1/2 ปอนด์, 1 ปอนด์ และ 8ปอนด์ ซึ่งแต่ละขนาดก็จะเหมาะกับการใช้งานที่แตกต่างกันไป



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ TNT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3.2 แอมโมเนียมไนเตรท (Ammonium Nitrate)

ปุ๋ย แอมโมเนียมไนเตรท (ammonium nitrate) และกลุ่มไนเตรททั้งหลายเช่น แคลเซียมแอมโมเนียมไนเตรท (calcium ammonium nitrate) เป็นปุ๋ยหัวเชื้อราคาถูกมีลักษณะเป็นผงสีขาวเหมือนน้ำตาลทราย จัดอยู่ในกลุ่มวัตถุระเบิด ใช้ทำระเบิดแรงดันสูง นิยมใช้มากในการก่อการร้ายทั่วโลก และเป็นที่ยอมรับในการใช้ทำระเบิดแสวงเครื่องการนำปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรทมาใช้เป็นวัตถุดิบในการทำระเบิดมีมานานแล้วโดยนำไปผสมกับเชื้อเพลิง หรือที่นิยมเรียกกันว่า ระเบิด ANFO ซึ่งย่อจาก ammonium nitrate-fuel oil อันเป็นส่วนผสมระหว่างสารแอมโมเนียมไนเตรทและน้ำมันเชื้อเพลิง มักจะเป็นน้ำมันดีเซล , น้ำมันเครื่อง แต่บางครั้งอาจใช้น้ำมันก๊าด และเนื่องจากเป็นระเบิดที่ใช้งานง่าย และมีราคาถูก จึงนิยมใช้มากในเหมืองถ่านหิน เหมืองหิน เหมืองแร่โลหะ และอื่นๆ สำหรับการนำปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรทไปใช้ทำระเบิดเพื่อก่อการร้ายเริ่มครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1970 ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งปัจจุบันประเทศในแถบตะวันออกกลาง เช่น อัฟกานิสถาน เป็นต้น ก็ยังนิยมทำและใช้อยู่ เนื่องจากระเบิดแบบนี้ใช้ปุ๋ยเคมีเป็นส่วนประกอบ จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อว่า ระเบิดปุ๋ย (fertilizer bomb) แอมโมเนียมไนเตรท เป็นวัตถุระเบิดที่มีความไวในการระเบิดน้อย ที่สุดในบรรดาวัตถุระเบิดทางทหาร จึงต้องมีดินขยายการระเบิดในการระเบิด เพราะว่ ดินระเบิดแอมโมเนียมไนเตรท มีความไวในการระเบิดน้อย จึงใช้ผสมสำหรับการใช้เป็นดินระเบิดตัด หรือระเบิดแตกหัก แต่เราจะนำไปใช้สำหรับระเบิดทำหลุม หรือขุดคู ส่วนมากจะนำไปใช้ในด้านอุตสาหกรรมเหมืองแร่ หรือการขุดดิน แอมโมเนียมไนเตรทจะขึ้นเมื่อถูกอากาศ ดังนั้นจึงต้องบรรจุให้ดีเพื่อป้องกันมิให้อากาศเข้าได้ ฉะนั้นวัตถุระเบิดชนิดนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ได้น้ำ นอกจากนี้ได้มีการป้องกันมิให้ถูกน้ำซึมนเท่านั้น

โดยกลไกการระเบิดของวัตถุระเบิดชนิดนี้คือการระเบิดเริ่มต้นจากการระเบิดของเชื้อปะทุ (วัสดุที่มีวัตถุระเบิดปริมาณเล็กน้อย) และปลดปล่อย คลื่นระเบิด (detonation wave) ซึ่งมีความเร็วประมาณ 3.2-4.8 กิโลเมตร/วินาทีออกมา ส่งผลให้สารแอมโมเนียมไนเตรทในเม็ดปุ๋ยระเบิดกลายเป็นก๊าซทันที และจุดเชื้อเพลิงให้ลุกไหม้ พลังงานจากคลื่นระเบิดที่ทะลุผ่านสารแอมโมเนียมไนเตรททำให้โมเลกุลสลายตัว อะตอมออกซิเจนถูกปลดปล่อยออกมา และรวมตัวเป็นก๊าซออกซิเจน แรงปฏิกิริยาหรือกระบวนการเผาไหม้ให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ได้ผลิตผลต่อเนื่องเป็นก๊าซร้อนต่างๆ โดยก๊าซร้อนที่เกิดในเวลาสั้นเหล่านี้ทำให้เกิดคลื่นความดัน (pressure wave) ซึ่งเคลื่อนที่เร็วเท่าอัตราเร็วเสียง (330 เมตรหรือ 1,100 ฟุต/วินาที) คลื่นนี้อาจทำอันตรายต่อชีวิต วัตถุ สิ่งของต่างๆ โดยรอบ นอกจากนี้ความร้อนสูงซึ่งเกิดขึ้นจากการเผาไหม้ยังทำให้วัตถุโดยรอบไหม้ไฟได้ อย่างไรก็ตามผู้เชี่ยวชาญด้านระเบิดระบุว่า อำนาจการทำลายส่วนใหญ่มาจากคลื่นความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



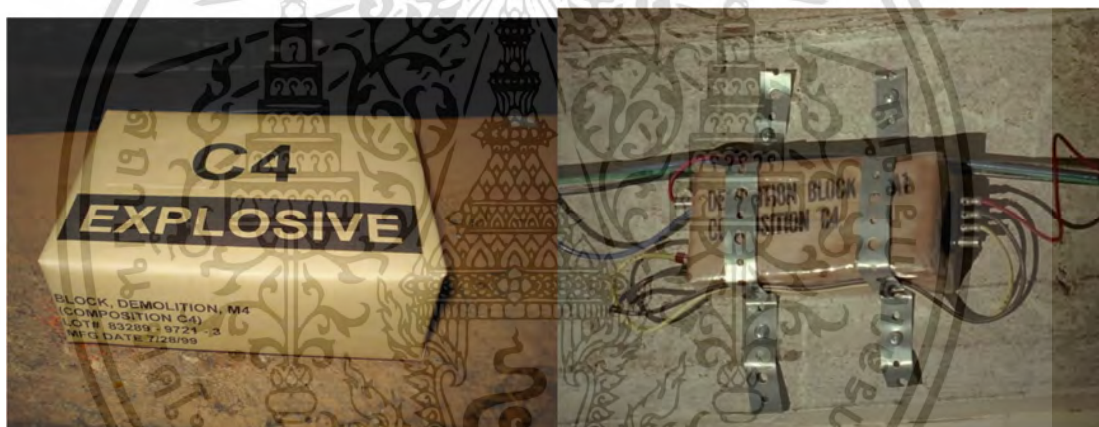
รูปที่ 2.8 รูปร่างของวัตถุระเบิดชนิดแอมโมเนียมไนเตรต (ammonium nitrate)

2.5.3.3 RDXและคอมโปซิชั่น-4 (Composition-4)(C-4)

C-4 เป็นระเบิดพลาสติก (Plastic Explosive หรือ Plastique) ซึ่งมีลักษณะพิเศษคือเป็นวัสดุที่มีคล้ายดินน้ำมันสามารถปั้นเป็นรูปต่างๆได้ด้วยมือ ที่รู้จักกันดีอีกอย่างคือ Semtex โดยระเบิดพลาสติกชนิดแรกคือ Gelignite คิดค้นขึ้นโดย Alfred Noble (ผู้ตั้งรางวัล Noble) ในค.ศ.1875 ต่อมาได้รับการพัฒนาในสงครามโลกครั้งที่สองเป็น Noble 808 และถูกใช้กว้างขวางในการจลาจลการทำลายกองทัพนาซี ซึ่งได้พัฒนาสาร RDX ขึ้นมาคำว่า RDX ย่อมาจาก Research Development Explosive หรือ Royal Demolition Explosive ชื่อทางการว่า Cyclotrimethylene-Trinitramine เป็นวัตถุระเบิดที่มีความไวในการระเบิดมากมีอำนาจในการทำลายสูงและเป็นวัตถุระเบิดทางทหารที่มีอำนาจมากชนิดหนึ่ง RDX ใช้เป็นวัตถุระเบิดหลักในเชื้อประทุไฟฟ้า M6 และเชื้อประทุขนวน M7 ดินระเบิดชนิดนี้ถ้าทำให้หมดความไวในการระเบิดแล้ว สามารถใช้เป็นดินช่วยขยายการระเบิดดินระเบิดทำลาย และดินระเบิดแท่งได้ และ ใช้เป็นส่วนผสมทำเป็นดินระเบิดชนิดอื่นๆ เช่น ดินระเบิดคอมโปซิชั่น เอ,บี หรือ คอมโปซิชั่น ซี กล่าวคือระเบิดซีโพร (C-4) ย่อมาจากคำว่า Composition 4 ซึ่งหมายถึงส่วนประกอบ4อย่างประกอบด้วยRDX 91% , Di (2 -ethylhexyl sebacate) 5.3 %Polyisobutylene (พอลิไอโซบิวทิลีน) 2.1% และน้ำมัน (Motor oil) 1.6% โดยRDX คือวัตถุระเบิดหลักที่ผสมอยู่ในC-4 โดยผสมกับส่วนผสมอื่นๆเพื่อทำให้ไม่ระเบิดง่ายๆเมื่อถูกความร้อนหรือกระแทก อีกทั้งอ่อนนิ่มจนทำให้สามารถปั้นได้ ในการผลิต C-4 จะใช้สาร RDX ในรูปผงจะละลายกับน้ำแล้วเติมตัวประสานคือ Polyisobutylene ผสมกับสาร 2-ethylhexyl sebacate จนละลายเข้าด้วยกันจากนั้นผสมน้ำมันเพื่อช่วยให้ขึ้นรูปเป็นก้อนได้ง่ายเมื่อเอามากลั่นและทำให้น้ำระเหยไปจะได้วัสดุที่มีรูปร่างคล้ายดินน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C-4 จะระเบิดได้เมื่อมีพลังงานเข้าไปกระตุ้น (kick-off) ให้เกิดกระบวนการทางเคมี ถ้าเกิดเอาไม้ขีดไฟไปเผา C-4 มันก็จะเผาไหม้อย่างช้าๆเหมือนไฟติดดินน้ำมัน หรือแม้แต่เอาปืนไปยิง C-4 ก็ไม่ระเบิด มันจะระเบิดต่อเมื่อมีตัวจุด (detonator) ซึ่งใช้กระแสไฟฟ้าเมื่อ C-4 ระเบิดนั้น จะเกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรง ปล่องก๊าซหลายอย่างออกในทุกทิศทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ไนโตรเจนโดย C-4 ในปริมาณต่ำกว่า 1 ปอนด์สามารถฆ่าคนหลายคนได้สบายๆ รถบรรทุกทั้งคันพังทลายได้ด้วย C-4 หนักครึ่งกิโลกรัม เหล็กคานขนาด 8x8 นิ้วหักได้ด้วยแรงระเบิดของ C-4 หนัก 3.6-4.5 กิโลกรัม C-4 มีแรงระเบิดที่เร็วถึง 8,040 เมตร/วินาที หรือ 28,900 กิโลเมตร/ชั่วโมง ระเบิดพลาสติกต่าง ๆ นั้นเหมาะสำหรับการระเบิดทำลายเนื่องจากสามารถปั้นในเข้ากับโครงสร้างที่ต้องการทำลายได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการระเบิดที่รุนแรงและหนักแน่นด้วย ความเร็วสูงมาก อย่างไม่เป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีราคาแพงกว่าวัสดุระเบิดอื่นๆมาก



รูปที่ 2.9 รูปร่างของระเบิดชนิดคอมโพสิชัน-4 (Composition-4)(C-4)

2.5.3.4 ไดนาไมต์ (Dynamites)

ไดนาไมต์คือวัตถุระเบิดแรงสูง ที่ผลิตจากไนโตรกลีเซอรินซึ่งมีความไวในการระเบิดสูงเมื่อมีแรงสั่นสะเทือน และใช้ดิน Diatomite หรือใยฝ้ายดูดซับไดนาไมต์เป็นผลจากการประดิษฐ์ของอัลเฟรด โนเบล นักเคมีและวิศวกรชาวสวีเดน เมื่อ พ.ศ. 2409 และได้จดสิทธิบัตรเมื่อปี พ.ศ. 2410 โดยปกติแล้วจะขายในเป็นแท่ง มีความยาวประมาณ 8 นิ้ว และเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว (แต่ก็มีในขนาดอื่นๆ ด้วย) ไดนาไมต์ถือเป็นระเบิดที่มีอนุภาพสูง ซึ่งหมายความว่า ใช้การจุดประทุ (detonation) แทนที่จะเป็นการลุกไหม้ (deflagration) โดยไดนาไมต์ทางการค้าเดิมใช้เรียกชื่อ

ส่วนผสมของไนโตรกลีเซอริน กับสารที่ดูดซึมไนโตรกลีเซอริน ต่อมาได้มีการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงเอกสารนี้เป็นเอกสารทศวรรษวิสาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนผสมบางอย่าง ทำให้เกิดเป็นไดนาไมต์ หลายชนิด ได้แก่ สเตรทไดนาไมต์, แอมโมเนียไดนาไมต์, เยลาตินไดนาไมต์ และ แอมโมเนียเยลาตินไดนาไมต์ ไดนาไมต์เหล่านี้ มีไนโตรกลีเซอรินผสมอยู่ด้วย

ส่วนไดนาไมต์ทางการค้าได้พัฒนาประกอบด้วย RDX 75% TNT 15% และ อีก 10% เป็นวัสดุที่ทำให้หมดความไว และวัสดุที่เป็นพลาสติก มีอำนาจเท่ากับไดนาไมต์ 60% ทางการค้า ดินระเบิดทางการค้าไม่มีไนโตรกลีเซอริน เป็นดินระเบิดที่ไม่มีกลิ่นไม่ดูและเก็บความชื้นและไม่มีไนโตรกลีเซอริน ฉะนั้นจึงมีความปลอดภัยในการเก็บรักษา การจับถือและการลำเลียงขนส่งมากกว่าดินระเบิดไดนาไมต์ทางการค้า

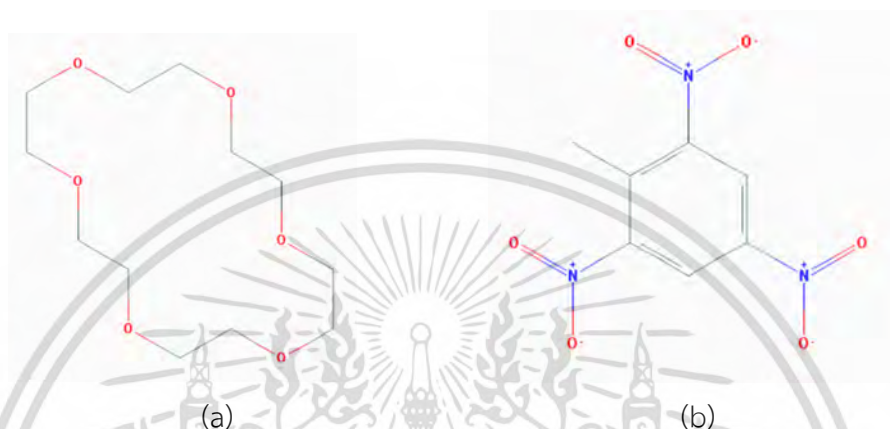


รูปที่ 2.10 รูปร่างของระเบิดไดนาไมต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 Sensitive Material

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้ฟิล์มบางของ 18-Crown-6 ether ซึ่งมีโครงสร้างตามรูปที่ 2.11 และใช้สารที่มีลักษณะเป็นโพลีเมอร์อย่าง Polymethylmethacrylate (PMMA) มาช่วยในการสร้างเนื้อฟิล์มเพื่อยึดเกาะกับผิวของ QCM โดยเหตุผลและสมบัติต่างๆของสารทั้ง 2 ชนิดมีดังต่อไปนี้



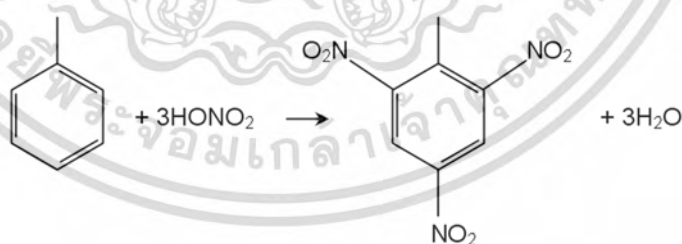
รูปที่ 2.11 แสดงถึงโครงสร้างของ 18-Crown-6 ether (a) [5] และ 2,4,6-TRINITROTOLUENE (b) [6]

สารประเภท crown ether นั้นเป็นสารที่ถูกค้นพบในช่วงปลายทศวรรษที่ 1960 ชาลส์ เพเดอร์สัน (Charles J. Pederson) นักเคมีชาวอเมริกันได้สังเคราะห์โมเลกุลหน้าตาแปลกประหลาดขึ้นมา และเขาตั้งชื่อมันว่า “คราวน์อีเทอร์” (Crown ether) เพราะรูปร่างทางเคมีที่มีความละม้ายคล้ายกับมงกุฎ ไม่เพียงแต่รูปร่างของโมเลกุลที่มีลักษณะไม่เหมือนใคร สมบัติบางประการของคราวน์อีเธอร์ยังโดดเด่นจนน่าจับตามองอีกด้วยโมเลกุลรูปมงกุฎที่เขาสังเคราะห์ขึ้นสามารถนำไปครอบไอออนของโลหะ เช่น โซเดียมหรือโพแทสเซียมพร้อมกับตรึงโลหะชนิดนั้นๆ ให้อยู่ภายในช่องว่างโดยไม่หลุดหายไปไหนซึ่งไม่เคยมีสารเคมีชนิดใดแสดงสมบัติเช่นนี้มาก่อน โดยคราวน์อีเทอร์มีส่วนประกอบของอะตอมที่ให้อิเล็กตรอน (donor atom) คือ ออกซิเจน จึงทำให้เหมาะกับการจับไอออนของโลหะได้ดี โดย 18-crown-6 ether นั้น เป็น สารประกอบโคออร์ดิเนชันชนิดหนึ่งๆที่เรียกว่า แมโครไซคลิกพอลิอีเทอร์ (macrocyclic polyethers) ซึ่งมีคุณสมบัติในการทำหน้าที่เป็นโฮสต์ในการจับกับโลหะได้อย่างเหมาะสมเนื่องจาก ประกอบด้วยหน่วย $-OCH_2CH_2-$ ซ้ำๆกันเป็นวง ในทางเคมีจะเรียกคุณสมบัติในการจับโลหะที่เกิดขึ้นแบบนี้ “ลิแกนด์” โดยลิแกนด์ คือ ไอออนหรือโมเลกุลที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

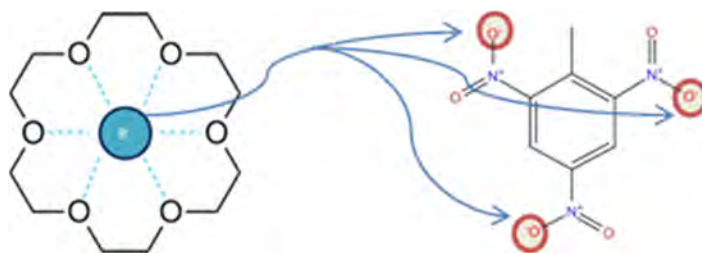
ล้อมรอบและสามารถจะเชื่อมต่อกับอะตอมหรือไอออนกลางซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นโลหะ หรือเป็นสารที่มีอะตอมของธาตุที่มี อิเล็กตรอนคู่อิสระอยู่ เช่น O^- , F^- , Br^- , OH^- , SCN^- , S^{2-} , CO , NH_3 , H_2O เป็นต้น

พันธะระหว่างลิแกนด์ และอะตอมกลางเป็นพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ (ใช้คู่อิเล็กตรอนของลิแกนด์ สร้างพันธะ) ด้วยคุณสมบัตินี้สามารถทำให้ 18-crown-6 ether จับกับไอออนของโลหะ หรือสารที่มีอิเล็กตรอนคู่อิสระอยู่ ซึ่งด้วยเหตุผลนี้ 18-crown-6 ether จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการตรวจวัด TNT เนื่องจาก TNT นั้นเป็นสารประกอบชนิดไนโตรอะโรมาติก ที่เกิดจากการที่ โทลูอิน (Toluene) ถูกกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไนเตรชันโดยสารรีเอเจนต์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยานี้ คือ กรดไนตริกเข้มข้นและกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ซึ่งปฏิกิริยาไนเตรชันคือการแทนที่ด้วยหมู่ไนโตรเป็นปฏิกิริยาที่ไฮโดรเจนของเบนซีนถูกแทนที่ด้วยหมู่ไนโตร ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่สำคัญของสารประกอบอะโรมาติก เนื่องจากสามารถรีดิวส์หมู่ไนโตรให้เป็นอะมิโนและฟังก์ชันอื่นๆ ที่อนุพัทธ์จากหมู่อะมิโนได้ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากปฏิกิริยานี้เมื่อเกิดขึ้นกับโทลูอินคือ การแทนที่ด้วยไนโตรเนียม ไอออน นั่นเอง ซึ่งถ้าเกิดปฏิกิริยานี้เพียงครั้งเดียวจะได้สารประกอบที่ชื่อว่า โมโนไนโตรโทลูอิน และเมื่อเติมสารรีเอเจนต์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไนเตรชันอีก 2 ครั้ง จะได้สารประกอบที่มีชื่อว่า ไดไนโตรโทลูอิน และ ไตรไนโตรโทลูอิน ตามลำดับ โดยปฏิกิริยาไนเตรชันที่ทำให้เกิดไตรไนโตรโทลูอินเป็นดังรูปที่ 2.12 โดยเราจะสังเกตได้ว่า TNT นั้นมีหมู่เมทิลของโทลูอินที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้หลายตัวรวมถึงไนโตรเนียม ไอออนเกิดขึ้นถึง 3 ตำแหน่ง ซึ่งไอออนและหมู่เมทิลเหล่านี้สามารถจับหรือเกิดพันธะกับ 18-crow-6 ether ได้นั่นเอง



รูปที่ 2.12 แสดงถึงปฏิกิริยาไนเตรชันที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์ไตรไนโตรโทลูอิน (TNT)

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



รูปที่ 2.13 แสดงถึงปฏิกิริยาการจับกันของ 18-crown-6 ether กับ ไตรไนโตรโทลูอีน (TNT)

โดยการสร้างฟิล์มบางของ 18-Crown-6 ether ลงยังพื้นผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์นั้น ผู้วิจัยได้เลือกใช้การเคลือบด้วยวิธีการจุ่มเนื่องจากตัวคริสตัลนั้นบางมากๆ จึงทำให้เกิดการแตกหักได้ง่าย ซึ่งถ้าเลือกใช้วิธีอื่น อาทิเช่น การพิมพ์สกรีน (Printed Screen Coating) หรือกระบวนการหมุนเคลือบ (spin coating) อาจจะทำให้คริสตัลเกิดความเสียหายได้ โดยการเคลือบด้วยวิธีการจุ่ม (Dip coating) นั้นเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการศึกษาวิจัยทางวิศวกรรมเคมี และ nanomaterial ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากใช้เทคนิคจุ่มเคลือบเพื่อสร้างฟิล์มบาง โดยส่วนมากจะใช้เทคนิคนี้ในการทำเซนเซอร์ชนิด Multilayer sensor coatings และใช้ในการสร้างวัสดุขนาดเล็กหรือ nanomaterials เช่น วัสดุประเภท Hydrogels, Sol-Gel nanoparticle, self-assembled monolayers และ Layer-by-layer nanoparticle assemblies. เป็นต้น โดยขั้นตอนของการเคลือบด้วยวิธีการจุ่มที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้นั้น จะกล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 3

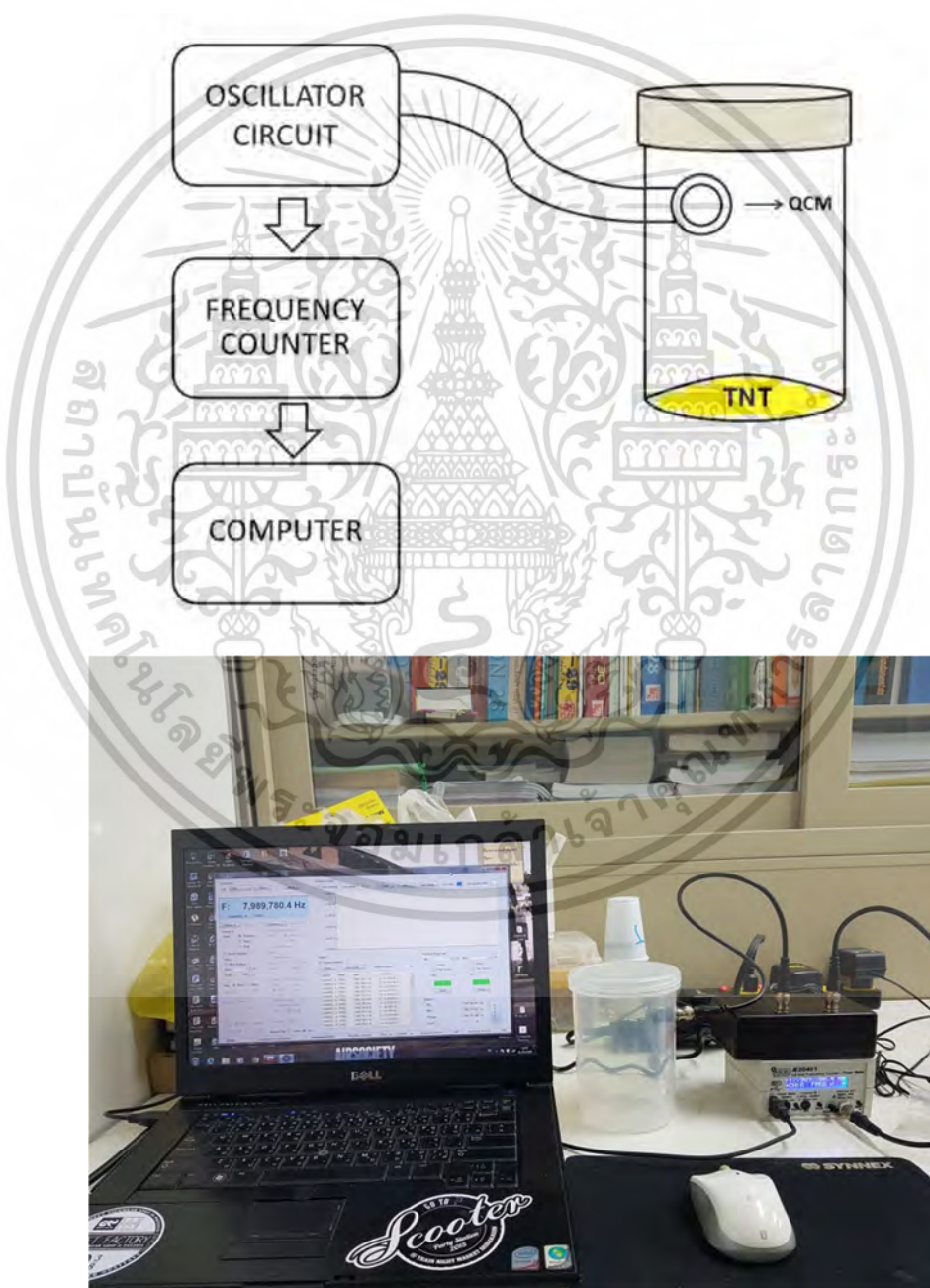
วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์(Quartz Crystal Microbalanced) เพื่อนำมาใช้ในการเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยของสารตั้งต้นวัตถุระเบิดชนิด 2,4,6 – Trinitrotoluene (TNT) โดยขอบเขตของขั้นตอนการดำเนินงานในโครงการพิเศษนี้ จะแบ่งเป็น 5 ส่วนหลักๆ โดยในส่วนแรกคือการศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ว่ามีหลักการทำงานอย่างไร สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานลักษณะได้บ้าง จากนั้นในส่วนที่ 2 จะพูดถึง การสร้างและทดลองเบื้องต้นเกี่ยวกับควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ โดยในตอนนี้จะเป็นการออกแบบวงจรและระบบที่ใช้ร่วมกับควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ โดยจะทดลองเกี่ยวกับย่านการใช้งานที่วงจรสามารถทำงานได้ และทดสอบคุณสมบัติในการวัดมวลของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ ด้วยการนำไปตรวจวัดในสารที่มีอัตราการระเหยมากๆ เช่น การบูร จากนั้นในตอนที่ 3 จะเป็นการศึกษาการเตรียมสารเคลือบผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์และทดลองเกี่ยวกับสารเคลือบผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ที่ทำให้ตรวจวัดเฉพาะ TNT ได้ โดยจะศึกษาถึงการสร้างวัสดุที่มีความไวสูงต่อการตรวจวัดไอระเหยของสารตั้งต้นวัตถุระเบิดชนิด 2,4,6 – Trinitrotoluene (TNT) โดยดูจากคุณสมบัติทางเคมีของสารนั้นๆ โดยวัสดุที่มีความไวสูงที่เราเลือกใช้ซึ่งก็คือ 18 – crown -6 ether เมื่อได้สารที่มีความเหมาะสมจึงนำมาเคลือบไปยังผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ โดยใช้วัสดุที่เป็น โพลีเมอร์อย่างเช่น โพลีเมทิลเมทาไครเลต (PMMA) เป็นตัวประสานระหว่างผิวของคริสตัลกับวัสดุที่มีความไวสูงเมื่อเซนเซอร์พร้อมใช้งานแล้วจะทำการทดลองคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มที่มีผลต่อการวัดและเซนเซอร์เช่น ความเข้มข้น , ความหนา และความเรียบของฟิล์มต่อไป ซึ่งในตอนที่ 4 จะทำการทดลองตรวจวัดจริงกับสารตั้งต้นวัตถุระเบิดชนิด 2,4,6 – Trinitrotoluene (TNT) ที่มีปริมาณเท่าๆกันแต่จะใช้เซนเซอร์ที่มีฟิล์มที่มีความเข้มข้น , ความหนา และความเรียบ ต่างๆกัน เพื่อหาเซนเซอร์ที่เหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด จากนั้นในตอนที่ 5 จะทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลรวมถึงสรุปและวิเคราะห์ผลในการวัดด้วยเซนเซอร์ที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองในตอนที่แล้วมาตรวจวัดสารตั้งต้นวัตถุระเบิดชนิด 2,4,6 – Trinitrotoluene (TNT) ที่ ปริมาณ ต่างๆกัน ตั้งแต่ 2 – 10 กรัม จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองต่อไป ซึ่งขั้นตอนการดำเนินการทดลองโดยละเอียดในแต่ละขั้นตอนนี้จะพูดถึงในตอนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบที่ใช้ในการตรวจวัดไอระเหยของTNT

ภาพรวมของระบบตรวจวัดที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นไปดังภาพที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย แคมเบอรัปขนาด 1,100 ลบ.ซม. ที่มีควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ติดอยู่ด้านบน และ TNT อยู่ด้านใน ซึ่งQCM Sensor จะต่อกับวงจรกำเนิดความถี่เพื่อกำเนิดสัญญาณความถี่ให้กับQCM และอีกด้านหนึ่งจะต่อเข้ากับเครื่องนับค่าความถี่ เพื่อนำค่าความถี่ที่ได้จากเซนเซอร์ และเชื่อมต่อผ่านสายUSB เพื่อบันทึกและแสดงผลข้อมูลในคอมพิวเตอร์นั่นเอง



รูปที่3.1 ระบบตรวจวัดไอระเหยของTNTที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 เครื่องมือตรวจวัด

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



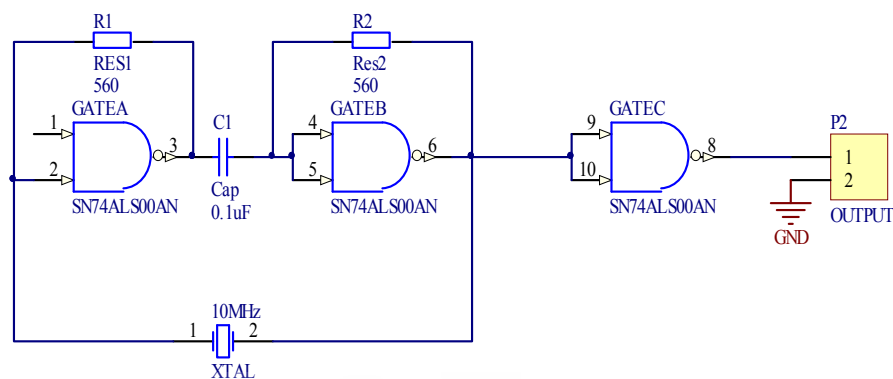
รูปที่ 3.2 โครงสร้างควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์(QCM)

โดยปกติผลึกควอตซ์นั้นจะไม่มีประจุไฟฟ้าจึงต้องทำให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าโดยการใส่โลหะมาเคลือบบนพื้นผิวเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดการนำไฟฟ้าในตัวของผลึกควอตซ์ได้ ส่วนในระบบการวัดของงานวิจัยชิ้นนี้นั้น ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์(QCM) จะถูกต่อเข้ากับวงจรออสซิลเลเตอร์ กำเนิดความถี่โซแนนซ์(ความถี่ธรรมชาติ)แก่QCM เพื่อนำค่าความถี่ที่เกิดขึ้นมาใช้ในการเก็บข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด

3.1.2 วงจรกำเนิดความถี่ที่ใช้ในการทดลอง

วงจรที่เลือกใช้ในโครงงานฉบับนี้ คือวงจร IC-compatible crystal oscillator เป็นวงจรออสซิลเลเตอร์กำเนิดสัญญาณแบบสี่เหลี่ยม(Rectangular waveform) ประกอบไปด้วย NAND gates ที่มีตัวต้านทานต่อคร่อมเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้ NAND gates ทำงานได้ปกติ และมี ตัวเก็บประจุ ทำหน้าที่เป็น DC Blockingไม่ให้ไปกวนสัญญาณความถี่จากคริสตัล โดยวงจรนี้จะทำงานที่ ค่าเรโซแนนซ์ ของคริสตัลนั้นๆ โดยความถี่ของคริสตัลที่เหมาะสมจะอยู่ที่1-12MHz.ผู้ทดลองได้เลือกใช้วงจรนี้เนื่องจากสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 0°C -70°C และมีสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้น้อย เนื่องจากตัว IC ถูกชิลด์มาแล้ว จึงเหมาะในการนำมาประยุกต์ทำเป็นเครื่องมือวัดต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการขังนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยู่ได้เห็นว่าใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT

3.1.3 อุปกรณ์วัดสัญญาณความถี่

3.1.3.1 ออสซิลโลสโคป (Cathode Ray Oscilloscope;CRO)

ออสซิลโลสโคปเป็นเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในการวัดแสดงรูปและวิเคราะห์คลื่นสัญญาณต่างๆ ออกมาเป็นภาพปรากฏบนจอภาพให้เห็น โดยจะแสดงภาพออกมา เช่น การวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า การวัดความถี่ของสัญญาณ การวัดเฟสของสัญญาณ การวัดคาบของสัญญาณ และรวมถึงการวัดสัญญาณพัลส์ การอ่านค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเป็นPeak-To-Peak และค่าเวลาเป็นวินาที เป็นต้น

หลักการทำงานของออสซิลโลสโคป คือ จะใช้หลักการเบี่ยงเบนของลำอิเล็กตรอน ภายในหลอดภาพรังสีแคโทด (Cathode Ray Tube;CRT) ด้วยระบบการเบี่ยงเบนทางไฟฟ้าสถิตหน้าที่หลักของออสซิลโลสโคป คือ รับสัญญาณ , แสดงภาพของสัญญาณที่รับและวิเคราะห์สัญญาณ



รูปที่ 3.4 ออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.2 เครื่องวัดความถี่แบบดิจิทัล (Digital Frequency Counter)

เครื่องวัดความถี่แบบดิจิทัล (Digital Frequency Counter) ทำหน้าที่ วัดความถี่กำหนดที่ ได้จากวงจร Oscillator โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องนับความถี่แบบดิจิทัล ยี่ห้อ Ascel Electronic รุ่น AE20401 ซึ่งมาพร้อมกับซอฟต์แวร์ที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและแสดงผลได้แบบเรียลไทม์ (Real time) ดังรูป 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องนับความถี่แบบดิจิทัล ยี่ห้อ Ascel Electronic รุ่น AE20401

3.2 การทดลอง

3.2.1 การทดลองบันทึกค่าความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์เมื่อใช้คริสตัลความถี่ที่ค่าต่างๆ

ในขั้นตอนนี้เป็น การทดสอบวงจรออสซิลเลเตอร์ที่จะนำมาใช้ในการกำเนิดความถี่ให้กับคริสตัลเพื่อนำมาทำเป็นควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ โดยจะทดลองที่คริสตัลที่ค่าความถี่ต่างๆ เพื่อหาการใช้งานที่เหมาะสมต่อไป

