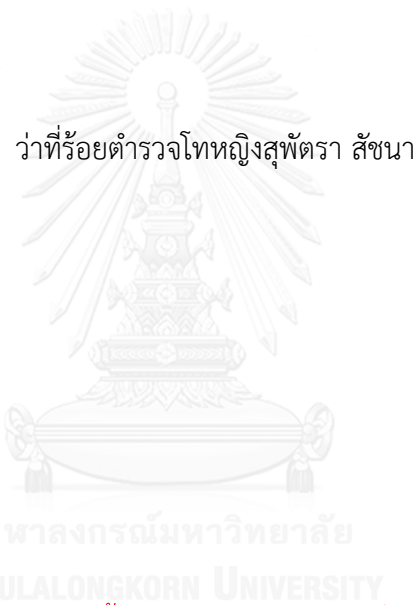


การวิเคราะห์ผลึกของสารประกอบเคมีที่ใช้เป็นวัตถุระเบิดด้วยภาพถ่าย
จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์



ว่าที่ร้อยตำรวจโทหญิงสุพัตรา สัชฌา

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF EXPLOSIVE CHEMICAL COMPOUND CRYSTAL USING IMAGE
FROM POLARIZED LIGHT MICROSCOPE

Acting Police Lieutenant Suphattra Sachana



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Physics

Department of Physics

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การวิเคราะห์ผลึกของสารประกอบเคมีที่ใช้เป็นวัตถุระเบิด |
| | ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ |
| โดย | ว่าที่ร้อยตำรวจโทหญิงสุพัตรา สัจนา |
| สาขาวิชา | ฟิสิกส์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤมล สุวรรณจันทร์ดี |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | อาจารย์ ดร.สมฤทธิ วงศ์มณีโรจน์ |

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐชาติ มงคลนาวิน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤมล สุวรรณจันทร์ดี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.สมฤทธิ วงศ์มณีโรจน์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญ อารยะธนิตกุล)

สุพัตรา สัชนา : การวิเคราะห์ผลึกของสารประกอบเคมีที่ใช้เป็นวัตถุระเบิดด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ (ANALYSIS OF EXPLOSIVE CHEMICAL COMPOUND CRYSTAL USING IMAGE FROM POLARIZED LIGHT MICROSCOPE) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.นฤมล สุวรรณจันทร์ดี, อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ. ดร.สมฤทธิ วงศ์มณีโรจน์, 83 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ (polarized light microscope) ในการศึกษาสมบัติเชิงแสงของสารแอมโมเนียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐาน โดยการถ่ายภาพโพลาไรซ์ของแต่ละสารตัวอย่างที่เตรียมด้วยวิธีการหลอมสารเคมีแล้วปล่อยให้เย็นตัว ภาพโพลาไรซ์ที่ได้จากเงื่อนไขการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะมีคุณภาพ และไม่มีฟองอากาศ เหมาะสำหรับนำไปวิเคราะห์ต่อยกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ ภาพโพลาไรซ์มีสีของการแทรกสอดที่หลากหลายเกิดจากความหนาที่แตกต่างกัน สามารถหาความหนาของผลึกสารในแต่ละบริเวณที่มีสีแตกต่างกันได้จากการใช้ตัวหน่วง (retarder) และแผนภาพของมิเชล-เลวี (Michel-Lévy Chart) รูปแบบภาพโพลาไรซ์ของสารแอมโมเนียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐานมีความแตกต่างกันโดยแอมโมเนียมไนเตรทมีลักษณะเกรนที่ซับซ้อนกว่าโพแทสเซียมไนเตรท การใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction) ศึกษาผลึกของสารเคมีพบว่าระบบผลึกของสารเคมีที่อุณหภูมิห้องก่อนและหลังหลอมไม่มีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ได้นำสารเคมีที่ใช้เป็นส่วนผสมของวัตถุระเบิดที่เก็บได้จากสถานที่เกิดเหตุมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ พบว่าสามารถใช้ภาพโพลาไรซ์ของสารเคมีมาตรฐานเป็นมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบกับภาพโพลาไรซ์ของสารเคมีที่ใช้เป็นส่วนผสมของวัตถุระเบิดจากสถานที่เกิดเหตุในการระบุชนิดสารเคมีสองชนิด คือ แอมโมเนียมไนเตรท และโพแทสเซียมไนเตรท ที่ใช้เป็นส่วนผสมของวัตถุระเบิดได้ แม้ว่าสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุจะมีการปนเปื้อนแต่ไม่ส่งผลต่อภาพโพลาไรซ์

ภาควิชา ฟิสิกส์

สาขาวิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาร่วม

5572151823 : MAJOR PHYSICS

KEYWORDS: POLARIZED LIGHT MICROSCOPE / , EXTINCTION POSITION / AMMONIUM NITRATE / POTASSIUM NITRATE / MICHEL-LEVY CHART

SUPHATTRA SACHANA: ANALYSIS OF EXPLOSIVE CHEMICAL COMPOUND CRYSTAL USING IMAGE FROM POLARIZED LIGHT MICROSCOPE. ADVISOR: ASST. PROF. DR.NARUMON SUWONJANDEE, CO-ADVISOR: DR.SOMRIT WONGMANEROD, 83 pp.

The objectives of this research is to study the optical properties of standard ammonium nitrate and potassium nitrate by using the polarized light microscope (PLM). The polarized images of the surface of each sample prepared by fusion method have been taken using PLM. The polarized images of the sample with rapid cooling down have good quality and no bubbles, and are suitable to analyze by the polarized light microscope. The various interference colors of polarized images are caused by a variety of different thickness. The thickness of each area that has different color can be estimated by using retarder and the Michel-Lévy chart. The polarized images of both chemical compounds show different grain patterns, the grain patterns of ammonium nitrate are more complicated than potassium nitrate. X-Ray Diffraction (XRD) is used to study the crystal system of chemical compounds. The crystal system of chemical compounds does not change at room temperature before and after fusion process. In addition, explosive compounds collected from the crime scene are analyzed by polarized light microscope. The polarized images of chemical standards are set as standard to compare with the polarized images of explosive compounds from crime scene which are identified two explosive compounds; ammonium nitrate and potassium nitrate. Although the explosive compounds are contaminated, but they do not affect the polarized images.

Department: Physics

Field of Study: Physics

Academic Year: 2015

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีต้องขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤมล สุวรรณจันทร์ดี และ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์ ดร.สมฤทธิ วงศ์มนิโรจน์ ที่ท่านได้ชี้แนะแนวทาง ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือทั้งการทำงานวิจัย และการเขียนวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังสอนให้เรียนรู้การทำงานวิจัยที่ดีด้วย ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้อันมีค่า และมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำงานวิจัยชิ้นนี้รวมถึงให้กำลังใจทั้งเรื่องการเรียนและเรื่องงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ พ.ต.ท.หญิงยุพรัตน์ ปิ่นแก้ว นักวิทยาศาสตร์ สัญญาบัตร 2 กลุ่มงาน ตรวจทางเคมี ฟิสิกส์ ที่ได้เสนอแนวคิดของงานวิจัยนี้เพื่อให้เป็นประโยชน์ในงานด้านพิสูจน์หลักฐาน และให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยชิ้นนี้ตลอดมา ขอขอบคุณกลุ่มงานตรวจทางเคมี ฟิสิกส์

กองพิสูจน์หลักฐานกลาง สำนักงานตำรวจแห่งชาติ ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือ วิทยาศาสตร์ในการทำการทดลองให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณสมาชิกครอบครัวสี่ชนาทุกท่านที่มอบความรักความอบอุ่น และคอยเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยเสมอมาในทุก ๆ เรื่อง

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการศึกษา จากคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต ครั้งที่ 2/2558 ภาควิชาการศึกษาลาย ปีการศึกษา 2557 จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้จัดทำโครงการรู้สึกซาบซึ้ง และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงแก่ผู้ที่ทำให้การสนับสนุนในการจัดทำงานวิจัยทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญรูป | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 การหาค่าไบรีฟรินเจนซ์ของแร่โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์..... | 4 |
| 2.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ (polarized light microscope)..... | 6 |
| 2.3 สมบัติเชิงแสงของวัสดุ | 8 |
| 2.4 ตัวหน่วง (retarder)..... | 18 |
| 2.5 การเกิดผลึกของแข็ง (crystallization)..... | 19 |
| 2.6 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray diffraction, XRD)..... | 20 |
| 2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)..... | 21 |
| 2.8 สารประกอบเคมีที่ใช้เป็นวัตถุระเบิด..... | 23 |
| 2.8.1 แอมโมเนียมไนเตรท (Ammonium Nitrate, NH_4NO_3) | 23 |
| 2.8.2 โพแทสเซียมไนเตรท (Potassium Nitrate, KNO_3)..... | 24 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 25 |
| 3.1 อุปกรณ์การวิจัย..... | 25 |
| 3.2 ขั้นตอนการวิจัย | 27 |
| 3.2.1 การเตรียมสไลด์..... | 27 |

| | |
|--|----|
| 3.2.2 การเตรียมสารเคมี..... | 27 |
| 3.2.3 การหลอมสารเคมีโดยใช้เครื่องหลอม..... | 29 |
| 3.2.4 การถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์..... | 31 |
| 3.2.5 การใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์..... | 32 |
| 3.2.6 การวัดความหนาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... | 33 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัย..... | 34 |
| 4.1 เงื่อนไขอุณหภูมิในการหลอมสารเคมี..... | 34 |
| 4.2 ภาพโพลาไรซ์ในขณะเย็นตัว..... | 37 |
| 4.3 การควบคุมแรงกดบนแผ่นกระจกปิดสไลด์และวัดความหนาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... | 38 |
| 4.4 ตำแหน่งสลัวแสง (extinction position)..... | 41 |
| 4.5 การประมาณความหนาของผลึกสารโดยใช้ตัวหน่วงและแผนภาพของมิเชล-เลวี..... | 42 |
| 4.6 ผลของความหนากับสีของภาพโพลาไรซ์..... | 45 |
| 4.6.1 แอมโมเนียมไนเตรท..... | 45 |
| 4.6.2 โพแทสเซียมไนเตรท..... | 50 |
| 4.7 รูปแบบภาพโพลาไรซ์ของสารเคมีมาตรฐาน..... | 52 |
| 4.7.1 รูปแบบภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐาน..... | 52 |
| 4.7.2 รูปแบบภาพโพลาไรซ์ของโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐาน..... | 54 |
| 4.8 การใช้ค่าอัตราส่วนภาพ (aspect ratio) แสดงลักษณะเกรนของสารเคมี..... | 56 |
| 4.9 ผลการวิเคราะห์ผลึกสารเคมีก่อนและหลังให้ความร้อนจากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบน รังสีเอ็กซ์..... | 59 |
| 4.9.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแอมโมเนียมไนเตรท..... | 59 |
| 4.9.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโพแทสเซียมไนเตรท..... | 60 |
| 4.10 เปรียบเทียบภาพโพลาไรซ์ของสารเคมีมาตรฐานกับสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุ..... | 61 |

| | |
|--|----|
| 4.10.1 ภาพโพลาริซ์ของสารแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐานกับสารแอมโมเนียมไนเตรท จากสถานที่เกิดเหตุ..... | 62 |
| 4.10.2 ภาพโพลาริซ์ของสารโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐานกับสารโพแทสเซียมไนเตรท จากสถานที่เกิดเหตุ..... | 65 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย..... | 69 |
| 5.1 ผลการวิจัย..... | 69 |
| 5.2 งานวิจัยในอนาคต (Future Research)..... | 71 |
| รายการอ้างอิง..... | 73 |
| ภาคผนวก..... | 75 |
| ภาคผนวก ก ขั้นตอนการดำเนินงาน..... | 76 |
| ภาคผนวก ข การเตรียมตัวอย่างและการตั้งค่าเครื่องมือ..... | 78 |
| ภาคผนวก ค ระบบผลึก..... | 82 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 83 |

สารบัญตาราง

หน้า

| | | |
|--------------|---|----|
| ตารางที่ 2.1 | ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับผลต่างระยะทางเชิงแสงในอันดับ 1 ถึง 4.... | 13 |
| ตารางที่ 2.2 | ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของแสง ผลต่างระยะทางเชิงแสง และความหนา ในอันดับ 1 ถึง 4 ของแอมโมเนียมไนเตรทที่มีค่าไบรีฟรินเจนซ์ 0.224..... | 16 |
| ตารางที่ 2.3 | ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของแสง ผลต่างระยะทางเชิงแสง และความหนา ในอันดับ 1 ถึง 4 ของโพแทสเซียมไนเตรทที่มีค่าไบรีฟรินเจนซ์ 0.171..... | 17 |
| ตารางที่ 4.1 | ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่เกิดขึ้น อันดับ ผลต่างระยะทางเชิงแสง และความหนา จากรูปที่ 4.14 ของแอมโมเนียมไนเตรทที่มีค่าไบรีฟรินเจนซ์ 0.224..... | 47 |
| ตารางที่ 4.2 | ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่เกิดขึ้น อันดับ ผลต่างระยะทางเชิงแสง และความหนา จากรูปที่ 4.18 ของโพแทสเซียมไนเตรทที่มีค่าไบรีฟรินเจนซ์ 0.171..... | 50 |
| ตารางที่ ข.1 | การตั้งค่าพารามิเตอร์ของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์..... | 80 |
| ตารางที่ ข.2 | พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์..... | 81 |
| ตารางที่ ข.3 | พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... | 81 |

สารบัญรูป

หน้า

| | | |
|-------------|---|----|
| รูปที่ 2.1 | สีการแทรกสอดของตัวอย่างแร่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบ แสงโพลาไรซ์..... | 5 |
| รูปที่ 2.2 | ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ | 6 |
| รูปที่ 2.3 | เวกเตอร์สนามไฟฟ้าของแสงไมโพลาไรซ์เมื่อผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์..... | 7 |
| รูปที่ 2.4 | เวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ผ่านโพลาไรเซอร์ตั้งฉากกับแกนยอมผ่านของแสงของ อะนาไลเซอร์ทำให้ไม่มีแสงผ่านไป..... | 7 |
| รูปที่ 2.5 | (ก) โครงผลึกของแคลไซต์ซึ่งมีระบบผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล (ข) แสงไมโพลาไรซ์ ผ่านแคลไซต์ในทิศทางเดียวกับแกนแสง และตั้งฉากกับแกนแสง..... | 9 |
| รูปที่ 2.6 | แสงเดินทางผ่านวัสดุแอนไอโซทรอปิกในทิศตั้งฉากกับแกนแสง..... | 10 |
| รูปที่ 2.7 | แสงโพลาไรซ์ที่เดินทางผ่านวัสดุแอนไอโซทรอปิกที่อยู่ในตำแหน่งทแยงมุมสำหรับ แสงสีเดียว..... | 10 |
| รูปที่ 2.8 | แผนภาพของมิเชล-เลวี..... | 14 |
| รูปที่ 2.9 | ความยาวคลื่นของแสงสีต่าง ๆ ที่ตำแหน่งค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงใด ๆ..... | 15 |
| รูปที่ 2.10 | แสงที่เดินทางผ่านวัสดุแอนไอโซทรอปิกและตัวหมุน..... | 18 |
| รูปที่ 2.11 | สภาวะหลอมเหลวของอะตอมที่มีการแยกจากกันของอะตอมแบบสุ่ม..... | 19 |
| รูปที่ 2.12 | การเกิดนิวเคลียสจนกระทั่งเป็นเกรน..... | 20 |
| รูปที่ 2.13 | การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยผลึก..... | 21 |
| รูปที่ 2.14 | ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... | 22 |
| รูปที่ 2.15 | โครงสร้างโมเลกุลของแอมโมเนียมไนเตรท..... | 23 |
| รูปที่ 2.16 | โครงสร้างโมเลกุลของโพแทสเซียมไนเตรท..... | 24 |
| รูปที่ 3.1 | (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ และ (ข) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบน รังสีเอ็กซ์..... | 26 |
| รูปที่ 3.2 | (ก) เครื่องหลอม และ (ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... | 26 |
| รูปที่ 3.3 | (ก) แอมโมเนียมไนเตรท และ (ข) โพแทสเซียมไนเตรท..... | 26 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 3.4 (ก) โปรแกรมควบคุมอุณหภูมิ JC-300(DCL-300) และ (ข) แผ่นโลหะสำหรับ คุมแรงกด..... | 27 |
| รูปที่ 3.5 การซิงสารเคมีที่วางอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเครื่องซิงดิจิทัล..... | 27 |
| รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเตรียมสารแอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุเพื่อนำไปหลอม..... | 28 |
| รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมสารโพแทสเซียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุเพื่อนำไปหลอม..... | 29 |
| รูปที่ 3.8 แผนผังเครื่องหลอมที่เชื่อมต่อกับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ..... | 30 |
| รูปที่ 3.9 ค่าอุณหภูมิของเครื่องหลอมจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิ..... | 30 |
| รูปที่ 3.10 (ก) สารเคมีบนเครื่องหลอมได้รับความร้อนจนถึงจุดหลอมเหลว (ข) แผ่นกระจกปิด สไลด์ปิดทับบนสารเคมีที่หลอม (ค) แผ่นโลหะสำหรับควบคุมแรงกดจำนวน 1 แผ่น วางบนแผ่นกระจกปิดสไลด์ (ง) แผ่นโลหะสำหรับควบคุมแรงกดจำนวน 2 แผ่น วางบนแผ่นกระจกปิดสไลด์ (จ) แผ่นโลหะสำหรับควบคุมแรงกดจำนวน 3 แผ่น วางบนแผ่นกระจกปิดสไลด์..... | 30 |
| รูปที่ 3.11 ตัวหน่วงของ “Berek polarization compensator” | 32 |
| รูปที่ 3.12 การใส่ตัวหน่วงระหว่างวัสดุแอนไอโซทรอปิกและอะนาไลเซอร์..... | 32 |
| รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเครื่องหลอมกับเวลาในกรณีเย็นตัว แบบช้า ๆ..... | 35 |
| รูปที่ 4.2 ภาพโพลาริซ์ที่ได้จากการเย็นตัวอย่างช้า ๆ และอย่างรวดเร็วของสารเคมีที่กำลังขยาย 100 เท่า..... | 36 |
| รูปที่ 4.3 ภาพโพลาริซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทแสดงการเย็นตัวเข้าสู่จุดศูนย์กลางที่เวลาต่าง ๆ | 37 |
| รูปที่ 4.4 ภาพโพลาริซ์ของโพแทสเซียมไนเตรทแสดงการเย็นตัวเข้าสู่จุดศูนย์กลางที่เวลาต่าง ๆ | 37 |
| รูปที่ 4.5 ภาพโพลาริซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทแสดงการเย็นตัวแบบสุ่มที่เวลาต่าง ๆ | 38 |
| รูปที่ 4.6 ภาพโพลาริซ์ของโพแทสเซียมไนเตรทแสดงการเย็นตัวแบบสุ่มที่เวลาต่าง ๆ | 38 |
| รูปที่ 4.7 (ก) ภาพโพลาริซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทที่ได้จากการปิดทับด้วยแผ่นกระจกปิดสไลด์ อย่างเดียว และ (ข) วัดความหนาของสารจากรูป (ก) โดยใช้ SEM ได้ประมาณ 13.27 ไมโครเมตร..... | 39 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 4.8 (ก) ภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทที่ได้จากการปิดทับด้วยแผ่นโลหะ 1 แผ่น บนแผ่นกระจกปิดสไลด์ และ (ข) วัดความหนาของสารจากรูป (ก) โดยใช้ SEM ได้ประมาณ 9.84 ไมโครเมตร..... | 39 |
| รูปที่ 4.9 (ก) ภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทที่ได้จากการปิดทับด้วยโลหะ 2 แผ่น บนแผ่นกระจกปิดสไลด์ และ (ข) วัดความหนาของสารจากรูป (ก) โดยใช้ SEM ได้ประมาณ 7.22 ไมโครเมตร..... | 40 |
| รูปที่ 4.10 (ก) ภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทที่ได้จากการปิดทับด้วยโลหะ 3 แผ่น บนแผ่นกระจกปิดสไลด์ และ (ข) วัดความหนาของสารจากรูป (ก) โดยใช้ SEM ได้ประมาณ 5.56 ไมโครเมตร..... | 40 |
| รูปที่ 4.11 ภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทแสดงภาพเกรนที่พิจารณาเม็ดที่ตำแหน่งสลับแสง (0°) ที่ตำแหน่งทแยงมุม (45°) แสดงภาพเกรนเป็นสีฟ้า ที่ตำแหน่งสลับแสงอีกครั้ง (90°) แสดงภาพเกรนมืด และที่ตำแหน่งทแยงมุมอีกครั้ง (135°) แสดงภาพเกรนเป็นสีฟ้า..... | 41 |
| รูปที่ 4.12 ภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทที่กำลังขยาย 100 เท่า..... | 42 |
| รูปที่ 4.13 การประมาณความหนาของผลึกสารแอมโมเนียมไนเตรทโดยใช้ตัวหน่วง 632.8 นาโนเมตร..... | 43 |
| รูปที่ 4.14 การประมาณความหนาของผลึกสารแอมโมเนียมไนเตรทที่บริเวณต่าง ๆ ภายในเกรน เดียวกันโดยใช้ตัวหน่วง 632.8 นาโนเมตร..... | 46 |
| รูปที่ 4.15 แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของความหนาที่บริเวณต่าง ๆ ภายในหนึ่งเกรนของ แอมโมเนียมไนเตรท..... | 47 |
| รูปที่ 4.16 การไล่ระดับสีของภาพโพลาไรซ์ในอันดับที่ 1 ถึง 3 ที่สอดคล้องกับแผนภาพ ของมิเชล-เลวี..... | 48 |
| รูปที่ 4.17 ความหนาของผลึกสารแอมโมเนียมไนเตรทประมาณ 5.861 ไมโครเมตร ที่กำลังขยาย 1000 เท่า วัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... | 49 |
| รูปที่ 4.18 การประมาณความหนาของผลึกสารโพแทสเซียมไนเตรทที่บริเวณต่าง ๆ ภายใน หนึ่งเกรนโดยใช้ตัวหน่วง 500 นาโนเมตร..... | 51 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 4.19 ตัวอย่างรูปแบบภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียมไนเตรท..... | 53 |
| รูปที่ 4.20 ตัวอย่างรูปแบบภาพโพลาไรซ์ของโพแทสเซียมไนเตรท..... | 55 |
| รูปที่ 4.21 การนำกรอบสี่เหลี่ยมมาวางภายในเกรนเพื่อหาค่าอัตราส่วนภาพจากภาพโพลาไรซ์ ของแอมโมเนียมไนเตรท..... | 56 |
| รูปที่ 4.22 อัตราส่วนภาพเกรนของแอมโมเนียมไนเตรท..... | 57 |
| รูปที่ 4.23 การนำกรอบสี่เหลี่ยมมาวางภายในเกรนเพื่อหาค่าอัตราส่วนภาพจากภาพโพลาไรซ์ ของโพแทสเซียมไนเตรท | 57 |
| รูปที่ 4.24 อัตราส่วนภาพเกรนของโพแทสเซียมไนเตรท..... | 58 |
| รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบอัตราส่วนภาพของแอมโมเนียมไนเตรท (ฟ้า) และโพแทสเซียม ไนเตรท (ส้ม)..... | 58 |
| รูปที่ 4.26 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทก่อนหลอม (สีแดง) และ แอมโมเนียมไนเตรทหลังหลอม (สีดำ)..... | 60 |
| รูปที่ 4.27 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโพแทสเซียมไนเตรทก่อนหลอม (สีแดง) และ โพแทสเซียมไนเตรทหลังหลอม (สีดำ)..... | 61 |
| รูปที่ 4.28 ตัวอย่างการเปรียบเทียบรูปแบบภาพโพลาไรซ์ของสารแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐานที่ บริเวณต่าง ๆ (ก) ถึง (ค) กับสารแอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุ (ง) ถึง (ฉ)... | 62 |
| รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบอัตราส่วนภาพของแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐาน (ฟ้า) และ แอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุ (แดง)..... | 63 |
| รูปที่ 4.30 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐาน (สีดำ) และ แอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุ (สีแดง)..... | 64 |
| รูปที่ 4.31 สเปกตรัมของสารแอมโมเนียมไนเตรท (ก) มาตรฐาน และ (ข) จากสถานที่เกิดเหตุ..... | 64 |
| รูปที่ 4.32 ตัวอย่างการเปรียบเทียบรูปแบบภาพโพลาไรซ์ของสารโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐานที่ บริเวณต่าง ๆ (ก) ถึง (ค) กับสารโพแทสเซียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุ (ง) ถึง (ฉ)... | 65 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบอัตราส่วนภาพของโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐาน (ฟ้า) และ โพแทสเซียมจากสถานที่เกิดเหตุ (แดง)..... | 66 |
| รูปที่ 4.34 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐาน (สีดำ) และ โพแทสเซียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุ (สีแดง)..... | 67 |
| รูปที่ 4.35 สเปกตรัมของสารโพแทสเซียมไนเตรท (ก) มาตรฐาน และ (ข) จากสถานที่เกิดเหตุ.... | 68 |
| รูปที่ ข.1 สารเคมีที่เก็บได้จากที่เกิดเหตุ..... | 78 |
| รูปที่ ข.2 สารเคมีที่เก็บได้จากที่เกิดเหตุถูกหลอมแล้วปล่อยให้เย็นตัวนำไปส่องใต้กล้องจุลทรรศน์ แบบแสงโพลาไรซ์..... | 78 |
| รูปที่ ข.3 ผลึกของสารแอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุหลังการอบ..... | 79 |
| รูปที่ ข.4 หน้าต่าง 1channel display ของโปรแกรม JC-300(DCL-300)..... | 79 |
| รูปที่ ข.5 กำหนดค่าอุณหภูมิของสารแอมโมเนียมไนเตรทที่ 170 องศาเซลเซียส..... | 80 |
| รูปที่ ข.6 หน้าต่าง Logging display เพื่อเลือกที่เก็บข้อมูลอุณหภูมิกับเวลา..... | 80 |
| รูปที่ ค.1 แลตทิจบราเวียส 14 แบบ..... | 82 |

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีปัญหาความขัดแย้งอย่างมากไม่ว่าจะเป็นปัญหาความขัดแย้งด้านการเมือง ปัญหาการก่อความไม่สงบทางตอนใต้ของประเทศไทย ปัญหาเหล่านี้มักจะนำไปสู่การใช้ความรุนแรงในสังคม เช่น การวางระเบิด การวางเพลิง และการลอบทำร้าย ทำให้เกิดการสูญเสียชีวิตทรัพย์สิน ทรัพยากรประเทศ ซึ่งมีผลกระทบต่อเศรษฐกิจ สังคมและบ้านเมือง โดยเฉพาะความรุนแรงที่เกิดจากการวางระเบิดจะทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงและเกิดความเสียหายเป็นบริเวณกว้าง งานวิจัยนี้จะศึกษาเกี่ยวกับสารเคมีที่นำมาใช้ทำเป็นวัตถุระเบิด เพื่อนำมาใช้ในการเชื่อมโยงกับสารเคมีที่พบหรือตรวจยึดได้จากผู้ต้องสงสัยและในสถานที่เกิดเหตุ ซึ่งสามารถระบุได้ว่าใคร หรือกลุ่มคนกลุ่มใด มีส่วนเกี่ยวข้องกับเหตุระเบิดบ้าง งานวิจัยนี้จะประโยชน์อย่างมากในด้านนิติวิทยาศาสตร์ ทำให้เจ้าหน้าที่ตำรวจสามารถจับกุมผู้ที่กระทำความผิดมาลงโทษได้ เนื่องจากวัตถุระเบิดแต่ละชนิดที่ใช้ในการก่อการร้ายนั้น มีสารเคมีที่ใช้เป็นสารตั้งต้นแตกต่างกัน เช่น แอมโมเนียมไนเตรท (NH_4NO_3) และโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) เป็นต้น สารเคมีเหล่านี้อาจจะมีลักษณะทางกายภาพที่คล้ายคลึงกัน คือเป็นของแข็งสีขาวเหมือนกันทำให้เราไม่สามารถสังเกตดูความแตกต่างได้ด้วยตาเปล่า และไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นวัตถุระเบิดชนิดใด ในการตรวจพิสูจน์สารประกอบเคมีที่นำมาใช้ทำเป็นวัตถุระเบิดนั้นมีจุดประสงค์เพื่อต้องการทราบว่าสารเคมีที่ส่งมาตรวจพิสูจน์นั้นเป็นสารเคมีอะไร สามารถใช้ทำเป็นวัตถุระเบิดได้หรือไม่ ถ้าเป็นสารเคมีที่ใช้เป็นวัตถุระเบิดตามประกาศกระทรวงกลาโหม เรื่อง กำหนดยุทธภัณฑ์ที่ต้องขออนุญาต ตามพระราชบัญญัติควบคุมยุทธภัณฑ์ พ.ศ. ๒๕๓๐ [1] ต้องมีการตรวจสอบใบขออนุญาตและดำเนินคดีตามกฎหมายกับผู้ที่มีสารเคมีนี้ไว้ในครอบครอง ในปัจจุบันได้มีการตรวจพิสูจน์สารเคมีที่นำไปใช้ทำเป็นสารตั้งต้นในการทำวัตถุระเบิดโดยใช้วิธีการทางเคมี และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ขั้นสูงที่มีราคาสูง เช่น การทดสอบไอออนของสารเคมีโดยใช้สารทำปฏิกิริยา (reagent) โดยสังเกตสีที่เปลี่ยนไป การใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray diffraction) ในการระบุชนิดของสารเคมี การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) เพื่อวิเคราะห์ธาตุ [2-4] ซึ่งการตรวจพิสูจน์ด้วยวิธีการทางเคมีนี้จะทำลายวัตถุพยาน ในกรณีที่มีวัตถุพยานปริมาณน้อยทำให้ไม่สามารถนำมาตรวจพิสูจน์ซ้ำได้อีก และเครื่องมือมีราคาสูง มีขนาดใหญ่ ไม่สามารถเคลื่อนย้ายหรือนำไปตรวจในสถานที่เกิดเหตุได้

