

การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักในการระบุชนิดสารระเบิดโดยอาศัย
เทคนิคจมูกอิเล็กทรอนิกส์และเทคนิคการวัดแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

APPLICATION OF PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS TO IDENTIFY EXPLOSIVE
MATERIALS BY USING ELECTRONIC NOSE AND X-RAY DIFFRACTION.



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-NT-M-001-008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Application of Principal Component Analysis to identify explosive materials by using Electronic nose and X-ray diffraction



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักในการระบุชนิดสารระเบิดโดยอาศัยเทคนิค
จุมุกอิเล็กทรอนิกส์และเทคนิคการวัดแบบเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

Thesis Title Application of Principal Component Analysis to Identify Explosive Materials by
using Electronic Nose and X-ray Diffraction

นักศึกษา นางสาวณรัชชอร์ สายโสภา

รหัสประจำตัว 51064605

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สิรพัฒน์ ประโทนเทพ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม -

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม -

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2013-NT-M-001-008

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ประภาช	อศศกสิมาพันธุ์	
ดร.สิรพัฒน์	ประโทนเทพ	
ดร.ดารินี	พรหมโยธิน	
ดร.วินัดดา	วงศ์วิริยะพันธ์	
ผศ.ดร.รัชภาคย์	จิตต์อารี	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 26 มีนาคม พ.ศ. 2556 เวลา 14.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ อาคารวิจัยนาโนเทคโนโลยีสิรินธร ชั้น 1 ห้องประชุมนาโน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังรับรองแล้ว

(ศาสตราจารย์ ดร.จิติ หนูแก้ว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เป็นทรัพย์สินของสถาบันฯ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารฉบับนี้ที่มีการนำไปใช้

วันที่..... เดือน..... พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักในการระบุชนิดสารระเบิดโดยอาศัยเทคนิคจุ่มกอิเล็กทรอนิกส์และเทคนิคการวัดแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

นักศึกษา

นางสาว ณรัชชอร์ สายโสภาก

รหัสประจำตัว

51064605

ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา

นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

พ.ศ.

2555

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร.สิริพัฒน์ ประโทนเทพ

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์ผลแบบการหาองค์ประกอบหลัก (Principle Component Analysis, PCA) ซึ่งเป็นการจำแนกรูปแบบ (Pattern recognition) ของข้อมูล เพื่อต้องการระบุชนิดของวัตถุระเบิดและไม่ใช่วัตถุระเบิดที่เก็บได้ในสถานที่เกิดเหตุ โดยมีจุดประสงค์ดังนี้คือไม่ต้องมีการเตรียมสาร มีการตรวจวิเคราะห์ผลได้อย่างรวดเร็วและไม่ต้องคำนึงปริมาณของสาร งานวิจัยนี้จึงได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 เป็นเทคนิคจุ่มกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic nose, E-nose) เนื่องจากวัตถุระเบิดมีกลิ่นน้อยมาก การวัดแบบปกติไม่สามารถวัดได้จึงได้ทำการวัดที่อุณหภูมิ 30, 50, 100, 150 และ 200 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถระบุชนิดของวัตถุระเบิดและไม่ใช่วัตถุระเบิดได้ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ส่วนที่ 2 เป็นการนำเทคนิคการวัดแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) เป็นเครื่องมือที่มีใช้ในห้องปฏิบัติการทั่วไปแต่ใช้เวลาในการตรวจวิเคราะห์นาน ในการทดลองนี้ได้นำผลมาทำการวิเคราะห์และทำการทดสอบเวลาที่ใช้ในการวัดที่ 2 และ 30 นาที เพื่อการวิเคราะห์ที่รวดเร็วจึงใช้การวัดที่เวลา 2 นาทีมาทำการจัดรูปแบบ พบว่าสามารถระบุชนิดของวัตถุระเบิดและไม่ใช่วัตถุระเบิดได้

คำสำคัญ : จุ่มกอิเล็กทรอนิกส์, การหาองค์ประกอบหลัก, เทคนิคการวัดแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Application of Principal Component Analysis to identify explosive materials by using Electronic nose and X-ray diffraction
Student	Miss Naratorn Saysopa
Student ID	51064605
Degree	Master of Science
Program	Nanoscience and Nanotechnology
Year	2012
Thesis Advisor	Dr. Sirapat Pratontep

ABSTRACT

The objective of this research is to classify of explosive and non-explosive materials by principle component analysis (PCA). The method is to develop a qualitative measurement system for material, sample preparation and fast analysis. This research has been divided into two parts. In the first part, Electronic nose (E-nose) was employed to discriminate the type of materials from responses of various commercial gas sensor to the vapor of the test materials at elevated (30, 50, 100, 150 and 200°C). The results indicate that the electronic nose is able to identify explosive materials at the burning temperature of 200°C. The second part was an experiment to classify materials by using XRD in conjunction with PCA. XRD spectral data were preprocessed and analyzed by PCA. The effect of XRD scan duration (2 min and 30 min) was investigated on the ability to discriminate materials types. The results indicate that the XRD scans of 2 min are sufficient to distinguish explosive types. The results also show that the normalization of the data by their standard deviation enhances the data discrimination.

Keywords: electronic nose, principal component analysis (PCA), X-Ray Diffraction (XRD)

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความกรุณาจาก ดร.สิริพัฒน์ ประโทนเทพ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นผู้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ทั้งทางด้านทฤษฎี และด้านปฏิบัติ พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในงานวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์ที่ทำให้ลูกศิษย์คนนี้ได้ประสบความสำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว ผู้ให้โอกาสและคำชี้แนะแนวทางการศึกษา และขอขอบคุณอาจารย์ในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความรู้จนประสบความสำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ พี่น้อง ในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบคุณ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้ให้ทุนในการศึกษาและให้การสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ พี่นเอกชาญวิทย์ ราชธนบริหารและหน่วยทำลายล้างวัตถุระเบิด กรมสรรพาวุธทหารบกทุกท่าน ที่ให้องค์ความรู้เกี่ยวกับงานวิจัยครั้งนี้ ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบคุณ สถาบันนิติวิทยาศาสตร์ ที่ให้โอกาสและสนับสนุนทางการศึกษา
สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง และขอบคุณพี่ต้น ผู้คอยให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการศึกษาอันมีค่ายิ่ง จนมีข้าพเจ้าในวันนี้ คุณประโยชน์ของวิทยานิพนธ์นี้ ขออุทิศแด่ครูบาอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ณรัชชอร์ สายโสภา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
1.5 รายละเอียดของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 สารวัตถุระเบิด.....	4
2.1.1 คุณลักษณะสารวัตถุระเบิด.....	4
2.2 สารวัตถุระเบิดที่ใช้ในการทดสอบ.....	6
2.2.1 Trinitrotoluene (TNT).....	6
2.2.2 Clotrimethylenetrinitramine (RDX).....	7
2.3 ตัวอย่างวิธีการตรวจวิเคราะห์สาร.....	8
2.3.1.วิเคราะห์ทางด้านแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-VIS Spectroscopy Techniques).....	8
2.3.2.การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุ.....	10
1.) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิกซอร์พชั่นสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS).....	10
2.) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซ์-เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (X-ray Fluorescence Spectroscopy).....	12
3.) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคลิควิดโครมาโทกราฟี (Liquid Chromatography, LC หรือHPLC).....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography / Mass Spectrometry, GC/MS).....	14
5.) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP).....	16
6.) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไอออนสแกน (ION Scan).....	17
2.3.3. วิเคราะห์หาความเป็นผลึกโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD).....	18
2.3.4. การหาพันธะทางเคมี.....	20
1.) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR).....	20
2.) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy).....	21
2.3.5. การวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพเทคนิคจมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic nose, E-nose).....	22
2.3.6. วิเคราะห์การดูลักษณะทางกายภาพ.....	23
1.) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบสแกน (Scanning Electron Microscope, SEM).....	23
2.) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการทดสอบสี (Color test)	23
2.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal components analysis, PCA).....	23
บทที่ 3 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคจมูกอิเล็กทรอนิกส์.....	27
3.1 การตรวจสอบคุณสมบัติของสารวัตถุระเบิดเพื่อใช้ในการวางแผนการ ทดสอบสารที่ คุณสมบัติต่างๆ.....	31
3.2 หลักการทำงานของจมูกอิเล็กทรอนิกส์.....	33
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	35
3.4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	40
บทที่ 4 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	53
4.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	54
4.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	58
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
อ้างอิง.....	70
ประวัติผู้เขียน.....	74
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	75



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงชนิดของสารวัตถุระเบิดจำแนกตามลักษณะของการระเบิด.....	6
2.2 โครงสร้างของ Trinitrotoluene (TNT).....	7
2.3 โครงสร้างของ Cyclonite (RDX).....	7
2.4 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อกระทบระนาบของผลึก.....	19
2.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคPCA.....	26
3.1 แสดงการเปรียบเทียบระบบการทำงานของมนุษย์และจมูกอิเล็กทรอนิกส์.....	29
3.2 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) รุ่นDSC823 mettler tolede	33
3.3 แผนภาพแสดงระบบการทำงานของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นแบบง่าย.....	34
3.4 แผนภาพแสดงการทำงานของจมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Nose, E-nose).....	34
3.5 แสดงผลการวัดหาค่าจุดหลอมเหลวและจุดเดือดของสาร Cassava powder, RDX, TNT และ Urea fertilizer ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC).....	36
3.6 แสดงตัวอย่างถ้วยอลูมิเนียมฟลอยด์ที่ใช้ในการวัด.....	37
3.7 แสดงตัวอย่างโปรแกรม Lab Viewที่ใช้ในการวัดและวิเคราะห์ผล.....	38
3.8 กราฟตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างผลแรงดันสัญญาณของเซ็นเซอร์ ขณะตรวจวัดสาร TNT, RDX และ Cassava powder โดย TGS 2602 (A-B) และ TGS2201/1 (C-D) ที่อุณหภูมิ 100 และ 150 °C ตามลำดับ.....	39
3.9 แผนภาพสรุปขั้นตอนการวัดสารด้วยเทคนิคจมูกอิเล็กทรอนิกส์.....	39
3.10 แสดงกราฟ Principal Component Analysis (PCA) score plotของการตรวจวัดสารTNT, RDX และ Cassava powder ที่อุณหภูมิ 30(A), 50(B), 100(C), 150(D) และ 200°C (E) ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์แบบที่ 1 การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์แต่ละตัว กรณีสารบริสุทธิ์.....	41
3.11 กราฟ Principal Component Analysis (PCA) Loading plot ของเซ็นเซอร์ TGS2610, 2602, 2201/1, 2201/2 และ 2620 ที่อุณหภูมิ 30(A), 50(B), 100(C), 150(D) และ 200°C (E) ตามลำดับ.....	43
3.12 กราฟแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่าง PCA score plot ของสาร (A) และ loading plot ของเซ็นเซอร์ (B)	44
3.13 กราฟ Principal Component Analysis (PCA) score plot ของการตรวจวัดสาร TNT, RDX และ Cassava powder ที่อุณหภูมิ 30(A), 50(B), 100(C), 150(D), 200 °C (E) ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์แบบที่ 2 การไม่หารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์ กรณีสารบริสุทธิ์.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 (A) ตัวอย่างกราฟที่นำมาวิเคราะห์ และ (B) ระยะห่างระหว่างสาร TNT และ Cassava powder.....	47
3.15 กราฟ Principal Component Analysis (PCA) score plot ของการตรวจวัดสาร TNT100, Cassava powder100, TNT ในอัตราส่วน 20, 40, 50, 60 และ 80 ที่ 200°C จากผลการวิเคราะห์แบบที่ 1 ไม่หารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์ กรณีสารบริสุทธิ์ ตามลำดับ.....	48
3.16 ค่าระยะห่างระหว่างTNT กับ Cassava powder.....	49
3.17 กราฟ Principal Component Analysis (PCA) score plot ของการตรวจวัดสาร TNT100, Cassava powder100, TNT ในอัตราส่วน 20, 40, 50, 60 และ 80 ที่ 200°C ตามลำดับจากผลการวิเคราะห์แบบที่ 2 การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์ กรณีสารปนเปื้อน.....	50
3.18 ค่าระยะห่างระหว่างTNT กับ Cassava powder.....	51
4.1 เครื่อง X-ray diffraction รุ่น D8 discovery with GADDS.....	54
4.2 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบกราฟของCassava powderและTNTที่ 30 นาที (A1, B1) และ 2 นาที (A2, B2) ตามลำดับ.....	55
4.3 แสดงตัวอย่างกราฟที่นำไปวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิค PCA	56
4.4 กราฟ PCA score plotของการตรวจวัดสาร Cassava powder, TNT, RDX, PETN และ Urea ผลการทดลองวิธีที่ 1 การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสาร (intensity) กรณีสารบริสุทธิ์ ดังสมการ ที่ 4.3	58
4.5 กราฟ PCA score plotของการตรวจวัดสาร Cassava powder, TNT, RDX, PETN และ Urea ผลการทดลองวิธีที่ 2 การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสาร (intensity) กรณีสารบริสุทธิ์ ดังสมการ ที่ 4.4.....	59
4.6 กราฟ PCA loading plotของสารcassava powder, TNT, RDX, PETN และ Urea เมื่อวิเคราะห์ผลแบบที่ 1ไม่การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสาร (intensity) กรณีสารบริสุทธิ์ ดังสมการที่ 4.4.....	60
4.7 แสดงกราฟ XRD ของสาร TNT กับ Cassava powder ในอัตรา 20, 40, 50, 60 และ 80.....	61

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 กราฟ PCA score plotของสาร TNT กับ Cassava powder ในอัตรา 20, 40, 50, 60 และ 80 เมื่อวิเคราะห์ผลแบบที่ 2 ไม่การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสาร (intensity) ดังสมการที่ 4.4 กรณีปนเปื้อน	63
4.11 ค่าระยะห่างระหว่างสาร TNT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กับ Cassava powder (A,B) และ ระยะห่างจาก PC2 กับ Cassava powder (C,D).....	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

รูปที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติของเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจ.....	35
3.2 สรุปผลการทดลองหาจุดเดือดและจุดหลอมเหลวด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC).....	37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดXอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การก่อการร้ายเป็นปัญหาสำคัญซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของความขัดแย้งทั้งภายในและภายนอกของแต่ละประเทศ ในประเทศไทยก็เช่นเดียวกันพบมากทางภาคใต้ซึ่งได้แก่ จังหวัดปัตตานี, ยะลา และ นราธิวาส ซึ่งเป็นการกระทำเพื่อจุดประสงค์ทางศาสนา การเมืองหรืออุดมการณ์อย่างใดอย่างหนึ่ง ส่วนใหญ่มักจะก่อเหตุด้วยการใช้ระเบิด จากการศึกษาชนิดของสารวัตถุระเบิดและกรณีที่มีสารปนเปื้อนกับสารวัตถุระเบิดเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในด้านนิติวิทยาศาสตร์ การระบุชนิดของระเบิด อาจจะบอกได้ว่าเกิดจากขบวนการก่อการร้ายกลุ่มใด เทคนิคที่นำมาใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาสารวัตถุระเบิดมีมากมาย เช่น เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometry (FTIR), Raman Spectrometry, Gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS), Gas chromatography/Thermal energy analyzer (GC/TEA), High-performance liquid chromatography (HPLC), Ion mobility spectrometry (IMS), UV-VIS spectrophotometry, Electronic nose (E-nose) หรือ X-ray diffraction (XRD) เป็นต้น ซึ่งเทคนิคโดยทั่วไปนั้นจะพบปัญหาใช้เวลาในการตรวจวิเคราะห์ผลนาน ถ้ามีสารปนเปื้อนบางเทคนิคจะไม่สามารถตรวจพบได้ และใช้เวลาในการเตรียมสารตัวอย่างที่ยุ่งยากและนาน อาจจะทำให้เป้าหมายในการจับกุมหัวตัวต้นหรือก่อเหตุซ้ำได้ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าเทคนิคการตรวจวิเคราะห์หาสารวัตถุระเบิดด้วยเทคนิคต่างๆว่ามีเทคนิคใดบ้างสามารถใช้เวลาในการตรวจวิเคราะห์ผลโดยใช้เวลาน้อยที่สุดและไม่ต้องมีการเตรียมสารให้ยุ่งยาก

จากการศึกษาเทคนิคต่างๆ พบว่าเทคนิคจมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic nose, E-nose) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เลียนแบบการทำงานของจมูกมนุษย์โดยจะกล่าวถึงในบทที่ 2 เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ไม่ต้องมีการเตรียมสารให้ยุ่งยาก มีการแยกชนิดของสารออกจากกันโดยไม่ต้องคำนึงปริมาณของสาร และมีการตรวจวิเคราะห์ผลได้อย่างรวดเร็ว ในการวิเคราะห์ผลจะใช้หลักการวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพที่ดูแพทเทิร์น (Pattern recognition) ของแต่ละกลิ่นจดจำไว้เพื่อทำการเปรียบเทียบความเหมือนกันหรือต่างกันของกลิ่นที่คล้ายกับการจดจำกลิ่นของมนุษย์ ซึ่งเรียกว่า การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle Component Analysis, PCA) และจากการศึกษาเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเทคนิคที่มีข้อดีคือไม่ต้องมีการเตรียมสารให้ยุ่งยากแต่ใช้เวลาในการตรวจวิเคราะห์ผลนาน จึงมีแนวคิดหากนำวิธีการวิเคราะห์ผลแบบการจดจำรูปแบบ (Pattern recognition) มาประยุกต์ใช้ในเทคนิคนี้น่าจะใช้เวลาในการวิเคราะห์ผลได้รวดเร็วขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้มีความสนใจศึกษาการตรวจวิเคราะห์ระบุชนิดของสารวัตถุระเบิดและไม่ใช่สารวัตถุระเบิดด้วยเทคนิคจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์และนำวิธีการวิเคราะห์ผลแบบการจดจำรูปแบบ (Pattern recognition) มาประยุกต์ใช้ในการตรวจด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) ซึ่งเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายแต่ใช้เวลาในการตรวจวิเคราะห์นาน ข้อเสียในกรณีที่มีสารปนเปื้อนบางครั้งไม่สามารถวิเคราะห์ผล เมื่อใช้วิธีการวิเคราะห์ผลแบบการจดจำรูปแบบสามารถแยกชนิดของสารวัตถุระเบิดโดยใช้เวลาในการวิเคราะห์ไม่นานได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการตรวจวิเคราะห์หาการแยกชนิดของสารวัตถุระเบิด Trinitrotoluene (TNT) และ Clotrimethylenetrinitramine หรือ Cyclonite (RDX) ด้วยเทคนิคจุ่มก๊อเล็กทรอนิกส์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการวิเคราะห์ผลแบบการจดจำรูปแบบ (Pattern recognition) ในกรณีที่มีสารเจือปน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการนำวิธีการวิเคราะห์ผลแบบการจดจำรูปแบบ (Pattern recognition) มาประยุกต์ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-RAY Diffraction, XRD)
- 1.2.4 ต้องการลดขั้นตอนในการเตรียมสารตัวอย่างและเพื่อการวิเคราะห์ผลที่รวดเร็ว

1.3 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับเซนเซอร์และสารวัตถุระเบิด
- 1.3.2 ศึกษาการวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis)
- 1.3.3 สามารถนำเทคนิคการจดจำรูปแบบ (Pattern recognition) ใช้ร่วมกับผลการวัดด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในการวิเคราะห์ผลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 สามารถใช้ความรู้ความสามารถจากงานวิจัยไปเชื่อมโยงกับงานพิสูจน์หลักฐานได้
- 1.4.2 สามารถระบุชนิดของสารวัตถุระเบิดและไม่ใช่สารวัตถุระเบิดได้อย่างรวดเร็ว
- 1.4.3 สามารถลดขั้นตอนในการเตรียมสาร
- 1.4.3 สามารถวิเคราะห์ถึงปัญหาและข้อจำกัดของงานวิจัยได้

1.5 รายละเอียดของงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย สมมติฐานของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยและรายละเอียดของงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยจะมีการกล่าวถึงประวัติความเป็นมาและคุณสมบัติของสารวัตถุระเบิด รวมทั้งกล่าวถึงเทคนิคในการตรวจวิเคราะห์สารวัตถุระเบิด

บทที่ 3 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคจัมูกอิล็กทรอนิกส์ โดยจะกล่าวถึงขั้นตอนการตรวจรวมทั้งผลการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

บทที่ 4 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ได้กล่าวถึงขั้นตอนการตรวจวัดและการนำวิธีนำเทคนิคการจดจำรูปแบบ (Pattern recognition) มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะของงานวิจัยทั้งหมด

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณลักษณะและคุณสมบัติของสารวัตถุระเบิดที่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างไร รวมทั้งกล่าวถึงเทคนิคที่สามารถตรวจวิเคราะห์สารวัตถุระเบิดได้มีเทคนิคใดบ้าง

2.1 สารวัตถุระเบิด

2.1.1 คุณลักษณะสารวัตถุระเบิด

2.1.1.1. การระเบิด (Explosion) คือ การปล่อยพลังงานออกมาอย่างรวดเร็วและรุนแรง การระเบิดมี 3 แบบ [1] คือ

1) การระเบิดแบบกลไก (Mechanical Explosions) เป็นการระเบิดที่เกิดจากแรงดันภายในภาชนะเพิ่มขึ้นจนภาชนะไม่สามารถทนแรงดันภายในได้ จึงเกิดการระเบิดอย่างเฉียบพลันและรุนแรง เช่น ยางรถยนต์ระเบิด, ถังอัดลมระเบิด เป็นต้น

2) การระเบิดแบบเคมี (Chemical Explosions) เป็นการระเบิดที่เกิดจากสารเคมี ซึ่งเมื่อถูกพลังงานที่เหมาะสมมากจะทำให้เกิดการสลายตัวอย่างฉับพลันและรุนแรง ทำให้เกิดความร้อน ความดัน และแก๊สจำนวนมาก

3) การระเบิดแบบปรมาณู (Nuclear Explosions) เป็นการระเบิดที่เกิดจากการรวมตัวหรือแยกตัวของอะตอมในนิวเคลียร์ แล้วปล่อยพลังงานจำนวนมากออกมา

2.1.1.2. คุณสมบัติของการระเบิด การระเบิดจะเกิดแรงดันขึ้น 2 ช่วง คือ ช่วงแรงดันออก (Positive pressure phase) และ ช่วงแรงดันเข้า (Negative pressure phase)

1) ช่วงแรงดันออก (Positive pressure phase) เป็นช่วงแรกของการระเบิด การขยายตัวของแก๊สจะทำให้เกิดแรงผลักดันรอบจุดศูนย์กลางของการระเบิด ซึ่งเป็นแรงดันที่สูงมากในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ทำให้รอบจุดศูนย์กลางของการระเบิดเกิดความว่างเปล่า โดยขอบหน้าของความว่างเปล่าจะเป็นคลื่นกระแทก

2) ช่วงแรงดันเข้า (Negative pressure phase) ขณะแก๊สขยายตัวออกไปพร้อมกับแรงดันแล้ว ก็จะทำให้เกิดความว่างเปล่ารอบจุดศูนย์กลางการระเบิดทำให้ความดันลดลง และเมื่อคลื่นกระแทกผ่านไปแล้ว อากาศภายในบรรยากาศก็จะเริ่มไหลเข้ามาแทนที่ความว่างเปล่าอย่างรวดเร็ว เนื่องจากขณะนั้นความดันรอบจุดศูนย์กลางการระเบิดต่ำกว่าความดันบรรยากาศจึงเป็นช่วงของแรงดันเข้า ซึ่งจะกินเวลานานกว่าช่วงแรงดันออกประมาณ 4 เท่าแต่ความรุนแรงต่ำมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.3. วัตถุระเบิด (Explosive) คือ สารเคมีที่เป็นสารประกอบหรือสารผสม ซึ่งเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยความร้อน แรงกระแทกและการเสียดสีที่เหมาะสมจะเกิดการสลายตัวโดยทันที ทำให้เกิดความร้อนและแก๊สที่มีความดันสูงจำนวนมาก การจัดแบ่งประเภทของวัตถุระเบิดถ้าพิจารณาชนิดของวัตถุระเบิดจำแนกตามอำนาจของการระเบิดแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1) ระเบิดแรงต่ำ (Low – Explosives) โดยทั่วไปแล้วปฏิกิริยาการระเบิดวัตถุระเบิดประเภทนี้ จะเป็นการลุกไหม้อย่างรวดเร็ว (deflagration) ทำให้เกิดความร้อนและความดันก๊าซ โดยที่คลื่นกระแทก (shock wave) ที่เกิดจากการระเบิด มีความเร็วในการแล่นผ่านตัววัตถุระเบิดเองน้อยกว่า 1000 เมตรต่อวินาที วัตถุระเบิดที่จัดอยู่ในประเภทนี้ ได้แก่ ดินดำ (black powder), ดินส่งกระสุน, สารไพโรเทคนิค

2) ระเบิดแรงสูง (High – Explosives) โดยทั่วไปแล้วปฏิกิริยาการระเบิดวัตถุระเบิดประเภทนี้ จะเป็นการสลายตัวรวดเร็วของสารระเบิดหรือการปะทุ (Detonation) ทำให้เกิดพลังงานที่เกิดความดันก๊าซและคลื่นกระแทก (shock wave) ที่สูงมาก โดยที่คลื่นกระแทก (shock wave) ความเร็วในการแล่นผ่านตัววัตถุระเบิดเอง มากกว่า 1000 เมตรต่อวินาที วัตถุระเบิดที่จัดอยู่ในประเภทนี้ ได้แก่ TNT , PETN , Dynamite และ RDX

2.1.1.4. ประเภทของการปะทุมี 2 ประเภท ดังนี้

1) การปะทุที่สมบูร์น (High Order Detonation) คือ การปะทุด้วยความเร็วที่ถูกต้องของวัตถุระเบิดแต่ละชนิดซึ่งจะให้อำนาจการระเบิดสูงสุด

2) การปะทุที่ไม่สมบูร์น (Low Order Detonation) คือ การปะทุด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วที่ควรจะเป็นของวัตถุระเบิดชนิดนั้นๆ ทำให้อำนาจการระเบิดต่ำกว่าที่ควรจะเป็นและจะมีส่วนที่เหลืออยู่ (Residue) ของวัตถุระเบิดนั้นในบริเวณที่เกิดการระเบิด

2.1.1.5. ตัวอย่างวัตถุระเบิดแรงต่ำ (Low Explosives)

1) ดินดำ (Black Powder) ใช้ทำฝักแคเวลา (Time fuses or Safety fuses), ตัวจุด (Igniter), ดินส่งกระสุน (Propellant) และใช้ทำระเบิดท่อ (Pipe bombs)

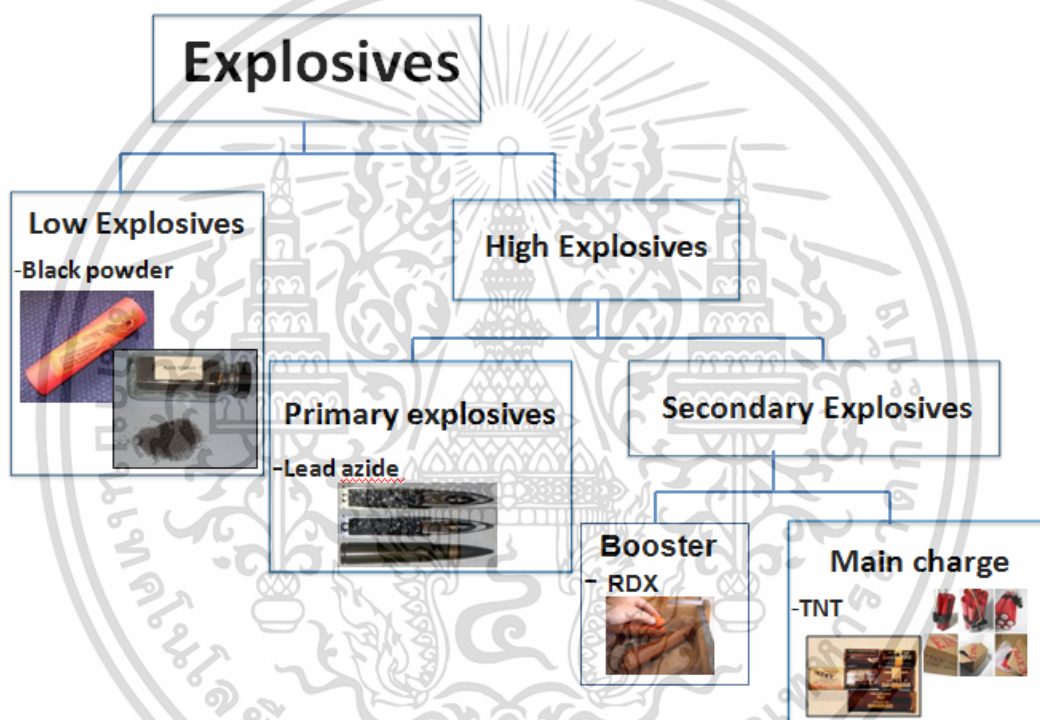
2) ดินส่งกระสุน (Propellant) เป็นวัตถุระเบิดแรงต่ำที่ทำขึ้นเพื่อใช้ส่งลูกกระสุนออกจากลำกล้องปืนหรือขั้วลูกจรวดออกจากเครื่องยิงจรวด

2.1.1.6. ตัวอย่างวัตถุระเบิดแรงสูง (High Explosives) แบ่งตามความไวของการระเบิดได้ 2 ประเภทดังรูปที่ 2.1 คือ Primary High Explosives และ Secondary High Explosives