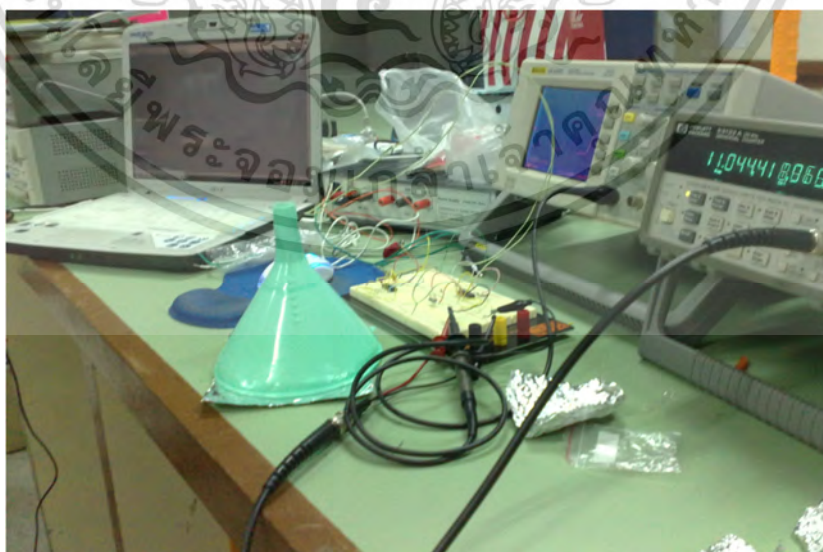


รูปที่ 3.6 การทดลองหาวงจรและค่าความถี่ที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้เป็น OCM เซนเซอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงบนเว็บไซต์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ผู้เขียนขอสงวนสิทธิ์ในทรัพย์สินทางปัญญาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวิธีการทดลองมีดังต่อไปนี้

1. ต่วงจรดังรูป 3.3 โดยใช้วงจรออสซิลเลเตอร์แต่ละความถี่ของควอตซ์คริสตัลดังนี้
 - ควอตซ์คริสตัลความถี่ 4 MHz
 - ควอตซ์คริสตัลความถี่ 8 MHz
 - ควอตซ์คริสตัลความถี่ 10 MHz
 - ควอตซ์คริสตัลความถี่ 11.0592 MHz
2. จัดระบบบันทึกค่าความถี่ต่างๆโดยใช้วงจร Oscillator ที่มีคริสตัลความถี่ 4 , 8 , 10 , 11.0592 MHz ตามลำดับโดยต่อกับเครื่องนับความถี่ เพื่ออ่านและบันทึกค่าความถี่
3. ต่อสาย USB เพื่อติดต่อข้อมูลจากเครื่องนับความถี่แบบดิจิตอลไปยังหน้า จอคอมพิวเตอร์ และต่อออสซิลโลสโคปเพื่อดูสัญญาณความถี่ที่เกิดขึ้นว่ามีลักษณะแบบใด
4. เปิด Switch อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดเพื่อเริ่มการทดลอง
5. ตรวจสอบการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องนับความถี่แบบดิจิตอลกับ คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ ที่ติดตั้งว่าได้เชื่อมต่อกันอยู่หรือยัง
6. เริ่มบันทึกค่าความถี่โดยหลังจากบันทึกเสร็จค่าความถี่จะถูกบันทึกเป็นไฟล์ Excel จากนั้นนำค่าความถี่ที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความถี่
7. สรุปและวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่าความถี่ที่เหมาะสมในการใช้งานเพื่อทดลองในตอนต่อไป

3.2.2 การบันทึกค่าความถี่เมื่อมีการบูรตกลงบนผิวหน้าของควอตซ์คริสตัล เพื่อทดสอบคุณสมบัติของคริสตัลที่นำมาพัฒนาใช้เป็นเซนเซอร์วัดมวลควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์(QCM)



รูปที่ 3.7 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองบันทึกค่าความถี่โดยใช้การตกสะสมของการบูร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีทดลอง

1. ต่อบอร์ดวงจรรูป 3.3 โดยใช้ควอตซ์คริสตัลความถี่ 10MHz.
2. จัดระบบการตกสะสมของการบูร์ดนี้
 - นำการบูร์ดที่ใช้ในการทดลองจำนวนหนึ่งใส่ไว้ในแฮมเบอร์



รูปที่ 3.8 การบูร์ดที่บรรจุลงในแฮมเบอร์

- นำควอตซ์คริสตัลติดตั้งลงด้านบนของแฮมเบอร์ ดังรูป 3.9 โดยขั้วของคริสตัลต่อกับวงจรออสซิลเลเตอร์เพื่อกำเนิดสัญญาณความถี่ให้กับคริสตัล



รูปที่ 3.9 ติดตั้งควอตซ์คริสตัลที่ด้านบนของแฮมเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จัดระบบบันทึกความถี่โดยนำการตกสะสมของการบวมซึ่งต่อกับวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ใช้ความถี่ 10MHz ต่อกับแหล่งจ่ายไฟ +5 V และเครื่องนับความถี่แบบดิจิทัล ดังรูป 3.10



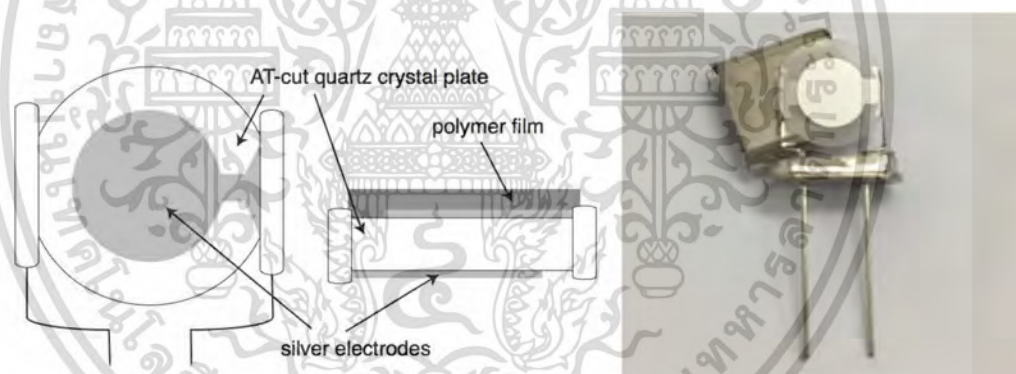
รูปที่ 3.10 ระบบวัดข้อมูลความถี่ที่ใช้คริสตัล 10MHz ในการตกสะสมของการบวม

4. ต่อสาย USB เพื่อติดต่อส่งผ่านข้อมูลจากเครื่องวัดความถี่แบบดิจิทัลไปยังหน้าจอกอมพิวเตอร์
5. เปิด Switch อุปกรณ์ทั้งหมดดังรูป 3.10 เพื่อเริ่มการทดลอง
6. ตรวจสอบการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องนับความถี่แบบดิจิทัล , พอร์ต USB และโปรแกรมที่ติดตั้งในคอมพิวเตอร์
7. เริ่มต้นบันทึกข้อมูลความถี่ที่ได้จากระบบ
8. นำข้อมูลที่บันทึกได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการทดลองและค่าความถี่ที่บันทึกได้ ณ เวลาต่างๆ
9. ทำการคำนวณน้ำหนักมวล(Δm)ที่ตกสะสมลงบนควอตซ์คริสตัลจากสมการSauerbrey
10. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การเตรียมสารเพื่อสร้างฟิล์มเคลือบเซนเซอร์วัดมวลควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (QCM) เพื่อใช้ในการตรวจวัดเฉพาะกับ 2,4,6 - Trinitrotoluene (TNT)

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 โพลีเมททิลเมทาไคเลต [18-19] มาเพื่อช่วยยึดให้ 18-crown-6 ether สามารถเกาะอยู่บนผิวของคริสตัลได้ โดยการเคลือบด้วยวิธีการจุ่ม (Dip-coating) นั้นเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการศึกษาวิจัยทางวิศวกรรมเคมีและ nanomaterial ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากใช้เทคนิคจุ่มเคลือบเพื่อสร้างฟิล์มบางโดยขั้นตอนการเตรียมสารมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.11 QCM ที่ยังไม่ถูกเคลือบผิวและโครงสร้างของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (QCM) หลังจากเคลือบฟิล์มแล้ว

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารเคลือบ QCM



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

รูปที่ 3.13 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มเคลือบผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์

2. หลังจากเตรียมสารในบีกเกอร์แล้วนำไปเขย่าให้เข้ากันด้วยultrasonic bath เป็นเวลา 15 นาที ก็จะได้สารละลายที่พร้อมสำหรับการเคลือบผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์



รูปที่ 3.14 เครื่องชั่งสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 Ultrasonic bath

3. เปิดกระป๋องคริสตัลออกและทำการทำความสะอาดผิวหน้าคริสตัลด้วย แอลกอฮอล์บริสุทธิ์

4. ทำการเคลือบเซอด้วยวิธีการจุ่มลงไปนสารละลายที่เตรียมไว้

โดยหลังจากเคลือบเสร็จนำมาตรวจสอบหาความถี่เริ่มต้นของ QCM อีกครั้งเพื่อตรวจสอบว่ามวลของฟิล์มบางทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเพียงใดเพื่อที่จะได้ทราบค่าความถี่เริ่มต้นก่อนทำการทดลอง

3.2.4 การตรวจวัด 2,4,6 - Trinitrotoluene (TNT) โดยใช้เซนเซอร์วัดมวลควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (QCM) ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาว่าความเข้มข้นของ 18-crown-6 ether นั้นมีผลอย่างไรต่อการตรวจวัด TNT และมีผลอย่างไรต่อเซนเซอร์ ซึ่งจะใช้ TNT ที่ปริมาณเท่ากันที่ 4.6 กรัม โดยขั้นตอนการเตรียมนั้นจะเหมือนกับในขั้นตอนการเตรียมฟิล์มที่กล่าวไปแล้วโดยเปลี่ยนความเข้มข้นตามที่กำหนด คือ 10^{-3} M , 2×10^{-3} M , 4×10^{-3} M , 10^{-2} M โดยขั้นตอนการเตรียมมีดังต่อไปนี้

1. เตรียมสารละลายที่ความเข้มข้น 10^{-3} M , 2×10^{-3} M , 4×10^{-3} M , 10^{-2} M โดยใช้
 - ไดคลอโรมีเทน 50 มิลลิลิตร
 - 18 - crown - 6 ether 0.0132g, 0.0264 g, 0.0528 g and 0.132 g ตามลำดับ
 - โพลีเมททิลเมทาไคเลต 0.5 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หลังจากเตรียมสารในปิกเกอร์แล้วนำไปเขย่าให้เข้ากันด้วยultrasonic bath เป็นเวลา 15 นาที ก็จะได้สารละลายที่พร้อมสำหรับการเคลือบผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์
3. เปิดกระป๋องคริสตัลออกและทำการเคลือบผิวหน้าคริสตัลด้วย แอลกอฮอล์บริสุทธิ์
4. ทำการเคลือบเซนเซอร์ด้วยวิธีการจุ่มลงไปนในสารละลายที่เตรียมไว้
5. นำเซนเซอร์มาต่อเข้ากับระบบวัดเพื่อทดสอบด้วยการวัดTNT ที่ปริมาณเท่ากันที่4.6กรัม
6. บันทึกผลตั้งแต่เริ่มต้นจนค่าความถี่ค่อยๆที่(เซนเซอร์ถึงจุดอิ่มตัว)แล้วนำข้อมูลที่ได้อมาเขียนกราฟเพื่อสรุปผลการทดลองในตอนต่อไป

3.2.5 การตรวจวัด 2,4,6 - Trinitrotoluene (TNT)โดยใช้เซนเซอร์วัดมวลควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์(QCM)ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether ที่มีความหนาและความเรียบของฟิล์มต่างกัน

ในการทดลองตอนนี้เป็นการทดสอบว่าความหนาและความเรียบของฟิล์มนั้น มีผลอย่างไรต่อเซนเซอร์และมีผลอย่างไรต่อการวัด TNTซึ่งจะใช้ TNT ที่ปริมาณเท่ากันที่ 4.6 กรัม โดยจะควบคุมความหนาและความเรียบด้วยการเคลือบผิวด้วยวิธีการจุ่มซ้ำ โดยจะจุ่มเหมือนการเคลือบผิวปกติ เพียงแต่ตัวที่ต้องการจุ่มซ้ำ ต้องรอให้การเคลือบผิวครั้งแรก นั้นแห้งก่อนจึงจะจุ่มซ้ำ

1. เตรียมสารละลายที่ความเข้มข้น 2×10^{-3} M โดยใช้
 - ไตคลอโรมีเทน 50 มิลลิลิตร
 - 18 - crown - 6 ether 0.0264 g.
 - โพลีเมททิลเมทาไคเลต 0.5 กรัม
2. หลังจากเตรียมสารในปิกเกอร์แล้วนำไปเขย่าให้เข้ากันด้วยultrasonic bath เป็นเวลา 15 นาที ก็จะได้สารละลายที่พร้อมสำหรับการเคลือบผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์
3. เปิดกระป๋องคริสตัลออกและทำการทำความสะอาดผิวหน้าคริสตัลด้วย แอลกอฮอล์บริสุทธิ์
4. ทำการเคลือบเซนเซอร์ด้วยวิธีการจุ่มลงไปนในสารละลายที่เตรียมไว้โดยตัวแรกจุ่ม1ครั้งตัวที่2 และตัวที่3 จุ่ม2และ3ครั้งตามลำดับโดยในการจุ่มแต่ละครั้งต้องรอให้แห้งก่อนจะค่อยจุ่มใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นว่าเป็นการละเมิดลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำเซนเซอร์ต่อเข้ากับระบบวัดเพื่อทดสอบด้วยการวัดTNTในแชมเบอร์โดยเริ่มที่ 2 กรัม
6. บันทึกผลตั้งแต่เริ่มต้นจนค่าความถี่ค่อยๆคงที่(เซนเซอร์ถึงจุดอิ่มตัว)แล้วนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟเพื่อสรุปผลการทดลองในตอนต่อไป

3.2.6 การตรวจวัด 2,4,6 – Trinitrotoluene (TNT)ที่ปริมาณต่างๆโดยใช้เซนเซอร์วัดมวลควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์(QCM)ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการทดลองเพื่อทดสอบว่าเซนเซอร์สามารถตรวจวัดได้ที่TNT ปริมาณต่างๆกันได้หรือไม่ และให้ผลที่แตกต่างกันหรือไม่โดยใช้TNT ปริมาณ 2กรัม ,4กรัม ,6กรัม ,8กรัม และ10กรัม และใช้คริสตัลที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether ที่ความเข้มข้น 2×10^{-3} โมลาร์มาใช้งาน โดยเลือกใช้งานตามผลการทดลองในตอนก่อนหน้านี้ โดยขั้นตอนในการทดลองตอนนี้มีดังต่อไปนี้

1. เตรียมสารละลายที่ความเข้มข้น 2×10^{-3} M โดยใช้
 - ไตคลอโรมีเทน 50 มิลลิลิตร
 - 18 – crown – 6 ether 0.0264 g.
 - โพลีเมททิลเมทาไคเลต 0.5 กรัม
2. หลังจากเตรียมสารในบีกเกอร์แล้วนำไปเขย่าให้เข้ากันด้วยultrasonic bath เป็นเวลา 15 นาที ก็จะได้สารละลายที่พร้อมสำหรับการเคลือบผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์
3. เปิดกระป๋องคริสตัลออกและทำการทำความสะอาดผิวหน้าคริสตัลด้วย แอลกอฮอล์บริสุทธิ์
4. ทำการเคลือบเซนเซอร์ด้วยวิธีการจุ่มลงไปในสารละลายที่เตรียมไว้
5. นำเซนเซอร์ต่อเข้ากับระบบวัดเพื่อทดสอบด้วยการวัดTNTในแชมเบอร์โดยเริ่มที่ 2 กรัม
6. บันทึกผลตั้งแต่เริ่มต้นจนค่าความถี่ค่อยๆคงที่(เซนเซอร์ถึงจุดอิ่มตัว)แล้วนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟเพื่อสรุปผลการทดลองในตอนต่อไป
7. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 4และ5 ด้วยเซนเซอร์ตัวเดิม แต่เพิ่ม ปริมาณ TNT เป็น 4กรัม 6กรัม ,8กรัม และ10กรัม ตามลำดับ
8. สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

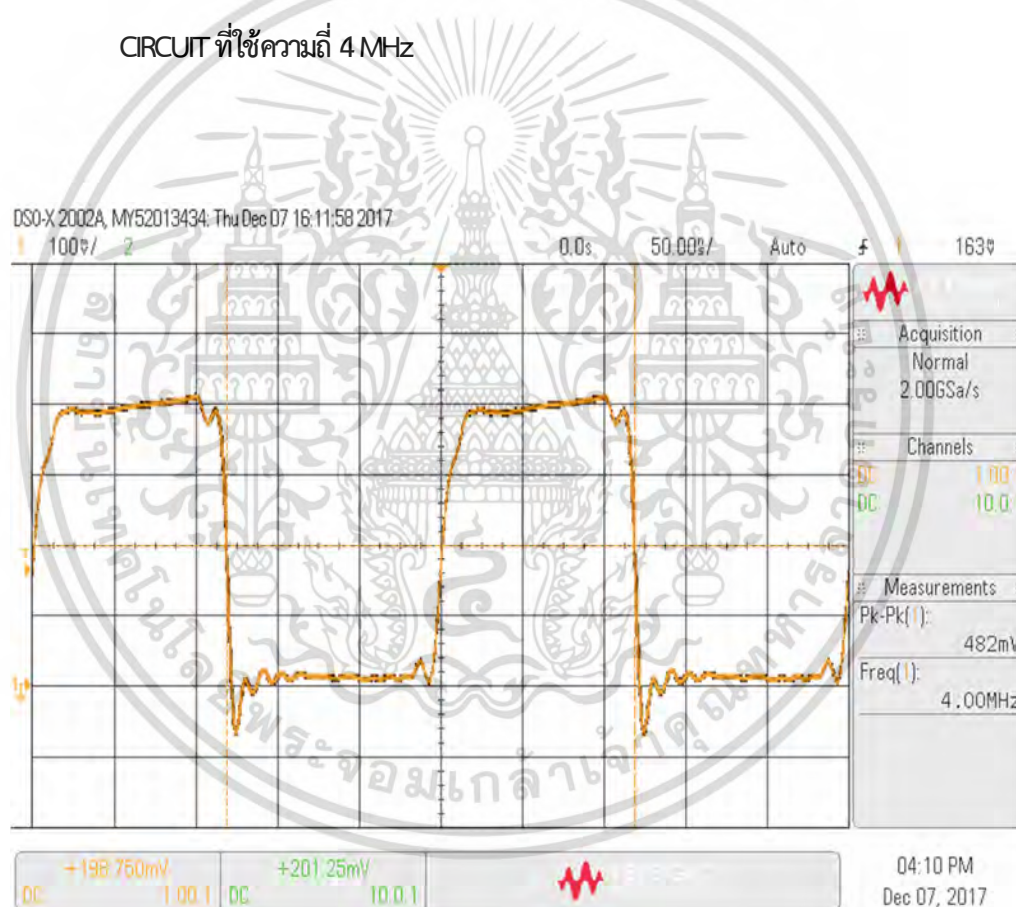
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของการทดลองจากบทที่ 3 ซึ่งแบ่งเป็นทั้งหมด 5 ตอนใหญ่ๆ โดยในตอนแรกจะเป็นการทดลองหาวงจรถูกกำเนิดสัญญาณความถี่และย่านความถี่ที่เหมาะสมกับวงจรถูกกำเนิดสัญญาณความถี่โดยจากที่ผู้วิจัยได้ทดลองเลือกหาวงจรถูกกำเนิดสัญญาณความถี่มาเพื่อทดลองหลายวงจรถจนได้วงจรถูกกำเนิดสัญญาณความถี่ที่มีความเสถียร มีสัญญาณรบกวนต่ำคือวงจรถูกที่มีชื่อว่า IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT เนื่องจากเป็นวงจรถูกที่ใช้อุปกรณ์น้อยและอุปกรณ์หลักของวงจรถูกชิลด์ป้องกันสัญญาณรบกวนมาแล้วทำให้สัญญาณรบกวนต่ำ จากนั้นทดสอบย่านการใช้งานของวงจรถูกนี้โดยการเปลี่ยนค่าความถี่พื้นฐานของวงจรถูกกล่าวคือเปลี่ยนค่าคริสตัลที่ใช้ในวงจรถูกนั่นเองเพื่อหาการใช้งานที่เหมาะสม จากนั้นทดลองเกี่ยวกับการนำคริสตัลมาพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์วัดมวลความไวสูงหรือที่เราเรียกว่าควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์นั่นเองโดยจะทดลองโดยใช้การบูรเป็นสารตัวอย่างในการระเหิด เนื่องจากการบูรเป็นสารที่เกิดการระเหิดได้ง่าย มีกลิ่นและไอระเหยค่อนข้างเยอะ ซึ่งทดลองโดยวงจรถูกดังกล่าวที่ใช้คริสตัลที่มีความถี่ที่ 10 MHz. เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงความถี่และคำนวณหาปริมาณของไอระเหยของการบูรที่มากก่สมบนผิวของคริสตัลว่าเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์หรือไม่ จากนั้นในตอนถัดมาจะเป็นการทดสอบคุณสมบัติของฟิล์มของ 18-crown-6 ether ที่นำมาใช้ในการเคลือบไปยังผิวและขั้วไฟฟ้าของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ เพื่อให้สามารถตรวจจับกับไอระเหยของ 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) ได้ โดยในขั้นตอนแรกนั้นจะทดสอบหาปริมาณความเข้มข้นของ 18-crown-6 ether ที่เหมาะสมกับการทำเป็นฟิล์มเพื่อใช้ในการตรวจวัดกับ 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) จากนั้นในตอนถัดมาจะทดสอบว่าความหนาและความเรียบของฟิล์มนั้นมีผลต่อการตรวจวัดและมีผลต่อตัวเซนเซอร์อย่างไรและจะทำให้การตรวจวัดดีขึ้นหรือไม่ โดยจากผลการทดลอง 2 ตอนนี้จะเลือกคุณสมบัติต่างๆที่เหมาะสมเพื่อมาเตรียมเซนเซอร์ที่ผู้วิจัยคิดว่าเหมาะสมที่สุดมาเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป ซึ่งจะทดสอบเซนเซอร์ที่เคลือบด้วยฟิล์มที่มีความเข้มข้น ความหนา ความเรียบ รวมถึงมีช่วงเวลาในการตรวจวัดที่เหมาะสม ด้วยการตรวจวัดกับ 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) ที่ปริมาณต่างๆกันนั่นเอง เพื่อหาข้อสรุปว่าเซนเซอร์สามารถทำงานได้ตรงตามกับทฤษฎีหรือไม่และช่วงการวัดที่เหมาะสมกับเซนเซอร์นั้นอยู่ตรงไหน โดยผลการทดลองในแต่ละตอนนั้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ผลการทดลองที่ 3.2.1 บันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT โดยผู้ทดลองและผลการทดลองวัดความถี่ของวงจรแบบต่อเนื่อง

ในการทดลองตอนนี้เป็นการทดสอบวงจร IC-compatible crystal oscillator เป็นวงจรออสซิลเลเตอร์กำเนิดสัญญาณแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular waveform) โดยมีย่านการทำงานที่ความถี่พื้นฐานอยู่ที่ 1 – 12 MHz. ซึ่งขึ้นกับคริสตัลที่เรานำมาใช้ โดยทดลองออสซิลเลส คริสตัลที่มีความถี่ต่างๆกันโดยผลที่ได้เป็นดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลการทดลองบันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT ที่ใช้ความถี่ 4 MHz

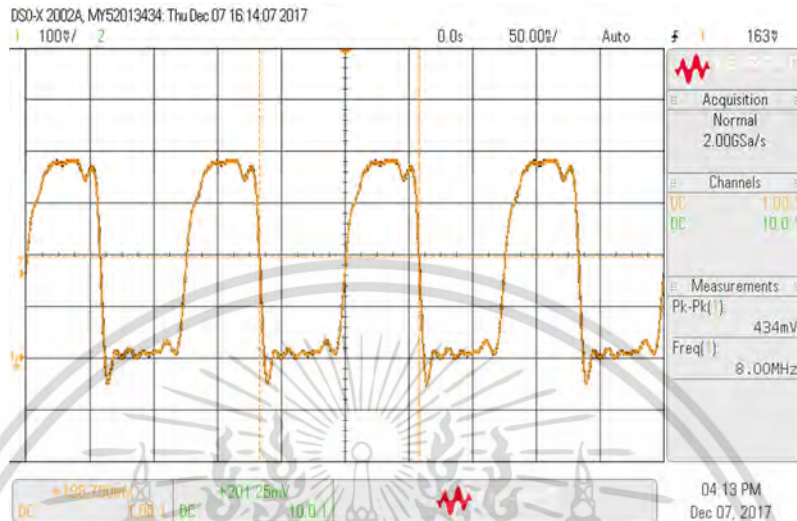


รูปที่ 4.1 คลื่นความถี่จาก Oscilloscope เมื่อใช้คริสตัลความถี่ 4 MHz

จากรูปที่ 4.1 จะพบว่า ออสซิลโลสโคปสามารถจับสัญญาณความถี่ได้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยม (Square Wave) และอ่านความถี่ได้ที่ 4.00 MHz. ซึ่งตรงกับค่าของคริสตัลที่เราได้ออสซิลเลตสัญญาณให้นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

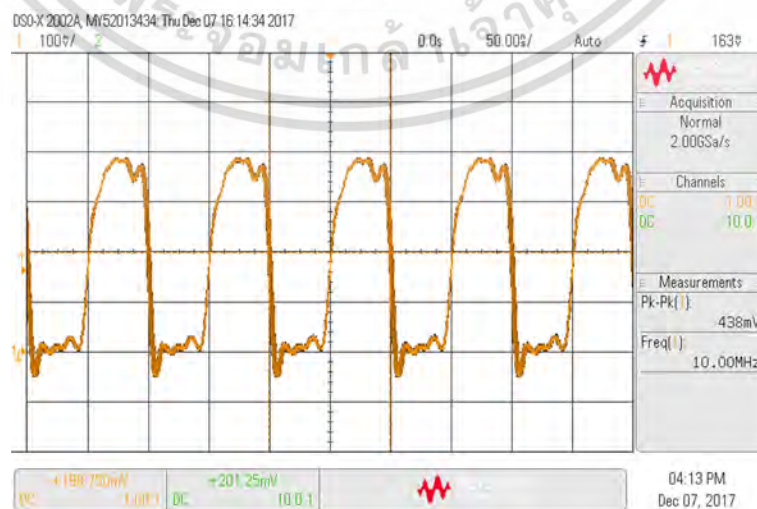
4.1.2 ผลการทดลองที่3.2.1 บันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT ที่ใช้ความถี่ 8 MHz



รูปที่4.2 คลื่นความถี่จาก Oscilloscope เมื่อใช้คริสตัลความถี่ 8 MHz

จากรูปที่4.2 จะพบว่า ออสซิลโลสโคปสามารถจับสัญญาณความถี่อยู่ในรูปสี่เหลี่ยม (Square Wave) แต่ยอดของกราฟสัญญาณสูงขึ้นคาบเวลาสั้นลง เนื่องจากความถี่ที่เพิ่มขึ้น และอ่านความถี่ได้ที่ 8.00 MHz. ซึ่งตรงกับค่าของคริสตัลที่เราได้ออสซิลเลตสัญญาณให้มันเอง

4.1.3 ผลการทดลองที่3.2.1 บันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT ที่ใช้ความถี่ 10 MHz



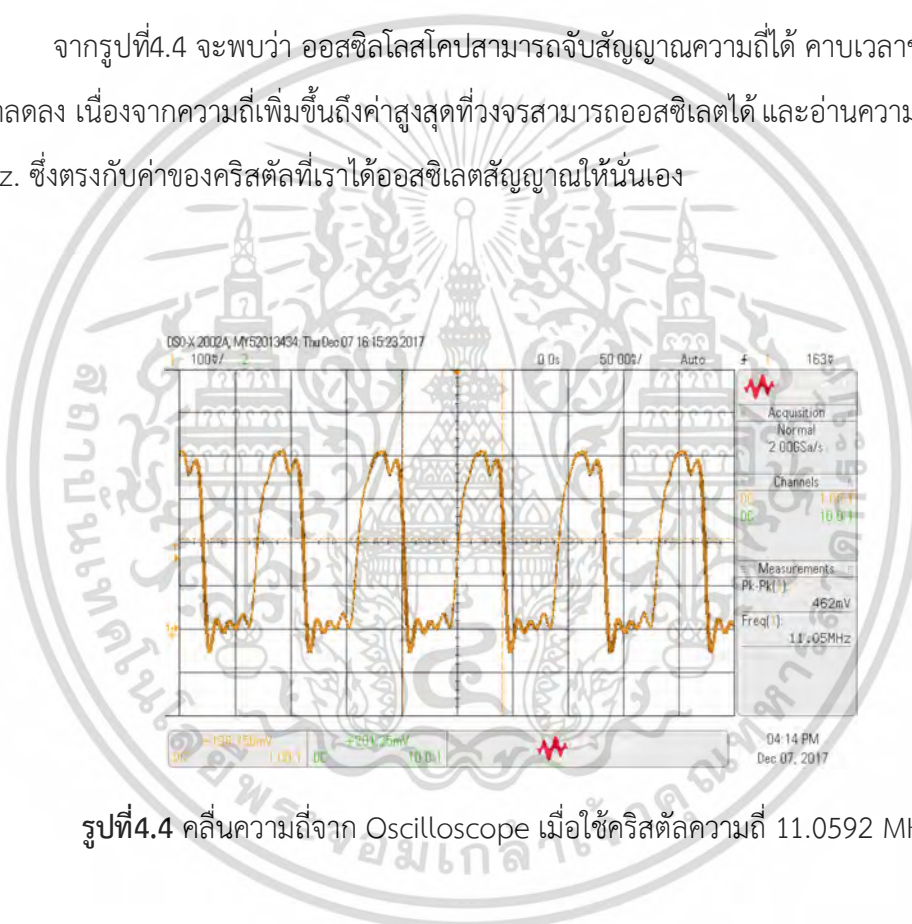
รูปที่4.3 คลื่นความถี่จาก Oscilloscope เมื่อใช้คริสตัลความถี่ 10 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักเรียนไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 จะพบว่า ออสซิลโลสโคปสามารถจับสัญญาณความถี่ พบว่าคาบเวลาของสัญญาณมีค่าลดลง เนื่องจากความถี่เพิ่มขึ้น และอ่านความถี่ได้ที่ 10.00 MHz. ซึ่งตรงกับค่าของคริสตัลที่เราได้ออสซิลเลตสัญญาณให้มันเอง

4.1.4 ผลการทดลองที่ 3.2.1 บันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT ที่ใช้ความถี่ 11.0592 MHz ดังรูป 4.4

จากรูปที่ 4.4 จะพบว่า ออสซิลโลสโคปสามารถจับสัญญาณความถี่ได้ คาบเวลาของสัญญาณมีค่าลดลง เนื่องจากความถี่เพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดที่วงจรสามารถออสซิลเลตได้ และอ่านความถี่ได้ที่ 11.05 MHz. ซึ่งตรงกับค่าของคริสตัลที่เราได้ออสซิลเลตสัญญาณให้มันเอง

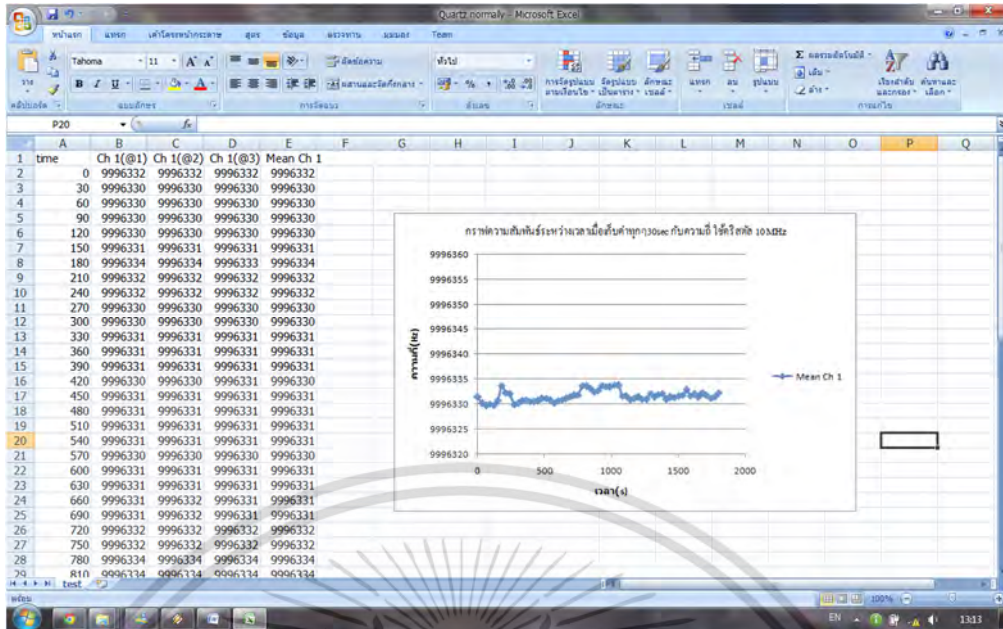


รูปที่ 4.4 คลื่นความถี่จาก Oscilloscope เมื่อใช้คริสตัลความถี่ 11.0592 MHz

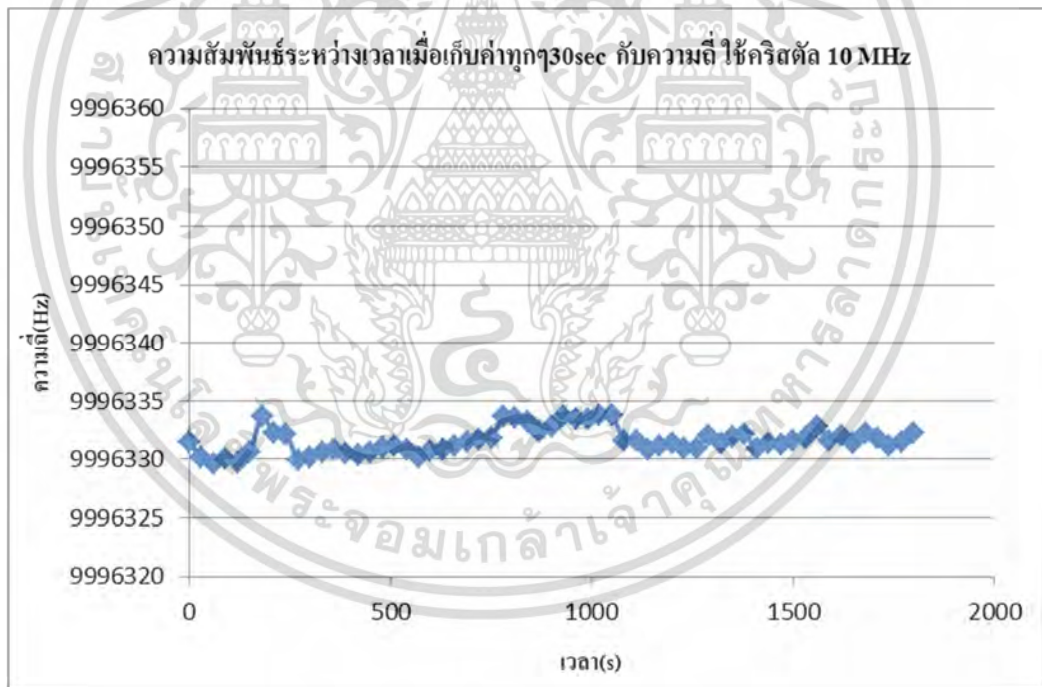
4.1.5 ผลการบันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT ที่ใช้คริสตัลความถี่ 10 MHz เมื่อบันทึกค่าความถี่ทุกๆ 30 วินาที

จากผล การทดลองแสดงรูป และ ข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมดังรูป 4.5จากนั้นทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับ ความถี่ ดังรูป 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ข้อมูลที่ได้ โดยใช้คริสตัล 10 MHz เมื่อบันทึกค่าทุกๆ 30 วินาที



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความถี่โดยใช้คริสตัล 10 MHz เมื่อบันทึกค่าทุกๆ 30 วินาที

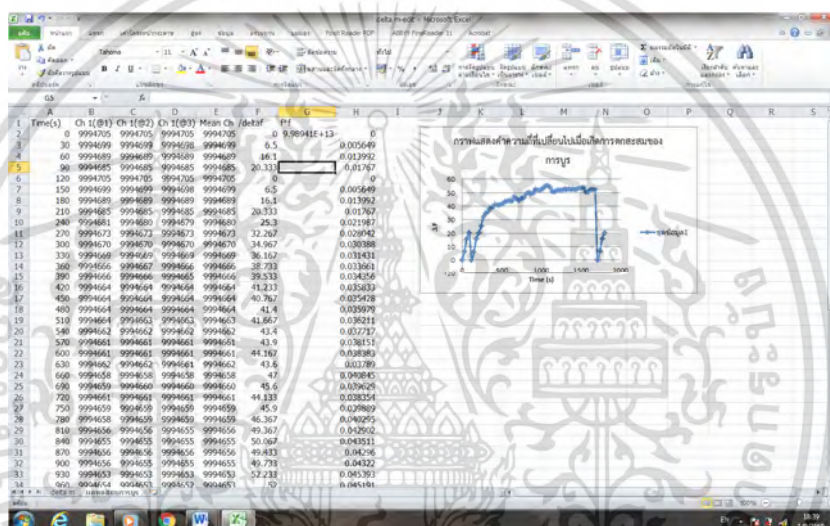
สาเหตุที่เลือกใช้Crystal ความถี่ 10MHz นั้นเนื่องจากจากการทดลองพบว่าค่าความถี่ของ Crystal ที่ 10MHz นั้นค่าความถี่มีค่าค่อนข้างจะมีเสถียรภาพมากที่สุดโดยจะแกว่งอยู่ในช่วง 0-10Hz.