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดสำหรับการตรวจพิสูจน์สารเคมีโดยวิธีการทางฟิสิกส์ซึ่งทำลายวัตถุพยานน้อยที่สุด และได้ผลการตรวจพิสูจน์อย่างรวดเร็ว ผู้วิจัยได้นำกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์

มาประยุกต์ใช้กับงานตรวจพิสูจน์ เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของสารเคมีที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำวัตถุระเบิดแต่ละชนิด ได้แก่ สมบัติเชิงแสง สี รูปร่างเฉพาะ ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์นี้มีขนาดเล็ก สามารถพกพาได้ สามารถนำไปใช้ในการตรวจสถานที่เกิดเหตุได้

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษากระบวนการวิเคราะห์ และสมบัติเชิงแสงของสารประกอบไนเตรทที่ใช้เป็นวัตถุระเบิดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ โดยมีระเบียบวิธีวิจัยคือ กลุ่มตัวอย่างที่ผู้วิจัยเลือกใช้เป็นสารเคมีที่เป็นอันตรายน้อยที่สุด และใช้ในการก่อการร้ายกันอย่างแพร่หลายในทางตอนใต้ของประเทศไทย ได้แก่ แอมโมเนียมไนเตรท โพลีเอทิลีนไนเตรท และสารประกอบไนเตรทที่ใช้ทำเป็นวัตถุระเบิดที่ตรวจเก็บได้จากสถานที่เกิดเหตุ ข้อจำกัดในการเลือกสารเคมีที่นำมาศึกษานั้นต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการทำทดลอง เนื่องจากในการทดลองมีการให้ความร้อนกับสารเคมี สารเคมีบางชนิดมีความไวสูงเมื่อสัมผัสความร้อนจะเกิดการระเบิดได้ จึงจำเป็นต้องศึกษาข้อมูลเป็นเบื้องต้นที่จะนำมาให้ความร้อน นอกจากนี้ ยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย คือ ไม่สามารถตั้งค่าอัตราการเพิ่มหรืออัตราการลดอุณหภูมิได้ แต่จะเป็นการลดอุณหภูมิด้วยตัวของเครื่องหลอมเอง สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ผู้วิจัยจะใช้สีจากภาพโพลาไรซ์ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ มาวิเคราะห์หาค่าความหนาของแต่ละบริเวณที่มีสีแตกต่างกัน และแสดงผลออกมาเป็นแผนภูมิการกระจายตัวของความหนาที่บริเวณต่างๆ บันทึกภาพโพลาไรซ์ของสารเคมีที่แสดงขอบเกรนชัดเจนเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนภาพ (aspect ratio) และจะใช้ค่าอัตราส่วนภาพนี้เป็นค่าเฉพาะในการแยกสารเคมีแต่ละชนิด

งานวิจัยนี้จะใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ที่มีแผ่นโพลาไรซ์จำนวนสองแผ่นวางตัวในลักษณะที่แกนยอมผ่านของแสง (transmission axes) ตั้งฉากกันโดยมีวัสดุที่ต้องการศึกษาวางอยู่ระหว่างแผ่นโพลาไรซ์ทั้งสอง เพื่อศึกษาสารประกอบเคมีที่มีสมบัติเป็นแอนไอโซทรอปิก เมื่อแสงโพลาไรซ์จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ผ่านเข้าไปในวัสดุแอนไอโซทรอปิกนั้นจะมีปรากฏการณ์ต่าง ๆ เกิดขึ้น กล่าวคือ การแยกแสงโพลาไรซ์เป็นสองรังสีที่มีทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกัน และเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงค่าดัชนีหักเหของแสงที่มีมากกว่าหนึ่งค่า การที่รังสีทั้งสองเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วไม่เท่ากันในวัสดุแอนไอโซทรอปิกจะทำให้เกิดผลต่างระยะทางเชิงแสงขึ้น ซึ่งค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงนี้ จะขึ้นกับความหนาของวัสดุ และค่าไบรีฟรินเจนซ์ (birefringence) ของวัสดุ สามารถหาค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงได้จากการเปรียบเทียบสีของภาพโพลาไรซ์กับสีของแผนภาพของมิเชล-เลวี (Michel-Levy chart) และนำค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงนี้ไปคำนวณหาค่าความหนาของวัสดุได้ [5, 6]

สำหรับขั้นตอนในการวิจัยจะเริ่มตั้งแต่กระบวนการเตรียมตัวอย่างให้มีคุณภาพพอที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ โดยจะเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการหลอมสารเคมีให้ถึงจุดหลอมเหลวแล้วปล่อยให้เย็นตัว และศึกษาภาพโพลาไรซ์ที่ได้จากการเย็นตัวอย่างช้า ๆ และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อหาเงื่อนไขที่ทำให้ภาพโพลาไรซ์มีคุณภาพที่สุด เปลี่ยนแรงกดที่กระทำบนแผ่นกระจกปิดสไลด์โดยใช้แผ่นโลหะในการกดทับ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงความหนาว่ามีผลอย่างไรต่อภาพโพลาไรซ์ และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการวัดความหนา ในการศึกษาสีของการแทรกสอดเพื่อนำไปคำนวณความหนาของสารเคมีจะใช้แผนภาพของมิเชล-เลวี และตัวหน่วง (retarder) โดยการนำตัวหน่วงใส่เข้ากับกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ในตำแหน่งระหว่างแผ่นวางตัวอย่างกับอะนาไลเซอร์ (analyzer) สีของภาพโพลาไรซ์ที่ได้จะเปลี่ยนไป 1 ความยาวคลื่น นอกจากนี้ ยังใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในการศึกษาโครงสร้างสารเคมีก่อนและหลังหลอมว่ามีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ สำหรับการเตรียมสารเคมีที่ใช้ทำเป็นวัตถุระเบิดจากสถานที่เกิดเหตุเพื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์นั้น จำเป็นต้องทำการสกัดเอาสารเคมีออกจากสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ จึงจะนำไปวิเคราะห์ได้ และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณในการหาปริมาณธาตุที่ปนเปื้อนจากสถานที่เกิดเหตุ

ภาพโพลาไรซ์ที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์จะแสดงสีของการแทรกสอดอย่างหลากหลาย เราสามารถประมาณความหนาของชั้นตัวอย่างได้จากสีของการแทรกสอดนี้ ซึ่งเครื่องมือบางชนิดไม่สามารถประมาณความหนาได้โดยตรงเนื่องจากสมบัติของสารประกอบเอง เช่น การดูดความชื้นของสารประกอบแอมโมเนียมไนเตรท นอกจากนี้ ภาพโพลาไรซ์ยังแสดงรูปร่างเฉพาะของสารประกอบแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน ทำให้เราสามารถแยกสารเคมีแต่ละชนิดได้จากภาพโพลาไรซ์ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในการศึกษาระบบผลึกของสารเคมี เพื่อนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการตรวจพิสูจน์วัตถุระเบิดและใช้ในการตรวจสอบผลการทดลองระหว่างการใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์กับกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด และโครงสร้างผลึกก่อนและหลังทำการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่อย่างไร

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ศึกษาสารประกอบเคมีที่ใช้ทำเป็นวัตถุระเบิดโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงาน และส่วนประกอบต่าง ๆ ของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ เพื่อที่จะสามารถอธิบายสิ่งที่ปรากฏบนภาพถ่ายในการศึกษาสมบัติเชิงแสงของวัสดุ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง นอกจากนั้นจะกล่าวถึงหลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ซึ่งนำมาใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึก และระบุนิตของสารประกอบเคมี และหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ และวัดความหนาของสารประกอบเคมี

2.1 การหาค่าไบรีฟรินเจนซ์ของแร่โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์

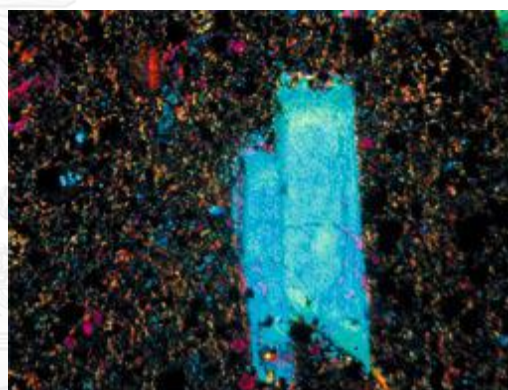
งานวิจัยของแมกนุส [6] ในปี 2011 ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ ตัวหน่วง (retarder) และแผนภาพของมิเชล-เลวี มาใช้ในการหาค่าไบรีฟรินเจนซ์ของแร่ ซึ่งค่าไบรีฟรินเจนซ์ของแร่จะเป็นค่าเฉพาะของแร่แต่ละชนิด ทำให้เขาทราบว่าแร่ที่เขานำมาตรวจสอบเป็นแร่อะไร การตรวจสอบชนิดของแร่จากค่าไบรีฟรินเจนซ์เป็นวิธีที่ง่าย สามารถทำให้ทราบชนิดของแร่ได้อย่างรวดเร็ว หลักการเชิงแสงที่ใช้คือ เมื่อมีแสงโพลาไรซ์ผ่านไปยังตัวกลางที่เป็นไบรีฟรินเจนซ์ จะมีการแตกองค์ประกอบของแสงเป็นสององค์ประกอบที่มีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ในตัวกลางต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากดัชนีหักเหของแสงในองค์ประกอบทั้งสองต่างกัน และทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกัน โดยระนาบการสั่นของแสงทั้งสององค์ประกอบจะตั้งฉากกัน การรวมกันของแสงสององค์ประกอบนี้เรียกว่า การแทรกสอด (interference) สีที่ปรากฏภายใต้การวางตัวของแกนยอมผ่านแสงของโพลาไรเซอร์วางตั้งฉากกับแกนยอมผ่านแสงของอะนาไลเซอร์เรียกว่า สีการแทรกสอด (interference color)

วิธีการทดลองคือ เตรียมตัวอย่างแร่ที่ต้องการนำมาหาค่าไบรีฟรินเจนซ์โดยมีความหนาประมาณ 25 - 30 ไมโครเมตร วางตัวอย่างแร่บนแท่นวางตัวอย่างของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ แล้วหมุนแร่ไปตำแหน่งที่แร่มีดที่สุด ดังรูปที่ 2.1 (ก) แล้วหมุนตัวอย่างแร่ต่อไปอีก 45° จะปรากฏภาพสีการแทรกสอดของแร่เป็นสีฟ้า ดังรูปที่ 2.1 (ข) เปรียบเทียบสีฟ้าของแร่กับสีจากแผนภาพของมิเชล-เลวีเพื่อระบุค่าผลต่างระยะทางเชิงแสง (optical path difference) ปรากฏว่าสีฟ้านี้มีค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงสองค่าที่เป็นไปได้ซึ่งอยู่ในอันดับที่สอง คือ 655 นาโนเมตร และอันดับที่สามคือ 1150 นาโนเมตร ดังนั้นเขาจะใช้ตัวหน่วงซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางแสงทำหน้าที่ลดหรือเพิ่ม

ค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงไป 1 อันดับ มาช่วยในการระบุอันดับของสีฟ้า เมื่อใส่ตัวหน่วงที่มีค่าความยาวคลื่น 551 นาโนเมตร ระหว่างอะนาไลเซอร์และแท่นวางตัวอย่าง ปรากฏว่าสีการแทรกสอดของแสงจากเดิมที่เป็นสีฟ้าจะเปลี่ยนเป็นสีเทา-ฟ้า ดังรูป 2.1 (ก) ที่มีค่าผลต่างระยะทางเชิงแสง 104 นาโนเมตร ซึ่งหาได้จากผลต่างระหว่างค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงของสีฟ้าอันดับที่ 2 (655 นาโนเมตร) และ ค่าความยาวคลื่นของตัวหน่วง (551 นาโนเมตร) ดังนั้นทำให้เขาทราบว่าสีฟ้าที่ปรากฏ ดังรูปที่ 2.1 (ข) อยู่ในอันดับที่ 2 ที่มีค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงเป็น 655 นาโนเมตร เพื่อที่จะตรวจสอบและยืนยันว่าสีฟ้าที่ปรากฏนั้นเป็นสีฟ้าอันดับที่ 2 เขาได้หมุนตัวอย่างแร่จากรูปที่ 2.1 (ค) ต่ไปอีก 90° ปรากฏว่าสีการแทรกสอดเปลี่ยนจากสีเทา-ฟ้าเป็นสีแอมเขียวที่มีค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงเป็น 1206 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากผลรวมระหว่างค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงของสีฟ้าอันดับที่ 2 (655 นาโนเมตร) กับค่าความยาวคลื่นของตัวหน่วง (551 นาโนเมตร) ดังนั้นทำให้เขาทราบว่าสีฟ้าที่ปรากฏตามรูปที่ 2.1 (ง) อยู่ในอันดับที่ 2 ที่มีค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงเป็น 655 นาโนเมตร



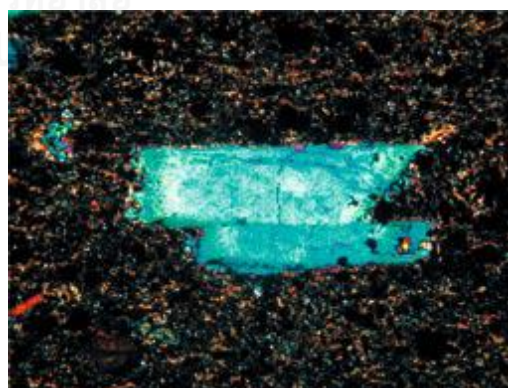
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

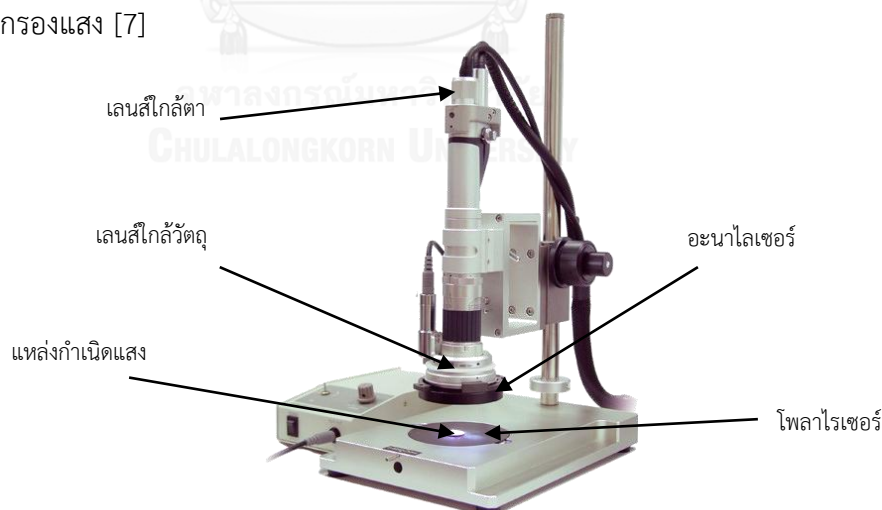
รูปที่ 2.1 สีการแทรกสอดของตัวอย่างแร่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ (ก) สีการแทรกสอดของแร่มืดที่สุด, (ข) หมุนแร่จากตำแหน่งมืดสุดไป 45° , (ค) ใส่ตัวหน่วงที่มีความยาวคลื่น 551 นาโนเมตร และ (ง) หมุนแร่ต่ไปอีก 90°

เมื่อนำค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงมาใช้ในการหาค่าไบรีฟรินเจนซ์ เมื่อค่าความหนา คือ 25 – 30 ไมโครเมตร ทำให้ได้ค่าไบรีฟรินเจนซ์เป็น 0.024 เขาจึงทราบว่าจะตัวอย่างแร่ที่นำมาศึกษาเป็น ออไกท์ (Augite)

จากงานวิจัยของแมกนุสซึ่งเตรียมตัวอย่างแร่ที่มีความหนาคงที่เพื่อนำมาระบุชนิดของแร่ จากค่าไบรีฟรินเจนซ์ ผู้วิจัยจึงได้ใช้วิธีการเดียวกันในการศึกษาสารเคมีที่ใช้ทำเป็นวัตถุระเบิด ซึ่งทราบค่าไบรีฟรินเจนซ์ของสารเคมีอยู่แล้ว แต่ใช้วิธีการนี้เพื่อศึกษาความหนาในแต่ละบริเวณที่ปรากฏสีการแทรกสอดที่แตกต่างกันของสารเคมีที่เตรียมด้วยวิธีการหลอมแล้วปล่อยให้เย็นตัว

2.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ (polarized light microscope)

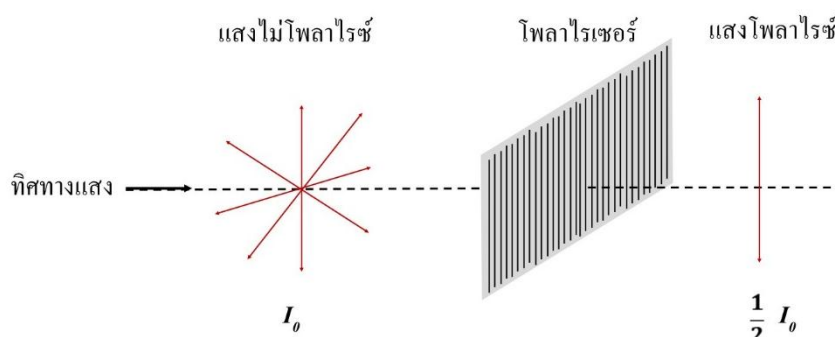
กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ถูกออกแบบมาเพื่อศึกษาสมบัติเชิงแสงของวัสดุ ซึ่งแสดงผลเป็นภาพการแทรกสอดของแสง กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็น กล้องจุลทรรศน์ที่มีส่วนประกอบ คือ แหล่งกำเนิดแสง (light source) แท่นวางตัวอย่าง (sample stage) เลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) เลนส์ใกล้ตา (eye piece) นอกจากนี้ยังมี ส่วนประกอบหลักที่สำคัญติดตั้งอยู่ คือ แผ่นกรองแสงโพลาไรซ์ (polarizing filter) จำนวนสองแผ่น ซึ่งแผ่นกรองแสงโพลาไรซ์นี้เป็นแผ่นพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพจนมีสมบัติในการดูดกลืนแสงที่มีระนาบการกวัดแกว่งของสนามไฟฟ้าในทิศทางหนึ่ง และปล่อยให้แสงที่มีระนาบการกวัดแกว่งของสนามไฟฟ้าในอีกทางหนึ่งออกไป แนวการกวัดแกว่งที่ปล่อยให้ผ่านไปได้นี้เรียกว่าแกนยอมผ่านของแผ่นกรองแสง [7]



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์

แผ่นกรองแสงทั้งสองถูกติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งต่างกันภายในกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ โดยแผ่นแรกถูกติดตั้งอยู่ด้านล่างของกล้องระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและแท่นวางตัวอย่าง ทำหน้าที่เปลี่ยนแสงจากแหล่งกำเนิดแสงซึ่งเป็นแสงไม่โพลาไรซ์ให้กลายเป็นแสงโพลาไรซ์แบบระนาบ เรียกว่า

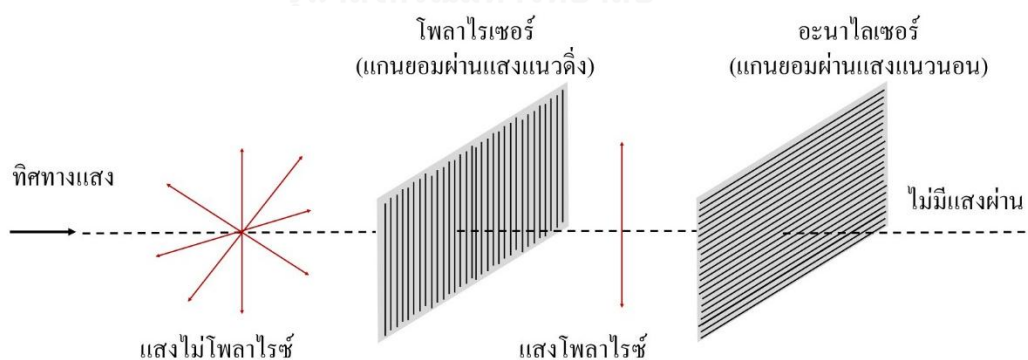
แผ่นกรองแสงแผ่นนี้ตามหน้าที่ของมันว่าโพลาไรเซอร์ (polarizer) ตามรูปที่ 2.2 ความเข้มของแสงหลังจากผ่านโพลาไรเซอร์จะลดลงครึ่งหนึ่งของความเข้มแสงเริ่มต้นตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เวกเตอร์สนามไฟฟ้าของแสงไม่โพลาไรซ์เมื่อผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์

ส่วนแผ่นกรองแสงอีกอันหนึ่งจะถูกติดตั้งอยู่ด้านบนของกล้องถัดจากแผ่นวางตัวอย่างขึ้นมาทำหน้าที่คัดกรองเฉพาะแสงที่มีระนาบการกวัดแกว่งสนามไฟฟ้าในทิศทางหนึ่งให้ผ่านไปยังเลนส์ใกล้ตาได้ ปริมาณแสงที่ปล่อยผ่านไปจะมาก - น้อย ขึ้นกับมุมบิดระหว่างแกนยอมผ่านของแผ่นกรองแสงกับทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าของแสงที่ผ่านเข้าแผ่นกรองแสงแผ่นที่สอง เรียกแผ่นกรองแสงแผ่นที่สองตามหน้าที่ของมันว่า อะนาไลเซอร์ (analyzer)

การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์สองตัวสุดที่ต้องการศึกษา จะมีการจัดวางเริ่มต้นให้แกนยอมผ่านของโพลาไรเซอร์และอะนาไลเซอร์ทำมุมฉากซึ่งกันและกัน จนปรากฏเป็นภาพพื้นหลังมืด (dark field of view) เพราะแสงโพลาไรซ์ที่เดินทางผ่านไปจากโพลาไรเซอร์จะถูกกั้นทั้งหมดโดยอะนาไลเซอร์ ตามรูปที่ 2.4



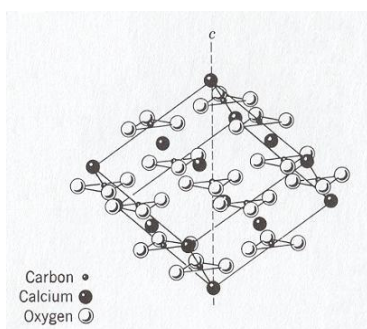
รูปที่ 2.4 เวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ผ่านโพลาไรเซอร์ตั้งฉากกับแกนยอมผ่านของแสงของอะนาไลเซอร์ทำให้ไม่มีแสงผ่านไปได้

2.3 สมบัติเชิงแสงของวัสดุ

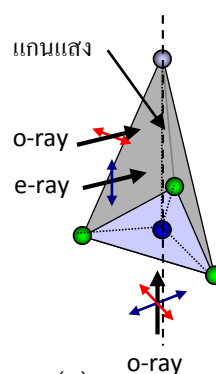
ในวัสดุที่มีอะตอมเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ มีความสมมาตรรอบทิศทาง โดยเฉพาะวัสดุที่มีระบบผลึกแบบลูกบาศก์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ แสงเดินทางในเนื้อสารด้วยอัตราเร็วเท่ากันหมดทุกทิศทาง จึงถือว่ามีดัชนีหักเหค่าเดียว เรียกวัสดุพวกนี้ว่า วัสดุไอโซทรอปิก (isotropic materials) เมื่อนำวัสดุที่มีดัชนีหักเหค่าเดียวกันสมำเสมอในทุกทิศทางนี้ มาวางกั้นลำแสงจากโพลาริเซอร์ เมื่อแสงโพลาริซ์ผ่านเข้าออกจากวัสดุเหล่านี้จะยังคงระนาบการสั่นดั้งเดิม ทำให้แสงโพลาริซ์ที่มีระนาบการสั่นเดิมนี้ไม่สามารถผ่านอะนาไลเซอร์ที่มีแกนยอมผ่านของแสงตั้งฉากกับโพลาริเซอร์ไปได้ ทำให้ภาพของวัสดุที่ปรากฏหลังจากไม่มีแสงผ่านอะนาไลเซอร์ไปได้นั้นดูมืดไปกับพื้นหลังไม่ว่าจะบิดหมุนวัสดุไปทางใดก็ตาม [8, 9] เช่นเดียวกับรูปที่ 2.4

วัสดุอีกกลุ่มหนึ่งที่มีดัชนีหักเหแสงไม่คงตัวเปลี่ยนแปลงตามทิศทางบนโครงผลึกเรียกว่า วัสดุแอนไอโซทรอปิก (anisotropic materials) อัตราเร็วแสงในตัวกลางจะมีได้มากกว่าหนึ่งค่า ซึ่งจะขึ้นกับทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้า สำหรับวัสดุที่อยู่ในระบบผลึกเฮกซะโกนอล ไตรโกนอล และ เตตระโกนอล จะมีหน่วยเซลล์ที่มีสมมาตรรอบแกนหนึ่งเรียกว่า แกนแสง (optical axis) และถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของผลึกแกนเดี่ยว (uniaxial crystal) เช่น แคลไซต์ ดังรูปที่ 2.5 (ก) ซึ่งโครงผลึกของแคลไซต์เป็นแบบพีระมิดฐานสามเหลี่ยม ดัชนีหักเหของแสงที่มีสนามไฟฟ้าสั่นในแนวขนานกับแกนแสงจะมีค่าต่ำกว่าของดัชนีหักเหของแสงที่มีสนามไฟฟ้าสั่นในแนวตั้งฉากกับแกนแสงของวัสดุ ($n_{\parallel} = 1.4864$ และ $n_{\perp} = 1.6584$)

แสงที่เดินทางในแนว “ฐาน-ยอด” ของพีระมิด ซึ่งเป็นแนวเดียวกับแกนแสง ตามรูปที่ 2.5 (ข) จะมีสนามไฟฟ้าที่สั่นในแนวตั้งฉากกับแกนแสงอยู่เสมอ ส่วนแสงที่เดินทางในทิศตั้งฉากกับแกนแสงสามารถพิจารณาได้เป็นสองรังสีที่มีทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกัน โดยรังสีที่มีสนามไฟฟ้าสั่นตั้งฉากกับแกนแสงจะมีการหักเหผ่านผิวรอยต่อระหว่างตัวกลางเป็นไปตามกฎของสเนลล์ เรียกว่า รังสีแสงปรกติ (ordinary ray : o-ray) ซึ่งจะแทนทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าด้วยลูกศรสีแดง และรังสีที่เดินทางในทิศใดก็ตามที่มีการสั่นของสนามไฟฟ้าขนานกับแกนแสงจะมีการหักเหที่ไม่เป็นไปตามกฎของสเนลล์ เรียกว่า รังสีแสงเกินปรกติ (extraordinary ray: e-ray) ซึ่งจะแทนทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าด้วยลูกศรสีน้ำเงิน ส่วนลูกศรสีดำแทนทิศการเคลื่อนที่ของแสง



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.5 (ก) โครงผลึกของแคลไซต์ซึ่งมีระบบผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล (ข) แสงไมโพลาริซ์ผ่านแคลไซต์ในทิศทางเดียวกับแกนแสง และตั้งฉากกับแกนแสง [10]

วัสดุแอนไอโซทรอปิกอีกกลุ่มหนึ่งที่มีระบบผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก โมโนคลินิก และไตรคลินิก เป็นพวกที่มีดัชนีหักเหแสงแตกต่างกันในทั้งสามทิศทาง เรียกว่ากลุ่มผลึกแกนคู่ (Biaxial crystal) เนื่องจากมีแกนแสง 2 แนว แยกจากกัน แสงที่เดินทางในแนวแกนทั้งคู่ จะมีค่าดัชนีหักเหของแสงคงตัวไม่ขึ้นอยู่กับทิศของระนาบการโพลาไรซ์ของแสงนั้น

ดังนั้นการนำวัสดุแอนไอโซทรอปิกไปวางกันแสง เมื่อแสงโพลาไรซ์ผ่านเข้าไปในวัสดุพวกนี้จะถูกแยกออกเป็น 2 รังสี ดังที่กล่าวมาข้างต้น คือ o-ray และ e-ray ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วแตกต่างกัน และอัตราเร็วแปรผกผันกับดัชนีหักเหของแสง ดังนั้นรังสีที่เคลื่อนที่เร็วหรือเรียกว่า รังสีเร็ว (fast-ray) จะมีดัชนีหักเหของแสงน้อยกว่ารังสีที่เคลื่อนที่ช้าหรือเรียกว่า รังสีช้า (slow-ray) ผลต่างดัชนีหักเหของแสงระหว่างทั้งสองรังสีนิยามเป็น ค่าไบรีฟรินเจนซ์ (birefringence) ดังสมการที่ 2.1 [9]

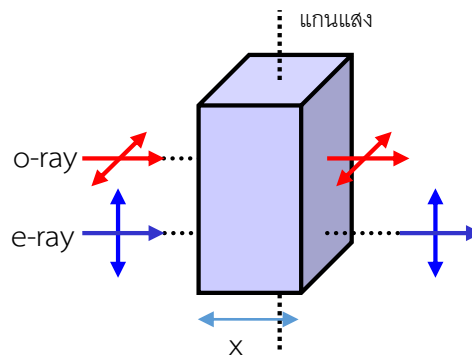
$$B = n_e - n_o \quad (2.1)$$

B คือ ค่าไบรีฟรินเจนซ์ของวัสดุ

n_e คือ ค่าดัชนีหักเหของรังสีแสงเกินปกติ

n_o คือ ค่าดัชนีหักเหของรังสีแสงปกติ

ในกรณีของสารแอมโมเนียมไนเตรท และสารโพแทสเซียมไนเตรทซึ่งมีค่าไบรีฟรินเจนซ์เป็นค่าลบนั้น e-ray จะเป็นรังสีเร็วที่มีดัชนีหักเหของแสงน้อย ส่วน o-ray จะเป็นรังสีช้าที่มีดัชนีหักเหของแสงมากกว่า