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) **Primary High Explosives** มีความไวสูงสุดต่อความร้อน, การกระทบ, การเสียดสีและไฟฟ้าสถิตย์ ใช้ทำเป็นชนวนและเชื้อประทุ เช่น ดินกรดปรอท (Mercury fulminate), Lead azide เป็นต้น

2) **Secondary High Explosives** มีความไวสูงสุดต่อความร้อน, การกระทบและการเสียดสีน้อยกว่า Primary High Explosives ปกติถูกจุดให้ระเบิดได้ด้วย Primary High Explosives โดยไม่ต้องใช้ดินขยายการระเบิด (Booster) และสามารถนำไปใช้เป็นดินระเบิดหลัก, ดินขยายการระเบิดและฝักแกระเบิด เช่น ไดนาไมท์ (Dynamite), Trinitrotoluene (TNT) และ Booster เป็นต้น

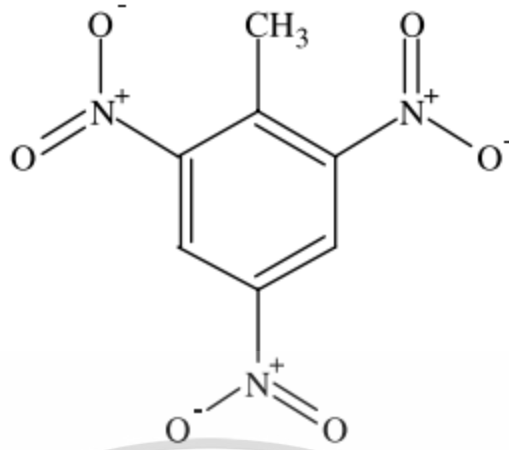


รูปที่ 2.1 แสดงชนิดของวัตถุระเบิดจำแนกตามลักษณะของการระเบิด

2.2 สารวัตถุระเบิดที่ใช้ในการทดสอบ

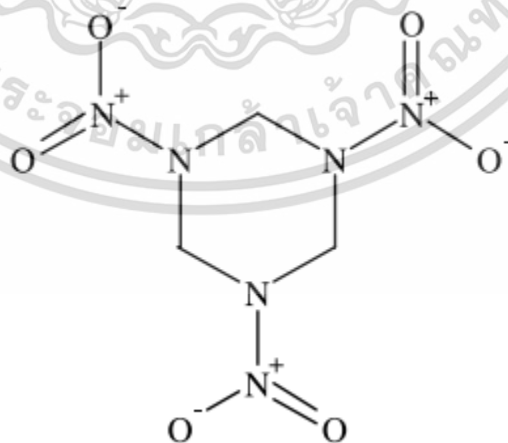
2.2.1. **Trinitrotoluene (TNT)** มีสูตรทางเคมีคือ $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$ หรือ $C_7H_5N_3O_6$ ลักษณะเป็นผลึกสีเหลืองอ่อน มีความคงทนดี มีความไวน้อย สามารถถือและจับได้ซึ่งจัดเป็นวัตถุระเบิดมาตรฐานสารชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้ทั้งในราชการทหารและอุตสาหกรรม ซึ่งมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ $80.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ จุดเดือดอยู่ที่ $295\text{ }^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ Trinitrotoluene (TNT)

2.2.2. Clotrimethylenetrinitramine หรือ Cyclonite (RDX) มีสูตรทางเคมีคือ $C_3H_6N_6O_6$ มีลักษณะเป็นผงผลึกสีชมพูจนถึงสีแดงเข้มใช้งานเช่นเดียวกับ PETN คือทำเป็นประจุล่งของเชื้อปะทุ ทำสายชนวนระเบิด ใช้สำหรับกระตุ้นการระเบิดแรงสูงชนิดอื่น มีความเร็วในการระเบิด 27,394 ฟุตต่อวินาที นอกจากนี้ยังใช้ทำยารักษาโรคท่อปัสสาวะอีกเสบเรียกว่า Methylamine ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตพลาสติกและอุตสาหกรรมยางอีกด้วย RDX ประมาณ 83 % ผสมกับซีผึ้งหรือวัสดุที่สามารถทำให้มีการปั้นเป็นก้อนได้ง่ายอีก 17 % เรียกว่าระเบิดซีโฟ (C4) เป็นวัตถุระเบิดที่ใช้เพื่อการทำลายซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ $203.5^{\circ}C$ และจุดเดือดที่อุณหภูมิ $235^{\circ}C$



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ Clotrimethylenetrinitramine หรือ Cyclonite (RDX)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ตัวอย่างวิธีการตรวจวิเคราะห์สารสามารถตรวจได้หลายวิธี ดังนี้คือ

2.3.1. การวิเคราะห์ทางด้านแสงเทคนิคทั่วไปที่ใช้คือเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี (UV-VIS Spectroscopy Techniques) [15,16] เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืน โดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือความยาวคลื่นแสง จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ในปัจจุบันได้รับการพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง มีความไวมากขึ้น ให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้นรวมถึงการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ควบคุมกับเครื่องมือในการวิเคราะห์และการพ่วงต่อกับเทคนิคอื่นๆ ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขึ้น UV-Vis Spectrum คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีแถบสเปกตรัม ตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นสั้น(รวมทั้งรังสีแกมมาและรังสีเอ็กซ์) ไปจนถึงช่วงความยาวคลื่นยาว (รวมถึงไมโครเวฟและคลื่นวิทยุ) รังสียูวีและแสงขาวเป็นเพียงส่วนเล็กๆส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยมีความยาวคลื่นประมาณ 190-800 นาโนเมตร ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาเทคนิค UV- Vis spectroscopy ได้ถูกนำไปใช้งานต่าง ๆ อย่างมากมาย แม้ว่าทุกวันนี้เครื่องมือที่นำเทคนิคนี้ไปใช้จะมีความแตกต่างจากเครื่องมือตัวแรกเป็นอย่างมาก แต่เครื่องมือเหล่านี้ก็ทำงานบน หลักการพื้นฐานเดียวกัน คือ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า ส่วนประกอบของเครื่อง UV-Vis spectrophotometer

1.) แหล่งกำเนิดแสง (Light Source) สำหรับเครื่อง UV-Vis spectrophotometer แหล่งที่ให้กำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นหลอดไฮโดรเจน (hydrogen lamp) หรือ หลอดดีวเทอเรียม (deuterium lamp) ให้แสงอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 185 – 375 nm ส่วนแหล่งกำเนิดแสงวิสิเบิลเป็นหลอดทังสเตน (Tungsten filament lamp) มีลักษณะคล้ายๆ หลอดไฟธรรมดาโดยใช้ไส้หลอดที่เป็นโลหะทังสเตน และเปล่งแสงในช่วง 320 – 2500 nm

แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในงานทางสเปกโทรโฟโตเมตรี ควรจะต้องมีลักษณะดังนี้

- 1.1) ต้องให้ลำแสง (beam of radiation) ที่มีกำลังพอที่จะวัดได้ด้วย photometer
- 1.2) ต้องให้การแผ่รังสี (radiation) ออกมาตลอดเวลาในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ
- 1.3.) ต้องให้การแผ่รังสีคงที่ตลอดเวลา นั่นคือ PO ต้องคงที่ มิฉะนั้นผลของการวิเคราะห์จะไม่แม่นยำหรือไม่เที่ยงตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator) เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงซึ่งเป็นพอลิโครเมติก (คือเป็นแสงที่ประกอบด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ) ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ โมโนโครเมเตอร์ประกอบด้วย entrance slit, mirror หรือ lens และส่วนที่ทำให้แสงกระจายออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ หรืออาจเป็นส่วนที่ตัดแสงบางช่วงออกไปให้เหลือเฉพาะช่วงคลื่นแสงที่ต้องการอุปกรณ์ส่วนนี้อาจประกอบไปด้วย

2.1) ฟิลเตอร์ (Filters) จัดเป็นโมโนโครเมเตอร์ที่ง่ายที่สุด ซึ่งอาจประกอบด้วยกระจกสีต่างๆ

2.2) ปริซึม (Prism) ปัจจุบันเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ทั่วไปได้ยกเลิกการใช้ปริซึม

2.3) เกรตติง (Grating) ในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์สมัยใหม่ใช้เกรตติงเป็นส่วนกระจายแสงทั้งสิ้น

2.4) ช่องแสงออก (Exit slit)

3.) ส่วนที่วางสารตัวอย่างเพื่อวัด (Cell Compartment) เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่างและสารเปรียบเทียบแล้วนำไปใส่ที่สำหรับ ซึ่งส่วนนี้จะมีฝาปิดเพื่อกันแสงจากภายนอกจะเข้าไปและถูกกั้นออกจากส่วนที่เป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์และระบบแสง

เซลล์ที่ใส่สารตัวอย่าง (Sample cell) บางครั้งเรียกว่าคิวเวทท์ (Cuvettes) มีด้วยกันหลายแบบ รูปร่างต่างๆ ที่ใช้กันโดยทั่วไปมีดังนี้

3.1) เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดา จะใช้ได้เฉพาะในช่วงวิสิเบิล เพราะเนื้อแก้วธรรมดาดูดกลืนแสงในช่วงยูวีได้

3.2) เซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา (Silica) และควอร์ตซ์ (Quartz) ใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิลและยังมีเซลล์ที่เป็นเกรดพิเศษ เรียกว่า Special UV Grade โดยเขียนไว้ว่าเป็น UV-Cell ในการซื้อเซลล์มาใช้ในงานวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปี มักจะซื้อเป็นคู่เรียกว่า “Matched Cells” เซลล์ดังกล่าวนี้เป็นเซลล์ที่ได้คัดเลือกแล้วว่ามีลักษณะเหมือนกันทั้งขนาดและการดูดกลืนแสง

การระวังรักษาและทำความสะอาดเซลล์ ควรเช็ดไว้ในกรดเจือจาง เช่น กรดไนตริก หรือกรดโครมิก แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด ไม่ควรใช้แปรงหรือใช้ผ้าทำความสะอาด เมื่อล้างสะอาดแล้วควรใช้กระดาษนุ่มๆ ซับน้ำให้แห้ง ถ้าเซลล์สกปรกมากควรต้มกับกรดไนตริกเข้มข้นหรือกรดกัดทอง หรือต้มกับสารซักฟอก 2% หรือกับสารละลายอิมัลชันโซเดียมฟอสเฟต หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด ในการทำให้เซลล์แห้งนั้นทางที่ดีที่สุดควรใช้อากาศอุ่นๆ เป่าให้แห้ง แล้วเก็บไว้ในกล่องที่มีฟองน้ำและก่อนใช้ควรจะต้องล้างด้วยน้ำกลั่นหรือตัวทำละลายที่จะใช้เสมอ

4.) เครื่องวัดแสง (Radiation Detector) เครื่องที่ใช้สำหรับวัดแสงมีด้วยกันหลายแบบ ซึ่ง

แต่ละแบบอาจแตกต่างกันบ้างที่ความกว้างของช่วงคลื่นแสงที่สามารถตรวจสอบได้ ความเร็วของการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่เป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอบสนองต่อแสง สภาพไวของการรับแสง เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อต้องการเปลี่ยนพลังงานแสง (Radiant energy) ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า (Electrical signal) เครื่องวัดแสงที่ดีควรมีลักษณะดังนี้

- 4.1) มีสภาพไวสูงคือแม้กำลังของแสงจะเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยก็สามารถตรวจวัดได้
- 4.2) การตอบรับแสงเป็นแบบสภาพเชิงเส้น (Linearity of response) คือ ถ้าแสงตกกระทบบ่อยมากก็วัดได้มาก แสงตกกระทบน้อยก็วัดได้น้อย
- 4.3) ระดับของสัญญาณรบกวนจะต้องมีน้อย (Low noise level)
- 4.4) การตอบสนองต่อแสงขึ้นอยู่กับความถี่หรือความยาวคลื่นของแสง
- 4.5) เครื่องจะต้องมีความเสถียรดี (Stability) ค่าที่วัดได้ไม่ควรแปรปรวนมาก
- 4.6) ขนาดไม่ควรจะใหญ่เกินไป
- 4.7) ราคาถูก

2.3.2. การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้แก่

1.) วิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS)[15,16]

หลักการวิเคราะห์ของอะตอมมิกสเปกโทรสโกปีอยู่บนพื้นฐานของสมบัติของอะตอมในการปล่อยและดูดกลืนรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าเฉพาะตัวของแต่ละธาตุภายใต้สภาวะทางกายภาพหนึ่งๆ ในจุดนี้จำเป็นต้องปลดปล่อยธาตุที่ต้องการจะวิเคราะห์หาจากสารตัวอย่างออกมาจากสารประกอบของธาตุนั้นๆ ก่อน ส่วนมากจะทำโดยให้พลังงานเข้าไปเพื่อทำให้ได้เป็นอนุภาคอิสระ ธาตุจะทำให้อนุภาคที่เกิดประจุไฟฟ้าจะถูกแยกและตรวจจับได้ในแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Mass Spectrometer) ด้วยพลังงานที่ให้เข้าไป อะตอมมิกสเปกโทรสโกปีแบบดูดกลืนแสง (Atomic Absorption Spectroscopy: AAS) ในเทคนิคนี้ธาตุที่จะถูกวิเคราะห์จะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะอะตอมอิสระในเครื่องสร้างอะตอม (อะตอมไม่เขชัน: Atomization) โดยพลังงานความร้อนที่ให้เข้าไป อะตอมเหล่านี้จะสามารถดูดกลืนรังสีเฉพาะของธาตุได้เพื่อให้ได้ตามนี้ หลอดรังสีเฉพาะของธาตุพร้อมขั้วบวกที่มีลักษณะกลวงที่ทำจากธาตุที่ต้องการวิเคราะห์จะถูกนำเข้าไปในแนวรังสีของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์นี้พร้อมเครื่องอะตอมไม่เขชันและเครื่องตรวจจับ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุที่จะตรวจหาในสารตัวอย่าง ความเข้มข้นของรังสีบางชนิดของหลอดขั้วบวกแบบกลวงจะถูกดูดกลืนไปโดยอะตอมที่ถูกสร้างขึ้นเหล่านี้ ตัวขยายสัญญาณสองชุดจะวัดความเข้มข้นของรังสีเริ่มต้นและรังสีหลังจากผ่านออกจากระบบสร้างอะตอมระหว่างการใส่สารละลายสารตัวอย่าง ความเข้มข้นของธาตุในสารตัวอย่างจะคำนวณได้จากความแตกต่างของความเข้มแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบที่สำคัญต่าง ๆ ของเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์มีทั้งหมด 5 ส่วนคือ

1.) แหล่งกำเนิดแสง (Light Source) โดยทั่วไปใช้เป็น Hollow Cathode Lamps (HCL) และ Electrodeless Discharge Lamps (EDL) ซึ่งมีใช้เฉพาะบางธาตุเท่านั้น

2.) ส่วนที่ทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมเสรี (Atomizer) ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะประสบความสำเร็จได้ขึ้นอยู่กับปริมาณอะตอมเสรีของธาตุที่ทำให้เกิดขึ้น เพราะอะตอมเสรีเป็นตัวดูดกลืนแสงที่จะทำการวัดโดยเลือกใช้ความยาวคลื่นของแสงที่เหมาะสมผ่าเข้าไป ความสำคัญจึงอยู่ที่ว่าจะทำอย่างไรจึงจะทำให้ธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์แตกตัวเป็นอะตอมเสรีที่สถานะพื้นได้มากๆ

3.) โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator) ซึ่งใช้แยกแสงให้ได้ความยาวคลื่นแสงที่ต้องการ

4.) ดีเทคเตอร์ (Detector)

5.) เครื่องประมวลผลและอ่านผล (Data system and read-out units)

ประโยชน์ของ AAS ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีซึ่งเทคนิคนี้เป็นที่นิยมกันมากในการวิเคราะห์ดังนี้

- 1) ใช้ในการวิเคราะห์ทางเพื่อการเกษตรเช่น การวิเคราะห์ดิน พีช และปุ๋ย เป็นต้น
- 2) ใช้ในงานวิเคราะห์เพื่อการแพทย์และชีวเคมี เช่นการหาปริมาณ Ca, Mg, Cu, Pb, Na และอื่นๆ ในเลือด ปัสสาวะและเนื้อเยื่อ เป็นต้น
- 3) ใช้ในงานวิเคราะห์พวกน้ำมันและเพื่อการปิโตรเลียม เช่นการหาองค์ประกอบที่เป็นโลหะของน้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันเครื่อง น้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น
- 4) ใช้ในงานวิเคราะห์พวกแร่และวัสดุต่างๆ
- 5) ใช้ในงานวิเคราะห์น้ำจากแหล่งต่างๆ เช่น น้ำบาดาล น้ำเสีย น้ำทิ้ง น้ำแร่ เป็นต้น
- 6) ใช้ในงานวิเคราะห์เพื่อการโลหวิทยา เช่น การวิเคราะห์โลหะผสมต่างๆ เป็นต้น
- 7) ใช้ในงานวิเคราะห์ทางสิ่งแวดล้อม
- 8) ใช้ในงานวิเคราะห์ทางอาหารและยา
- 9) ใช้ในงานวิเคราะห์ธาตุในสารอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) วิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซ์-เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (X-ray Fluorescence Spectroscopy)[15,16]

เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีเป็นแบบไม่ทำลายตัวอย่าง สามารถทำได้ทั้งวิเคราะห์ธาตุเดี่ยวๆ ที่ละลายหรือหลายธาตุพร้อมกันเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง ปัจจุบันเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างมากเพราะสามารถวิเคราะห์ทางเคมีได้แทบทุกชนิดของสารตัวอย่างในระดับความเข้มข้นสูงถึงระดับความเข้มข้นต่ำ บางครั้งสามารถวิเคราะห์ได้ถึงระดับ Trace analysis (ppm) ซึ่งวิเคราะห์ได้ง่ายและรวดเร็ว

หลักการและวิธีการวิเคราะห์เมื่อรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray photon) จากหลอดรังสีเอกซ์พุ่งเข้าชนสารตัวอย่างจะเป็นผลให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในสารตัวอย่างหลุดออกจากอะตอมในรูปของโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างชั้นในวงอิเล็กตรอนนั้น ซึ่งที่สภาวะนี้อะตอมจะไม่เสถียร อะตอมจะกลับสู่สภาวะที่เสถียรขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทน ที่ช่องว่างดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีการ ปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทุติยภูมิ (Secondary X-ray photon) ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ฟลูออเรสเซนซ์” (Fluorescence) พลังงานของรังสีเอกซ์ทุติยภูมิที่ปลดปล่อยออกมาจะมีค่าที่แตกต่าง กันขึ้นกับความแตกต่างของระดับพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนวงนอกที่ เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานกับระดับพลังงานของช่องว่างที่เกิดจากรังสี เอกซ์ปฐมภูมิ รังสีเอกซ์ทุติยภูมิที่เกิดจากปรากฏการณ์ ฟลูออเรสเซนซ์จะเป็นรังสีเอกซ์ที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของธาตุแต่ละชนิด ดังนั้นเทคนิค XRF จึงใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบ ของสารตัวอย่าง อย่างไรก็ตามเทคนิค XRF จะไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุ 11 ธาตุแรกของตารางธาตุได้ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดรังสีเอกซ์โดยทั่วไป ประกอบด้วยหัววัดรังสี (Detector) ส่วนสร้างสัญญาณ (Preamplifier) ส่วนขยายสัญญาณ (Amplifier) ส่วนวิเคราะห์สัญญาณ (Multichannel Analyzer) หรือ MCA ประกอบกับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมประมวลผลและแสดงผลการวิเคราะห์

การเตรียมสารตัวอย่าง แบ่งออกเป็น 3 พวกคือ

- 1) สารตัวอย่างที่สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยตรงหรืออาจใช้วิธีเตรียมง่ายๆ เช่น นำไปอัดแผ่นหรือขูดผิวได้เลย ได้แก่สารตัวอย่างที่เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน อาจเป็นผง ก้อน โลหะ หรือของเหลว
- 2) สารตัวอย่างที่ต้องการเตรียมพอสมควร เช่น สารตัวอย่างที่มีเนื้อไม่เข้ากัน ต้องทำให้เจือจางลงเพื่อลดผลของเมทริกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) สารตัวอย่างที่ต้องมีการเตรียมด้วยวิธีพิเศษ เช่น สารตัวอย่างมีปริมาณจำกัด ต้องมีการเพิ่มความเข้มข้น ทำให้บริสุทธิ์ก่อนด้วยการแยกเสียก่อน

3.) วิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟี (Liquid Chromatography, LC หรือ HPLC)[16]

HPLC เป็นเทคนิคการแยกสารประกอบ (Substances) โดยอาศัยหลักการความแตกต่างของอัตราการเคลื่อนที่ของสารประกอบในสแตชันนารีเฟส (Stationary Phase) ของคอลัมน์ โดยมีเฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase) เป็นตัวพาไป เมื่อต่อเข้ากับเครื่องตรวจวัด (Detector) จะสามารถตรวจวัดสารที่ออกมาจากคอลัมน์ (Solutes) ได้อย่างต่อเนื่องสามารถตรวจวัดทั้งเชิงคุณภาพ (Qualitative Analysis) และเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) ส่วนใหญ่นิยมใช้วิเคราะห์สารประกอบที่ระเหยยาก (Low Volatile Substation) หรือน้ำหนักโมเลกุลสูง (High Molecular Weight Compounds)

HPLC สามารถวิเคราะห์สารได้หลายชนิด เช่น สารอินทรีย์ สารประกอบทางชีวภาพ โพลีเมอร์ คิวแอนทีโอเมอร์ สารประกอบที่เสถียรได้ง่าย สารประกอบที่ระเหยยาก ไอออนขนาดเล็ก ไมโครโมเลกุล ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ต้องเป็นของแข็งหรือของเหลว ต้องละลายได้ 100 % (กรองด้วย) การแยกสารจะประสบความสำเร็จได้ก็ต่อเมื่อสารมีอัตราการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันภายในคอลัมน์ สารประกอบที่ถูกแยกนั้นจะเคลื่อนที่ไปตามความยาวทั้งหมดของคอลัมน์ โดยมีเฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase) เป็นตัวพาไป

หลักการทํางานของ HPLC หรือโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงแยกสารเคมีภายใต้ความดันของเหลว เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สารเชิงคุณภาพวิเคราะห์ (Qualitative Analysis) และปริมาณวิเคราะห์ (Quantitative Analysis) ที่นิยมใช้มากวิธีหนึ่ง โดยสามารถใช้กับงานด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง เช่นในการวิเคราะห์ทางอาหาร, ยา, ยาฆ่าแมลง, ทางด้านการแพทย์, สมุนไพร และทางด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น สามารถตรวจวิเคราะห์ปริมาณต่ำๆได้ในระดับไมโครกรัม (μg) ถึงพิโคกรัม (pg) เมื่อเลือกใช้เครื่องตรวจวัดที่เหมาะสม HPLC เป็นเทคนิคแยกสารผสมแบบใช้เครื่องสูบล้างดันสูง (High pressure pump) สูบตัวทำละลายซึ่งทำหน้าที่เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) พาสารตัวอย่างที่ถูกฉีดเข้าทางช่องฉีดสาร (Injector) ผ่านอนุภาคที่เป็นเฟสอยู่กับที่ (Stationary phase) ซึ่งบรรจุอยู่ในคอลัมน์ (Column) สารผสมตัวอย่างจะเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์และถูกแยกออกมา ผ่านเข้าสู่เครื่องตรวจวัด (Detector) ในเวลาที่ต่างกัน สัญญาณที่วัดได้จะอยู่ในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณไฟฟ้าตามเวลาและปริมาณของสารแต่ละตัวที่ตรวจวัดได้ จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังเครื่องบันทึกสัญญาณ เพื่อแสดงผลออกมาเป็นโครมาโทแกรม (Chromatogram)

4.) วิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography / Mass Spectrometry, GC/MS)[15,16]

เป็นวิธีที่สามารถทำนายชนิดขององค์ประกอบที่มีอยู่ในสารได้อย่างค่อนข้างแม่นยำโดยอาศัยการเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของเลขมวล (Mass number) ของสารตัวอย่างนั้นๆ กับข้อมูลที่มีอยู่ในฐานข้อมูล นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณ (Quantitative analysis) และเชิงคุณภาพ (Qualitative analysis)

GC-MS ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของเครื่อง GC (Gas chromatography) และส่วนของเครื่องแมสสเปกโตร (Mass spectrometer)

1.) Gas Chromatograph (GC) ทำหน้าที่ในการแยกองค์ประกอบของสารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอ (Volatile organic compounds) ได้เมื่อถูกความร้อน กลไกที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบต่างๆ ในสารตัวอย่างอาศัยหลักของความชอบที่แตกต่างกันขององค์ประกอบในตัวอย่างที่มีต่อเฟส 2 เฟส คือ เฟสอยู่กับที่ (Stationary phase) และ เฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง GC สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ

1.1. Injector คือ ส่วนที่สารตัวอย่างจะถูกฉีดเข้าสู่เครื่องและระเหยเป็นไอก่อนที่จะเข้าสู่ Column อุณหภูมิที่เหมาะสมของ injector ควรเป็นอุณหภูมิที่สูงพอที่จะทำให้สารตัวอย่างสามารถระเหยได้แต่ต้องไม่ทำให้สารสลายตัว ตัวอย่างของ injector ได้แก่ Split, Split less, On column

1.2. Oven คือ ส่วนที่ใช้สำหรับบรรจุ Column และเป็นส่วนที่ควบคุมอุณหภูมิของ Column ให้เปลี่ยนไปตามความเหมาะสมกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิของ Oven นั้น มี 2 แบบ คือ

1.2.1. Isocratic Temperature

1.2.2. Gradient Temperature ข้อดีของการทำ Gradient temperature คือ สามารถใช้กับสารตัวอย่างที่มีจุดเดือดกว้าง (Wide boiling range) และยังช่วยลดเวลาในการวิเคราะห์

1.3. Detector คือส่วนที่จะใช้สำหรับตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและดูว่าสารตัวอย่างชนิดที่เราสนใจมีปริมาณอยู่เท่าใด

2.) Mass Spectrometer (MS) เป็นเครื่องตรวจวัดที่ใช้ตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสาร

ตัวอย่างโดยอาศัยกลไก คือ โมเลกุลขององค์ประกอบที่ถูกแยกออกมาจากสารตัวอย่างโดยเครื่อง GC เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถูกไอออไนซ์ในสภาวะสุญญากาศแล้วตรวจวัดออกมาเป็นเลขมวล (Mass number) เทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิง แล้ว แปลผลออกมาเป็นชื่อขององค์ประกอบนั้นๆ ซึ่งองค์ประกอบสำคัญของ MS แบ่งออกเป็น

2.1. Ionization Source แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ Electron Ionization (EI) เป็นการทำให้สารเกิด Fragment โดยใช้ลำ Electron ซึ่ง Ionization chamber ต้องมีความดันต่ำประมาณ 10⁻⁸ Torr โดย Electron จาก Filament ที่ร้อนจะถูกโฟกัสผ่านห้องนี้และถูกดึงเข้าหา repeller voltage ที่มีความต่างศักย์ 70 โวลต์ ซึ่งจะให้พลังงานกับ Electron เป็น 70 eV ทำให้ของผสมที่ซับซ้อนของไอออนเกิดการแตกหัก (Fragmentation ion) ที่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างและความอุดมสมบูรณ์ (Relative abundance) Chemical Ionization (CI) เป็นการทำให้สารเกิดการ Fragment ด้วยวิธีทางเคมีโดยผสมสารตัวอย่าง (ความดัน 10⁻⁴Torr) เข้ากับแก๊สที่ทำปฏิกิริยาด้วย (ความดัน 1 Torr) แล้วผ่านสารผสมเข้าไปใน Ionization chamber โดยการทำให้เกิดการ Fragment ด้วยการชนกับอิเล็กตรอน เช่นเดียวกันแก๊สที่ใช้ได้แก่ มีเทน, ไอโซบิวเทน, แอมโมเนีย

2.2. Mass Analyzer เป็นเครื่องวิเคราะห์มวล มีหลายแบบ คือ Magnetic-sector analyzer, Electrostatic analyzer, Time-of-flight analyzer, Ion cyclotron resonance analyzer, Quadrupole mass spectrometer-Quadrupole Mass Spectrometer ใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยสนามแม่เหล็ก คือ เป็น Path-stability mass spectrometer ซึ่งมีแหล่งผลิต Ion source 2 ส่วนโดยส่วนแรกจะทำให้ตัวอย่างกลายเป็นไอออน และส่วนที่ 2 ทำให้สารมาตรฐานกลายเป็นไอออนลำไอออนทั้งสองจะถูกบังคับให้ผ่านเครื่องแยกไอออนชุดเดียวกัน ดังนั้นไอออนทั้งหมดจะได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กในสภาวะเดียวกัน แต่ถูกตรวจและวัดด้วยเครื่องตรวจวัดแยกกันซึ่งมีข้อดีคือทำให้สามารถวัดมวลได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

2.3. Detector ที่ใช้โดยทั่วไปมีหลายอย่าง คือ Faraday cup detector, Electron multiplier detector, Scintillation counter detector, Photographic plate detector

ข้อดีของ GC-MS

- 1) สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งแบบทั่วไปและแบบเฉพาะเจาะจงให้ Sensitivity ที่สูง
- 2) สามารถบ่งชี้ชนิดขององค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้
- 3) สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ

ข้อเสียของ GC-MS

- 1) ราคาแพง และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องสูง
- 2) ต้องใช้บุคลากรที่มีความชำนาญสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.) วิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP-MS)[16]