เท่านั้น

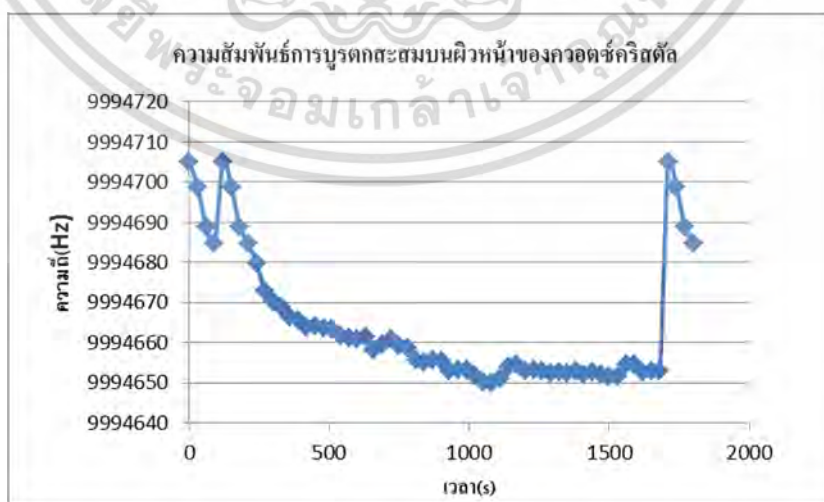
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลอง บันทึกค่าความถี่ของQuartz Crystal Microbalanced ที่ใช้ความถี่ 10 MHz เมื่อให้การบรูตคสะสมบนผิวหน้าของควอตซ์คริสตัล

จากผลการทดลองจะพบว่าควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์สามารถทำการตรวจวัดปริมาณไอระเหยของการบรูตได้เป็นอย่างดีเมื่อเวลาเปลี่ยนไปจะทำให้ความถี่ของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์นั้นเปลี่ยนแปลงไปด้วยจนถึงจุดอิ่มตัวที่ทำให้ความถี่ค่อนข้างคงที่โดยใช้เวลาประมาณ 25 นาที ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า เราสามารถใช้คริสตัลมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์วัดมวลหรือที่เรียกว่าควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ได้



รูปที่ 4.7 ข้อมูลความถี่ที่บันทึกได้ เมื่อให้การบรูตคสะสมบนผิวหน้าของควอตซ์คริสตัล



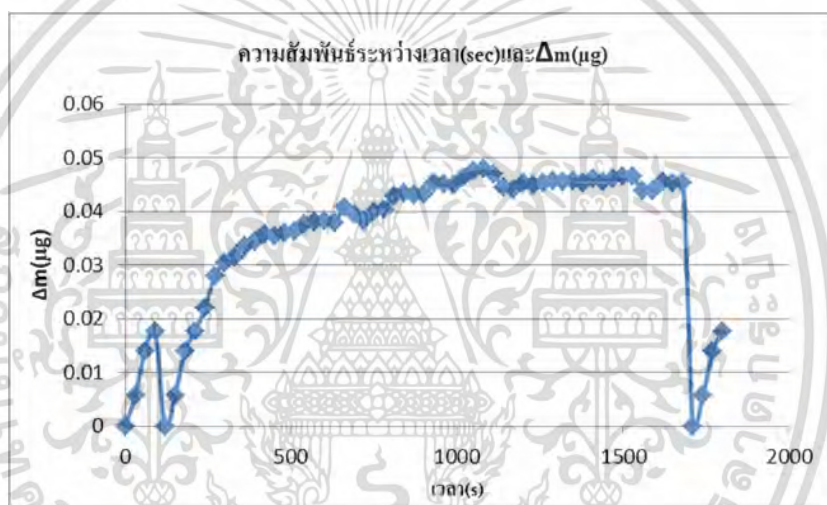
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งกับความถี่เมื่อให้การบรูตคสะสมบนผิวหน้าของควอตซ์คริสตัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งกับความถี่จะได้ผลดังรูปที่ 4.8

ซึ่งจากความสัมพันธ์ของสมการ Sauerbrey เมื่ออนุภาคมาเกาะบนส่วนที่ทำให้เกิดการสั่น จะทำให้มวลรวมของวัสดุนั้นมีการเปลี่ยนไป และจะทำให้เกิดความถี่ของการสั่นขึ้นมาใหม่ ซึ่งจะนำสมการที่กล่าวมาในบทที่ 2 มาคำนวณ

ดังนั้นจากข้อมูลดังรูป 4.7 ที่ทำการวัดการการบวมของผิวหน้าของควอตซ์คริสตัลซึ่งเขียนกราฟได้ดังรูป 4.8 สามารถนำมาคำนวณหามวลที่ตกสะสมได้บนผิวหน้าของควอตซ์คริสตัลได้ดังรูป 4.9



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบระหว่างเวลา(s)และ Δm (g)บนผิวหน้าควอตซ์คริสตัล

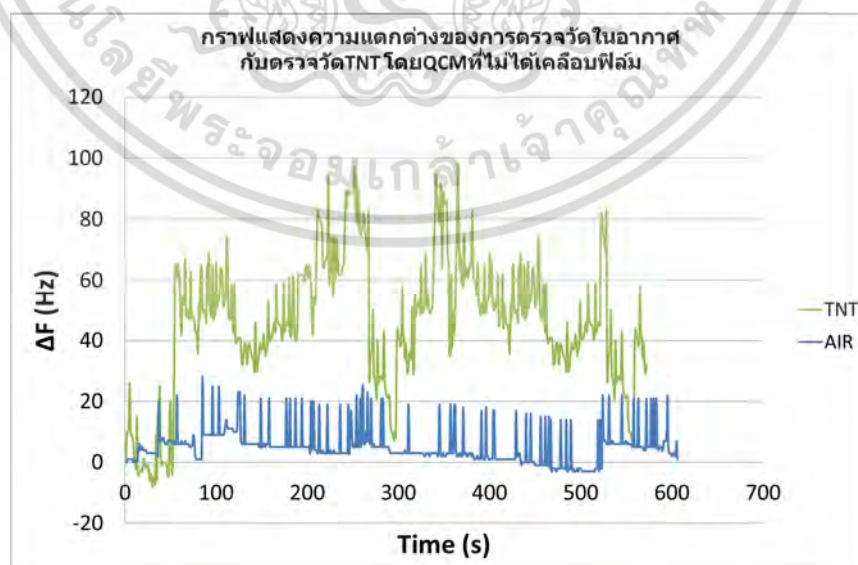
จากรูปที่ 4.9 นั้นจะพบว่ามวลที่เปลี่ยนไปบนพื้นผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยมวลที่ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์วัดได้จะอยู่ที่ประมาณ 0.05 กรัมที่เวลาประมาณ 25 นาที (1,500) วินาที ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.8 ที่ความถี่ของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ที่เปลี่ยนไปจากความถี่พื้นฐานนั้นเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการตรวจวัดเพิ่มขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่า มวลของไอระเหยของการบวมที่ตกสะสมบนผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับความถี่ของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการตรวจวัดเพิ่มขึ้นหรือกล่าวโดยสั้นๆได้ว่า เมื่อความถี่ที่เปลี่ยนไปมากขึ้น มวลที่ตกสะสมก็จะมากขึ้นเช่นกัน ($\Delta m \propto \Delta f$) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ ที่ว่าตามสมการ Sauerbrey นั้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

4.3.1 การตรวจวัดโดยใช้QCMที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มบางในอากาศและในสภาวะที่มี TNT เจือปน

จากการทดลองการตรวจวัดโดยใช้QCMที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มบางในอากาศและในสภาวะที่มี TNT เจือปน รูปที่ 5 แสดงถึงการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของQCMที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบฟิล์มในการตรวจวัดในอากาศและการตรวจวัดไอระเหยของTNT จะพบว่าในอากาศ ความถี่ที่เปลี่ยนไปจะมีค่าน้อยมากโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 10 Hz. เท่านั้น ในส่วนของการตรวจวัดในอากาศที่มีไอระเหยของTNTปนอยู่นั้นจะพบว่าค่าความถี่จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นแต่แกว่งโดยความถี่ที่เปลี่ยนไปอยู่ในช่วง 20-80 Hz. โดยความถี่ที่เปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยนี้เกิดจากการที่โมเลกุลของสารนั้นไม่สามารถจับกับผิวของQCMได้ดี โดยTNTทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจริงแต่เซนเซอร์ทำงานได้ไม่เสถียรแม้ว่าความถี่จะเปลี่ยนเพิ่มขึ้น แต่ไม่สามารถระบุได้ว่าโมเลกุลไหนเกาะบนพื้นผิวจึงทำให้เกิดค่าที่แกว่งๆในย่านที่กว้างขึ้นซึ่งเป็นการยากที่จะนำมาใช้ในการตรวจวัด

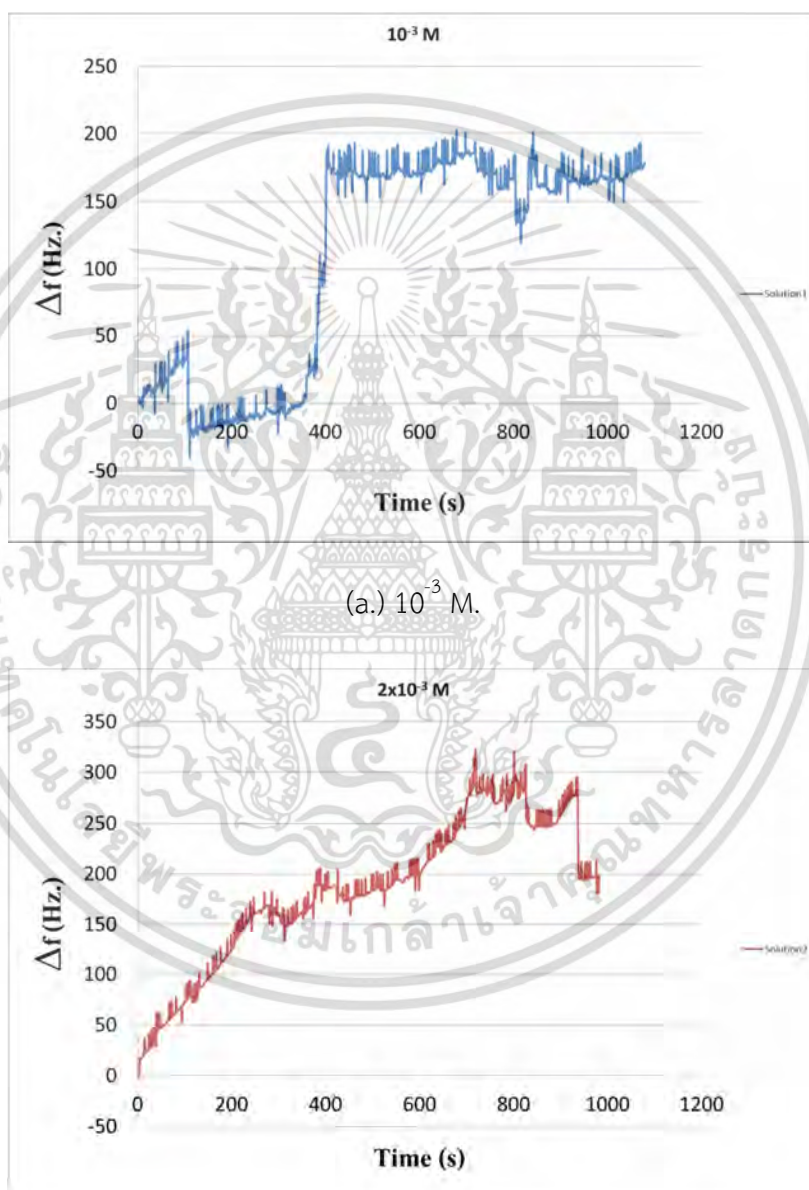


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความแตกต่างของการตรวจวัดในอากาศกับตรวจวัดTNTโดยQCMที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

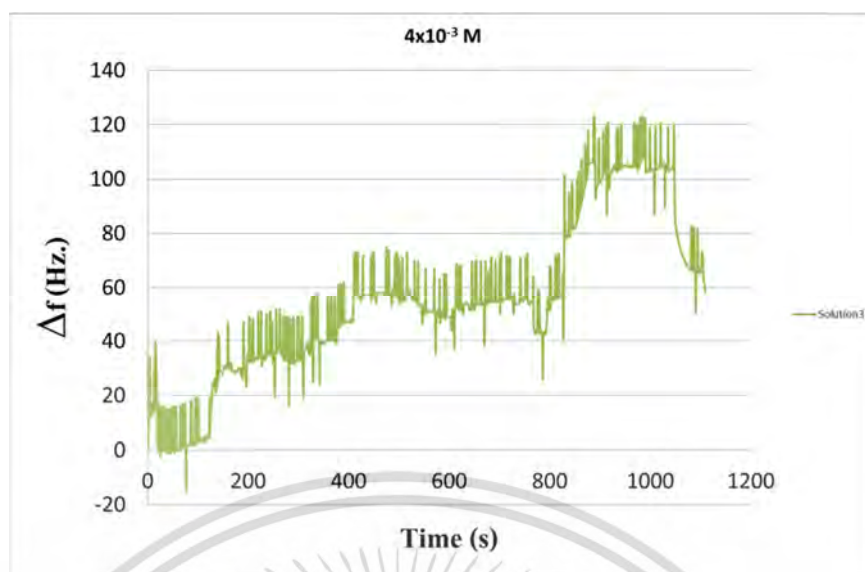
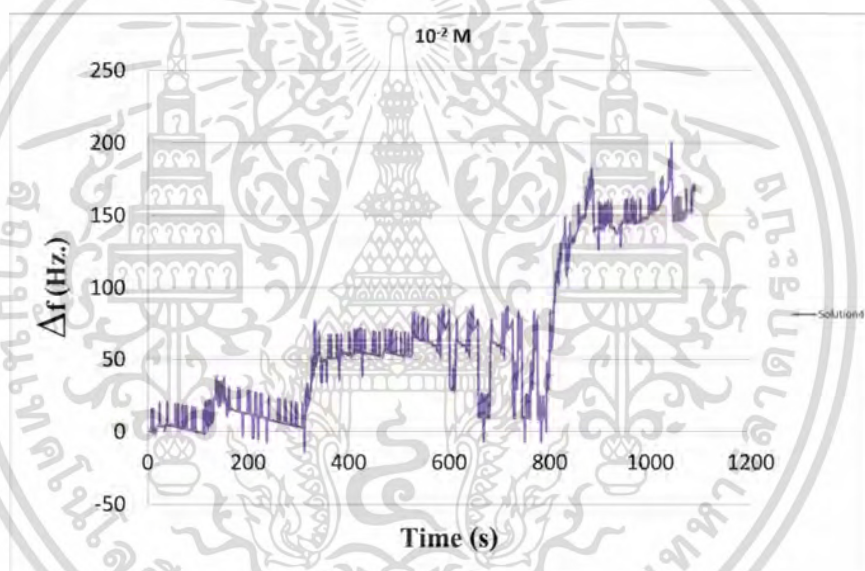
4.3.2 การตรวจวัดโดยใช้QCMที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ18-crown-6 ether ที่ความเข้มข้นต่างๆ [8]

ในขั้นตอนนี้จะใช้ TNT ที่ปริมาณเท่ากันที่ 4.6 กรัม โดยเปลี่ยนความเข้มข้นตามที่กำหนดคือ 10^{-3} M , 2×10^{-3} M, 4×10^{-3} M, 10^{-2} M เพื่อเป็นการศึกษาเพื่อหาว่าความเข้มข้นของ 18-crown-6 ether นั้นมีผลอย่างไรต่อการตรวจวัดTNT และมีผลอย่างไรต่อเซนเซอร์ โดยผลการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าความถี่ที่เปลี่ยนไป(Δf)ของQCMที่เคลือบด้วย18-Crown-6 ether ที่ความเข้มข้นต่างๆในสถานะที่มี TNT เจือปน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(c.) 4×10^{-3} M.(d.) 10^{-2} M.

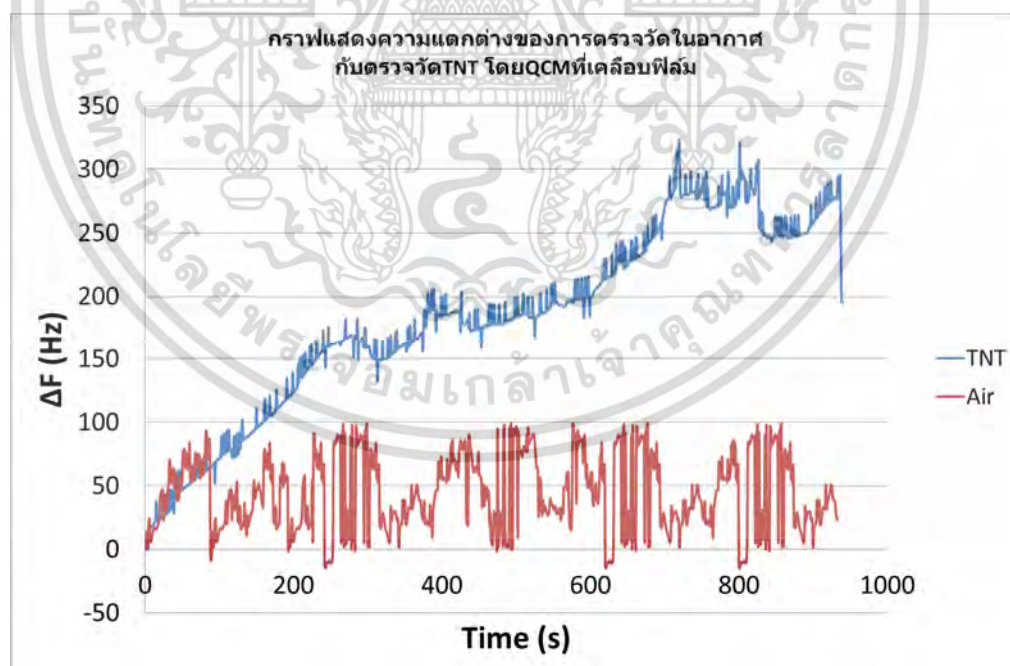
รูปที่ 4.11(ต่อ) กราฟแสดงค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลง (Δf) ของ QCM ที่เคลือบด้วย 18-Crown-6 ether

ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในสถานะที่มี TNT เจือปน

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. ค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปจะอยู่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วง 150-200 Hz. ระยะเวลาที่เซนเซอร์ใช้ในการวัดจนถึงจุดอิ่มตัวอยู่ที่ 400 วินาที และที่ความเข้มข้น 2×10^{-3} M. ระยะเวลาที่เซนเซอร์ใช้ในการวัดจนถึงจุดอิ่มตัวของเซนเซอร์อยู่ที่ 700 วินาที โดยค่าความถี่ที่เปลี่ยนไปจะอยู่ในช่วงประมาณ 200-300 Hz. ซึ่งสูงกว่าในความเข้มข้นแรก ซึ่งหมายความว่าความเข้มข้นของ 18-crown-6 ether มากขึ้นจะส่งผลให้สามารถจับกับโมเลกุลของ TNT ได้มากขึ้น แสดงว่าเมื่อมวลมากขึ้นความถี่ก็จะเปลี่ยนมากขึ้น ส่วนที่ความเข้มข้น 4×10^{-3} M. และ 10^{-2} M. จากกราฟพบว่าผลการทดลองนั้นมีความถี่เปลี่ยนแปลงมากขึ้นแต่ยังไม่ถึงจุดอิ่มตัวซึ่งใช้เวลาในการตรวจวัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของ 18-crown-6 ether มากขึ้น ทำให้จับโมเลกุลของ TNT ได้มากขึ้น เวลาที่ใช้ในการตรวจวัดจนกว่าเซนเซอร์จะถึงจุดอิ่มตัวนานขึ้นจึงสรุปได้ว่าที่จุดอิ่มตัวของเซนเซอร์ที่มีความเข้มข้นสูงความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปจะมากกว่าฟิล์มที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า

4.3.3 การตรวจวัดโดยใช้ QCM ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether ในอากาศ และในสถานะที่มี TNT เจือปน



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความแตกต่างของการตรวจวัดในอากาศกับตรวจวัด TNT โดย QCM ที่เคลือบฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความถี่ที่เปลี่ยนไปของQCMที่เคลือบฟิล์มบางของการตรวจวัดในอากาศกับตรวจวัดใน TNTเป็นดังรูปที่ 4.3 ในการตรวจวัดในอากาศปกติค่าความถี่จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและแกว่งอยู่ในช่วง0-100 Hz. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ50Hz.ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการวัดโดยใช้ QCMที่ไม่ได้เคลือบนั้นจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่มีมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีผลทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงมากขึ้นแต่ไม่มีรูปแบบการตกสะสมบนผิวที่ชัดเจนเพราะไม่สามารถเจาะจงได้ว่ามวลที่มาเกาะบนผิวคืออะไรซึ่งในกรณีที่วัดในสภาวะที่มีไอระเหยของTNTจะพบผลลัพธ์ที่ดีกว่า โดยค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงในสภาวะที่มีTNTนั้น จะค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นจนถึงจุดอิ่มตัวของเซนเซอร์ หมายความว่าฟิล์มบางของ18-crown-6 ether สามารถทำให้QCMตรวจจับกับTNTได้ดี ทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงมากขึ้น

จึงสรุปได้ว่าปริมาณของของTNTที่สะสมบนผิวของQCMจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นและทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงมากขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวของเซนเซอร์ได้

4.4 ผลการทดลอง บันทึกค่าความถี่ของQuartz Crystal Microbalanced ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether ที่ความหนาต่างกัน เมื่อตรวจวัดTNTที่ปริมาณเท่าๆกัน [10]

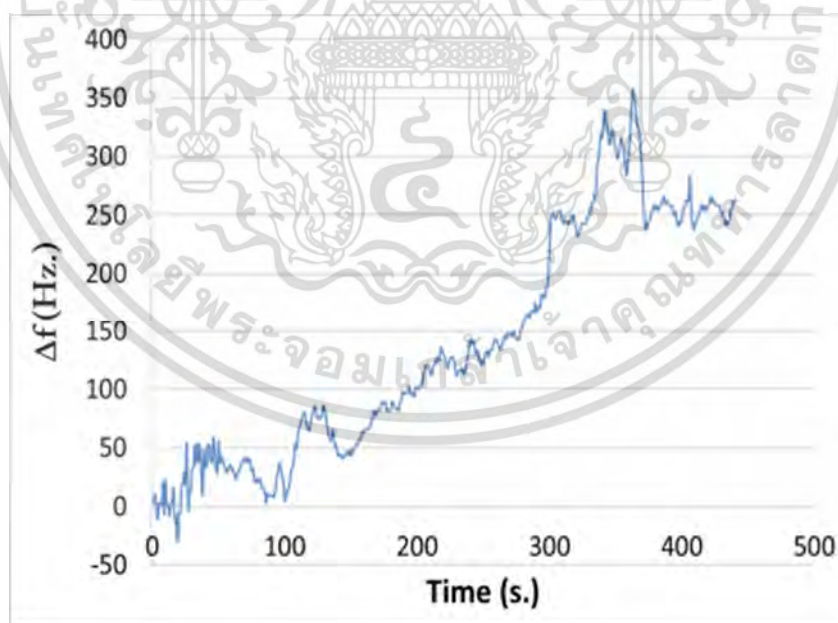
ในการทดลองตอนนี้เป็นการทดสอบว่าความหนาและความเรียบของฟิล์มนั้น มีผลอย่างไรต่อเซนเซอร์และมีผลอย่างไรต่อการวัด TNT โดยจะใช้ฟิล์มที่มีความเข้มข้นเท่ากันที่ 2×10^{-3} โมลาร์และจะควบคุมความหนาและความเรียบด้วยการเคลือบผิวด้วยวิธีการจุ่มซ้ำ โดยจะทำการเตรียมเซนเซอร์ทั้งหมด 3 ตัว โดยตัวแรกจะเป็นการเคลือบเซนเซอร์เพียงครั้งเดียว และ ตัวที่ 2และ3 จะเป็นการจุ่มซ้ำ2และ3ครั้งตามลำดับ โดยลำดับแรกจะตรวจสอบหาความถี่เริ่มต้นของเซนเซอร์แต่ละตัวว่าความหนาของฟิล์มนั้นมีผลทำให้ค่าความถี่เริ่มต้นของเซนเซอร์นั้นเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรเพื่อหามวลของความหนาของฟิล์มโดยความถี่พื้นฐานของQCMก่อนทำการเคลือบผิวนั้นมีความถี่อยู่ที่ 9.834 MHz. และ QCM ที่เคลือบ 1,2และ3ครั้งจะมีค่าความถี่พื้นฐานเปลี่ยนไปอยู่ที่ 9.823 MHz. , 9.820 MHz. และ 9.815 MHz ตามลำดับ โดยความถี่ที่เปลี่ยนไปนั้นเกิดจากการจุ่มซ้ำเพื่อทำให้ฟิล์มมีความหนาขึ้นหรือมวลของฟิล์มเพิ่มขึ้น โดยเราสามารถคำนวณหามวลของเนื้อฟิล์มได้จากค่าความถี่เริ่มต้นของเซนเซอร์ได้อีกด้วย โดยหลังจากเคลือบเซนเซอร์ทั้ง 3 ตัวแล้วนำมาเปรียบเทียบกับดังรูปที่4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 รูปแสดงความแตกต่างของQCMที่ไม่ได้เคลือบและเคลือบฟิล์มบางที่มีความหนาต่างๆ

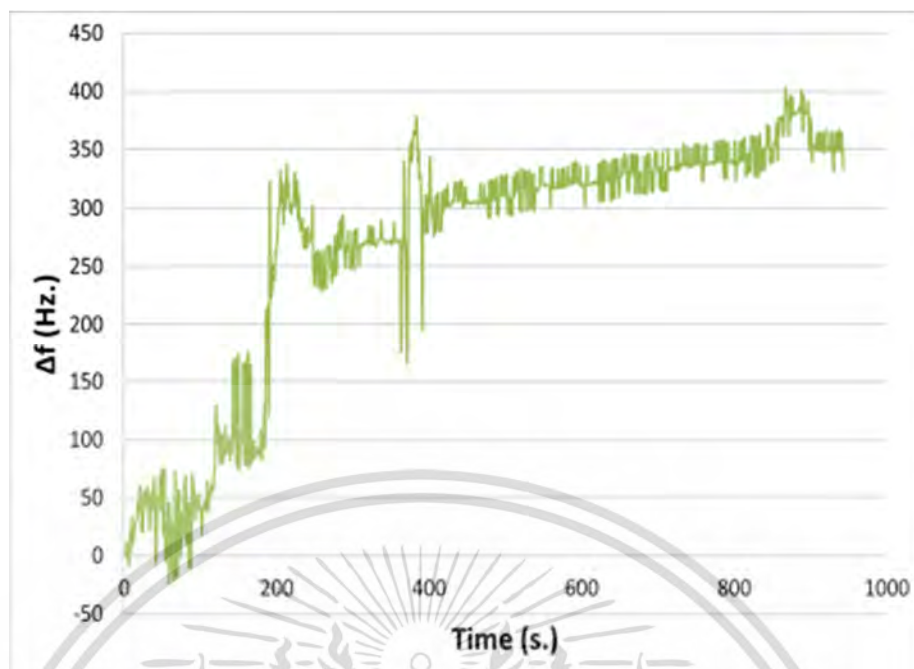
จะเห็นว่าเซนเซอร์ทั้ง3ตัวนั้นมีพื้นผิวความเรียบที่แตกต่างกันซึ่งเราจะตรวจสอบผลของความเรียบว่ามีผลต่อการวัดอย่างไรด้วยการวัดในTNTที่ปริมาณเท่าๆกันนั่นเอง โดยผลการตรวจวัดจะแสดงดังรูปที่ 4.14



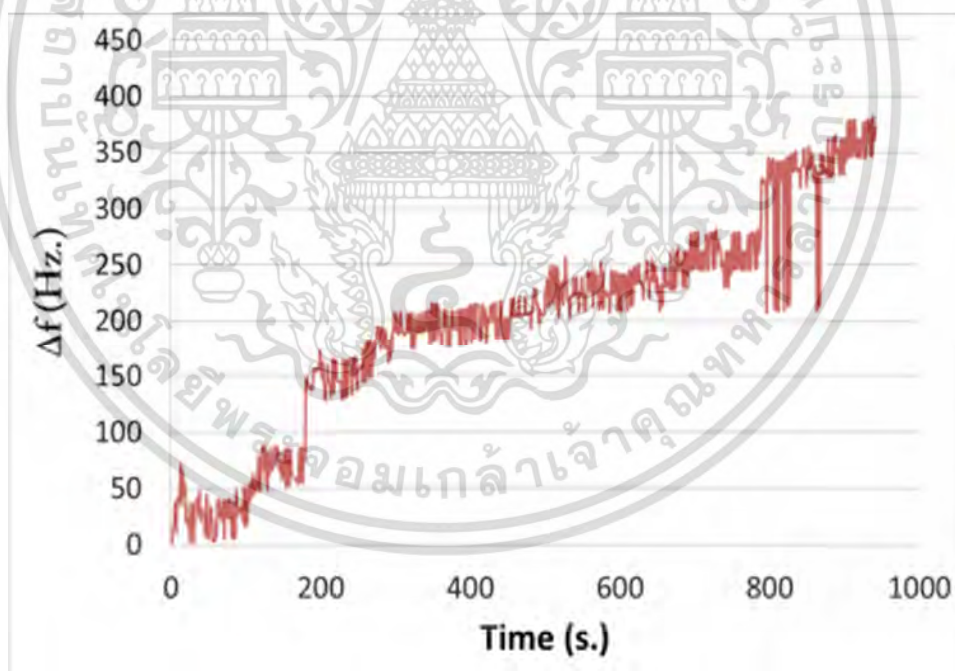
(a) กราฟแสดงการตรวจวัดTNTด้วยQCMเซนเซอร์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ18-crown-6 ether เพียงครั้งเดียว

รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการตรวจวัดTNTด้วยQCMเซนเซอร์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ

18-crown-6 etherที่มีความหนาต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) กราฟแสดงการตรวจวัดTNTด้วยQCMเซนเซอร์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ18-crown-6 ether สองครั้ง



(c) กราฟแสดงการตรวจวัดTNTด้วยQCMเซนเซอร์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ18-crown-6 ether สามครั้ง

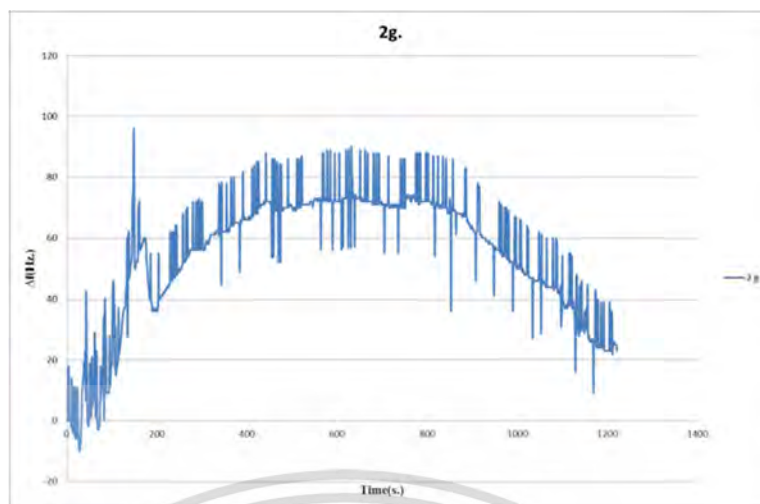
รูปที่ 4.14(ต่อ) กราฟแสดงการตรวจวัดTNTด้วยQCMเซนเซอร์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether ที่ความหนาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองจะพบว่า เมื่อเปรียบเทียบเซนเซอร์ทั้ง3ตัวจะเห็นว่าเซนเซอร์ตัวที่ถูกเคลือบเพียงครั้งเดียวนั้นมีผิวที่ขรุขระที่สุดเนื่องจากว่าคริสตัลมีลักษณะผิวที่มันและลื่น ทำให้ฟิล์มนั้นเกาะติดได้ยากทำให้พื้นที่บางส่วนไม่สามารถเกาะติดได้เรียบจึงทำการเคลือบซ้ำทำให้ผิวหน้าของฟิล์มถูกเติมเต็มและเรียบสม่ำเสมอมากขึ้นตามลำดับของการเคลือบซึ่งการเคลือบซ้ำนั้นทำให้มีความหนาหรือมวลของฟิล์มเพิ่มมากขึ้นด้วย จากนั้นวัดผลการตอบสนองของเซนเซอร์ทั้ง3ตัวด้วย TNT ที่ปริมาณเท่าๆกัน จะพบว่าในการวัดที่เซนเซอร์ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ18 -crown-6 ether เพียงครั้งเดียวนั้นจะมีช่วงเวลาในการวัดจนถึงจุดอิ่มตัวของเซนเซอร์อยู่ที่ประมาณ 350 - 400 วินาที และความถี่ที่เปลี่ยนไปสูงสุดของเซนเซอร์ก่อนถึงจุดอิ่มตัวอยู่ที่ 300-350 Hz. ส่วนในการวัดด้วยเซนเซอร์ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ18 -crown-6 ether สองครั้งและสามครั้งนั้นจะมีช่วงการวัดจนถึงจุดอิ่มตัวของเซนเซอร์อยู่ที่ประมาณ 800วินาที และ มากกว่า1,200 วินาทีตามลำดับ โดยความถี่ที่เปลี่ยนไปสูงสุดก่อนถึงจุดอิ่มตัวอยู่ที่ 350-400 Hz. ซึ่งจากผลการทดลองข้างต้นนี้ สามารถสรุปได้ว่า ฟิล์มของ 18 -crown-6 ether ที่มีมวลของฟิล์มมากกว่าสามารถทำให้ตรวจวัดโมเลกุลของ TNT ได้มากกว่า และใช้เวลาในการถึงจุดอิ่มตัวมากกว่า เนื่องจากฟิล์มสามารถเกิดพันธะกับTNTได้มากกว่ากล่าวง่าย ๆ คือสามารถตรวจวัดTNTเจอในปริมาณที่มากกว่า

4.5 ผลการทดลอง บันทึกค่าความถี่ของQuartz Crystal Microbalanced ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether เมื่อตรวจวัดTNTที่ปริมาณแตกต่างกัน [9]

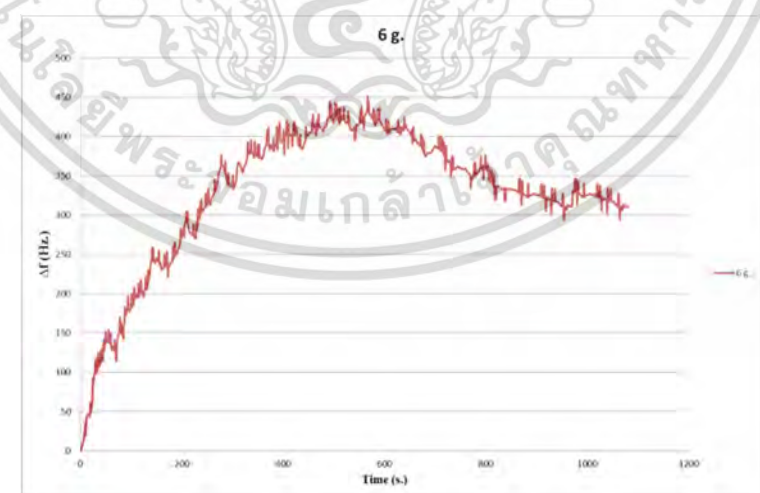
หลังจากการทดลองคุณสมบัติของฟิล์มในสองตอนที่ผ่านมานั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้ฟิล์มของ 18-crown-6 ether ที่มีความเข้มข้น 2×10^{-3} โมลาร์ ที่เคลือบสองครั้งเพราะมีช่วงเวลาที่ตอบสนองต่อTNTได้อย่างเหมาะสมและตรวจวัดโมเลกุลTNTได้ดีพอๆกับที่เคลือบสามครั้ง จึงมีความเหมาะสมในการใช้งานมากที่สุด โดยในการทดลองตอนนี้นั้นจะเป็นการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์โดยตรวจวันในสภาวะที่มีTNTที่ปริมาณต่างๆกันว่าเซนเซอร์นั้นสามารถตรวจวัดเจอไอระเหยของTNTที่ปริมาณแตกต่างกันหรือไม่โดยจะทำการตรวจวัดโดยใช้เซนเซอร์ตัวเดียวกัน และใช้ TNT ที่ปริมาณ 2 กรัม , 4 กรัม , 6 กรัม , 8 กรัม และ10 กรัม โดยผลการตรวจวัดที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 4.15



(a) กราฟแสดงการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรวจวัด TNT ที่ปริมาณ 2 กรัม



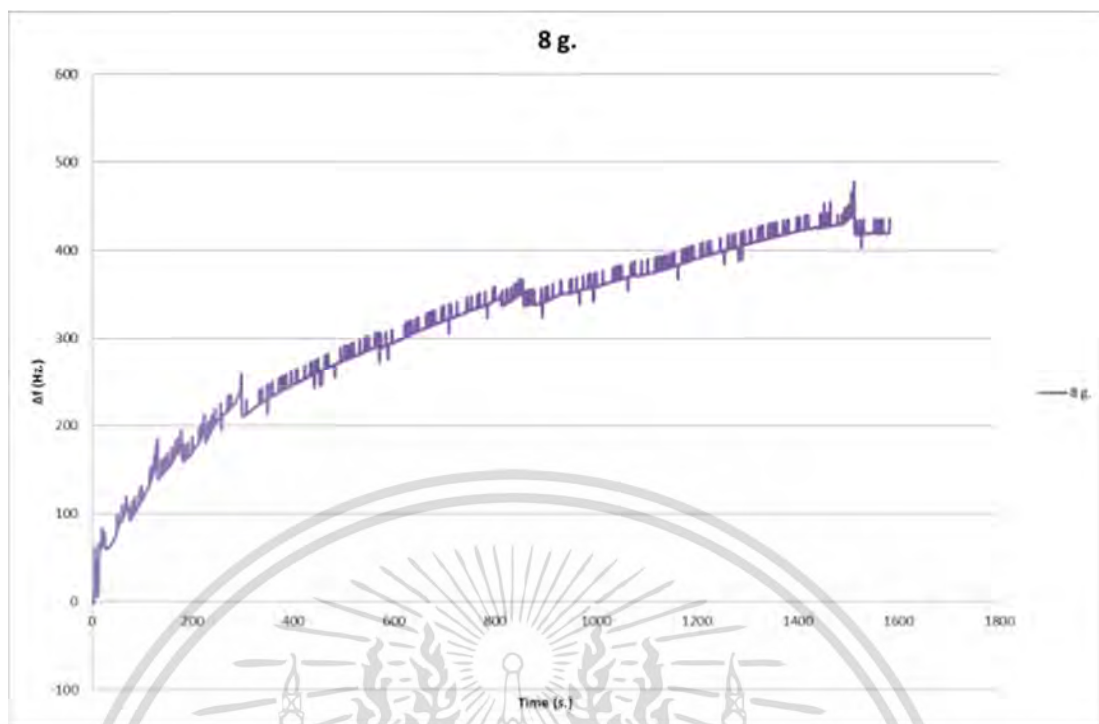
(b) กราฟแสดงการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรวจวัด TNT ที่ปริมาณ 4 กรัม