รูปที่ 2.6 แสงเดินทางผ่านวัสดุแอนไอโซทรอปิกในทิศตั้งฉากกับแกนแสง

พิจารณาแสงเดินทางผ่านวัสดุแอนไอโซทรอปิกในทิศตั้งฉากกับแกนแสงดังรูปที่ 2.6 เป็นกรณีที่ต้องประกอบในแนวขนาน (รังสีเร็ว) หรือ e-ray เคลื่อนที่ได้เร็วกว่าในแนวตั้งฉาก (รังสีช้า) หรือ o-ray ถ้ากำหนดให้ระยะเวลาที่ทั้ง o-ray และ e-ray ใช้ในการเดินทางภายในผลึกเป็น t_o และ t_e ตามลำดับ ผลต่างระยะทางเชิงแสง (optical path difference, retardation) ซึ่งนิยามมาจากผลต่างของระยะทางเชิงแสงที่รังสีทั้งสองเคลื่อนที่ในสุญญากาศภายในเวลาเดียวกันคือ t_o และ t_e ดังกล่าว จะเป็นไปตามสมการที่ 2.2 [10]

$$r = ct_e - ct_o \quad (2.2)$$

เมื่อ r คือ ผลต่างระยะทางเชิงแสงระหว่าง o-ray และ e-ray

c คือ อัตราเร็วแสงในสุญญากาศ

อัตราเร็วของทั้งสองรังสีที่เคลื่อนที่ภายในวัสดุแอนไอโซทรอปิกเป็นไปตามสมการที่ 2.3

$$v_e = \frac{x}{t_e} \quad \text{และ} \quad v_o = \frac{x}{t_o} \quad (2.3)$$

เมื่อ v_e คือ อัตราเร็วของ e-ray ที่เคลื่อนที่ภายในวัสดุแอนไอโซทรอปิก

v_o คือ อัตราเร็วของ o-ray ที่เคลื่อนที่ภายในวัสดุแอนไอโซทรอปิก

x คือ ความหนาของวัสดุแอนไอโซทรอปิก

แทนค่า t_e และ t_o จากสมการ 2.3 ลงในสมการ 2.2 จะได้ค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงดังนี้

$$r = c \left(\frac{x}{v_e} \right) - c \left(\frac{x}{v_o} \right) \quad (2.4)$$

จากสมการที่ 2.4 จะเห็นว่าอัตราส่วนระหว่าง อัตราเร็วแสงในสุญญากาศและอัตราเร็วแสงในตัวกลาง คือ ค่าดัชนีหักเหของแสงในตัวกลาง นั่นคือ

$$n_e = \frac{c}{v_e} \quad \text{และ} \quad n_o = \frac{c}{v_o} \quad (2.5)$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าดัชนีหักเหของแสงจากสมการที่ 2.5 ลงในสมการที่ 2.4 จะได้ผลต่างระยะทางเชิงแสงดังสมการที่ 2.6

$$r = n_e x - n_o x = (n_e - n_o)x \quad (2.6)$$

ซึ่ง $(n_e - n_o)$ คือ ค่าไบรีฟรินเจนซ์ ตามสมการที่ 2.1 ดังนั้นผลต่างระยะทางเชิงแสงที่ได้คือ

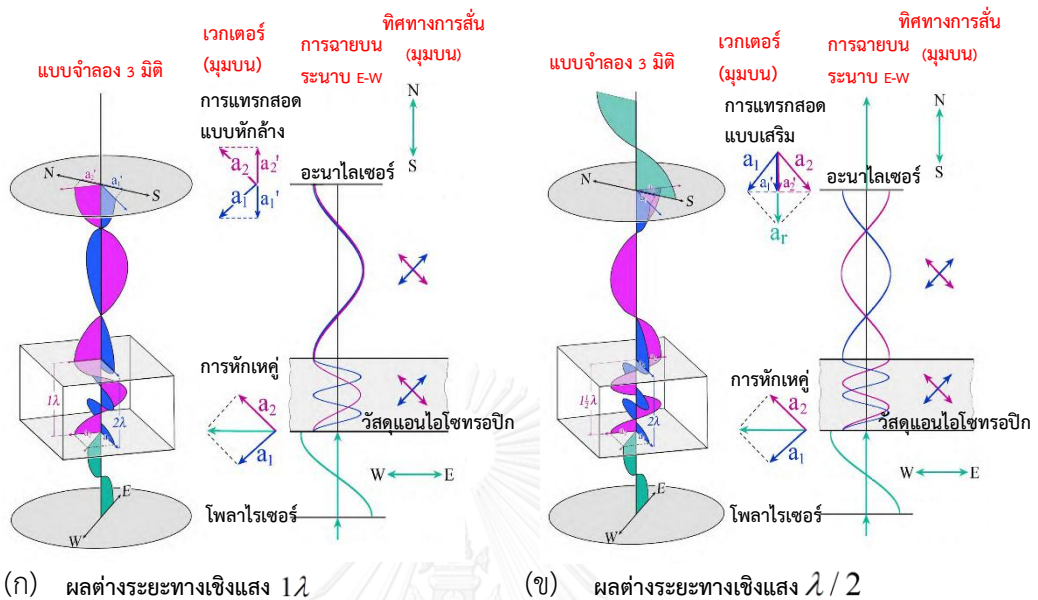
$$r = Bx \quad (2.7)$$

จะเห็นได้ว่าผลต่างระยะทางเชิงแสงตามสมการที่ 2.7 ขึ้นกับความหนาของวัสดุแอนไอโซทรอปิกเมื่อค่าไบรีฟรินเจนซ์ของวัสดุแอนไอโซทรอปิกคงที่

การนำวัสดุแอนไอโซทรอปิกมาศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์โดยมีแกนยอมผ่านของแสงของโพลาไรเซอร์และอะนาไลเซอร์อยู่ในลักษณะตั้งฉากกัน เรียกว่า โพลาไรเซอร์ขวางฉาก (crossed-polarizers) การหมุนวัสดุใต้กล้องนี้จะพบการเปลี่ยนแปลงของความสว่าง กล่าวคือภาพโพลาไรซ์ของวัสดุจะปรากฏมืดสลับสว่าง เมื่อหมุนวัสดุครบ 360° ภาพโพลาไรซ์จะปรากฏมืดจำนวน 4 ครั้ง และสว่างจำนวน 4 ครั้ง ตำแหน่งที่ภาพโพลาไรซ์มืดนี้เรียกว่า ตำแหน่งสลัวแสง (extinction position) เหตุการณ์นี้เกิดขึ้นจากการที่แสงโพลาไรซ์ที่ผ่านโพลาไรเซอร์เคลื่อนที่ผ่านเข้าออกวัสดุแอนไอโซทรอปิก โดยมีทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าอยู่ในแนวเดียวกับแกนยอมผ่านของแสงของโพลาไรเซอร์ เมื่อแสงที่สั่นในทิศทางดังกล่าวนี้เคลื่อนที่ไปยังอะนาไลเซอร์ที่มีแกนยอมผ่านของแสงตั้งฉากกับทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้านี้ ทำให้ไม่สามารถลอดผ่านอะนาไลเซอร์ไปได้ ภาพโพลาไรซ์ที่ปรากฏจึงมืด ในขณะที่ภาพโพลาไรซ์ที่ปรากฏสว่างนั้นจะมีความเข้มของแสงมากที่สุด ภาพในตำแหน่งนี้เรียกว่า ตำแหน่งทแยงมุม (diagonal position) ซึ่งจะอยู่ในตำแหน่ง 45° จากตำแหน่งสลัวแสง

เมื่อแสงโพลาไรซ์จากโพลาไรเซอร์มีทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าในทิศตะวันออก-ตะวันตก (E-W) เดินทางผ่านเข้าไปในวัสดุแอนไอโซทรอปิกที่อยู่ในตำแหน่งทแยงมุมนั้น แสงโพลาไรซ์จะแยกออกเป็นสองรังสีที่มีทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกันและอัตราเร็วต่างกัน ผลต่างระยะทางเชิงแสงเกิดขึ้นในขณะที่ทั้งสองรังสีเดินทางขึ้นไปถึงด้านบนของวัสดุแอนไอโซทรอปิก จากนั้นทั้งสองรังสีเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากันออกจากวัสดุไปยังอะนาไลเซอร์โดยแอมพลิจูดของทั้งสองรังสี คือ a_1 และ a_2 ซึ่งมีขนาดเท่ากัน ตามรูปที่ 2.7 การแทรกสอดของทั้งสองรังสีตามแนวแกนยอมผ่านของแสงของอะนาไลเซอร์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การแทรกสอดแบบหักล้าง (destructive interference) และการแทรกสอดแบบเสริม (constructive interference) ในส่วนการแทรกสอดแบบหักล้างเกิดขึ้นเมื่อ ผลต่างระยะทางเชิงแสงระหว่างรังสีทั้งสองที่เคลื่อนที่ภายในวัสดุแอนไอโซทรอปิกมีค่าเป็น 0 หรือจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่น ($r = n\lambda$ เมื่อ $n = 0, 1, 2, \dots$) เมื่อรังสีทั้งสองเคลื่อนที่ออกจากวัสดุไปยังอะนาไลเซอร์ที่มีแกนยอมผ่านของแสงในทิศเหนือ-ใต้ (N-S) องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าของทั้งสองรังสีจะอยู่ในทิศตรงกันข้ามโดยมีแอมพลิจูด a_2' และ a_1' จึงทำให้ทั้งสององค์ประกอบของสนามไฟฟ้าตามแนวแกนยอมผ่านของแสงของอะนาไลเซอร์ของทั้งสองรังสีเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน จึงไม่มีแสงที่ลอดผ่านอะนาไลเซอร์ไปได้ตามรูปที่ 2.7 (ก) เนื่องจากแสงจากแหล่งกำเนิดแสงของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์เป็นแสงขาวซึ่งประกอบด้วยสเปกตรัมของแสงสีเดียว (monochrome) มารวมกันกลายเป็นแสงขาว ที่ตำแหน่งทแยงมุมนี้จะปรากฏทั้งการแทรก

สอดแบบเสริมกันและหักล้างกันตามแนวแกนยอมผ่านของแสงของอะนาไลเซอร์สำหรับแสงแต่ละสี แสงสีใดที่สามารถแทรกสอดแบบเสริมกันแล้วลอดผ่านอะนาไลเซอร์ขึ้นไปได้ จะเกิดการรวมกันเป็นสี การแทรกสอดที่ปรากฏจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์



รูปที่ 2.7 แสงโพลาไรซ์ที่เดินทางผ่านวัสดุแอนไอโซทรอปิกที่อยู่ในตำแหน่งทแยงมุมสำหรับแสงสีเดียว (ก) การแทรกสอดแบบหักล้าง มีผลต่างระยะทางเชิงแสงคือ 1λ และ (ข) การแทรกสอดแบบเสริม มีผลต่างระยะทางเชิงแสงคือ $\lambda/2$ [10]

ในส่วนของการแทรกสอดแบบเสริมตามแนวแกนยอมผ่านของแสงของอะนาไลเซอร์นั้น เกิดขึ้นเมื่อผลต่างระยะทางเชิงแสงระหว่างรังสีทั้งสองที่เคลื่อนที่ภายในวัสดุแอนไอโซทรอปิกมีค่าเป็นจำนวนเต็มคือเท่าของครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($r = (2n + 1)\lambda/2$ เมื่อ $n = 0, 1, 2, \dots$) [9] ดังรูปที่ 2.7 (ข) เมื่อรังสีทั้งสองเคลื่อนที่ออกจากวัสดุไปยังอะนาไลเซอร์ที่มีแกนยอมผ่านของแสงในทิศเหนือ-ใต้ (N-S) จะมีรังสีหนึ่งเปลี่ยนเฟสไป 180° ทำให้องค์ประกอบของสนามไฟฟ้ารวมของทั้งสองรังสีอยู่ในทิศเดียวกันคือทิศใต้ โดยมีแอมพลิจูดรวมเพิ่มขึ้นเป็น a_r ทำให้ทั้งสองรังสีเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน และมีแสงลอดผ่านอะนาไลเซอร์ไปด้วยความเข้มสูงที่สุดปรากฏภาพโพลาไรซ์ที่มีสีของการแทรกสอดอย่างหลากหลาย

จากผลต่างระยะทางเชิงแสงของทั้งสองรังสีที่ให้ความเข้มสูงที่สุด ซึ่งสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของแสง และค่าไบรีฟรินเจนซ์ตามสมการที่ 2.1 ดังนั้นจะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างระยะทางเชิงแสง ค่าไบรีฟรินเจนซ์ และความยาวคลื่นของแสง ดังสมการที่ 2.8

$$r = Bx = (n + 0.5)\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 0, 1, 2, \dots \tag{2.8}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและผลต่างระยะทางเชิงแสงในแต่ละอันดับ ($n = 0, 1, 2, \dots$)

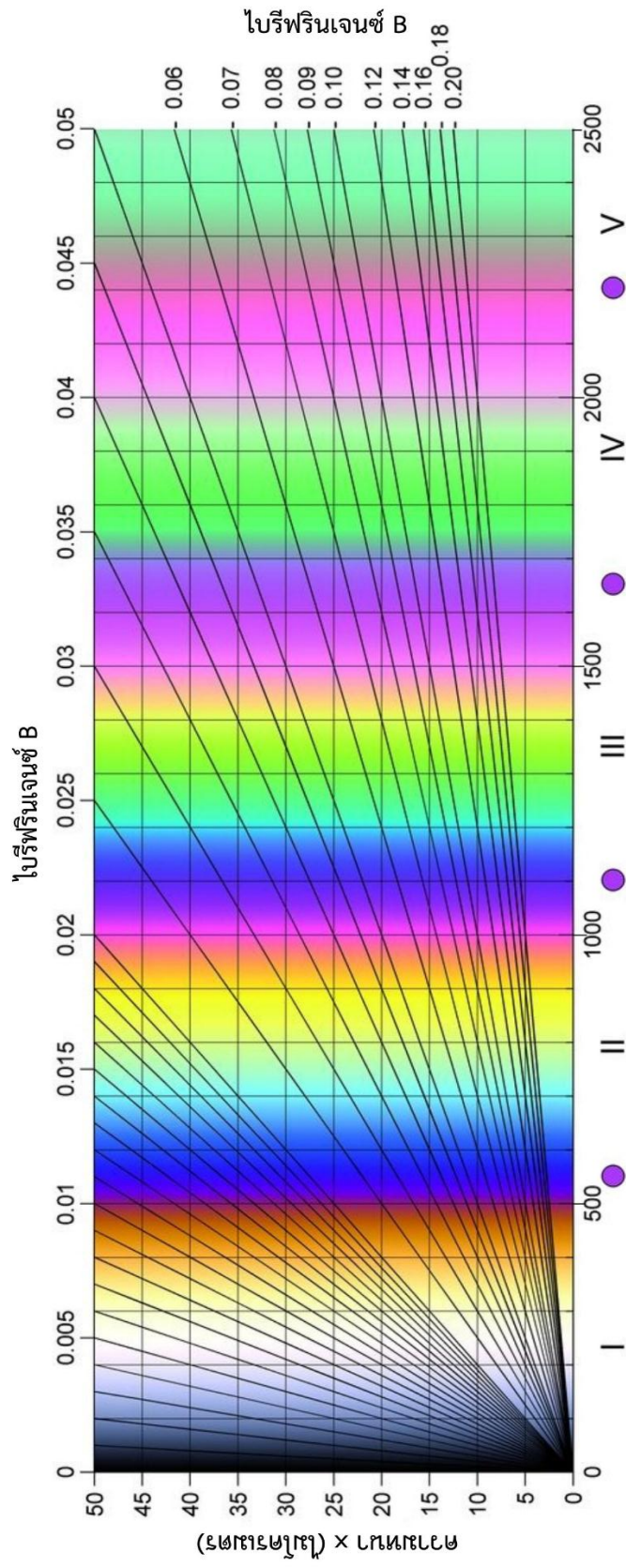
แสดงได้ดังตารางที่ 2.1 และแผนภาพของมิเชล-เลวี (Michel-Levy chart) ดังรูปที่ 2.8

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับผลต่างระยะทางเชิงแสงในอันดับ 1 ถึง 4 [5]

| สี | ความยาวคลื่น λ (นาโนเมตร) | ผลต่างระยะทางเชิงแสง r (นาโนเมตร) | | | |
|---------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | อันดับ1 ($n=0$) | อันดับ2 ($n=1$) | อันดับ3 ($n=2$) | อันดับ4 ($n=3$) |
| ม่วง | 380 – 450 | 190 – 225 | 570 – 675 | 950 – 1125 | 1330 – 1575 |
| น้ำเงิน | 450 – 495 | 225 – 248 | 675 – 743 | 1125 – 1238 | 1575 – 1733 |
| เขียว | 495 – 570 | 248 – 285 | 743– 855 | 1238 – 1425 | 1733 – 1995 |
| เหลือง | 570 – 590 | 285 – 295 | 855 – 885 | 1425 – 1475 | 1995 – 2065 |
| ส้ม | 590 – 620 | 295 – 310 | 885 – 930 | 1475 – 1550 | 2065 – 2170 |
| แดง | 620 – 750 | 310 – 375 | 930 – 1125 | 1550 – 1875 | 2170 – 2623 |

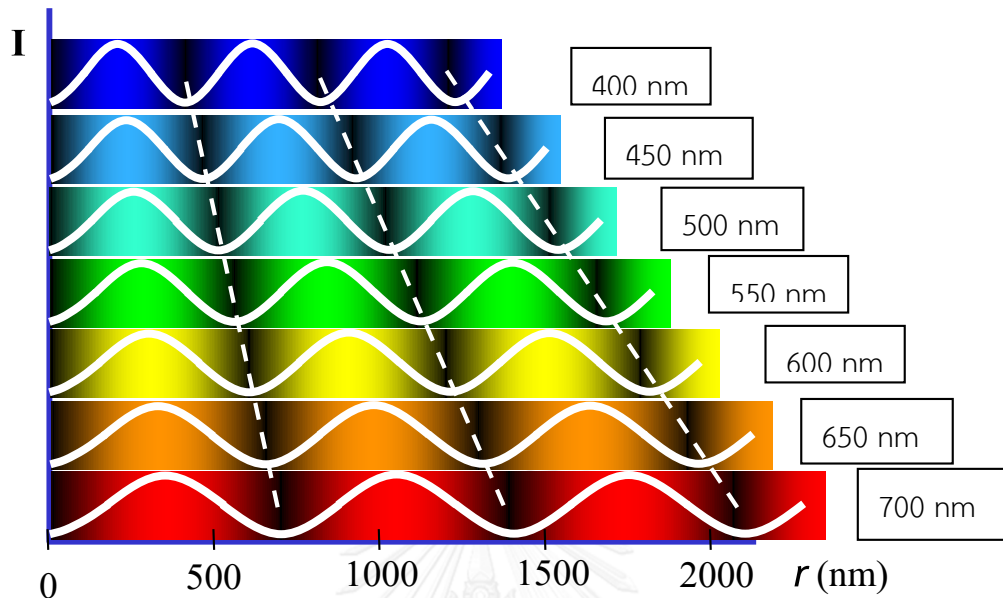
ในแสงขาวซึ่งมีสเปกตรัมต่อเนื่อง วัสดุแอนไอโซโทรปิกที่มีความหน่วงค่าหนึ่งจะตอบสนองต่อองค์ประกอบของแสงสีอย่างแตกต่างกันเรียงลำดับตามค่าความยาวคลื่นแสง ที่ตำแหน่งค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงตำแหน่งหนึ่งอาจมีบางสีที่เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างจนมืดสนิท ในขณะที่บางสีอาจเกิดการแทรกสอดแบบเสริมทำให้มีความสว่างมากที่สุด เช่นที่ค่าผลต่างระยะทางเชิงแสง 500 นาโนเมตร แสงสีน้ำเงินที่มีความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร จะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง ส่วนแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงการตอบสนองเชิงความเข้มของแสงสีต่าง ๆ ที่ตำแหน่งค่าความหน่วงใด ๆ เส้นประในภาพเป็นการแสดงถึงแนวที่เป็นการแทรกสอดแบบหักล้าง

แผนภาพของมิเชล-เลวี



ผลต่างระยะทางเชิงแสง r (นาโนเมตร) และ อันดับสีจาก 1 ถึง 5 แบ่งโดยจุดสีม่วง

รูปที่ 2.8 แผนภาพของมิเชล-เลวี [5]



รูปที่ 2.9 ความยาวคลื่นของแสงสีต่าง ๆ ที่ตำแหน่งค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงใด ๆ [10]

ดังนั้นสีของภาพที่ปรากฏใต้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์เมื่อใช้แสงขาวส่องวัสดุที่มีค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงค่าหนึ่ง เป็นผลรวมเชิงแสงของสีต่าง ๆ ตามแนวคิดในรูปที่ 2.9 ด้วยสัดส่วนความเข้มที่แตกต่างกัน กลายเป็นแผนภาพของมิเชล-เลวีที่แสดงสีจากผลรวมเชิงแสงที่ตำแหน่งค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงค่าหนึ่ง เช่น ในช่วงค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงน้อย ๆ 0 ถึง 200 นาโนเมตร จะเป็นช่วงที่มีตของแสงทุกสี (เกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง) จึงได้ผลรวมเป็นบริเวณมืดในแผนภาพ บริเวณถัดไปในช่วงค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงประมาณ 250 นาโนเมตร จะมีสีทุกสีรวมกันเป็นบริเวณสว่าง หรือ สีขาวในอันดับที่ 1 (เกิดการแทรกสอดแบบเสริม) ในช่วงค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงประมาณ 400 ถึง 500 นาโนเมตร สีน้ำเงินและสีเขียวจะมีตลง ผลรวมของสีจึงแสดงผลเป็นสีแดงส้ม ในทางกลับกันที่ค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงประมาณ 600 ถึง 650 นาโนเมตร สีเหลืองและสีแดงจะมีตลง ผลรวมของสีจึงออกเป็นสีน้ำเงินและสีฟ้า หากค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงมากขึ้นจะทำให้ความหลากหลายของสีที่รวมกันเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน สีสุทธิจะดูจางลงและครอบคลุมในช่วงกว้างขึ้น บนแผนภาพจะมีการจัดแบ่งเป็นอันดับ (order) จากน้อยไปมาก โดยใช้จุดสีม่วงเป็นจุดแบ่ง หรือ แบ่งเป็นช่วง ๆ ละ 551 นาโนเมตร เช่น อันดับที่ 2 จะอยู่ในช่วงผลต่างระยะทางเชิงแสง 551 ถึง 1102 นาโนเมตร และมีสีเริ่มตั้งแต่ แดง - น้ำเงิน - เขียว - เหลือง - ส้ม และสีแดง

แผนภาพของมิเชล-เลวี นอกจากการแสดงให้เห็นจากการแทรกสอดแล้วยังมีแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความหนาของวัสดุและค่าผลต่างระยะทางเชิงแสง จากสมการที่ 2.8 เราทราบว่าผลต่างระยะทางเชิงแสงเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความหนา โดยมีค่าคงที่ของการแปรผันเป็นค่าไบรฟรินเจนซ์ ดังนั้น ความชันของกราฟเส้นตรงในแผนภาพนี้จึงเป็นค่าส่วนกลับของค่าไบรฟรินเจนซ์ อย่างไรก็ตามความชันของกราฟแต่ละเส้นจะมีค่าไบรฟรินเจนซ์ระบุไว้ด้วยเพื่อความสะดวกในการใช้งาน ถ้าเราทราบค่าไบรฟรินเจนซ์ของวัสดุ เราสามารถใช้แผนภาพของมิเชล-เลวีประมาณค่าความหนาของวัสดุได้

จากสมการที่ 2.7 คือ $r = Bx$ ซึ่งผลต่างระยะทางเชิงแสงจะขึ้นอยู่กับความหนาและค่าไบรฟรินเจนซ์ของวัสดุ สำหรับงานวิจัยนี้สารเคมีที่ศึกษาคือ แอมโมเนียมไนเตรท และโพแทสเซียมไนเตรท เมื่อค่าไบรฟรินเจนซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทคือ 0.224 และโพแทสเซียมไนเตรทคือ 0.171 ดังนั้นจากตารางที่ 2.1 เมื่อเราคำนวณค่าความหนาจากค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงที่ได้จากแผนภาพของมิเชล-เลวี และค่าไบรฟรินเจนซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทซึ่งเป็นค่าคงตัว จะได้ผลดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของแสง ผลต่างระยะทางเชิงแสง และความหนาในอันดับ 1 ถึง 4 ของแอมโมเนียมไนเตรทที่มีค่าไบรฟรินเจนซ์ 0.224

| สี | ความยาวคลื่นของแสง $\lambda (nm)$ | อันดับ 1 | | อันดับ 2 | | อันดับ 3 | | อันดับ 4 | |
|--------|--------------------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|
| | | ผลต่างระยะทางเชิงแสง $r (nm)$ | ความหนา $x (\mu m)$ | ผลต่างระยะทางเชิงแสง $r (nm)$ | ความหนา $x (\mu m)$ | ผลต่างระยะทางเชิงแสง $r (nm)$ | ความหนา $x (\mu m)$ | ผลต่างระยะทางเชิงแสง $r (nm)$ | ความหนา $x (\mu m)$ |
| ม่วง | 380-450 | 190-225 | 0.85-1.00 | 570-675 | 2.54-3.01 | 950-1125 | 4.24-5.02 | 1330-1575 | 5.94-7.03 |
| ฟ้า | 450-495 | 225-248 | 1.00-1.11 | 675-743 | 3.01-3.31 | 1125-1238 | 5.02-5.52 | 1575-1733 | 7.03-7.73 |
| เขียว | 495-570 | 248-285 | 1.11-1.27 | 743-855 | 3.31-3.82 | 1238-1425 | 5.52-6.36 | 1733-1995 | 7.73-8.91 |
| เหลือง | 570-590 | 285-295 | 1.27-1.32 | 855-885 | 3.82-3.95 | 1425-1475 | 6.36-6.58 | 1995-2065 | 8.91-9.22 |
| ส้ม | 590-620 | 295-310 | 1.32-1.38 | 885-930 | 3.95-4.15 | 1475-1550 | 6.58-6.92 | 2065-2170 | 9.22-9.69 |
| แดง | 620-750 | 310-375 | 1.38-1.67 | 930-1125 | 4.15-5.02 | 1550-1875 | 6.92-8.37 | 2170-2625 | 9.69-11.70 |

จากตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าสีที่เกิดขึ้นที่ผลต่างระยะทางเชิงแสงหนึ่งขึ้นกับความหนา เช่น พิจารณาผลต่างระยะทางเชิงแสงในอันดับ 1 ของสีม่วงที่ 190-255 นาโนเมตร และสีฟ้าที่ 225-248 นาโนเมตร จะมีความหนาอยู่ในช่วงประมาณ 0.85-1.00 ไมโครเมตร เมื่อผลต่างระยะทางเชิงแสงเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 450-495 นาโนเมตร พบว่าความหนาเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 1.00-1.11 ไมโครเมตร

สำหรับการคำนวณค่าความหนาจากผลต่างระยะทางเชิงแสงและค่าไบรีฟรินเจนซ์ของโพแทสเซียมไนเตรทที่มีค่าไบรีฟรินเจนซ์ 0.171 จะได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของแสง ผลต่างระยะทางเชิงแสง และความหนาในอันดับ 1 ถึง 4 ของโพแทสเซียมไนเตรทที่มีค่าไบรีฟรินเจนซ์ 0.171

| สี | ความยาวคลื่นของแสง $\lambda(nm)$ | อันดับ 1 | | อันดับ 2 | | อันดับ 3 | | อันดับ 4 | |
|--------|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| | | ผลต่างระยะทางเชิงแสง $\lambda(nm)$ | ความหนา $x(\mu m)$ | ผลต่างระยะทางเชิงแสง $\lambda(nm)$ | ความหนา $x(\mu m)$ | ผลต่างระยะทางเชิงแสง $\lambda(nm)$ | ความหนา $x(\mu m)$ | ผลต่างระยะทางเชิงแสง $\lambda(nm)$ | ความหนา $x(\mu m)$ |
| ม่วง | 380-450 | 190-225 | 1.11-1.32 | 570-675 | 3.33-3.95 | 950-1125 | 5.56-6.58 | 1330-1575 | 7.78-9.21 |
| ฟ้า | 450-495 | 225-248 | 1.32-1.45 | 675-743 | 3.95-4.34 | 1125-1238 | 6.58-7.24 | 1575-1733 | 9.21-10.10 |
| เขียว | 495-570 | 248-285 | 1.45-1.67 | 743-855 | 4.34-5.00 | 1238-1425 | 7.24-8.33 | 1733-1995 | 10.10-11.70 |
| เหลือง | 570-590 | 285-295 | 1.67-1.73 | 855-885 | 5.00-5.18 | 1425-1475 | 8.33-8.63 | 1995-2065 | 11.70-12.10 |
| ส้ม | 590-620 | 295-310 | 1.73-1.81 | 885-930 | 5.18-5.44 | 1475-1550 | 8.63-9.06 | 2065-2170 | 12.10-12.70 |
| แดง | 620-750 | 310-375 | 1.81-2.19 | 930-1125 | 5.44-6.58 | 1550-1875 | 9.06-11.00 | 2170-2625 | 12.70-15.35 |

จากตารางที่ 2.2 และ 2.3 จะเห็นได้ว่าความหนาของโพแทสเซียมไนเตรทที่คำนวณได้ที่ค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงเดียวกันกับแอมโมเนียมไนเตรท มีค่ามากกว่าความหนาที่คำนวณได้จากแอมโมเนียมไนเตรท เช่น สีม่วง อันดับ 1 มีผลต่างระยะทางเชิงแสง 380-450 นาโนเมตร ความหนาของแอมโมเนียมไนเตรทที่คำนวณได้มีค่า 0.85-1.00 ไมโครเมตร ในขณะที่ความหนาของโพแทสเซียมไนเตรทคำนวณได้มากกว่าคือ 1.11-1.32 ไมโครเมตร ที่ผลต่างระยะทางเชิงแสงเดียวกัน ความหนาของโพแทสเซียมไนเตรทที่คำนวณได้มากกว่านี้เป็นผลมาจากค่าไบรีฟรินเจนซ์ที่มีค่าน้อยกว่าค่าไบรีฟรินเจนซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทนั่นเอง