ICP-MS เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุใน ระดับต่ำมาก (ppb-ppt) ใน ตัวอย่าง เช่น น้ำดื่ม น้ำเสีย น้ำบาดาล จุดเด่นของการวิเคราะห์ ด้วยเครื่อง ICP-MS นี้คือ สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับ Isotope Ratio และเป็นเทคนิคที่มีความไวมีความถูกต้องสูง มีอุปกรณ์ ป้อนตัวอย่างอัตโนมัติ เหมาะสำหรับ การวิเคราะห์สารตัวอย่างปริมาณมากและมีอุปกรณ์เจือจาง ตัวอย่าง อัตโนมัติรวมทั้งชุด Vapor Generation ที่ใช้เพิ่มความไวของการวิเคราะห์ธาตุ As Se Sb Bi Ge และ Sn ชุดวิเคราะห์มวล เป็นชนิดควอดรูโพล (Quadrupole) สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีมวล อะตอมในช่วง 3-256 amu เทคนิคการวิเคราะห์ ICP-MS มีประโยชน์อย่างมากต่องาน ด้าน สิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะการวิเคราะห์หา ปริมาณโลหะหนักเช่น As, Hg, Cd, Cr, Pb, Sn, Bi เป็นต้น

ICP ในสมัยของ Fassel ได้อธิบายว่า เมื่อปล่องแก๊สอาร์กอนผ่านเข้าไปในคบ (torch) ซึ่ง ประกอบด้วยหลอดที่ทำด้วยควอร์ตซ์ (Quartz Tube) ซ้อนกันสามชั้น ที่ปลายคบด้านบนจะมีท่อ กลวงทำด้วยทองแดงล้อมรอบอยู่ เรียกว่า “load coil” coil นี้ต่อเข้ากับเครื่องส่งความถี่วิทยุ (Radio frequency, RF generator) เมื่อให้ RF power (โดยทั่วไปจะเป็น 700-1,500 วัตต์) ปล่อง เข้าไปใน load coil จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าสลับเคลื่อนที่ไปมาในหลอดทองแดงหรือเกิดการสั่น (oscillate) ด้วยอัตราเร็วเท่ากับความเร็วของเครื่องส่ง (RF generator) ในเครื่อง ICP ส่วนมากจะใช้ ความถี่ที่ 27 หรือ 40 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) จากการผ่าน RF เข้าไปในหลอดทองแดงทำให้เกิด สนามแม่เหล็ก (H) ขึ้นที่บริเวณปลายคบ แล้วทำให้เกิดการชักนำให้มีกระแสไฟฟ้า (Eddy current) ไหลผ่านตัวนำ แล้วทำให้ตัวนำมีความร้อนเกิดขึ้น แก๊สอาร์กอนที่ผ่านเข้าไปในแนวตั้งฉากเพื่อให้เกิด การหมุนไปรอบหลอด ควอร์ตซ์นั้นไม่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง จึงจำเป็นต้องทำให้เป็นตัวนำ ด้วยการทำให้เกิดสปาร์ค หรือปล่อยประจุไฟฟ้าจากเทสลา (Tesla discharge) ให้ผ่านแก๊สอาร์กอน เสียก่อน เพื่อทำให้แก๊สอาร์กอนเกิดไอออนได้อิเล็กตรอนเกิดขึ้น สนามแม่เหล็กจะทำหน้าที่ช่วยเร่ง ให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เร็วขึ้น ประกอบกับมีหลอดทองแดงทำหน้าที่เป็นขดลวด ทำให้อิเล็กตรอนมี พลังงานเพิ่มขึ้น เรียกว่า Inductive Coupling อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงนี้จะชนกับอะตอมของแก๊ส อาร์กอนต่อไป ทำให้เกิดอิเล็กตรอนมากขึ้นไปอีกเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ กลายเป็นพลาสมาจึงเรียกว่า Inductively Coupled Plasma (ICP) การปล่อยประจุจากพลาสมานี้จะให้ความร้อนที่อุณหภูมิ ประมาณ 1,000-10,000 K และมีความเสถียรดีเมื่อใช้กำลังไฟ 1-2kW

ลักษณะเฉพาะของ ICP สรุปได้ดังนี้

1) ให้อุณหภูมิสูงถึงประมาณ 10,000K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) สารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์สามารถอยู่ในพลาสมาได้นานพอ โดยทั่วไปจะอยู่ได้นานถึง 2-3 ms ทำให้สารตัวอย่างสามารถแตกตัวเป็นอะตอมได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง
- 3) Matrix และ interelement effects มีน้อย โดยเฉพาะเมื่ออยู่ในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย ทำให้อะตอมอิสระที่เกิดขึ้นในพลาสมามี life time ยาวขึ้น
- 4) ในกรณีที่ใช้ Ar-ICP พบว่า ให้ electron density สูง แม้ใส่สารบางชนิดที่ไอออไนส์ได้ง่าย เข้าไปก็จะมีผลต่อจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น ดังนั้น การแทรกสอดที่เกิดจากการไอออไนเซชันจะมีผลกระทบน้อย
- 5) Molecular species มีโอกาสเกิดน้อยหรือไม่เกิดเลย เพราะอุณหภูมิสูงทำให้ลดการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ และ self-absorption
- 6) แก๊สที่ใช้เป็นแก๊สเฉื่อยจึงไม่มีการระเหิดเกิดขึ้น
- 7) ไม่ต้องใช้ขั้วไฟฟ้าเลย

6.) วิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไอออนสแกน (ION Scan)[17]

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจหาร่องรอยสารระเบิด (Trace explosive) ที่อาศัยเทคโนโลยี IMS ในการตรวจวิเคราะห์สารตัวอย่าง หลักการตรวจวิเคราะห์อาศัยหลักการเหนี่ยวนำละอองไอออนของสารตัวอย่างที่จะทำการตรวจ จากนั้นทำการยิงละอองไอออนเหล่านี้ออกไปเพื่อวัดระยะไป-กลับ แล้วทำการใช้ระยะเวลาการวิ่งไป-กลับนี้กับฐานข้อมูลในตัวเครื่องว่าละอองไอออนนี้เป็นสารระเบิดชนิดใด

หลักการทำงานของเครื่องไอออนสแกน เริ่มจากการนำผ้า swab สารตัวอย่างจากวัตถุต้องสงสัยจากนั้นนำเข้าสู่ช่องตรวจของเครื่อง สารตัวอย่างบนผ้าจะเกิดการเผาจากพลังงานความร้อนจนกลายเป็นก๊าซแล้วถูกดูดผ่านไปยังส่วนปฏิกิริยาซึ่งจะทำการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางไฟฟ้าโดยใช้สารกัมมันตภาพรังสีที่มีอยู่น้อยมากจากการปะทะกับอนุภาคเบต้า ก๊าซของสารชนิดนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นไอออนลบ จากนั้นไอออนเหล่านี้จะถูกส่งผ่านไปยังส่วนที่เรียกว่าดริฟทิวป์ ซึ่งภายในประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและก๊าซเฉื่อยที่จะทำการแยกไอออนตามความสามารถในการเคลื่อนที่ ถ้าไอออนของก๊าซ ณ ความดันบรรยากาศเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าคงที่ จะมีอัตราเร่งลดลงจนกระทั่งชนกับโมเลกุลที่เป็นกลาง การชนกันของไอออนและอิทธิพลของสนามไฟฟ้าจะส่งผลให้เกิดการชนต่อกันไปเรื่อยๆ ความเร่งและการชนที่เกิดขึ้นจะแปรเปลี่ยนเป็นความเร็วที่เคลื่อนที่ไปตามระยะทางสนามไฟฟ้าที่ใช้จะสุ่มจากการชนกันของไอออน ซึ่งผลรวมของความเร่งและการชนกันที่เกิดขึ้นจะทำให้

ให้ความเร็วเฉลี่ยของไอออนที่จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าและจะได้อัตราส่วนระหว่าง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่เป็นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วที่เคลื่อนที่ไปตามระยะทางกับสนามไฟฟ้า นั่นก็คือความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออนที่สามารถแยกสารแต่ละชนิดกันออกมา

2.3.3. วิเคราะห์หาความเป็นผลึกเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD)[16,18]

กระบวนการเกิดหรือการผลิตรังสีเอกซ์ทั้งโดยฝีมือมนุษย์และในธรรมชาติ มีอยู่ 2 วิธีใหญ่ๆ คือ วิธีที่ 1 เป็นวิธีผลิตรังสีเอกซ์โดยการยิงลำอนุภาคอิเล็กตรอนใส่แผ่นโลหะ เช่น ทังสเตน อิเล็กตรอน ที่เป็นกระสุนจะวิ่งไปชนอิเล็กตรอนของอะตอมโลหะที่เป็นเป้า ทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกชนเปลี่ยนตำแหน่ง การโคจรรอบนิวเคลียส เกิดตำแหน่งที่ว่างของอิเล็กตรอนในวงโคจรรอบนิวเคลียสเดิม อิเล็กตรอนตัวอื่นที่ อยู่ในตำแหน่งวงโคจรมีพลังงานสูงกว่า จะกระโดดเข้าไปแทนที่ของอิเล็กตรอนเดิม แล้วปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือ รังสีเอกซ์ เครื่องฉายรังสีเอกซ์ที่ใช้งานกันทั่วไปในโรงพยาบาลและในโรงงานอุตสาหกรรม ล้วนเป็นเครื่องผลิต รังสีเอกซ์จากวิธีการนี้ วิธีที่ 2 เป็นวิธีผลิต หรือ กำเนิดรังสีเอกซ์จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า เช่น อิเล็กตรอน โปรตอนหรืออะตอม อย่างมีความเร่ง คือ อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเหล่านี้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้นแล้วก็เปลี่ยน ธรรมชาติของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเหล่านี้เอง ที่ต้องปล่อยพลังงานออกมาในรูปของ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อย่างที่ไม่มีอะไรไปห้ามได้ ซึ่งถ้าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปล่อยออกมามีความถี่สูงพอก็จะเป็นรังสีเอกซ์ กำเนิดรังสีเอกซ์วิธีนี้เป็นวิธีที่นักวิทยาศาสตร์ที่นิยมใช้ในการผลิตรังสีเอกซ์ในห้องทดลองวิทยาศาสตร์

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการศึกษาโครงสร้างของผลึก ความเครียดของโลหะ ขนาดของอนุภาคและการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ซึ่งในผลึกแต่ละชนิดมีขนาดของหน่วยเซลล์ไม่เท่ากันและประกอบด้วยสารที่แตกต่างกัน แพทเทอร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของการเลี้ยวเบนกับความเข้มสัมพัทธ์ของพีค การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับขนาดของหน่วยเซลล์ คือมีขนาดตั้งแต่ประมาณ 0.1-100 อังสตรอม จึงสามารถเลี้ยวเบนได้ดีจากผลึก เช่นเดียวกับแสงที่สามารถเลี้ยวเบนจากดิฟแฟรคชันเกรตติ้งจากรูปที่2.3จะพบว่ารังสีขนานตกลงบนผลึกที่จุด A และ B ตามลำดับ โดยทำมุม Theta กับระนาบของผลึก การเลี้ยวเบนของรังสีจะเกิดขึ้นเมื่อระยะทางที่รังสีเอกซ์ 1 และ 2 เดินทางต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น จะได้ว่าสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

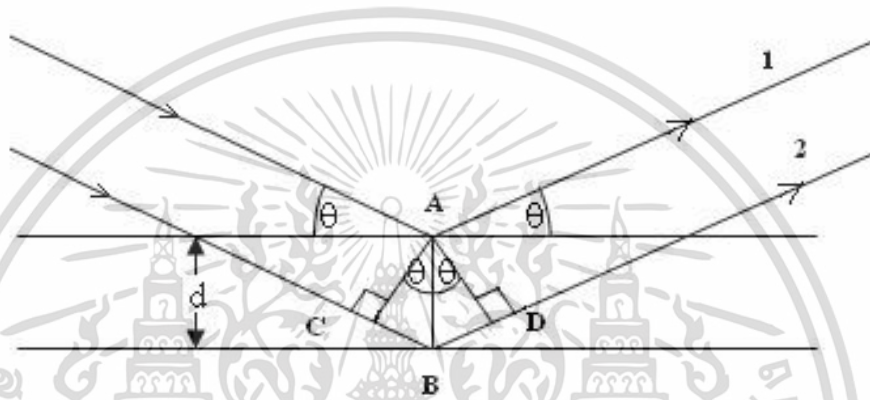
$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

เมื่อ d คือ ระยะระหว่างระนาบ

θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ซึ่งเท่ากับมุมตกกระทบ

n คือ อันดับการเลี้ยวเบน มีค่าตั้ง 1,2,3,...,

λ คือ ความยาวคลื่น



รูปที่ 2.3 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อกระทบระนาบของผลึก

โดยกฎข้อนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ถ้ารังสีเอกซ์ตกกระทบมีความยาวคลื่นที่คงที่แล้ว มุมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นกับระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก กฎของแบรกก์อาศัยหลักการทางฟิสิกส์ที่เรียกว่า การแทรกสอดของคลื่นรังสีเอกซ์ (Roentgenstrahlinterferenzen) แต่นิยมเรียกว่า การเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) ซึ่งเป็นเครื่องมืออันสำคัญยิ่งของนักฟิสิกส์ และนักเคมี เพื่อใช้อธิบายโครงสร้างของผลึกภายในตารางธาตุ

ข้อดีของ X-ray diffraction

- 1) ตัวอย่างที่มีปริมาณน้อย ๆ ก็สามารถทำการวิเคราะห์ได้
- 2) เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่างจึงเหมาะแก่การใช้วิเคราะห์ทางด้าน forensic evidence
- 3) สามารถหาสารประกอบเคมีที่แท้จริงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) ถ้าวัสดุที่จะวิเคราะห์สามารถเกิดได้หลาย polymorphic forms การวิเคราะห์จะหาออกมาแบบอัตโนมัติเป็น crystal type

2.3.4. วิธีการหาพันธะทางเคมีได้แก่

1.) วิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)[15,16]

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์ และ อนินทรีย์ เทคนิคนี้เป็นวิธีการทาง Spectroscopy ชนิดหนึ่งที่ศึกษาการดูดกลืนแสงของสารในย่านความถี่ของแสงซึ่งโดยการวิเคราะห์โครงสร้างสารจะอาศัยการดูดกลืนที่แตกต่างกันของแต่ละโมเลกุลซึ่งโมเลกุลแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดที่ต่างกัน โดยช่วง wave numbers 4000 - 1500 จะเป็นช่วงที่บ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล เช่น -OH, C=O, N-H, CH₃ เป็นต้น และในช่วง wave numbers 1500 - 400 เป็นช่วง the fingerprint region ซึ่งจะมีลักษณะของสเปกตรัมที่เฉพาะเจาะจงของสารแต่ละตัวแต่เนื่องจากจะมีพิกัดซ้อนกันยุ่งเหยิงดังนั้นการวิเคราะห์สเปกตรัมช่วงนี้ค่อนข้างยาก การนำเทคนิคนี้จะนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมเกี่ยวกับ ด้านวัสดุศาสตร์ เช่น พอลิเมอร์ช่วยในการจำแนกชนิดของพอลิเมอร์ และ ในด้านอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจากเทคนิคนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างไม่แพงและรวมไปถึงชนิดของตัวอย่างสามารถวิเคราะห์ได้เกือบทุกชนิด

ส่วนประกอบของเครื่องที่สำคัญคือ

1. ต้นกำเนิดแสงอินฟราเรด (IR sources) ที่ใช้กันทั่วไปนั้นเป็นของแข็งที่เนื้อเยื่อ ซึ่งสามารถเผาให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าจนมีอุณหภูมิประมาณ 1,500-2,000 K ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะให้แสงมีความเข้มสูงสุดที่ความถี่ประมาณ $5,000\text{ cm}^{-1}$
2. โมโนโครเมเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยช่องแสงผ่าน (Slits) เกรตติง (Grating) หรืออาจมีฟิลเตอร์ (Filter) ประกอบด้วยก็ได้
3. เครื่องวัดแสงอินฟราเรด (IR Detectors) เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรดที่ผลิตได้ในปัจจุบันล้วนเป็นพวกที่ให้ความเข้มต่ำ ประกอบกับแสงอินฟราเรดเป็นแสงที่มีพลังงานต่ำ จึงทำให้การตรวจวัดค่อนข้างยุ่งยากกว่าการตรวจวัดแสงยูวีและวิสิเบิลเพราะพลังงานไม่พอที่จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนในหลอดวัดแสง (phototube) ได้
4. เครื่องบันทึกสเปกตรัม (Read Out Devices) สัญญาณที่ได้จากดีเทคเตอร์ซึ่งสัญญาณที่น้อยจำเป็นจะต้องเข้าเครื่องขยายสัญญาณก่อนที่จะเข้าเครื่องบันทึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) วิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)[15,16]

Raman scattering เกิดขึ้นได้โดยใช้ลำแสงโมนโครมาติกที่มีความเข้มสูง เช่น ลำแสงเลเซอร์ (Laser beam) ผ่านเข้าไปยังตัวกลางโปร่งใส แสงส่วนใหญ่จะผ่านทะลุไปได้ แต่มีส่วน้อยบางส่วนเกิดการกระเจิงไปทุกทิศทุกทางด้วยการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) กับโมเลกุลของสาร เรียกว่าการกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh scattering) แต่ถ้าเป็นการชนกับอนุภาคเล็ก เช่น ฝุ่นละออง เรียกว่าการกระเจิงแบบทินดอลล์ (Tyndall scattering) การกระเจิงของแสงแบบนี้ความถี่ยังคงเดิม หรือพลังงานเท่าเดิม แต่มีการชนอีกแบบหนึ่ง คือ การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) ซึ่งเกิดขึ้นเป็นส่วน้อยและมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ไปเล็กน้อยเรียกว่าการกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering) หรือสรุปได้ว่าเทคนิคนี้อาศัยเทคนิคที่หลักการชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างโฟตอนกับโมเลกุลของสาร จากนั้นพลังงานบางส่วนจะถูกถ่ายเทไปยังโมเลกุลทำให้เกิดการสั่นของโมเลกุลแล้วเกิดกระเจิงออกไป ประโยชน์ของการนำเทคนิคนี้ไปใช้ทางเคมีก็คือใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ วิเคราะห์สารต่างๆ ทั้งสารอินทรีย์หรือชีวสารซึ่งการวิเคราะห์นี้เป็นการหาหมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างทางเคมีของสารที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร

แหล่งกำเนิดแสง (Light source) เลเซอร์จัดว่าเป็นต้นกำเนิดแสงที่ให้ความเข้มของแสงสูง จึงได้นำมาใช้สร้างเครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ที่มีคุณภาพดี ความจริงแล้วเลเซอร์สามารถใช้ได้ในงานต่างๆ อย่างกว้างขวาง เลเซอร์ (laser) ย่อมาจากคำว่า light amplification by stimulated emission of radiation สารที่ใช้ทำเลเซอร์ได้อาจเป็นสารที่อยู่ในรูปโมเลกุลหรืออาจเป็นไอออนก็ได้ เพื่อให้เข้าใจหลักการทํางานของเลเซอร์ดีขึ้น จำเป็นจะต้องเข้าใจกระบวนการกระตุ้นให้เกิดอิมิสชัน (stimulate emission) ซึ่งเป็นกระบวนการก่อให้เกิดความเข้มขึ้นของแสงเพิ่มขึ้น (light amplification) เสียก่อน

การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ สารตัวอย่างที่จะนำไปวิเคราะห์นั้นสามารถนำไปใส่ภาชนะหรืออุปกรณ์ซึ่งทำได้ง่ายๆ และบางครั้งก็มีอุปกรณ์พิเศษเพื่อป้องกันผลที่จะเกิดขึ้นตามมาภายหลัง อุปกรณ์ที่ใช้เป็น capillary tube ที่ใช้สำหรับหาจุดหลอมเหลวธรรมดา โดยที่ปลายข้างหนึ่งเชื่อมติดกัน สารที่วิเคราะห์ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็งก็ได้ โดยนำมาใส่หลอดนำไปวิเคราะห์ได้เลย สำหรับสารตัวอย่างที่อาจเกิดการสลายตัวเมื่อได้รับแสงเลเซอร์ หรือถูกทำให้ร้อนตัว ด้วยแสงเลเซอร์อาจใช้วิธีการผสมกับ KBr แล้วอัดให้เป็นแผ่นบางๆ (pellets) เหมือนกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี แล้วนำแผ่นที่อัดนั้นไปใส่ในที่รองรับซึ่งหมุนได้ด้วยความเร็วสูง เพื่อป้องกันมิให้สารตัวอย่างเกิดความร้อนเฉพาะแห่งจากการถูกกับแสงเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสารตัวอย่างเป็นของเหลว นำสารตัวอย่างนั้นไปใส่ในเซลล์ที่หมุนได้หรืออาจใช้วิธีปั๊มสารตัวอย่างนั้นผ่านเข้าไปในหลอดเล็กๆ ก็ได้ นอกจากนี้สารตัวอย่างที่เป็นจุด ๆ อยู่บน TLC plates ก็ สามารถวิเคราะห์ได้โดยพอสให้เลเซอร์ตกลงบนจุดต่างๆ นั้น

2.3.5. วิธีการวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพเทคนิคที่นิยมใช้เป็นเทคนิคจมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic nose, E-nose)

จมูกอิเล็กทรอนิกส์ เป็นระบบที่เกิดจากการเลียนแบบจมูกของมนุษย์ที่มีความสามารถในการ จำแนกและจัดระดับความแรงของกลิ่นได้ โดยมีส่วนประกอบเป็นเซ็นเซอร์จำนวนมาก ซึ่งเซ็นเซอร์แต่ละตัวจะมีความจำเพาะในการวัดที่แตกต่างกัน อีกทั้งยังมีการคำนวณข้อมูลทางสถิติ เพื่อเป็นฐานข้อมูลให้เกิดการจดจำกลิ่น และระดับความแรงของกลิ่น ปัจจุบันจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตทางการค้า ใช้เทคนิคก๊าซเซ็นเซอร์เนื่องจากเป็นเซ็นเซอร์ที่มีความเสถียร และความทนทานสูง เทคนิคการวิเคราะห์เชิงสถิติมีความสำคัญต่อระบบเป็นอย่างมาก โดยการวิเคราะห์จะเริ่มด้วยระบบ การใช้กราฟไปจนถึงการคำนวณแบบซ้ำซ้อน เช่น การแยกแยะและจัดการข้อมูลด้วยวิธี Principal component analysis (PCA) การประมวลผลที่เลียนแบบสมองของมนุษย์ที่เรียกว่า อาร์ติฟิเชียล นิวรอน เนตเวิร์ค (Artificial Neural Networks) และฟังก์ชันเรเดียลเบซิส (Radial basis function) ซึ่งในปัจจุบันจมูกอิเล็กทรอนิกส์ได้รับการพัฒนาจะถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การควบคุมคุณภาพ การติดตามกระบวนการผลิต การประเมินความสดของผักผลไม้ การตรวจสอบอายุของอาหาร การป้องกันการปลอมแปลงอาหาร หรือใช้ตรวจสอบการปนเปื้อนของสารพิษต่างๆ ที่อาจตกค้างหรือเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ได้

จมูกอิเล็กทรอนิกส์ก็จะมีลักษณะที่เลียนแบบระบบรับรู้กลิ่นในธรรมชาติ ดังนี้

1) ส่วนรับกลิ่น ประกอบไปด้วยตัวนำกลิ่นเข้ามา ซึ่งอาจมีมอเตอร์ดูดอากาศ มีท่อรวบรวมกลิ่น (Concentrator) เพื่อให้กลิ่นมีความเข้มข้นสูงขึ้น และที่สำคัญที่สุดคือเซ็นเซอร์รับกลิ่นจำนวนมากตั้งแต่ 4 ตัวขึ้นไปจนถึงนับพันตัว ซึ่งหากจะเปรียบเทียบกับธรรมชาติก็ถือว่าน้อยมาก

2) ส่วนรวบรวมสัญญาณ ทำการแปรสัญญาณจากเซ็นเซอร์ (Transducing) และทำการจัดการสัญญาณ (Signal Conditioning) เช่น ลดสัญญาณรบกวน จากนั้นก็จะแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิตอล (A/D Converter)

3) ส่วนประมวลผล นำสัญญาณที่ได้รับมาทำการเปรียบเทียบเชิงสถิติกับฐาน ข้อมูลที่มีอยู่เดิม ซึ่งอาจจะใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis) เพื่อทำ

การแยกแยะกลิ่น
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6.วิเคราะห์การดูลักษณะทางกายภาพได้แก่

1.) วิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)[19]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องที่ใช้ส่องดูวัตถุขนาดเล็กมากๆ ให้เห็นใหญ่ขึ้นได้กว่าเดิมถึงสองแสนเท่า กล้องชนิดนี้ใช้อิเล็กตรอนแทนแสง โดยใช้อำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าบังคับกระแสอิเล็กตรอนให้พุ่งไปรวมกันที่จุดใดจุดหนึ่ง บนตัวอย่างในทำนองเดียวกับการใช้เลนส์รวมแสงไปที่จุดโฟกัสในกล้องจุลทรรศน์ แบบธรรมดาซึ่งจะได้ภาพจะเกิดขึ้นบนจอมอนิเตอร์โดยสามารถที่จะเลือกบริเวณที่จะดูได้อย่างสะดวก โดยระบบของเครื่องจะอยู่ในสภาพสุญญากาศ

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นประโยชน์มากในการศึกษาค้นคว้าทางการแพทย์ โลหะวิทยา และวิทยาศาสตร์อีกหลายสาขา เพราะใช้ส่องให้มองเห็นรูปร่าง ลักษณะของแบคทีเรีย ไวรัส และผลึกที่ประกอบขึ้นเป็นโลหะซึ่งไม่อาจมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาได้

หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน ด้านบนจะมีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา (Primary electron) โดยจะควบคุมจำนวนอิเล็กตรอนนั้นด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง ๆ (High voltage) โดยใช้เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) โฟกัสให้อิเล็กตรอนนั้นตกกระทบชิ้นงาน และเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบชิ้นงานจะ ได้สัญญาณแบบต่าง ๆ เช่น สัญญาณจากอิเล็กตรอนในชิ้นงานที่หลุดออกมา (Secondary electron) อิเล็กตรอนที่กระดอนกลับ (Backscattered electron) หรือ x-ray สัญญาณแต่ละชนิดจะถูกตรวจวัดโดยตัวจับสัญญาณแต่ละชนิด และแปลผลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และแปลเป็นภาพและกราฟในที่สุด

2.) วิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการทดสอบสี (Color test)

เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการทดสอบสารวัตถุระเบิดพบว่าสามารถตรวจจับอนุภาคขนาด 20 นาโนกรัมซึ่งจะแสดงผลสีออกมาตามคุณสมบัติของสารและบริษัทผู้ผลิต วัตถุระเบิดส่วนใหญ่จะไม่ละลายน้ำและเป็นเรื่องยากมากที่จะกำจัดร่องรอยในมือแม้หลังจากที่การชำระร่างกายด้วยน้ำและสบู่

2.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal components analysis, PCA)[13]

ปัจจุบันงานด้านวิจัยจะมีตัวแปรหลายตัวแปร ซึ่งตัวแปรเหล่านี้บางตัวอาจมีความสัมพันธ์กันมากน้อยหรือไม่สัมพันธ์กันเลยก็ได้ การวิเคราะห์หลายตัวแปรจะใช้หลักสถิติเข้ามาช่วยในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่นานนักจะเห็นไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูลหลายตัวแปรเช่น การวิเคราะห์ปัจจัย การวิเคราะห์จำแนกประเภท การวิเคราะห์ตัวประกอบหลัก การวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปร เป็นต้น ในการวิเคราะห์จะพิจารณาจากวัตถุประสงค์ของวิธีการนำไปใช้ซึ่งในการวิเคราะห์ผลในงานวิจัยนี้จะใช้คือ เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal components analysis, PCA)

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ในการจัดจำแนกแพทเทิร์น (Pattern) ด้วยวิธีคำนวณเมตริกซ์ โดยจะนำข้อมูลจำนวนมากมาทำการลดจำนวนตัวแปรของข้อมูลให้มีจำนวนน้อยลง การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเดิม (X) เป็นการแปลงเชิงเส้นของค่าความแปรปรวนจากข้อมูลเดิมไปยังตัวแปรใหม่ (Y) การวิเคราะห์นี้เป็นเทคนิคทางสถิติที่อยู่บนฐานของค่าความแปรปรวน (Variance หรือ SD) และค่าความแปรปรวนรวม (Covariance) ของกลุ่มข้อมูล ค่าความแปรปรวนเป็นการแตกกระจายซึ่งเป็นหนึ่งตัวแปรที่อยู่ในกลุ่มของข้อมูล ส่วนค่าความแปรปรวนรวมเป็นการวัดกระจายการแตกกระจายในระหว่างกลุ่มของตัวแปร ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ของจุมก อเล็กทรอนิกส์ จากสัญญาของเซนเซอร์หลายชนิดที่ใช้ตรวจจับก๊าซจะทำการหาดัชนีหรือพารามิเตอร์ชุดใหม่สำหรับการแสดงผลข้อมูลนั้นให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ โดยพารามิเตอร์ชุดใหม่นี้หนึ่งตัวจะเป็นผลรวมจากข้อมูลของเซนเซอร์ทุกตัวแต่จะให้น้ำหนักความสำคัญแตกต่างกันไป อีกพารามิเตอร์ชุดใหม่จะถูกเรียงลำดับตามความสำคัญจากมากไปน้อย โดยพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่สุดเพียง 2-3 พารามิเตอร์จะเพียงพอที่จะนำมาแสดงการจัดจำแนกข้อมูลชนิดที่เหมือนกันไปรวมกลุ่มกันและแยกจากชนิดอื่น เป็นต้น