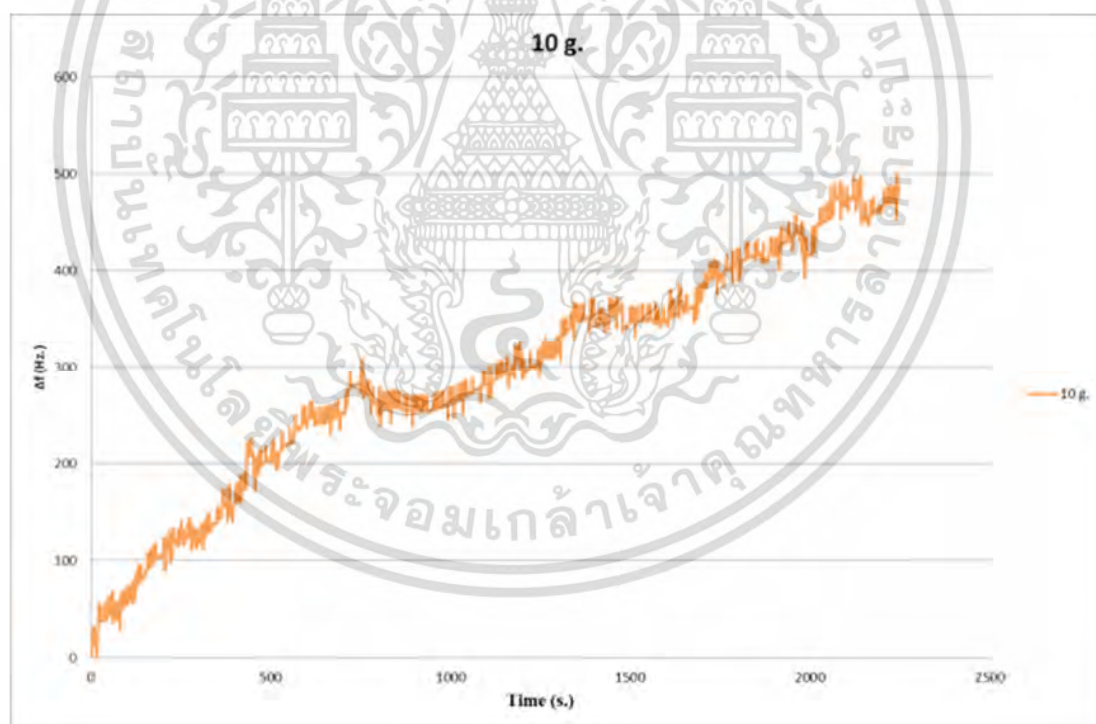
(c) กราฟแสดงการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรวจวัด TNT ที่ปริมาณ 6 กรัม

รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการตรวจวัด TNT ด้วย QCM เซนเซอร์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether ที่ปริมาณ TNT ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) กราฟแสดงการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรวจวัด TNT ที่ปริมาณ 8 กรัม



(e) กราฟแสดงการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ตรวจวัด TNT ที่ปริมาณ 10 กรัม

รูปที่ 4.15(ต่อ) กราฟแสดงการตรวจวัด TNT ด้วย QCM เซนเซอร์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของ 18-crown-6 ether ที่ปริมาณ TNT ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่4.1 แสดงถึงผลการทดลองตรวจวัดTNTที่ปริมาณต่าง

ปริมาณ TNT ที่อยู่ในแชมเบอร์	เวลาในการตรวจวัด (วินาที)	ผลต่างความถี่สูงสุด(ΔF) (Hz.)	ปริมาณไอระเหยของTNTที่คำนวณได้ (กรัม)	ปริมาณความเข้มข้นของไอระเหยTNTที่ผิวของQCM (PPM.)	ปริมาณความเข้มข้นของไอระเหยTNTภายในแชมเบอร์ (PPM.)
2กรัม	≈ 700	≈ 50	0.00000004	0.0031	160.41
4กรัม	≈ 900	≈ 400	0.00000034	0.0272	320.82
6กรัม	≈ 900	≈ 450	0.00000038	0.0304	481.23
8กรัม	≈ 1400	≈ 480	0.00000040	0.0321	641.64
10กรัม	≈ 2400	≈ 500	0.00000044	0.0354	802.05

จากตารางแสดงผลการทดลองตรวจวัดTNTที่ปริมาณต่างๆ เพื่อทดสอบว่าการตรวจวัด TNT ที่ปริมาณแตกต่างกันนั้นเซนเซอร์มีผลตอบสนองอย่างไรเพื่อหาแนวโน้มเพื่อพัฒนาเซนเซอร์และความเหมาะสมในการใช้งานจริงต่อไป โดยในการตรวจวัดที่ TNT ปริมาณ 2 กรัม จะพบว่าความถี่ที่เปลี่ยนไปจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการตรวจวัดเพิ่มขึ้นซึ่งหมายความว่าสามารถตรวจวัดได้แต่ความถี่ที่เปลี่ยนไปที่เพิ่มขึ้นนั้นมีค่าสูงสุดเพียง 50 Hz. ซึ่งหมายความว่าตรวจวัดเจอในปริมาณที่น้อยมากๆ โดยเมื่อนำค่าความถี่นี้มาคำนวณด้วยสมการของ Sauerbrey จะได้มวลที่เปลี่ยนแปลงไปเพียงแค่ประมาณ 0.00000004 กรัม เท่านั้นซึ่งน้อยมากๆ เนื่องจากQCMเป็นเซนเซอร์วัดมวลที่มีขนาดเล็กมากๆและมีความละเอียดสูงมากเมื่อปริมาณของTNT มีน้อยมากทำให้ไอระเหยที่เกิดขึ้นนั้นมีความหนาแน่นน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของแชมเบอร์และพื้นที่หน้าตัดของเซนเซอร์ รวมถึงปริมาณความเข้มข้นของฟิล์ม จึงทำให้ไม่สามารถตรวจเจอปริมาณจริงๆได้ทั้งหมด ในกรณีที่ตรวจวัดไอระเหยของ TNTที่ปริมาณ 4 กรัม 6 กรัม 8กรัม และ 10 กรัม ก็จะเป็นไปในลักษณะเดียวกันกล่าวคือเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นความถี่ที่เปลี่ยนไปก็จะเพิ่มขึ้นซึ่งเพิ่มขึ้นไปจนถึงจุดอิ่มตัว โดยความถี่ที่เปลี่ยนไปของการวัดTNTที่ปริมาณ 4 กรัมนี้ อยู่ที่ประมาณ 400 Hz. และใช้เวลาในการตรวจวัดประมาณ 900 วินาที ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ การตรวจวัด TNTที่ 2กรัมแล้วนั้นผลจะแตกต่างกันชัดเจน โดยจะสังเกตได้ว่าเซนเซอร์จะใช้เวลาในการถึงจุดอิ่มตัวนานขึ้นเมื่อปริมาณของมวลที่ตรวจวัดนั้นเพิ่มขึ้น ทำให้เห็นความถี่ที่เปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนขึ้นโดยเมื่อนำค่าความถี่นี้มาคำนวณด้วยสมการของ Sauerbrey จะได้มวลที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นถึง 0.00000034 กรัม และในการตรวจวัดที่ TNT ปริมาณ 6 กรัม ความถี่ที่

เปลี่ยนไปของการวัดTNTที่ปริมาณ 6กรัมนี้ อยู่ที่ประมาณ 450 Hz. และใช้เวลาในการตรวจวัดประมาณ 900 วินาที เช่นกัน โดยเมื่อนำค่าความถี่นี้มาคำนวณด้วยสมการของ Sauerbrey จะได้มวลที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 0.00000038 กรัมและในการตรวจวัดที่ TNT ปริมาณ 8 กรัม ความถี่ที่เปลี่ยนไปของการวัดTNTที่ปริมาณ 8กรัมนี้ อยู่ที่ประมาณ 480 Hz. และใช้เวลาในการตรวจวัดประมาณ 1,400 วินาที โดยเมื่อนำค่าความถี่นี้มาคำนวณด้วยสมการของ Sauerbrey จะได้มวลที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 0.00000040 กรัม และในการตรวจวัดที่ TNT ปริมาณ 10 กรัม ความถี่ที่เปลี่ยนไปสูงสุดของการวัดTNTที่ปริมาณ 10กรัมนี้ อยู่ที่ประมาณ 500 Hz. และใช้เวลาในการตรวจวัดประมาณ 2,400 วินาที โดยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเนื่องจากยังไม่ถึงจุดอิ่มตัวของเซนเซอร์ แต่ใช้เวลานานมากในการทดสอบ โดยเมื่อนำค่าความถี่นี้มาคำนวณด้วยสมการของ Sauerbrey จะได้มวลที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 0.00000044 กรัม โดยจากตารางที่4.1พบว่า ค่าปริมาณความเข้มข้นของไอระเหยที่เกิดขึ้นในแชมเบอร์ที่ปริมาณTNTต่างกันนั้นเพิ่มขึ้นเมื่อTNTมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งการวัดค่าปริมาณความเข้มข้นของไอระเหยที่เซนเซอร์สามารถวัดได้นั้นก็เป็นไปในลักษณะเดียวกันคือเมื่อปริมาณของTNTเพิ่มขึ้นก็จะตรวจเจอปริมาณความเข้มข้นของไอระเหยเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ด้วยควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์นั้นเป็นเซนเซอร์วัดมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในระดับไมโครจึงสามารถตรวจเจอปริมาณความเข้มข้นของไอระเหยได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ซึ่งจากผลการทดลองในตอนนี้อาจสรุปได้ว่า QCMเซนเซอร์ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether นี้ สามารถตรวจวัดไอระเหยของTNT ได้โดยความถี่ที่เปลี่ยนไปในการตรวจวัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณTNTเพิ่มขึ้นและเมื่อเวลาในการตรวจวัดเพิ่มขึ้น โดยความถี่ที่เพิ่มขึ้นนั้นสามารถนำมาคำนวณกลับเป็นปริมาณมวลของไอระเหยที่สะสมบนพื้นผิวรวมถึงปริมาณความเข้มข้นของไอระเหยที่เพิ่มขึ้นได้โดยลักษณะความสัมพันธ์ของปริมาณความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปกับปริมาณมวลที่ตกสะสมบนพื้นผิวนั้นเป็นไปตามทฤษฎีของQCMหรือตามสมการของ Sauerbrey นั่นเอง ซึ่งจากข้อสรุปนี้จึงสามารถพิสูจน์ได้ว่าการประยุกต์ใช้คริสตัลเพื่อเป็นเซนเซอร์วัดมวลที่เรียกว่า ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์นั้นสามารถใช้งานได้จริงในการตรวจวัดไอระเหยของ 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) ที่ปริมาณต่างๆกันได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองพบว่าระบบควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ฟิล์มของ 18-crown-6 ether มาเคลือบไปยังผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์เพื่อตรวจวัดไอระเหยของวัตถุระเบิดชนิด 2,4,6 trinitrotoluene (TNT) ที่ตกสะสมบนควอตซ์คริสตัลจากค่าความถี่ที่ใช้ในวงจรออสซิลเลเตอร์แบบ IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT ที่เชื่อมต่อกับเครื่องนับความถี่แบบดิจิทัลที่เก็บค่าความถี่ที่อ่านได้ทุกๆ 1 วินาทีซึ่งมาพร้อมกับซอฟต์แวร์ที่สามารถใช้ในการเก็บข้อมูลและแสดงการตรวจวัดได้แบบเรียลไทม์ (Real time) งานนี้นำข้อมูลที่เก็บได้มาประมวลผลผ่านคอมพิวเตอร์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เปลี่ยนไปกับเวลา

จากผลการทดลองที่ 3.2.1 และผลการทดลองที่ 4.1 ซึ่งทำการบันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT เมื่อใช้คริสตัลความถี่ 4, 8, 10 และ 11.0952 เมกกะเฮิร์ตซ์ของผู้ทดลอง พบว่า ลักษณะกราฟรวมถึงความถี่ที่ได้จากวงจรมีความเสถียรและมีประสิทธิภาพสามารถใช้ในการทดลองได้ดี จากนั้นได้ทดลองบันทึกค่าความถี่ของวงจร IC-COMPATIBLE CRYSTAL OSCILLATOR CIRCUIT ที่ใช้ความถี่ 10 เมกกะเฮิร์ตซ์ บันทึกค่าความถี่ทุกๆ 1 วินาที ด้วยโปรแกรม เมื่อบันทึกค่าความถี่กำหนดของควอตซ์คริสตัล พบว่า ความถี่กำหนดนี้สั้นในช่วงสั้นๆ แค่ 5 เฮิร์ตซ์ จึงสรุปได้ว่า วงจรที่ใช้มีเสถียรภาพทางความถี่ที่ดี จึงเหมาะแก่การนำมาออสซิลเลตสัญญาณให้กับเซนเซอร์

จากการทดลองที่ 3.2.2 และผลการทดลองที่ 4.2 การบันทึกค่าการตรวจวัดไอระเหยของการบูรเพื่อตรวจสอบว่าเซนเซอร์สามารถทำงานได้ตามหลักการของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ พบว่าเมื่อการบูรเกิดการระเหิดไปตกสะสมที่ผิวหน้าของควอตซ์คริสตัล เป็นผลให้ความถี่ของควอตซ์คริสตัลลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และเมื่อเปิดให้อากาศเข้าไปในแชมเบอร์ การบูรจะระเหิดออกจากผิวของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ทำให้ความถี่ของควอตซ์คริสตัลจะเพิ่มขึ้นและคงที่ในความถี่ค่าหนึ่งซึ่งเป็นไปตามหลักการของควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์

จากนั้นในการทดลองที่ 3.2.3 และ 3.2.4 เป็นขั้นตอนของการเตรียมเซนเซอร์ด้วยการเคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether เพื่อใช้ในการตรวจวัดไอระเหยของวัตถุระเบิดชนิด 2,4,6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

trinitrotoluene (TNT) ซึ่งผลการทดลองของการตรวจวัดกับ 2,4,6 trinitrotoluene (TNT) และการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มจะเป็นไปดังต่อไปนี้ โดยจากผลการทดลองที่ 4.3 จะเป็นการศึกษาเพื่อหาว่าควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มของ 18-crown-6 ether ที่ความเข้มข้นต่างๆ ว่ามีผลต่อการตรวจวัด 2,4,6 trinitrotoluene (TNT) หรือไม่ โดยจากผลการทดลองจะพบว่าเมื่อใช้ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ตรวจวัดในสภาวะที่เป็นอากาศ กับสภาวะที่มี TNT เจือปนทั้งคริสตัลในแบบที่เคลือบและไม่ได้เคลือบฟิล์มบาง จะพบว่าฟิล์มของ 18-crown-6 ether นั้นสามารถช่วยให้เซนเซอร์ตรวจวัดอย่างเฉพาะเจาะจงกับ 2,4,6 trinitrotoluene ได้ จากนั้นจะเป็นการทดสอบเซนเซอร์ที่เคลือบฟิล์มของ 18-crown-6 ether ที่ความเข้มข้นต่างๆ จะพบว่าที่ความเข้มข้นมากขึ้นทำให้เซนเซอร์จับไอระเหยของ TNT ได้มากขึ้น และเวลาที่ใช้ในการตรวจวัดจนกว่าเซนเซอร์จะถึงจุดอิ่มตัวมากขึ้น จึงสรุปได้ว่าเซนเซอร์ที่เคลือบฟิล์มที่มีความเข้มข้นสูงทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงไปจะมากขึ้นและเวลาที่ใช้ในการตรวจวัดก็จะมากขึ้นตาม ซึ่งจากข้อสรุปนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ฟิล์มที่มีความเข้มข้นที่ 2×10^{-3} โมลาร์ มาใช้งานต่อไปเนื่องจากมีย่านการตรวจวัดได้ดีในช่วงเวลาที่เหมาะสม

จากนั้นในการทดลองตอนที่ 3.2.5 จะทดสอบถึงความหนาและความเรียบของฟิล์มว่ามีผลต่อเซนเซอร์และการตรวจจับกับไอระเหยของ 2,4,6 trinitrotoluene หรือไม่ โดยจากผลการทดลองที่ 4.4 จะพบว่าฟิล์มที่มีความเรียบและความหนามากกว่าสามารถทำให้ตรวจวัดไอระเหยของ TNT ได้มากกว่าและใช้เวลาในการถึงจุดอิ่มตัวมากกว่า เนื่องจากฟิล์มสามารถเกิดพันธะกับ TNT ได้มากกว่า กล่าวง่าย ๆ คือสามารถตรวจวัด TNT เจือในปริมาณที่มากกว่านั่นเอง

จากนั้นในการทดลองที่ 3.2.6 จะเป็นการตรวจวัด TNT ที่ปริมาณต่างๆ กันโดยใช้เซนเซอร์ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน โดยจากผลการทดลองที่ 4.5 จะพบว่าเมื่อปริมาณของ TNT เพิ่มขึ้น ความถี่ที่เปลี่ยนไปของเซนเซอร์ก็จะเพิ่มขึ้นและเวลาที่ตรวจวัดก็จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณไอระเหยของ TNT ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นนั่นเอง

ซึ่งจากข้อสรุปเหล่านี้จึงสามารถพิสูจน์ได้ว่าการประยุกต์ใช้คริสตัลเพื่อเป็นเซนเซอร์วัดมวลในระดับไมโครที่เรียกว่าควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์นั้นสามารถใช้ในการตรวจวัดไอระเหยของ 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) ได้นั่นเอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรทำการทดลองเพิ่มเติมเกี่ยวกับการตรวจวัดสารตั้งต้นวัดถูระเบิดชนิดอื่นก่อนพัฒนาไปเป็นระบบตรวจวัดที่จะใช้จริงต่อไป
- ควรทำการทดลองเพิ่มเติมในระบบเปิดเพิ่มเติม
- เนื่องจากควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์เป็นเซนเซอร์ที่มีความไวสูงมากๆจึงทำให้เกิดสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้ง่าย ควรหาวิธีป้องกันเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น
- ควรทดลองตรวจวัดเพิ่มในสถานะอื่นๆที่ไม่ใช่แก๊ส เช่น ในของเหลว เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Quartz Crystal Cut [Online]
<http://www.radio-electronics.com/info/data/crystals/quartz-crystal-cuts-at-sc-ct.php>
- [2] J. Janata, “Principles of Chemical Sensors Second Edition”, Springer Science+Business Media, LLC 2009
- [3] Rudolf F. Graf, “ **Oscillator circuits**” Published 1996 by Newnes in Boston, Mass. Written in English
- [4] โรงเรียนนาวิกโยธินทหารเรือ, “วิชาทหารช่าง หลักสูตรชั้นนายเรืออาวุโส นย.” , 2009
- [5] 18-crown-6ether[Online]
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/18-Crown-6>
- [6] TNT[Online] <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Trinitrotoluene#section=Top>
- [7] วัสดุเพียโซอิเล็กทริก [Online] <http://phchitchai.wbvschool.net/page/7>
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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
- [11] Khaoula Tbarki, Salma Ben Said, Nourredine Ellouze,” Non-linear filtering for landmine detection on ground penetration radar data,” Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), 2016 ,pp. 200 – 205

- [12] Sanjeevareddy Kolkoori, Norma Wrobel, Uwe Ewert, "A new X-ray backscatter technology for aviation security applications," Technologies for Homeland Security (HST), 2015 IEEE International Symposium on, pp. 1 - 5
- [13] Mika Harbeck, Dilek D. Erbahar, Ilke Gürol, Emel Musluoğlu, "Chemical Sensing of Explosives in Water," Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2010
- [14] S. Kurosawa ; Dae-Sang Han ; Jong-Won Park ; H. Aizawa ; M. Yoshimoto ; C. Nakamura ; J. Miyake ; Sang-Mok Chang, "Gas sensor using high-frequency quartz crystal microbalance," Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, 2001. Proceedings of the 2001 IEEE International, 2001 , pp.462-464
- [15] M. Guillemot, F. Dayber, P. Montméat*, C. Barthet, P. Prené, "Detection of explosives vapours on quartz crystal microbalances: generation of very low-concentrated vapours for sensors calibration ," Procedia Chemistry Volume 1, Issue 1, September 2009, pp. 967-970
- [16] M. Guillemot, F. Dayber, P. Montméat*, C. Barthet, P. Prené, "Detection of explosives vapours using a multi-quartz crystal microbalance system," Procedia Chemistry Volume 5, 2010, pp. 472-475
- [17] R. Rousiera*, S. Bouata, T. Bordya, H. Grateaua, M. Darbouxa, J Huea, G. Gaillardb, S. Besnardb, F. Veignalb, P. Montméatb, G. Lebrunc, A. Laruec, "T-REX: a portable device to detect and identify explosives vapors," Procedia Engineering 47 (2012) 390 – 393
- [18] E. Bentes, H.L.Gomes, P.Stallinga and L. Moura, "Detection of explosive vapors using organic thin-film transistors," SENSORS, 2004
- [19] Edison B. Gibelli a, Jiang Kai b,c, Ercules E.S. Teotonio d, Oscar L. Malta e, Maria C.F.C. Felinto a, Hermi F. Brito b, "Photoluminescent PMMA polymer films doped with Eu³⁺--diketonate crownether complex," Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 251 , 2013, pp. 154–159

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

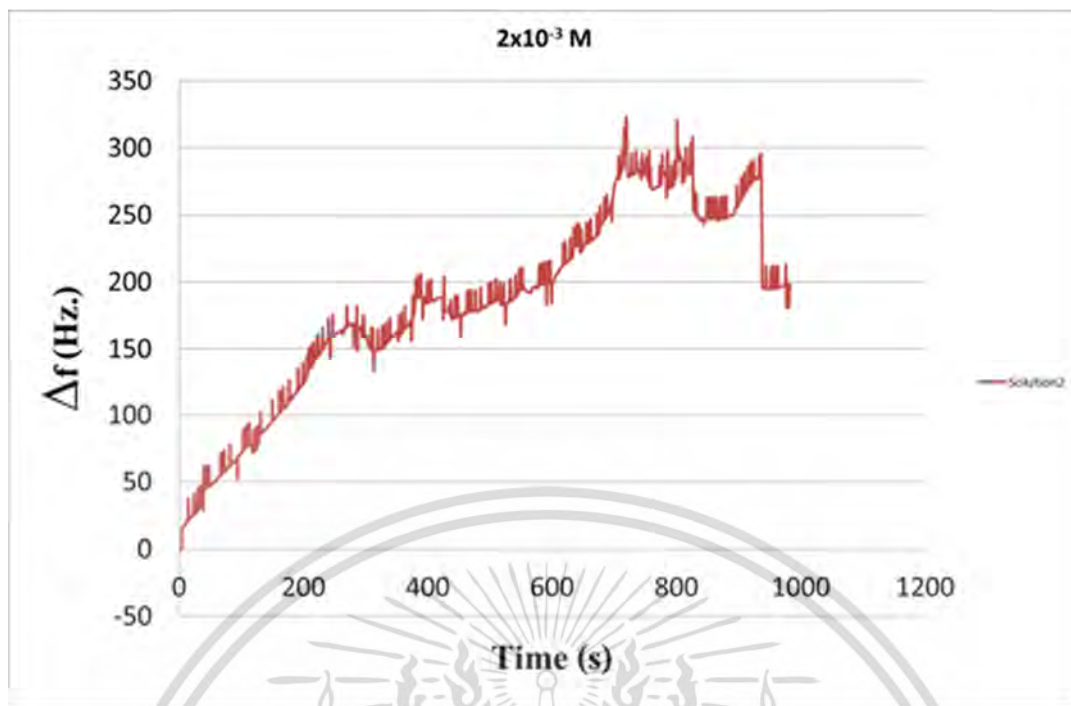
ตัวอย่างผลการทดลองตรวจวัดไอระเหยวัดถูระเบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

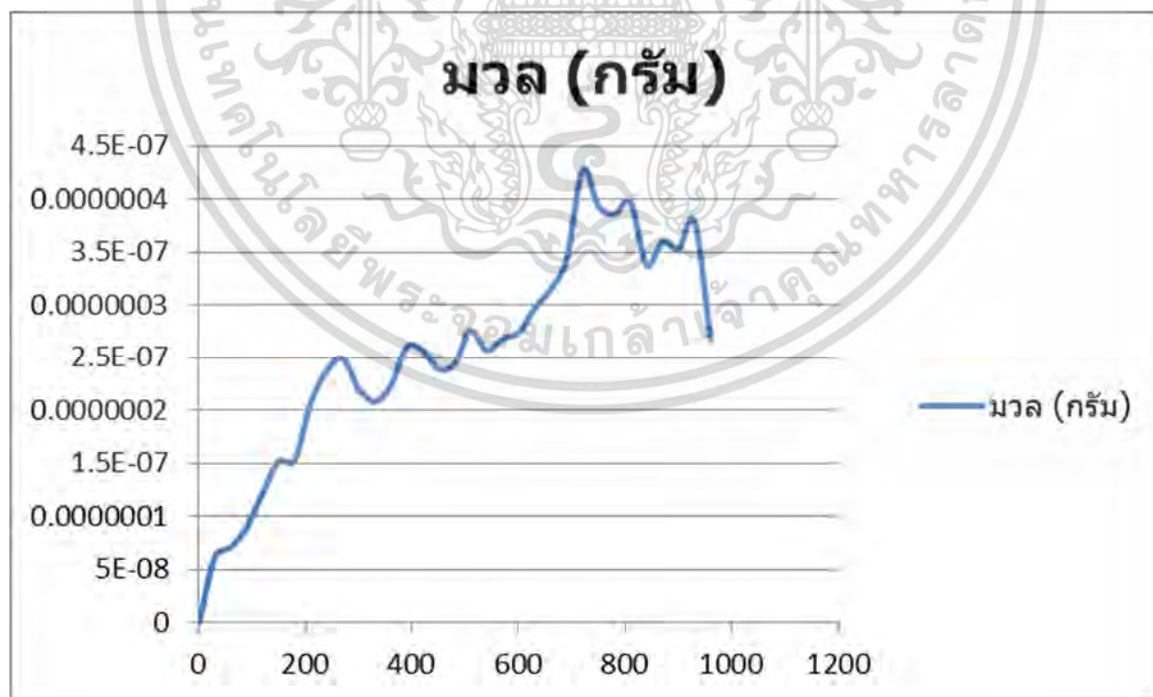
เวลา(วินาที)	ผลต่างความถี่ (Hz.)	มวล (กรัม)
1	0	0.000000000
30	45	0.000000062
60	52	0.000000071
90	66	0.000000090
120	89	0.000000122
150	111	0.000000152
180	112	0.000000153
210	151	0.000000207
240	173	0.000000237
270	182	0.000000249
300	159	0.000000218
301	160	0.000000219
330	152	0.000000208
360	163	0.000000223
390	190	0.000000260
420	188	0.000000257
450	175	0.000000239
480	178	0.000000244
510	202	0.000000276
540	188	0.000000257
570	196	0.000000268
600	200	0.000000274
630	217	0.000000297
660	230	0.000000315
690	251	0.000000343
720	312	0.000000427
750	287	0.000000393
780	282	0.000000386
810	290	0.000000397
840	247	0.000000338
870	263	0.000000360
900	258	0.000000353
930	277	0.000000379
960	196	0.000000268

ตารางแสดงค่าความถี่ที่เปลี่ยนไป(Δf)และมวลที่ตกสะสมบนQCMที่เคลือบด้วย18-Crown-6 ether ที่ความเข้มข้น 2×10^{-3} ในสถานะที่มี TNT เจือปน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟแสดงค่าความถี่ที่เปลี่ยนไป(Δf)ของQCMที่เคลือบด้วย18-Crown-6 ether ที่ความเข้มข้น 2×10^{-3} ในสถานะที่มี TNT เจือปน



กราฟแสดงมวลที่เปลี่ยนไป(Δm)ของQCMที่เคลือบด้วย18-Crown-6 ether ที่ความเข้มข้น 2×10^{-3} ในสถานะที่มี TNT เจือปน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีคำนวณความเข้มข้นของสารละลาย

วิธีการเตรียมสารละลาย 18-crown-6 ether ที่ความเข้มข้น 10^{-3} โมลาร์

จากสูตร
$$\text{โมลาร์} = \frac{\text{น้ำหนักของสาร (กรัม)}}{\text{สารละลาย 1 ลิตร}}$$

ถ้าต้องการเตรียมสารละลาย 18-crown-6 ether ที่ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ จำนวน 100 mL สามารถคำนวณได้จาก (M.W. ของ 18-crown-6 ether = 264.31 g/mol)

วิธีคำนวณ

$$\text{โมล} = \frac{\text{น้ำหนักของสาร (กรัม)}}{\text{มวลโมเลกุล}}$$

$$0.001 \text{ mol} = \frac{\text{น้ำหนักของสาร (กรัม)}}{264.31 \text{ g/mol}}$$

∴ น้ำหนักของสาร 18-crown-6 ether = 0.2643 กรัม

ถ้าหากต้องการเตรียมสารละลาย 1000 mL ต้องชั่งสาร 18-crown-6 ether 0.2643 กรัม แต่หากต้องการเตรียมสารละลาย 100 mL จะต้องเตรียมชั่งสารโดยคำนวณจาก

$$\text{น้ำหนักของ 18-crown-6 ether} = \frac{0.2643 \times 100}{1000} = 0.02643 \text{ กรัม}$$

เพราะฉะนั้น ถ้าต้องการเตรียมสารละลายที่ปริมาณ 100 mL จะต้องชั่งสาร 18-crown-6 ether 0.02643 กรัม

วิธีคำนวณความเปลี่ยนแปลงของความถี่เปลี่ยนเป็นมวล

วิธีคำนวณความเปลี่ยนแปลงของความถี่เปลี่ยนเป็นมวลคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงของมวล Δm (g) เนื่องจากการดูดซึ่มและการปล่อยโมเลกุลบนพื้นผิว และความถี่ที่เปลี่ยนไป Δf (Hz) จะเปลี่ยนตามสมการ Sauerbrey's ที่ว่า.

$$\Delta f = 2.26 \times 10^{-6} f_0^2 \frac{\Delta m}{A}$$

เมื่อ Δf = ความถี่ที่เปลี่ยนไป (Hz) f_0 = ความถี่พื้นฐานหรือความถี่เริ่มต้น (Hz)

Δm = มวลที่เปลี่ยนไป (g) A = พื้นที่ผิวหน้าของคริสตัล (0.1963 cm^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีคำนวณเบื้องต้นสำหรับการเปลี่ยนหน่วยPPM.สำหรับมลพิษทางอากาศ

ค่า PPM คือหนึ่งในล้านส่วน เป็นการเปรียบเทียบในหน่วยวัดเดียวกัน เช่น มวลต่อมวล mg/kg หรือ ปริมาตรต่อปริมาตร m^3/m^3 ซึ่งในกรณีในงานวิจัยฉบับนี้ เบื้องต้นจะทราบแค่ปริมาณสารต่อหนึ่งหน่วย ปริมาตร คือในแชมเบอร์ปิดขนาด 1.1 m^3 เราบรรจุสารTNTปริมาณ 2กรัม, 4กรัม, 6กรัม, 8กรัม และ 10กรัม ซึ่งในการรายงานผลเป็นหน่วยPPM.ในกรณีการตรวจวัดสำหรับมลพิษทางอากาศจะต้องมีการเปลี่ยนหน่วย เป็น mg/m^3 เพื่อนำไปคำนวณปริมาณการปลดปล่อยมลพิษต่อไปโดยสูตรหรือสมการที่ใช้ในการเปลี่ยนหน่วย เป็นดังต่อไปนี้

$$C_{\text{mg}/\text{m}^3} = \text{PPM} \times \frac{MW.}{24.45}$$

โดย ค่า MW. ของTNT = 277.13 กรัม/โมล

และค่า C_{mg/m^3} คือค่าความเข้มข้นของสารมลพิษจะคำนวณอย่างง่ายจากการเทียบบัญญัติไตรยางค์ ตัวอย่างเช่นที่แชมเบอร์ปิดขนาด 1.1 m^3 มีTNTอยู่ 2 กรัม แล้วถ้าแชมเบอร์ปิดขนาด 1 m^3 จะมีTNTอยู่เท่าใด

วิธีคิดคือ

ที่ปริมาตร 1.1 m^3 มี TNT อยู่ 2 กรัม

$$\therefore \text{ที่ปริมาตร } 1 \text{ m}^3 \text{ จะมี TNT} = \frac{2 \times 1}{1.1} = 1.818 \text{ กรัม}$$

จึงสามารถสรุปได้ว่าที่ปริมาตร 1 m^3 จะมี TNTอยู่ 1.818 กรัม หรือมีค่าความเข้มข้นของสารมลพิษอยู่ที่ 1,818 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร จากนั้นนำมาคำนวณ หาค่า PPM จะได้ว่า

$$1,818 = \text{PPM} \times \frac{277.13}{24.45}$$

$$\text{PPM} = 160.41 \text{ PPM}$$

จึงสามารถสรุปได้ว่าการตรวจวัดTNTปริมาณ 2 กรัม ปริมาณความเข้มข้นของไอระเหยTNTภายในแชมเบอร์จะอยู่ที่ 160.41 PPM. นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



QUARTZ CRYSTAL UNIT

Product Brief Introduction

SERIES: HC49U

Application:

Radio communication, Audio-visual equipment, Office automation equipment, Consumer product

Specification

Frequency range	See table 1
Vibration mode	AT cut: fundamental, Third
Frequency tolerance at 25 °C	±10, ±15, ±20, ±30, ±50 ppm
Operating temperature range and frequency stability	See Table 2
Equivalent series resistance	See Table 1
Shunt capacitance	7.0pF max or special
Measure instrument	S&A 250B PI system
Load capacitance	Series, 16, 20, 30pF or special
Drive level	10,100, 300, 500uW or special
Insulation resistance	500 M Ω min/DC 100V
Aging	±1, 3, 5ppm/ year
Storage temperature range	-40 ~ +85 °C

Table 1/ Frequency range & Equivalent Series resistance

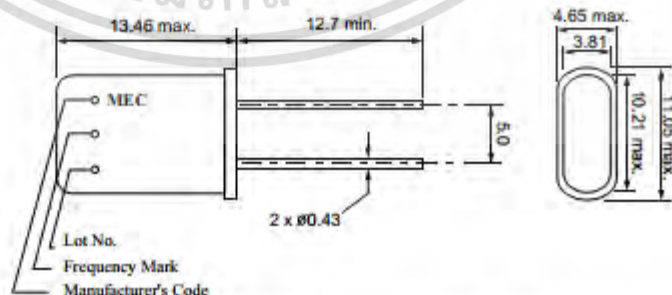
Frequency (MHz)	Vibration mode	HC-49U(Ω)	HC-49T(Ω)	HC-50U(Ω)	HC-50T(Ω)
1.8~1.99	Fundamental /F	700		700	
2.0~2.99	Fundamental /F	500	600	500	600
3.0~3.19	Fundamental /F	300	400	300	400
3.2~3.99	Fundamental /F	150	200	150	200
4.0~4.49	Fundamental /F	90	150	90	150
4.5~4.99	Fundamental /F	70	80	70	80
5.0~6.99	Fundamental /F	50	60	50	60
7.0~9.99	Fundamental /F	35	40	35	40
10.0~30.0	Fundamental /F	25	25	25	25
20.0~24.99	Third/ O3	45	50	45	50
25.0~90.0	Third/ O3	40	40	40	40
90.1~160.0	Third/ O3	70	70	70	70

Table 2/ Operating temperature range and frequency stability

TEMP	±3	±5	±7.5	±10	±15	±20	±30	±50
0→+50 °C	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆
-10→+60 °C	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆
-20→+70 °C		☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆
-30→+80 °C			☆	☆	☆	☆	☆	☆
-40→+90 °C				☆	☆	☆	☆	☆

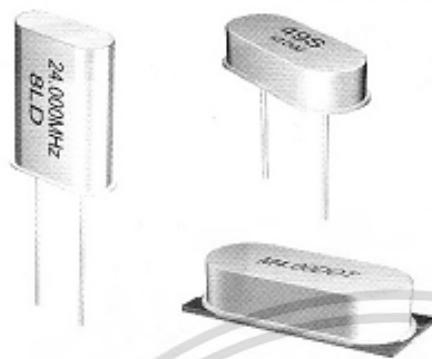
The mark " ☆ " denotes our achieved level

DIMENSIONS (mm)

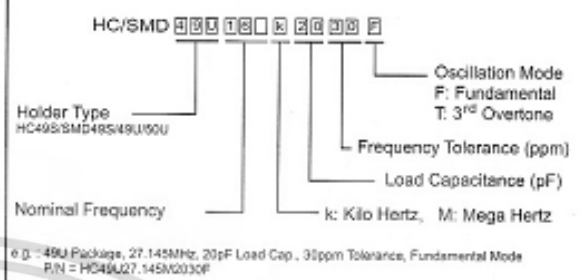
Mobicon Holdings Limited Tel: (852) 2397 6628 Fax: (852) 2397 8187 <http://www.mobicon.com> E-mail: info@mobicon.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