ภาพโพลาไรซ์ (polarized image) ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์จะแสดงเป็นสีต่าง ๆ อย่างหลากหลายซึ่งสีที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าสีของการแทรกสอด (interference colors) ซึ่งสีของการแทรกสอดที่เกิดขึ้นสามารถใช้อธิบายสมบัติเชิงแสงของผลึก โดยสีที่เรามองเห็นขึ้นกับค่าไบรีฟรินเจนซ์ และความหนาของตัวอย่าง วัสดุที่มีความเป็นระเบียบ (order materials) เช่น วัสดุที่มีระบบผลึกแบบลูกบาศก์ (cubic crystals) หรือวัสดุไอโซทรอปิก เมื่อแสงโพลาไรซ์ผ่านเข้าไปภายในผลึกจะไม่มีอาการแยกเป็นสองรังสี มีเพียงรังสีแสงปกติที่มีการสั่นของสนามไฟฟ้าในทิศทางเดียว และมีดัชนีหักเหของแสงเพียงค่าเดียว วัสดุเหล่านี้จะไม่แสดงสีของการแทรกสอด ดังนั้นสามารถใช้สีของการแทรกสอดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ในการแยกชนิดของวัสดุที่ศึกษาว่าเป็นวัสดุแบบใด

2.4 ตัวหน่วง (retarder)

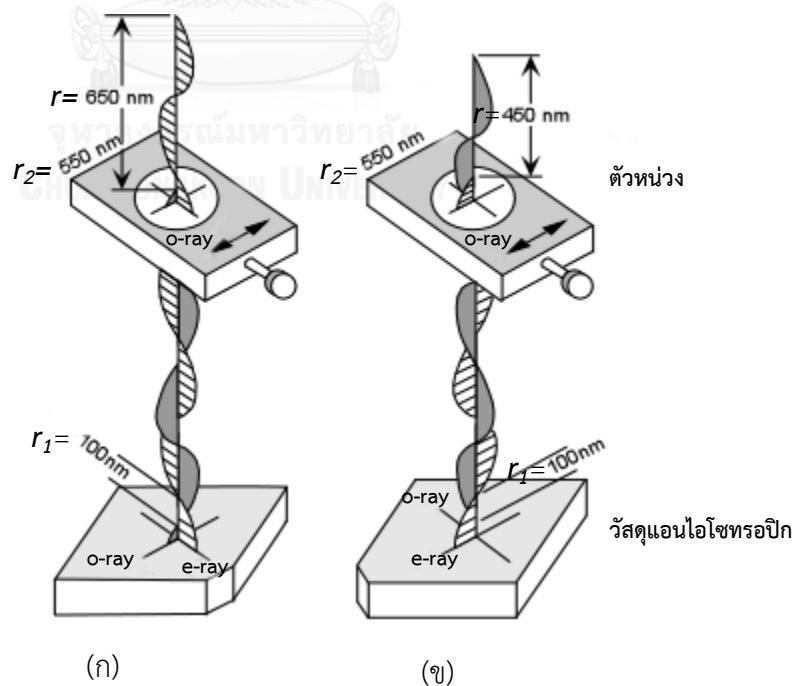
ตัวหน่วงเป็นอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้สำหรับศึกษาสมบัติเชิงแสงของวัสดุที่มีสมบัติหักเหซ้อน (double refraction) เช่น ใช้ในการเปลี่ยนหรือหาค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงในวัสดุ ตัวหน่วงจะทำหน้าที่เพิ่มหรือลดค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงระหว่าง o-ray และ e-ray เป็นผลให้สีของการแทรกสอดเปลี่ยนไป ในกรณีที่วัสดุแอนไอโซทรอปิกมีค่าไบรีฟรินเจนซ์เป็นค่าลบนั้น o-ray จะเป็นรังสีที่เคลื่อนที่ช้าเรียกว่า รังสีช้า (slow-ray) มีค่าดัชนีหักเหของแสงมาก และ e-ray จะเป็นรังสีที่เคลื่อนที่เร็วเรียกว่า รังสีเร็ว (fast-ray) มีค่าดัชนีหักเหของแสงน้อย เมื่อพิจารณาแสงที่เดินทางผ่านวัสดุแอนไอโซทรอปิก และตัวหน่วง ถ้าทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าของ o-ray ของทั้งวัสดุแอนไอโซทรอปิก และตัวหน่วงอยู่ในทิศเดียวกัน ทำให้ o-ray ที่เป็นรังสีช้าอยู่แล้วนั้นเคลื่อนที่ช้าลงอีก ทำให้ผลต่างระยะทางเชิงแสงระหว่าง o-ray และ e-ray เพิ่มมากขึ้น เหตุการณ์แบบนี้เรียกว่าการบวก (addition) [9, 10] ตามรูปที่ 2.10 (ก) ดังนั้นสีของการแทรกสอดตามแผนภาพของมิเชล-เลวีจะเลื่อนไปอยู่ในอันดับที่สูงขึ้น ผลต่างระยะทางเชิงแสงเพิ่มขึ้นนั้นเป็นไปตามสมการที่ 2.10

$$r = r_1 + r_2 \quad (2.9)$$

เมื่อ r คือผลต่างระยะทางเชิงแสงที่ปรากฏ

r_1 คือผลต่างระยะทางเชิงแสงของวัสดุแอนไอโซทรอปิก

r_2 คือผลต่างระยะทางเชิงแสงของตัวหน่วง



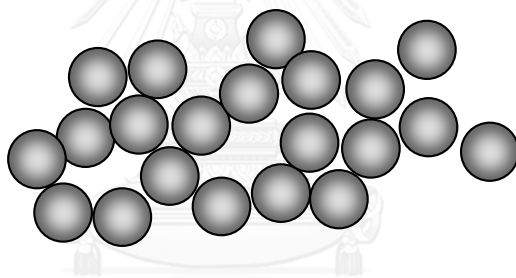
รูปที่ 2.10 แสงที่เดินทางผ่านวัสดุแอนไอโซทรอปิกและตัวหน่วง (ก) ผลต่างระยะทางเชิงแสงเพิ่มขึ้นเป็นการบวก และ (ข) ผลต่างระยะทางเชิงแสงลดลงเป็นการลบ [11]

ในทางกลับกันถ้าทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าของ o-ray ของตัวหน่วง ไม่อยู่ในทิศเดียวกันกับ o-ray ของวัสดุแอนไอโซทรอปิก แต่อยู่ในทิศเดียวกันกับทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าของ e-ray ของวัสดุแอนไอโซทรอปิก ทำให้ e-ray ของวัสดุแอนไอโซทรอปิกที่เป็นรังสีเร็วถูกลดความเร็วลงโดย o-ray ของตัวหน่วงที่เป็นรังสีช้า เป็นผลให้ผลต่างระยะทางเชิงแสงระหว่าง o-ray และ e-ray ลดลง เหตุการณ์แบบนี้เรียกว่าการลบ (subtraction) ดังรูปที่ 2.9 (ข) [8, 10] ดังนั้นสีของการแทรกสอดตามแผนภาพของมิเชล-เลวี จะเลื่อนไปอยู่ในอันดับที่ต่ำลงตามสมการที่ 2.10

$$r = r_1 - r_2 \quad (2.10)$$

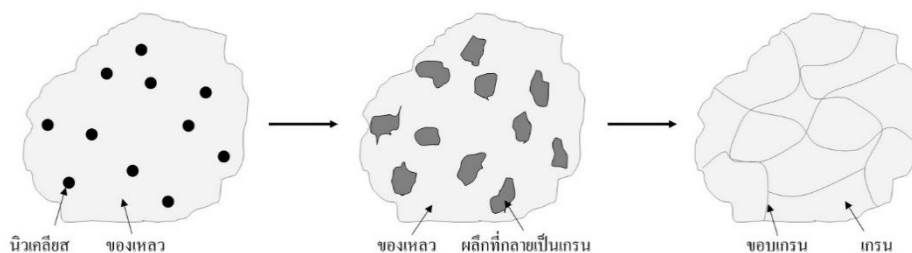
2.5 การเกิดผลึกของแข็ง (crystallization)

ถ้านำของแข็งมาหลอมแล้วปล่อยให้เย็นตัว ในขณะที่ของแข็งอยู่ในสภาวะหลอมเหลวนั้น จะเกิดการแยกจากกันของอะตอมแบบสุ่ม (random) ตามรูปที่ 2.11 และเกิดได้ตลอดเวลา เนื่องจากมีพลังงานกระตุ้นสูงจากอุณหภูมิที่สูง พลังงานของอะตอมจะมีอยู่ 2 ประเภท คือ พลังงานจลน์ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราเร็วที่อะตอมเคลื่อนที่ และแปรผันตรงกับอุณหภูมิ และพลังงานศักย์ซึ่งเป็นพลังงานที่สะสมอยู่ภายใน



รูปที่ 2.11 สภาวะหลอมเหลวของอะตอมที่มีการแยกจากกันของอะตอมแบบสุ่ม

เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของของแข็งนั้น ๆ ของแข็งที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลว จะเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง พลังงานจะต่ำลง อะตอมจะต้องคายความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (Latent heat of fusion) ออกมา เพื่อเกิดเป็นนิวเคลียส (Nucleus formation) ของของแข็ง หลังจากที่นิวเคลียสเกิดขึ้นมาแล้ว นิวเคลียสก็จะพยายามดึงอะตอมจากของเหลวเข้ามารวม เพื่อให้กลายเป็นผลึกขึ้นอย่างต่อเนื่องจนหยุดเกิดเมื่อไปชนกับผลึกอื่นที่มีทิศทางการจัดเรียงตัวอะตอมที่ต่างกัน ผลึกที่เกิดขึ้นจนหยุดเกิดนี้เรียกว่าเกรน (grain) บริเวณรอยต่อที่ผลึกชนกับผลึกอื่นจะเรียกว่าขอบเกรน (grain boundary) จากนั้นหลาย ๆ เกรนรวมกันเป็นของแข็ง [12] รูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การเกิดนิวเคลียสจนกระทั่งเป็นเกรน

ขนาดของเกรนจะเล็กหรือใหญ่ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว คือ ถ้าเย็นตัวแบบฉับพลัน เกรนที่ได้จะมีขนาดเล็กมาก แต่ถ้าเย็นตัวช้า ๆ เกรนที่ได้ก็มีขนาดใหญ่ บริเวณที่มีอัตราการเย็นตัวเร็วจะเกิดนิวเคลียสเป็นส่วนแรก ซึ่งจะเป็นบริเวณที่ถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม โดยสิ่งแวดล้อมต้องมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าด้วย บริเวณนี้จะเติบโตเป็นผลึกอย่างรวดเร็วได้ดีกว่าบริเวณอื่นจึงเกิดผลึกขนาดเล็กมากและสม่ำเสมอ ขณะที่ของแข็งกำลังแข็งตัวอยู่นั้น ผลึกจะคายความร้อนแฝงออกมาทำให้ของแข็งที่เหลือมีอัตราการเย็นตัวช้าลง เนื่องจากความสามารถในการถ่ายเทความร้อนในแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน อุณหภูมิภายในจึงแตกต่างกัน ทิศทางของการเกิดผลึกจึงตรงกันข้ามกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน [12]

2.6 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray diffraction, XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เป็นเครื่องมือที่สำคัญที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้าง และระบุชนิดของสารประกอบเคมี โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของชิ้นตัวอย่างที่มุมต่างกัน เนื่องจากในผลึกของชิ้นตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของเซลล์หน่วย (unit cell) ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ออกมาไม่เหมือนกัน เราจึงสามารถวิเคราะห์โครงสร้าง และระบุชนิดของสารประกอบต่าง ๆ ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบน หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์อาศัยกฎของแบร็ก (Bragg's law) คือเมื่อมีรังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่น λ มาตกกระทบระนาบของอะตอมแทนด้วย A, B, C, ... ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบบนชุดระนาบ (hkl) ดังรูปที่ 2.13 แต่ละระนาบขนานกันและอยู่ห่างกันเป็นระยะ d_{hkl} มีมุมตกกระทบเป็นมุม θ เราจะพบรังสีเอ็กซ์ซึ่งเลี้ยวเบนจากแนวรังสีตกกระทบ (โดยการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์วัดรังสีเอ็กซ์) ซึ่งลำรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนนี้จะเป็นลำรังสีที่ประกอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงจากอะตอมจำนวนมากแล้วมารวมกันแบบเสริมกัน ซึ่งผลต่างระยะทางของรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงจากอะตอมบนระนาบเดียวกันจะเท่ากับ 0 เช่น อะตอม H และ M ดังนั้นรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงจากอะตอมบนระนาบเดียวกันจะมีเฟสตรงกัน และรวมกันแบบเสริม กลายเป็นส่วนหนึ่งของรังสี

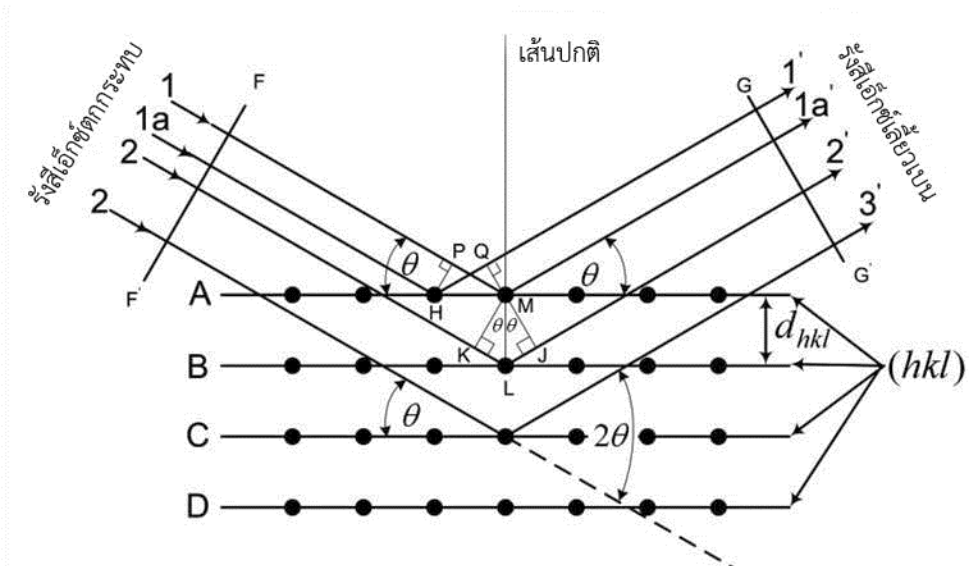
เอ็กซ์เรย์และผลต่างระยะทางของรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงจากอะตอมบนระนาบที่อยู่ติดกัน เช่น รังสีกระเจิงจากอะตอม M บนระนาบ A และจากอะตอม L บนระนาบ B จะมีขนาดเท่ากับ [13]

$$\text{ผลต่างระยะทาง} = KL + LJ = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (2.11)$$

ซึ่งรังสีกระเจิงจากทั้งสองระนาบนี้จะมีเฟสตรงกัน และเกิดการรวมกันแบบเสริมก็ต่อเมื่อผลต่างระยะทางมีขนาดเป็นจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่น นั่นคือ

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.12)$$

เมื่อ $n = 1, 2, 3, \dots$



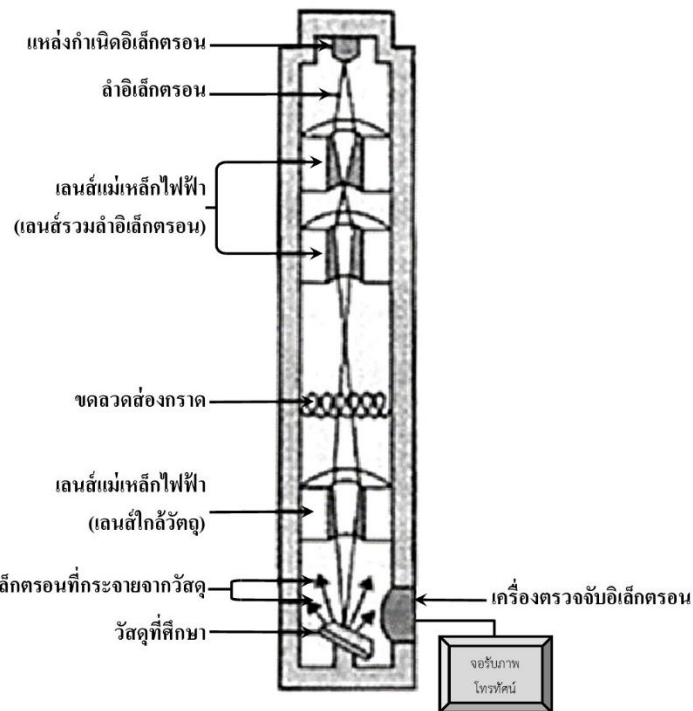
รูปที่ 2.13 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยผลึก [13]

ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกสามารถระบุชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติได้ว่ามีรูปแบบระบบผลึกแบบใด เพราะสารบางชนิดมีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกันแต่มีระบบผลึกต่างกัน โดยการวัดค่าความเข้มของรังสีที่เลี้ยวเบนออกมาที่มุม 2θ ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับฐานข้อมูล (data base) ของเครื่อง ข้อจำกัดของการใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์คือ ไม่สามารถวิเคราะห์เพื่อหาโครงสร้างหรือระบุชนิดของชิ้นตัวอย่างที่มีสมบัติเป็นอสัณฐาน (amorphous) ได้ เนื่องจากชิ้นตัวอย่างกลุ่มนี้ไม่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดถูกนำมาใช้ในการศึกษารูปร่างและลักษณะภายนอกของพื้นผิวตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ ซึ่งหลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากการให้ความร้อนตามรูปที่ 2.14 โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วย

สนามไฟฟ้า ให้มีพลังงานในช่วง 0.1 – 30 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า และเลนส์รวมลำอิเล็กตรอน เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอนซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการรูปที่มีความคมชัด จะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นเลนส์ใกล้วัตถุจะทำการปรับโฟกัสให้ลำอิเล็กตรอนกราดลงไปบนผิวชิ้นงานในตำแหน่งที่ต้องการศึกษา ลำอิเล็กตรอนจะไปชนอิเล็กตรอนในอะตอมของชิ้นงานให้หลุดออกทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น และจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจจับอิเล็กตรอน ซึ่งอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างภาพให้ปรากฏบนจอร์รับภาพต่อไป

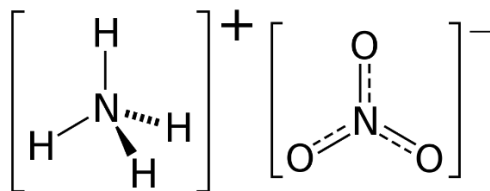


รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ปรับปรุงจาก [14]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อใช้ในการวัดความหนาของสารเคมีที่เตรียมด้วยวิธีการหลอมแล้วปล่อยให้เย็นตัวภายใต้แผ่นกระจกสไลด์และแผ่นกระจกปิดสไลด์ และใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Energy-dispersive X-ray spectrometer) ที่ติดตั้งกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุของสารประกอบเคมี

2.8 สารประกอบเคมีที่ใช้เป็นวัตถุระเบิด

2.8.1 แอมโมเนียมไนเตรท (Ammonium Nitrate, NH_4NO_3)



รูปที่ 2.15 โครงสร้างโมเลกุลของแอมโมเนียมไนเตรท

แอมโมเนียมไนเตรทเป็นสารเคมีที่มีลักษณะเป็นผลึกใสไม่มีสี มวลโมเลกุล 80.052 กรัมต่อโมล เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างก๊าซแอมโมเนียกับกรดไนตริก สามารถละลายได้ดีในน้ำและแอลกอฮอล์ มีความหนาแน่น 1.725 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส) จุดหลอมเหลว 169.6 องศาเซลเซียส และเสถียรภาพที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส โดยกลายเป็นไนตรัสออกไซด์ (Nitrous Oxide) มีดัชนีหักเหของแสง 3 ค่า คือ $\alpha = 1.413$, $\beta = 1.611$ และ $\gamma = 1.637$ มีค่าโพริฟรินเจนซ์ 0.224 ระบบผลึกที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นแบบออร์โธโรมบิก ($Z=2$, $a=4.942 \text{ \AA}$, $b=5.438 \text{ \AA}$, $c=5.745 \text{ \AA}$) นอกจากนี้แอมโมเนียมไนเตรทยังสามารถเปลี่ยนแปลงระบบผลึกตามการเพิ่มและลดอุณหภูมิ ในขณะที่เพิ่มและลดอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิของระบบผลึกใด จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงระบบผลึกในขณะที่เพิ่มหรือลดอุณหภูมิในช่วงนั้น ซึ่งเฟสของแอมโมเนียมไนเตรทแบ่งได้เป็น 5 เฟส ดังนี้

- | | | |
|-------|-------------------------------------|-----------------------------|
| เฟส 1 | อุณหภูมิ 130 ถึง 169.6 องศาเซลเซียส | ระบบผลึก ลูกบาศก์ |
| เฟส 2 | อุณหภูมิ 90 ถึง 129 องศาเซลเซียส | ระบบผลึก เตตระโกนอล |
| เฟส 3 | อุณหภูมิ 50 ถึง 89 องศาเซลเซียส | ระบบผลึก ออร์โธโรมบิก |
| เฟส 4 | อุณหภูมิ 23 ถึง 49 องศาเซลเซียส | ระบบผลึก ออร์โธโรมบิก |
| เฟส 5 | อุณหภูมิ -18 ถึง 22 องศาเซลเซียส | ระบบผลึก เตตระโกนอล [2, 15] |

ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้แอมโมเนียมไนเตรทอย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็นทางด้านเกษตรกรรม หรืออุตสาหกรรม เช่น ปุ๋ยเคมี ยาฆ่าแมลง หรือใช้เป็นวัตถุระเบิดสำหรับระเบิดพื้นให้เป็นหลุมในการขุดระเบิดหิน หรือระเบิดเหมืองแร่ นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้อย่างผิดกฎหมายได้แก่ การนำไปใช้ประกอบเป็นระเบิดแสวงเครื่องอีกด้วย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์การวิจัย และขั้นตอนในการวิจัย ซึ่งการวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงการทดลอง โดยลักษณะของกลุ่มตัวอย่างที่ผู้วิจัยเลือกมาศึกษาคือ สารแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐาน สารโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐาน ซึ่งเป็นสารเคมีที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นสารตั้งต้นในการทำวัตถุระเบิด หาได้ง่าย และพบบ่อยทาง 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ นอกจากนี้ยังนำสารประกอบแอมโมเนียมไนเตรทและสารประกอบโพแทสเซียมไนเตรทที่เก็บได้จากสถานที่เกิดเหตุระเบิดมาใช้ในการศึกษาด้วย เครื่องมือหลักที่ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ เครื่องหลอมชิ้นตัวอย่าง เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.1 อุปกรณ์การวิจัย

1. กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ ยี่ห้อไฮรอกซ์ (Hirox) รุ่น KH-7700 ตามรูปที่ 3.1 (ก)
2. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ยี่ห้อบรูเกอร์ (Bruker) รุ่น D2 Phaser ตามรูปที่ 3.1 (ข)
3. เครื่องหลอม (heater) ที่สร้างขึ้นเอง ตามรูปที่ 3.2 (ก)
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อจีโอล (Jeol) รุ่น JSM-IT300 ตามรูปที่ 3.2 (ข)
5. สารเคมีที่ใช้ทำวัตถุระเบิด
 - แอมโมเนียมไนเตรท ยี่ห้อยูนิวาร์ (Univar) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.0 ตามรูปที่ 3.3 (ก)
 - โพแทสเซียมไนเตรท ยี่ห้อศึกษาภัณฑ์พาณิชย์ ความบริสุทธิ์ไม่ระบุ ตามรูปที่ 3.3 (ข)
6. แผ่นกระจกสไลด์ (glass slide) ขนาด 7.6 x 2.5 ตารางเซนติเมตร
7. แผ่นกระจกปิดสไลด์ (cover glass) ขนาด 2.2 x 2.2 ตารางเซนติเมตร
8. คอมพิวเตอร์
9. โปรแกรมควบคุมอุณหภูมิ JC-300(DCL-300) ตามรูปที่ 3.4 (ก)
10. เครื่องชั่งมวล
11. แผ่นโลหะสำหรับคุมแรงกดขนาด 127 กรัม ตามรูปที่ 3.4 (ข)
12. ฟอ์เซป (forceps)
13. ถุงมือ

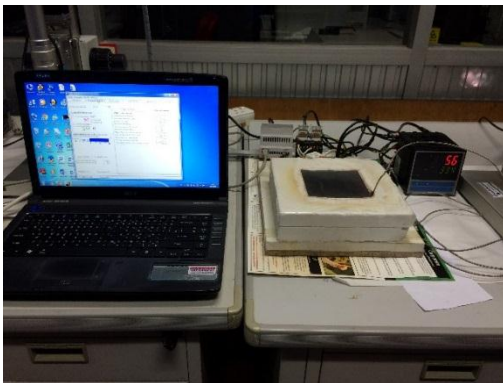


(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 (ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ และ (ข) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

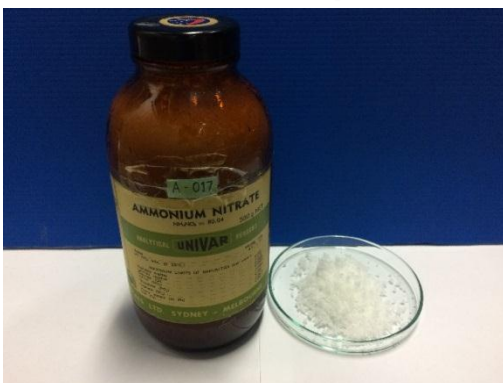


(ก)

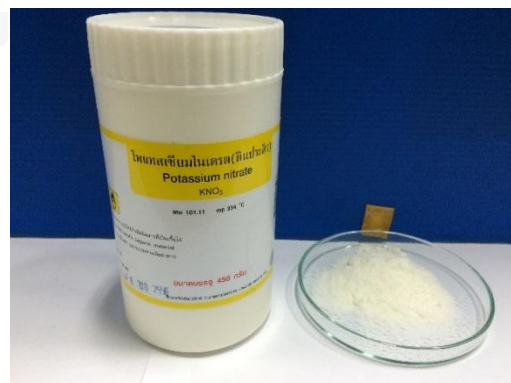


(ข)

รูปที่ 3.2 (ก) เครื่องหลอม และ (ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

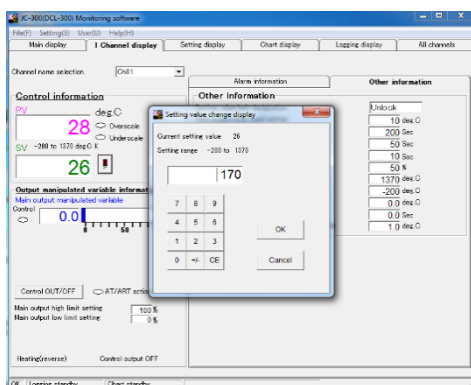


(ก)

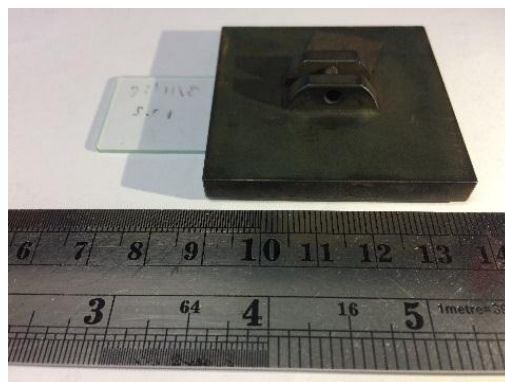


(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) แอมโมเนียมไนเตรท และ (ข) โพแทสเซียมไนเตรท



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 (ก) โปรแกรมควบคุมอุณหภูมิ JC-300(DCL-300) และ (ข) แผ่นโลหะสำหรับคุมแรงกด

3.2 ขั้นตอนการวิจัย

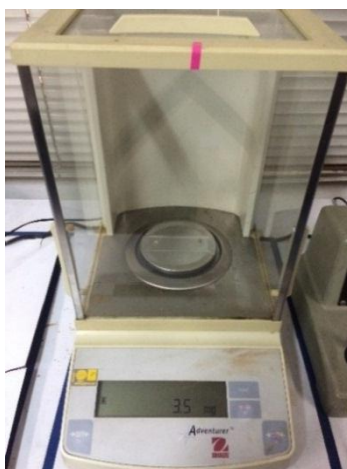
3.2.1 การเตรียมสไลด์

ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นกระจกปิดสไลด์โดยใช้กระดาษทิชชูชุบแอลกอฮอล์เช็ดทำความสะอาดคราบสิ่งสกปรกเพื่อป้องกันการปนเปื้อนที่มาจากสไลด์

3.2.2 การเตรียมสารเคมี

3.2.2.1 สารเคมีมาตรฐาน

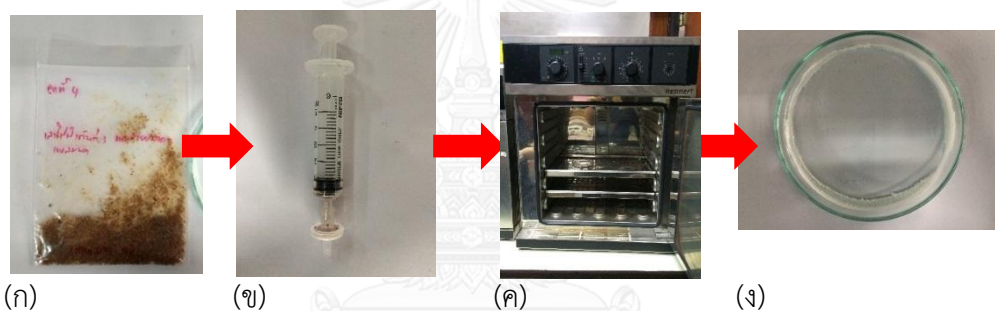
นำช้อนตักสารเคมีที่ถูกเช็ดทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ตักสารเคมีจากขวดบรรจุสารเคมีขึ้นมาวางลงบนแผ่นกระจกสไลด์ที่ถูกทำความสะอาดแล้วตามข้อ 3.2.1 นำไปชั่งมวลด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลที่มีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม โดยให้มวลของสารเคมีประมาณ 3.5 ถึง 4.0 มิลลิกรัม ตามรูปที่ 3.5 นำแผ่นกระจกสไลด์ที่มีสารเคมีอยู่ไปวางบนเครื่องหลอมเพื่อเตรียมหลอมสารเคมีต่อไป