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของตัวแปร X ทั้งหมด n ตัวเป็นการกำหนดการแปลงเชิงเส้นของการแปรเปลี่ยนในตัวแปรเดิมสู่ตัวแปรใหม่ Y ทั้งหมด n ในการแปลงนี้กำหนดให้ตัวแปรลำดับแรกของกลุ่มตัวแปร Y มีค่าความแปรปรวนสูงสุด จากค่าความแปรปรวนทั้งหมด ส่วนตัวแปรลำดับที่สองของกลุ่มตัวแปร Y จะมีค่าความแปรปรวนสูงสุดจากความแปรปรวนที่เหลือและไล่ลงไปสำหรับตัวแปรถัดไป

ขั้นตอนการวิเคราะห์โดยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักดังนี้

- 1) ทำการจัดเรียงข้อมูลให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ [X] (โดยให้แวนอนของแถวเป็นข้อมูลเรียงลำดับตามแรงดันไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่มีหน่วยเป็นโวลต์ และแนวตั้งของแถวเป็นข้อมูลกลิ่นของสารตัวอย่าง
- 2) คำนวณหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลแต่ละหลักจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \dots\dots\dots(2.1)$$

- 3) นำค่าเฉลี่ยที่ได้ลบจากข้อมูลจริงในแต่ละหลัก จะได้เมตริกซีใหม่[Y] และนำเมตริกซีใหม่ที่ได้
นี้มาหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจาก

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \dots\dots\dots(2.2)$$

และนำมาคำนวณหาค่าแปรปรวนได้จาก

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)} \dots\dots\dots(2.3)$$

- 4) หาค่าความแปรปรวนรวมจาก

$$C(x, y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \dots\dots\dots(2.4)$$

- 5) คำนวณหาค่าของ Eigenvalues และ Eigenvectors ได้จาก

$$(C_x - \lambda I)s = 0 \dots\dots\dots(2.5)$$

เมื่อ C_x คือ ความแปรปรวนรวมของข้อมูล

λ คือ Eigenvalues

s คือ Eigenvectors

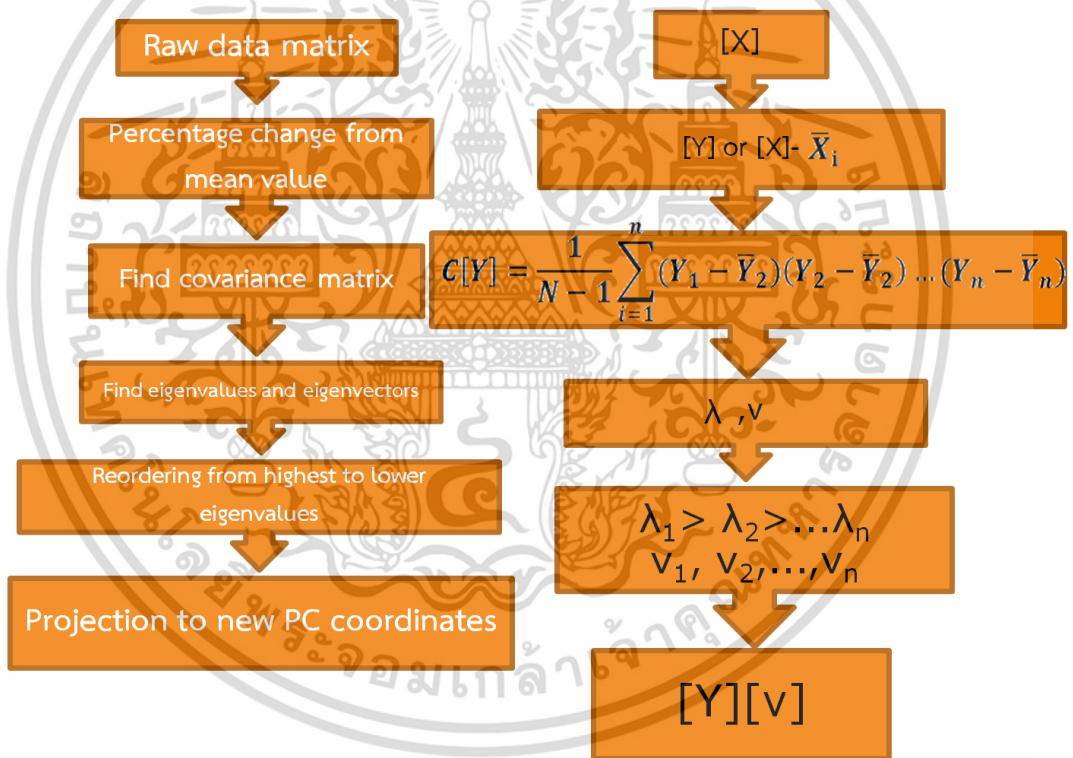
ค่า Eigenvectors (s) แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบหลักและตัวแปรเดิม (Principal Component Analysis Loading plot) ของข้อมูลจะได้เป็นเมตริกซ์จตุรัส เป็นค่าที่แสดงถึงอิทธิพลของตัวแปรเดิมที่มีต่อการสร้างตัวประกอบหลัก ถ้าค่า loading ของตัวแปรเดิมใดมีค่ามาก (ใกล้ +1 หรือ ใกล้ -1) แสดงว่าตัวแปรเดิมนั้นมีความสำคัญหรือมีส่วนร่วมในการสร้างตัวประกอบหลักมาก โดยจะแสดงถึงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่สอดคล้องกับ Principal Component Analysis score plot ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$PC=[Y]s \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

โดย PC1 จะถือว่ามีจำนวนข้อมูลเดิมอยู่บนแนวแกนนี้มากที่สุด เนื่องจากมีค่าความแปรปรวนของข้อมูลมากที่สุดดังที่กล่าวมาข้างต้น จะสามารถคำนวณหาค่าร้อยละของข้อมูลเดิมที่อยู่บนแกนPC1ได้จาก

$$PC1 = \frac{\text{Eigenvalue} \times 100}{\text{Total Eigenvalues}} \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

สามารถสรุปขั้นตอนการวิเคราะห์ผลได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคPCA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคจุ่มกิโลอิเล็กทอนิกส์

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคจุ่มกิโลอิเล็กทอนิกส์ โดยจะกล่าวถึงขั้นตอนการตรวจรวมทั้งผลการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

ปัจจุบันมีเทคนิคในการวิเคราะห์ระเบิดมีมากมาย เช่น ทางด้านแสงด้วยเทคนิค UV-VIS spectrophotometry, หางค์ประกอบของธาตุ ได้แก่เทคนิค Atomic Absorption Spectroscopy (AAS), X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF), High-performance liquid chromatography (HPLC), Gas chromatography/mass spectrometry (GC-MS), Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP), Ion mobility spectrometry (IMS), หาความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์(X-ray diffraction, XRD), หาพันธะทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometry (FTIR) และ Raman Spectrometry (Raman), ดูลักษณะทางกายภาพด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM), ดูข้อมูลเชิงคุณภาพด้วยเทคนิคจุ่มกิโลอิเล็กทอนิกส์ (Electronic nose, E-nose) และ Color test เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ต้องการลดขั้นตอนการเตรียมสารและลดเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ จากการศึกษาเทคนิคต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น จะยกตัวอย่างวิธีการเตรียมตัวอย่างและวิธีการตรวจของแต่ละเทคนิคอย่างคร่าวๆ ของนักวิจัยที่ทำการทดลอง ดังนี้ เทคนิค IMS เป็นเทคนิคที่หางค์ประกอบของธาตุซึ่งจะใช้อาศัยหลักการเหนี่ยวนำละอองไอออนของสาร เทคนิคนี้มีนักวิจัยชื่อ T. Khayamian และคณะ ประเทศอิหร่าน [19] ได้ทำการทดลองหาสาร TNT, PETN และ RDX ซึ่งมีการเตรียมสารในเมทริล ไอโซบิวทิล คีโตน (methyl isobutyl ketone) ต้องทำให้เป็นของเหลวก่อน โดยผสมกับกรดไนตริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และทำการทดลองพร้อมวิเคราะห์ผล เทคนิคเป็นเทคนิคที่ต้องมีการเตรียมสารที่ยุ่งยาก ต่อมาจะกล่าวถึง เทคนิค FTIR เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์ และ อินทรีย์เทคนิคนี้เป็นวิธีการทาง Spectroscopy ชนิดหนึ่งที่ศึกษาการดูดกลืนแสงของสารในย่านความถี่ของแสงซึ่งโดยการวิเคราะห์โครงสร้างสารจะอาศัยการดูดกลืนที่แตกต่างกันของแต่ละโมเลกุลซึ่งโมเลกุลแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดที่แตกต่างกัน เทคนิคนี้มีความนิยมอย่างแพร่หลายในการตรวจด้านวัสดุศาสตร์และด้านโพลีเมอร์ ในด้านทางนิติวิทยาศาสตร์ก็เช่นกันได้มีกลุ่มนักวิจัยของ A. Banas และคณะ[2] จากประเทศสิงคโปร์ได้

ทำการศึกษาเทคนิคการตรวจนี้ขึ้นมาโดยจะทำการตรวจสาร C-4, PETN, TNT และ RDX หลังการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

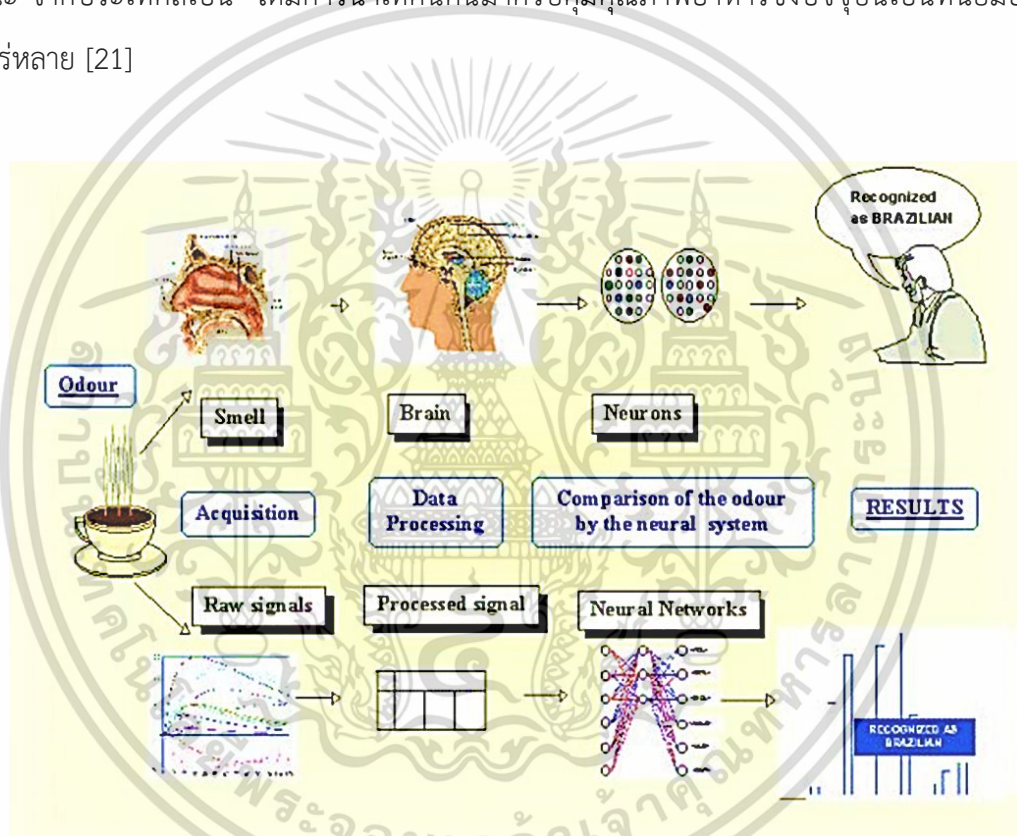
ระเบิด โดยจะทำการตรวจสอบสารระเบิดก่อนและหลังระเบิดเพื่อเปรียบเทียบกัน วิธีการเก็บหลังระเบิด จะเก็บจากชิ้นส่วนที่เกิดจากการระเบิดและมีการตรวจซ้ำๆหลายครั้ง โดยใช้เวลาในแต่ละครั้ง ประมาณ 30 นาที จากการศึกษาเทคนิคนี้พบว่า การเตรียมสารอาจจะไม่ยุ่งยากพร้อมทั้งการวิเคราะห์ ใช้เวลานาน จึงทำการศึกษาเทคนิคอื่น ๆ ที่สามารถบอกข้อมูลในเชิงคุณภาพได้บ้าง จึงพบว่า มีเทคนิค จมูกอิเล็กทรอนิกส์, กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดและการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถตรวจได้ โดยไม่ต้องเตรียมสารให้ยุ่งยากและการตรวจวิเคราะห์ใช้เวลาสั้น แต่เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นั้นใช้เวลานาน ทางผู้วิจัยจึงตัดสินใจเลือกเทคนิคจมูกอิเล็กทรอนิกส์มาทำการทดลองครั้งนี้ และมีแนวคิดที่ว่า ถ้าหากนำวิธีการวิเคราะห์แบบจดจำรูปแบบของการวิเคราะห์ผลของเทคนิคจมูก อิเล็กทรอนิกส์มาใช้กับเทคนิคอื่นได้หรือไม่ และคิดว่าหากนำวิธีการวิเคราะห์ผลมาใช้กับเทคนิคการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์น่าจะใช้ได้ โดยจะขอกล่าวในบทต่อไป

จมูกอิเล็กทรอนิกส์ [7,8] เป็นเครื่องมือที่สามารถระบุกลิ่นจดจำกลิ่นต่างๆให้คล้ายกับการ ทำงานของมนุษย์เปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 3.1 เมื่อมนุษย์สูดดมอากาศเข้าไปอากาศก็จะนำพาไอของ โมเลกุล ซึ่งอาจมีกลิ่นเข้าไปในโพรงจมูก กระแสลมแปรปรวน (Turbulence) ในโพรงจมูกจะช่วยทำ ให้ไอโมเลกุลนั้นเกิดการสัมผัสกับต่อมรับกลิ่นซึ่งอยู่บนเซลล์ประสาทรับกลิ่น โดยปลายข้างหนึ่งของ เซลล์นี้จะไปรวมกันที่ต่อมรวมประสาท (Glomeruli) ซึ่งมันจะทำหน้าที่ขยาย สัญญาณ (Amplifier) แล้วนำสัญญาณประสาทส่งไปสู่สมองส่วนที่เรียกว่า Olfactory Cortex เซลล์ รับกลิ่นที่มีโมเลกุลรับกลิ่นชนิดเดียวกันจะส่งสัญญาณไปที่ต่อมรวมประสาทแบบเดียวกัน ทำให้สมอง แยกแยะได้ว่าสัญญาณที่เข้ามานั้นมาจากเซลล์ที่มีโมเลกุลรับกลิ่นแบบไหน จากนั้นสมองก็จะ ประมวลผลออกมาเช่นเดียวกับจมูกอิเล็กทรอนิกส์มีลักษณะการทำงานซึ่งแบ่งออกเป็นสามส่วน ดังนี้คือส่วนรับกลิ่นเปรียบเทียบเช่น เซอร์รับกลิ่นส่วนที่สองรวบรวมสัญญาณซึ่งจะทำการแปร สัญญาณจากเซ็นเซอร์จากสัญญาณอนาล็อกให้เป็นดิจิตอล (Data acquisition) และส่วนที่สามเป็น การประมวลผลนำสัญญาณที่ได้มาทำการเปรียบเทียบเชิงสถิติกับฐานข้อมูลจะใช้วิธีการวิเคราะห์ องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis, PCA)

จมูกอิเล็กทรอนิกส์จะพยายามเลียนแบบธรรมชาติในแทบทุกด้าน เช่น ชา, กาแฟ, ผลไม้ อบแห้ง, บรรจุน้ำดื่ม, น้ำผักและผลไม้, กลิ่นสังเคราะห์ในผลิตภัณฑ์อาหาร, เครื่องหอม, สินค้าอุปโภค เป็นต้น วิธีการวัดต่างๆไปที่ใช้ในเทคนิคนี้ก็คล้ายๆกัน เช่น กลิ่นไวน์แล้วเอาไปดมกลิ่นกาแฟทันที มันก็ จะอาจจะไม่สามารถรับรู้กลิ่นกาแฟได้ดี เนื่องจากโมเลกุลกลิ่นไวน์ได้เข้าไปจับตัวเซ็นเซอร์ทำให้ เซ็นเซอร์ไม่สามารถจับกับโมเลกุลกลิ่นอื่นๆที่เข้ามาใหม่ได้ จึงต้องมีวิธีการไล่กลิ่นเดิมออกไปด้วยการ

เป่าอากาศเข้าไปที่ตัวเซ็นเซอร์ นอกจากนี้จมูกอิเล็กทรอนิกส์ก็เหมือนจมูกมนุษย์ที่ต้องการการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่จะอิงขึ้นด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียนรู้ ตอนที่เรากินมันนั้นเราแทบไม่มีข้อมูลของกลิ่นอยู่เลยในสมองของเรา เราต้องเรียนรู้ตั้งแต่เด็กกว่าดอกไม้มีกลิ่นอย่างไร สตรอเบอร์รี่มีกลิ่นอย่างไร จมูกอิเล็กทรอนิกส์ก็เช่นเดียวกันที่ต้องการการฝึกฝน เพื่อให้สามารถจดจำแยกแยะกลิ่นได้ นักชิมไวน์ที่มีความเชี่ยวชาญในการจำแนกแยกแยะไวน์ชนิดต่างๆ ต้องอาศัยการฝึกฝนและสั่งสมประสบการณ์เป็นระยะเวลายาวนานนับสิบปี เป็นต้น นักวิจัยที่นำเทคนิคนี้มาใช้มีมากมาย เช่น นักวิจัย S. Ampuero และคณะ จากประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ได้ทำการทดลองการใช้จมูกอิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ของนม (The electronic nose applied to dairy products: a review) [20] และมีนักวิจัย Miguel Peris และคณะ จากประเทศสเปน ได้มีการนำเทคนิคนี้มาควบคุมคุณภาพอาหารซึ่งปัจจุบันเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย [21]



รูปที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบระบบการทำงานของมนุษย์และจมูกอิเล็กทรอนิกส์

จุดเด่นของเทคนิคจมูกอิเล็กทรอนิกส์คือการวิเคราะห์ผลได้รวดเร็วและบอกข้อมูลเชิงคุณภาพของกลิ่นได้ เช่น กลุ่มของสาร หรือระดับปริมาณมาก น้อย ปานกลาง [22,23] ข้อดีคือ มีราคาต่ำกว่าเทคนิคการตรวจวัดขั้นสูงโดยทั่วไปและสามารถให้ข้อมูลได้หลากหลายปัจจุบันระบบนี้นิยมมากในเชิงพาณิชย์ทั้งในประเทศและต่างประเทศและยังมีการพัฒนาใช้การวัดสารเคมีในน้ำ ที่เรียกว่า ระบบรับรู้รสแบบอิเล็กทรอนิกส์ [24,25] อีกด้วย จากการศึกษาพบว่านอกจากนิยมใช้ในเชิงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาณิชย์แล้วยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านนิติวิทยาศาสตร์ได้ด้วย โดยดูได้จากทดลองของ Jehuda Yinon เป็นบุคคลที่มีความชำนาญด้านเกี่ยวกับนิติวิทยาศาสตร์ ได้ศึกษาเกี่ยวกับระบบของจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานที่เกี่ยวข้องกับการตรวจระเบิด เช่น จากบทความเรื่องการตรวจจับระเบิดด้วยจมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Detection of Explosive by Electronic Noses) [26] จะกล่าวถึงวิธีการเลือกเซ็นเซอร์และวัสดุที่เหมาะสมในการประดิษฐ์จมูกอิเล็กทรอนิกส์และสารที่ใช้เป็นสารระเบิดประเภทแรงสูงคือใช้สาร TNT และ DNT และยังได้มีการพัฒนาร่วมกับ Julian W. Gardner [27] ซึ่งเป็นบุคคลที่มีความชำนาญด้านจมูกอิเล็กทรอนิกส์ ได้พัฒนาด้านการตรวจทางด้านตรวจระเบิดร่วมกัน จากบทความเรื่อง จมูกอิเล็กทรอนิกส์และเซ็นเซอร์สำหรับการตรวจจับระเบิด (Electronic Noses & Sensors for the Detection of Explosives) [7] กล่าวถึงวิวัฒนาการของเซ็นเซอร์ในการตรวจวัดระเบิดในปัจจุบัน และยังมีบทความอื่นที่น่าสนใจ อาทิเช่นบทความของ David James และคณะ[28], Muthukumar K. [29] และ Suman Singh[30] ได้ศึกษาเกี่ยวกับเซ็นเซอร์ที่นำมาใช้เกี่ยวกับจมูกอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น จากบทที่เกี่ยวข้องกับงานด้านนิติวิทยาศาสตร์ที่นำเทคนิคจมูกอิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ใช้และเริ่มเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายสังเกตได้จากการพัฒนาเกี่ยวกับเซ็นเซอร์ [30-34] มากมาย ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำเทคนิคนี้มาทดลองในงานวิจัย

ในส่วนของเซ็นเซอร์นั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นส่วนที่มีคุณสมบัติในการตรวจจับสารแต่ละชนิดแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงขอล่าส่วนความเป็นมาของเซ็นเซอร์ ที่ผ่านมามีการพัฒนาในด้านสิ่งแวดล้อมจะเน้นในการตรวจจับก๊าซพิษและสารที่ก่อมะเร็งเป็นหลัก ในการตรวจจับก๊าซเหล่านี้จะมีการเน้นความจำเพาะเจาะในการตรวจจับสารด้วยปฏิกิริยาทางเคมี มีการนำวัสดุนาโนมาใช้ในการควบคุมโครงสร้างของพื้นผิวซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพการตรวจจับก๊าซ วัสดุที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันได้แก่ ท่อคาร์บอนนาโน (Carbon Nanotubes) เป็นต้น จากการศึกษาคุณสมบัติหรือการพัฒนาเซ็นเซอร์ได้มีกลุ่มผู้วิจัยหลายกลุ่มที่มีความสนใจ เช่น นักวิจัย David James และคณะ [34] ได้ศึกษาเซ็นเซอร์แบบ Metal oxide semiconductor (MOS) และ Metal oxide semiconductor filed effect transistor (MOSFET) เพื่อที่จะนำมาตรวจวัดอาหาร, นักวิจัย Behzad Rezaei และคณะ [35] ได้ศึกษาเซ็นเซอร์แบบ multi-walled carbon nano tube เพื่อนำมาวัดสารระเบิด และพร้อมกันนี้ทางนักวิจัย Muthukumar K. และคณะ [29] ได้ศึกษาเซ็นเซอร์แบบ Carbon nano tube เพื่อไปวัดสารระเบิดเช่นเดียวกัน เป็นต้น

3.1 การตรวจสอบอุณหภูมิของสารวัฏธนะเปิดโดยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC)[36]

เพื่อใช้การวางแผนในการทดสอบสารที่อุณหภูมิต่างๆการเตรียมสารเพื่อตรวจสอบการวัดหาค่าจุดเดือดของสารทดสอบโดยการนำสารที่ใช้ในการทดสอบมาทำการวิเคราะห์โดยเทคนิค DSC เป็นแคลอริมิเตอร์ (Calorimeter) ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Thermal Transition) ของสารตัวอย่าง ที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (การดูดหรือคายพลังงาน) ของสารตัวอย่าง เมื่อถูกเพิ่ม (หรือลด) อุณหภูมิ ในบรรยากาศที่ถูกควบคุม

หลักพื้นฐานของ DSC คือ นำถาด 2 ถาด คือถาดที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample Pan) และถาดอ้างอิง (Reference Pan) ซึ่งเป็นถาดเปล่า วางอยู่ข้างกัน ไปวางบนอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ชนิดเดียวกัน เมื่อเริ่มการทดลองอุปกรณ์ให้ความร้อน จะเริ่มให้ความร้อนแก่ถาดทั้งสอง โดยเครื่อง DSC จะควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้คงที่ (เช่น 10°C ต่อ 1 นาที) โดย จะควบคุมให้ความร้อนถาดทั้งสองที่วางแยกกัน ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนที่เท่ากันตลอดทั้งการทดลอง

หลังการให้ความร้อน อุณหภูมิของถาดทั้งสองจะเพิ่มด้วยอัตราที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample Pan) มีตัวอย่างอยู่ข้างใน แต่ถาดอ้างอิง (Reference Pan) ไม่มี การมีสารตัวอย่างอยู่ข้างในทำให้ที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample Pan) มีสารในปริมาณที่มากกว่าถาดอ้างอิง (Reference Pan) นั่นหมายความว่า Furnace ต้องให้ความร้อนที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample Pan) มากกว่าที่ให้ถาดอ้างอิง (Reference Pan) เพื่อที่จะคงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากัน ดังนั้น Furnace ที่อยู่ใต้ที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample Pan) จะต้องทำงานหนักกว่าเตาหลอม (Furnace) ที่อยู่ใต้ถาดอ้างอิง (Reference Pan) คือมันต้องให้ความร้อนมากกว่า และการวัดความแตกต่างของปริมาณความร้อนจากเตาหลอมทั้งสองนี้ ก็คือหน้าที่หลักของเครื่อง DSC และเพื่อให้เห็นภาพได้ง่าย เราจะสร้างกราฟ โดยมีแกน X เป็นค่าของอุณหภูมิ และแกน Y เป็นค่าของความแตกต่างของปริมาณความร้อนของเตาหลอมทั้งสอง ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งจึงนำมาใช้เพื่อศึกษาสมบัติที่เป็นลักษณะพิเศษของวัสดุต่างๆ ในการวิเคราะห์ได้มีการควบคุมการวัดอุณหภูมิที่ $25-300^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิเพิ่มทุก 10°C ต่อนาที

โดยปกติแล้ว การทดสอบสารตัวอย่างทำโดยการเพิ่ม (หรือลด) อุณหภูมิสารตัวอย่างด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่คงที่ (เช่น 10°C ต่อ 1 นาที โดยเริ่มต้นที่ 25°C และสิ้นสุดการทดลองที่ 300°C) หรือการรักษาอุณหภูมิสารตัวอย่างไว้คงที่ (Isothermal) เป็นระยะเวลาหนึ่ง (เช่น 200°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง) และสำหรับการทดลองส่วนใหญ่แล้ว บรรยากาศก็มีบทบาทสำคัญต่อผลการ

ทดลองเช่นเดียวกับอุณหภูมิและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ โดยส่วนใหญ่แล้วบรรยากาศที่ใช้ในการ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่อผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ในการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองมีสองแบบคือ บรรยากาศเฉื่อย (Inert Atmosphere เช่น แก๊สไนโตรเจน) และบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจน (Oxidizing Atmosphere เช่น แก๊สออกซิเจน หรืออากาศ)

ความร้อนที่ให้อารตัวอย่าง (Heat Flow) มีค่าสอดคล้องกับพลังงานที่ให้อารตัวอย่าง และถูกวัดในหน่วยมิลลิวัตต์ (milliwatts, mW) เมื่อนำค่าพลังงานมาคูณด้วยเวลา ผลลัพธ์ที่ได้คือปริมาณพลังงานที่ถูกแสดงในหน่วย มิลลิวัตต์วินาที (mW.s) หรือ มิลลิจูลล์ (mJ) พลังงานที่ให้อารตัวอย่างมีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy) ของสารตัวอย่าง เมื่อสารตัวอย่างดูดพลังงาน เราเรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Endothermic และเมื่อสารตัวอย่างคายพลังงาน เราเรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Exothermic

เมื่อสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหลอมเหลว (Melting) Furnace ต้องให้ความร้อนที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample Pan) มากกว่าที่ให้ภาตตัวอย่าง (Reference Pan) เพื่อที่จะควบคุมอุณหภูมิของที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample Pan) และภาตอ้างอิง (Reference Pan) ให้เท่ากัน ความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยังที่บรรจุสารตัวอย่าง มากกว่าหรือน้อยกว่าที่ถูกส่งผ่านไปยังภาตตัวอย่างนั้น ขึ้นอยู่กับว่าความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบ Exothermic หรือแบบ Endothermic

DSC เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ตั้งแต่ในอุตสาหกรรมเคมี พลาสติก อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ อากาศยาน ไปจนถึงอาหารและยา โดยถูกนำไปประยุกต์ใช้ ทั้งสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ และสำหรับงานวิจัย ตัวอย่างของข้อมูลที่สามารถวัดได้จากการใช้เครื่อง DSC เช่น จุดหลอมเหลว (Melting Point), Glass Transition Temperature (T_g, อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว), ความเสถียรต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Stability), จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา (Reaction Kinetics) หรือ ความบริสุทธิ์ (Purity) เป็นต้น