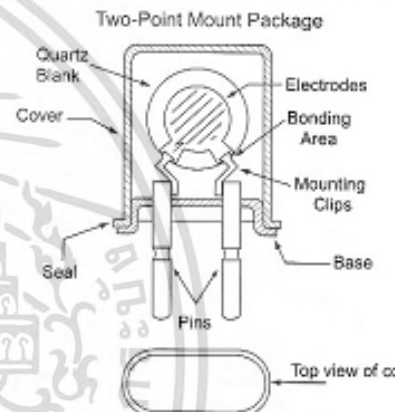
CRYSTAL UNITS HC-49S, SMD49S, HC-49U & HC-50U



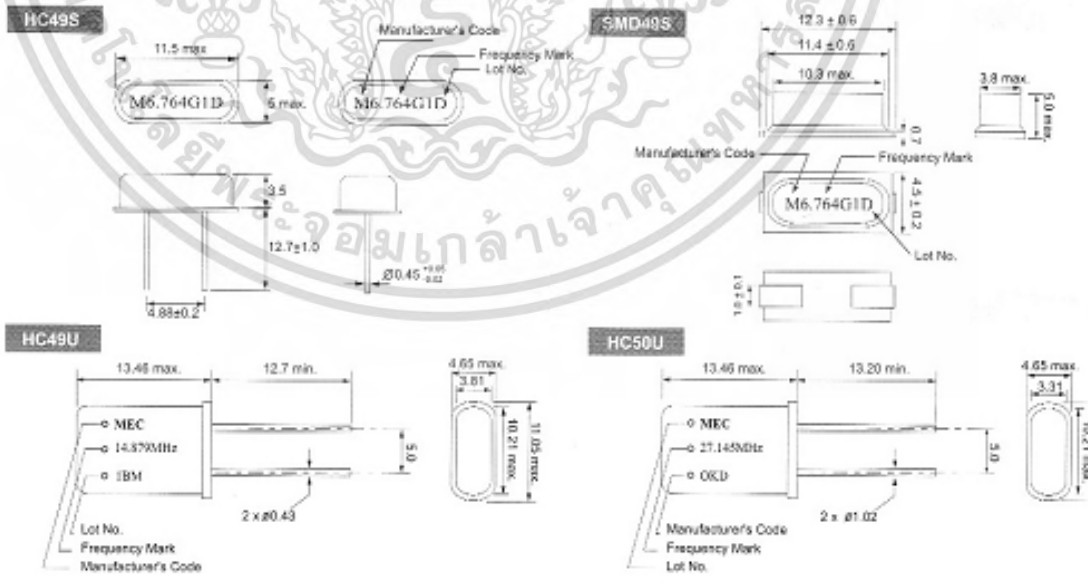
PART NUMBERING SYSTEM



Model	HC-49S, SMD49S, 49U & 50U
Nominal Frequency	3.50MHz - 56.45MHz
Frequency Tolerance	-10, 20, 25, 30, 50ppm
ESR	25-150Ω
Insulation Resistance	500MΩ at 100Vdc
Shunt Capacitance	5.7pF ± 0.3pF
Loading Capacitance	7, 16, 18, 20, 22, 30, 32pF
Drive Level	100, 300, 500µW
Temperature Tolerance	±2, 25, 30, 50, 100ppm
Operation Temperature	-20-70°C
Storage Temperature	-20-80°C
Aging	±3, 5 ppm/year
Oscillation Mode	Fundamental/ 3 rd Overtone



OUTLINE DRAWING & DIMENSIONS (mm)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SN5400, SN54LS00, SN54S00
SN7400, SN74LS00, SN74S00

SDLS025D—DECEMBER 1983—REVISED MAY 2017

SNx400, SNx4LS00, and SNx4S00 Quadruple 2-Input Positive-NAND Gates

1 Features

- Package Options Include:
 - Plastic Small-Outline (D, NS, PS)
 - Shrink Small-Outline (DB)
 - Ceramic Flat (W)
 - Ceramic Chip Carriers (FK)
 - Standard Plastic (N)
 - Ceramic (J)
- Also Available as Dual 2-Input Positive-NAND Gate in Small-Outline (PS) Package
- Inputs Are TTL Compliant, $V_{IH} = 2\text{ V}$ and $V_{IL} = 0.8\text{ V}$
- Inputs Can Accept 3.3-V or 2.5-V Logic Inputs
- SN5400, SN54LS00, and SN54S00 are Characterized For Operation Over the Full Military Temperature Range of -55°C to 125°C

2 Applications

- AV Receivers
- Portable Audio Docks
- Blu-Ray Players
- Home Theater
- MP3 Players or Recorders
- Personal Digital Assistants (PDAs)

3 Description

The SNx4xx00 devices contain four independent, 2-input NAND gates. The devices perform the Boolean function $Y = A \cdot B$ or $Y = A + B$ in positive logic.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
SN74LS00DB	SSOP (14)	6.20 mm × 5.30 mm
SN7400D, SN74LS00D, SN74S00D	SOIC (14)	8.65 mm × 3.91 mm
SN74LS00NSR	PDIP (14)	19.30 × 6.35 mm
SNJ5400J, SNJ54LS00J, SNJ54S00J	CDIP (14)	19.56 mm × 6.67 mm
SNJ5400W, SNJ54LS00W, SNJ54S00W	CFP (14)	9.21 mm × 5.97 mm
SN54LS00FK, SN54S00FK	LCCC (20)	8.89 mm × 8.89 mm
SN7400NS, SN74LS00NS, SN74S00NS	SO (14)	10.30 mm × 5.30 mm
SN7400PS, SN74LS00PS	SO (8)	6.20 mm × 5.30 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

Logic Diagram, Each Gate (Positive Logic)



▲ An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table of Contents

1 Features	1	8.1 Overview	10
2 Applications	1	8.2 Functional Block Diagram	10
3 Description	1	8.3 Feature Description	10
4 Revision History	2	8.4 Device Functional Modes	10
5 Pin Configuration and Functions	3	9 Application and Implementation	11
6 Specifications	4	9.1 Application Information	11
6.1 Absolute Maximum Ratings	4	9.2 Typical Application	11
6.2 ESD Ratings: SN74LS00	4	10 Power Supply Recommendations	12
6.3 Recommended Operating Conditions	4	11 Layout	13
6.4 Thermal Information	6	11.1 Layout Guidelines	13
6.5 Electrical Characteristics: SNx400	6	11.2 Layout Example	13
6.6 Electrical Characteristics: SNx4LS00	6	12 Device and Documentation Support	14
6.7 Electrical Characteristics: SNx4S00	6	12.1 Documentation Support	14
6.8 Switching Characteristics: SNx400	7	12.2 Related Links	14
6.9 Switching Characteristics: SNx4LS00	7	12.3 Receiving Notification of Documentation Updates	14
6.10 Switching Characteristics: SNx4S00	7	12.4 Community Resources	14
6.11 Typical Characteristics	8	12.5 Trademarks	14
7 Parameter Measurement Information	9	12.6 Electrostatic Discharge Caution	14
7.1 Propagation Delays, Setup and Hold Times, and Pulse Width	9	12.7 Glossary	14
8 Detailed Description	10	13 Mechanical, Packaging, and Orderable Information	15

4 Revision History

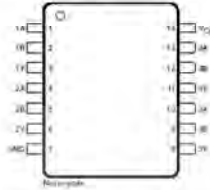
NOTE: Page numbers for previous revisions may differ from page numbers in the current version.

Changes from Revision C (November 2016) to Revision D	Page
• Changed <i>Typical Application Diagram</i> see <i>Application and Implementation</i> section	1
Changes from Revision B (October 2003) to Revision C	Page
• Added <i>ESD Ratings</i> table, <i>Feature Description</i> section, <i>Device Functional Modes</i> , <i>Application and Implementation</i> , <i>Power Supply Recommendations</i> section, <i>Layout</i> section, <i>Device and Documentation Support</i> section, and <i>Mechanical, Packaging, and Orderable Information</i> section	1
• Changed <i>Ordering Information</i> table to <i>Device Comparison Table</i> ; see <i>Package Option Addendum</i> at the end of the data sheet	1
• Changed Package thermal impedance, $R_{\theta JA}$, values in <i>Thermal Information</i> table From: 86°C/W To: 90.9°C/W (D), From: 96°C/W To: 102.8°C/W (DB), From: 80°C/W To: 54.8°C/W (N), and From: 76°C/W To: 89.7°C/W (NS)	6

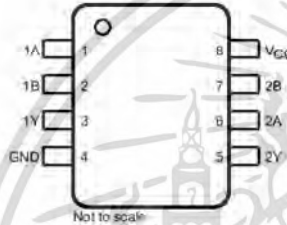
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5 Pin Configuration and Functions

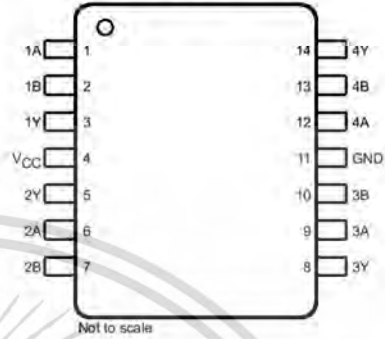
SN5400 J, SN54xx00 J and W, SN74x00 D, N, and NS, or
SN74LS00 D, DB, N, and NS Packages
14-Pin CDIP, CFP, SOIC, PDIP, SO, or SSOP
Top View



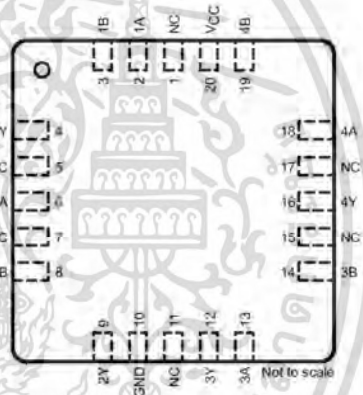
SN5400 W Package
14-Pin CFP
Top View



SN74xx00 PS Package
18-Pin SO
Top View



SN54xx00 FK Package
20-Pin LCCC
Top View



Pin Functions

NAME	PIN				I/O	DESCRIPTION
	CDIP, CFP, SOIC, PDIP, SO, SSOP	SO (SN74xx00)	CFP (SN5400)	LCCC		
1A	1	1	1	2	I	Gate 1 input
1B	2	2	2	3	I	Gate 1 input
1Y	3	3	3	4	O	Gate 1 output
2A	4	6	6	5	I	Gate 2 input
2B	5	7	7	8	I	Gate 2 input
2Y	6	5	5	9	O	Gate 2 output
3A	10	—	9	13	I	Gate 3 input
3B	9	—	10	14	I	Gate 3 input

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SN5400, SN54LS00, SN54S00
SN7400, SN74LS00, SN74S00



SDLS025D – DECEMBER 1983 – REVISED MAY 2017

www.ti.com

Pin Functions (continued)

NAME	PIN				I/O	DESCRIPTION
	CDIP, CFP, SOIC, PDIP, SO, SSOP	SO (SN74xx00)	CFP (SN5400)	LCCC		
3Y	8	—	8	12	O	Gate 3 output
4A	13	—	12	18	I	Gate 4 input
4B	12	—	13	19	I	Gate 4 input
4Y	11	—	14	16	O	Gate 4 output
GND	7	4	11	10	—	Ground
NC	—	—	—	1, 5, 7, 11, 15, 17	—	No connect
V _{CC}	14	8	4	20	—	Power supply

6 Specifications

6.1 Absolute Maximum Ratings

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)⁽¹⁾

	MIN	MAX	UNIT
Supply voltage, V _{CC} ⁽²⁾		7	V
Input voltage	SNx400 and SNxS400		5.5
	SNx4LS00		7
Junction temperature, T _J		150	°C
Storage temperature, T _{stg}	–65	150	°C

- Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, which do not imply functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions*. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.
- Voltage values are with respect to network ground terminal.

6.2 ESD Ratings: SN74LS00

V _(ESD)	Electrostatic discharge	Human-body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 ⁽¹⁾	VALUE	UNIT
		Charged-device model (CDM), per JEDEC specification JESD22-C101 ⁽²⁾	±500	V
			±2000	

- JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process. Manufacturing with less than 500-V HBM is possible with the necessary precautions.
- JEDEC document JEP157 states that 250-V CDM allows safe manufacturing with a standard ESD control process. Manufacturing with less than 250-V CDM is possible with the necessary precautions. Pins listed as ±2000 V may actually have higher performance. ESD Tested on SN74LS00N package.

6.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

		MIN	NOM	MAX	UNIT
V _{CC}	Supply voltage	SN54xx00		4.5	5
		SN74xx00		4.75	5
V _{IH}	High-level input voltage	2			V
V _{IL}	Low-level input voltage	SNx400, SN7LS400, and SNx4S00		0.8	
		SN54LS00		0.7	
I _{OH}	High-level output current	SN5400, SN54LS00, and SN74LS00		–0.4	
		SNx4S00		–1	
I _{OL}	Low-level output current	SNx400		16	
		SN5LS400		4	
		SN7LS400		8	
		SNx4S00		20	

4 Submit Documentation Feedback

Copyright © 1983–2017, Texas Instruments Incorporated

Product Folder Links: [SN5400](#) [SN54LS00](#) [SN54S00](#) [SN7400](#) [SN74LS00](#) [SN74S00](#)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SN5400, SN54LS00, SN54S00
SN7400, SN74LS00, SN74S00

www.ti.com

SDLS025D – DECEMBER 1983 – REVISED MAY 2017

Recommended Operating Conditions (continued)

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

		MIN	NOM	MAX	UNIT
T _A	Operating free-air temperature	SN54xx00		125	°C
		SN74xx00	-55	70	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SN5400, SN54LS00, SN54S00
SN7400, SN74LS00, SN74S00



SDLS025D – DECEMBER 1983 – REVISED MAY 2017

www.ti.com

6.4 Thermal Information

THERMAL METRIC ⁽¹⁾⁽²⁾	SN74LS00				UNIT
	D (SOIC)	DB (SSOP)	N (PDIP)	NS (SO)	
	14 PINS	14 PINS	14 PINS	14 PINS	
$R_{\theta JA}$ Junction-to-ambient thermal resistance	90.9	102.8	54.8	89.7	°C/W
$R_{\theta JC(top)}$ Junction-to-case (top) thermal resistance	51.9	53.3	42.1	48.1	°C/W
$R_{\theta JB}$ Junction-to-board thermal resistance	48	53.4	34.8	50.1	°C/W
V_{JT} Junction-to-top characterization parameter	18.6	16.5	26.9	16.7	°C/W
V_{JB} Junction-to-board characterization parameter	47.8	52.9	34.7	49.8	°C/W

- (1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the *Semiconductor and IC Package Thermal Metrics* application report.
- (2) The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51-7.

6.5 Electrical Characteristics: SNx400

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
V_{IK}	$V_{CC} = \text{MIN}$ and $I_I = -12 \text{ mA}$			-1.5	V
V_{OH}	$V_{CC} = \text{MIN}$, $V_{IL} = 0.8 \text{ V}$, and $I_{OH} = -0.4 \text{ mA}$	2.4	3.4		V
V_{OL}	$V_{CC} = \text{MIN}$, $V_{IH} = 2 \text{ V}$, and $I_{OL} = 16 \text{ mA}$		0.2	0.4	V
I_I	$V_{CC} = \text{MAX}$ and $V_I = 5.5 \text{ V}$			1	mA
I_{IH}	$V_{CC} = \text{MAX}$ and $V_I = 2.4 \text{ V}$			40	μA
I_{IL}	$V_{CC} = \text{MAX}$ and $V_I = 0.4 \text{ V}$			-1.6	mA
I_{OS}	$V_{CC} = \text{MAX}$	SN5400 SN7400		-20 -55	mA
I_{CCH}	$V_{CC} = \text{MAX}$ and $V_I = 0 \text{ V}$		4	8	mA
I_{CCL}	$V_{CC} = \text{MAX}$ and $V_I = 4.5 \text{ V}$		12	22	mA

6.6 Electrical Characteristics: SNx4LS00

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
V_{IK}	$V_{CC} = \text{MIN}$ and $I_I = -18 \text{ mA}$			-1.5	V
V_{OH}	$V_{CC} = \text{MIN}$, $V_{IL} = \text{MAX}$, and $I_{OH} = -0.4 \text{ mA}$	2.5	3.4		V
V_{OL}	$V_{CC} = \text{MIN}$ and $V_{IH} = 2 \text{ V}$		0.25	0.4	V
	$I_{OL} = 4 \text{ mA}$		0.35	0.5	
	$I_{OL} = 8 \text{ mA}$ (SN74LS00)				
I_I	$V_{CC} = \text{MAX}$ and $V_I = 7 \text{ V}$			0.1	mA
I_{IH}	$V_{CC} = \text{MAX}$ and $V_I = 2.7 \text{ V}$			20	μA
I_{IL}	$V_{CC} = \text{MAX}$ and $V_I = 0.4 \text{ V}$			-0.4	mA
I_{OS}	$V_{CC} = \text{MAX}$			-20	mA
I_{CCH}	$V_{CC} = \text{MAX}$ and $V_I = 0 \text{ V}$		0.8	1.6	mA
I_{CCL}	$V_{CC} = \text{MAX}$ and $V_I = 4.5 \text{ V}$		2.4	4.4	mA

6.7 Electrical Characteristics: SNx4S00

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
V_{IK}	$V_{CC} = \text{MIN}$ and $I_I = -18 \text{ mA}$			-1.2	V
V_{OH}	$V_{CC} = \text{MIN}$, $V_{IL} = 0.8 \text{ V}$, and $I_{OH} = -1 \text{ mA}$	2.5	3.4		V
V_{OL}	$V_{CC} = \text{MIN}$, $V_{IH} = 2 \text{ V}$, and $I_{OL} = 20 \text{ mA}$			0.5	V
I_I	$V_{CC} = \text{MAX}$ and $V_I = 5.5 \text{ V}$			1	mA
I_{IH}	$V_{CC} = \text{MAX}$ and $V_I = 2.7 \text{ V}$			50	μA
I_{IL}	$V_{CC} = \text{MAX}$ and $V_I = 0.5 \text{ V}$			-2	mA

5 Submit Documentation Feedback

Copyright © 1983–2017, Texas Instruments Incorporated

Product Folder Links: SN5400 SN54LS00 SN54S00 SN7400 SN74LS00 SN74S00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SN5400, SN54LS00, SN54S00
SN7400, SN74LS00, SN74S00

www.ti.com

SDLS025D – DECEMBER 1983 – REVISED MAY 2017

Electrical Characteristics: SNx4S00 (continued)

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
I_{OS}	$V_{CC} = \text{MAX}$	-40		100	mA
I_{CCH}	$V_{CC} = \text{MAX}$ and $V_I = 0 \text{ V}$		10	16	mA
I_{OCL}	$V_{CC} = \text{MAX}$ and $V_I = 4.5 \text{ V}$		20	36	mA

6.8 Switching Characteristics: SNx400

$V_{CC} = 5 \text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, and over operating free-air temperature range (unless otherwise noted). See Figure 2.

PARAMETER	FROM (INPUT)	TO (OUTPUT)	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
t_{PLH}	A or B	Y	$R_L = 400 \Omega$ and $C_L = 15 \text{ pF}$		11	22	ns
t_{PHL}					7	15	

6.9 Switching Characteristics: SNx4LS00

$V_{CC} = 5 \text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, and over operating free-air temperature range (unless otherwise noted). See Figure 2.

PARAMETER	FROM (INPUT)	TO (OUTPUT)	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
t_{PLH}	A or B	Y	$R_L = 2 \text{ k}\Omega$ and $C_L = 15 \text{ pF}$		9	15	ns
t_{PHL}					10	15	

6.10 Switching Characteristics: SNx4S00

$V_{CC} = 5 \text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, and over operating free-air temperature range (unless otherwise noted). See Figure 2.

PARAMETER	FROM (INPUT)	TO (OUTPUT)	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
t_{PLH}	A or B	Y	$R_L = 280 \Omega$ and $C_L = 15 \text{ pF}$		3	4.5	ns
			$R_L = 280 \Omega$ and $C_L = 50 \text{ pF}$			4.5	
t_{PHL}	A or B	Y	$R_L = 280 \Omega$ and $C_L = 15 \text{ pF}$		3	5	
			$R_L = 280 \Omega$ and $C_L = 50 \text{ pF}$			5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SN5400, SN54LS00, SN54S00
SN7400, SN74LS00, SN74S00

SDLS025D – DECEMBER 1983 – REVISED MAY 2017



www.ti.com

6.11 Typical Characteristics

C_L = 15 pF

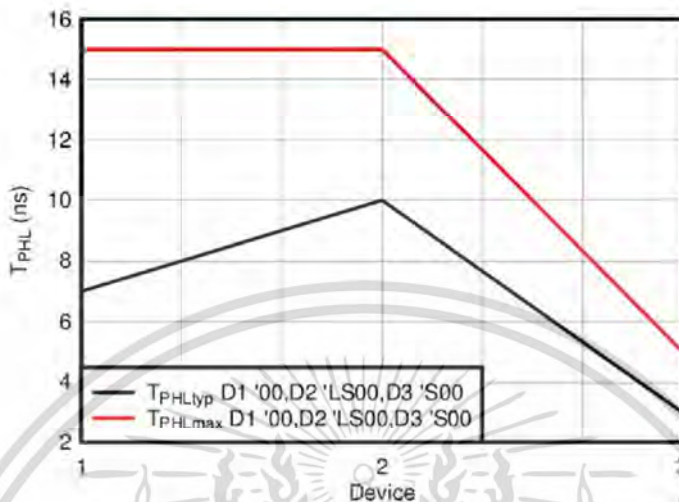


Figure 1. T_{PHL} (Across Devices)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7 Parameter Measurement Information

7.1 Propagation Delays, Setup and Hold Times, and Pulse Width

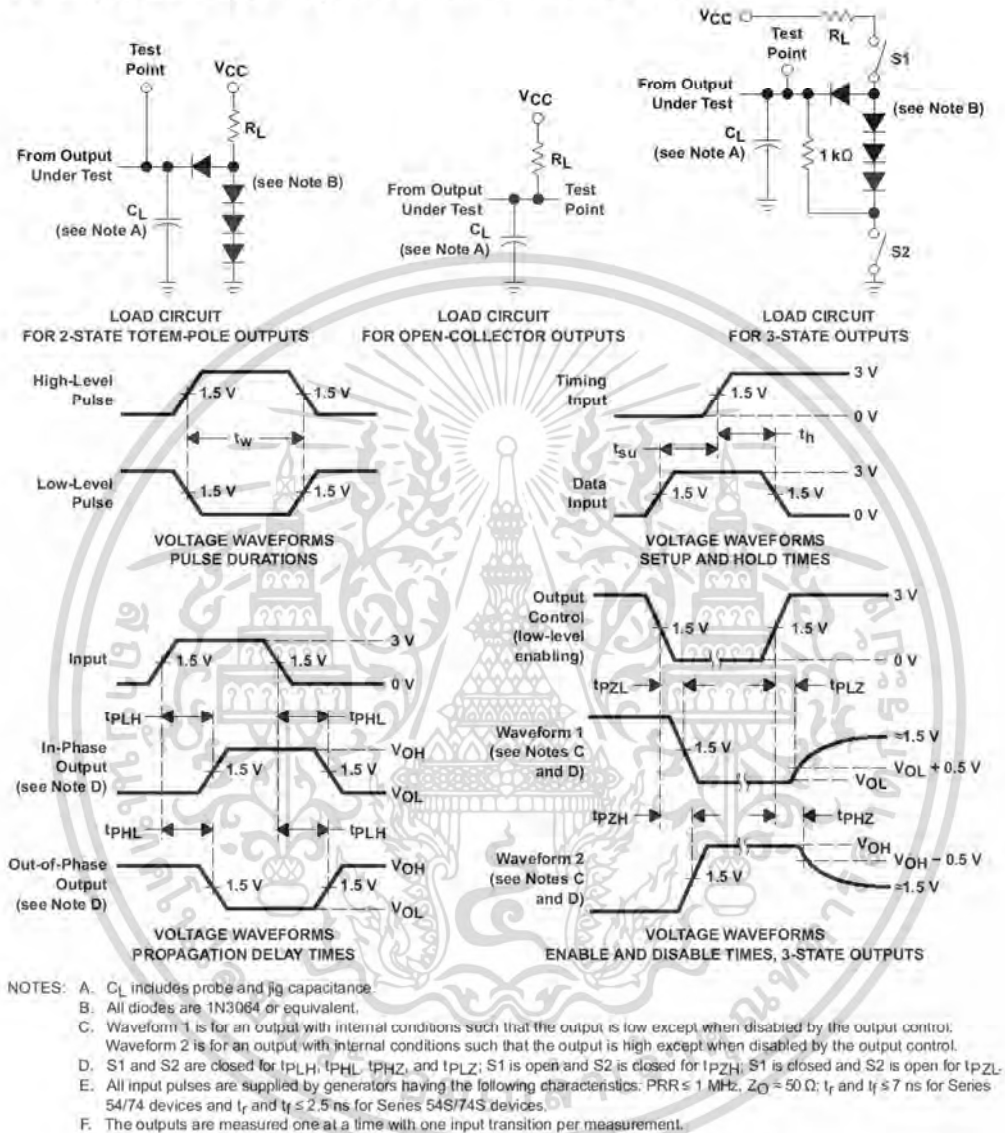


Figure 2. Load Circuits and Voltage Waveforms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SN5400, SN54LS00, SN54S00
SN7400, SN74LS00, SN74S00

SDLS025D – DECEMBER 1983 – REVISED MAY 2017



www.ti.com

8 Detailed Description

8.1 Overview

The SNx4xx00 devices are quadruple, 2-input NAND gates which perform the Boolean function $Y = \overline{A \cdot B}$ or $Y = \overline{A} + \overline{B}$ in positive logic.

8.2 Functional Block Diagram



8.3 Feature Description

The operating voltage of SN74xx00 is from 4.75-V to 5.25-V V_{CC} . The operating voltage of SN54xx00 is from 4.5-V to 5.5-V V_{CC} . The SN54xx00 devices are rated from -55°C to 125°C whereas SN74xx00 device are rated from 0°C to 70°C .

8.4 Device Functional Modes

Table 1 lists the functions of the devices.

Table 1. Functional Table (Each Gate)

INPUTS		OUTPUT
A	B	Y
H	H	L
L	X	H
X	L	H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9 Application and Implementation

NOTE

Information in the following applications sections is not part of the TI component specification, and TI does not warrant its accuracy or completeness. TI's customers are responsible for determining suitability of components for their purposes. Customers should validate and test their design implementation to confirm system functionality.

9.1 Application Information

The SNx4xx00 devices are quadruple, 2-input NAND gate. A typical application of NAND gate can be as an error indicator as shown in Figure 3. If either of the sensor has an error, the error flag is high to indicate system error.

9.2 Typical Application

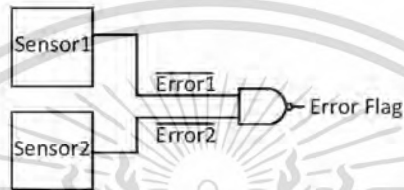


Figure 3. Typical Application Diagram

9.2.1 Design Requirements

These devices use BJT technology and have unbalanced output drive with I_{OL} and I_{OH} specified as per the [Recommended Operating Conditions](#).

9.2.2 Detailed Design Procedure

- Recommended Input Conditions:
 - The inputs are TTL compliant.
 - Because the base-emitter junction at the inputs breaks down, no voltage greater than 5.5 V must be applied to the inputs.
 - Specified high and low levels: See V_{IH} and V_{IL} in [Recommended Operating Conditions](#).
- Recommended Output Conditions:
 - No more than one output must be shorted at a time as per the [Electrical Characteristics: SNx400](#) for thermal stability and reliability.
 - For high-current applications, consider thermal characteristics of the package listed in [Thermal Information](#).

SN5400, SN54LS00, SN54S00
SN7400, SN74LS00, SN74S00

SDLS025D – DECEMBER 1983 – REVISED MAY 2017



www.ti.com

Typical Application (continued)

9.2.3 Application Curve

$C_L = 15 \text{ pF}$

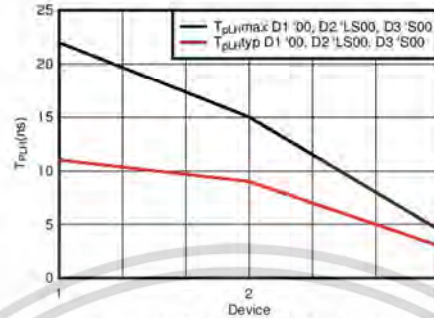


Figure 4. T_{PLH} (Across Devices)

10 Power Supply Recommendations

The power supply can be any voltage between the minimum and maximum supply voltage rating located in *Recommended Operating Conditions* for each of the SNx4LS00, SNx4S00, and SNx400 devices.

Each V_{CC} pin must have a good bypass capacitor to prevent power disturbance. For devices with a single supply, 0.1 μF is recommended; if there are multiple V_{CC} pins, then 0.01 μF or 0.022 μF is recommended for each power pin. It is acceptable to parallel multiple bypass capacitors to reject different frequencies of noise. A 0.1 μF and a 1 μF are commonly used in parallel. The bypass capacitor must be installed as close to the power pin as possible for best results.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11 Layout

11.1 Layout Guidelines

When using multiple bit logic, devices inputs must never float.

Devices with multiple-emitter inputs (SN74 and SN74S series) need special care. Because no voltage greater than 5.5 V must be applied to the inputs (if exceeded, the base-emitter junction at the inputs breaks down), the inputs of these devices must be connected to the supply voltage, V_{CC} , through series resistor, R_S (see Figure 5). This resistor must be dimensioned such that the current flowing into the gate or gates, which results from overvoltage, does not exceed 1 mA. However, because the high-level input current of the circuits connected to the gate flows through this resistor, the resistor must be dimensioned so that the voltage drop across it still allows the required high level. Equation 1 and Equation 2 are for dimensioning resistor, R_S , and several inputs can be connected to a high level through a single resistor if the following conditions are met.

$$R_{S(\min)} = \frac{V_{CCP} - 5.5 \text{ V}}{1 \text{ mA}} \quad (1)$$

$$R_{S(\max)} = \frac{V_{CC(\min)} - 2.4 \text{ V}}{n I_{IH}}$$

where

- n = number of inputs connected
- I_{IH} = high input current (typical 40 μA)
- $V_{CC(\min)}$ = minimum supply voltage, V_{CC}
- V_{CCP} = maximum peak voltage of the supply voltage, V_{CC} (about 7 V)

(2)

11.2 Layout Example



Figure 5. Series Resistor Connected to Unused Inputs of Multiple-Emitter Transistors

SN5400, SN54LS00, SN54S00
SN7400, SN74LS00, SN74S00

SDLS025D – DECEMBER 1983 – REVISED MAY 2017



www.ti.com

12 Device and Documentation Support

12.1 Documentation Support

12.1.1 Related Documentation

For related documentation see the following:

Designing With Logic (SDYA009)

12.2 Related Links

The table below lists quick access links. Categories include technical documents, support and community resources, tools and software, and quick access to sample or buy.

Table 2. Related Links

PARTS	PRODUCT FOLDER	SAMPLE & BUY	TECHNICAL DOCUMENTS	TOOLS & SOFTWARE	SUPPORT & COMMUNITY
SN5400	Click here	Click here	Click here	Click here	Click here
SN54LS00	Click here	Click here	Click here	Click here	Click here
SN54S00	Click here	Click here	Click here	Click here	Click here
SN7400	Click here	Click here	Click here	Click here	Click here
SN74LS00	Click here	Click here	Click here	Click here	Click here
SN74S00	Click here	Click here	Click here	Click here	Click here

12.3 Receiving Notification of Documentation Updates

To receive notification of documentation updates, navigate to the device product folder on ti.com. In the upper right corner, click on *Alert me* to register and receive a weekly digest of any product information that has changed. For change details, review the revision history included in any revised document.

12.4 Community Resources

The following links connect to TI community resources. Linked contents are provided "AS IS" by the respective contributors. They do not constitute TI specifications and do not necessarily reflect TI's views; see TI's [Terms of Use](#).

TI E2E™ Online Community *TI's Engineer-to-Engineer (E2E) Community*. Created to foster collaboration among engineers. At e2e.ti.com, you can ask questions, share knowledge, explore ideas and help solve problems with fellow engineers.

Design Support *TI's Design Support* Quickly find helpful E2E forums along with design support tools and contact information for technical support.

12.5 Trademarks

E2E is a trademark of Texas Instruments.
All other trademarks are the property of their respective owners.

12.6 Electrostatic Discharge Caution



These devices have limited built-in ESD protection. The leads should be shorted together or the device placed in conductive foam during storage or handling to prevent electrostatic damage to the MOS gates.

12.7 Glossary

SLYZ022 — *TI Glossary*.

This glossary lists and explains terms, acronyms, and definitions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13 Mechanical, Packaging, and Orderable Information

The following pages include mechanical, packaging, and orderable information. This information is the most current data available for the designated devices. This data is subject to change without notice and revision of this document. For browser-based versions of this data sheet, refer to the left-hand navigation.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGING INFORMATION

Orderable Device	Status	Package Type	Package Drawing	Pins	Package Qty	Eco Plan	Lead/Ball Finish	MSL Peak Temp	Op Temp (°C)	Device Marking	Samples
JM38510/00104BCA	ACTIVE	CDIP	J	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	JM38510/00104BCA	Samples
JM38510/00104BDA	ACTIVE	CFP	W	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	JM38510/00104BDA	Samples
JM38510/07001BCA	ACTIVE	CDIP	J	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	JM38510/07001BCA	Samples
JM38510/07001BDA	ACTIVE	CFP	W	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	JM38510/07001BDA	Samples
JM38510/30001B2A	ACTIVE	LOCC	FK	20	1	TBD	POST-PLATE	N / A for Pkg Type	-55 to 125	JM38510/30001B2A	Samples
JM38510/30001BCA	ACTIVE	CDIP	J	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	JM38510/30001BCA	Samples
JM38510/30001BDA	ACTIVE	CFP	W	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	JM38510/30001BDA	Samples
JM38510/30001SCA	ACTIVE	CDIP	J	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	JM38510/30001SCA	Samples
JM38510/30001SDA	ACTIVE	CFP	W	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	JM38510/30001SDA	Samples
M38510/00104BCA	ACTIVE	CDIP	J	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	M38510/00104BCA	Samples
M38510/00104BDA	ACTIVE	CFP	W	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	M38510/00104BDA	Samples
M38510/07001BCA	ACTIVE	CDIP	J	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	M38510/07001BCA	Samples
M38510/07001BDA	ACTIVE	CFP	W	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	M38510/07001BDA	Samples
M38510/30001B2A	ACTIVE	LOCC	FK	20	1	TBD	POST-PLATE	N / A for Pkg Type	-55 to 125	M38510/30001B2A	Samples
M38510/30001BCA	ACTIVE	CDIP	J	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	M38510/30001BCA	Samples
M38510/30001BDA	ACTIVE	CFP	W	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	M38510/30001BDA	Samples
M38510/30001SCA	ACTIVE	CDIP	J	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	M38510/30001SCA	Samples

Addendum-Page 1

Orderable Device	Status	Package Type	Package Drawing	Pins	Package Qty	Eco Plan	Lead/Ball Finish	MSL Peak Temp	Op Temp (°C)	Device Marking	Samples
M38510/30001SDA	ACTIVE	CFP	W	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	M38510/30001SDA	Samples
SN5400J	ACTIVE	CDIP	J	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	SN5400J	Samples
SN54LS00J	ACTIVE	CDIP	J	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	SN54LS00J	Samples
SN54S00J	ACTIVE	CDIP	J	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	SN54S00J	Samples
SN7400D	ACTIVE	SOIC	D	14	50	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-U.NLIM	0 to 70	7400	Samples
SN7400DG4	ACTIVE	SOIC	D	14	50	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-U.NLIM	0 to 70	7400	Samples
SN7400N	ACTIVE	PDIP	N	14	25	Pb-Free (RoHS)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type	0 to 70	SN7400N	Samples
SN7400NE4	ACTIVE	PDIP	N	14	25	Pb-Free (RoHS)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type	0 to 70	SN7400N	Samples
SN74LS00D	ACTIVE	SOIC	D	14	50	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-U.NLIM	0 to 70	LS00	Samples
SN74LS00DBR	ACTIVE	SSOP	DB	14	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-U.NLIM	0 to 70	LS00	Samples
SN74LS00DG4	ACTIVE	SOIC	D	14	50	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-U.NLIM	0 to 70	LS00	Samples
SN74LS00DR	ACTIVE	SOIC	D	14	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-U.NLIM	0 to 70	LS00	Samples
SN74LS00DRE4	ACTIVE	SOIC	D	14	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-U.NLIM	0 to 70	LS00	Samples
SN74LS00N	ACTIVE	PDIP	N	14	25	Pb-Free (RoHS)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type	0 to 70	SN74LS00N	Samples
SN74LS00NE4	ACTIVE	PDIP	N	14	25	Pb-Free (RoHS)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type	0 to 70	SN74LS00N	Samples
SN74LS00NSR	ACTIVE	SQ	NS	14	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-U.NLIM	0 to 70	74LS00	Samples
SN74LS00NSRG4	ACTIVE	SO	NS	14	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-U.NLIM	0 to 70	74LS00	Samples
SN74LS00PSR	ACTIVE	SO	PS	8	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1-260C-U.NLIM	0 to 70	LS00	Samples

Addendum-Page 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Orderable Device	Status (1)	Package Type	Package Drawing	Pins	Package Qty	Eco Plan (2)	Lead/Ball Finish (3)	MSL Peak Temp. (4)	Op Temp. (°C)	Device Marking (5)	Samples
SN74LS00PSRG4	ACTIVE	SO	PS	8	2000	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1:260C-LNL/IM	0 to 70	LS00	Samples
SN74S00D	NRND	SOIC	D	14	50	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1:260C-LNL/IM	0 to 70	S00	
SN74S00DE4	NRND	SOIC	D	14	50	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-1:260C-LNL/IM	0 to 70	S00	
SN74S00N	NRND	PDIP	N	14	25	Pb-Free (RoHS)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type	0 to 70	SN74S00N	
SN74S00NE4	NRND	PDIP	N	14	25	Pb-Free (RoHS)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type	0 to 70	SN74S00N	
SNJ5400J	ACTIVE	CDIP	J	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	SNJ5400J	Samples
SNJ5400W	ACTIVE	CFP	W	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	SNJ5400W	Samples
SNJ54LS00FK	ACTIVE	LCCC	FK	20	1	TBD	POST-PLATE	N / A for Pkg Type	-55 to 125	SNJ54LS00FK	Samples
SNJ54LS00J	ACTIVE	CDIP	J	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	SNJ54LS00J	Samples
SNJ54LS00W	ACTIVE	CFP	W	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	SNJ54LS00W	Samples
SNJ54S00FK	ACTIVE	LCCC	FK	20	1	TBD	POST-PLATE	N / A for Pkg Type	-55 to 125	SNJ54S00FK	Samples
SNJ54S00J	ACTIVE	CDIP	J	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	SNJ54S00J	Samples
SNJ54S00W	ACTIVE	CFP	W	14	1	TBD	A42	N / A for Pkg Type	-55 to 125	SNJ54S00W	Samples

(1) The marketing status values are defined as follows:

ACTIVE: Product device recommended for new designs.