รูปที่ 3.5 การชั่งสารเคมีที่วางอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล

3.2.2.2 สารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุ

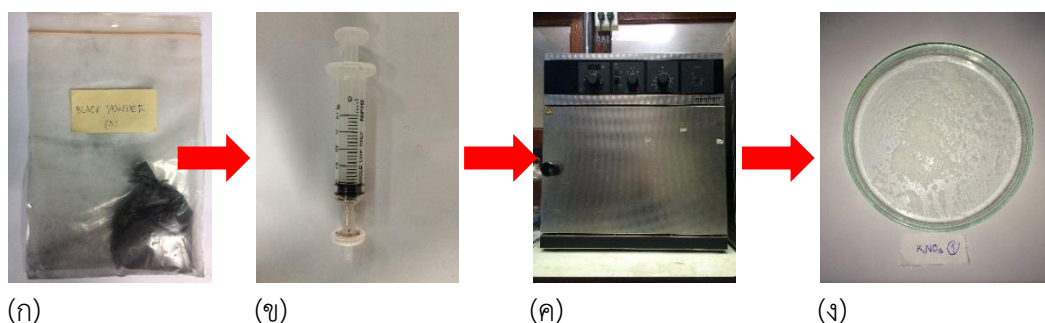
สารแอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุตรวจเก็บโดยเจ้าหน้าที่ตำรวจ สภ. เมืองปัตตานี สถานที่เกิดเหตุคือ เสาไฟฟ้าต้นที่ 4 ถนนบานา - แหลมบก อ เมืองปัตตานี จ.ปัตตานี ซึ่งเกิดเหตุเมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2557 สารแอมโมเนียมไนเตรทที่เก็บได้นี้มีส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ช่วยในการระเบิดเรียกว่า แอนโฟ (Ammonium Nitrate and Fuel Oil; ANFO) และยังมีสารปนเปื้อนจากภาชนะบรรจุระเบิด ตามรูปที่ 3.6 (ก) ดังนั้นต้องทำการกรองสารเคมีให้บริสุทธิ์เพื่อนำสิ่งปนเปื้อนออกก่อน เนื่องจากสารแอมโมเนียมไนเตรทมีคุณสมบัติละลายได้ดีในน้ำจึงใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย จากนั้นกรองเอาสิ่งสกปรกออกด้วยแผ่นกรองไนลอน (nylon filter disc) ขนาด 0.45 ไมโครเมตร ตามรูปที่ 3.6 (ข) จะได้สารละลายใสของแอมโมเนียมไนเตรท แล้วนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยเอาน้ำออก ตามรูปที่ 3.6 (ค) ก็จะได้ผลึกสารแอมโมเนียมไนเตรทสีขาวตามรูปที่ 3.6 (ง) จึงนำไปหลอมสารเคมีได้



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเตรียมสารแอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุเพื่อนำไปหลอม

- (ก) สารแอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุ
- (ข) การกรองสิ่งสกปรกออกด้วยแผ่นกรองไนลอนที่สวมอยู่ที่ปลายกระบอกฉีดยา
- (ค) การนำสารละลายของแอมโมเนียมไนเตรทไปเข้าตู้อบ
- (ง) ผลึกสารแอมโมเนียมไนเตรทสีขาวหลังการอบ

สำหรับสารโพแทสเซียมไนเตรทที่เก็บได้จากสถานที่เกิดเหตุจะอยู่ในรูปของดินดำ ตามรูปที่ 3.7 (ก) ซึ่งประกอบไปด้วย โพแทสเซียมไนเตรท ผงถ่าน (C) และกำมะถัน (S) ดังนั้นต้องสกัดเอาโพแทสเซียมไนเตรทออกมาจากผงถ่านและกำมะถันเช่นกัน ซึ่งโพแทสเซียมไนเตรทมีคุณสมบัติละลายได้ดีในน้ำ ส่วนผงถ่านและกำมะถันไม่ละลายในน้ำ ดังนั้นจึงใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย สารโพแทสเซียมไนเตรทที่เก็บได้จากสถานที่เกิดเหตุ แล้วกรองด้วยแผ่นกรองไนลอนเพื่อกำจัดอนุภาคแขวนลอยออก ตามรูปที่ 3.7 (ข) ก็จะได้สารละลายใสของโพแทสเซียมไนเตรท แล้วนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยเอาน้ำออก ตามรูปที่ 3.7 (ค) ก็จะได้ผลึกสารโพแทสเซียมไนเตรทสีขาวตามรูปที่ 3.7 (ง) จึงนำไปหลอมสารเคมีได้

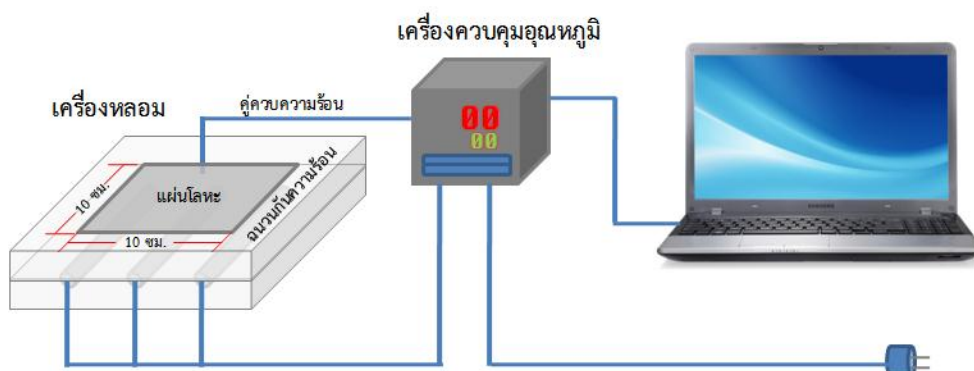


รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมสารโพลีแอครีลาไมด์จากสถานที่เกิดเหตุเพื่อนำไปหลอม

- (ก) สารโพลีแอครีลาไมด์จากสถานที่เกิดเหตุ
- (ข) ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายสารโพลีแอครีลาไมด์จากสถานที่เกิดเหตุ
- (ค) การกรองสิ่งสกปรกออกด้วยแผ่นกรองไนลอนที่สวมอยู่ที่ปลายกระบอกฉีดยา
- (ง) การนำสารละลายของโพลีแอครีลาไมด์ทไปเข้าตู้อบ
- (ง) ผลึกสารโพลีแอครีลาไมด์สีขาวหลังการอบ

3.2.3 การหลอมสารเคมีโดยใช้เครื่องหลอม

เครื่องหลอมที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบขึ้นเองโดยออกแบบให้พื้นที่หน้าเตา มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร เพื่อให้วางกระจกสไลด์ได้หลายแผ่น ทำมาจากโลหะเพื่อให้ทนความร้อนได้สูงเพียงพอที่สารเคมีที่ศึกษาถึงจุดหลอมเหลว และสามารถควบคุมการทำงานได้โดยการใช้ซอฟต์แวร์ที่มาจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิเชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอร์ ตามรูปที่ 3.8 สามารถตั้งอุณหภูมิที่ต้องการได้จากตัวเครื่องควบคุมอุณหภูมิหรือจากคอมพิวเตอร์ และสามารถเก็บข้อมูลอุณหภูมิที่เวลาต่าง ๆ ได้



รูปที่ 3.8 แผนผังเครื่องหลอมที่เชื่อมต่อกับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

3.2.3.1 เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ จะปรากฏตัวเลขสีแดงและสีเขียวของอุณหภูมิขึ้นมา โดยตัวเลขสีเขียวข้างล่างจะแสดงค่าอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้ ตัวเลขสีแดงข้างบนแสดงค่าอุณหภูมิขณะนั้น วัดจากคู่อุณหภูมิ (thermocouple) ตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ค่าอุณหภูมิของเครื่องหลอมจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

เมื่อสารเคมีได้รับความร้อนจนถึงจุดหลอมเหลว สารเคมีก็จะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ตามรูปที่ 3.10 (ก) จากนั้นนำแผ่นกระจกปิดสไลด์มาปิดทับบนสารเคมีที่หลอมตามรูปที่ 3.10 (ข) และทำการศึกษาแรงกดที่กระทำบนสารเคมีที่หลอมอยู่ระหว่างแผ่นกระจกปิดสไลด์ โดยแบ่งการศึกษาเป็น 3 ชุด ได้แก่ ชุดที่ 1 การนำแผ่นโลหะสำหรับควบคุมแรงกดจำนวน 1 แผ่น มาวางบนแผ่นกระจกปิดสไลด์ ตามรูปที่ 3.10 (ค) ชุดที่ 2 ใช้แผ่นโลหะสำหรับควบคุมแรงกดจำนวน 2 แผ่น ตามรูปที่ 3.10 (ง) และชุดที่ 3 ใช้แผ่นโลหะสำหรับควบคุมแรงกดจำนวน 3 แผ่น ตามรูปที่ 3.10 (จ) จากนั้นนำแผ่นโลหะดังกล่าวออกจากตัวอย่าง



รูปที่ 3.10 (ก) สารเคมีบนเครื่องหลอมได้รับความร้อนจนถึงจุดหลอมเหลว

- (ข) แผ่นกระจกปิดสไลด์ปิดทับบนสารเคมีที่หลอม
- (ค) แผ่นโลหะสำหรับควบคุมแรงกดจำนวน 1 แผ่น วางบนแผ่นกระจกปิดสไลด์
- (ง) แผ่นโลหะสำหรับควบคุมแรงกดจำนวน 2 แผ่น วางบนแผ่นกระจกปิดสไลด์
- (จ) แผ่นโลหะสำหรับควบคุมแรงกดจำนวน 3 แผ่น วางบนแผ่นกระจกปิดสไลด์

3.2.3.2 ทำการลดอุณหภูมิของสารเคมีลงเพื่อให้เย็นตัวกลายเป็นผลึก ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาการเย็นตัวของสารเคมีสองแบบคือ เย็นตัวอย่างรวดเร็ว และเย็นตัวอย่างช้า ๆ สำหรับการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำโดยการนำชิ้นงานออกจากเครื่องหลอมให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง ส่วนการเย็นตัวอย่างช้า ๆ ทำได้โดยการปล่อยให้ตัวอย่างเย็นตัวอยู่บนเครื่องหลอมด้วยการตั้งค่าอุณหภูมิของ

เครื่องหลอมกลับมาที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการลดอุณหภูมิอย่างช้า ๆ ของตัวเครื่องหลอมเอง เนื่องจากเครื่องหลอมไม่มีระบบระบายความร้อน

3.2.3.3 นำตัวอย่างสารเคมีที่เย็นตัวกลายเป็นผลึกแล้วไปถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์

3.2.4 การถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์

3.2.4.1 สำหรับขั้นตอนในการใช้งานกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ยี่ห้อไฮรอกซ์ (Hirox) รุ่น KH-7700 จะเริ่มจากการเปิดเครื่องที่ปุ่ม Power จะมีกล่องข้อความปรากฏขึ้นมาให้ใส่ชื่อเลนส์ให้ตรงกับเลนส์ที่ใส่อยู่ที่ตัวกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งเลนส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ MG5040RZ กำลังขยายต่ำสุดที่ 50 เท่า และสูงสุดที่ 400 เท่า

3.2.4.2 เนื่องจากสารเคมีที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวัสดุแอนไอโซทรอปิกซึ่งจะแสดงภาพโพลาไรซ์อยู่บนภาพพื้นหลังมืด จากหลักการของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์จะมีส่วนประกอบหลักที่เป็นแผ่นโพลาไรซ์อยู่สองแผ่น คือ โพลาไรเซอร์ซึ่งติดตั้งอยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับแท่นวางตัวอย่าง และอะนาไลเซอร์ซึ่งติดตั้งอยู่ระหว่างแท่นวางตัวอย่างกับเลนส์ MG5040RZ ในการถ่ายภาพโพลาไรซ์ แผ่นโพลาไรซ์ทั้งสองแผ่นต้องอยู่ในลักษณะโพลาไรเซอร์ขวางฉาก (cross polarizers) หมายความว่าแกนยอมผ่านของแสงของโพลาไรเซอร์ต้องตั้งฉากกับแกนยอมผ่านของแสงของอะนาไลเซอร์ ภาพที่ปรากฏจะมีมืด ดังนั้นจะต้องหมุนแท่นวางตัวอย่างจนกว่าภาพที่ปรากฏจะมีพื้นหลังมืดที่สุด เพื่อให้ได้ภาพโพลาไรซ์ที่คมชัดที่สุด

3.2.4.3 นำตัวอย่างสารเคมีที่เย็นตัวกลายเป็นผลึกตามข้อ 3.2.3.3 มาวางบนแท่นวางตัวอย่างของกล้องจุลทรรศน์ ปรับโฟกัสของภาพโดยใช้ปุ่มปรับโฟกัสแบบหยาบและละเอียด แล้วถ่ายภาพในแต่ละตำแหน่งของสารเคมี ภาพที่ได้จะเป็นภาพที่มีสีสั่นอย่างหลากหลายปรากฏอยู่บนพื้นหลังที่มืด

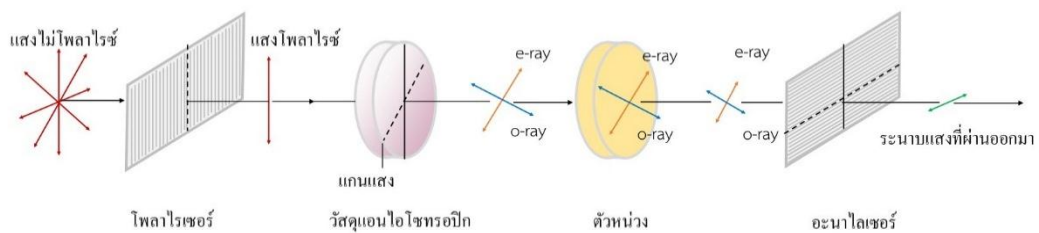
3.2.4.4 ในการพิจารณาตำแหน่งสลัวแสง (extinction position) เลือกเกรนที่มีมืดที่สุดแล้วถ่ายรูปไว้ จากนั้นหมุนแท่นวางตัวอย่างไป 45° คือ ตำแหน่งทแยงมุม (diagonal position) เกรนเดิมนั้นจะแสดงภาพสว่างที่สุด เนื่องจากที่ตำแหน่งนี้แกนแสงวางตัวทำมุม 45° กับแกนยอมผ่านของแสงของโพลาไรเซอร์และอะนาไลเซอร์ทำให้ความเข้มที่ตำแหน่งนี้สูงที่สุด แล้วถ่ายรูปไว้ เมื่อหมุนแท่นวางตัวอย่างต่อไปอีก 45° เกรนเดิมนั้นจะกลับมามีมืดอีกครั้ง ในการหมุนแท่นวางตัวอย่างไปที่ละ 45° ภาพที่ได้จะเป็นภาพมืดสลับกับสว่าง เหตุผลในการศึกษาภาพโพลาไรซ์ที่ตำแหน่งทแยงมุม เนื่องจากตำแหน่งนี้มีความเข้มแสงสูงที่สุด สามารถนำสีจากการแทรกสอดนี้ไปใช้ในการเปรียบเทียบกับแผนภาพของมิเชล-เลวี ที่มีการพิจารณาที่ความเข้มแสงสูงที่สุดเช่นกัน

3.2.4.5 การใช้ตัวหน่วงในการประมาณความหนาของผลึกสารเคมีจะใช้ตัวหน่วงของ “Berek Polarization compensator” ตามรูปที่ 3.11 สามารถปรับค่าความยาวคลื่นของแสงได้

ในการใช้งานตัวหน่วงจะพิจารณาภาพโพลาไรซ์ที่อยู่ในตำแหน่งทแยงมุม โดยการนำตัวหน่วงใส่ที่กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ในตำแหน่งระหว่างแท่นวางตัวอย่างและอะนาไลเซอร์ตามรูปที่ 3.12 ภาพโพลาไรซ์ที่ปรากฏบนจอรับภาพจะเปลี่ยนสีไป โดยผลต่างระยะทางเชิงแสงจะเพิ่มขึ้น (ลดลง) 1 ความยาวคลื่น ให้ถ่ายรูปไว้ จากนั้นหมุนแท่นวางตัวอย่างจากตำแหน่งเดิมไปอีก 90° โดยที่ยังมีตัวหน่วงอยู่ ภาพโพลาไรซ์ที่ปรากฏบนจอรับภาพจะเปลี่ยนสีไปโดยผลต่างระยะทางเชิงแสงลดลง (เพิ่มขึ้น) 1 อันดับ ให้ถ่ายรูปไว้อีกครั้ง จากนั้นนำสีของการแทรกสอดจากภาพโพลาไรซ์มาเปรียบเทียบกับแผนภาพของมิเชล-เลวีเพื่อหาค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงซึ่งนำไปใช้ในการประมาณความหนาของผลึกสาร



รูปที่ 3.11 ตัวหน่วงของ “Berek polarization compensator”



รูปที่ 3.12 การใส่ตัวหน่วงระหว่างวัสดุแอนไอโซทรอปิกและอะนาไลเซอร์

3.2.5 การใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

การเตรียมตัวอย่างสำหรับเข้าเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จำเป็นต้องบดสารเคมีเป็นผงละเอียดด้วยภาชนะบดสาร เรียกว่า โกร่ง จากนั้นนำผงสารเคมีใส่ลงในภาชนะใส่สาร เรียกว่า “sample holder” ใช้กระจกกดทับกวาดผิวหน้าให้เรียบเสมอกันเพื่อนำไปเข้าเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ใช้งานปรากฏตามภาคผนวก ข ตารางที่ ข.2

3.2.6 การวัดความหนาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ JOEL พร้อมชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectrometer; EDS) ในการเตรียมตัวอย่างผลึกสารเคมีเพื่อวัดความหนาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้นจะเตรียมโดยการนำตัวอย่างผลึกสารเคมีหลังจากส่องกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์แล้วมาเปิดกระจกปิดสไลด์ออก แล้ววัดความหนาของเนื้อสารเคมีในลักษณะภาคตัดขวางโดยใช้พารามิเตอร์ตามภาคผนวก ข ตารางที่ ข.3

เมื่อเปิดแผ่นกระจกปิดสไลด์ออกจะมีเนื้อสารเคมีลอกขึ้นทำให้เห็นภาคตัดขวางของเนื้อสาร ซึ่งเป็นความหนาของสารโดยตรง ในกรณีที่ภาคตัดขวางของเนื้อสารเปิดขึ้นมาแต่ไม่อยู่ในระนาบที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดถ่ายรูปได้ชัดเจน สามารถปรับแท่นวางตัวอย่างได้ เช่น การปรับความเอียง และการหมุนแท่นวางตัวอย่าง



บทที่ 4

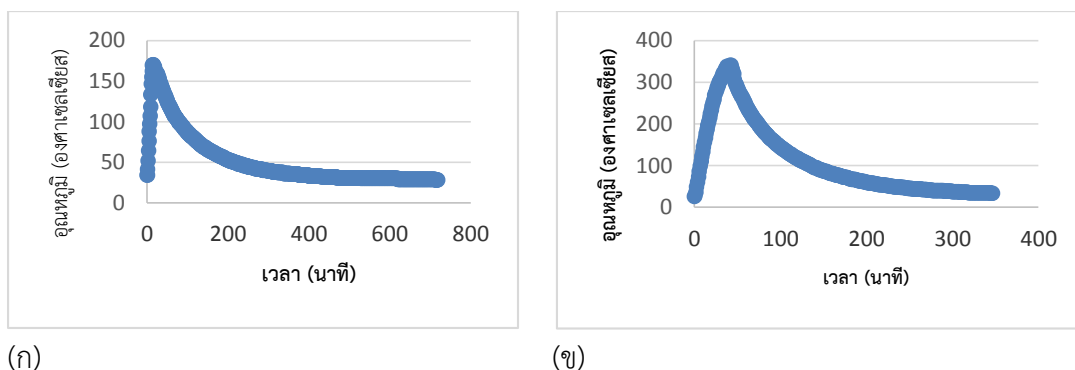
ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัยตั้งแต่กระบวนการหลอมสารเคมีบนเงื่อนไขการเย็นตัวอย่างช้า ๆ และอย่างรวดเร็ว เพื่อหาเงื่อนไขที่ทำให้เกิดภาพโพลารไรซ์ที่มีคุณภาพ เหมาะแก่การนำไปวิเคราะห์หาค่าด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลารไรซ์ การควบคุมแรงกดที่กระทำบนแผ่นกระจกปิดสไลด์ที่มีผลต่อความหนาของสารเคมีทำให้ภาพโพลารไรซ์มีสีของการแทรกสอดเปลี่ยนไป สมบัติเชิงแสงของสารเคมี เช่น ตำแหน่งสลับแสง และตำแหน่งทแยงมุม ผลการวิจัยเกี่ยวกับรูปแบบภาพโพลารไรซ์ของสารเคมีแต่ละชนิด ผลรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารเคมีจากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ การวัดความหนา และวิเคราะห์ธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด นอกจากนี้ยังแสดงผลการวิเคราะห์สารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุด้วยวิธีการเดียวกันด้วย

4.1 เงื่อนไขอุณหภูมิในการหลอมสารเคมี

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีการทดลองเกี่ยวกับการหลอมสารเคมีแล้วปล่อยให้เย็นตัว และต้องการทราบว่า การเย็นตัวต่างกันจะมีผลอย่างไรต่อภาพโพลารไรซ์ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลารไรซ์ ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาการเย็นตัวของผลึกสารเคมีจากอัตราการลดอุณหภูมิของเครื่องหลอม สำหรับการศึกษาค่าการเย็นตัวของผลึกสารประกอบไนเตรทจะแบ่งพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ การเย็นตัวอย่างช้า ๆ และการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งการเย็นตัวอย่างช้า ๆ จะทดลองโดยการนำสารเคมีที่เตรียมไว้บนกระจกสไลด์มาหลอมแล้วปล่อยให้เย็นตัวอยู่บนเครื่องหลอมตามอัตราการลดอุณหภูมิของเครื่องหลอม ส่วนการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะยกสารเคมีออกจากเครื่องหลอมให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง

การเย็นตัวอย่างช้า ๆ ของสารแอมโมเนียมไนเตรทที่มีจุดหลอมเหลว 169 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิของเครื่องหลอมเพิ่มขึ้นถึง 170 องศาเซลเซียส สารเคมีจึงหลอมจนหมด จากนั้นลดอุณหภูมิกลับมาที่อุณหภูมิห้อง พบว่าอุณหภูมิของเครื่องหลอมค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ ตามรูปที่ 4.1 (ก) ส่วนการเย็นตัวอย่างช้า ๆ ของสารโพแทสเซียมไนเตรทที่มีจุดหลอมเหลว 334 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิของเครื่องหลอม ถึง 340 องศาเซลเซียส สารเคมีจะหลอมจนหมด จากนั้นจึงลดอุณหภูมิกลับมาที่อุณหภูมิห้อง กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการหลอมโพแทสเซียมไนเตรทแสดงดังรูปที่ 4.1 (ข)



(ก)

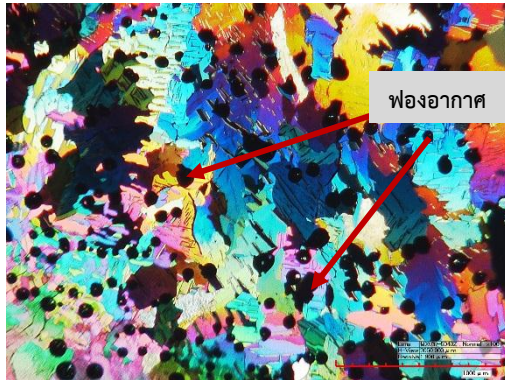
(ข)

รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเครื่องหลอมกับเวลาในกรณีเย็นตัวแบบช้า ๆ ของ (ก) สารแอมโมเนียมไนเตรท และ (ข) สารโพแทสเซียมไนเตรท

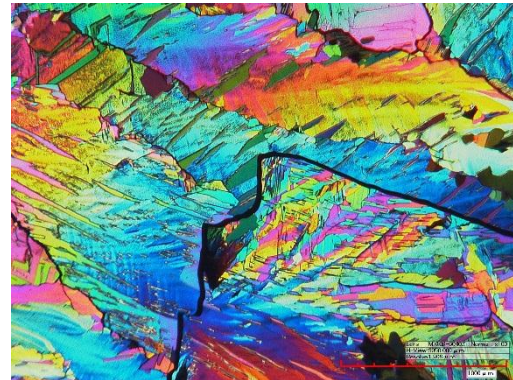
ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ คือ คุณภาพพื้นผิวของสารตัวอย่างไม่ดีพอที่จะนำไปวิเคราะห์หัตถ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ กล่าวคือ फिल्मสารตัวอย่างที่ได้จากการหลอมมีฟองอากาศปะปนอยู่ จากการสังเกตพบว่า ระยะเวลาในช่วงกระบวนการหลอมส่งผลกับจำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้น เมื่อให้ความร้อนจนถึงจุดหลอมเหลวแล้ว สารเคมีบางส่วนจะเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นของเหลว และในระหว่างรอให้สารเคมีเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวทั้งหมดนั้น สารเคมีที่มีสถานะเป็นของเหลวแล้วบางส่วนจะเริ่มกลายเป็นไอ และไอนี้เองที่เป็นที่มาของฟองอากาศ ซึ่งจะมีจำนวนฟองอากาศมากหรือน้อย ขึ้นกับระยะเวลาที่ปล่อยให้สารเคมีนั้น ๆ กลายเป็นไอ กล่าวคือถ้าปล่อยให้เกิดไอสารเคมีจำนวนมาก ก็จะมีฟองอากาศเกิดขึ้นจำนวนมากด้วย

ในช่วงการเย็นตัว ยิงนำสารเคมีที่หลอมเหลวออกจากเครื่องหลอมเร็วฟองอากาศก็จะน้อย ข้อจำกัดของการเตรียมสารเคมีจากเครื่องหลอมที่ใช้อยู่นี้คือมีการสะสมความร้อนอยู่นาน ทำให้แม้ว่าจะใช้อัตราการเย็นตัวมากที่สุด (ปิดเครื่อง) แล้วก็ตาม ก็ยังมีฟองอากาศเกิดขึ้นอยู่มาก เมื่อนำฟิล์มสารตัวอย่างไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์จะเห็นฟองอากาศ (จุดสีดำ) เป็นจำนวนมากดังรูปที่ 4.2 (ก) และ 4.2 (ค) อย่างไรก็ตาม เราได้ทดลองให้ฟิล์มสารตัวอย่างเย็นตัวอย่างรวดเร็วขึ้นโดยนำออกจากเครื่องหลอมทันทีเพื่อให้เข้าสู่การเย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ คือ ได้ฟิล์มสารตัวอย่างที่ปราศจากฟองอากาศดังรูปที่ 4.2 (ข) และ 4.2 (ง) จึงสามารถตีความได้ว่า แม้ว่าจะตั้งอุณหภูมิในช่วงการหลอมให้ใกล้เคียงจุดหลอมเหลวแล้วก็ตาม ฟองอากาศที่เป็นปัญหาเหล่านี้ยังเกิดขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง แต่ถ้าทำให้กระบวนการหลอมและเย็นตัวนี้เร็วขึ้น ก็จะช่วยลดการเกิดฟองอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในการเตรียมตัวอย่างเพื่อถ่ายภาพโดยใช้กล้อง

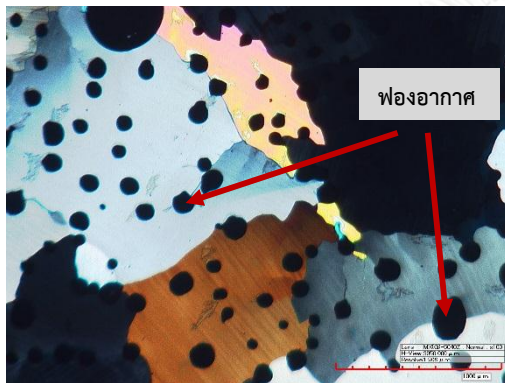
จุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์นั้น ควรเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการหลอมแล้วทำให้สารเคมีเย็นตัวอย่างรวดเร็วเพื่อให้ได้ภาพโพลาไรซ์ที่มีคุณภาพ และไม่มีฟองอากาศ



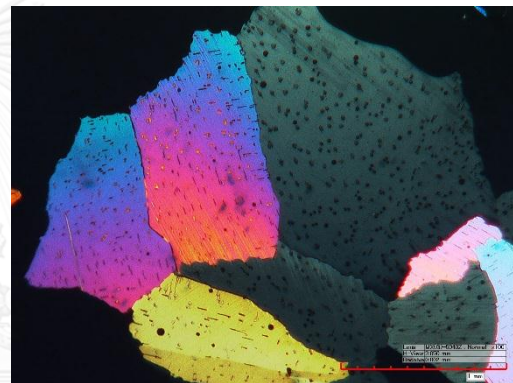
(ก)



(ข)



(ค)