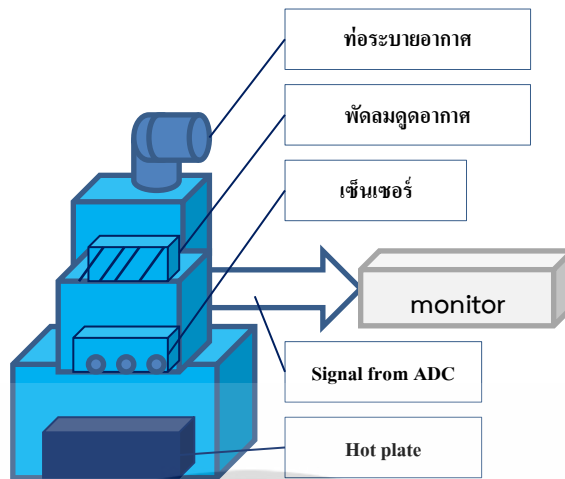


รูปที่ 3.2 เครื่องDifferential Scanning Calorimeter (DSC) รุ่นDSC823 mettlertolede

3.2 หลักการทำงานของจุ่มกิโลอิเล็กทริก

การตรวจจับสนามแม่เหล็กด้วยวิธีการแบบจุ่มกิโลอิเล็กทริกเป็นการเลียนแบบการรับรู้กลิ่นหรือรสของมนุษย์ ในลักษณะการเรียนรู้แพทเทิร์นที่เกิดขึ้นบนระบบของหัวเซ็นเซอร์ที่ต่างกันไป ในการทดลองครั้งนี้ได้สร้างเครื่องจุ่มกิโลอิเล็กทริกต้นแบบดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงระบบการทำงานของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นแบบง่าย โดยสามารถแยกการทำงานออกได้เป็น 4 ส่วน ดังรูปที่ 3.4 ดังนี้



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงการทำงานของจมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Nose, E-nose)

3.2.1 เซ็นเซอร์(Sensor) คืออุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณหรือปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิ(temperature), เสียง(sound), แสง(light), แรงทางกล(force), ความดันบรรยากาศ (pressure), ระยะกระจัด (displacement), ความเร็ว(speed), อัตราเร่ง (acceleration), ระดับของเหลว(liquid level) และอัตราการไหล(flow rate) เป็นต้น จากนั้นจะทำหน้าที่เปลี่ยนเป็นสัญญาณออกหรือปริมาณเอาต์พุตที่ได้จากการวัดในอีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถนำไปประมวลผลต่อได้ ในการทดลองครั้งนี้ใช้เซ็นเซอร์ทั้งหมด 4 ตัว ดังตารางที่ 3.1 ซึ่งสัญญาณที่ได้จะแสดงค่าแรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจ

เซ็นเซอร์	ชนิด	สารที่ตรวจวัดได้	ความละเอียด
TGS 2602	Air contaminants	VOCs, Toluene, Hydrogen sulfide	1-30 ppm
TGS 2610	LPG	Iso-butane/ Propane, Methane, Hydrogen	100 ppm
TGS 2620	Solvent vapors	Alcohol, Solvent vapors	50-5,000 ppm
TGS 2201	Gasoline	NO, NO ₂	0.1 - 10 ppm
	Diesel Exhaust Gas	CO, H ₂ HC	10 - 100 ppm

3.2.2 ตัวแปรสัญญาณการตรวจจับ (Transducers) จะแปรสัญญาณการตรวจจับสารระเหยให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า

3.2.3 ระบบอิเล็กทรอนิกส์รวบรวมสัญญาณ (Data acquisition) จะเป็นการแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Converter, ADC)

3.2.4 ระบบโปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณ (Analysis software) ซึ่งเป็นลักษณะการวิเคราะห์แพทเทิร์นของสัญญาณที่เกิดจากเซ็นเซอร์หลายๆตัว เพื่อจำแนกระบุชนิดและปริมาณของสารระเหยที่ต้องการตรวจวัด ในการทดลองครั้งนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์แบบการหาค่าประกอบหลัก (Principals Component Analysis, PCA)

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

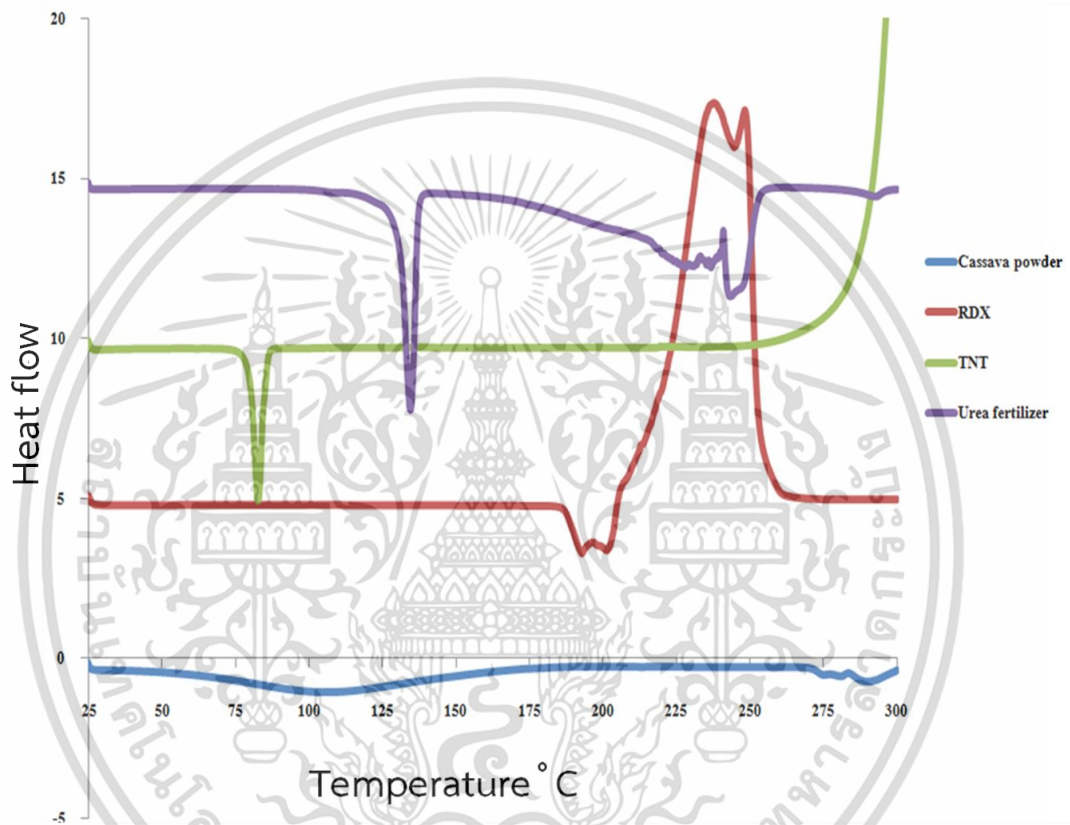
3.3.1 หาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการวัดด้วยจุ่มอุณหภูมิต่อเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้น

1) นำสาร TNT, RDX, Urea fertilizer และ Cassava powder หาจุดเดือดและจุดหลอมเหลวด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) รุ่น DSC823 mettler toledo

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ผลการทดลองหาจุดเดือดและจุดหลอมเหลวด้วยเครื่อง DSC จากรูปที่ 3.4 สามารถนำมาสรุปผลดังตารางที่ 3.2

3) เมื่อได้ค่าจุดเดือดและจุดหลอมเหลวของสารนั้นๆแล้วนำมาวางแผนหาอุณหภูมิในการวัดที่เหมาะสมและสามารถแยกกลืนของสารได้ดี จึงสามารถสรุปอุณหภูมิต่างๆ ได้ดังนี้ 30, 50, 100, 150 และ 200°C จากนั้นดำเนินการวัดสารตัวอย่างด้วยเทคนิคจุ่มกิโลอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นต่อไป



รูปที่ 3.5 แสดงผลการวัดหาค่าจุดหลอมเหลวและจุดเดือดของสาร Cassava powder, RDX, TNT และ Urea fertilizer ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

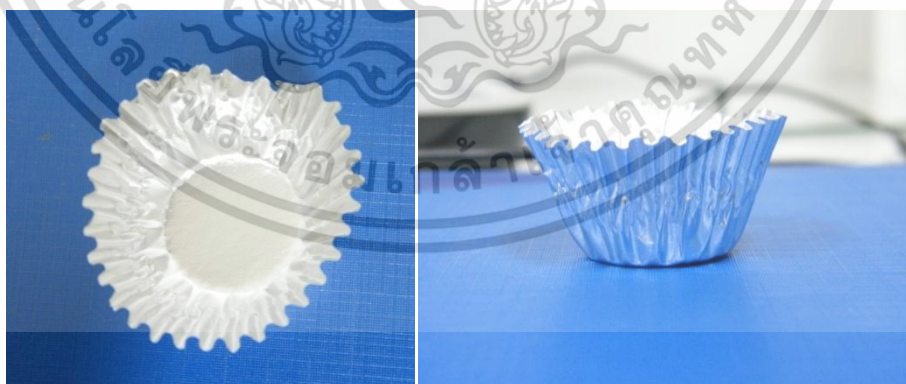
ตารางที่ 3.2 สรุปผลการทดลองหาจุดเดือดและจุดหลอมเหลวด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ได้ดังนี้

สาร	จุดหลอมเหลว	จุดเดือด
TNT	80.35 °C	295 °C
RDX	205.5 °C	234 °C
Urea fertilizer	133 °C	-
Cassava powder	-	-

หมายเหตุ เนื่องจากต่างๆ ในการทดลองครั้งนี้ได้มีการควบคุมการวัดอุณหภูมิที่ 25-300 °C จึงทำให้ผลการทดลองจุดเดือดของ Urea fertilizer และจุดเดือดของ Cassava powder ไม่สามารถบอกค่าได้ สาเหตุอาจเกิดจากการตั้งค่าของอุณหภูมิที่ต่ำหรือสูงเกินกว่าค่าของจุดเดือดและจุดหลอมเหลวของสารนั้นๆ

3.3.2 การวัดสารด้วยเทคนิคจุมุกอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้น

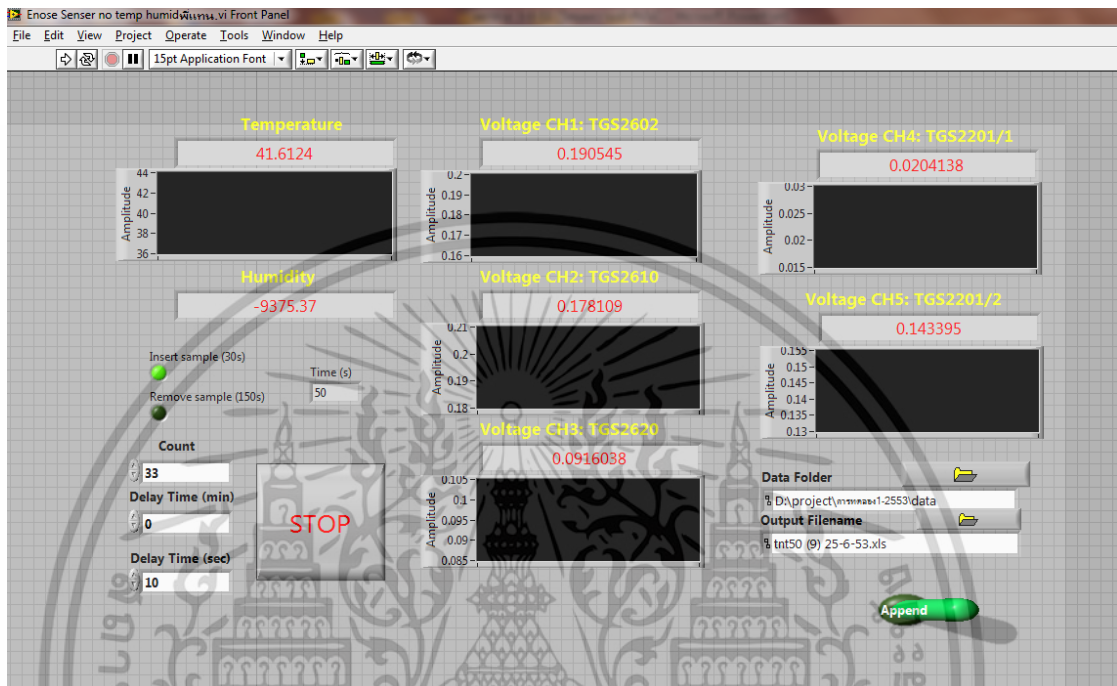
1) เตรียมสาร TNT, RDX, Urea fertilizer และ Cassava powder โดยนำสารแต่ละชนิดไปชั่งในปริมาณที่เท่ากันคือ 0.015 กรัมในถ้วยอลูมิเนียมฟลอยด์ดังรูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างถ้วยอลูมิเนียมฟลอยด์ที่ใช้ในการวัด




รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างถ้วยอลูมิเนียมฟลอยด์ที่ใช้ในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เปิดโปรแกรม Lab View ที่ตั้งไว้ประมาณ 30 นาทีก่อนการวัด เพื่อให้เซ็นเซอร์มีความเสถียรและเปิด hot plate ปรับไปที่อุณหภูมิที่ต้องการวัดโดยจะเปิดทิ้งไว้ประมาณ 10 นาทีก่อนการวัดเพื่อให้อุณหภูมิคงที่ดังรูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างโปรแกรม Lab View ที่ใช้ในการวัดและวิเคราะห์ผล



รูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างโปรแกรม Lab View ที่ใช้ในการวัดและวิเคราะห์ผล

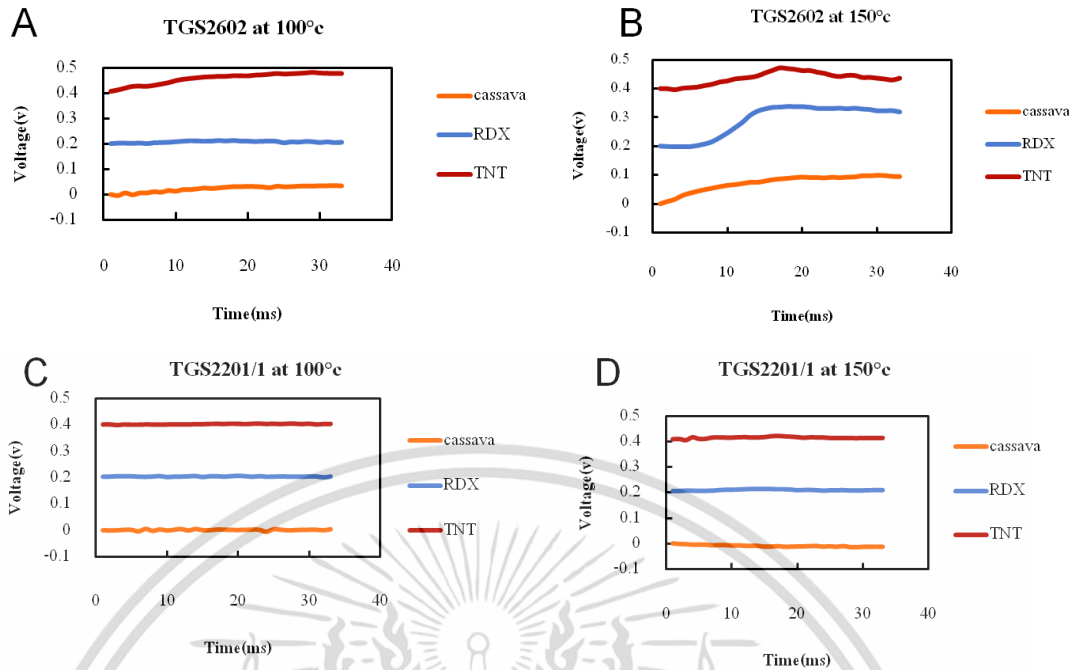
3) ในการทดลองทำการปรับค่าอุณหภูมิของ hot plate เป็นไปตามเงื่อนไขของการวัดคือ 30, 50, 100, 150 และ 200 °C รอให้อุณหภูมิที่ต้องการวัดคงที่ จากนั้นกดปุ่ม  RUN รอจนไฟที่ปุ่ม Insert sample ขึ้นเป็นสีเขียวจึงนำสารตัวอย่างวางบน hot plate และเครื่องจะทำการเก็บข้อมูลทั้งหมด 33 ค่าข้อมูล เมื่อเก็บข้อมูลครบจำนวนแล้วไฟจะขึ้นเป็นสีแดงที่ปุ่ม Remove sample จึงนำสารออกจาก hot plate

4) เมื่อวัดสารตัวอย่างเสร็จแล้วต้องเปิดพัดลมดูดอากาศประมาณ 5 นาทีทุกครั้ง เพื่อเป็นการทำความสะอาดอากาศภายในตัวเครื่องและเป็นการเตรียมพร้อมสำหรับการวัดตัวอย่างครั้งต่อไป

5) ข้อมูลของการวัดที่ได้เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า โดยแกน x แทนจำนวนข้อมูล แกน y แทนค่าแรงดันไฟฟ้างดังตัวอย่างรูปที่ 3.8

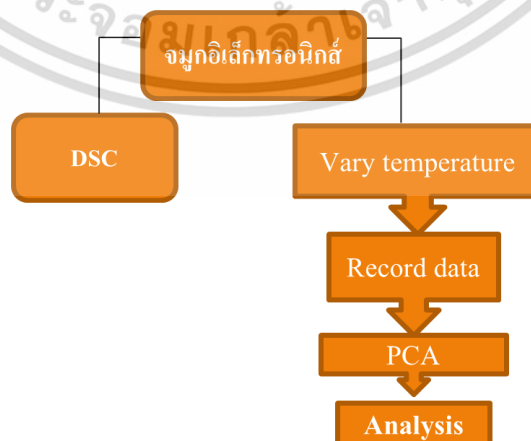
6) นำค่าแรงดันไฟฟ้ามาทำการบันทึกข้อมูลและวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนการวัดได้ดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 กราฟตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของสาร TNT, RDX และ Cassava powder โดย TGS 2602 (A-B) และ TGS2201/1 (C-D) ที่อุณหภูมิ 100 และ 150°C ตามลำดับ

จากกราฟสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของสาร TNT, RDX และ Cassava powder วัดด้วยเครื่องจุ่มกิโลอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นแบบง่ายแสดงตัวอย่างการตอบสนองของเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เซ็นเซอร์ TGS 2602 (A,B) และ TGS2201/1 (C,D) ที่อุณหภูมิ 100 และ 150°C ตามลำดับ จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเซ็นเซอร์ที่เลือกมาใช้ในการตรวจวัดนี้สามารถตรวจวัดสารได้จริงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.9 แผนภาพสรุปขั้นตอนการวัดสารด้วยเทคนิคจุ่มกิโลอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

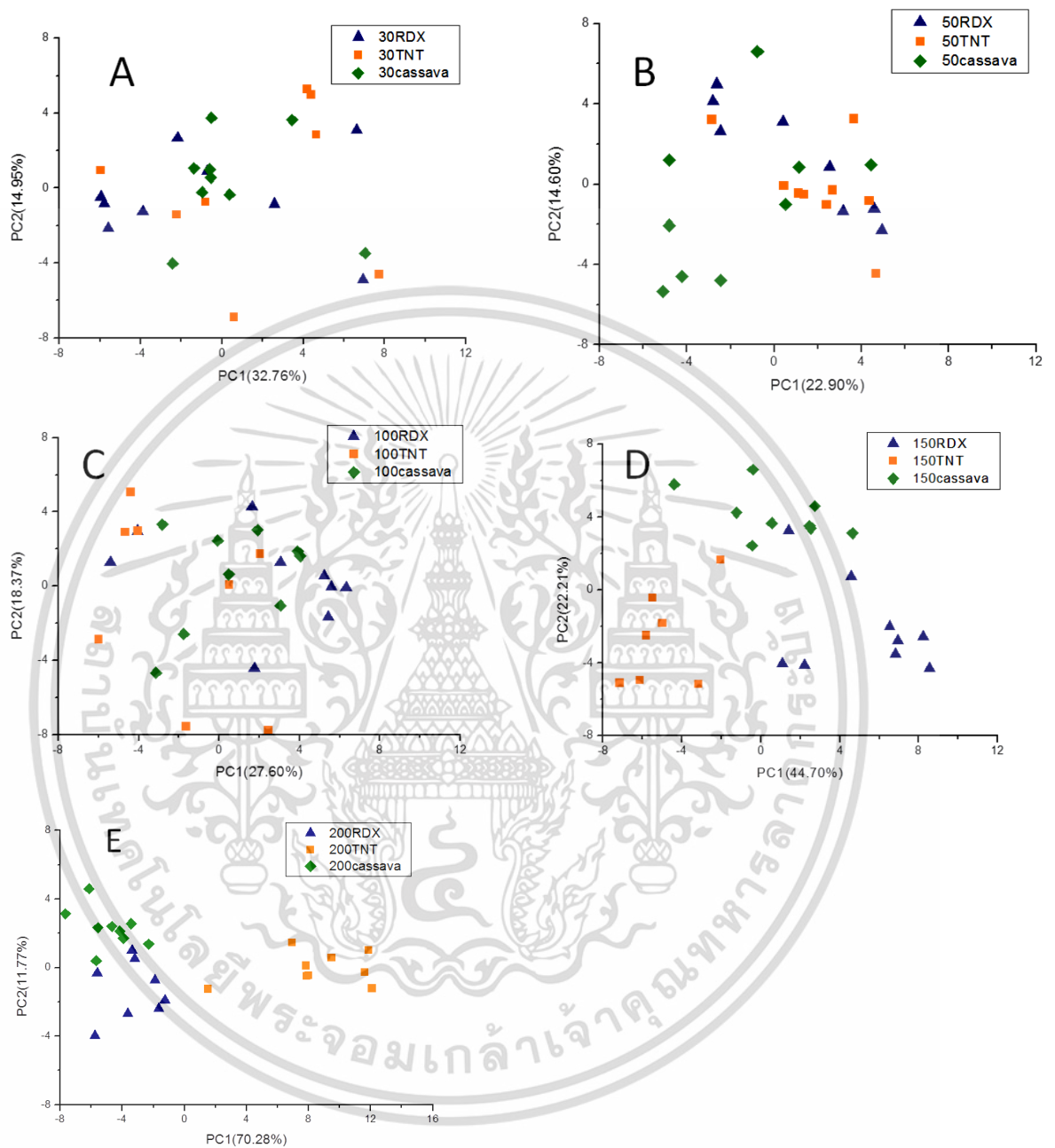
3.4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทดลองได้ทำการวิเคราะห์ผลแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบที่ 1 การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Division, SD) ของเซ็นเซอร์กรณีสารบริสุทธิ์และกรณีสารปนเปื้อน และแบบที่ 2 ไม่หารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์กรณีสารบริสุทธิ์และกรณีสารปนเปื้อน เนื่องจากค่าแรงดันไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ให้ค่าต่างกันจึงได้ทำการทดลองวิเคราะห์ 2 แบบ จากการตรวจวัดสารข้อมูลที่ได้มีค่าความแปรปรวนที่แตกต่างกันน้อยมาก หากนำค่า SD มาหารจะช่วยในการให้ค่าความสำคัญของเซ็นเซอร์ให้มีความสำคัญเท่ากัน เพื่อสรรหาว่าวิธีใดที่จะสามารถแยกกลุ่มสารได้ดีและเพื่อทำให้ง่ายต่อการตัดสินใจว่าแบบใดเหมาะสมที่จะนำมาใช้วิเคราะห์ผลมากที่สุด ดังผลการทดลองดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบที่ 1 การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ
เซ็นเซอร์ กรณีสารบริสุทธิ์

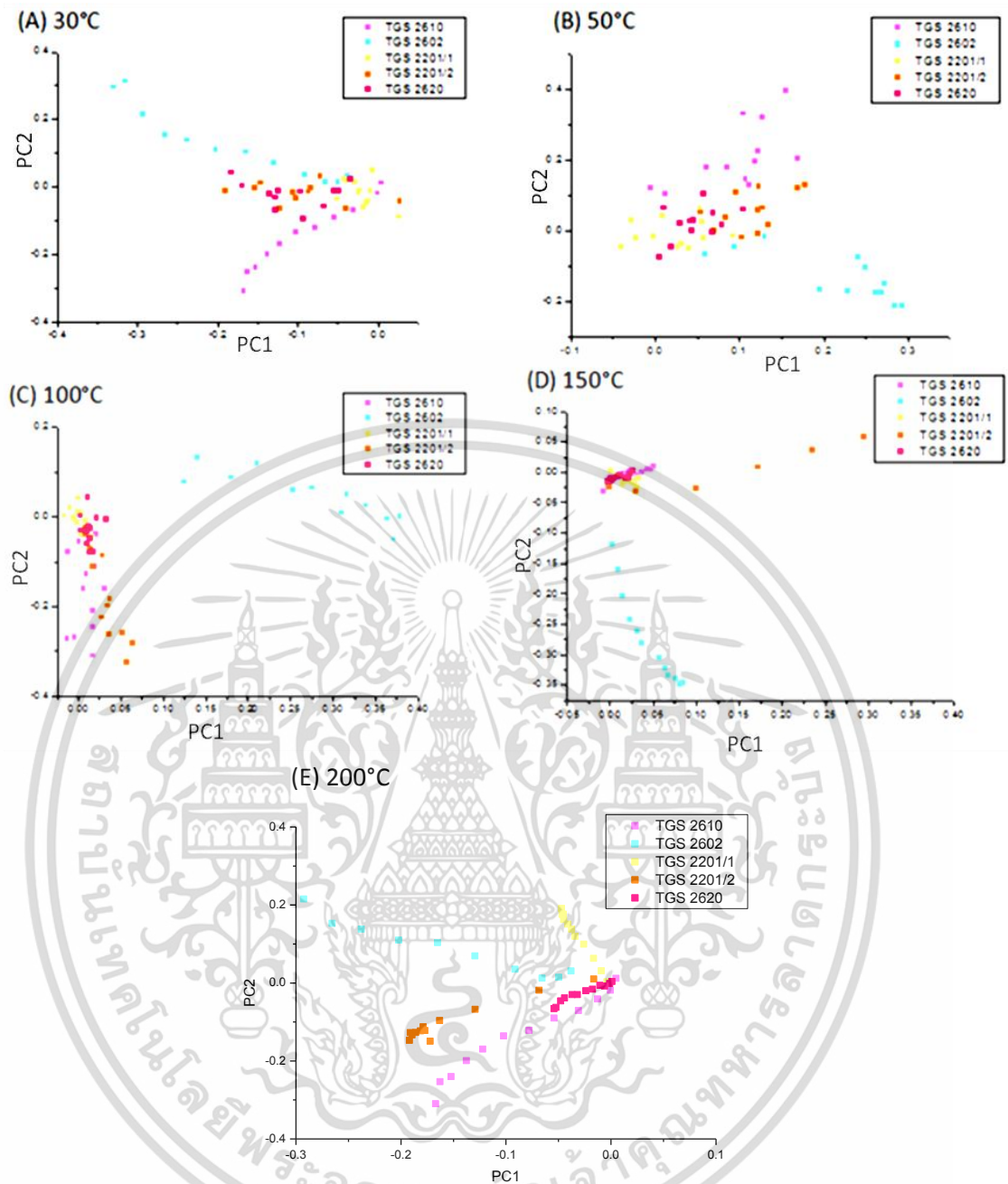


รูปที่ 3.10 แสดงกราฟ Principal Component Analysis (PCA) score plot ของสารTNT, RDX และ Cassava powder ที่อุณหภูมิ 30(A), 50(B), 100(C), 150(D) และ200°C(E) เป็นผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบที่ 1 การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์ กรณีสารบริสุทธิ์ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารที่ใช้ในการตรวจวัด ได้แก่ TNT, RDX และ Cassava powder ซึ่งวัดที่อุณหภูมิ 30, 50, 100, 150 และ 200 °C ตามลำดับ โดยเก็บข้อมูลสารทั้งหมด 9 ตัวอย่างต่อสาร 1 ชนิด และนำข้อมูลสัญญาณจากเซ็นเซอร์ของการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการจำแนกแพทเทิร์นด้วยเทคนิค Principal Component Analysis ดังรูปที่ 3.10

ผลการวิเคราะห์โดยการจัดแพทเทิร์นด้วยหลักทางสถิติ Principal Component Analysis (PCA) score plot ร่วมกับการวิเคราะห์จากข้อมูลสัญญาณของเซ็นเซอร์ โดยนำกราฟจากข้อมูลสัญญาณของเซ็นเซอร์ ได้แก่ TGS 2602, 2610, 2620 และ 2210 ที่ใช้ในเป็นตัวตรวจวัดสารแต่ละชนิดมาทำการหาค่าเฉลี่ย และนำค่าที่ทำการหาค่าเฉลี่ยแล้วมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA ซึ่งผลจากรูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC1 กับ PC2 ของกราฟ Principal Component Analysis score plot ของสาร TNT, RDX และ Cassava powder ที่อุณหภูมิ 30, 50, 100, 150 และ 200 °C ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 30, 50 และ 100 °C (รูปที่ 3.10 A-C) สารทั้ง 3 ชนิดยังไม่สามารถแยกกลุ่มของกลิ่นของสารได้ ที่อุณหภูมิ 150 °C (รูปที่ 3.10 D) สารทั้ง 3 ชนิดเริ่มมีการแยกกลุ่มของกลิ่นของสารมากขึ้น และอุณหภูมิที่ 200 °C (รูปที่ 3.10 E) สารทั้ง 3 ชนิด สามารถแยกกลุ่มของกลิ่นของสารได้ชัดเจน นั่นแสดงว่า อุณหภูมิมีผลต่อไอระเหยของสารยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นน่าจะยิ่งทำให้ไอระเหยของสารมากขึ้น จึงทำให้เซ็นเซอร์สามารถตรวจจับสารได้ดีขึ้น ดูได้จากรูปที่ 3.11