LIFEBUY: TI has announced that the device will be discontinued, and a lifetime-buy period is in effect.

NRND: Not recommended for new designs. Device is in production to support existing customers, but TI does not recommend using this part in a new design.

PREVIEW: Device has been announced but is not in production. Samples may or may not be available.

OBSOLETE: TI has discontinued the production of the device.

(2) **RoHS:** TI defines "RoHS" to mean semiconductor products that are compliant with the current EU RoHS requirements for all 10 RoHS substances, including the requirement that RoHS substance do not exceed 0.1% by weight in homogeneous materials. Where designed to be soldered at high temperatures, "RoHS" products are suitable for use in specified lead-free processes. TI may reference these types of products as "Pb-Free".

RoHS Exempt: TI defines "RoHS Exempt" to mean products that contain lead but are compliant with EU RoHS pursuant to a specific EU RoHS exemption.

Green: TI defines "Green" to mean the content of Chlorine (Cl) and Bromine (Br) based flame retardants meet J5709B low halogen requirements of <=1000ppm threshold. Antimony trioxide based flame retardants must also meet the <=1000ppm threshold requirement.

Addendum-Page 3

(4) **MSL, Peak Temp. -** The Moisture Sensitivity Level rating according to the JEDEC industry standard classifications, and peak solder temperature.

(5) There may be additional marking, which relates to the logo, die lot trace code information, or the environmental category on the device.

(6) Multiple Device Markings will be inside parentheses. Only one Device Marking contained in parentheses and separated by a "-" will appear on a device. If a line is indented then it is a continuation of the previous line and the two combined represent the entire Device Marking for that device.

(7) **Lead/Ball Finish -** Orderable Devices may have multiple material finish options. Finish options are separated by a vertical ruled line. Lead/Ball Finish values may wrap to two lines if the finish value exceeds the maximum column width.

Important Information and Disclaimer: The information provided on this page represents TI's knowledge and belief as of the date that it is provided. TI bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TI has taken and continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TI and TI suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

OTHER QUALIFIED VERSIONS OF SN5400, SN54LS00, SN54LS00-SP, SN54S00, SN7400, SN74LS00, SN74S00:

• Catalog: SN7400, SN74LS00, SN54LS00, SN74S00

• Military: GNS400, GNS4LS00, SN54S00

• Space: SN54LS00-SP

NOTE: Qualified Version Definitions:

• Catalog - TI's standard catalog product

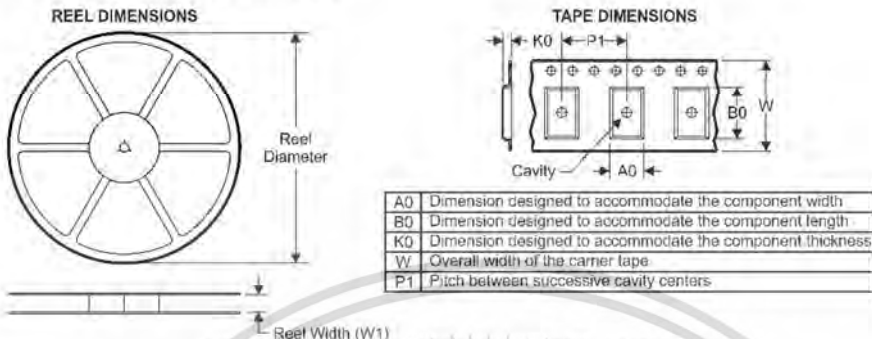
• Military - QML certified for Military and Defense Applications

• Space - Radiation tolerant, ceramic packaging and qualified for use in Space-based application

Addendum-Page 4

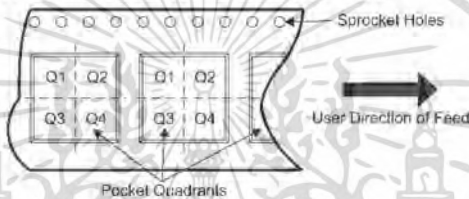
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TAPE AND REEL INFORMATION



A0	Dimension designed to accommodate the component width
B0	Dimension designed to accommodate the component length
K0	Dimension designed to accommodate the component thickness
W	Overall width of the carrier tape
P1	Pitch between successive cavity centers

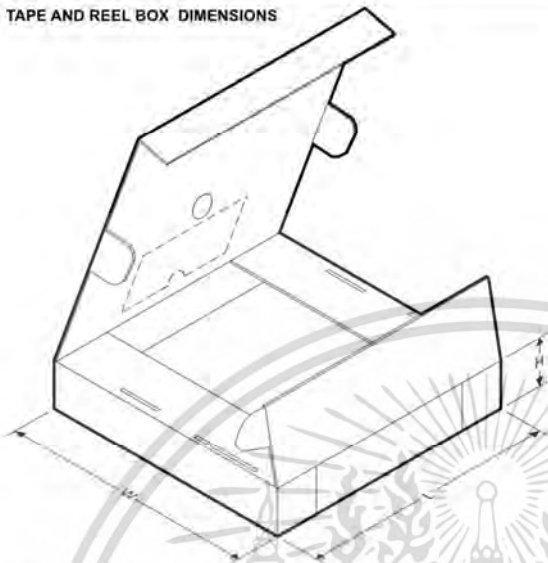
QUADRANT ASSIGNMENTS FOR PIN 1 ORIENTATION IN TAPE



*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPO	Reel Diameter (mm)	Reel Width W1 (mm)	A0 (mm)	B0 (mm)	K0 (mm)	P1 (mm)	W (mm)	Pin1 Quadrant
SN74LS00DBR	SSOP	DB	14	2000	330.0	16.4	8.2	6.6	2.5	12.0	16.0	Q1
SN74LS00DR	SOIC	D	14	2500	330.0	16.4	6.5	9.0	2.1	8.0	16.0	Q1
SN74LS00NSR	SO	NS	14	2000	330.0	16.4	8.2	10.5	2.5	12.0	16.0	Q1
SN74LS00PSR	SO	PS	8	2000	330.0	16.4	8.2	6.6	2.5	12.0	16.0	Q1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TAPE AND REEL BOX DIMENSIONS


*All dimensions are nominal

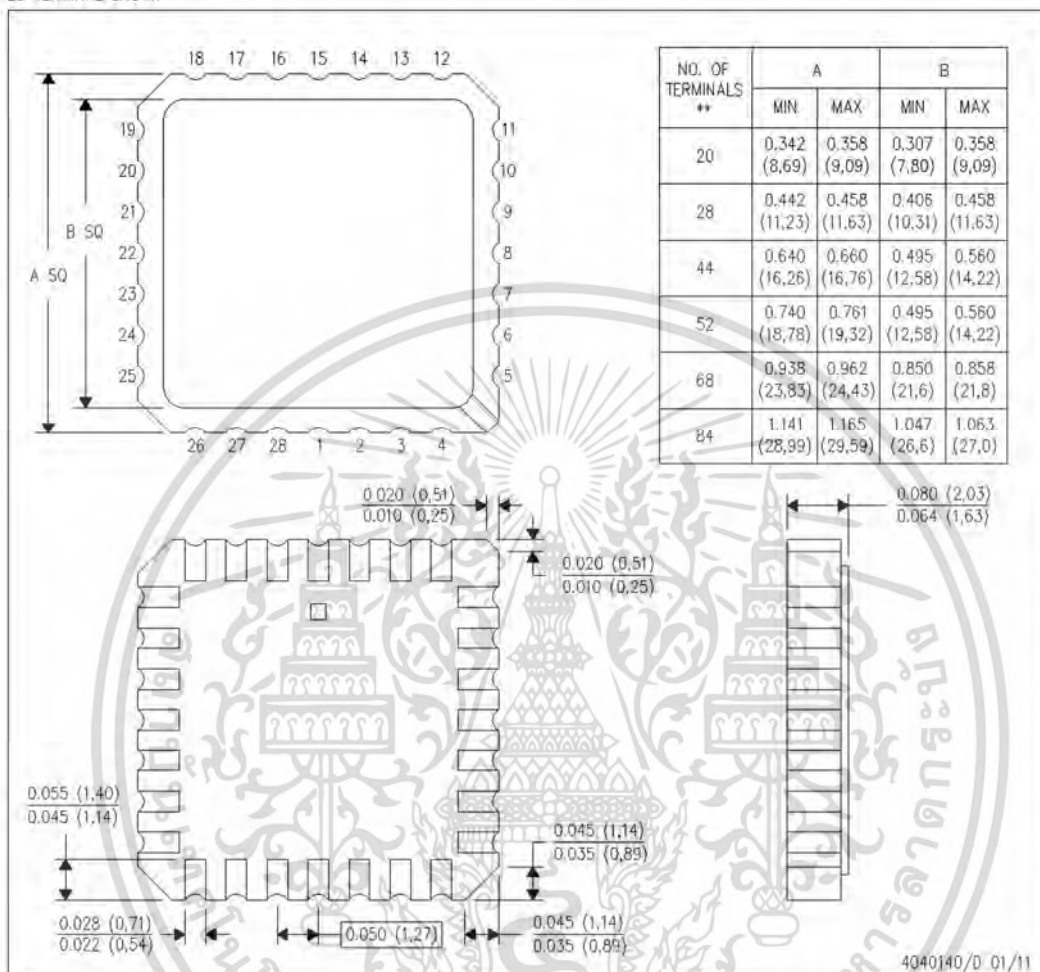
Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)
SN74LS00DBR	SSOP	DB	14	2000	367.0	367.0	38.0
SN74LS00DR	SOIC	D	14	2500	367.0	367.0	38.0
SN74LS00NSR	SO	NS	14	2000	367.0	367.0	38.0
SN74LS00PSR	SO	PS	8	2000	367.0	367.0	38.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MECHANICAL DATA

FK (S-CQCC-N**)
28 TERMINAL SHOWN

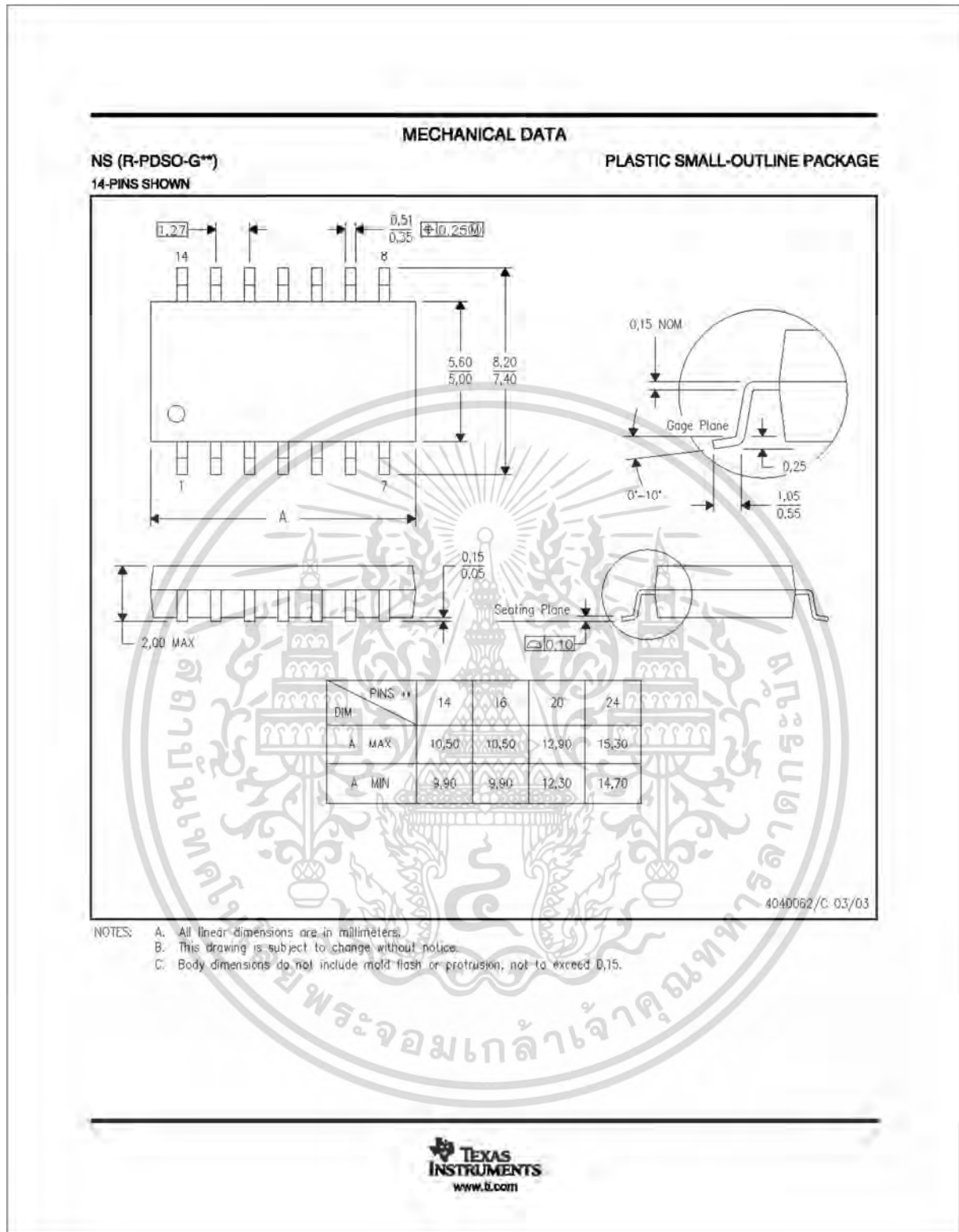
LEADLESS CERAMIC CHIP CARRIER



- NOTES:
- A. All linear dimensions are in inches (millimeters).
 - B. This drawing is subject to change without notice.
 - C. This package can be hermetically sealed with a metal lid.
 - D. Falls within JEDEC M-004.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

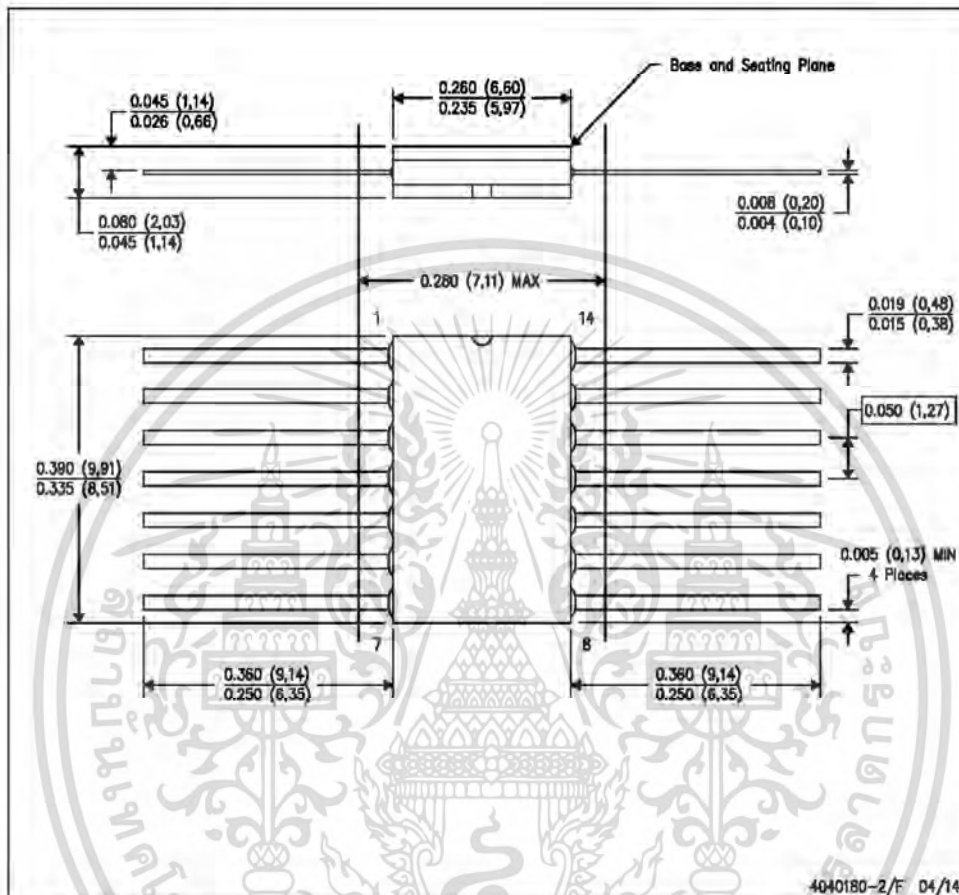


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MECHANICAL DATA

W (R-GDFP-F14)

CERAMIC DUAL FLATPACK



- NOTES:
- All linear dimensions are in inches (millimeters).
 - This drawing is subject to change without notice.
 - This package can be hermetically sealed with a ceramic lid using glass frit.
 - Index point is provided on cap for terminal identification only.
 - Falls within MIL. STD 1835 GDFP-F14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

J 14

GENERIC PACKAGE VIEW
CDIP - 5.08 mm max height
 CERAMIC DUAL IN LINE PACKAGE



Images above are just a representation of the package family, actual package may vary.
 Refer to the product data sheet for package details.

4040083-5/G



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

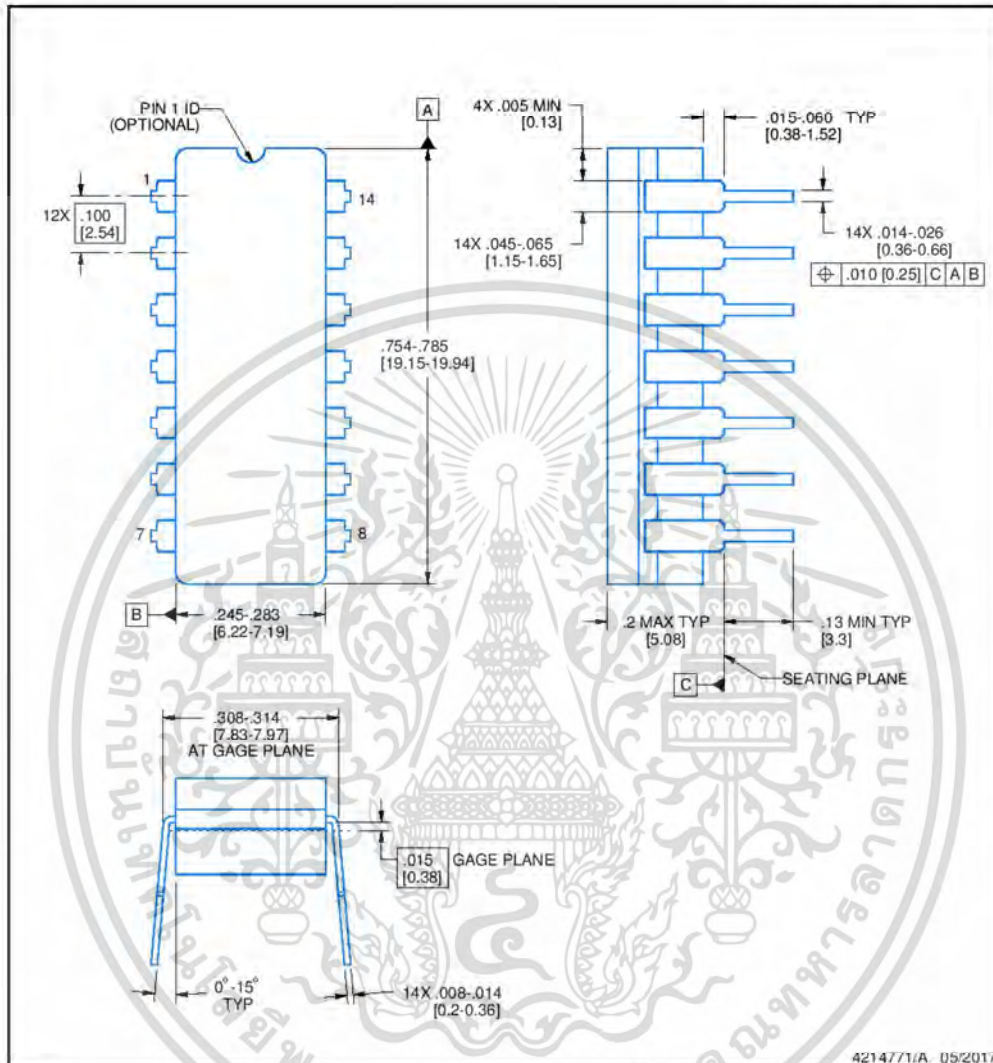
J0014A



PACKAGE OUTLINE

CDIP - 5.08 mm max height

CERAMIC DUAL IN LINE PACKAGE



4214771/A 05/2017

NOTES:

1. All controlling linear dimensions are in inches. Dimensions in brackets are in millimeters. Any dimension in brackets or parenthesis are for reference only. Dimensioning and tolerancing per ASME Y14.5M.
2. This drawing is subject to change without notice.
3. This package is hermetically sealed with a ceramic lid using glass frit.
4. Index point is provided on cap for terminal identification only and on press ceramic glass frit seal only.
5. Falls within MIL-STD-1835 and GDIP1-T14.

 **TEXAS
INSTRUMENTS**
www.ti.com

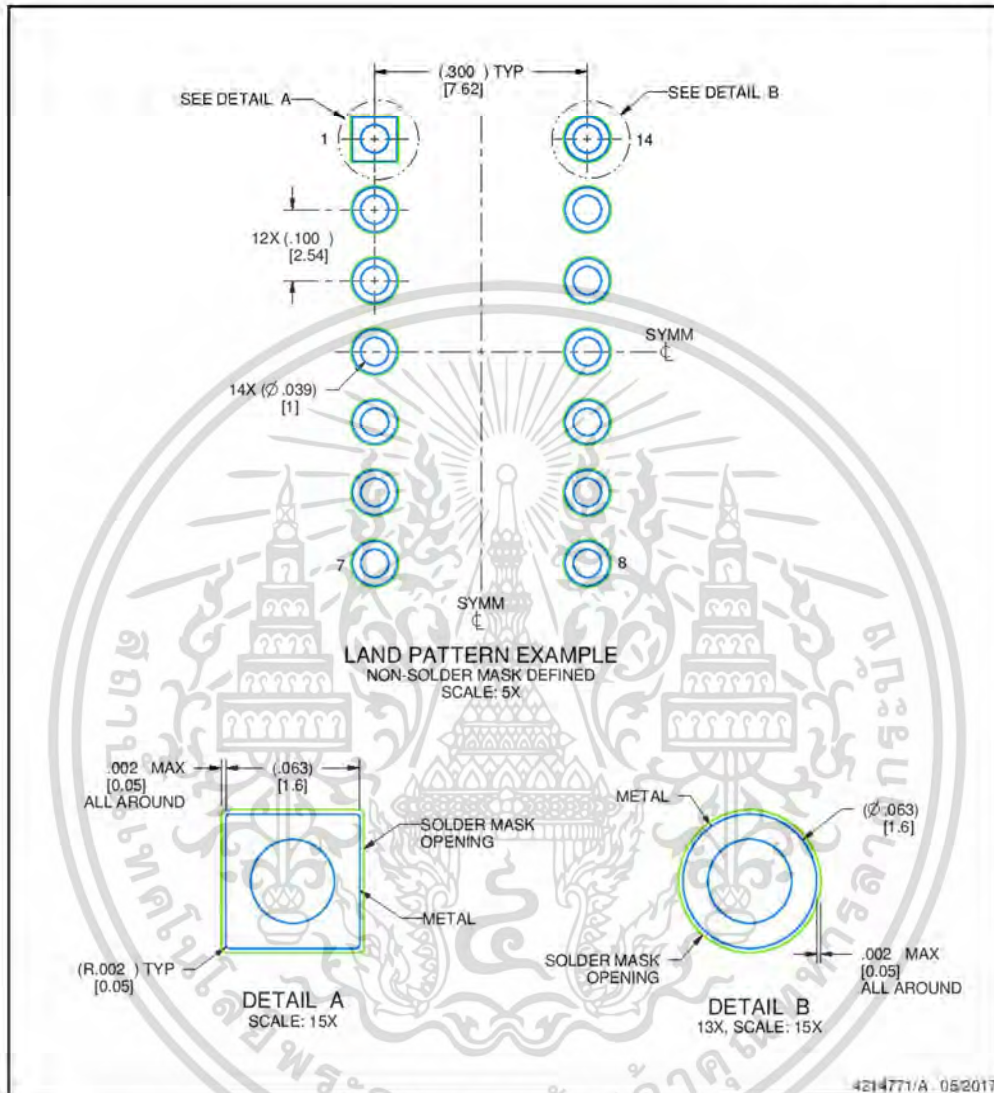
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXAMPLE BOARD LAYOUT

J0014A

CDIP - 5.08 mm max height

CERAMIC DUAL IN LINE PACKAGE

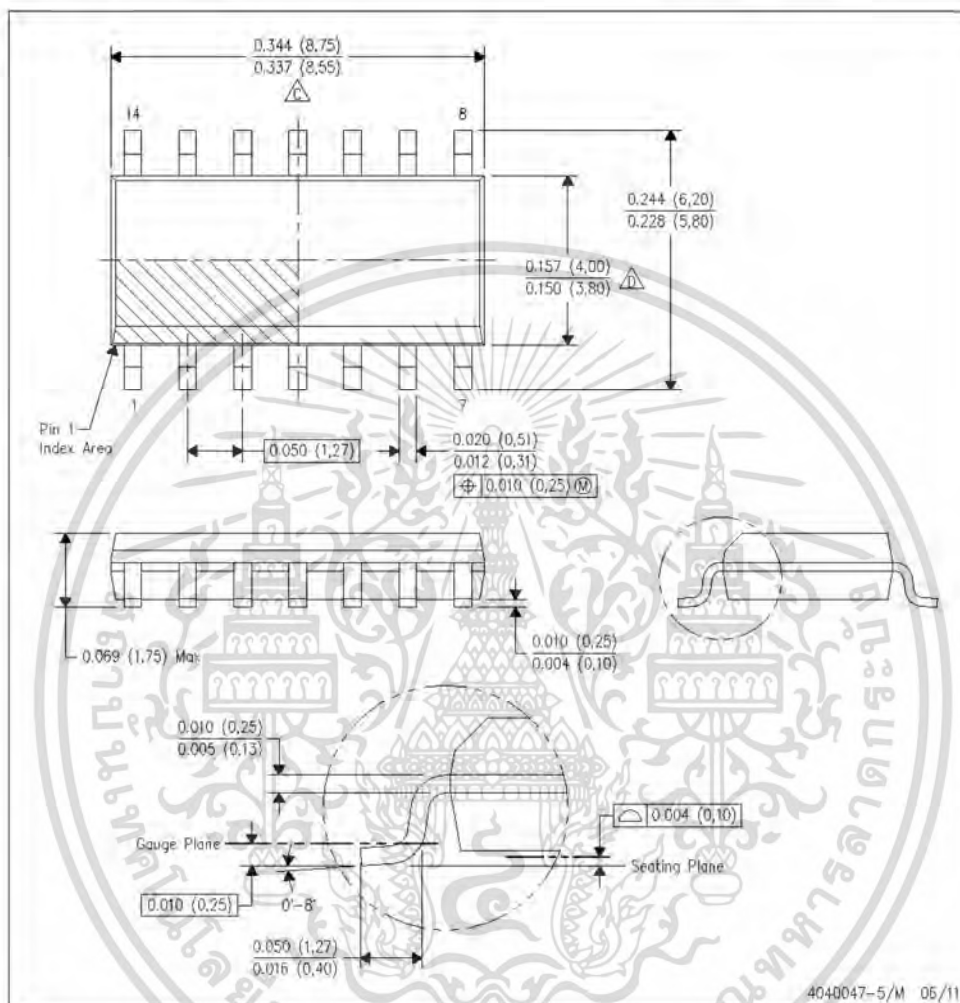




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MECHANICAL DATA

D (R=PDSO-G14)

PLASTIC SMALL OUTLINE



- NOTES:
- A. All linear dimensions are in inches (millimeters).
 - B. This drawing is subject to change without notice.
 -  Body length does not include mold flash, protrusions, or gate burrs. Mold flash, protrusions, or gate burrs shall not exceed 0.006 (0.15) each side.
 -  Body width does not include interlead flash. Interlead flash shall not exceed 0.017 (0.43) each side.
 - E. Reference JEDEC MS-012 variation AB.

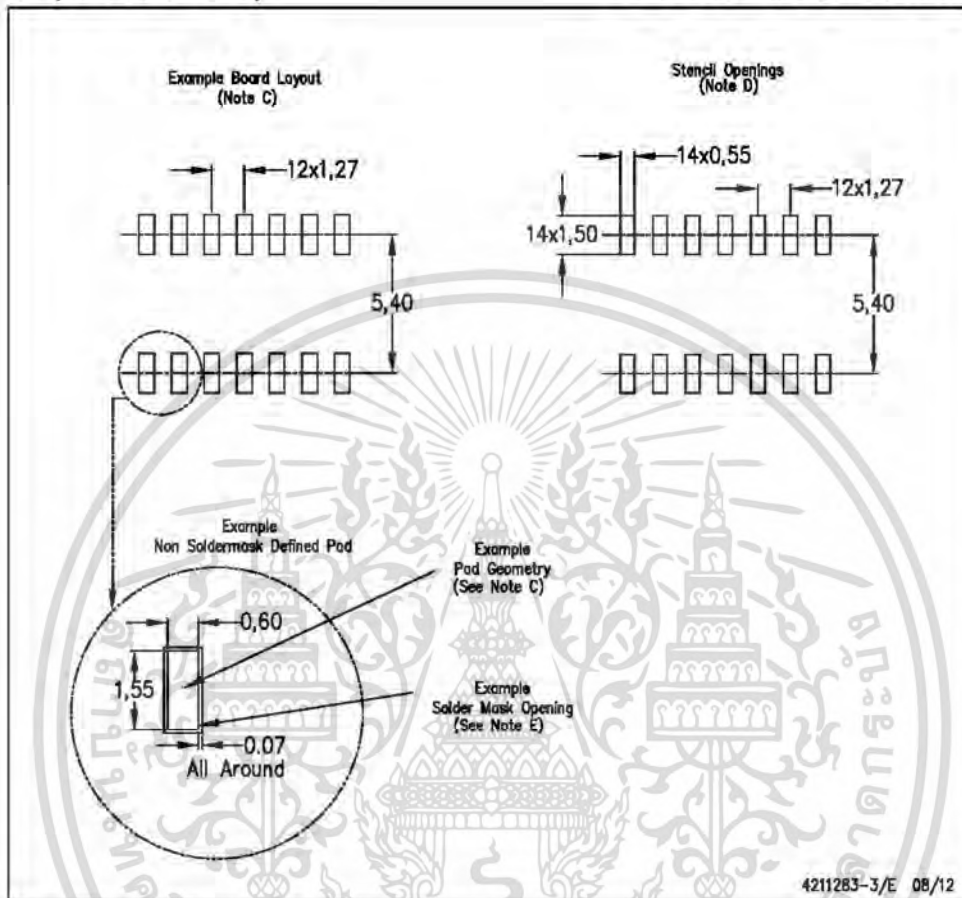
 **TEXAS
INSTRUMENTS**
www.ti.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LAND PATTERN DATA

D (R-PDSO-G14)

PLASTIC SMALL OUTLINE

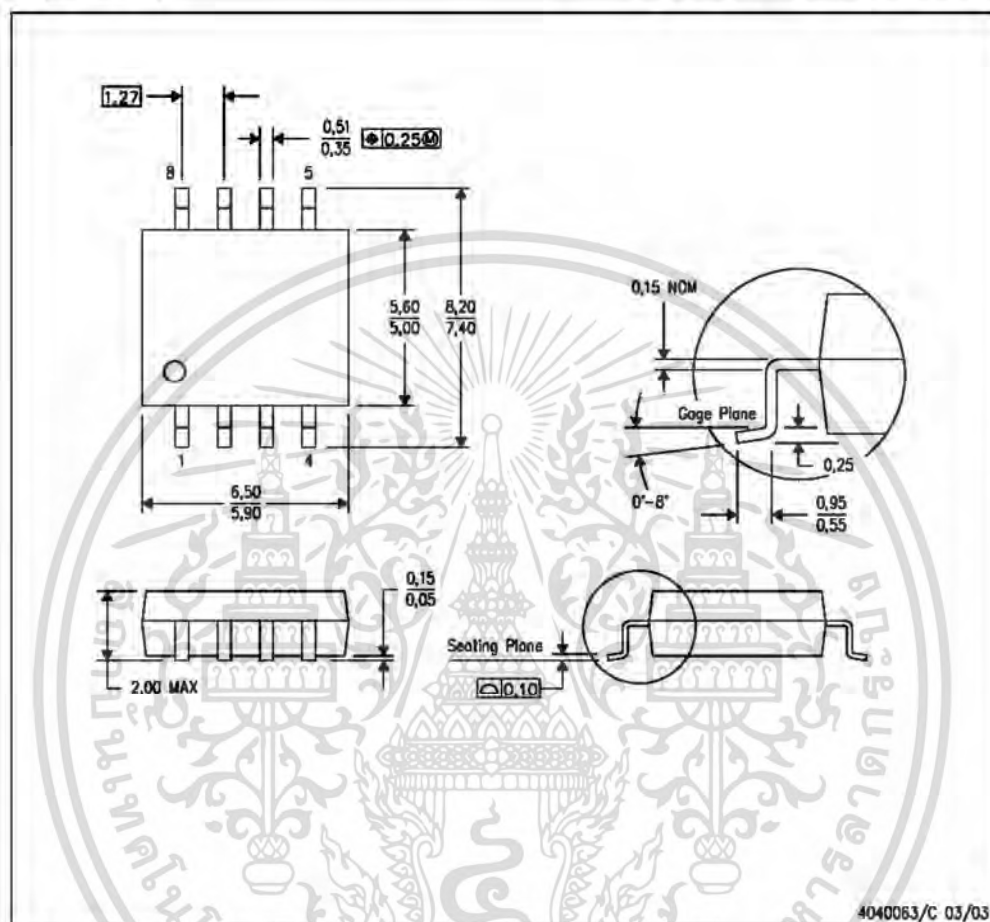


- NOTES:
- All linear dimensions are in millimeters.
 - This drawing is subject to change without notice.
 - Publication IPC-7351 is recommended for alternate designs.
 - Laser cutting apertures with trapezoidal walls and also rounding corners will offer better paste release. Customers should contact their board assembly site for stencil design recommendations. Refer to IPC-7525 for other stencil recommendations.
 - Customers should contact their board fabrication site for solder mask tolerances between and around signal pads.

MECHANICAL DATA

PS (R-PDSO-G8)

PLASTIC SMALL-OUTLINE PACKAGE



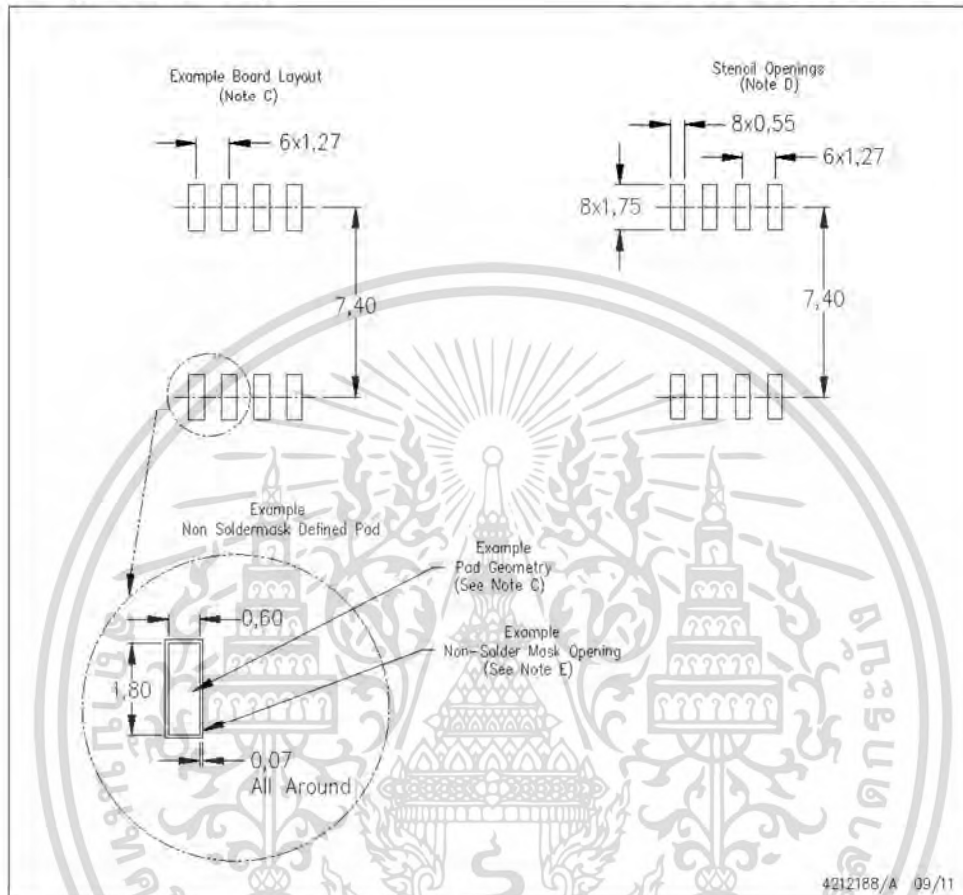
- NOTES:
- All linear dimensions are in millimeters.
 - This drawing is subject to change without notice.
 - Body dimensions do not include mold flash or protrusion, not to exceed 0.15.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LAND PATTERN DATA

PS (R-PDSO-G8)

PLASTIC SMALL OUTLINE



- NOTES:
- All linear dimensions are in millimeters.
 - This drawing is subject to change without notice.
 - Publication IPC-7351 is recommended for alternate designs.
 - Laser cutting apertures with trapezoidal walls and also rounding corners will offer better paste release. Customers should contact their board assembly site for stencil design recommendations. Refer to IPC-7525 for other stencil recommendations.
 - Customers should contact their board fabrication site for solder mask tolerances between and around signal pads.