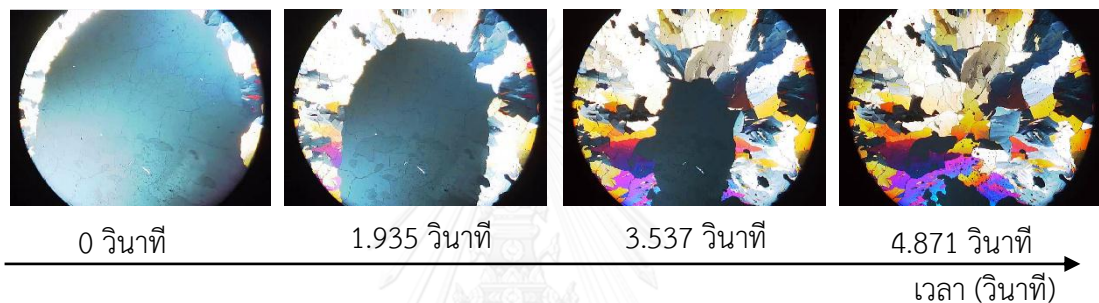
(ง)

รูปที่ 4.2 ภาพโพลาไรซ์ที่ได้จากการเย็นตัวอย่างช้า ๆ และอย่างรวดเร็วของสารเคมีที่กำลังขยาย 100 เท่า (ก) สารแอมโมเนียมไนเตรท เย็นตัวอย่างช้า ๆ, (ข) สารแอมโมเนียมไนเตรท เย็นตัวอย่างรวดเร็ว, (ค) สารโพแทสเซียมไนเตรท เย็นตัวอย่างช้า ๆ และ (ง) สารโพแทสเซียมไนเตรทเย็นตัวอย่างรวดเร็ว

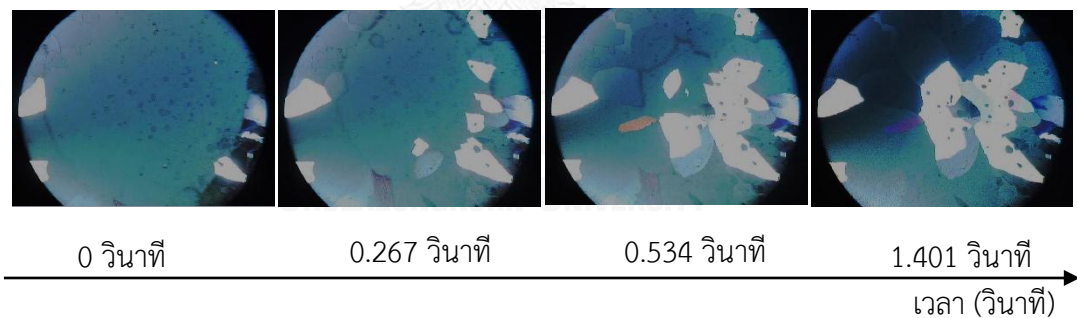
ภาพโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นมีสีสันที่หลากหลายซึ่งเกิดจากการที่แสงไม่โพลาไรซ์เดินทางผ่านโพลาไรเซอร์ ทำให้เกิดเป็นแสงโพลาไรซ์ที่มีทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าในทิศเดียวกับแกนยอมผ่านของแสงของโพลาไรเซอร์ เมื่อแสงโพลาไรซ์นี้เดินทางผ่านผลึกสารจะถูกแยกออกเป็นสองรังสี ได้แก่ รังสีแสงปกติ (ordinary-ray) ซึ่งจะมีทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับแกนแสง และอีกรังสีหนึ่งคือรังสีแสงเกินปกติ (extra ordinary-ray) ซึ่งจะมีทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าในทิศเดียวกับแกนแสง เมื่อทั้งสองรังสีนี้เดินทางออกจากผลึกสารเคมีผ่านอะนาไลเซอร์จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันเกิดเป็นภาพโพลาไรซ์ที่แสดงสีการแทรกสอดอย่างหลากหลายดังรูปที่ 4.2

4.2 ภาพโพลาไรซ์ในขณะเย็นตัว

ในการพิจารณาทิศทางการเย็นตัวจะใช้สิ่งแวดล้อมเป็นตัวควบคุมการถ่ายเทความร้อนของผลึกสารแอมโมเนียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรท ในขณะที่สารเคมีเริ่มเย็นตัวนั้น ถ้าสารเคมีสัมผัสอยู่กับสิ่งใดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ก็จะถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งนั้น ในการทดลองนี้ จะหลอมสารเคมีจนถึงจุดหลอมเหลวแล้วยกตัวอย่างออกจากเครื่องหลอมมาวางไว้บนแท่นโลหะที่มีรูปทรงเป็นทรงกระบอกที่มีรูตรงกลางซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร โดยให้สารเคมีอยู่ตรงกลางของรูทรงกระบอกเพื่อให้แสงจากกล้องส่องผ่านได้ ภาพโพลาไรซ์ที่ได้จะแสดงการเย็นตัวจากขอบเข้าสู่จุดศูนย์กลางตามรูปที่ 4.3 และ 4.4

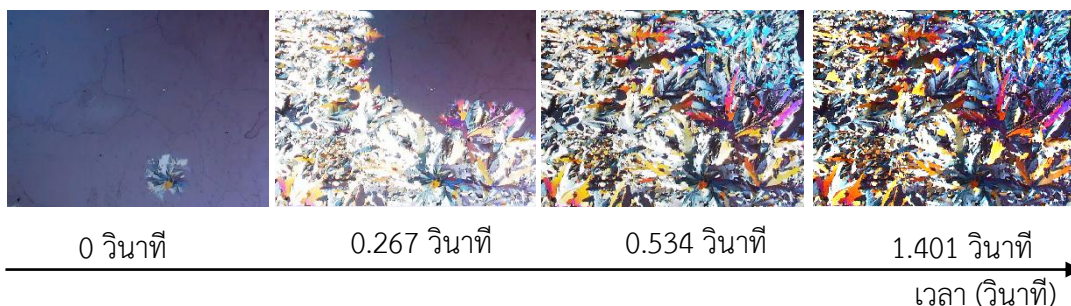


รูปที่ 4.3 ภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทแสดงการเย็นตัวเข้าสู่จุดศูนย์กลางที่เวลาต่าง ๆ

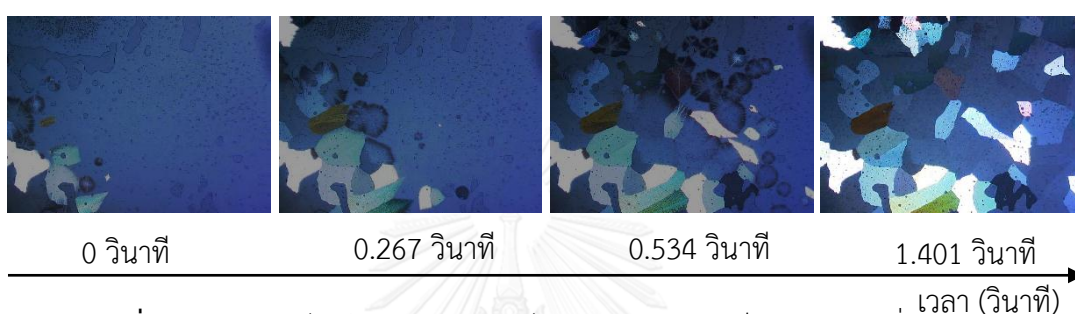


รูปที่ 4.4 ภาพโพลาไรซ์ของโพแทสเซียมไนเตรทแสดงการเย็นตัวเข้าสู่จุดศูนย์กลางที่เวลาต่าง ๆ

นอกจากนี้ถ้าให้สารเคมีเย็นตัวโดยการถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม ด้วยการวางตัวอย่างสัมผัสกับแท่นวางตัวอย่างของกล้องจุลทรรศน์โดยตรง ภาพโพลาไรซ์ที่ปรากฏจะแสดงการเย็นตัวแบบไม่มีทิศทางแน่นอน ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิที่ถ่ายเทในแต่ละบริเวณ ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 ภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทแสดงการเย็นตัวแบบสุ่มที่เวลาต่าง ๆ



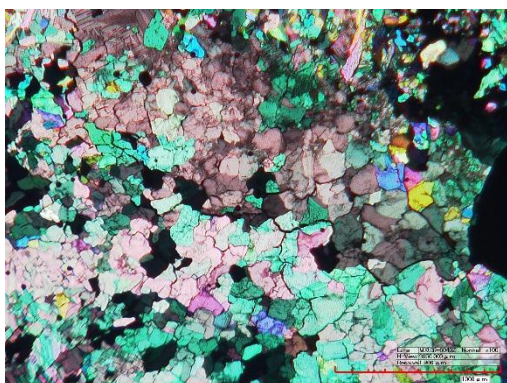
รูปที่ 4.6 ภาพโพลาไรซ์ของโพแทสเซียมไนเตรทแสดงการเย็นตัวแบบสุ่มที่เวลาต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.3 ถึง 4.6 พบว่าทิศทางการเย็นตัวของสารแอมโมเนียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทขึ้นกับการถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม โดยเมื่อบริเวณใดบริเวณหนึ่งของตัวอย่างสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า บริเวณนั้นจะเกิดเป็นผลึกก่อน เนื่องจากความสามารถในการถ่ายเทความร้อนในแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน อุณหภูมิภายในจึงแตกต่างกัน

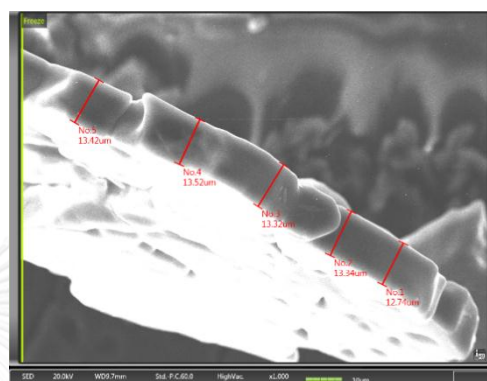
4.3 การควบคุมแรงกดบนแผ่นกระจกปิดสไลด์และวัดความหนาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การควบคุมแรงกดบนแผ่นกระจกปิดสไลด์ทำโดยการนำแผ่นโลหะที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 5.1×5.1 ตารางเซนติเมตร หนา 0.6 เซนติเมตร น้ำหนัก 127 กรัม ด้านหนึ่งของแผ่นโลหะมีหน้าสัมผัสเรียบ ส่วนอีกด้านหนึ่งมีลักษณะเป็นแท่นขึ้นมาสำหรับจับ สามารถนำแผ่นโลหะมากดทับลงบนแผ่นกระจกปิดสไลด์เพื่อควบคุมแรงกดได้ การทดลองนี้แบ่งเป็น 4 กรณี ดังนี้ กรณีที่ 1 ปิดทับสารตัวอย่างด้วยแผ่นกระจกปิดสไลด์อย่างเดียว กรณีที่ 2 ปิดทับสารตัวอย่างด้วยแผ่นโลหะ 1 แผ่น บนแผ่นกระจกปิดสไลด์ กรณีที่ 3 ปิดทับด้วยโลหะ 2 แผ่น บนแผ่นกระจกปิดสไลด์ และกรณีที่ 4 ปิดทับด้วยแผ่นโลหะ 3 แผ่นบนแผ่นกระจกปิดสไลด์ จากการทดลองพบว่ากรณีที่ 1 ที่ปิดทับด้วยแผ่นกระจกปิดสไลด์อย่างเดียว ภาพโพลาไรซ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะปรากฏเป็นสีเขียวและ

สีชมพู ตามรูปที่ 4.7 (ก) เมื่อวัดความหนาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แล้วพบว่า มีความหนาของสารมากที่สุด ประมาณ 13.27 ± 0.27 ไมโครเมตร ตามรูปที่ 4.7 (ข) ส่วนกรณีที่ 2 มีความหนาของสารประมาณ 9.84 ± 0.18 ไมโครเมตร ตามรูปที่ 4.8 กรณีที่ 3 มีความหนาของสาร ประมาณ 7.22 ± 0.20 ไมโครเมตร ตามรูปที่ 4.9 และ กรณีที่ 4 ภาพโพลาริซที่ได้จะพบสีน้ำเงิน ปรากฏอยู่ด้วย และมีความหนาน้อยที่สุดคือ 5.56 ± 0.12 ไมโครเมตร ตามรูปที่ 4.10

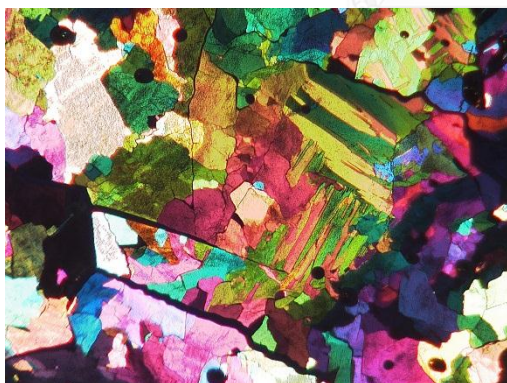


(ก)

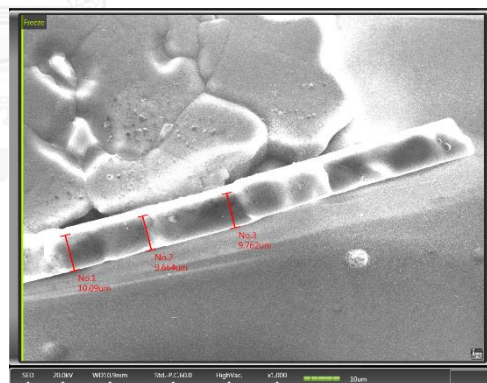


(ข)

รูปที่ 4.7 (ก) ภาพโพลาริซซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทที่ได้จากการปิดทับด้วยแผ่นกระจกปิดสไลด์ อย่างเดียว และ (ข) วัดความหนาของสารจากรูป (ก) โดยใช้ SEM ได้ประมาณ 13.27 ไมโครเมตร

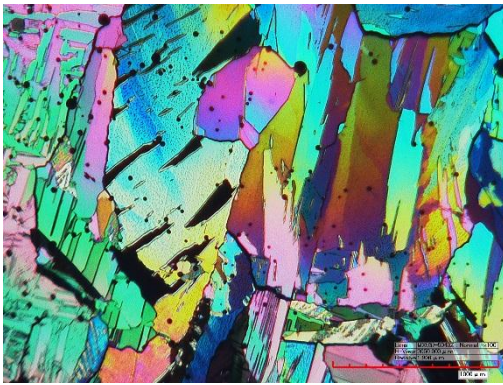


(ก)

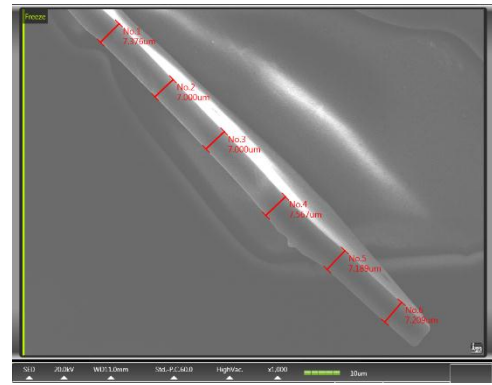


(ข)

รูปที่ 4.8 (ก) ภาพโพลาริซซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทที่ได้จากการปิดทับด้วยแผ่นโลหะ 1 แผ่น บนแผ่นกระจกปิดสไลด์ และ (ข) วัดความหนาของสารจากรูป (ก) โดยใช้ SEM ได้ประมาณ 9.84 ไมโครเมตร

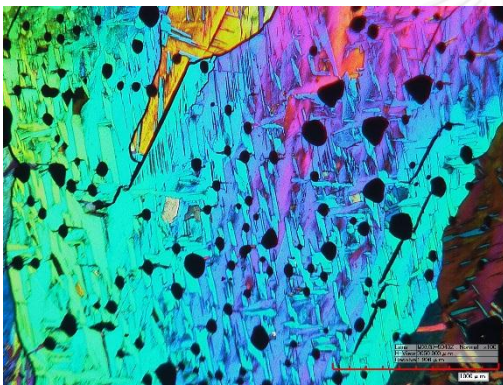


(ก)

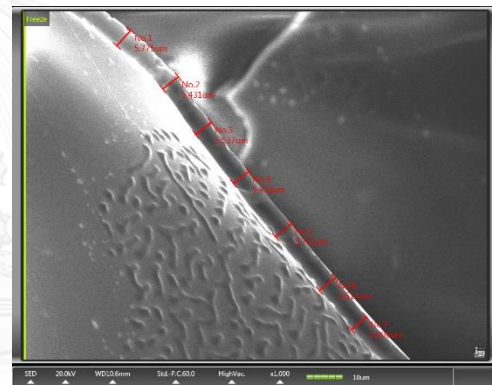


(ข)

รูปที่ 4.9 (ก) ภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทที่ได้จากการปิดทับด้วยโลหะ 2 แผ่นบนแผ่นกระจกปิดสไลด์ และ (ข) วัดความหนาของสารจากรูป (ก) โดยใช้ SEM ได้ประมาณ 7.22 ไมโครเมตร



(ก)



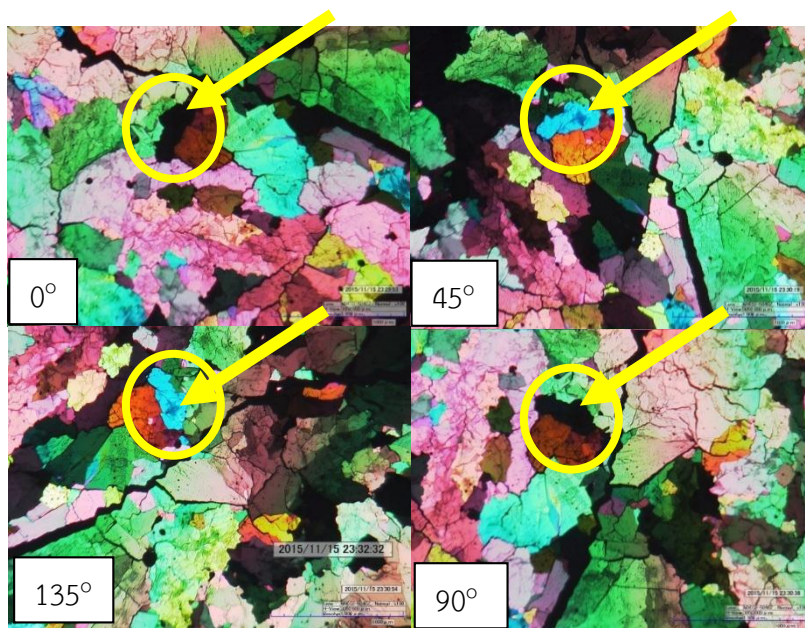
(ข)

รูปที่ 4.10 (ก) ภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทที่ได้จากการปิดทับด้วยโลหะ 3 แผ่นบนแผ่นกระจกปิดสไลด์ และ (ข) วัดความหนาของสารจากรูป (ก) โดยใช้ SEM ได้ประมาณ 5.56 ไมโครเมตร

ดังนั้นการใช้แผ่นโลหะในการควบคุมแรงกดพบว่าเมื่อนำน้ำหนักกดทับลงบนแผ่นกระจกปิดสไลด์มากขึ้นทำให้สารเคมีมีความหนาน้อยลง และยังความหนาน้อยภาพโพลาไรซ์ที่ปรากฏจะพบสีน้ำเงินมากขึ้น และเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น จะเห็นได้ว่าสีที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความหนาซึ่งได้ทำการทดลองในหัวข้อ 4.6

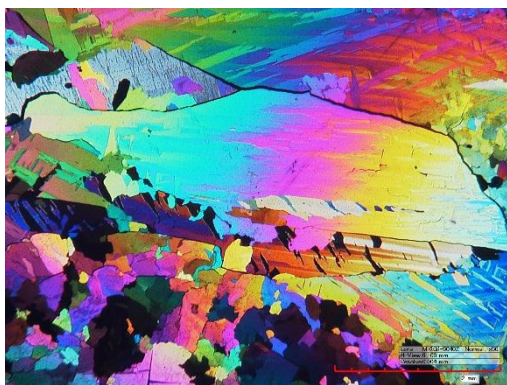
4.4 ตำแหน่งสลัวแสง (extinction position)

ในการพิจารณาตำแหน่งสลัวแสงนั้นสามารถทำได้โดยการหมุนแท่นวางตัวอย่างให้เกรนที่พิจารณามีมืดที่สุด จากนั้นจึงหมุนแท่นวางตัวอย่างในทิศวนตามเข็มนาฬิกาไป 45° เกรนเดิมนั้นจะสว่างที่สุด ซึ่งในการหมุนแท่นวางตัวอย่างไปทีละ 45° เกรนที่พิจารณาจะมืดและสว่างสลับกันไปตามรูปที่ 4.11

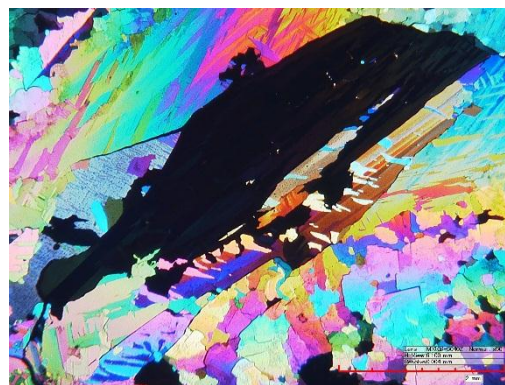


รูปที่ 4.11 ภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียไมเนตรทแสดงภาพเกรนที่พิจารณามีมืดที่ตำแหน่งสลัวแสง (0°) ที่ตำแหน่งทแยงมุม (45°) แสดงภาพเกรนเป็นสีฟ้า ที่ตำแหน่งสลัวแสงอีกครั้ง (90°) แสดงภาพเกรนมืด และที่ตำแหน่งทแยงมุมอีกครั้ง (135°) แสดงภาพเกรนเป็นสีฟ้า

จากรูปเมื่อพิจารณาเกรนที่มีมืดสนิทตามศรีซี่ ที่ 0° แสดงว่าทุกผลึกที่อยู่ภายในเกรนนี้มีแกนแสงของผลึกที่วางตัวในแนวเดียวกันทุกผลึก ซึ่งอาจขนานกับแกนยอมผ่านของแสงของโพลาริเซอร์หรืออะนาไลเซอร์ เมื่อหมุนตัวอย่างวนตามเข็มนาฬิกาไปอีก 45° จะเห็นผลึกเป็นสีฟ้า แสดงว่าผลึกที่อยู่ในเกรนนี้มีแกนแสงที่วางตัวทำมุม 45° กับแกนยอมผ่านของแสงของโพลาริเซอร์และอะนาไลเซอร์ เมื่อหมุนแท่นวางตัวอย่างไปอีก 45° จะเห็นเกรนที่พิจารณากลับมามีมืดอีกครั้ง ดังนั้นเมื่อหมุนตัวอย่างไปทุก ๆ 45° จะเห็นเกรนนั้นเป็นมืดสลับกับสว่าง เนื่องจากภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียไมเนตรทจะปรากฏลักษณะของเกรนที่ซ้อนทับกัน ทำให้สังเกตเห็นขอบเกรนไม่ชัดเจน เราจะใช้ตำแหน่งสลัวแสงในการหาขอบเกรนของแอมโมเนียไมเนตรทตามรูปที่ 4.12



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.12 ภาพโพลาริซ์ของแอมโมเนียมในเตรทที่กำลังขยาย 50 เท่า (ก) สีการแทรกสอดที่หลากหลาย และ (ข) เกรนที่ตำแหน่งสลัวแสง

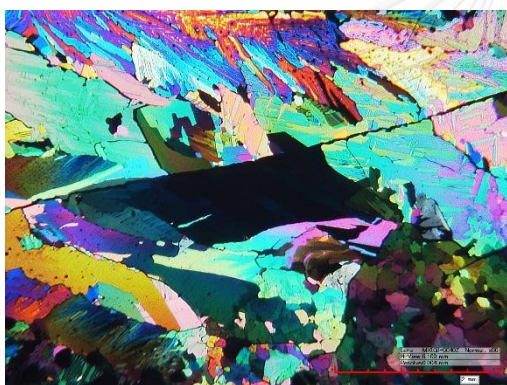
เนื่องจากลักษณะของเกรนมีการซ้อนทับกันทำให้ไม่สามารถระบุขอบเกรนได้ เมื่อเราต้องการทราบขอบเกรนของภาพโพลาริซ์ที่มีสีของการแทรกสอดหลายสีตามรูปที่ 4.12 (ก) ให้หมุนแผ่นวางตัวอย่างทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกาจนเกรนที่พิจารณานั้นปรากฏภาพมืดที่สุดตามรูปที่ 4.12 (ข) จะเห็นได้ว่าทุกผลึกที่อยู่ภายในหนึ่งเกรนนี้มีการจัดวางตัวของแกนแสงของผลึกในแนวเดียวกันที่ตำแหน่งสลัวแสง ซึ่งปรากฏสีการแทรกสอดได้หลากหลายสี ซึ่งให้เห็นว่าภายในหนึ่งเกรนมีการจัดวางตัวของแกนแสงใน 1 ทิศทาง สามารถเกิดสีการแทรกสอดได้หลากหลาย ดังนั้นสีแต่ละสีที่เกิดขึ้นไม่ขึ้นกับการจัดวางตัวของแกนแสงของผลึก

4.5 การประมาณความหนาของผลึกสารโดยใช้ตัวหน่วงและแผนภาพของมิเชล-เลวี

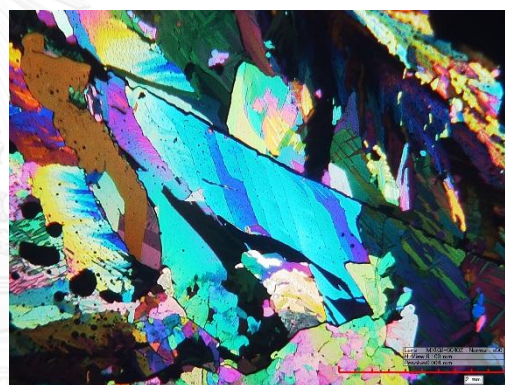
ผลการทดลองเรื่องการควบคุมแรงกดทำให้เราทราบว่าภาพโพลาริซ์ของสารเคมีที่มีความหนาต่างกันนั้นจะมีสีแตกต่างกัน การทดลองในหัวข้อนี้จะเป็นการประมาณค่าความหนาของสารเคมี ซึ่งดูจากสีของภาพโพลาริซ์ของเกรนหนึ่งเกรนโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาริซ์ ตัวหน่วง และแผนภาพของมิเชล-เลวี ในการประมาณความหนาของผลึกสารเคมีจำเป็นต้องทราบค่าผลต่างระยะทางเชิงแสง ซึ่งผลต่างระยะทางเชิงแสงนี้ได้มาจากการเทียบสีของภาพโพลาริซ์กับแผนภาพของมิเชล-เลวีตามรูปที่ 2.9 จากแผนภาพของมิเชล-เลวี แกนตั้ง คือ ความหนาของตัวอย่างในหน่วยไมโครเมตร แกนนอน คือ ผลต่างระยะทางเชิงแสงในลำดับที่ 1 ถึง 5 ซึ่งมีจุดสีม่วงเป็นจุดแบ่งลำดับเส้นในแนวทแยงบอกค่าไบรีฟรินเจนซ์ สีที่ปรากฏบนแผนภาพของมิเชล-เลวีบอกถึงผลต่างระยะทางเชิงแสง จะเห็นได้ว่ามีสีที่เหมือนกันอยู่ในแต่ละอันดับ ดังนั้นเพื่อที่จะทราบสีของการแทรกสอดว่าอยู่

ในอันดับใดจะต้องใช้อุปกรณ์ทางแสงเข้ามาช่วยคือ ตัวหน่วงซึ่งมีหน้าที่ในการลดหรือเพิ่มความเร็วของรังสีแสงปรกติและรังสีแสงเกินปรกติ ทำให้ผลต่างระยะทางเชิงแสงเปลี่ยนไป 1 อันดับ ถ้าทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าของรังสีแสงปรกติในผลึกสารสั่นในทิศเดียวกับสนามไฟฟ้าของรังสีแสงเกินปรกติในตัวหน่วงจะทำให้ผลต่างระยะทางเชิงแสงลดลง 1 อันดับ แต่ถ้าทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าของรังสีแสงปรกติในผลึกสารสั่นในทิศเดียวกับสนามไฟฟ้าของรังสีแสงปรกติในตัวหน่วงจะเป็นผลให้ผลต่างระยะทางเชิงแสงเพิ่ม 1 อันดับ

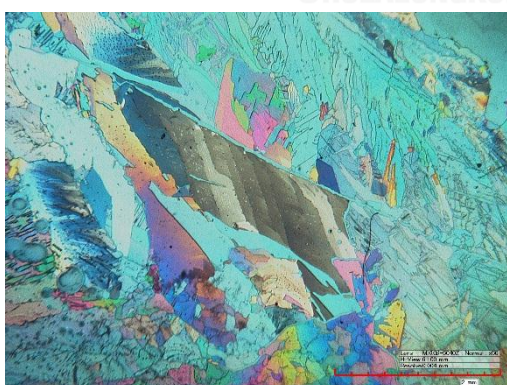
การทดลองต่อไปนี้ เป็นวิธีการประมาณความหนาของสารแอมโมเนียมไนเตรทที่เตรียมด้วยวิธีการหลอมแล้วปล่อยให้เย็นตัวภายใต้แผ่นกระจก 2 แผ่น โดยอาศัยสมบัติเชิงแสงจากการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ และตัวหน่วง ดังรูปที่ 4.13



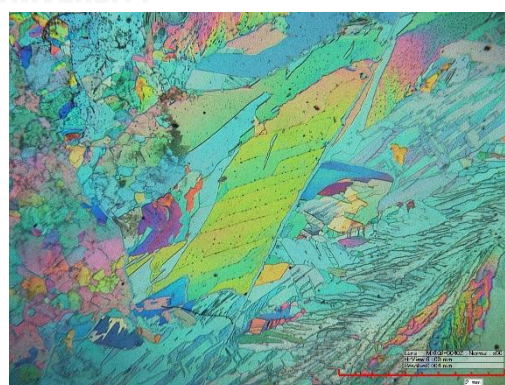
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.13 การประมาณความหนาของผลึกสารแอมโมเนียมไนเตรทโดยใช้ตัวหน่วง 632.8 นาโนเมตร (ก) ตำแหน่งสลับแสง, (ข) หมุนจากตำแหน่งสลับแสงไป 45° ได้เกรนสีฟ้า, (ค) ใส่ตัวหน่วงได้เกรนสีเทาดำ และ (ง) หมุนจาก (ข) ไป 90° พร้อมใส่ตัวหน่วงได้เกรนสีเขียวอมเหลือง