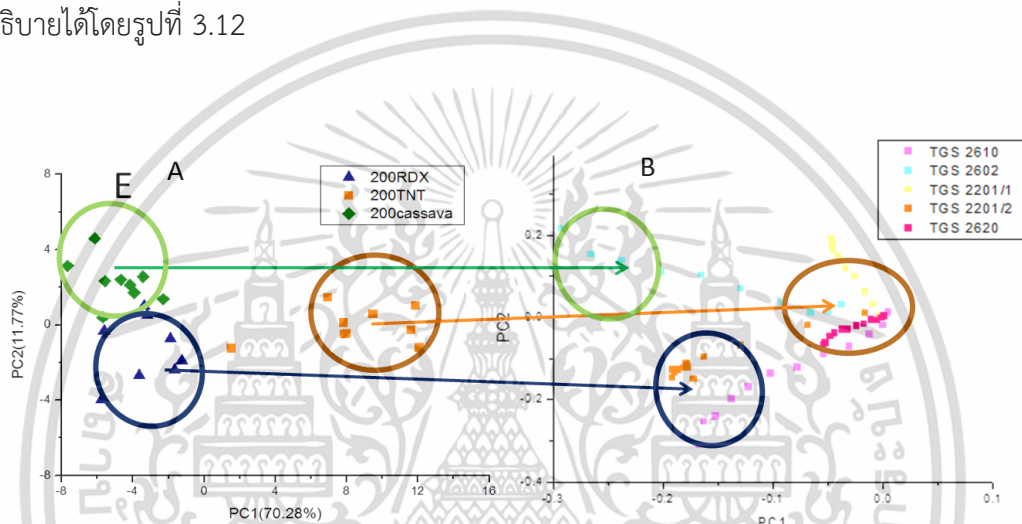


รูปที่ 3.11 กราฟ Principal Component Analysis (PCA) Loading plot ของเซ็นเซอร์ TGS2610, 2602, 2201/1, 2201/2 และ 2620 ที่อุณหภูมิ 30(A), 50(B), 100(C), 150(D) และ 200°C(E) ตามลำดับ

จากรูปที่ 3.11 เป็นการแสดงถึงคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการตอบสนองของเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง ที่อุณหภูมิ 30(A), 50(B), 100(C), 150(D) และ 200°C(E) ตามลำดับ ซึ่งเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ทั้งหมด 4 ตัว ได้แก่ TGS2610 (LPG), 2602 (Air contaminants), 2201/1

(Gasoline), 2201/2 (Diesel Exhaust Gas) และ 2620 (Solvent vapors) จากรูปจะเห็นว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟ Principal Component Analysis (PCA) Loading plot ของเซ็นเซอร์ที่นำมาตรวจวัดในพบว่าเมื่ออุณหภูมิต่างกันสารระเหยออกมาจะมีคุณสมบัติของสารต่างกันจึงทำให้เซ็นเซอร์ที่ตรวจวัดได้สารตามคุณสมบัติของเซ็นเซอร์ที่สามารถตรวจวัดสารแต่ละชนิดได้ดังรูปที่ 3.11 (A-E) พบว่ารูปที่ 3.11 (A-B) ยังไม่สามารถแยกสารออกจากกันได้รูปที่ 3.11C เซ็นเซอร์ TGS2602 เริ่มตรวจวัดสารที่ระเหยออกมาได้เช่นเดียวกับรูปที่ 3.11D เซ็นเซอร์ TGS2602 และTGS2201/2 มีการตรวจวัดสารระเหยได้ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเซ็นเซอร์สามารถตรวจวัดสารได้ดีดังรูปที่ 3.11E ซึ่งสัมพันธ์ข้อมูลของ score plot ในรูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ loading plot (เซ็นเซอร์) กับ score plot (กลิ่น) สามารถอธิบายได้โดยรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่าง PCA score plot ของสาร (A) และ loading plot ของเซ็นเซอร์ (B)

จากกราฟรูปที่ 3.12 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PCA score plot (A) และ loading plot (B) ซึ่งกราฟทั้งสองนี้เป็นมีความสมนัยกัน โดย PCA score plot แทนค่าข้อมูลของสารทดลองและ loading plot แทนค่าข้อมูลของเซ็นเซอร์ ในลักษณะของแผนที่ที่ซ้อนทับกันอยู่ได้แสดงให้เห็นว่ากราฟ B กลุ่มในวงกลมสีน้ำเงินแทนเซ็นเซอร์ TGS2201/2 กับ 2610 มีสัมพันธ์แบบสมนัยกันกับกราฟ A ซึ่งตรวจวัดสาร RDX ในกลุ่มวงกลมสีน้ำเงินได้ กลุ่มในวงกลมสีเหลือง (B) แทนเซ็นเซอร์ TGS 2620, 2201/1, 2610 และ 2602 มีความสัมพันธ์แบบสมนัยกันกับกราฟ A ซึ่งสามารถตรวจวัดสาร TNT ในวงกลมสีเหลือง (A) ได้ และกลุ่มในวงกลมสีเขียว (B) แทนเซ็นเซอร์ TGS 2602 มีความสัมพันธ์สมนัยกับกราฟ A ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์ที่สามารถวัดสาร Cassava powder ได้ บางบางส่วน จากกราฟนี้สามารถสรุปได้ว่า เซ็นเซอร์บางเซ็นเซอร์ยังไม่สามารถตรวจจับสารบาง

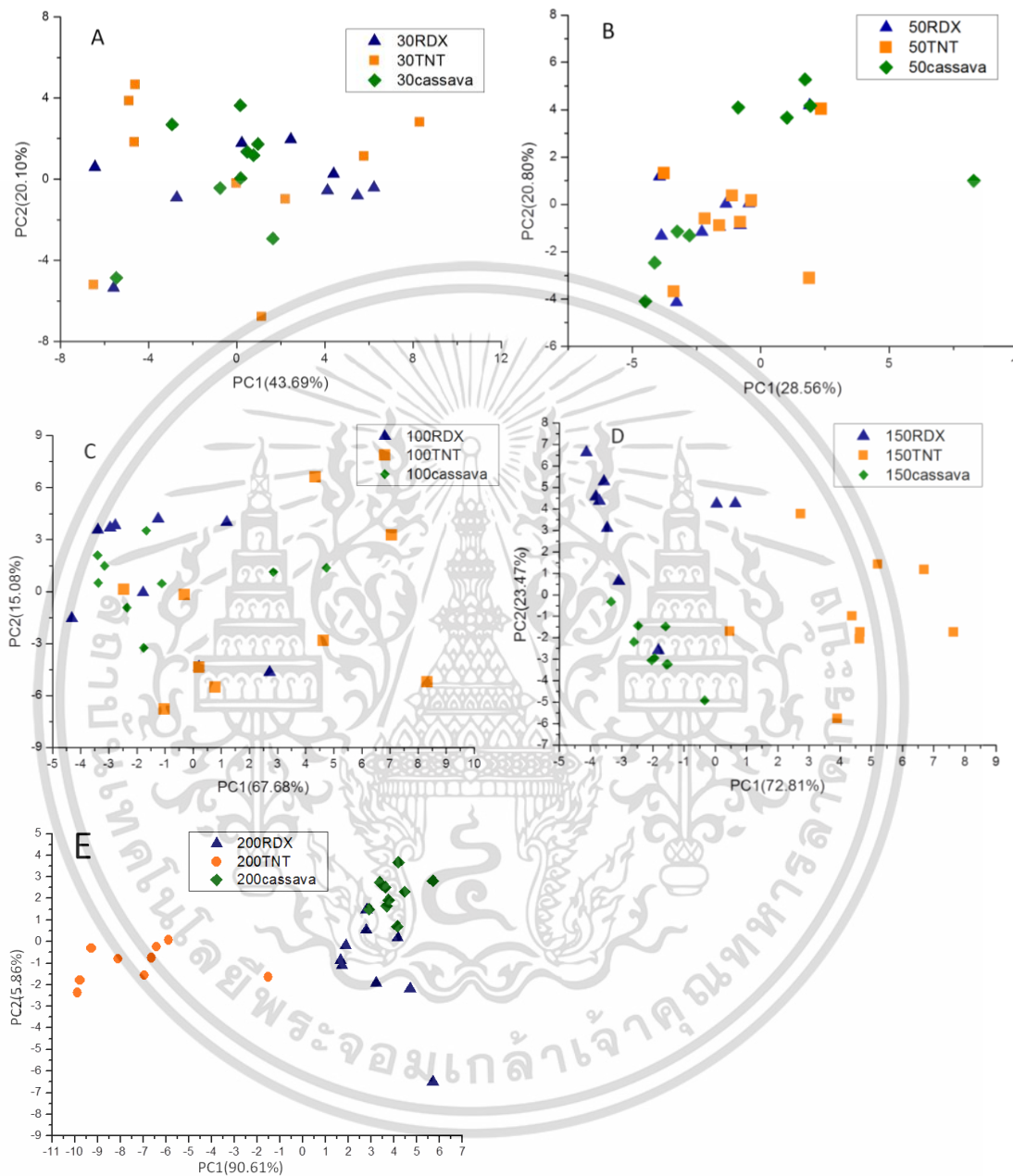
ตัวอย่างได้ทั้งหมดหรืออาจจะเป็นเพราะเซ็นเซอร์ที่นำมาใช้มีคุณสมบัติไม่ตรงกับสารที่ต้องการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจจับ หากต้องการให้การตรวจวัดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ต้องเพิ่มเซ็นเซอร์ที่มีคุณสมบัติตรงตามสารที่ต้องการวัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบที่ 2 การไม่หารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ เซ็นเซอร์กรณีสารบริสุทธิ์



รูปที่ 3.13 กราฟ Principal Component Analysis (PCA) score plot ของการตรวจวัดสาร TNT, RDX และ Cassava powder ที่อุณหภูมิ 30(A), 50(B), 100(C), 150(D), 200°C(E) เป็นผลการทดลองและวิเคราะห์แบบที่ 2 การไม่หารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์ กรณีสารบริสุทธิ์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟ Principal Component Analysis (PCA) score plot รูปที่ 3.13 แสดงการจัดแพทเทิร์นของสาร TNT, RDX และ Cassava powder ที่อุณหภูมิ 30, 50, 100, 150 และ 200 °C ตามลำดับ แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง PC1 กับ PC2 ซึ่งผลการทดลองมีความคล้ายคลึงกับ รูปที่ 3.10 แต่การกระจายตัวและการแยกกลุ่มของกลืนของสารรูปที่ 3.13 ได้ดีกว่า สังเกตได้จากค่าร้อยละของข้อมูลเดิมที่อยู่บนแกน PC มากกว่ารูปที่ 3.10 การแยกกลุ่มของกลืนของสารทดลอง จากผลการทดลองจะนำมาแสดงเชิงปริมาณเพื่อให้เห็นความแตกต่างได้ชัดเจนมากขึ้น โดยจะใช้พารามิเตอร์ของระยะห่างของกลุ่มกราฟดังสมการที่ 3.1 เมื่อได้ค่าระยะห่างของกลุ่มสารระหว่างสาร TNT และ Cassava powder และนำมาวาดเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 3.14

$$\text{Distance} = \sqrt{(\bar{X}_{\text{TNT}} - \bar{X}_{\text{Cassava}})^2 + (\bar{Y}_{\text{TNT}} - \bar{Y}_{\text{Cassava}})^2} \dots\dots(3.1)$$

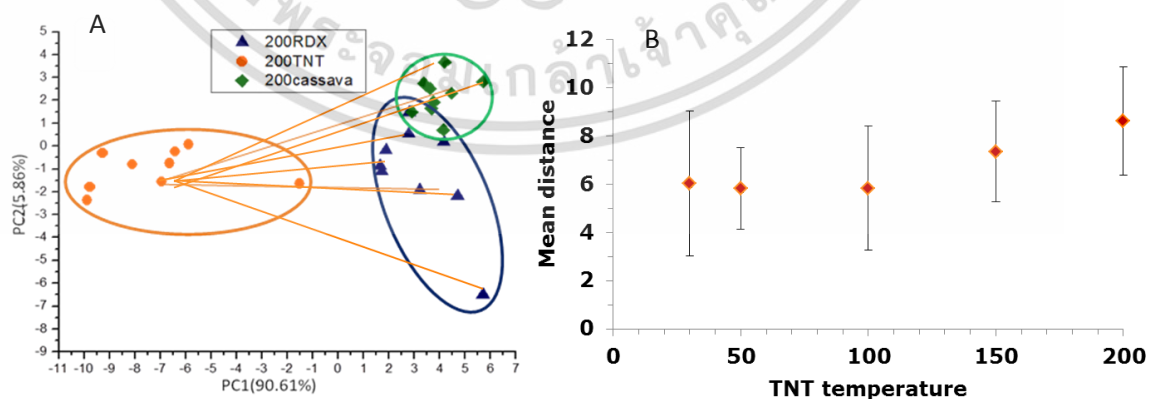
เมื่อ

\bar{X}_{TNT} แทนค่าแรงดันไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ของ PC1 ในการวัดสาร TNT ที่อุณหภูมิต่างๆ

\bar{Y}_{TNT} แทนค่าแรงดันไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ของ PC2 ในการวัดสาร TNT ที่อุณหภูมิต่างๆ

\bar{X}_{Cassava} แทนค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ทั้งหมดของ PC1 ในการวัดสาร Cassava powder อุณหภูมิต่างๆ

\bar{Y}_{Cassava} แทนค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ทั้งหมดของ PC2 ในการวัดสาร Cassava powder ที่อุณหภูมิต่างๆ

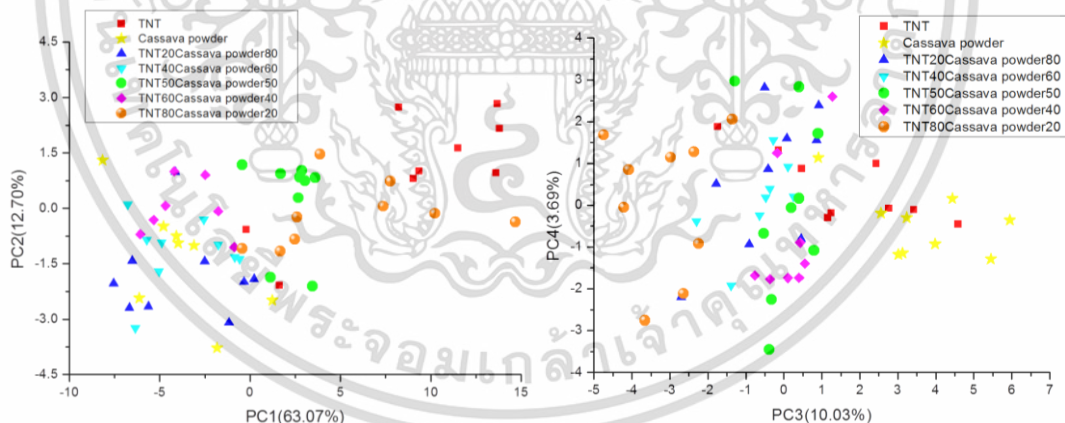


รูปที่ 3.14 (A) ตัวอย่างกราฟที่นำมาวิเคราะห์ และ (B) ระยะห่างระหว่างสาร TNT กับ Cassava powder

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.14 (A) เป็นตัวอย่างกราฟที่นำมาวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 200 °C โดยให้สาร และรูปที่ 3.14 (B) เป็นกราฟแสดงผลจากการนำผลการหาค่าระยะห่างระหว่างสาร TNT และ Cassava powder โดยให้สาร Cassava powder เป็นสารอ้างอิง จากกราฟ B สามารถบอกได้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อการตรวจวัดสารและยังสามารถบอกได้ว่าที่อุณหภูมิใดที่ทำให้สารแยกกลุ่มของกลิ่นของสารได้ จากการทดลองพบว่า กราฟ B ที่อุณหภูมิ 30, 50 และ 100 °C ค่าระยะห่างระหว่างสาร TNT กับ Cassava powder มีค่าใกล้เคียงกัน นั่นแสดงว่าที่อุณหภูมินี้สารทั้งสามชนิดไม่มีการแยกกลุ่มของกลิ่นของสารได้ ที่อุณหภูมิ 150°C ค่าระยะห่างระหว่างสาร TNT กับ Cassava powder เริ่มมีระยะห่างมากขึ้นและมีแนวโน้มห่างกันมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ 200 °C นั่นแสดงว่ายิ่งอุณหภูมิสูงขึ้น สารทั้งสามชนิดสามารถแยกกลุ่มของชนิดของสารได้ชัดเจน ดังนั้นการทดลองสารในกรณีสารปนเปื้อน จึงใช้อุณหภูมิที่ 200 °C โดยจะใช้วิธีการทดลองและวิเคราะห์ผลเหมือนกันกับกรณีสารบริสุทธิ์

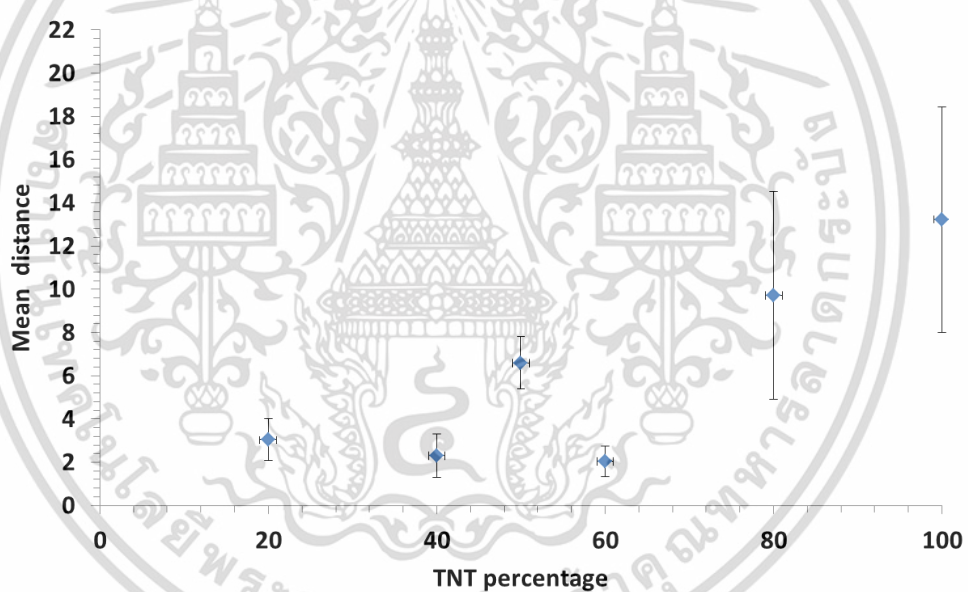
3.4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบที่ 1 การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์ กรณีสารปนเปื้อน



รูปที่ 3.15 กราฟ Principal Component Analysis (PCA) score plot ของการตรวจวัดสารTNT, Cassava powder, TNTในอัตราส่วน 20, 40, 50, 60 และ 80 ที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นผลการทดลองและวิเคราะห์แบบที่ 1 การไม่หารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์ กรณีสารบริสุทธิ์ ตามลำดับ

รูปที่ 3.15 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC1 กับ PC2 ของกราฟ Principal Component Analysis (PCA) score plot ของสาร TNT, Cassava powder, TNT ในอัตราส่วน 20, 40, 50, 60 และ 80 ที่อุณหภูมิ 200 °C จากผลการวิเคราะห์ผลแบบที่ 1 การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์ กรณีสารปนเปื้อน พบว่าสาร TNT และ TNT 80 มีการแยกกลุ่มของกลิ่นของสาร แต่สาร Cassava powder, TNT 20, 40, 50 และ 60 ไม่สามารถแยกกลุ่มของกลิ่นของสารนั้นได้ และเมื่อมาดูกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง PC3 กับ PC4 ของสารทั้งหมดก็ไม่สามารถแยกกลุ่มของกลิ่นของสารได้เช่นกัน

จากผลการทดลองของสารแต่ละชนิดและแต่ละชุดข้อมูลที่อุณหภูมิต่างๆจากข้อมูล PCA score plot สามารถนำมาวาดกราฟหาระยะห่างของระหว่างสาร TNT กับ Cassava powder ได้ จากสมการที่ 3.1 ดังรูปที่ 3.16 โดยให้สาร Cassava powder เป็นสารอ้างอิง

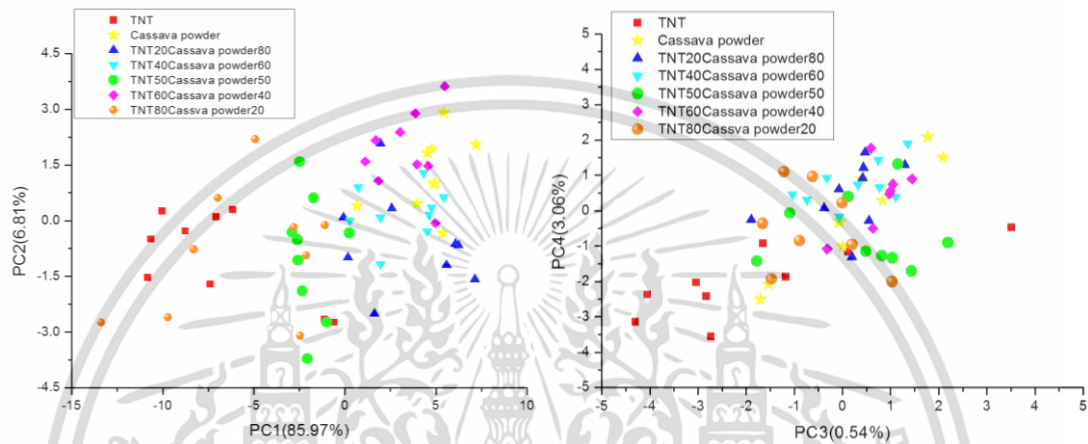


รูปที่ 3.16 ค่าระยะห่างระหว่างสาร TNT กับ Cassava powder

จากกราฟรูปที่ 3.16 แสดงให้เห็นว่าสารที่มีอัตราส่วนของ TNT80 และ 100 สารเริ่มมีแนวโน้มแยกกลุ่มของกลิ่นของสาร สังเกตได้จากค่าระยะห่างจากสารอ้างอิงเริ่มห่างออกไป ส่วนสาร TNT20, 40 และ 60 พบว่าค่าระยะห่างเข้าใกล้สารอ้างอิง นั่นแสดงว่า เมื่อสารมีการปนเปื้อนในอัตราส่วนที่มีปริมาณมากกว่า แนวโน้มการจัดกลุ่มของกลิ่นของสารนั้นเข้าใกล้กันหรือไม่แยกกลุ่มเลย เช่นเดียวกันเมื่อสารมีอัตราส่วนของสารต่างกันน้อยหรือปริมาณใกล้เคียงกัน ก็ไม่สามารถบอกปริมาณ

ของสารนั้นได้แต่จะสามารถบอกได้เพียงว่าสารนั้นเป็นสารชนิดใด และถ้า Cassava powder มีการปนเปื้อนเกิน 20 เปอร์เซ็นต์ยังสามารถแยกแยะสารระเบิดได้ด้วยเทคนิคนี้

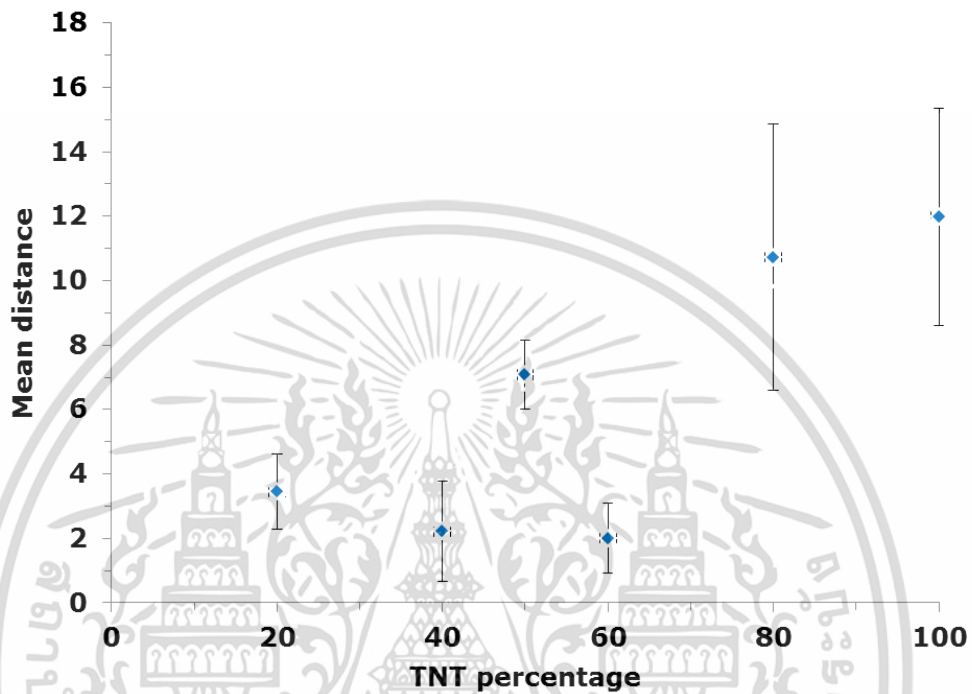
3.4.4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แบบที่ 2 ไม่หารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์ กรณีสารปนเปื้อน



รูปที่ 3.17 กราฟ Principal Component Analysis (PCA) score plot ของการตรวจวัดสาร TNT100, Cassava powder100, TNT ในอัตราส่วน 20, 40, 50, 60 และ 80 ที่อุณหภูมิ 200 °C ผลจากการวิเคราะห์ผลแบบที่ 2 ไม่หารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์ กรณีสารปนเปื้อน

จากกราฟรูปที่ 3.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC1 กับ PC2 ของกราฟ Principal Component Analysis (PCA) score plot ของการตรวจวัดสาร TNT100, Cassava powder100, TNT ในอัตราส่วน 20, 40, 50, 60 และ 80 ที่อุณหภูมิ 200 °C ผลจากการวิเคราะห์ผลแบบที่ 2 ไม่หารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์ กรณีสารปนเปื้อนรูปที่ 3.17 พบว่าสาร TNT และ TNT 80 มีการแยกกลุ่มของกลิ่นของสารกระจายออกจากกลุ่มสารอื่น ส่วน TNT20, 40, 60 และ Cassava powder มีการเกาะกลุ่มกันอย่างกระจัดกระจาย เมื่อสังเกตความสัมพันธ์ระหว่าง PC3 กับ PC4 พบว่า TNT มีการแยกกลุ่มกระจายออกมาเป็นบางส่วน ซึ่งผลการทดลองนี้มีความคล้ายคลึงกันกับผลการทดลองกราฟรูปที่ 3.15

จากผลการทดลองของสารแต่ละชนิดและแต่ละชุดข้อมูลที่อุณหภูมิต่างๆจากข้อมูล PCA score plot สามารถนำมาวาดกราฟหาระยะห่างของระหว่างสาร TNT กับ Cassava powder ได้จากสมการ 3.1 ดังรูปที่ 3.18 โดยให้สาร Cassava powder เป็นสารอ้างอิง



รูปที่ 3.18 ค่าระยะห่างระหว่าง TNT กับ Cassava powder

จากกราฟรูปที่ 3.18 แสดงให้เห็นว่าสาร TNT 20, 40 และ 60 เมื่อสังเกตจากค่าระยะห่างมีความใกล้เคียงกันทำให้สารดังกล่าวมีการเกาะกลุ่มกันอย่างจัดกระจาย เช่นเดียวกับสาร TNT 80 และ TNT มีการเกาะกลุ่มที่ใกล้เคียงกัน นั่นแสดงว่า สารที่มีอัตราส่วนของปริมาณมาก แนวโน้มสารนั้นก็จะเป็นทิศทางเดียวกับสารที่มีอัตราส่วนของปริมาณมาก

สรุปผลการทดลอง

เมื่อหาจุดเดือดจุดหลอมเหลวของสารชนิดต่างๆ ด้วยเครื่อง DSC และทำวางแผนหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมจึงได้ทำสรุปที่อุณหภูมิ 30, 50, 100, 150 และ 200°C ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิที่ 200°C สามารถวัดสารได้ เนื่องจากอุณหภูมิมิมีผลต่อการระเหยของสารชนิดต่างๆที่นำมาทดลองเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นไอระเหย่มากขึ้น จึงทำให้เซ็นเซอร์ที่นำมาใช้ในการวัดสามารถแยกชนิดของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารนั้นได้ พร้อมทั้งยังสามารถนำเทคนิคภูมิอิเล็กทรอนิกส์มาตรวจวิเคราะห์การแยกชนิดของสาร
วัตถุระเบิดและไม่ใช่สารวัตถุระเบิดได้ รวมถึงการวิเคราะห์กรณีสารบริสุทธิ์และสารปนเปื้อนได้อีก
ด้วย ในการวิเคราะห์ผลจะแบ่งออกเป็น 2 แบบคือแบบที่ 1 การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
(Standard Division, SD) ของเซ็นเซอร์กรณีสารบริสุทธิ์และกรณีสารปนเปื้อนและแบบที่ 2 ไม่หาร
ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์กรณีสารบริสุทธิ์และกรณีสารปนเปื้อน พบว่าการวิเคราะห์ผล
แบบที่ 2 ไม่หารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์ดีกว่าแบบที่ 1 เนื่องจากเมื่อนำค่าSD ของ
เซ็นเซอร์มาหาร ทำให้ความสำคัญของเซ็นเซอร์แต่ละตัวมีความสำคัญเท่ากัน จึงทำให้สัญญาณ
แรงดันไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ที่ตรวจวัดสัญญาณได้น้อยมีความสำคัญเท่ากับเซ็นเซอร์ที่มีสัญญาณ
แรงดันไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ที่ตรวจวัดสัญญาณได้มากจึงทำให้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์วิธีนี้ทำให้การ
จัดแยกกลุ่มได้ไม่ได้เท่าที่ควรเมื่อเทียบกับการวิเคราะห์ในแบบที่ 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายแต่ใช้เวลาในการตรวจวิเคราะห์นาน ข้อเสียในกรณีที่มีสารปนเปื้อนบางครั้งไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้ ทางผู้วิจัยจึงได้ศึกษาว่าเทคนิคนี้สามารถตรวจสอบสารระเบิดได้หรือไม่ จากผลงานวิจัยของ Anthony Dicken และคณะ [11] จากการศึกษาพบว่าได้มีการนำเทคนิคนี้มาใช้ในการตรวจสอบสารวัตถุระเบิด โดยวิธีการวิเคราะห์นั้นจะใช้เทคทั่วไปที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย การทดลองนี้จะใช้วิธีการซ่อนสารวัตถุระเบิดไว้ในกล่องเหล็กจากนั้นก็ทำการยิงรังสีเอกซ์เพื่อทดสอบว่าสามารถตรวจสอบและยิงทะลุหรือไม่ ผลการทดลองพบว่าใช้งานได้จริง ต่อมาจากผลงานของ Wei li และคณะ [38] ได้มีการพัฒนาและทดลองวิธีการวิเคราะห์ผลแบบใหม่และง่ายต่อการวิเคราะห์ผล จึงได้มีแนวคิดว่าจะนำวิธีการการจดจำรูปแบบ (Pattern recognition) มาใช้จะสามารถทำได้หรือไม่ ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็วกว่าไม่ต้องเตรียมสารและวิเคราะห์ผลที่ยังยากจากฐานข้อมูลที่มีมากมายในกรณีสารปนเปื้อน จากการทดลองได้ใช้สารเฮโรอินและยาบ้า, TNT และ กลีโธ โดยใช้ฉีดเข้าไปในกระเพาะอาหารโดยใช้หุ่นแทนมนุษย์ จากนั้นก็ทำการตรวจวัดและเก็บข้อมูล จากนั้นก็นำข้อมูลที่ได้มาจัดเก็บและวิเคราะห์ผลในรูปแบบ PCA เป็นต้น