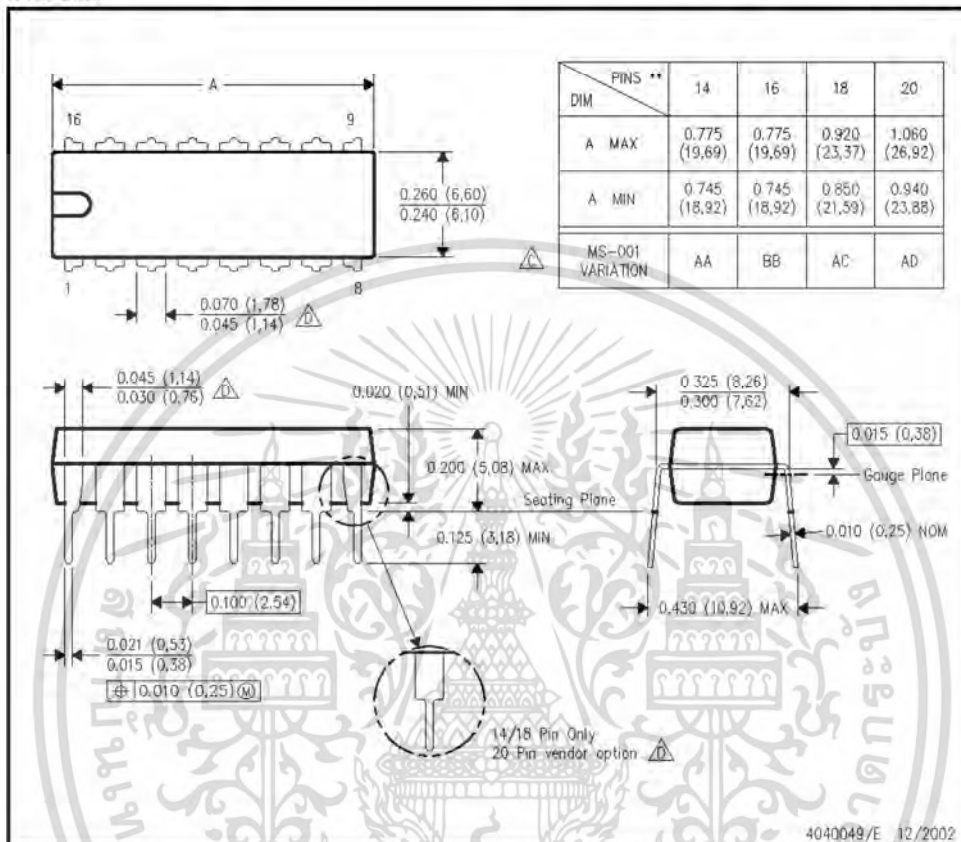
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MECHANICAL DATA

N (R-PDIP-T**)

PLASTIC DUAL-IN-LINE PACKAGE

16 PINS SHOWN



- NOTES:
- A. All linear dimensions are in inches (millimeters).
 - B. This drawing is subject to change without notice.
 - Falls within JEDEC MS-001, except 18 and 20 pin minimum body length (Dim. A).
 - The 20 pin end lead shoulder width is a vendor option, either half or full width.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

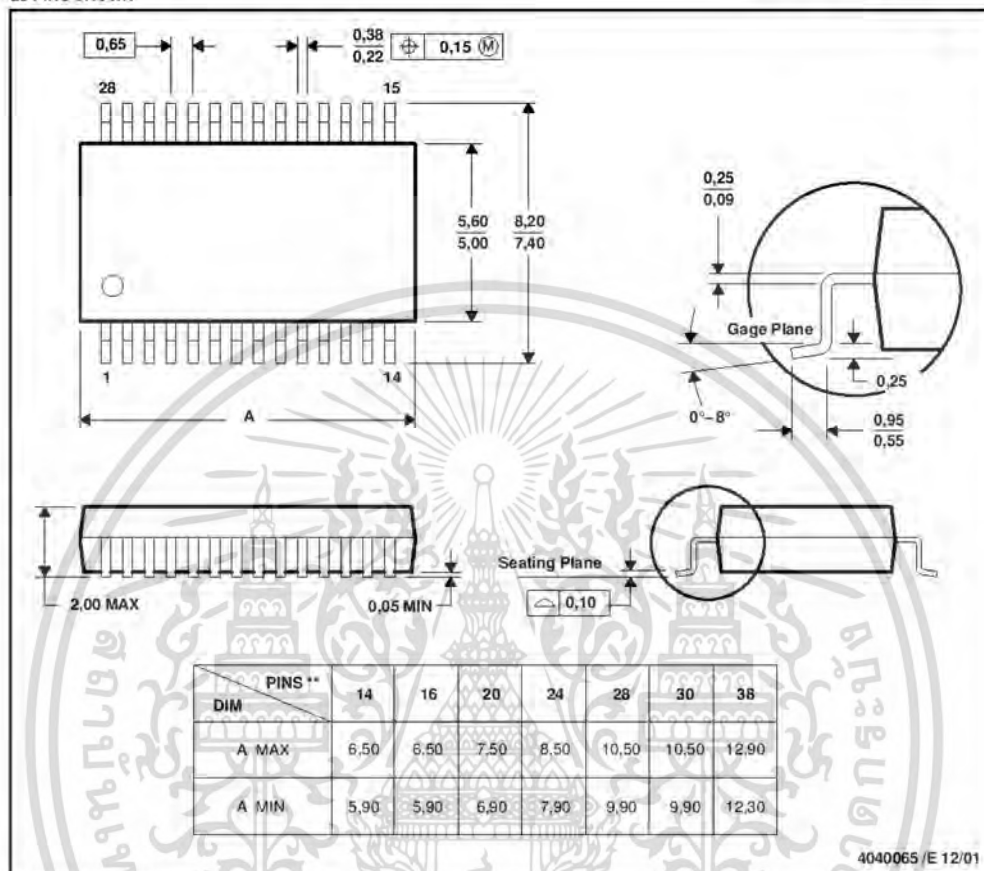
MECHANICAL DATA

MSS0002E - JANUARY 1995 - REVISED DECEMBER 2001

DB (R-PDSO-G**)

PLASTIC SMALL-OUTLINE

28 PINS SHOWN



- NOTES: A. All linear dimensions are in millimeters.
 B. This drawing is subject to change without notice.
 C. Body dimensions do not include mold flash or protrusion not to exceed 0,15.
 D. Falls within JEDEC MO-150.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments Incorporated (TI) reserves the right to make corrections, enhancements, improvements and other changes to its semiconductor products and services per JESD46, latest issue, and to discontinue any product or service per JESD48, latest issue. Buyers should obtain the latest relevant information before placing orders and should verify that such information is current and complete.

TI's published terms of sale for semiconductor products (<http://www.ti.com/sc/docs/std/terms.htm>) apply to the sale of packaged integrated circuit products that TI has qualified and released to market. Additional terms may apply to the use or sale of other types of TI products and services.

Reproduction of significant portions of TI information in TI data sheets is permissible only if reproduction is without alteration and is accompanied by all associated warranties, conditions, limitations, and notices. TI is not responsible or liable for such reproduced documentation. Information of third parties may be subject to additional restrictions. Resale of TI products or services with statements different from or beyond the parameters stated by TI for that product or service voids all express and any implied warranties for the associated TI product or service and is an unfair and deceptive business practice. TI is not responsible or liable for any such statements.

Buyers and others who are developing systems that incorporate TI products (collectively, "Designers") understand and agree that Designers remain responsible for using their independent analysis, evaluation and judgment in designing their applications and that Designers have full and exclusive responsibility to assure the safety of Designers' applications and compliance of their applications (and of all TI products used in or for Designers' applications) with all applicable regulations, laws and other applicable requirements. Designer represents that, with respect to their applications, Designer has all the necessary expertise to create and implement safeguards that (1) anticipate dangerous consequences of failures, (2) monitor failures and their consequences, and (3) lessen the likelihood of failures that might cause harm and take appropriate actions. Designer agrees that prior to using or distributing any applications that include TI products, Designer will thoroughly test such applications and the functionality of such TI products as used in such applications.

TI's provision of technical, application or other design advice, quality characterization, reliability data or other services or information, including, but not limited to, reference designs and materials relating to evaluation modules, (collectively, "TI Resources") are intended to assist designers who are developing applications that incorporate TI products; by downloading, accessing or using TI Resources in any way, Designer (individually or, if Designer is acting on behalf of a company, Designer's company) agrees to use any particular TI Resource solely for this purpose and subject to the terms of this Notice.

TI's provision of TI Resources does not expand or otherwise alter TI's applicable published warranties or warranty disclaimers for TI products, and no additional obligations or liabilities arise from TI providing such TI Resources. TI reserves the right to make corrections, enhancements, improvements and other changes to its TI Resources. TI has not conducted any testing other than that specifically described in the published documentation for a particular TI Resource.

Designer is authorized to use, copy and modify any individual TI Resource only in connection with the development of applications that include the TI product(s) identified in such TI Resource. NO OTHER LICENSE, EXPRESS OR IMPLIED, BY ESTOPPEL OR OTHERWISE TO ANY OTHER TI INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT, AND NO LICENSE TO ANY TECHNOLOGY OR INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT OF TI OR ANY THIRD PARTY IS GRANTED HEREIN, including but not limited to any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right relating to any combination, machine, or process in which TI products or services are used. Information regarding or referencing third-party products or services does not constitute a license to use such products or services, or a warranty or endorsement thereof. Use of TI Resources may require a license from a third party under the patents or other intellectual property of the third party, or a license from TI under the patents or other intellectual property of TI.

TI RESOURCES ARE PROVIDED "AS IS" AND WITH ALL FAULTS. TI DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES OR REPRESENTATIONS, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING RESOURCES OR USE THEREOF, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ACCURACY OR COMPLETENESS, TITLE, ANY EPIDEMIC FAILURE WARRANTY AND ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, AND NON-INFRINGEMENT OF ANY THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS. TI SHALL NOT BE LIABLE FOR AND SHALL NOT DEFEND OR INDEMNIFY DESIGNER AGAINST ANY CLAIM, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY INFRINGEMENT CLAIM THAT RELATES TO OR IS BASED ON ANY COMBINATION OF PRODUCTS EVEN IF DESCRIBED IN TI RESOURCES OR OTHERWISE. IN NO EVENT SHALL TI BE LIABLE FOR ANY ACTUAL, DIRECT, SPECIAL, COLLATERAL, INDIRECT, PUNITIVE, INCIDENTAL, CONSEQUENTIAL OR EXEMPLARY DAMAGES IN CONNECTION WITH OR ARISING OUT OF TI RESOURCES OR USE THEREOF, AND REGARDLESS OF WHETHER TI HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES.

Unless TI has explicitly designated an individual product as meeting the requirements of a particular industry standard (e.g., ISO/TS 16949 and ISO 26262), TI is not responsible for any failure to meet such industry standard requirements.

Where TI specifically promotes products as facilitating functional safety or as compliant with industry functional safety standards, such products are intended to help enable customers to design and create their own applications that meet applicable functional safety standards and requirements. Using products in an application does not by itself establish any safety features in the application. Designers must ensure compliance with safety-related requirements and standards applicable to their applications. Designer may not use any TI products in life-critical medical equipment unless authorized officers of the parties have executed a special contract specifically governing such use. Life-critical medical equipment is medical equipment where failure of such equipment would cause serious bodily injury or death (e.g., life support, pacemakers, defibrillators, heart pumps, neurostimulators, and implantables). Such equipment includes, without limitation, all medical devices identified by the U.S. Food and Drug Administration as Class III devices and equivalent classifications outside the U.S.

TI may expressly designate certain products as completing a particular qualification (e.g., Q100, Military Grade, or Enhanced Product). Designers agree that it has the necessary expertise to select the product with the appropriate qualification designation for their applications and that proper product selection is at Designers' own risk. Designers are solely responsible for compliance with all legal and regulatory requirements in connection with such selection.

Designer will fully indemnify TI and its representatives against any damages, costs, losses, and/or liabilities arising out of Designer's non-compliance with the terms and provisions of this Notice.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Proceedings



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Track 3 – Materials

Changing of Dimension and Microstructure of Flow Forming Cylinder Tube after Compress by Swaging Machine *	136
<i>Thawatchai Boonluang, Apirath Gositanon, Panitarn Suriyaamatayawadee</i>	
Bulletproof Prefabricated Steel Stud Wall	141
<i>Tanakorn Ngamjarungjit, Wasan Patwichaichote, Nuthaporn Nuttayasakul, Chuan Chuntavan</i>	
Development and Characterization of Ablative Materials Used for Rocket Motors	146
<i>Phimraphas Ngamsantivongsa, Suriyawate Boonthalarath, Bongkochorn Wong-ek, Suchuchchai Nuanklai, Chesda Kiriratnikom</i>	
A Using of Quartz Crystal Microbalance for 2, 4, 6-Trinitrotolurene (TNT) Vapor Detection *	151
<i>Pavaris Phuvanatai, Toempong Phetchakul</i>	
High Temperature Corrosion of Austenitic Stainless Steel in Simulated Rocket Combustion Gas	155
<i>Tosapolporu Pornpibunsompop</i>	
A Study of Fabrication of M4 Military Bridge Aluminium Floor Joists Using Domestic Materials	159
<i>Chalit Santitararag, Akhravat Lenwari, Nuthaporn Nuttayasakul</i>	
The Study of Different Type of Fibers for Using as the Ablative Materials *	166
<i>Bongkochorn Wong-ek, Phimraphas Ngamsantivongsa, Suriyawate Boonthalarath, Tawiwat Veeraklaew, Surwicha Chankrapoe, Chesda Kiriratnikom</i>	

Track 4 – Mechanical Engineering

Aerodynamic Heat Prediction on a 15 degree Cone-Cylinder-Flare Configuration using 2D Viscous Transient CFD	170
<i>Weerawut Charubhin, Pawat Chusilp</i>	
Numerical Study of CFD Simulations for Compact Counter-Recoil Design of EOD Water Cannon	178
<i>Premisiri Hongthong, Tonkid Chantrasmi</i>	
Seat Drop Test and Finite Element Analysis Using LS-DYNA *	184
<i>Khong Chee Houe, Ng Chee Keong</i>	
Estimating the Pitch Damping Coefficient of Rocket by Particle Based Computational Fluid Dynamics	190
<i>Chatrat Koomphati</i>	
Quadrotor Control System for a Propeller Failure *	194
<i>Pachara Phlaengsorn, Pongsathorn Saisujarit, Suwat Kuntanapreeda, Takaya Inamori, Hiroshi Ohtake</i>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Using of Quartz Crystal Microbalance for 2, 4, 6-Trinitrotolurene (TNT) Vapor Detection

Pavaris Phuvanatai

Department of Defence Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Ladkrabang, Bangkok, Thailand
potetology_98@hotmail.com

Toempong Phetchakul

Department of Electronic, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Ladkrabang, Bangkok, Thailand
toempong.ph@kmitl.ac.th

Abstract—In this paper, the detection for explosive vapor with a quartz crystal microbalance that is coated with organic thin film, 18-crown-6 ether, as sensitive material is proposed. When the explosive adheres to a surface of the crystal oscillator, the weight is changed and the resonance frequency of the crystal oscillator is shifted lower. This study focuses on the detection of vapors of 2, 4, 6 - Trinitrotoluene (TNT). TNT is widely used in both military and industrial, including use in terrorism. The quartz crystal resonance frequency is 8 MHz. The frequency of the oscillator is measured and recorded by digital frequency counter and can display in the real-time.

Keywords—Chemical sensor; Quartz Crystal Microbalance; TNT; Explosive detection; 18 crown 6 ether.

I. INTRODUCTION

In the present, they have more way to detect explosives, such as Ground Penetration Radar (GPR), [1] mobile X-ray vehicle (Z-backscatter System) [2] or explosive scent tracing [3] etc. Each detection methods will have advantage or disadvantage difference. Among the explosives, 2, 4, 6-trinitrotoluene is a prominent one which widely used in military, industrial and terrorism. It is widely used because it easy to use and create a blast so well that causes it popular than other explosives. This research will focus to detect 2, 4, 6-trinitrotoluene (TNT) vapor by using a quartz crystal microbalance. This technique is the part of explosive scent tracing. It is suitable for finding the trace on the sampling or suspicious object from the suspect area or the criminal scene. We choose the vapor detection technique because the changing of any process in both physical and chemistry will have come from the change of mass. One advantage of this method is the low cost. It is not expensive when compared to the other techniques.

We study on quartz crystal microbalance for applying to the explosive detection [4-7] by coating with organic thin-film that has 18-crown-6 ether as a sensitive material. The device work with the oscillator circuit which generate the frequency for the quartz crystal microbalance and use the AE20401 5.8 GHz frequency counter with software from Ascel-Electronics to read, record and display the data in real-time.

II. BASIC THEORY

A. Quartz Crystal Microbalance

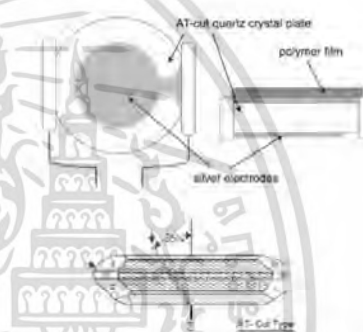


Fig.1 Structure of QCM Sensor

QCM is a plate of crystal that cutting with AT-CUT type that showed in Fig. 1. It is a mass sensor that varies per unit area by measuring the change in frequency of a quartz crystal resonator. When a mass accumulate on the surface of crystal plate the frequency will be changed. The linear relation between the changes in the resonant frequency of a quartz crystal and the mass are according to Sauerbrey's equation. It shows the relation between the decrease in resonant frequency or frequency shift (Δf) to the added mass (Δm) as

$$\Delta f = - \frac{2f_0^2}{A_s \rho_q \mu_q} \Delta m \quad (1)$$

where f_0 is the resonant frequency, A is the active electrode area, ρ_q is the density, μ_q is the shear modulus. In particular for an AT-cut quartz crystal we have, $\rho_q = 2.643 \text{ g/cm}^3$, $\mu_q = 2.947 \times 10^{11} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$

When represent the constants values in the Sauerbrey's equation that get new one as shown in equation (2)

$$\Delta f = -2.26 \times 10^{-6} f_0^2 \frac{\Delta m}{A} \quad (2)$$

In this research, we use quartz crystal model HC49U from Mobicon Electronic Components (MEC) which has a fundamental frequency at 8MHz.

B. Sensitive Material

The organic thin-film, 18-crown-6 ether, [8, 9] as a sensitive material has structure which is shown in Fig2(a). The reasons of choosing this as a sensitive material because 18-crown-6 ether has a function as a ligand for some metal ions. The 2, 4, 6-trinitrotolurene (TNT) is made from a nitroaromatic compound that has the ion from the unsaturated characteristics. The number of electrons of TNT is $4n + 2$ when $n = 1, 2, 3, \dots$ and these electrons are not fixed but can move so the two substances can hold together. The structure of TNT is shown in Fig. 2(b). The Poly (methyl methacrylate) is used to build the thin film to hold sensitive material with QCM surface.

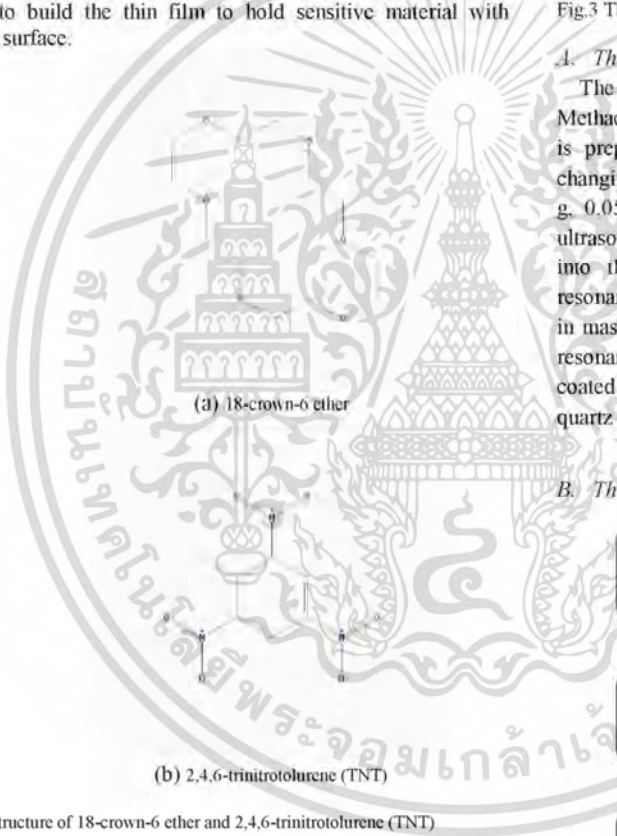


Fig.2 Structure of 18-crown-6 ether and 2,4,6-trinitrotolurene (TNT)

III. EXPERIMENTAL

The experimental is divided into two main parts. First, the preparing of sensitive organic thin film and then the second is setup the QCM measurement system for TNT.

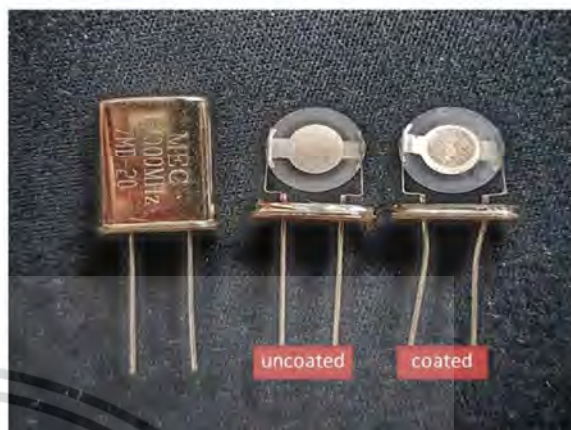


Fig.3 The photograph of coated and uncoated QCM.

A. The coated thin film for QCM preparing coating

The solution of 18-Crown-6 ether and polymethyl Methacrylate (PMMA) by using dichloromethane as a solvent is prepared for 10^{-3} M, 2×10^{-3} M, 4×10^{-3} M, 10^{-2} M by changing the amount of 18-Crown-6 ether in 0.0132 g, 0.0264 g, 0.0528 g and 0.132 g, respectively. Then shake it with ultrasonic for 15 minutes. The sensors are coated by dipping into the solvent for several minutes. After coating, the resonance frequency will be changed because of the changing in mass so it will be checked to determine a new value. The resonance frequency of uncoated film is 7,993,403 Hz and coated film is 7,967,451Hz. Fig. 3 shows the photograph of quartz crystal before and after coating.

B. The QCM System for measurement TNT vapor

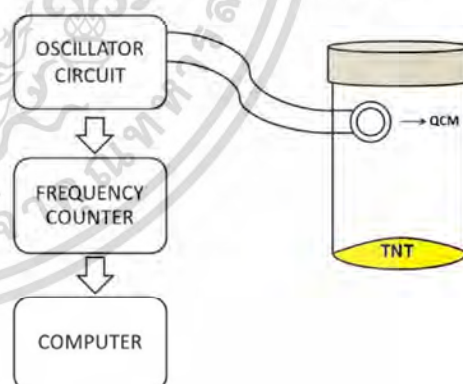


Fig.4 The QCM System for measurement

The QCM System for measurement that we use in this research is shown in Fig.4. It is composed of chamber 1,100 cm^3 with a QCM on the top and TNT 4.6 g inside, oscillator

circuit for generated the signal to QCM, and computer for reading, recording frequency data. By using AE20401 5.8GHz frequency counter connect with computer and software fro m Ascel-Electronics, the frequency shift is display on monitor in real time.

The data is recorded in every 1 second up to 1200 seconds. The frequency difference Δf is got from the difference of the frequency between measurement frequencies and the resonance frequency, and then the additional mass can be calculated to find a TNT vapor mass that deposited on QCM coated surface.

This research will study about the difference of frequency shift in measurements between QCM without coated thin films and QCM that is coated with organic thin-film that have 18-crown-6 ether as sensitive material in various concentration. It is measured in air comparing with TNT vapor in the air at room temperature and atmospheric pressure.

IV. RESULTS & DISCUSSION

A. The measurement on QCM without thin films

Fig. 5 shows the responses of different frequency of uncoated QCM in air and air mixed TNT vapor. In the case of fresh air, the frequency shift Δf is very low less than 10 Hz. For the case of mixed TNT vapor in air, the frequency shift is swing and unstable in the range between 20 and 80 Hz. The small frequency shift means that the molecule of substance cannot be caught on the surface of QCM so well. The TNT vapor mixed in air help the number of molecule vapor adding on the surface that can be observed the more frequency shift but it is not stable. Even though the frequency shift increases, the molecule do not hold on surface so the values are swings in wide range. It hardly applies for detecting.

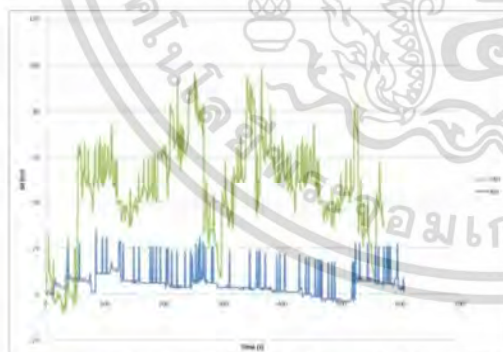


Fig.5 The resonance frequency response (f_0) of uncoated QCM in air and in air with TNT vapor.

B) The measurement on TNT with QCM that coat with thin-film that having 18-crown-6 ether as sensitive material in any concentration.

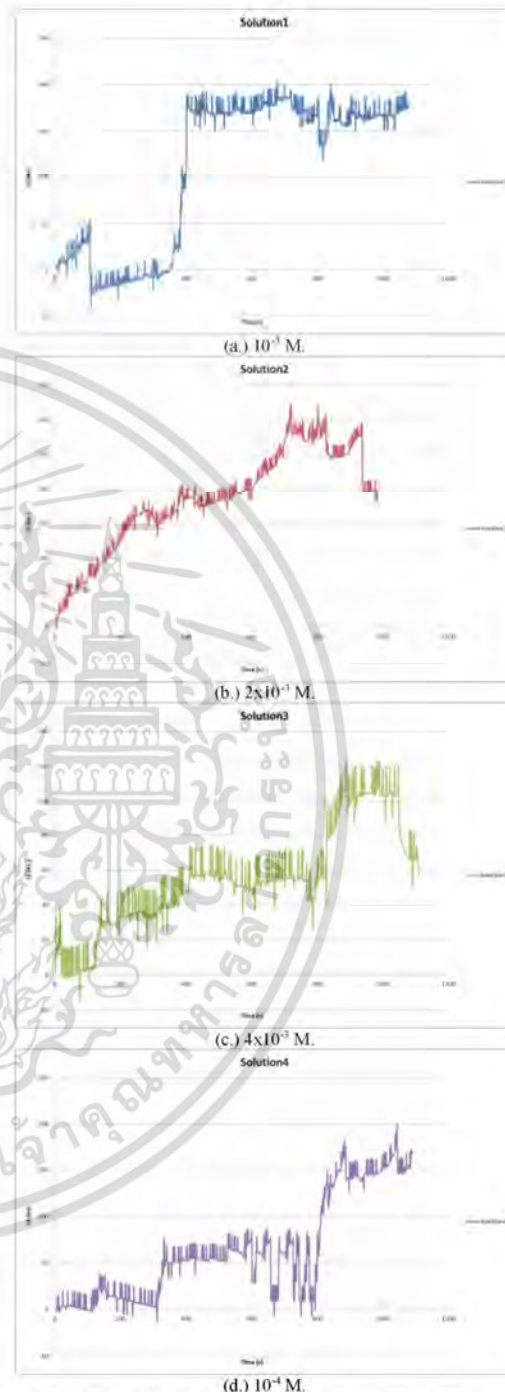


Fig.6 The frequency shift responses (Δf) of different concentration of 18-Crown-6 ether coated QCM in air mixed TNT vapor .

The sensitive organic film 18-Crown-6 ether is coated on QCM for selected layer of TNT molecules by the process as mentioned before. The concentration of 18-Crown-6 ether is the parameter for this study. Fig. 6 shows the responses of frequency shift at different concentration of 18-Crown-6 ether. Fig. 6 (a) is the case of the lowest concentration. The frequency shift is in the range of 150 -200 Hz. The response reaches to the steady state condition within the period of measurement about at 400 seconds. Fig. 6 (b) is the next higher concentration of sensitive film. We observe that the response reach to the steady state condition about at 700 seconds. The frequency shift at steady state is between 200 to 300 Hz that is higher than the lowest case. It means that higher concentration sensitive film tends to catch TNT molecules than lower concentration. Of course, the more mass is changed, the more frequency is shifted. The case of Fig. 6(c) and Fig. 6(d), the response do not seem to reach the steady state value. The response increase with time and try to reach the steady condition. The more concentration film tends to catch more TNT molecule and spend more time to steady state. We expect that the frequency shift should be higher than low concentration film at steady state condition.

C) The measurement of QCM-18-crown-6 ether as sensitive material thin-film coat in air and TNT vapor mixed in air.

The frequency shift response of coated QCM in air and air with TNT vapor is shown in Fig. 7. In fresh air, the frequency shift is varied between 0 to 100 Hz. The average is around 50 Hz. If it is compared with the uncoated QCM in fresh air, the coated QCM gives the high value than the uncoated one. The film tends to help QCM catch the molecule in air but cannot fix it so the frequency shift is unstable. In the case of air with TNT vapor, the response shows better result. The frequency shift tends to reach the steady state condition. The frequency shift is more stable than in fresh air. It means that coated film help QCM to catch the TNT molecule and fix it with the surface cause the frequency shift. The amount of TNT molecule adheres on the surface much more increase with time. The frequency shift with time and reach to saturation condition at steady state.

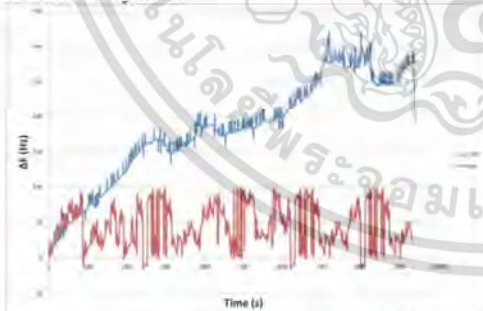


Fig.7 The frequency shift response (Δf) of coated QCM in air and in air with TNT vapor.

V. CONCLUSION

In this research, the chemical sensor that uses QCM by coated with 18-crown-6 ether as a sensitive organic thin film is applied for TNT vapor detection. The organic thin film proves that it can catch the molecule of TNT vapor in the air and change the mass which causes the resonance frequency shift. By the way, QCM that does not coat the film cannot focus to catch the any molecule in the air that will be known by the wide variation and low frequency shift. The frequency shift and time to steady state is related with the concentration of 18-Crown-6 ether. The high concentration tends to catch more TNT molecule and spend more time to reach steady state condition. The high concentration tends to generate high frequency shift because of the high addition mass which is according to the Sauerbrey's equation.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Asst. Prof. Polsart Lertprasert for supplying the TNT, Asst. Prof. Dr. Pichit Sudta for guidance on the chemistry theory and thank to Assoc. Prof. Somsak Cheirsirikul for measurement instrument.

REFERENCES

- [1] Khaoula Tbarki, Salma Ben Said, Nourredine Ellouze, "Non-linear filtering for landmine detection on ground penetration radar data," *Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, 2016, pp. 200 - 205
- [2] Sanjeevreddy Kolkoori, Norma Wrobel, Uwe Ewert, "A new X-ray backscatter technology for aviation security applications," *Technologies for Homeland Security (HST)*, 2015 IEEE International Symposium on, pp. 1 - 5
- [3] Mika Harbeck, Dilek D. Erbahar, Ilke Gürol, Emel Musluoğlu, "Chemical Sensing of Explosives in Water," *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2010
- [4] S. Kurosawa ; Dae-Sang Han ; Jong-Won Park ; H. Aizawa ; M. Yoshimoto ; C. Nakamura ; J. Miyake ; Sang-Mok Chang, "Gas sensor using high-frequency quartz crystal microbalance," *Frequency Control Symposium and PDA Exhibition*, 2001. *Proceedings of the 2001 IEEE International*, 2001, pp.462-464
- [5] M. Guillemot, F. Dayber, P. Monméat*, C. Barthet, P. Prené, "Detection of explosives vapours on quartz crystal microbalances: generation of very low-concentrated vapours for sensors calibration," *Procedia Chemistry* Volume 1, Issue 1, September 2009, pp. 967-970
- [6] M. Guillemot, F. Dayber, P. Monméat*, C. Barthet, P. Prené, "Detection of explosives vapours using a multi-quartz crystal microbalance system," *Procedia Chemistry* Volume 5, 2010, pp. 472-475
- [7] Aready P. Gershanik† and Yehuda Zeiri, "Sublimation Rate of TNT Microcrystals in Air," *J. Phys. Chem. A* 2010, 114, pp.12403-12410
- [8] E. Bentes, H.L.Gomes, P.Stallinga and L. Moura, "Detection of explosive vapors using organic thin-film transistors," *SENSORS*, 2004
- [9] Edison B. Gibelli a, Jiang Kai b.c, Ercules E.S. Teotonio d, Oscar L. Malta e, Maria C.F.C. Felinto a,Hermi F. Brito b, "Photoluminescent PMMA polymer films doped with Eu3+-diketonate crown ether complex," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 251, 2013, pp. 154-159

2017 The 2nd International Conference on Smart Materials Technologies

ICSMT 2017

St. Petersburg, Russia

19-21 May 2017

Editor

Marina Polyakova

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Sponsoring Organizations

Assisted by

Bauman Moscow State Technical University, Russia

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia

Science and Engineering Institute, USA

All papers have been peer reviewed.



Melville, New York, 2017
AIP Conference Proceedings

Volume 1858

To learn more about AIP Conference Proceedings visit <http://proceedings.aip.org>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AIP Conference Proceedings, Volume 1858
2017 The 2nd International Conference on Smart Materials Technologies
ICSMT 2017

Table of Contents

Preface: The 2nd International Conference on Smart Materials Technologies (ICSMT 2017)	010001
CHAPTER 1: MATERIAL STRUCTURE TEST AND PERFORMANCE ANALYSIS	
Study of degradation processes kinetics in ohmic contacts of resonant tunneling diodes based on nanoscale AlAs/GaAs heterostructures under influence of temperature M. O. Makeev and S. A. Meshkov	020001
Reversible and irreversible wrinkling in tube hydroforming process Ali Abd El-Aty, Tauseef Ahmed, and Ahmed Farooq	020002
Morphological arrangement of two-dimensional aggregated colloid Sarunya Promkottra and Tawiwat Kangsadan	020003
A study on 2, 4, 6-trinitrotolurene (TNT) vapor detection by using a quartz crystal microbalance with 18-crown-6 ether film Toempong Phetchakul and Pavaris Phuvanatai	020004
Statistical material parameters identification based on artificial neural networks for stochastic computations Drahomír Novák and David Lehký	020005
Sea urchin skeleton: Structure, composition, and application as a template for biomimetic materials Nikolay P. Shapkin, Irina G. Khalchenko, Alexander E. Panasenko, and Anatoly L. Drozdov	020006
Health and usage monitoring system for the small aircraft composite structure Milan Růžička, Milan Dvořák, Nikola Schmidová, Ladislav Šašek, and Martin Štěpánek	020007
CHAPTER 2: MATERIALS CHEMISTRY AND MECHANICS	
Adsorption of methyl orange from aqueous solution onto PMMA nanofiber: Kinetics study Muhammad Ali Zulfikar, Afdal Bahri, Henry Setiyanto, and Muhammad Nasir	030001
The calcium fluoride effect on properties of cryolite melts feasible for low-temperature production of aluminum and its alloys O. Tkacheva, A. Dedyukhin, A. Redkin, and Yu. Zaikov	030002
Investigation of partially oxidized Ge and Si nanoparticles produced in repetitive pulsed gas discharge D. A. Mylnikov, A. A. Lizunova, A. A. Efimov, and V. V. Ivanov	030003
An investigation on directionally dependent fracture toughness behavior of monolithic nickel gradient material synthesized from electroplating Ahmad Farooq, Ali Abd El-Aty, Tauseef Ahmed, and Chang Tai-Chi	030004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Study on 2, 4, 6-Trinitrotolurene (TNT) Vapor Detection by Using a Quartz Crystal Microbalance with 18-crown-6 Ether Film

Toempong Phetchakul^{1,a)} and Pavaris Phuvanatai^{2,b)}

¹*Department of Electronic, Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang 1 Soi Chalalongkrung 1, Ladkrabang, Bangkok, Thailand*

²*Department of Defence Engineering, Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang 1 Soi Chalalongkrung 1, Ladkrabang, Bangkok, Thailand*

^{a)}toempong.ph@kmitl.ac.th
^{b)}potetelogy_98@hotmail.com

Abstract. The application of 18-crown-6 ether film for 2, 4, 6-trinitrotolurene (TNT) vapor detection by using quartz crystal microbalance (QCM) is studied. The film is coated on the quartz electrodes as sensitive material for capture TNT molecule. The parameters that are studied are concentration and mass or thickness of film. When the explosive adheres to surface of the crystal oscillator, the weight is changed and the resonance frequency of the crystal oscillator is shifted lower. The frequency shift (Δf) relates to concentration and mass or thickness. The high concentration and mass /thickness of film enhance the TNT detection.