ในการหาตำแหน่งทแยงมุมเพื่อต้องการทราบสีการแทรกสอดเพื่อนำไปเทียบกับแผนภาพของมิเชล-เลวีนั้น จะต้องเริ่มจากการพิจารณาเกรนที่มีดสนิทที่ตำแหน่งสลับแสงก่อนดังรูปที่ 4.13 (ก) เมื่อหมุนแท่นวางตัวอย่างไป 45° จึงจะได้ตำแหน่งทแยงมุมที่มีความเข้มของแสงสูงสุด ดังรูปที่ 4.13 (ข) สีที่ปรากฏที่ตำแหน่งทแยงมุมคือ สีฟ้า เมื่อนำไปเทียบกับแผนภาพของมิเชล-เลวีแล้วปรากฏว่าตรงกับสีฟ้าของแผนภาพของมิเชล-เลวีในอันดับ 2 และอันดับ 3 ซึ่งมีค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงประมาณ 700 นาโนเมตร และ 1200 นาโนเมตร ตามลำดับ เพื่อจะทราบว่าสีฟ้าอยู่ในอันดับใดจึงใช้ตัวห่วงที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร มาช่วยในการระบุอันดับ โดยนำตัวห่วงนี้ใส่ในกล่องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ในตำแหน่งระหว่างแท่นวางตัวอย่าง และอะนาไลเซอร์ เกรนที่ได้มีสีเทา ดำตามรูปที่ 4.13 (ค) เมื่อเทียบกับแผนภาพของมิเชล-เลวี พบว่าเป็นสีเทาของอันดับ 1 ที่มีผลต่างระยะทางเชิงแสงอยู่ในช่วงประมาณ 30 ถึง 70 นาโนเมตร และเมื่อหมุนแท่นวางตัวอย่างไปอีก 90° พร้อมใส่ตัวห่วง เกรนที่ได้มีสีเขียวอมเหลืองตามรูปที่ 4.13 (ง) เมื่อเทียบกับแผนภาพของมิเชล-เลวี พบว่าเป็นสีเขียวอมเหลืองของอันดับ 3 ซึ่งมีผลต่างระยะทางเชิงแสงอยู่ในช่วงประมาณ 1250 ถึง 1350 นาโนเมตร

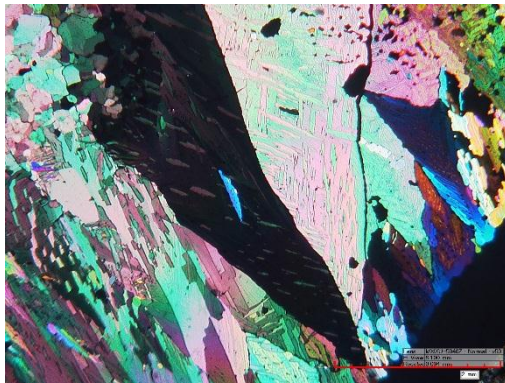
ด้วยสมบัติของตัวห่วงมีผลทำให้ผลต่างระยะทางเชิงแสงเปลี่ยนไป 1 อันดับ ดังนั้นสีเทาดำตามรูปที่ 4.13 (ค) เกิดจากผลต่างระยะทางเชิงแสงของสีฟ้าอันดับ 2 (700 นาโนเมตร) ลบกับความยาวคลื่นของตัวห่วง (632.8 นาโนเมตร) ทำให้สีเทาดำมีผลต่างระยะทางเชิงแสงประมาณ 67 นาโนเมตร และสีเขียวอมเหลืองตามรูปที่ 4.13 (ง) เกิดจากผลต่างระยะทางเชิงแสงของสีฟ้าอันดับ 2 (700 นาโนเมตร) บวกกับความยาวคลื่นของตัวห่วง (632.8 นาโนเมตร) ทำให้สีเขียวอมเหลืองมีผลต่างระยะทางเชิงแสงประมาณ 1333 นาโนเมตร ในกรณีที่ใช้ผลต่างระยะทางเชิงแสงของสีฟ้าในอันดับ 3 ประมาณ 1200 นาโนเมตร ในการพิจารณาปรากฏว่า ถ้าใช้ค่าความยาวคลื่นของตัวห่วง มาบวกและลบ สีที่ได้จะไม่ตรงกับการทดลอง ดังนั้น สีฟ้าที่ปรากฏตามรูปที่ 4.13 (ข) จึงเป็นสีฟ้าที่อยู่ในอันดับ 2 ของแผนภาพของมิเชล-เลวีที่มีผลต่างระยะทางเชิงแสงประมาณ 700 นาโนเมตร เมื่อนำค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงไปคำนวณตามสมการที่ 2.8 เมื่อค่าไบรีฟรินเจนซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทคือ 0.224 จะให้ความหนาเป็น 3.125 ± 0.223 ไมโครเมตร ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อน 0.223 นี้คำนวณมาจากช่วงของผลต่างระยะทางเชิงแสงของสีฟ้าอันดับ 2 โดยกำหนดให้มีค่าความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงประมาณ 50 นาโนเมตร ดังนั้น เราจึงสามารถประมาณความหนาของผลึกสารเคมีจากกล่องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์โดยใช้ตัวห่วงและแผนภาพของมิเชล-เลวีได้

4.6 ผลของความหนา กับสีของภาพโพลาไรซ์

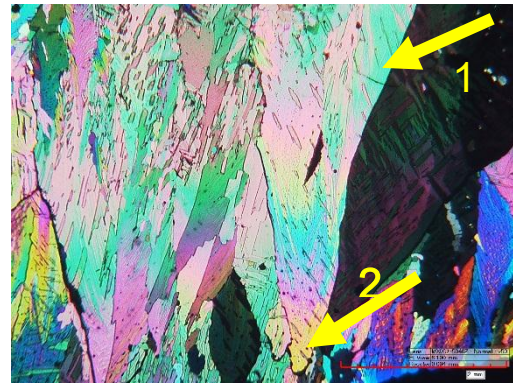
ภาพโพลาไรซ์ภายในหนึ่งเกรนมีสีการแทรกสอดอย่างหลากหลายดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.4 เรื่องตำแหน่งสลัวแสง ซึ่งสีการแทรกสอดที่หลากหลายนี้อันขึ้นกับการจัดวางตัวของแกนแสง เพราะทุกผลึกภายในหนึ่งเกรนมีการจัดวางตัวของแกนแสงในแนวเดียวกัน ดังนั้นการทดลองในหัวข้อนี้จะพิจารณาสีการแทรกสอดที่หลากหลายนี้อันขึ้นกับการจัดวางตัวของแกนแสงในแนวเดียวกัน และโพแทสเซียมไนเตรท เพื่อแสดงให้เห็นว่าสีการแทรกสอดที่หลากหลายนี้อันเป็นผลมาจากความหนาที่แตกต่างกันในแต่ละบริเวณ

4.6.1 แอมโมเนียมไนเตรท

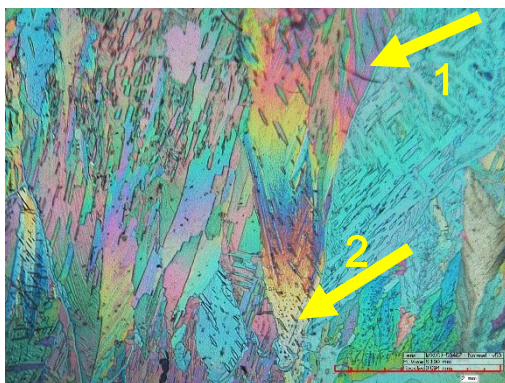
พิจารณาหนึ่งเกรนของแอมโมเนียมไนเตรทที่มีสีการแทรกสอดอย่างหลากหลายตามรูปที่ 4.14 คือ สีเขียวบริเวณที่ 1 และ สีเหลืองบริเวณที่ 2 ตามรูปที่ 4.14 (ข) แล้วใช้ตัวหน่วง 632.8 นาโนเมตร และแผนภาพของมิเชล-เลวี ในการหาค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความหนาในแต่ละบริเวณที่มีสีแตกต่างกันภายในหนึ่งเกรน พบว่าบริเวณที่ 1 เป็นสีเขียวของอันดับ 3 ที่มีผลต่างระยะทางเชิงแสง 1250 นาโนเมตร เมื่อนำค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงไปคำนวณหาค่าความหนาตามสมการที่ 2.8 เมื่อค่าไบรีฟรินเจนซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทคือ 0.224 จะได้ความหนาเป็น 5.580 ± 0.223 ไมโครเมตร สำหรับบริเวณที่ 2 จากรูปที่ 4.14 (ข) เป็นสีเหลืองของอันดับ 2 ที่มีผลต่างระยะทางเชิงแสง 900 นาโนเมตร และคำนวณหาค่าความหนาเป็น 4.018 ± 0.223 ไมโครเมตร



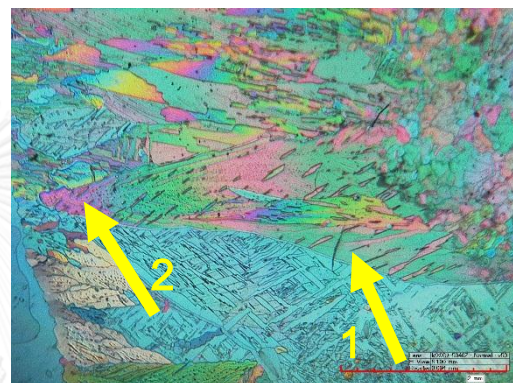
(ก)



(ข)



(ค)



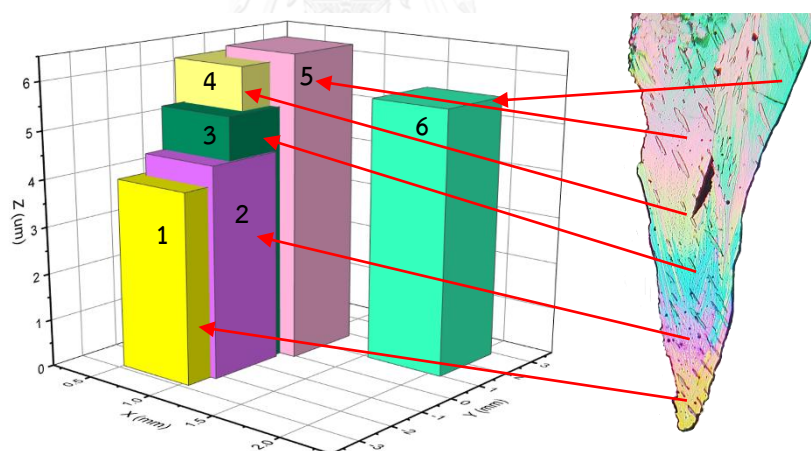
(ง)

รูปที่ 4.14 การประมาณความหนาของผลึกสารแอมโมเนียมไนเตรทที่บริเวณต่าง ๆ ภายในเกรนเดียวกันโดยใช้ตัวหน่วง 632.8 นาโนเมตร (ก) ตำแหน่งสลัวแสง, (ข) หมุนจากตำแหน่งสลัวแสงไป 45° บริเวณที่ 1 มีสีเขียว บริเวณที่ 2 มีสีเหลือง, (ค) ใส่ตัวหน่วง บริเวณที่ 1 มีสีม่วง บริเวณที่ 2 มีสีขาวอมเหลือง และ (ง) หมุนจาก (ข) ไป 90° พร้อมใส่ตัวหน่วง บริเวณที่ 1 มีสีเขียว และบริเวณที่ 2 มีสีชมพูอมม่วง

บริเวณอื่นภายในหนึ่งเกรนของรูปที่ 4.14 ที่มีสีการแทรกสอดแตกต่างกันสามารถประมาณความหนาด้วยวิธีเดียวกันได้ ข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสีที่เกิดขึ้น อันดับ ผลต่างระยะทางเชิงแสง และความหนา จะแสดงดังตารางที่ 4.3 และเมื่อนำความหนามาเขียนเป็นแผนภูมิแสดงการกระจายตัวของความหนาที่บริเวณต่าง ๆ จะได้ดังรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่เกิดขึ้น อันดับ ผลต่างระยะทางเชิงแสง และความหนา จากรูปที่ 4.14 ของแอมโมเนียมไนเตรทที่มีค่าไอริฟรินเจนซ์ 0.224

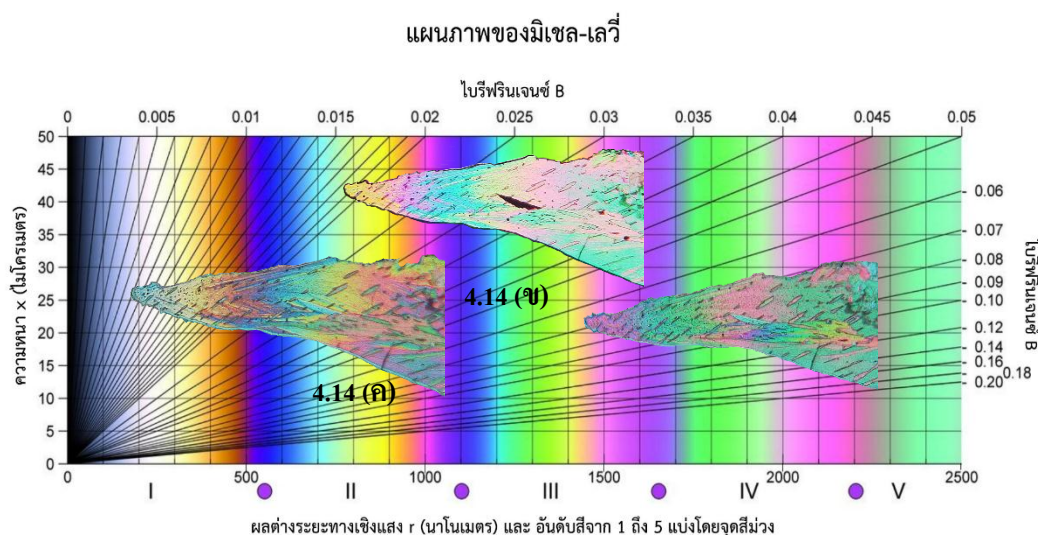
| ตำแหน่ง 45° รูปที่ 4.14 (ข) | | | ตำแหน่ง 45° และใส่ตัวท่วง (ลด) รูปที่ 4.14 (ค) | | | หมุนจากตำแหน่ง 45° ไปอีก 90° และใส่ตัวท่วง (เพิ่ม) รูปที่ 4.14 (ง) | | | ความหนา (ไมโครเมตร) |
|--------------------------------|--------|--|---|--------|--|--|--------|--|------------------------|
| สี | อันดับ | ผลต่าง ระยะทาง เชิงแสง (นาโนเมตร) | สี | อันดับ | ผลต่าง ระยะทาง เชิงแสง (นาโนเมตร) | สี | อันดับ | ผลต่าง ระยะทาง เชิงแสง (นาโนเมตร) | |
| 1 เหลือง | 2 | 900 | เหลือง | 1 | 267 | ชมพู | 3 | 1533 | 4.018 |
| 2 ชมพู | 2 | 1000 | ส้ม | 1 | 367 | ม่วง | 3 | 1633 | 4.464 |
| 3 เขียว | 3 | 1200 | น้ำเงิน | 2 | 567 | เขียว | 4 | 1833 | 5.357 |
| 4 เหลือง | 3 | 1400 | ฟ้า | 2 | 767 | ชมพู | 4 | 2033 | 6.250 |
| 5 ชมพู | 3 | 1450 | เหลือง | 2 | 817 | ชมพู | 4 | 2083 | 6.473 |
| 6 เขียว | 3 | 1250 | ม่วง | 2 | 617 | เขียว | 4 | 1883 | 5.580 |



รูปที่ 4.15 แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของความหนาที่บริเวณต่าง ๆ ภายในหนึ่งเกรนของแอมโมเนียมไนเตรท

จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าความหนาของแอมโมเนียมไนเตรทที่เตรียมด้วยวิธีการหลอมแล้วปล่อยให้เย็นตัวมีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ โดยสีเหลืองของอันดับ 2 ที่มีผลต่างระยะทางเชิงแสง 900 นาโนเมตร มีความหนาน้อยที่สุดคือ 4.018 ไมโครเมตร และความหนามากที่สุดคือสี

ชมพูของอันดับ 2 ที่มีผลต่างระยะทางเชิงแสง 1450 นาโนเมตร ซึ่งมีความหนา 6.473 ไมโครเมตร จะเห็นว่าพื้นที่ภายในเกรนนี้ตั้งแต่พื้นที่สีเหลืองของอันดับ 2 มีความหนาเพิ่มขึ้น จนถึงพื้นที่สีชมพูของอันดับ 3 และนอกจากนี้ยังพบการไล่ระดับสีที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความหนาซึ่งสอดคล้องกับแผนภาพของมิเชล-เลวีดังรูปที่ 4.16

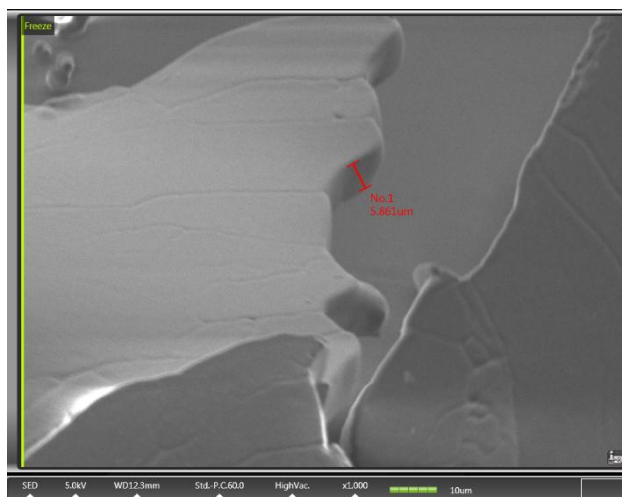


รูปที่ 4.16 การไล่ระดับสีของภาพโพลาไรซ์ในอันดับที่ 1 ถึง 3 ที่สอดคล้องกับแผนภาพของมิเชล-เลวี

จากรูปที่ 4.16 พบว่าสีที่เกิดขึ้นของภาพโพลาไรซ์ที่ได้จากรูปที่ 4.14 (ค) 4.14 (ข) และ 4.14 (ง) มีการไล่ระดับสี โดยรูปที่ 4.14 (ค) มีการไล่ระดับสีที่สอดคล้องกับแผนภาพของมิเชล-เลวี ตั้งแต่สีเหลืองของอันดับ 1 ถึง สีม่วงอันดับ 2 โดยรูปที่ 4.14 (ข) มีการไล่ระดับสีที่สอดคล้องกับแผนภาพของมิเชล-เลวี ตั้งแต่สีเหลืองของอันดับ 2 ถึง สีเขียวอันดับ 3 และมีความหนาอยู่ในช่วง 4.018 ถึง 5.580 นาโนเมตร ส่วนรูปที่ 4.14 (ง) มีการไล่ระดับสีที่สอดคล้องกับแผนภาพของมิเชล-เลวี ตั้งแต่สีชมพูของอันดับ 3 ถึง สีเขียวอันดับ 4 ซึ่งการไล่ระดับสีนี้จะทำให้เราทราบถึงความหนาที่แตกต่างกันในแต่ละบริเวณ

ดังนั้นจากการประมาณความหนาภายในหนึ่งเกรนของแอมโมเนียมไนเตรทโดยใช้ตัวหน่วงที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร และแผนภาพของมิเชล-เลวี พบว่าสีที่เกิดขึ้นแต่ละสีภายในหนึ่งเกรนเกิดจากความแตกต่างของความหนา และยังพบการไล่ระดับของสีที่สอดคล้องกับแผนภาพของมิเชล-เลวี อีกด้วย

เพื่อที่จะเปรียบเทียบค่าความหนาของสารเคมีที่เตรียมด้วยวิธีการหลอมแล้วปล่อยให้เย็นตัว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ ซึ่งประมาณจากการใช้สมบัติเชิงแสง ก็กับการวัดความหนา ด้วยเครื่องมืออื่นว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด ผู้วิจัยจึงได้นำกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมาใช้ในการวัดความหนาของผลึกสารแอมโมเนียมไนเตรทที่บริเวณที่ 1 พบว่าได้ความหนาประมาณ 5.861 ไมโครเมตร ตามรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ความหนาของผลึกสารแอมโมเนียมไนเตรทประมาณ 5.861 ไมโครเมตร ที่กำลังขยาย 1000 เท่า วัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

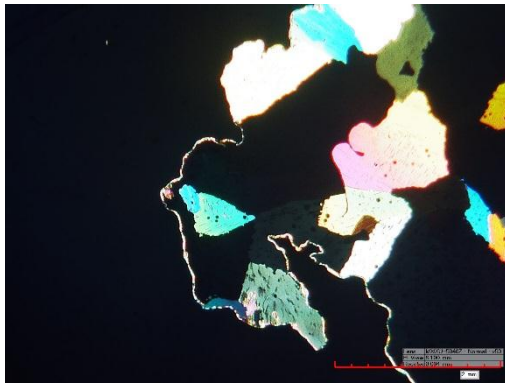
จากการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ประมาณความหนาของผลึกสารแอมโมเนียมไนเตรทที่เตรียมโดยการหลอมแล้วปล่อยให้เย็นตัว จากรูปที่ 4.14 (ข) ในบริเวณที่ 1 ได้ความหนาประมาณ 5.580 ไมโครเมตร แต่เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดวัดความหนาได้ประมาณ 5.861 ไมโครเมตร โดยค่าความหนาที่ประมาณได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์มีความแตกต่างจากค่าที่วัดโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดอยู่ร้อยละ 4.79 ซึ่งความหนาที่วัดโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีค่ามากกว่านี้อาจจะเกิดจากการเตรียมตัวอย่างเพื่อนำไปวัดความหนา จะต้องเปิดกระจกปิดสไลด์ออก เนื่องจากสารแอมโมเนียมไนเตรทมีสมบัติในการดูดความชื้น ผลึกสารแอมโมเนียมไนเตรทที่ถูกเปิดกระจกปิดสไลด์ออกจึงดูดความชื้นอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ความหนาเพิ่มขึ้น ในการประมาณความหนาด้วยวิธีการใช้ตัวหน่วงและแผนภาพของมิเชล-เลวีเป็นอีกวิธีการหนึ่งสำหรับการประมาณความหนาในระดับไมครอนซึ่งทำได้โดยไม่ต้องเปิดกระจกสไลด์ออก ถึงแม้สารจะอยู่ระหว่างแผ่นกระจกสองแผ่นก็ตาม

4.6.2 โฟแทสซีเอ็มไนเตรท

สำหรับการประมาณความหนาของโฟแทสซีเอ็มไนเตรทที่เตรียมด้วยการหลอมแล้วปล่อยให้เย็นตัวทำโดยการพิจารณาสีที่แตกต่างกันในเกรนเดียวกันตามรูปที่ 4.18 (ข) ได้แก่ สีชมพู สีฟ้าเขียว และสีเหลือง จากการประมาณความหนาโดยใช้ตัวหน่วง 500 นาโนเมตร และแผนภาพของมิเชล-เลวี จะยกตัวอย่างการประมาณความหนาของโฟแทสซีเอ็มไนเตรทในบริเวณที่ 1 ของรูปที่ 4.18 (ข) คือ บริเวณที่มีสีชมพูมีผลต่างระยะทางประมาณ 1000 นาโนเมตร เนื่องจากเมื่อใส่ตัวหน่วง 500 นาโนเมตร สีชมพูเปลี่ยนเป็นสีชมพูของอันดับ 3 ที่มีผลต่างระยะทางเชิงแสงประมาณ 1500 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากผลต่างระยะทางเชิงแสงของสีชมพูอันดับ 2 บวกกับความยาวคลื่นของตัวหน่วง (1000 + 500) และเมื่อหมุนแท่นวางตัวอย่างไป 90° พร้อมใส่ตัวหน่วง พบว่าสีชมพูเปลี่ยนเป็นสีม่วงน้ำเงินของอันดับ 1 ที่มีผลต่างระยะทางเชิงแสงประมาณ 500 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากผลต่างระยะทางเชิงแสงของสีชมพูอันดับ 2 ลบกับความยาวคลื่นของตัวหน่วง (1000 - 500) ดังนั้นทำให้เราทราบว่า บริเวณที่ 1 เป็นสีชมพูของอันดับ 2 ที่มีผลต่างระยะทางเชิงแสง 1000 นาโนเมตร เมื่อนำค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงไปคำนวณตามสมการที่ 2.7 เมื่อค่าไบรีฟรินเจนซ์ของโฟแทสซีเอ็มไนเตรทคือ 0.171 จะได้ความหนาเป็น 5.848 ± 0.117 ไมโครเมตร ดังนั้นเราสามารถประมาณความหนาของผลึกสารเคมีที่บริเวณอื่น ๆ ด้วยวิธีเดียวกันจะได้ค่าความหนาดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่เกิดขึ้น อันดับ ผลต่างระยะทางเชิงแสง และความหนาจากรูปที่ 4.18 ของโฟแทสซีเอ็มไนเตรทที่มีค่าไบรีฟรินเจนซ์ 0.171

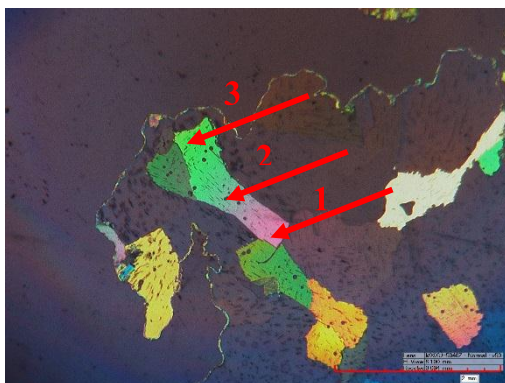
| ตำแหน่ง 45° รูปที่ 4.18 (ข) | | | ตำแหน่ง 45° และใส่ตัวหน่วง (เพิ่ม) รูปที่ 4.18 (ค) | | | หมุนจากตำแหน่ง 45° ไปอีก 90° และใส่ตัวหน่วง (ลด) รูปที่ 4.18 (ง) | | | ความหนา (ไมโครเมตร) |
|--------------------------------|--------|--|---|--------|--|--|--------|--|------------------------|
| สี | อันดับ | ผลต่าง ระยะทาง เชิงแสง (นาโนเมตร) | สี | อันดับ | ผลต่าง ระยะทาง เชิงแสง (นาโนเมตร) | สี | อันดับ | ผลต่าง ระยะทาง เชิงแสง (นาโนเมตร) | |
| ชมพู | 2 | 1000 | ชมพู | 3 | 1500 | ม่วงน้ำเงิน | 1 | 500 | 5.848 |
| ฟ้าเขียว | 3 | 1200 | ม่วง | 4 | 1700 | ฟ้า | 2 | 700 | 7.018 |
| เหลือง | 3 | 1400 | เขียว | 4 | 1900 | เหลือง | 2 | 900 | 8.187 |



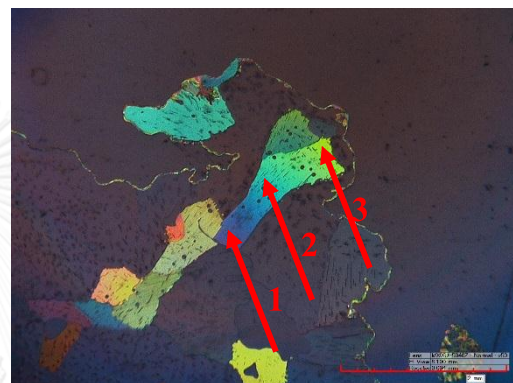
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.18 การประมาณความหนาของผลึกสารโพลีเอทิลีนในเตรทที่บริเวณต่าง ๆ ภายในหนึ่งเกรน โดยใช้ตัวหน่วง 500 นาโนเมตร (ก) ตำแหน่งสลัวแสง, (ข) หมุนจากตำแหน่งสลัวแสงไป 45° บริเวณที่ 1 มีสีชมพู บริเวณที่ 2 มีสีฟ้าเขียว และบริเวณที่ 3 มีสีเหลือง, (ค) ใส่ตัวหน่วง บริเวณที่ 1 มีสีชมพู บริเวณที่ 2 มีสีม่วง และบริเวณที่ 3 มีสีเขียว และ (ง) หมุนจาก (ข) ไป 90° พร้อมใส่ตัวหน่วง บริเวณที่ 1 มีสีม่วงน้ำเงิน บริเวณที่ 2 มีสีฟ้า และบริเวณที่ 3 มีสีเหลือง

จะเห็นได้ว่าเกรนที่พิจารณาตามรูปที่ 4.18 (ข) ซึ่งบริเวณที่มีสีชมพู สีฟ้าเขียว และสีเหลือง มีความหนาแตกต่างกัน ซึ่งความหนาของโพลีเอทิลีนในเตรทที่เตรียมด้วยวิธีการหลอมแล้วปล่อยให้เย็นตัวมีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ โดยสีชมพูของอันดับ 2 มีความหนาน้อยที่สุดคือ 5.848 ไมโครเมตร และความหนามากที่สุด คือ สีเหลืองของอันดับ 3 ซึ่งมีความหนา 8.187 ไมโครเมตร

การประมาณความหนาของสารเคมีพบว่าภาพโพลาไรซ์ของเกรนหนึ่งเกรนแสดงสีการแทรกสอดอย่างหลากหลายซึ่งเป็นผลมาจากความหนาที่แตกต่างกัน การเตรียมสารเคมีด้วยวิธีการหลอมแล้วปล่อยให้เย็นตัวควรเตรียมสารให้มีความหนาที่เหมาะสม คือ สามารถใช้ตัวหน่วงในการหาค่าผลต่างระยะทางเชิงแสงได้ กล่าวคือ ถ้าเราเตรียมสารเคมีบางมาก ๆ สีของภาพโพลาไรซ์ที่ได้จะ