จากงานวิจัยของ Wei li และคณะ ทำให้มีความสนใจที่จะนำการจดจำรูปแบบ (Pattern recognition) ของเทคนิคคอมพิวเตอร์อนิกส์มาประยุกต์ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ผลหาสารวัตถุระเบิดก่อนการระเบิดด้วยเทคนิค การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction) ถ้าลองใช้วิธีการวิเคราะห์ผลแบบการจดจำรูปแบบสามารถแยกชนิดของสารวัตถุระเบิดได้โดยใช้เวลาในการวิเคราะห์ อาจจะใช้เวลาไม่นานได้ ในการศึกษาครั้งนี้ทางผู้วิจัยเล็งเห็นว่าการใช้เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ควบคู่กับการวิเคราะห์ผลเชิงสถิติด้วยวิธีการหาค่าประกอบหลัก (Principal component analysis, PCA) อาจจะนำมาใช้ในการระบุชนิดของสารวัตถุระเบิดได้ โดยใช้เวลาในการวัดสาร 2 นาที สารที่ใช้ได้แก่ TNT, RDX และ PETN สารทั่วไปพบได้ในสถานที่เกิดเหตุเช่น Cassava powder และ Urea นอกจากนี้ยังมีการทดสอบกับสารที่ผสมกันระหว่าง TNT กับ Cassava powder ในอัตราส่วนต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ขั้นตอนการทดลอง

1.) สารที่ใช้ในการทดลองคือสารวัตถุระเบิด TNT, RDX และ PETN ได้มาจากบริษัท Viking Fertilizer ซึ่งสารทั้งหมดนี้ได้ทำการเตรียมจากสถาบันนิติวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ในการทดลองครั้งนี้ยังใช้สารที่ไม่ใช่สารวัตถุระเบิดที่มีความคล้ายคลึงกับสารวัตถุระเบิดในการทดสอบครั้งนี้ได้แก่แป้งมันสำปะหลังและปุ๋ยยูเรีย แป้งมันสำปะหลังได้มาจากบริษัท Sanguan Wongse มีลักษณะของสีและทางกายภาพคล้าย PETN Urea มีลักษณะทางกายภาพคล้าย RDX โดย Urea ที่ใช้มีสูตรโมเลกุล 46-0-0 นิยมนำมาผลิตระเบิดในการทดลองครั้งนี้ได้มาจากบริษัท Viking Fertilizer

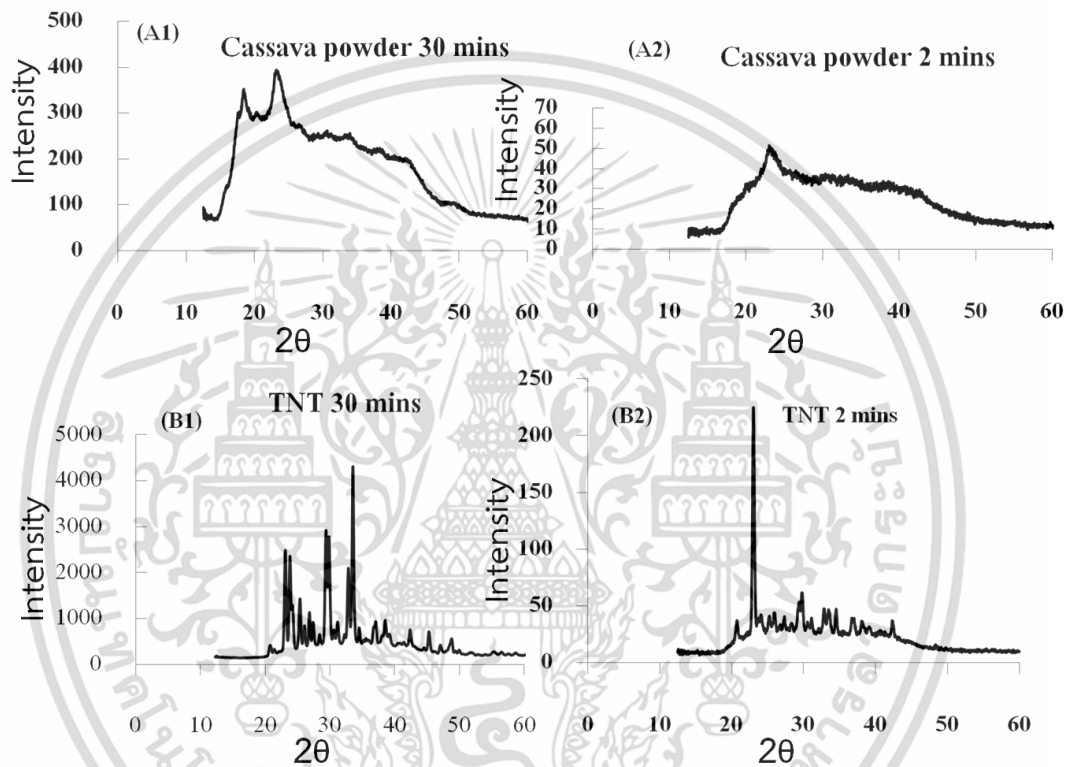
2.) เครื่อง X-ray diffraction รุ่น D8 discover with GADDS เป็นเครื่องมือที่ใช้ในห้องปฏิบัติการที่สถาบันนิติวิทยาศาสตร์ประเทศไทยดังรูปที่ 4.1 วิธีการเตรียมสารที่จะวัดโดยการบดสารให้ละเอียด จากนั้นวางสารบนแผ่นอลูมิเนียมที่ใช้เฉพาะเครื่องและวางแท่นพร้อมวัด การวัดได้ใช้การฉายรังสีเอกซเรย์ใช้ปริมาณ 40kV 40mA ด้วยต้นกำเนิดจาก Cu บันทึกตั้งแต่มุมที่ 15° ถึง 60° วัดทุกๆ 0.02° ในการทดลองมีการทดลองใช้เวลา 2 และ 30 นาทีเพื่อต้องการหาเวลาที่เหมาะสมและสามารถนำมาวิเคราะห์ผลได้



รูปที่ 4.1 เครื่อง X-ray diffraction รุ่น D8 discover with GADDS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

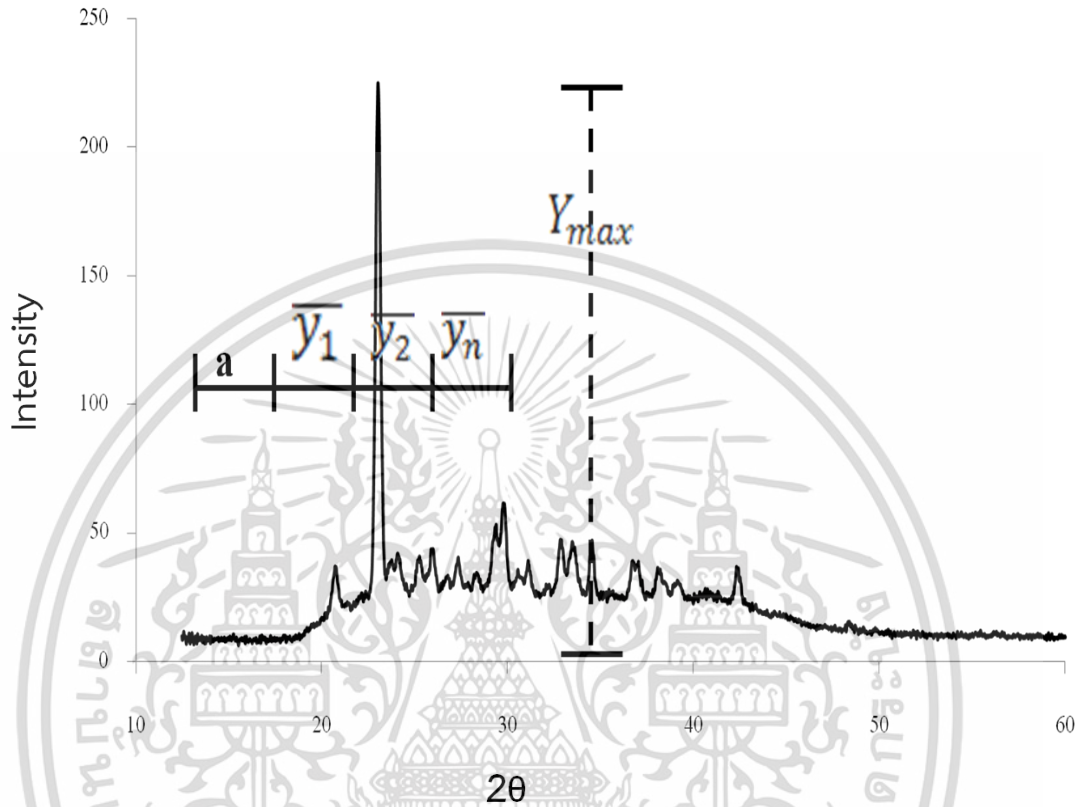
โดยปกติแล้วในการวัดวิเคราะห์ผลด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟกชันจะใช้เวลาในนาน ดังนั้นเรา จึงได้ทำการทดลองโดยใช้เวลาที่ 2 และ 30 นาที เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองดังรูปที่ 4.2 ปรากฏว่าเวลาที่ 2 นาที สามารถวิเคราะห์ผลได้เช่นกันเนื่องจากพบสารธาตุองค์ประกอบหลักที่เหมือนกัน การทดลองครั้งนี้เราจึงเลือกที่จะใช้เวลาที่น้อยคือ 2 นาที เพราะวัตถุประสงค์ในงานได้เน้นการ วิเคราะห์ผลได้อย่างรวดเร็วและใช้นเวลาน้อย จากนั้นเมื่อได้กราฟของสารทดลองจะนำมาวิเคราะห์ผล ด้วยวิธีการหาองค์ประกอบหลักหรือเรียกว่า PCA



รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบกราฟของ Cassava powder และ TNT ที่ 30 นาที (A1, B1) และ 2 นาที (A2, B2) ตามลำดับ

รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบกราฟของ Cassava powder และ TNT เมื่อใช้เวลา 30 และ 2 นาที ตามลำดับ พบว่ารูปที่ 4.2A1 แสดงกราฟของ Cassava powder ที่เวลา 30 นาทีค่า ความเข้มข้นของสาร (intensity) เวลาที่ 2 นาทีเพราะเมื่อใช้เวลานานยิ่งทำให้ลำแสงเอกซเรย์ที่ตก กระทบตัวอย่างนานขึ้นดังนั้นจึงทำให้สารบางชนิดถูกกระตุ้นด้วยรังสีเอกซเรย์ด้วยระยะเวลาที่ ยาวนานมากขึ้นจึงทำให้เห็นพีคของสารนั้นออกมา เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปที่ 4.2A1 กับ 4.2A2 พบว่ามีสารธาตุองค์ประกอบหลักตามฐานข้อมูลในเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟกชันคล้ายกัน

จากผลการทดลองการวัดด้วยเทคนิค XRD ทั้งหมดตัวอย่างละ 10 ตัวอย่าง ค่าความเข้มข้นที่ได้ในช่วงองศาทุกๆ 1 องศา จำนวน 35 จุด จะทำการหาค่าเฉลี่ย และนำค่าเฉลี่ยของค่าเข้มข้นทั้งหมดไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA



รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างกราฟที่นำไปวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคPCA

รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างกราฟที่ใช้ในการหาค่าเฉลี่ยของแต่ละช่วงองศาซึ่งในการวิเคราะห์ผลในการทดลองจะทำการวิเคราะห์ผลเป็น 2 แบบคือ แบบที่ 1 การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความเข้มข้นของสาร (intensity) กรณีสารบริสุทธิ์และกรณีสารปนเปื้อนดังสมการที่ 4.3 และแบบที่ 2 ไม่หารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความเข้มข้นของสาร (intensity) กรณีสารบริสุทธิ์และกรณีสารปนเปื้อนดังสมการที่ 4.4 โดยจะนำค่าแต่ละจุดมาลบกับค่าเฉลี่ยของ back ground ดังสมการที่ 4.1 และนำค่าสูงสุดของเข้มข้นไปคำนวณให้มีค่าเท่ากับ 1 ดังสมการที่ 4.2 ก่อนที่นำไปหาค่า PCA ด้วยโปรแกรม Lab view

จากสมการ

$$Y_n = \overline{y_n} - a \quad \dots\dots\dots 4.1$$

เมื่อ

Y_n แทนค่าเฉลี่ยทั้งหมด

$\overline{y_n}$ แทนค่าเฉลี่ยแต่ละช่วงของมุม

a แทนค่าเฉลี่ยของ back ground

และ

$$Z_n = \frac{Y_n}{Y_{\max}} \quad \dots\dots\dots 4.2$$

เมื่อ

Z_n แทนค่าเฉลี่ยทั้งหมดค่าความเข้มข้นของสาร (intensity) ของมุมที่สูงสุดเท่ากับ 1

Y_{\max} แทนค่าความเข้มข้นของสาร (intensity) ของมุมที่สูงสุด

วิธีที่ 1: $D_n = \frac{Z_n - \overline{Z_n}}{SD_n} \quad \dots\dots\dots (4.3)$

วิธีที่ 2: $D_n = Z_n - \overline{Z_n} \quad \dots\dots\dots (4.4)$

เมื่อ

D_n = ค่าจุดศูนย์กลางของข้อมูล PCA

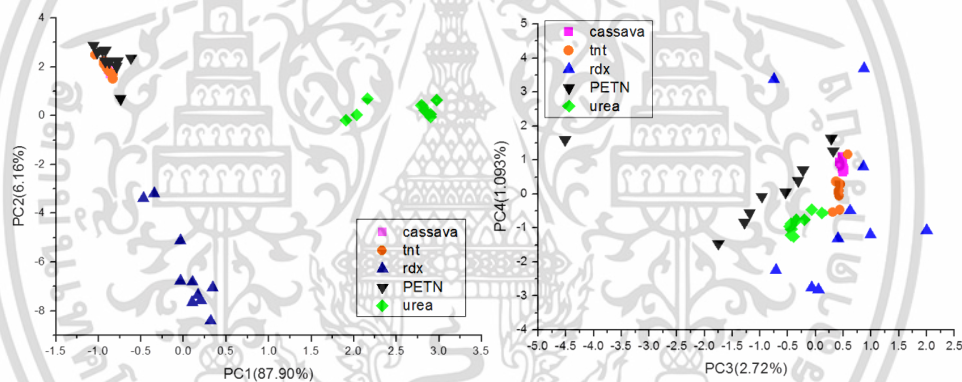
$\overline{Z_n}$ = ค่าเฉลี่ยแต่ละช่วงของมุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในการทดลองได้ทำการวิเคราะห์ผลแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบที่ 1 การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Division, SD) ของความเข้มข้นของสาร (intensity) กรณีสารบริสุทธิ์ และกรณีสารปนเปื้อนและแบบที่ 2 ไม่หารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสาร (intensity) กรณีสารบริสุทธิ์และกรณีสารปนเปื้อน เพื่อนำวิธีการแบบใดที่จะเหมาะสมและสามารถวิเคราะห์ผลได้อย่างแม่นยำ ดังผลการทดลองดังนี้

4.2.1 ผลการทดลองวิธีที่ 1 การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสาร (intensity) กรณีสารบริสุทธิ์ ดังสมการ ที่ 4.3

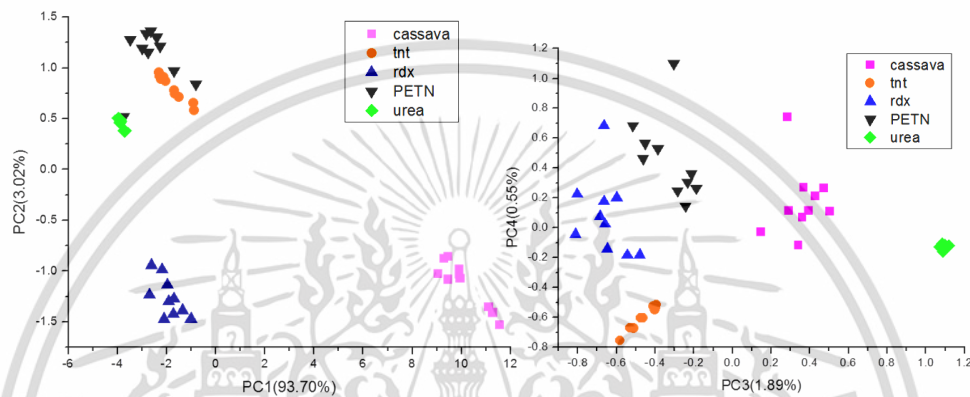


รูปที่ 4.4 กราฟ PCA score plot ของสาร cassava powder, TNT, RDX, PETN และ Urea ผลการทดลองวิธีที่ 1 การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสาร (intensity) กรณีสารบริสุทธิ์ ดังสมการ ที่ 4.3

จากรูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC1 กับ PC2 และ PC3 กับ PC4 ของกราฟ PCA score plot ของสาร Cassava powder, TNT, RDX, PETN และ Urea เมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.3 แสดงให้เห็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC1 กับ PC2 สาร Cassava powder, RDX และ TNT มีการจัดกลุ่มชัด แต่สาร Cassava powder และ RDX แยกห่างจากสารอื่น เมื่อมาดูสาร PETN

กับ Urea พบว่ายังมีการทับซ้อนกันอยู่แต่เมื่อมาดูกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC3 กับ PC4 สารทั้ง 5 ชนิดมีการจัดกลุ่มแยกออกจากกันชัดเจน

4.2.2 ผลการทดลองวิธีที่ 2 ไม่การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสาร (intensity) กรณีสารบริสุทธิ์ ดังสมการที่ 4.4

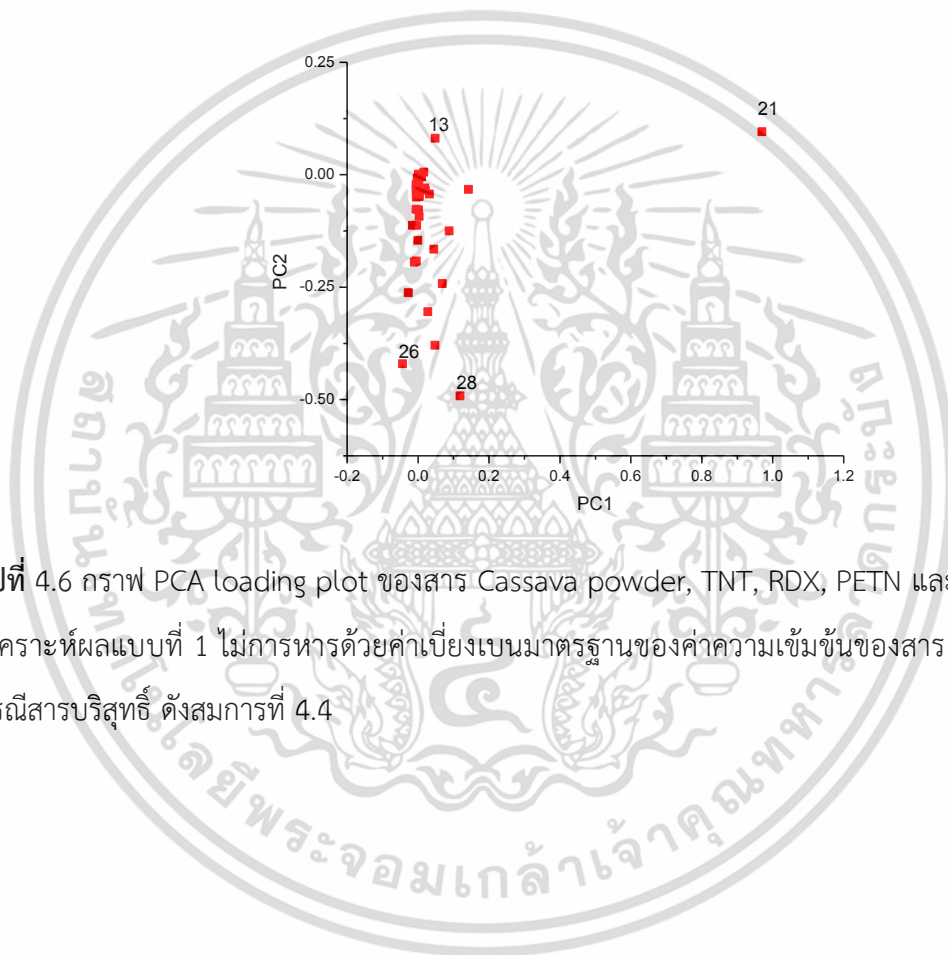


รูปที่ 4.5 กราฟ PCA score plot ของสาร Cassava powder, TNT, RDX, PETN และ Urea เมื่อวิเคราะห์ผลแบบที่ 1 ไม่การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสาร (intensity) กรณีสารบริสุทธิ์ ดังสมการที่ 4.4

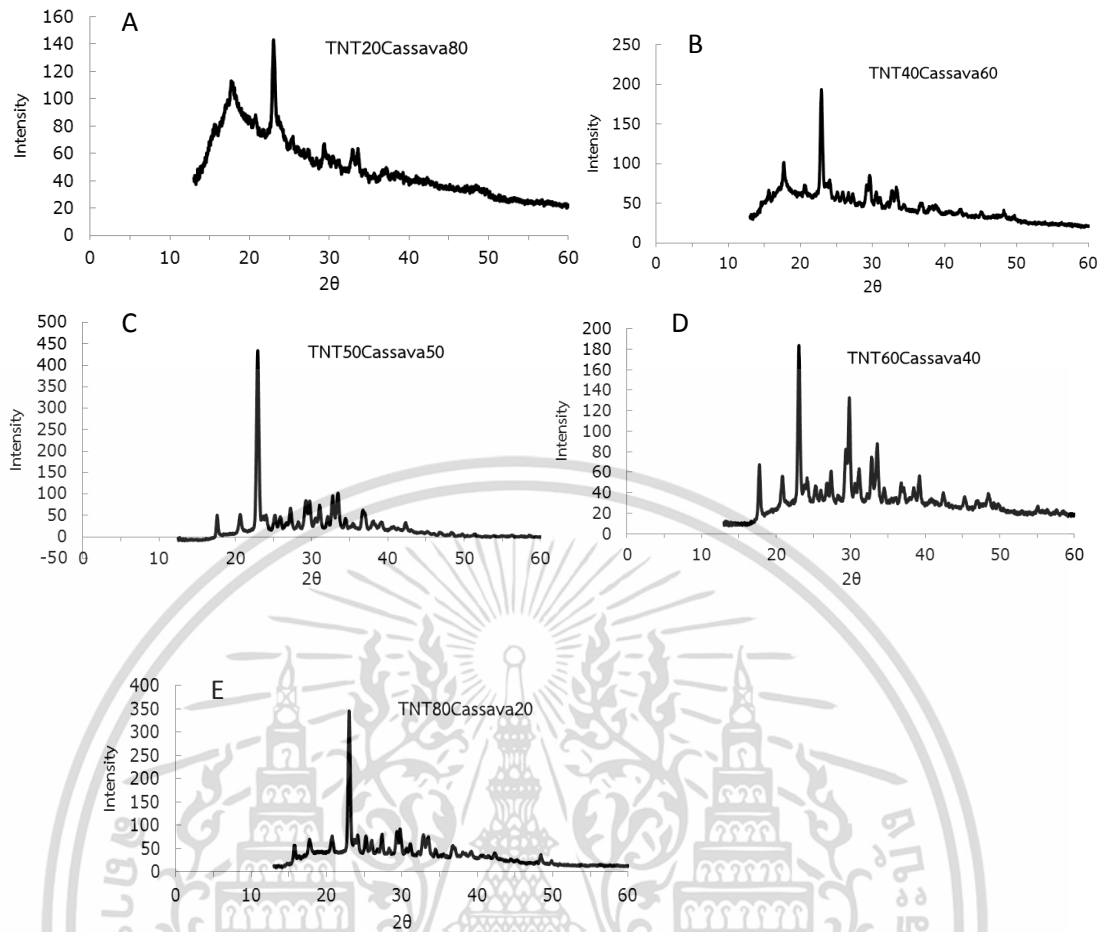
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC1 กับ PC2 และ PC3 กับ PC4 ของกราฟ PCA score plot ของสาร Cassava powder, TNT, RDX, PETN และ Urea เมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.4 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC1 กับ PC2 พบว่าสาร Urea และ RDX แยกกลุ่มชนิดชัดเจน แต่สาร Cassava powder, TNT และ PETN มีการเหลื่อมทับซ้อนไม่สามารถแยกกลุ่มชนิดได้แต่เมื่อมาดูกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC3 กับ PC4 พบว่าสาร PETN แยกออกจากสารชนิดอื่นชัดเจนแต่มีแนวโน้มเข้าใกล้สาร Cassava powder และสาร Cassava powder แยกชนิดชัดเจนแต่ยังมีทับซ้อนบางส่วนกับสาร TNT สาร RDX มีการกระจายไม่มีการแยกกลุ่มชนิดของสารนี้ จากนั้นนำผลทดลองที่ได้มาวาดเป็นกราฟ PCA loading plot ดังรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC1 กับ PC2 ของมุมต่างๆเมื่อวัดด้วยเครื่อง X-ray diffraction ของสาร cassava powder, TNT, RDX, PETN และ Urea พบว่า loading plot สามารถแยกข้อมูลของสารที่แตกต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันได้ซึ่งมีทิศทางเดียวกันกับ score plot คือค่า PC1 เป็นค่าของชุดข้อมูล 2 θ ที่สูงสุด ซึ่งแสดงถึงค่าความสำคัญสูงสุดจากค่า 2 θ ที่ 21° มีความสัมพันธ์กับยูเรียตามค่า score plot และสามารถคำนวณค่าระยะห่างจากพื้นที่แลตติจ (lattice spacing) ได้ค่า 4.035 อังสตรอม ซึ่งค่าที่ได้จะสอดคล้องกับระยะทางโมเลกุลของยูเรีย (00-028-1945 ,00-028-1945 (ICDD 2004) ในลักษณะเดียวกันชุดข้อมูลของ RDX จะมีความสัมพันธ์กับ 2 θ เช่นกัน ตัวอย่างเช่น ที่ 26 °และ 28 ° ซึ่งอาจเป็นผลมาจากคุณลักษณะเฉพาะของพีค XRD ดังรูปที่ 4.2



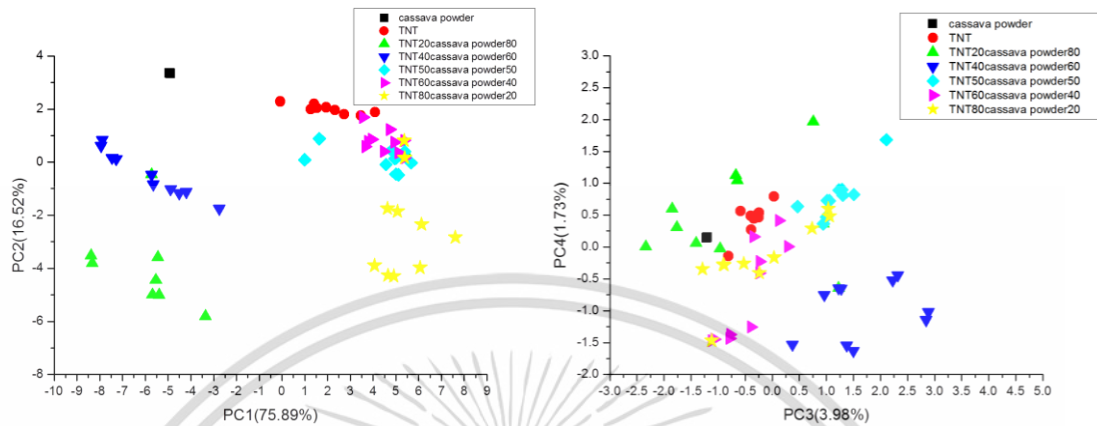
รูปที่ 4.6 กราฟ PCA loading plot ของสาร Cassava powder, TNT, RDX, PETN และ Urea เมื่อวิเคราะห์ผลแบบที่ 1 ไม่การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความเข้มข้นของสาร (intensity) กรณีสารบริสุทธิ์ ดังสมการที่ 4.4