INTRODUCTION

Currently, terrorists around the world use explosives to terrorism because a high efficiency in the destruction. The explosives that they used mainly are C4, TNT and RDX etc. But the widely used in both industry and the military is TNT. Because TNT easy to use and create a blast so well that causes it popular than other explosives. These explosive did a lot of damage after the explosion. This is the reason why we want to develop a device to detect explosives. In order to prevent terrorism or to find the type of explosives from the criminal scene that have an explosion to specify that type of an explosive, the explosive device will be used. In the present, they have many ways to detect explosives. This research will focus on explosive scent tracing technique [1] by using a quartz crystal microbalance to detect 2, 4, 6-trinitrotoluene (TNT) vapor. It is suitable for finding the trace on the sampling from the suspect area or the criminal scene. We choose the vapor detection technique because quartz crystal microbalance is a highly sensitive mass sensor that measured on the changing of mass per unit area. When the 2, 4, 6-trinitrotoluene (TNT) vapor are accumulating on the surface of QCM, the frequency will be shifted below. We can calculate a mass that accumulate on the surface from the Sauerbrey's equation. One advantage of this method is the low cost when compared to the other techniques.

We study on quartz crystal microbalance for applying to the explosive detection [2-5] by coating with organic thin-film. The 18-crown-6 ether organic film is used as a sensitive material by coated on the quartz crystal. The device works with the oscillator circuit which generates the resonant frequency for the quartz crystal microbalance and use frequency counter for measurement the frequency shift (Δf). The film preparation parameters are studied for appropriate condition.

2017 The 2nd International Conference on Smart Materials Technologies
AIP Conf. Proc. 1858, 020004-1–020004-5; doi: 10.1063/1.4989941
Published by AIP Publishing. 978-0-7354-1532-4/\$30.00

020004-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BASIC THEORY

A. Quartz Crystal Microbalance

QCM is a plate of crystal that cutting with AT-CUT type. It is a mass sensor that varies per unit area by measuring the change in frequency of a quartz crystal resonator. When a mass accumulate on the surface of crystal plate, the frequency will be changed. The linear relation between the changes in the resonant frequency of a quartz crystal and the mass are according to Sauerbrey's equation. It shows the relation between the decrease in resonant frequency or frequency shift (Δf) to the added mass (Δm) as

$$\Delta f = \frac{2f_0^2}{A\sqrt{\rho_q\mu_q}}\Delta m \quad (1)$$

where f_0 is the resonant frequency, A is the active electrode area, ρ_q is the quartz density, μ_q is the quartz shear modulus. In particular for an AT-cut quartz crystal, we have $\rho_q = 2.643 \text{ g/cm}^3$, $\mu_q = 2.947 \times 10^{11} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$. When represent the constants values in the Sauerbrey's equation that get new one as shown in equation (2)

$$\Delta f = -2.26 \times 10^{-6} f_0^2 \frac{\Delta m}{A} \quad (2)$$

B. Sensitive Material

The organic film, 18-crown-6 ether, [6, 7] as a sensitive material has structure which is shown in Fig.1(a). The reasons of choosing this as a sensitive material because 18-crown-6 ether has a function as a ligand for some metal ions. The 2, 4, 6-trinitrotolurene (TNT) is made from a nitroaromatic compound that has the ion from the unsaturated characteristics of valence electron that why the two substances can hold together. The structure of TNT is shown in Fig. 1(b). The Poly (methyl methacrylate) is used to build the thin film to hold sensitive material with coated QCM surface.



FIGURE 1. Structure of 18-crown-6 ether and 2,4,6-trinitrotolurene (TNT)

EXPERIMENTAL

This research will study about the difference of frequency shift in measurement between QCM without coated thin films and QCM that is coated with organic film that have 18-crown-6 ether as sensitive material in various concentration and various thickness or mass of film. It is measured in air comparing with TNT vapor in the air at room temperature and atmospheric pressure.

The preparing of sensitive organic film, we prepared a solution between 18-crown-6 ether and polymethyl methacrylate (PMMA) by using dichloromethane as a solvent for 10^{-3} M , $2 \times 10^{-3} \text{ M}$, $4 \times 10^{-3} \text{ M}$ and 10^{-2} M by changing the amount of 18-crown-6 ether in 0.0132 g, 0.0264 g, 0.0528 g and 0.132 g, respectively. Then they are shaken by

020004-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



FIGURE 2. The photograph of (a) QCM and (b) Schematic diagram of system for measurement

ultrasonic for 10 minutes. The sensors are coated by dipping into the solvent for several minutes and let them dry by air. For the thickness testing, we prepared to test about a thickness of film how affect to a QCM by dipped in a same concentration more than one time. After coating, the resonance frequency will be changed because of the changing in mass so it will be checked to determine a new resonance frequency. Fig. 2(a) shows the photograph of quartz crystal before and after coating. After measuring a new resonance frequency, we prepared for measured with TNT vapor. The diagram of measurement system that we use in this work is shown in Fig 2(b). It composes of chamber 1,100 cm³ with a QCM on the top and TNT inside on the bottom, oscillator circuit for generated the signal to QCM, AE20401 5.8GHz frequency counter and software from Ascel-Electronics that connected with computer to read, record and displayed the frequency data. The frequency data is display on monitor in real time. The data is recorded in every 1 second after we put a TNT inside a chamber. The frequency shift (Δf) is got from the difference of the frequency between measurement frequencies and the resonance frequency, and then the additional mass can be calculated to find a TNT vapor mass that deposited on QCM coated surface by use a sauerbrey's equation in (2).

RESULTS & DISSCUSSION

A. The measurement on QCM

The frequency shift response of QCM is show in Fig. 3. In Fig. 3, The measured on uncoated QCM in fresh air show the frequency shift is very low less than 10 Hz but the measured on coated QCM in fresh air, the frequency shift response is varied between 0 to 100 Hz. The average value is around 50 Hz. If it is compared with the uncoated QCM in fresh air, the coated QCM gives the high value than the uncoated one. The film tends to enhance QCM capture the molecule in air but cannot fix it so the frequency shift is unstable.

In the mixed TNT vapor in air, the measurement on uncoated QCM shows the frequency shift varied and unstable in the range between 20 and 80 Hz. The small frequency shift means that the molecule of substance cannot be captured on the surface of QCM so well. The TNT vapor mixed in air enhances the number of molecule vapor addingon the surface that can be observed the more frequency shift but it is not stable. Even though the frequency

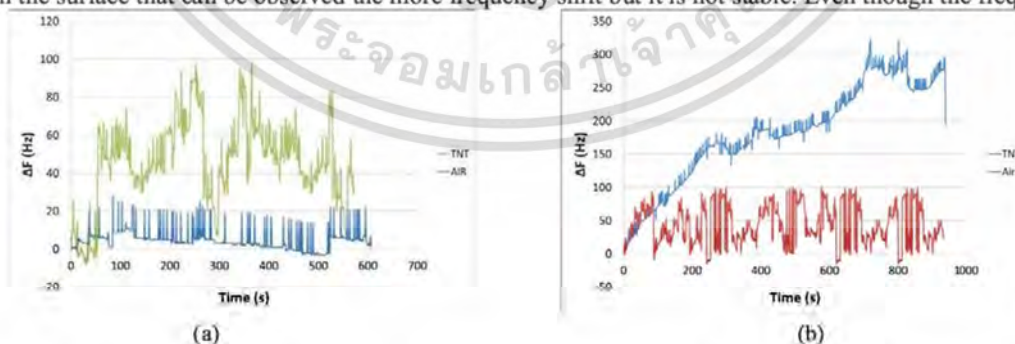


FIGURE 3. The frequency response of uncoated QCM (a) and coated QCM (b) in air and in air mixed TNT vapor.

020004-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

shift increases, the molecule do not hold on surface so the values swing in wide range. It hardly applies for detecting. But the measurement oncoated QCM in the mixed TNT vapor in air, the response shows better result. The frequency shift tends to reach the steady state condition. The frequency shift is more stable than in uncoated QCM. It means that coated film enhance QCM to capture the TNT molecule and fix it with the surface cause the frequency shift. The amount of TNT molecules adhere on the surface increase with time. The frequency shift increases with time and reaches to saturation condition at steady state.

B. The measurement on coated QCM in various concentrations

The sensitive organic film 18-crown-6 ether is coated on QCM for selected layer of TNT molecules by the process as mentioned before. The concentration of 18-crown-6 ether is the parameter for this study. Fig. 5 shows the responses of frequency shift at different concentration of 18-crown-6 ether. Fig.4(a) is the case of the lowest concentration. The frequency shift is in the range of 150-200 Hz. The response reaches to the steady state condition within the period of measurement about at 400 seconds. Fig.4(b) is the next higher concentration of sensitive film. We observe that the response reach to the steady state condition about at 700 seconds. The frequency shift at steady state is between 200 to 300 Hz that is higher than the lowest case. It means that higher concentration sensitive film tends to catch TNT molecules than lower concentration. Off course, the more mass is changed, the more frequency is shifted. The case of Fig.4(c) and Fig.4(d), the response do not seem to reach the steady state value. The response increase with time and try to reach the steady condition. The more concentration film tends to capture more TNT molecule and spend more time to steady state. We expect that the frequency shift should be higher than low concentration film at steady state condition.

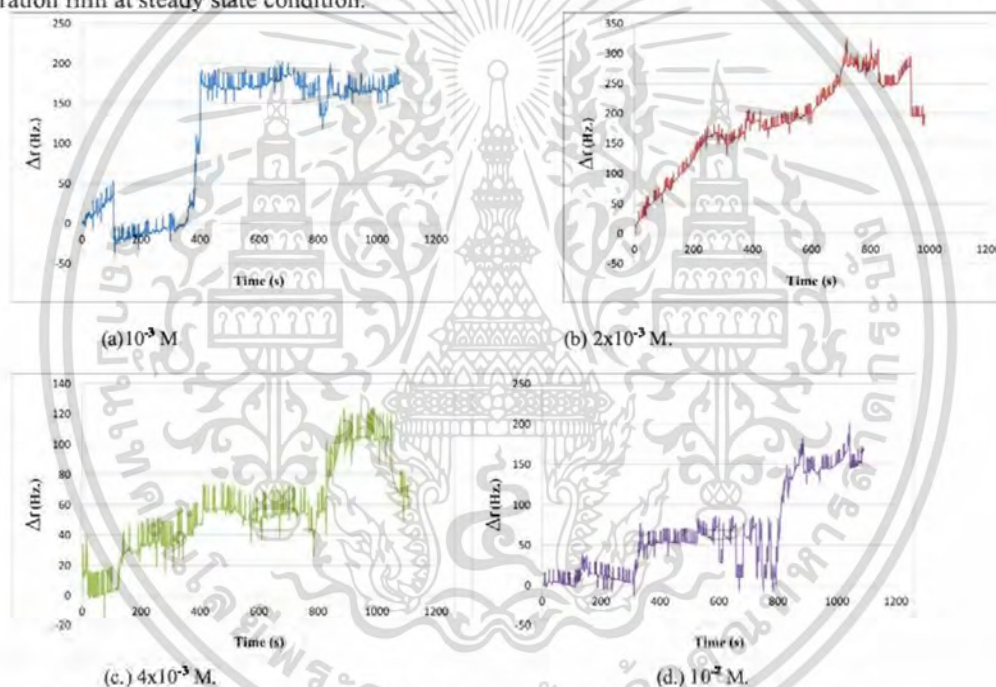


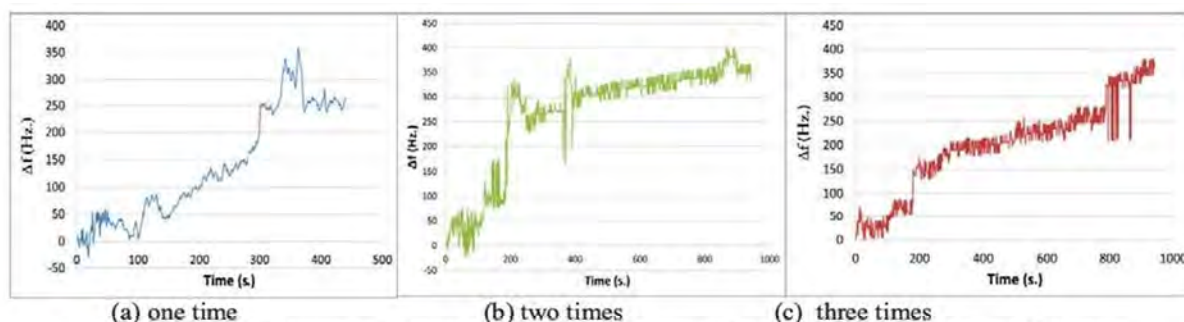
FIGURE 4. The frequency shift responses (Δf) of different concentration of 18-crown-6 ether coated QCM in air mixed TNT vapor.

C. The measurement on coated QCM in variousthicknesses

The method of coating film on the surface in this study is dipped in the solution. It is a very simple way and hardly to control the uniformity. We are trying to determine how to prepare the film for the detection of TNT. A film thickness was control by dipping in a same solution by one time, two times and three times, respectively. The number times of dip, make a more smooth and thick as well. The thickness of a film can calculated from the sauerbrey's equation by use a resonance frequency between normally QCM and the coated QCM to find a mass of a film. The resonance frequency of the normally QCM is 9.834 MHz. and The resonance frequency of the coated QCM in any thickness is 9.823 MHz. , 9.820 MHz. and 9.815 MHz. respectively. That show when we dipped again the frequency shift will increase from a thickness of a film. In the one-time dip, the surface is the most roughness by

020004-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) one time (b) two times (c) three times
FIGURE 5. The frequency shift responses (Δf) of different thickness of film on QCM measured in air mixed TNT vapor.

inspection. The frequency response will going to the steady state quickly than other thickness. The sensitive material should be less than other thickness. The response time reaches to the steady state condition within the period of measurement about at 400 seconds. The frequency shift is in the range of 250-300 Hz. In the case of two and the three times, the surface are smoother than the case of one time. The frequency shift is in the range of 350-400 Hz. The response times reach to the steady state condition and take more than 1,200 second. It means that higher smoothness sensitive film tends to capture TNT molecules than a roughness films.

CONCLUSION

The application of organic film 18-crown 6-ether for TNT detection by using quartz crystal microbalance QCM have been presented for the first time. The film was coated on the electrode of quartz crystal AT-cut type by dip on a solution. The film enhances to capture the molecule of TNT vapor in the air and change the mass which causes the resonance frequency shift. The frequency shift and time to steady state is related to the concentration and thickness/smoothness of film. The high concentration and thickness/smoothness tend to capture more TNT molecule and spend more time to reach steady state condition. The high concentration tends to generate high frequency shift because of the high addition mass which is according to the Sauerbrey's equation.

ACKNOWLEDGMENTS

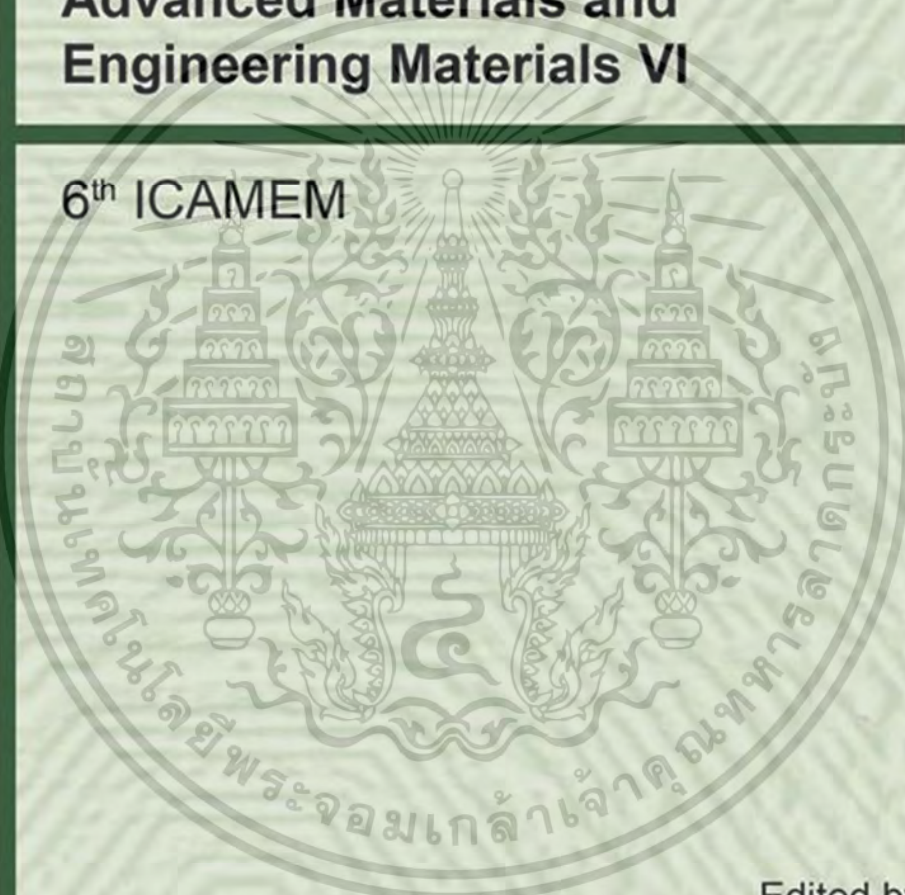
The authors would like to thank Asst. Prof. Polsart Lertprasert for supplying the TNT, Asst. Prof. Dr. Pichit Sudta for guidance on the chemistry theory and thank to Assoc. Prof. Somsak Cheirsirikul for measurement instrument.

REFERENCES

1. Mika Harbeck, Dilek D. Erbahar, Ilke Gürol, Emel Musluoğlu, "Chemical Sensing of Explosives in Water," Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2010
2. S. Kurosawa ; Dae-Sang Han ; Jong-Won Park ; H. Aizawa ; M. Yoshimoto ; C. Nakamura ; J. Miyake ; Sang-Mok Chang, " Gas sensor using high-frequency quartz crystal microbalance," Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, 2001. Proceedings of the 2001 IEEE International, 2001 , pp.462-464
3. M. Guillemot, F. Dayber, P. Montméat*, C. Barthet, P. Prené, "Detection of explosives vapours on quartz crystal microbalances: generation of very low-concentrated vapours for sensors calibration ," *Procedia Chemistry* Volume 1, Issue 1, September 2009, pp. 967-970
4. M. Guillemot, F. Dayber, P. Montméat*, C. Barthet, P. Prené, "Detection of explosives vapours using a multi-quartz crystal microbalance system," *Procedia Chemistry* Volume 5, 2010, pp. 472-475
5. Arcady P. Gershanik† and Yehuda Zeiri, "Sublimation Rate of TNT Microcrystals in Air," *J. Phys. Chem. A* 2010, 114, pp.12403–12410
6. E. Bentes, H.L.Gomes, P.Stallinga and L. Moura, "Detection of explosive vapors using organic thin-film transistors," *SENSORS*, 2004
7. Edison B. Gibelli a, Jiang Kai b,c, Ercules E.S. Teotonio d, Oscar L. Malta e, Maria C.F.C. Felintoa, Hermi F. Brito b, "Photoluminescent PMMA polymer films doped with Eu³⁺--diketonate crown ether complex," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 251, 2013, pp. 154–159

Advanced Materials and Engineering Materials VI

6th ICAMEM



Edited by
Katsuyuki Kida and Koshiro Mizobe

TTP TRANS TECH PUBLICATIONS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Evolution Analysis of Mechanical Properties of Marine Submerged Concrete Based on GRA	
C.Y. Liang, C.X. Qian, W.C. Kang and H.C. Chen	316
Effect of Carbon Dioxide Curing on Strength Development of Cement Mortar	
M.G. Lee, W.C. Wang, Y.S. Huang, Y.M. Su and Q.Z. Jiang	323
Numerical Modeling on the Stress-Strain Behavior of Sand via Disturbed State Concept Model	
P.H. Tsai, Y.H. Liang and P.C. Lin	328
Research Progress on the Effect of Stray Current on Properties of Cement-Based Materials in China	
G.N. Li and B.M. Wang	333
Study on the Effect of $[Al_{13}]^{7+}$ over the Free Swelling Ratio of Expansive Soil	
L. Liu, H.L. Yao, Z. Lu, Z.W. Yin, X.W. Luo and R. Fang	341
Effectiveness of Non-Suction Controlled Method of Wetting-Drying Cycles for Unsaturated Compacted Loess Material	
Z. Hu and Y.Z. Cheng	346

Chapter 7: Measurements and Modeling of Materials Properties and Behavior

Preparation of Polyaniline/Cu-BTC Composite and its Sensing Application for Ammonia	
Y.J. Zou, Y. Yin, H.T. Zhang, F. Xu and L.X. Sun	353
Quartz Crystal Microbalance Coated with 18-Crown-6 Ether Film for 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) Vapor Detection	
P. Phuvanatai and T. Phetchakul	358
Study on Methane Adsorption Capacity of Sensor Probe Based on Lead-Free Piezoelectric Resonance Modified by Zeolite X	
J. Du, H.L. Du and Q.L. An	363
New Methodology of Controlling Mechanical Properties of Materials	
R. Kotowski, V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, M.V. Koldaeva, E.A. Petrzhik and P. Tronezyk	369
Molecular Dynamics Simulation of the Variation in the Microstructure of a Polycrystalline Material under Tensile Load	
T. Uehara	375
High-Precision Determination of Residual Stress of As-Sprayed and Ground WC-10Co-4Cr Coating Using Optimized XRD-$\sin^2\psi$ Technique	
M.S. Zoei, M.H. Sadeghi and M. Salchi	381
Three-Dimensional Scanning Hall Probe Microscopy for Final Stage of Crack Growth of Chromium Molybdenum Steel SCM440	
T. Nakashima and K. Kida	386
Measurement Model for Young's Modulus of Axially Functionally Graded Materials	
X.L. Chen, L. Zhang and D.Y. Li	391
Modified Method to Predict Fatigue Crack Shape Based on Empirical Observation	
T. Matsueda and T. Nakashima	396

Chapter 8: Materials and Chemical Technologies in Environmental Engineering

Characterization and Photocatalytic Activity of $SmMnO_3$ Prepared by Sol-Gel Process	
J.Y. Min, L.L. Yu, P.S. Tang and H.F. Chen	403
Synthesis of $TbMnO_3$ by Microwave Assisted Method and its Photocatalytic Activity	
M.M. Jin, C.Y. Long, F.F. Peng, P.S. Tang and H.F. Chen	408
Preparation and Characterization of $Pr_2Ti_2O_7$ by Sol-Gel Process	
C.Y. Long, F.F. Peng, M.M. Jin, P.S. Tang and H.F. Chen	413
Preparation of Nanosized Ni^{2+}-Doped $ErFeO_3$ by Microwave Assisted Process and its Visible-Light Photocatalytic Activity	
L. Fang, Q. Yang, M.Y. Xu, J.W. Cao, P.S. Tang and H.F. Chen	418

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quartz Crystal Microbalance Coated with 18-Crown-6 Ether Film for 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) Vapor Detection

Pavaris Phuvanatai^{1,a*}, Toempong Phetchakul^{2,b}

¹Department of Defence Engineering, Faculty of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
 1 Soi Chalongkrung 1, Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520

²Department of Electronic, Faculty of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
 1 Soi Chalongkrung 1, Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520

^apotetology_98@hotmail.com, ^btoempong.ph@kmitl.ac.th

Keywords: Chemical sensor, Quartz Crystal Microbalance, TNT, Explosive detection, 18-crown-6 ether.

Abstract. The 2, 4, 6- trinitrotoluene (TNT) vapor detection by quartz crystal microbalance (QCM) coated with 18-crown-6 ether film is introduced. The film acts as selective or sensitive layer for detecting TNT molecule. The frequency shift response is depend on the amount of mass of molecule adhere on the coated film surface. In this study, the concentrations of TNT vapor which is related to responses are studied. It shows that the TNT vapor concentration is related to the time for steady state condition and the frequency shift response. The high concentration vapor will increase the frequency shift response but increase the steady state time.

Introduction

At present, the explosives are widely used in military, terrorism and industrial. The 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) is one of the explosive that is used popularly because it can create a blast so well. TNT is a nitroaromatic compound that has made from toluene and nitric acid. It is dangerous when contaminated into the environment if the user does not control. It can contaminate into the water, soil and air [1,2] in the nearby area that it is used. Therefore, the way to control and detect the impact on the environment is so important. It has impact on human health due to the direct effects of these compounds is toxic and carcinogenic [2]. A method to detect 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) vapor is quartz crystal microbalance [3]. This technique is the part of explosive scent tracing. It is suitable for use in the detection on the sample form the suspect area that has a contamination. The QCM which is a type of mass sensor for applying to 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) detection by coated with a sensitive film has been reported [4, 5]. Recently, QCM coated with 18-crown-6 ether which has chemical properties that can detect the TNT has been already presented by the authors [6]. In this research, the concentration of TNT vapor diluted in air will be studied.

Sensitive Material and Experimental Preparation

1. Sensitive Material

The organic film that made from a polymer and the organic substance such as Poly (methyl methacrylate) and 18-crown-6 as a sensitive material has structure which is shown in Fig. 1(a).

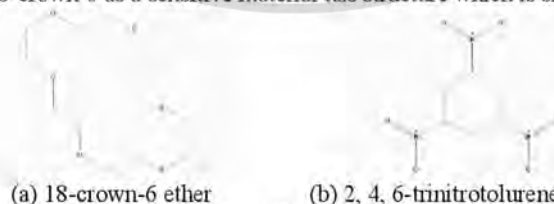


Figure 1. Structure of 18-crown-6 ether and 2, 4, 6-trinitrotoluene (TNT)

The solution of 18-crown-6 ether is prepared for 2×10^{-3} M and coated by dipping the QCM into the solution. The 2, 4, 6-trinitrotoluene (TNT) is a nitro aromatic compound that has the ions from the unsaturated valence electrons characteristics. The 18-crown-6 ether has a function to make a bond for some ions so the two substances can hold together. The structure of TNT is shown in Fig.1 (b).

2. The QCM system for measurement

QCM is a mass sensor that measuring the change in frequency of a quartz crystal resonator. When a mass stuck on the surface of QCM, the frequency will be changed. The relation of the decrease in resonant frequency or frequency shift (Δf) from the added mass (Δm) on the surface is according to Sauerbrey's equation

$$\Delta f = - \frac{2f_0^2}{A\sqrt{\rho_q\mu_q}} \Delta m \quad (1)$$

where f_0 is the resonant frequency, A is the active electrode area, ρ_q is the density, μ_q is the shear modulus. In particular for an AT-cut quartz crystal we have $\rho_q = 2.643 \text{ g/cm}^3$, $\mu_q = 2.947 \times 10^{11} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$

The system for measurement is shown in Fig. 2. That includes with a 1.1 liter chamber with the QCM on the top which works with oscillator circuit for generated signal to it. The frequency counter and computer are used to read record and display the shifted frequency responses that change from the quantity of TNT that we put inside the chamber. This research will study about the frequency shift of QCM that is coated with 18-crown-6 ether film as sensitive layer. It measures TNT vapor in air at room temperature and atmospheric pressure.

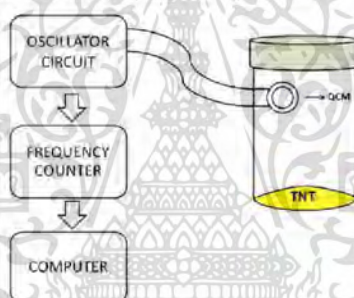


Figure 2. The QCM System for measurement

Results and Discussion

The experimental is to study how coated film 18-crown-6 ether response to the concentration of TNT vapor in air at atmospheric pressure. However, we have to prove that this film can select to catch only the TNT molecule in air or sensitive to TNT molecule than the other gas molecule. The experiment divide in 2 parts, the first part is to study the TNT molecule selectivity among others gas in air. The second part is to study the sensitivity of coated QCM device to the TNT vapor concentration mixed in air. The output response of QCM device is frequency shift that is the frequency shift from the fundamental frequency before detecting the purpose molecule. Another output is the time response of device that is the time spending for steady state condition.

1. The measurement of QCM coated with 18-crown-6 ether as sensitive material film in air and in TNT vapor mixed in air.

The response of QCM coated with 18-crown-6 ether in air and in TNT vapor mixed in air is shown in 'Figure 3. In air, the device seem to cannot capture the molecule of gas in air that it can be observed the very low frequency shift and the wide vary in fundamental frequency or unstable. This frequency shift response is still better than in the case of uncoated film. In air mixed TNT vapor, the frequency shift of device increases further than in air many time and more stable that prove that the

coated film affects to the ability of molecule capture. The frequency shift increases with time and reach to the steady state condition. In Fig. 3, the response time is around 700 seconds. This value depends on the method for preparing the film.

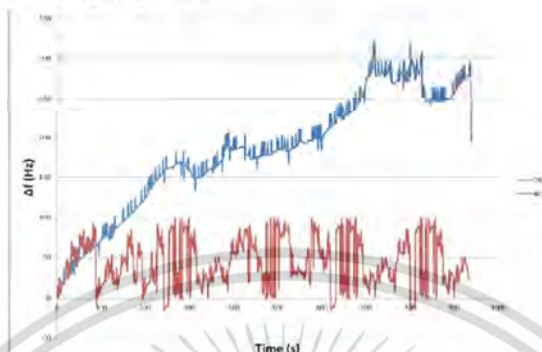


Figure 3. The frequency shift response (Δf) of coated QCM in air and in air mixed with TNT vapor 2. The measurement with QCM coated with 18-crown-6 ether as sensitive material film in air mixed various TNT concentration.

The frequency shift response with time of QCM that coated with 18-crown-6-ether as sensitive film in several of TNT vapor concentration mixed in air is shown in Fig.4. The concentration is varied by varying the amount of TNT in the chamber. In this study, we use TNT in 2, 4, 6, 8 and 10 grams for various TNT vapor concentration. The responses are measured in air at atmospheric pressure at room temperature without any carrying gas. In Fig.4(a), the amount of TNT 2 g, the frequency shift increases with time to the maximum value about 75 Hz and then decreases with time again. The steady state condition is not so clear. In Fig.4(b), the amount of TNT 4 g, the frequency shift response increases with time to the maximum value about 380 Hz and can observe the steady state condition. The response time for steady state is about 900 seconds. In similarly, in the case of 6 and 8 g of TNT, the frequency shift responses increase with time to the maximum values about 425 and 450 Hz, the response times are 1000 and 1500 seconds, respectively. The steady state condition can be observed. And the last condition for TNT 10 g, the frequency shift response also increases with time but it cannot be observed the steady state within the measurement range 2,500 seconds at frequency shift 500 Hz. From the experimental results, the frequency shift increases with time means that the 18-crown-6 ether film which coated on the surface of QCM can catch the TNT molecule in air. The amount of TNT molecule in vapor phase is captured by the sensitive film and the total mass increases with time causes frequency shift increases with time. The time response for steady state increases with the TNT concentration even though it cannot be observed in the case of 2 and 10 g in the measurement time range. It says that high concentration will be more capture than the lower by sensitive film. The frequency shift follows the captured TNT molecule mass on surface with time. The steady state condition depends on the concentration vapor. In the case of 2 g of TNT, it is the case of lowest concentration in this study and cannot show the steady state condition clearly. By the way in the case of 10 g, it also cannot be observed the steady state condition in the measurement time range because the high concentration can capture more TNT molecule and spends more time for steady state.

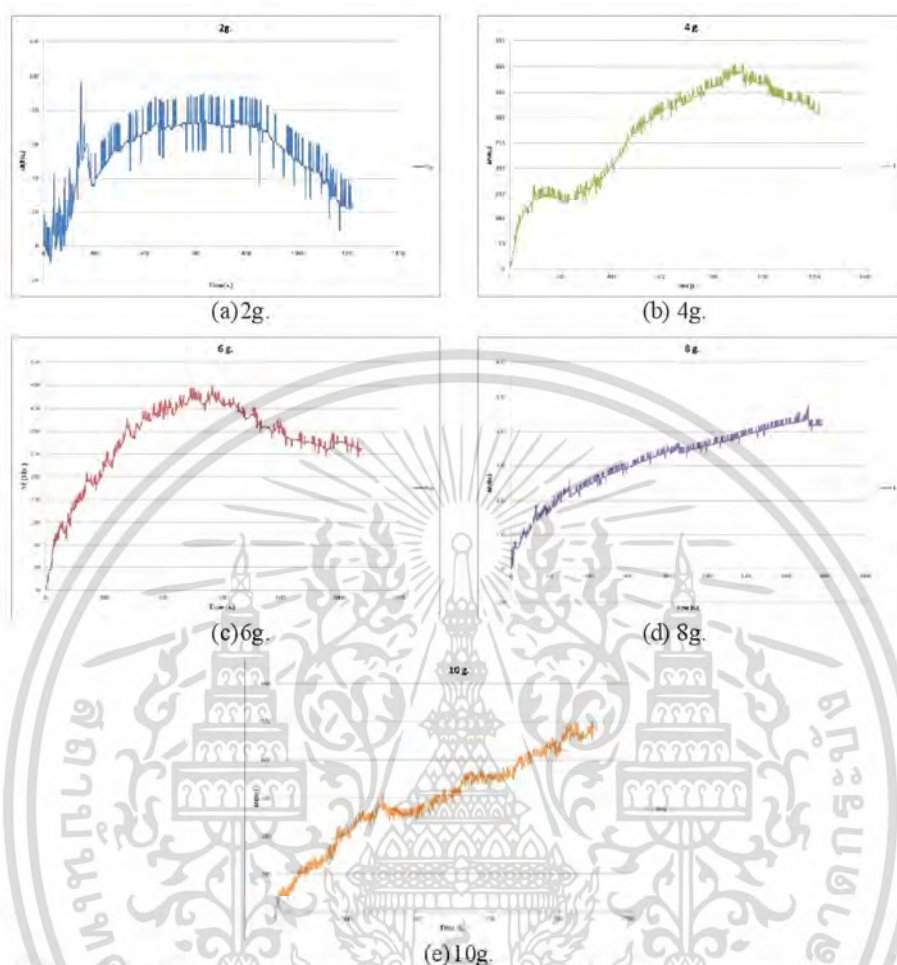


Figure 4. The frequency shift response (Δf) of coated QCM in air with various TNT vapor concentration by amount of TNT in grams

Summary

The QCM coated 18-crown-6 ether film as sensitive or selective layer for TNT vapor detection is introduced. The film helps QCM to catch molecule of TNT in vapor phase in air which uncoated QCM cannot do it. The frequency shift response is stable and has a maximum value and steady state. The concentration of TNT vapor influence to the frequency shift response and time response. The higher concentration increases the frequency shift and time response. The frequency shift increase with time and TNT vapor concentration and has a steady state value. The time response is proportional to TNT vapor concentration. The relation is according to Sauerbrey's equation.

Acknowledgements

The authors would like to thank Asst. Prof. Polsart Lertprasert for supplying the TNT, Asst. Prof. Dr. Pichit Sudta for guidance on the chemistry theory and thank to Assoc. Prof. Somsak Cheirsinkul for measurement instrument.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

References

- [1] Arcady P. Gershanik and Yehuda Zeiri, "Sublimation Rate of TNT Microcrystals in Air," *J. Phys. Chem. A* 2010, 114, pp.12403–12410.
- [2] Mika Harbeck, Dilek D. Erbahar, Ilke Gürol, Emel Musluoglu, "Chemical Sensing of Explosives in Water," *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2010.
- [3] M. Guillemot, F. Dayber, P. Montméat*, C. Barthet, P. Prené, "Detection of explosives vapors using a multi-quartz crystal microbalance system," *Procedia Chemistry Volume 5*, 2010, pp. 472-475.
- [4] E. Bentes, H.L.Gomes, P.Stallinga and L. Moura, "Detection of explosive vapors using organic thin-film transistors," *SENSORS*, 2004.
- [5] Edison B. Gibelli a, Jiang Kai b,c, Ercules E.S. Teotonio d, Oscar L. Malta e, Maria C.F.C. Felinto a, Hermi F. Brito b," Photoluminescent PMMA polymer films doped with Eu³⁺--diketonate crown ether complex," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 251, 2013, pp. 154–159.
- [6] Pavaris Phuvanatai and Toempong Phetchakul, "A using of Quartz Crystal Microbalance for 2, 4, 6-Trinitrotolurene (TNT) Vapor Detection," *The Third Asian Conference On Defence Technology 2017(3RD ACDT)*, 2017.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายปวิศ ภูวนไท
 วัน เดือน ปีเกิด 21 กุมภาพันธ์ 2533 ที่กรุงเทพมหานคร
 ที่อยู่ 466 ซอยลาดพร้าว64แยก4 แขวงวังทองหลาง
 เขตวังทองหลาง กรุงเทพฯ 10310 โทร.081-454-0301
 ประวัติการศึกษา 2554 วิทยาศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้