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงสารผสมระหว่างสาร TNT กับ Cassava powder ในอัตราส่วน 20, 40, 50, 60 และ 80

กราฟรูปที่ 4.7 (A-E) แสดงสารผสมระหว่างสาร TNT กับ Cassava powder ในอัตราส่วน 20, 40, 50, 60 และ 80 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.2 (A2) ซึ่งเป็นกราฟของ Cassava powder พบว่ากราฟ A ตำแหน่งพีคของ Cassava powder สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน เช่นเดียวกับกับกราฟ B แต่ค่าความเข้มข้นของพีคลดลง กราฟ C-E แทบจะมองไม่เห็นพีคของ Cassava powder นั้นแสดงว่าเมื่อความเข้มข้นของอัตราส่วนของสารใดสารหนึ่งเพิ่มมากขึ้นก็ยิ่งทำให้ความเข้มข้นของสารและพีคของสารนั้นลดลง

4.2.3 ผลการทดลองวิธีที่ 1 การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสาร (intensity) กรณีสารปนเปื้อน ดังสมการ ที่ 4.3



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟ Principal Component Analysis (PCA) score plot ของสาร TNT, Cassava powder, TNT20 , 40, 50, 60 และ 80 เมื่อวิเคราะห์ผลแบบที่ 1 หารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสาร (intensity) กรณีสารปนเปื้อน ดังสมการ ที่ 4.3

จากรูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC1 กับ PC2 และ PC3 กับ PC4 ของกราฟ PCA score plot ตรวจวัดสาร TNT, Cassava powder, TNT20 , 40, 50, 60 และ 80 วิเคราะห์ผลแบบที่ 1 หารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.3 จากกราฟสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC1 กับ PC2 และ PC3 กับ PC4 ของสาร Cassava powder มีการจัดกลุ่มชัดเจน
2. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC1 กับ PC2 ของสาร TNT ยังพบการทับซ้อนกันอยู่บางส่วนกับสาร TNT60Cassava powder40 แต่กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC3 กับ PC4 มีการจัดกลุ่มชัดเจน
3. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC1 กับ PC2 ของสาร TNT20Cassava powder80 และ TNT40Cassava powder60 มีการแยกกลุ่มออกจากกลุ่มอื่นแต่พบว่ามีการทับซ้อนกันอยู่บางส่วน แต่เมื่อมาดูกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC3 กับ PC4 ของสาร TNT20Cassava powder80 และ TNT40Cassava powder60 ก็ยังมีการทับซ้อนกันอยู่บางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC1 กับ PC2 ของสาร TNT50, 60 และ 80 มีการทับซ้อนกันอยู่บางส่วน แต่เมื่อมาดูกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC3 กับ PC4 ของสาร TNT60Cassava powder40 มีการทับซ้อนกับ TNT50Cassava powder50 บางส่วนและ TNT80Cassava powder20 มีการทับซ้อนกับ TNT60Cassava powder40 บางส่วน

จากผลการทดลองของสารแต่ละชนิดและแต่ละชุดข้อมูลที่อุณหภูมิต่างๆจากข้อมูล PCA plot สามารถวาดกราฟระยะห่างของระหว่าง TNT ที่อัตราส่วนต่างๆกับ Cassava powder ได้จากสมการ 3.1 ดังรูปที่ 4.8

$$\text{Distance} = \sqrt{(X_i - \bar{X}_{\text{Cassava}})^2 + (Y_i - \bar{Y}_{\text{Cassava}})^2} \dots\dots\dots(3.1)$$

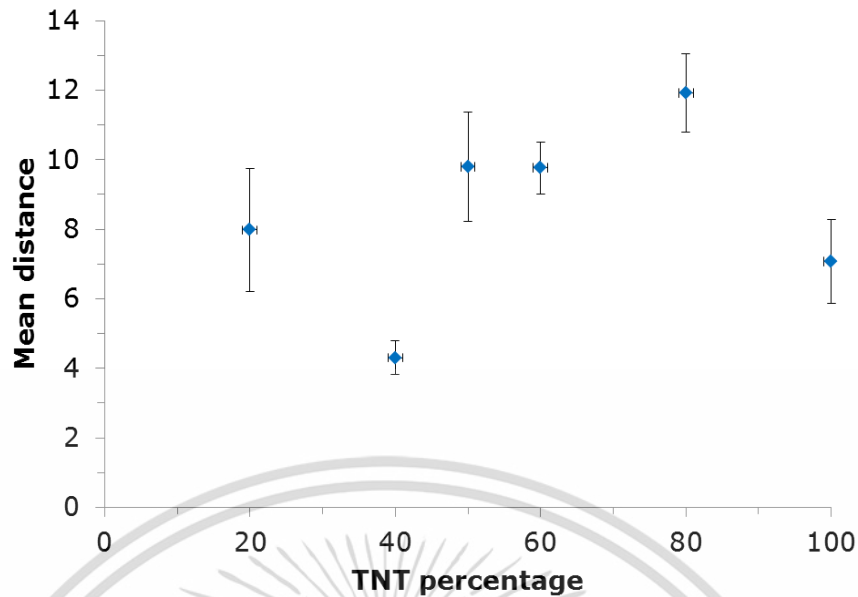
เมื่อ

X_i แทนค่าตำแหน่ง PC1 ของสารตัวอย่างบน PCA plot

Y_i แทนค่าตำแหน่ง PC2 ของสารตัวอย่างบน PCA plot

\bar{X}_{Cassava} แทนค่าเฉลี่ยตำแหน่ง PC1 ของ Cassava powderบน PCA plot

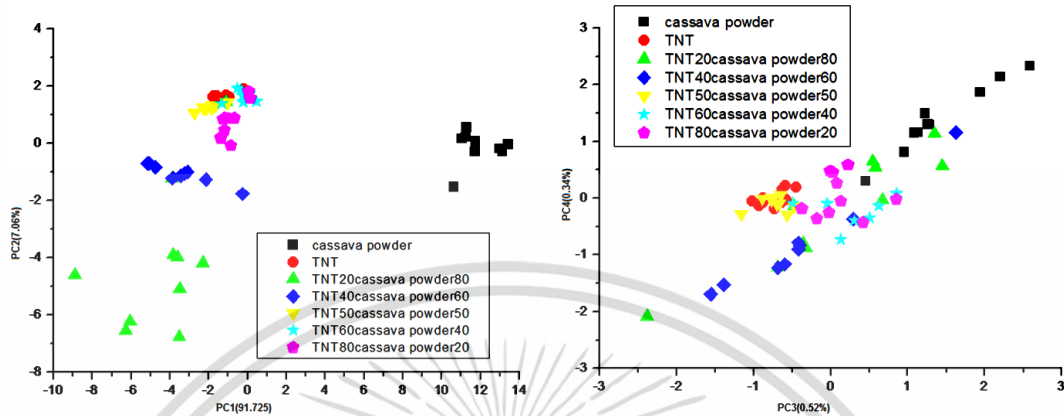
\bar{Y}_{Cassava} แทนค่าเฉลี่ยตำแหน่ง PC2 ของ Cassava powderบน PCA plot



รูปที่ 4.9 ค่ำระยะห่างระหว่างของสาร TNT ในความอัตราส่วนต่างๆกับ Cassava powder เมื่อวิเคราะห์ผลแบบที่ 1 ทารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสาร (intensity) กรณีสารปนเปื้อน

จากรูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะห่างของสาร TNT ในอัตราส่วนต่างๆกับ Cassava powder โดยมี Cassava powder เป็นสารอ้างอิง ก็อัตราส่วนต่างของสาร TNT จากกราฟสามารถบอกได้ว่า สาร TNT ที่อัตราส่วน 80 มีค่าระยะห่างจากสารอ้างอิงมากที่สุด และที่อัตราส่วนของสาร TNT 60, 20, 100 และ 40 มีค่าระยะห่างจากสารอ้างอิงจากระยะห่างไกลจนถึงใกล้ ตามลำดับ นั้นแสดงว่า สารใดที่มีอัตราส่วนน้อยแนวโน้มจะเข้าใกล้สารที่มีอัตราส่วนมากจึงทำให้ไม่สามารถบอกได้ว่าสารนั้นมีปริมาณเท่าไรบอกได้เพียงว่ามีสารชนิดนี้อยู่

4.2.4 ผลการทดลองวิธีที่ 2 ไม่การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสาร (intensity) ดังสมการที่ 4.4 กรณีสารปนเปื้อน

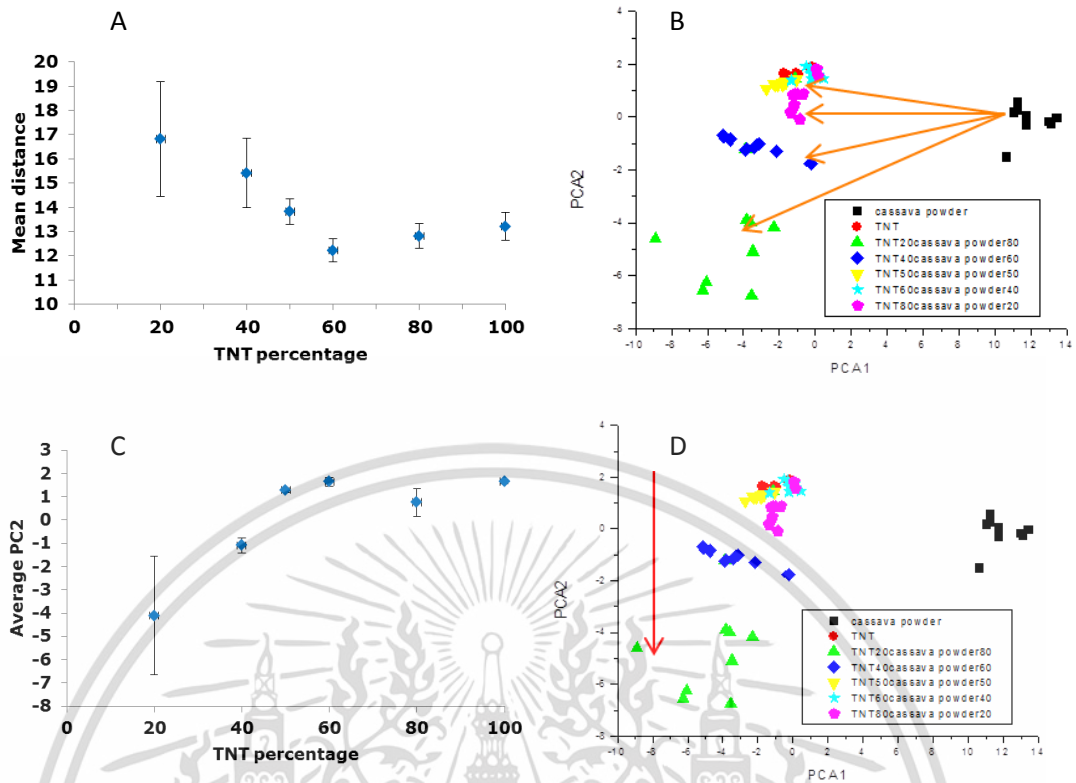


รูปที่ 4.10 กราฟ Principal Component Analysis (PCA) score plot ของสาร TNT, Cassava powder, TNT 20, 40, 50, 60 และ 80 เมื่อวิเคราะห์ผลแบบที่ 2 ไม่การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสาร (intensity) ดังสมการที่ 4.4 กรณีสารปนเปื้อน

จากรูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC1 กับ PC2 และ PC3 กับ PC4 ของกราฟ PCA score plot ตรวจวัดสาร TNT, Cassava powder, TNT 20, 40, 50, 60 และ 80 เมื่อวิเคราะห์ผลแบบที่ 2 ไม่การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสาร (intensity) ดังสมการที่ 4.4 กรณีสารปนเปื้อน จากกราฟสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC1 กับ PC2 ของสาร Cassava powder มีการจัดกลุ่มชัดเจน เมื่อมาดูความสัมพันธ์ระหว่าง PC3 กับ PC4 มีการทับซ้อนกับสารชนิดอื่น
2. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC1 กับ PC2 ของสาร TNT, TNT50, 60 และ 80 มีการทับซ้อนกัน เมื่อมาดูความสัมพันธ์ระหว่าง PC3 กับ PC4 ยังคงมีการทับซ้อนเช่นกัน
3. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PC1 กับ PC2 ของสาร TNT20 มีการทับซ้อนกับ TNT40 เมื่อมาดูความสัมพันธ์ระหว่าง PC3 กับ PC4 ยังคงมีการทับซ้อนกับสารชนิดอื่น

จากผลการทดลองของสารแต่ละชนิดและแต่ละชุดข้อมูลที่อุณหภูมิต่างๆจากข้อมูล PCA plot สามารถวาดกราฟระยะห่างของระหว่าง TNT ที่ความเข้มข้นต่างๆกับ Cassava powder และระยะห่างจาก PC2 กับ Cassava powder ได้จากสมการ 3.1 ดังรูปที่ 4.10 โดยให้สาร Cassava powder เป็นสารอ้างอิง



รูปที่ 4.11 ค่าระยะห่างระหว่างสาร TNT ที่อัตราส่วนต่างๆ กับ Cassava powder (A,B) และ ระยะห่างในแนวแกน PC2 กับ Cassava powder (C,D)

จากรูปที่ 4.11 รูป A เป็นรูปแสดงความสัมพันธ์การหาค่าระยะห่างระหว่างสาร TNT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กับ Cassava powder ซึ่งหาได้จาก รูป B จากรูป A สามารถอธิบายได้ว่าที่อัตราส่วน 20 มีแนวโน้มแยกออกจากสาร Cassava powder มากที่สุด รองลงมาอัตราส่วน 40, 100, 80 และ 60 ตามลำดับ ก็เป็นเช่นเดียวกับการหาค่าระยะห่างจาก PC2 กับ Cassava powder พบว่า ที่อัตราส่วน 20 แยกออกจากสาร Cassava powder มากที่สุด นั่นแสดงว่าเมื่อทำการผสมสารสารใดที่มีปริมาณมากทำให้แนวโน้มการเกาะกลุ่มของกลิ่นของสารนั้นมีมากขึ้นแต่จะมีการจัดกลุ่มแบบกระจัดกระจาย

สรุปผลการทดลอง

การที่นำวิธีการวิเคราะห์ผลแบบการจดจำรูปแบบ (Pattern recognition) มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผลโดยใช้เทคนิค PCA ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ในการวิเคราะห์ผลจะแบ่งออกเป็น 2 แบบคือแบบที่ 1 การหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Division, SD) ของความเอกลสารนี้เป็นเอกลสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกลสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มข้นของสาร (intensity) กรณีสารบริสุทธิ์และกรณีสารปนเปื้อน และแบบที่ 2 ไม่หารด้วยค่า เบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของความเข้มข้นของสาร (intensity) กรณีสารบริสุทธิ์และกรณี สารปนเปื้อน พบว่าการวิเคราะห์ผลแบบที่ 2 ไม่หารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของ สาร (intensity) กว่าแบบที่ 1 จากผลการทดลองพบว่าการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้สามารถนำมา วิเคราะห์ได้จริงทั้งกรณีสารบริสุทธิ์และสารปนเปื้อนได้ แม้จะมีปริมาณสารปนเปื้อนเกิน 60 เปอร์เซ็นต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยทั้งหมดที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีเนื้อหาสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ได้กำหนดไว้ในบทที่ 1 ซึ่งเป็นการศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์ผลแบบการทางองค์ประกอบหลัก (Principle Component Analysis, PCA) ซึ่งเป็นการจำแนกรูปแบบ (Pattern recognition) ของข้อมูล เพื่อต้องการระบุชนิดของวัตถุระเบิดและไม่ใช่วัตถุระเบิดนั้น โดยมีจุดประสงค์ดังนี้คือไม่ต้องการเตรียมสาร มีการตรวจวิเคราะห์ผลได้อย่างรวดเร็วและไม่ต้องคำนึงปริมาณของสาร งานวิจัยนี้จึงได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 เป็นเทคนิคจมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic nose, E-nose) และส่วนที่ 2 เป็นการนำเทคนิคการวัดแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) จึงขอสรุปเป็นข้อที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. จากการศึกษาการตรวจวิเคราะห์หาการแยกชนิดของสารวัตถุระเบิด Trinitrotoluene (TNT) และ Clotrimethylenetrinitramine หรือ Cyclonite (RDX) ด้วยเทคนิคจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นเอง
 - 1.1 เป็นวิธีการตรวจจับสารได้ดีและสามารถแยกชนิดของสารได้
 - 1.2 อุณหภูมิมีผลในการตรวจจับสารเนื่องจากยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ไอระเหยของสารมากขึ้น จึงทำให้เซ็นเซอร์สามารถตรวจจับสารได้ดีขึ้น
 - 1.3 การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีสารบริสุทธิ์และสารปนเปื้อน กรณีสารบริสุทธิ์สามารถแยกแยะกลิ่นของสารได้ ส่วนกรณีสารปนเปื้อนสามารถบอกได้เพียงอัตราส่วนแค่ 20 เปอร์เซ็นต์
 - 1.4 วิธีการวิเคราะห์ผลมี 2 แบบ ได้แก่ แบบที่ 1 ทหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์ และ แบบที่ 2 ไม่ทหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์ พบว่าวิธีการวิเคราะห์ผลทั้ง 2 แบบ ให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกัน แต่การวิเคราะห์แบบที่ 2 ไม่ทหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีกว่า
2. จากศึกษาการนำวิธีการวิเคราะห์ผลแบบการจดจำรูปแบบ (Pattern recognition) มาประยุกต์ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-RAY Diffraction (XRD)) เนื่องจากเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายแต่ใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน วัตถุประสงค์ในงานวิจัยต้องการลดเวลาการวิเคราะห์ผลดังนั้นจากการศึกษาการนำวิธีการวิเคราะห์ผลแบบการจดจำรูปแบบมาใช้พบว่าสามารถแยกชนิดของสารได้
 - 2.1 การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีสารบริสุทธิ์และสารปนเปื้อน กรณีสารบริสุทธิ์สามารถแยกแยะกลิ่นของสารได้ ส่วนกรณีสารปนเปื้อนสามารถตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารได้มากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อมีการปริมาณการปนเปื้อนที่น้อยกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ไม่ได้ แต่ยังสามารถตรวจพบสารระเบิดได้ ซึ่งต่างจาก E-nose ที่ตรวจวัดสารระเบิดไม่ได้เมื่อมีการปนเปื้อนมาก ๆ

2.2 วิธีการวิเคราะห์ผลมี 2 แบบ ได้แก่ แบบที่ 1 ทหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสาร (intensity) และ แบบที่ 2 ไม่ทหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสาร (intensity) พบว่า วิธีการวิเคราะห์ผลทั้ง 2 แบบ ให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกัน แต่การวิเคราะห์แบบที่ 2 ไม่ทหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสาร (intensity) ให้ผลการวิเคราะห์ได้ดีกว่า

3. เทคนิคจมูกอิเล็กทรอนิกส์และเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สามารถตรวจวัดสารระเบิดได้เหมือนกัน แต่ในกรณีที่มีสารปนเปื้อนปริมาณมากเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์บอกได้ในเชิงปริมาณได้ดีกว่า และในกรณีสารปนเปื้อนปริมาณน้อยเทคนิคจมูกอิเล็กทรอนิกส์จะบอกได้ดีกว่า

4. ข้อเสนอแนะ

4.1 เซ็นเซอร์บางเซ็นเซอร์ยังไม่สามารถตรวจจับสารบางอย่างได้ทั้งหมดหรืออาจจะ เป็นเพราะเซ็นเซอร์ที่นำมาใช้มีคุณสมบัติไม่ตรงกับสารที่ต้องการตรวจจับ หาก ต้องการให้การตรวจวัดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ต้องเพิ่มเซ็นเซอร์ที่มีคุณสมบัติตรงตามสารที่ต้องการวัด

4.2 ควรมีการศึกษากรณีสารปนเปื้อนให้หลากหลายชนิด เนื่องจากคุณสมบัติของสารปนเปื้อนแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันออกไป

4.3 อุปกรณ์จมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถพัฒนาให้มีขนาดเล็กและเป็นแบบพกพาไปใช้ตรวจวัดนอกสถานที่ได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Akhavan, Jacqueline “The Chemistry of Explosives. Royal Society of Chemistry, Cambridge”, UK (2004).
- [2] A. Banas “Post-blast detection of traces of explosives by means of Fourier transform infrared spectroscopy”, *Vibrational Spectroscopy* 51 (2009)168–176
- [3] Mary L. Lewis “Raman spectrometry of explosives with a no-moving-parts fiber coupled spectrometer: A comparison of excitation wavelength”, *Vibrational Spectroscopy* 38(2005)17–28
- [4] Jehuda Yinon “Trace analysis of explosives in water by gas chromatography-mass spectrometry with a temperature-programmed injector”, *Journal of Chromatography A*, 742 (1996) 205-209
- [5] Marianne E. Walsh “Determination of nitroaromatic, nitramine and nitrate ester explosives in soil by gas chromatography and an electron capture detector”, *Talanta* 54 (2001)427–438
- [6] Thomas Caron, Marianne Guillemat, Pierre Montmeat, Florian Veignal “Ultra trace detection of explosives in air: Development of a portable fluorescent detector”, *Talanta* 81(2010) 543-538
- [7] J. W. Gardner “Electronic Noses & Sensors for the Detection of Explosives”, (2004)
- [8] E. L. Hines, E. Llobet and J.W. Gardner “Electronic noses: a review of signal processing techniques”, *IEEE Proc. Circuits Device Syst.* (1999).
- [9] C. Crespy, P. Duvauchelle, V. Kaftandjian, F. Soulez, P. Ponard “Energy dispersive X-ray diffraction to identify explosive substance: Spectra analysis procedure optimization”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 623 (2010)1050-1060

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Catharine H. Malden, Robert D. Speller “A CdZnTe array for the detection of explosives in baggage by energy-dispersive X-ray diffraction signatures at multiple scatter angles”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 449(2000) 408-415
- [11] Anthony Dicken, Keith Rogers, Paul Evans, Joseph Rogers, Jer Wang Chan, “The separation of X-ray diffraction patterns for threat detection”, Applied Radiation and Isotopes 68(2010) 439-443
- [12] G. Harding “X-ray diffraction-A multi-generational perspective”, Applied Radiation and Isotopes 67 (2009) 287-295
- [13] Lindsay I Smith “A tutorial on Principle Components Analysis (2002)”.
- [14] Hee-Jung Im “Classification of materials for explosives from prompt gamma spectra by using principal component analysis”, Applied Radiation and Isotopes 67(2009)1458–1462
- [15] แม้น อมรสิทธิ์ และอมรเพชรสม “Principles and Techniques of Instrumental Analysis
- [16] รศ.คณะแม้น อมรสิทธิ์ และ“และ หลักการเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ”
- [17] นภาพร กัวยระกุล “”สแกนไอออนศึกษาการตรวจหาสารระเบิดบนผิวผ้าฝ้ายและไม้อัดด้วยวิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร 2552
- [18] สุธรรม ศรีหล่มสัก “เอกซเรย์ดิฟแฟรคชันเบื้องต้น”
- [19] ดร.บัญชา ชนบุญสมบัติ และ ศุภกาญจน์ คำมณี“ สรรพคุณอิเล็กทรอนิกส์แบบแอสกนนิ่ง ประตูลงเข้าสู่โลกระดับจุลภาค”
- [20] T. Khayamian, M. Tabrizchi and M.T. Jafari “Quantitative analysis of morphine and noscapine using corona discharge ion mobility spectrometry with ammonia reagent gas” Talanta Volume 69, Issue 4, 15 June 2006, Pages 795–799
- [21] S. Ampuero and J.O. Bosset “The electronic nose applied to dairy products: a review” Sensors and Actuators B: Chemical Volume 94, Issue 1, 15 August 2003, Pages 1–12
- [22] Miguel Perisa and Laura Escuder-Gilabertb “A 21st century technique for food control: Electronic noses” Analytica Chimica Acta 638 (2009) 1–15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] A. Berna “Metal Oxide Sensors for Electronic Noses and Their Application to Food Analysis” *Sensor* 10(4), 3882-3910(2010)
- [24] F. Rock, N. Barsan, U. Weimar, “Electronic Nose: Current Status and Future Trends”, *Chem. Rev.*108(2), 705-725(2008)
- [25] P. Ciosek, W. Wroblewski “Sensor Arrays for Liquid Sensing – Electronic Tongue Systems” *Analyst*132(10), 963-978 (2007)
- [26] กาญจนา แซ่เตียว อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เลียนแบบประสาทสัมผัสรับรสโดยวิธีเคมีไฟฟ้าเพื่อ “ใช้วัดไอออนในน้ำ; Electrochemical Electronic Tongue for Identifying Ion in Water” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง บัณฑิตวิทยาลัย .สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,2555
- [27] Jehuda Yinon “ Detection of explosives by Electronic noses” *Analytical chemistry*, March 1, 2003
- [28] http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/eng/research/sensors/mbl/staffold/julian_gardner/
- [29] Muthukumar K. and Devi Mala E. “Detection of IED Using Nanotechnology” *International Journal of Scientific & Engineering Research* Volume 2, Issue 12, December 2011
- [30] Suman Singh “Review, Sensor-An effective approach for the detection of explosives” *Journal of Hazardous Materials* 144(2007) 15-28
- [31] M. Endo, M. S. Strano, P. M. Ajayan “Title” in *Carbon Nanotubes* (Springer-Verlag Berlin, Berlin, 2008), Vol. 111, pp. 13-61
- [32] T.C Pearch, S.S. Schiffman, H.T.Nagle and J.w. Gardner, “Handbook of Machine Olfaction: Electronic Nose Technology” (Wiley-VCH, Weinheim, Germany 2003).
- [33] A. Berna, “Metal Oxide Sensors for Electronic Nose and Their Application to Food Analysis”, *Sensors* 10(4), 3882-3910 (2010).
- [34] David James, Simon M. Scott, Zulfiqur Ali and William T. O’Hare “Review, Chemical Sensor for Electronic Nose Systems” *Microchim. Acta* 149,1-17(2005)

- [35] Behzad Rezaei and S. Zohreh Mirahmadi Zare “Modified glassy carbon electrode with multiwall carbon nanotubes as a voltammetric sensor for determination of noscapine in biological and pharmaceutical samples” *Sensors and Actuators B: Chemical* Volume 134, Issue 1, 28 August 2008, Pages 292–299
- [36] เกศินี เหมวิเชียร และ พิริยาธร สุวรรณมาลา “การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ ตอนที่ 1 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์) Polymer Characterization I: Differential Scanning Calorimeter (DSC)” กลุ่มวิจัยและพัฒนานิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) .
- [37] Wei Li, Yu Zhong, Daoyang Yu, Dingjun Qu, Bai Sun, Minqiang Li and Jinhui Liu “APPLICATION OF PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS FOR IDENTIFICATION OF DRUGS PACKED IN ANTHROPOMORPHIC PHANTOM” *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences* 2006-2012 Asian Research Publishing Network (ARPN).

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล(ไทย) นางสาวณรัชชอร์ สายโสภา
ชื่อ-นามสกุล(อังกฤษ) Narat-orn Saysopa
วัน เดือน ปีเกิด 12 สิงหาคม 2522 ที่จังหวัดอุบลราชธานี
ที่อยู่ 99/696 ซอยหทัยราษฎร์ 33 แขวงบางชัน เขตคลองสามวา กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา

มัธยมศึกษา โรงเรียนเบญจมาฆะมหาธาตุ จังหวัดอุบลราชธานี จบการศึกษา
พ.ศ. 2541

อนุปริญญา โรงเรียนรังสีเทคนิค คณะแพทยศาสตร์โรงพยาบาลรามาธิบดี
มหาวิทยาลัยมหิดล จบการศึกษา พ.ศ. 2545

ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ สาขารังสีเทคนิค มหาวิทยาลัยรามคำแหง
จบการศึกษา พ.ศ. 2550

ปริญญาโท สาขาวิชาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง จบการศึกษา พ.ศ. 2556

ทุนการศึกษาที่เคยได้รับ

ทุนจากศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านฟิสิกส์ ในปีการศึกษา 2551-2553

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ.2545-2546 ตำแหน่งเจ้าหน้าที่รังสีเทคนิค โรงพยาบาลค่ายสรรพสิทธิประสงค์

พ.ศ.2547-ปัจจุบัน ตำแหน่งนักนิติวิทยาศาสตร์ปฏิบัติการ สถาบันนิติวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

1. C. Kiratiphaisarl, , **M. Saysopa**, J. Nukeaw, B. Tunhoo, “Application of electronic nose for detecting meat freshness” Proceeding of the 5th Annual Conference of the Thai journal of Physics series 5 SPC 2009 Physic for Dynamic Society, Phetchaburi, Thailand.
2. **N. Saysopa**, “Classification of explosives and non explosives by using XRD in conjunction with pattern recognition by principal component analysis” Proceeding of Pure and Applied Chemistry International Conference 2012, Chiangmai, Thailand

ผลงานที่ได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

1. **N. Saysopa**, C. Kiratiphaisarl, J. Nukeaw, S. Pratontep “Qualitative Analysis of Explosive at Elevated Temperature using Electronic Nose” Proceeding of the 5th Annual Conference of the Thai journal of Physics, series 6, 2010, Kanchanaburi, Thailand.