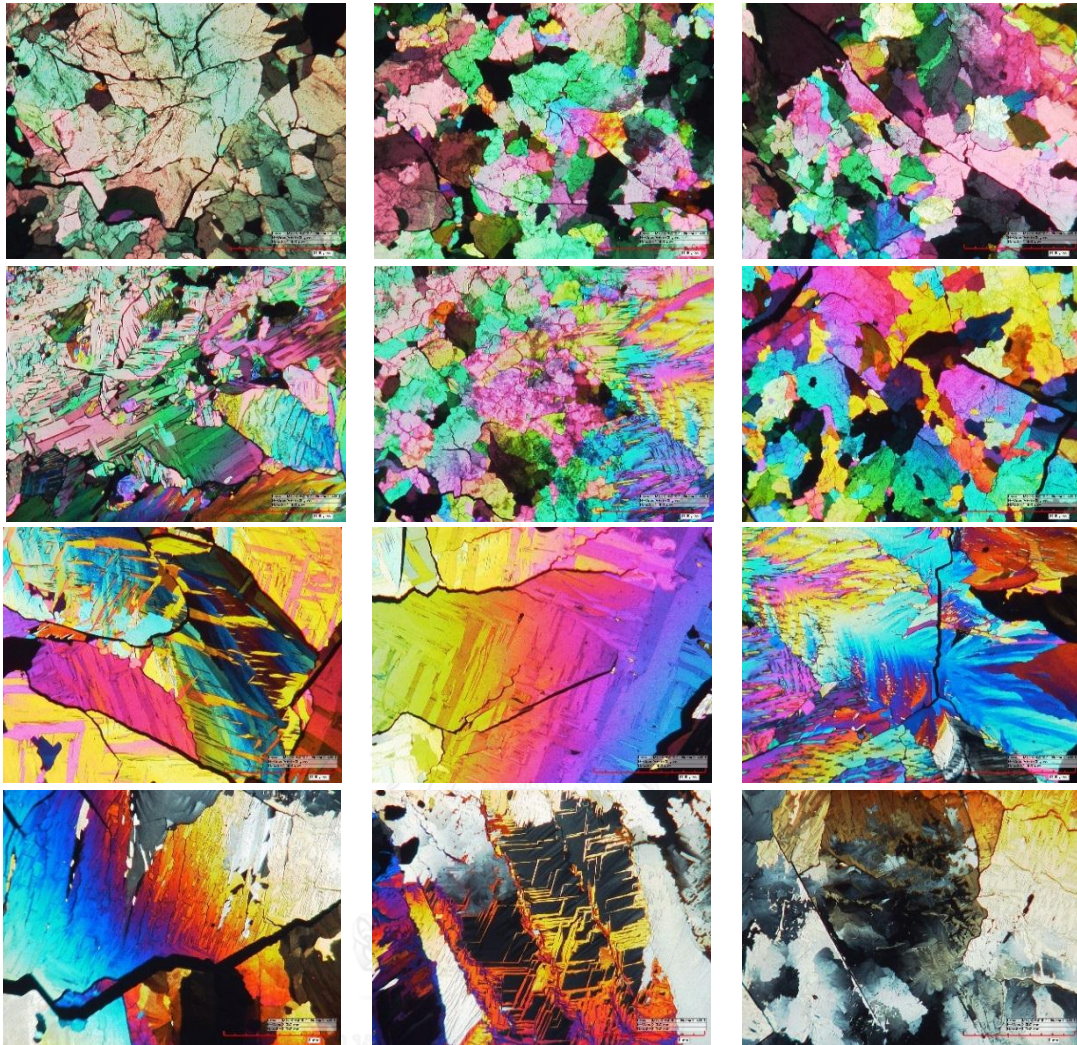
ปรากฏอยู่ในอันดับที่ 1 ของแผนภาพมิเชล-เลวี หรือหากสารเคมีมีความหนาแน่นมากเกินไป สีของภาพโพลาไรซ์จะอยู่ในช่วงกว้างในอันดับสูง ๆ ของแผนภาพมิเชล-เลวี ทำให้ไม่สามารถใช้ตัวหน่วงในการหาค่าผลต่างระยะทางได้ เนื่องจากสีที่ปรากฏก่อนและหลังจากใส่ตัวหน่วงเปลี่ยนแปลงน้อย ดังนั้น ความหนาของแอมโมเนียมไนเตรทที่เหมาะสมควรจะอยู่ในช่วงผลต่างระยะทางเชิงแสงในอันดับที่ 2 และ 3 ซึ่งมีความหนาประมาณ 2.455 ไมโครเมตร ถึง 6.920 ไมโครเมตร ส่วนโพแทสเซียมไนเตรทมีความหนาในช่วงประมาณ 3.216 ไมโครเมตร ถึง 9.064 ไมโครเมตร

4.7 รูปแบบภาพโพลาไรซ์ของสารเคมีมาตรฐาน

จากการศึกษาสมบัติเชิงแสงของสารเคมีโดยการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ ภาพโพลาไรซ์ของสารแอมโมเนียมไนเตรท และโพแทสเซียมไนเตรท จะแสดงรูปแบบภาพโพลาไรซ์ที่แตกต่างกัน อาจจะนำมาใช้เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละสารเคมี การทดลองนี้จะเป็นการศึกษาลักษณะเฉพาะของรูปแบบภาพโพลาไรซ์ของสารแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐาน และโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐาน

4.7.1 รูปแบบภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐาน

การเตรียมตัวอย่างสารแอมโมเนียมไนเตรทจากการหลอมแล้วปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว จะได้ตัวอย่างที่มีฟองอากาศน้อย ทำให้ได้ภาพโพลาไรซ์ที่มีสีสันอย่างหลากหลายเหมาะสำหรับการนำมาวิเคราะห์ รูปแบบภาพโพลาไรซ์ที่ถ่ายด้วยกำลังขยาย 100 เท่า จะได้ตามรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ตัวอย่างรูปแบบภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียมไนเตรท

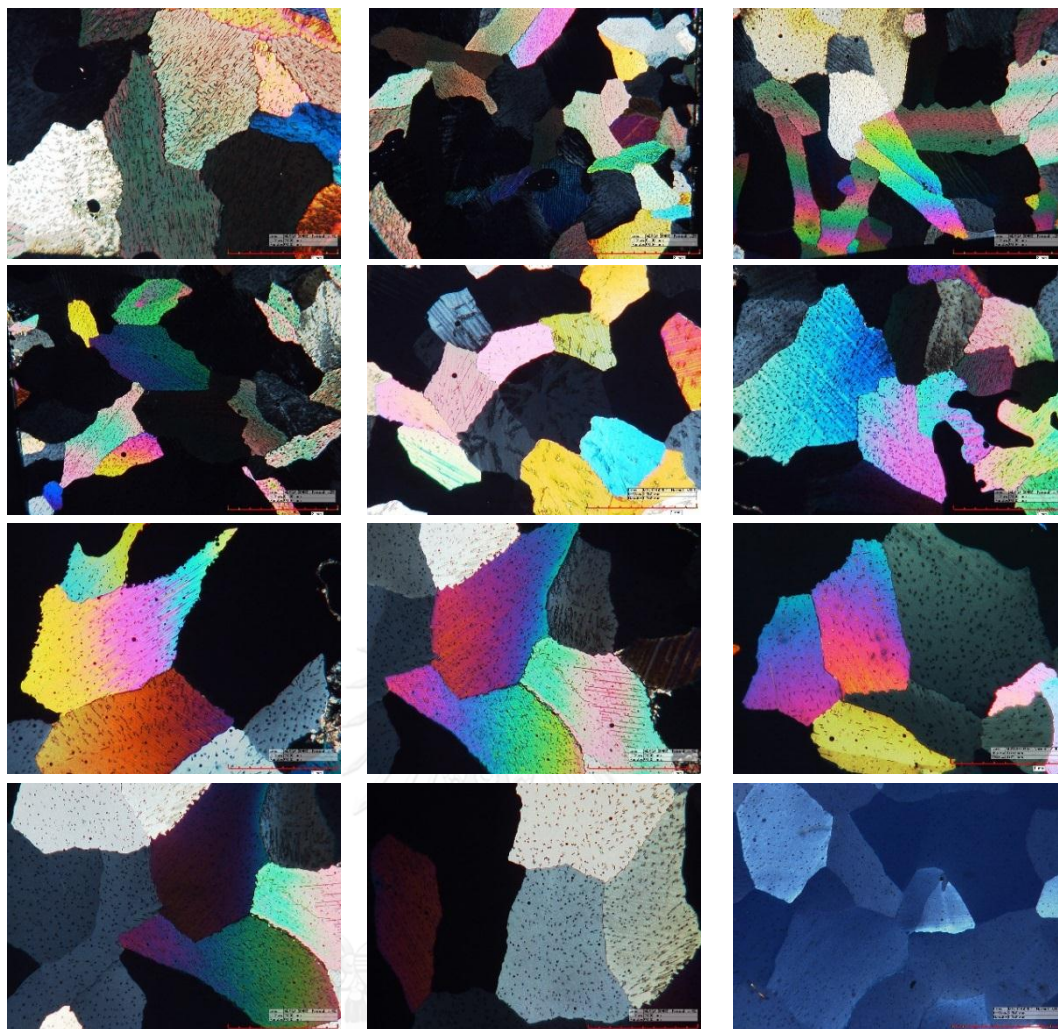
จากรูปที่ 4.19 จะเห็นว่ารูปแบบภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทจะมีลักษณะของเกรนที่ซ้อนทับกัน ทำให้สังเกตเห็นขอบเกรนไม่ชัดเจน ไม่สามารถแยกเกรนแต่ละเกรนได้จากขอบเกรน เส้นสีดำที่ปรากฏเป็นรอยแตกอาจเกิดจากการเย็นตัวของสารซึ่งไม่ใช่ขอบเกรน จึงต้องอาศัยตำแหน่งสลัวแสงในการหาขอบเกรน ทั้งนี้เมื่อหมุนเกรนที่มีเส้นสีดำไปยังตำแหน่งสลัวแสงแล้วพบว่า บริเวณรอบ ๆ เส้นสีดำของรอยแตกนั้นจะมีติดพร้อมกัน แสดงให้เห็นว่าบริเวณดังกล่าวเป็นเกรนเดียวกัน ไม่ได้ถูกแยกโดยรอยแตกนี้ เนื่องจากภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทมีลักษณะเกรนที่ซ้อนทับกัน ซึ่งภายในหนึ่งเกรนจะปรากฏสีของการแทรกสอดหลายสี บางตำแหน่งภายในเกรนจะมีลักษณะเป็นเส้น ๆ คล้ายรอยขีดข่วน และสีของรอยขีดข่วนนี้แตกต่างไปจากสีของเกรนโดยส่วนใหญ่

ลักษณะเช่นนี้แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของเกรนนั้นมีลักษณะขรุขระ ผิวไม่เรียบเสมอกัน ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาของสารเคมีในแต่ละบริเวณทำให้สีของภาพโพลาไรซ์เปลี่ยนแปลงไป ภาพโพลาไรซ์บริเวณที่มีสีเขียวและสีชมพูส่วนใหญ่จะเป็นเกรนขนาดเล็ก เมื่อพิจารณาจากแผนภาพของมิเชล-เลวีพบว่าสีเขียวและสีชมพูจะมีผลต่างระยะทางเชิงแสงตั้งแต่ 1700 นาโนเมตร ขึ้นไป ซึ่งมีความหนามากกว่า 7.59 ไมโครเมตร ส่วนภาพโพลาไรซ์บริเวณที่มีสีส้ม สีน้ำเงิน และสีเทา จะมีผลต่างระยะทางเชิงแสงอยู่ในช่วง 200 ถึง 600 นาโนเมตร ซึ่งมีความหนาอยู่ในช่วง 0.89 ถึง 2.68 ไมโครเมตร

4.7.2 รูปแบบภาพโพลาไรซ์ของโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐาน

ในการเตรียมตัวอย่างสารโพแทสเซียมไนเตรทเพื่อให้ได้ภาพโพลาไรซ์ที่มีสีสันทนอย่างหลากหลายและไม่มีฟองอากาศจะเตรียมเช่นเดียวกับแอมโมเนียมไนเตรท คือ การหลอมแล้วปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว รูปแบบภาพโพลาไรซ์ที่ถ่ายด้วยกำลังขยาย 100 เท่า จะแสดงตามรูปที่ 4.20

จากรูปที่ 4.20 จะเห็นว่ารูปแบบภาพโพลาไรซ์ของโพแทสเซียมไนเตรทมีลักษณะของเกรนที่ไม่ซ้อนทับกันเหมือนแอมโมเนียมไนเตรท จึงสามารถสังเกตเห็นขอบเกรนได้ชัดเจน ไม่ต้องอาศัยตำแหน่งสลัวแสงในการหาขอบเกรน ลักษณะภายในเกรนไม่มีรอยขีดข่วน และสีของภาพโพลาไรซ์ภายในเกรนเดียวกันมีความต่อเนื่องตามแผนภาพของมิเชล-เลวี แสดงให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวของเกรนมีความเรียบ และความหนาภายในเกรนเดียวกันที่มีสีต่างกันเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างต่อเนื่อง สีภาพโพลาไรซ์ในบริเวณที่มีสีเขียวและสีชมพูเป็นส่วนใหญ่นั้น เมื่อพิจารณาจากแผนภาพของมิเชล-เลวีพบว่าสีเขียวและสีชมพูจะมีผลต่างระยะทางเชิงแสงตั้งแต่ 1700 นาโนเมตร ขึ้นไป ซึ่งมีความหนามากกว่า 9.90 ไมโครเมตร ส่วนภาพโพลาไรซ์บริเวณที่มีสีเทา จะมีผลต่างระยะทางเชิงแสงอยู่ในช่วง 200 ถึง 600 นาโนเมตร ซึ่งมีความหนาอยู่ในช่วง 1.17 ถึง 3.51 ไมโครเมตร



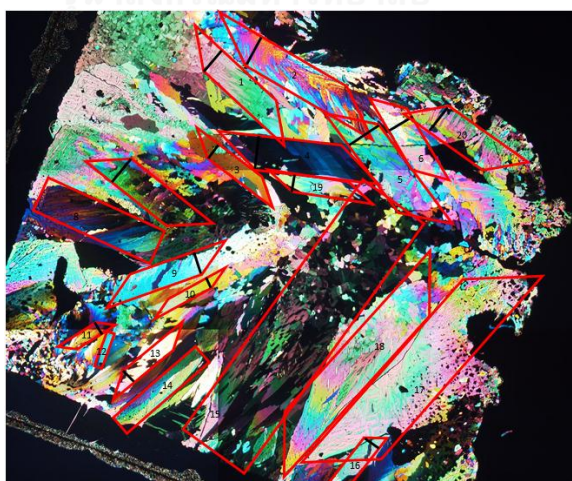
รูปที่ 4.20 ตัวอย่างรูปแบบภาพโพลาไรซ์ของโพแทสเซียมไนเตรท

จากการศึกษาสมบัติเชิงแสงของสารเคมีโดยการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ ภาพโพลาไรซ์ของสารแอมโมเนียมไนเตรท และโพแทสเซียมไนเตรท แสดงรูปแบบภาพโพลาไรซ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างเหล่านี้มาจากการสังเกตลักษณะเกรนของภาพโพลาไรซ์ โดยแอมโมเนียมไนเตรทจะมีเกรนขนาดเล็กและภายในเกรนมีลักษณะคล้ายรอยขีดข่วน ส่วนโพแทสเซียมไนเตรทจะมีเกรนขนาดใหญ่และภายในเกรนมีลักษณะคล้ายจุดกระจายอยู่ทั่วเกรน เนื่องจากผลการสังเกตรูปแบบภาพโพลาไรซ์ของแต่ละบุคคลอาจจะแตกต่างกัน ผู้วิจัยจึงเสนอวิธีแยกความแตกต่างของลักษณะเกรนของแอมโมเนียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทออกมาในเชิงตัวเลขโดยใช้ค่าอัตราส่วนภาพ (aspect ratio) เพื่อความสะดวกในการจำแนกเกรนของสารเคมีทั้งสองชนิด

4.8 การใช้ค่าอัตราส่วนภาพ (aspect ratio) แสดงลักษณะเกรนของสารเคมี

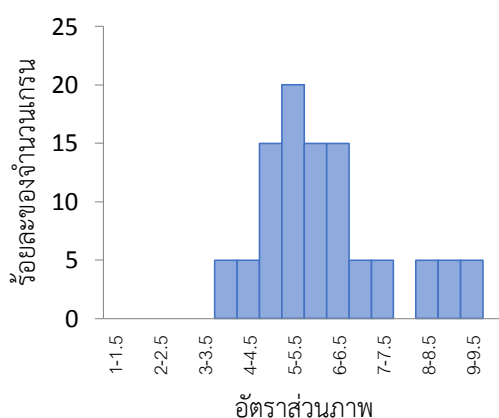
รูปแบบภาพโพลาไรซ์ของสารแอมโมเนียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทมีความแตกต่างกันตามหัวข้อที่ 4.7 และเมื่อพิจารณารูปร่างของเกรนของสารเคมีทั้งสอง พบว่า สารโพแทสเซียมไนเตรทจะมีรูปร่างของเกรนลักษณะค่อนข้างจะเป็นรูปสี่เหลี่ยม ที่มีความกว้างและความยาวไม่ต่างกันมาก ซึ่งแตกต่างจากแอมโมเนียมไนเตรทที่มีลักษณะรูปร่างของเกรนหลากหลายหรือมีความกว้างและความยาวที่ต่างกันค่อนข้างมาก ดังนั้น การวิเคราะห์และแยกแยะรูปร่างของเกรนของสารเคมีทั้งสองให้ออกมาในเชิงตัวเลขจะทำให้สามารถจำแนกลักษณะของเกรนของสารเคมีทั้งสองได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ใช้อัตราส่วนภาพ (aspect ratio) มาใช้ในการวิเคราะห์และแยกแยะลักษณะเกรน

อัตราส่วนภาพ คือ อัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของภาพ เช่น ภาพที่มีความยาว 1 ส่วน และความกว้าง 1 ส่วน จะมีอัตราส่วนภาพจะเป็น 1 ดังนั้น ภาพที่ได้จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ภาพที่มีความยาว 4 ส่วน และความกว้าง 3 ส่วน จะมีอัตราส่วนภาพเป็น 1.3 ภาพจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ยิ่งค่าอัตราส่วนภาพมีค่าเข้าใกล้ 1 รูปร่างที่ได้จะมีลักษณะค่อนข้างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส เราจะนำภาพโพลาไรซ์ของเกรนแต่ละเกรนที่ถ่ายได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์มาหาอัตราส่วนภาพ เพื่อดูลักษณะของเกรนว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกับรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยการนำกรอบสี่เหลี่ยม ได้แก่ สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า และสี่เหลี่ยมด้านขนาน มาวางภายในเกรนที่พิจารณา โดยให้กรอบสี่เหลี่ยมนี้ครอบคลุมพื้นที่ของเกรนและมีพื้นที่ใกล้เคียงกับพื้นที่ของเกรนที่พิจารณามากที่สุด ดังรูปที่ 4.21



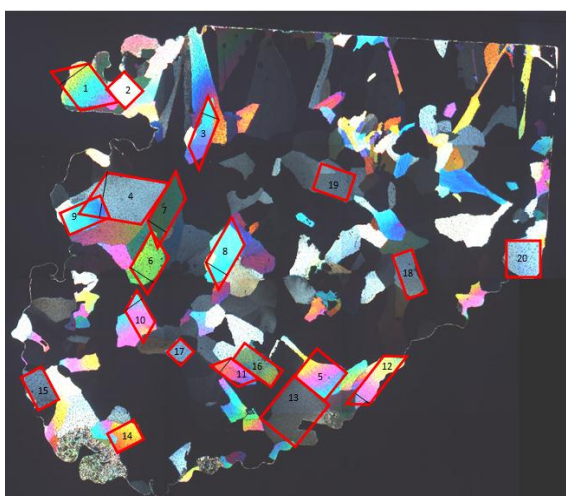
รูปที่ 4.21 การนำกรอบสี่เหลี่ยมมาวางภายในเกรนเพื่อหาค่าอัตราส่วนภาพจากภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียมไนเตรท

จากการนำกรอบสี่เหลี่ยมมาวางภายในเกรนที่ได้จากภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทจำนวน 20 เกรน และหาค่าอัตราส่วนภาพของกรอบสี่เหลี่ยมที่อยู่ภายในเกรนแต่ละเกรน พบว่าเกรนของแอมโมเนียมไนเตรทมีค่าอัตราส่วนภาพที่อยู่ในช่วงกว้างตั้งแต่ 3.5 ถึง 9.5 แสดงให้เห็นว่าลักษณะรูปร่างของเกรนมีหลากหลาย โดยเกรนส่วนใหญ่มีอัตราส่วนภาพอยู่ในช่วง 4.5 ถึง 6.5 ตามรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่ารูปร่างเกรนของแอมโมเนียมไนเตรทส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั่นหมายความว่าเกรนของแอมโมเนียมไนเตรทส่วนใหญ่จะค่อนข้างเป็นเกรนที่ยาว

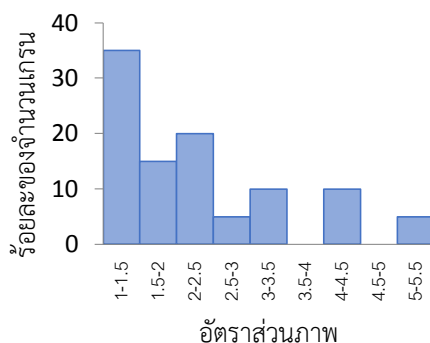


รูปที่ 4.22 อัตราส่วนภาพเกรนของแอมโมเนียมไนเตรท

ลักษณะเกรนของโพแทสเซียมไนเตรทแตกต่างจากเกรนของแอมโมเนียมไนเตรท เมื่อนำภาพโพลาไรซ์ของเกรนหนึ่งเกรนของโพแทสเซียมไนเตรทมาหาค่าอัตราส่วนภาพด้วยวิธีเดียวกันกับแอมโมเนียมไนเตรท เพื่อดูรูปร่างของเกรนจากการนำกรอบสี่เหลี่ยมมาวางภายในเกรนจำนวน 20 เกรน ตามรูปที่ 4.23



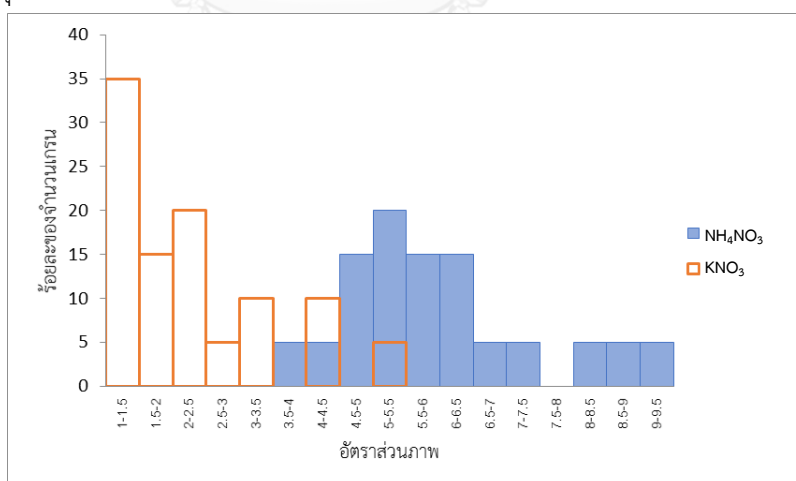
รูปที่ 4.23 การนำกรอบสี่เหลี่ยมมาวางภายในเกรนเพื่อหาค่าอัตราส่วนภาพจากภาพโพลาไรซ์ของโพแทสเซียมไนเตรท



รูปที่ 4.24 อัตราส่วนภาพเกรนของโพแทสเซียมไนเตรท

ค่าอัตราส่วนภาพของโพแทสเซียมไนเตรทอยู่ในช่วงตั้งแต่ 1 ถึง 5.5 โดยเกรนส่วนใหญ่มีอัตราส่วนภาพอยู่ในช่วง 1 ถึง 2.5 ตามรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่ารูปร่างของเกรนของโพแทสเซียมไนเตรทส่วนใหญ่มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ค่าอัตราส่วนภาพของสารเคมีทั้งสองชนิดอยู่ในช่วงที่แตกต่างกันตามรูปที่ 4.25 โดยอัตราส่วนภาพของแอมโมเนียมไนเตรทส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 4.5 ถึง 6.5 แสดงให้เห็นว่ารูปร่างของเกรนของแอมโมเนียมไนเตรทส่วนใหญ่มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและเป็นเกรนที่ยาว ส่วนโพแทสเซียมไนเตรทมีค่าอัตราส่วนภาพส่วนใหญ่เข้าใกล้ 1 และอยู่ในช่วงประมาณ 1 ถึง 2.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลักษณะเกรนของโพแทสเซียมไนเตรทส่วนใหญ่มีลักษณะเกรนที่สั้นขนาดใกล้เคียงกับรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส



รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบอัตราส่วนภาพของแอมโมเนียมไนเตรท (ฟ้า) และโพแทสเซียมไนเตรท (ส้ม)

เนื่องจากรูปร่างของเกรนของแอมโมเนียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทมีความแตกต่างกัน โดยค่าอัตราส่วนภาพของสารเคมีทั้งสองมีค่าอยู่ในช่วงแตกต่างกัน เราสามารถนำค่าอัตราส่วน

ภาพนี้มาใช้ในการแสดงลักษณะเฉพาะของเกรนของสารเคมีทั้งสองนี้ได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกชนิดของสารแอมโมเนียมไนเตรท และโพแทสเซียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุได้ เนื่องจากสารแอมโมเนียมไนเตรทเป็นสารเคมีที่กำหนดในยุทธภัณฑ์ที่ต้องขออนุญาต ส่วนโพแทสเซียมไนเตรทนั้นไม่ใช่ แต่ดินดำที่มีโพแทสเซียมไนเตรทเป็นส่วนผสมจึงจะเป็นสารเคมีที่กำหนดในยุทธภัณฑ์ที่ต้องขออนุญาต ดังนั้นถ้าบุคคลใดมีสารแอมโมเนียมไนเตรทไว้ในครอบครองก็ จะมีความผิด เราจึงต้องแยกแยะสารเคมีแต่ละชนิดให้ได้ว่าเป็นสารเคมีชนิดใด การแยกสารเคมี แอมโมเนียมไนเตรท และโพแทสเซียมไนเตรท ด้วยลักษณะของเกรนจากการใช้อัตราส่วนภาพเป็นอีก วิธีหนึ่งที่สามารถทำได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายมากเมื่อเทียบกับการใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ชั้นสูง เช่น เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

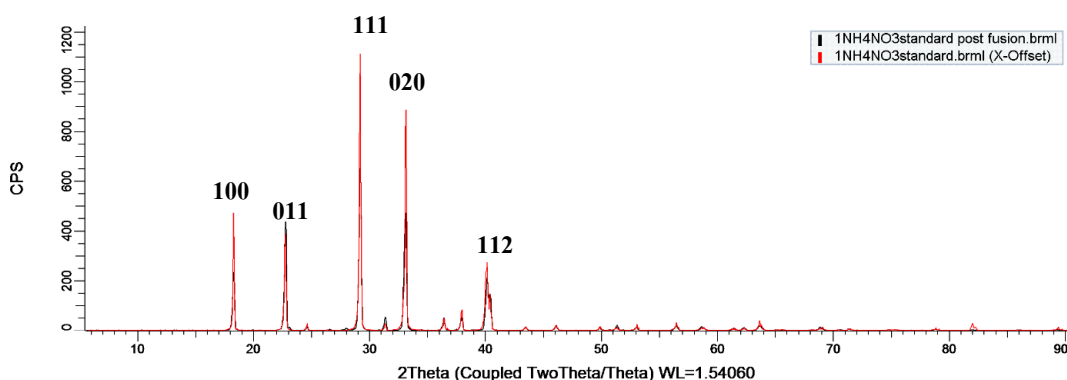
4.9 ผลการวิเคราะห์ผลึกสารเคมีก่อนและหลังให้ความร้อนจากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบน รังสีเอ็กซ์

เนื่องจากสารเคมีที่นำมาใช้ในการศึกษาสมบัติเชิงแสงโดยการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์ แบบแสงโพลาไรซ์นั้น มีการเตรียมสารเคมีด้วยวิธีการให้ความร้อนจนสารเคมีถึงจุดหลอมเหลวแล้ว ปล่อยให้เย็นตัวกลายเป็นผลึก ผู้วิจัยได้นำเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์มาศึกษาระบบผลึก ของสารเคมีก่อนและหลังให้ความร้อนว่าระบบผลึกมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ เนื่องจากการตรวจ พิสูจน์สารเคมีที่ใช้ทำเป็นวัตถุระเบิดจำเป็นต้องมีการยืนยันการตรวจพิสูจน์ด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ มากกว่า 2 ชนิดขึ้นไป ในกรณีที่มีสารเคมีปริมาณน้อย ๆ เมื่อตรวจพิสูจน์ด้วยเครื่องมือแรกแล้ว จำเป็นต้องนำสารเคมีเดิมนี้ไปตรวจด้วยเครื่องมืออีกชนิดหนึ่ง ดังนั้นถ้าสารเคมีมีการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างไปจากการตรวจพิสูจน์ด้วยเครื่องมือแรก อาจจะทำให้เกิดข้อผิดพลาดจากการตรวจพิสูจน์ ซ้ำด้วยเครื่องมือชนิดอื่น

ผลการศึกษาของระบบผลึกของสารแอมโมเนียมไนเตรทก่อนให้ความร้อนและหลังจากให้ความ ร้อนแล้วปล่อยให้เย็นตัวกลับมาเป็นผลึกอีกครั้งด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะแสดงผล การทดลองตามหัวข้อ 4.9.1

4.9.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแอมโมเนียมไนเตรท

เมื่อนำผงแอมโมเนียมไนเตรทก่อนให้ความร้อนและหลังให้ความร้อนโดยเครื่องหลอมจนถึง จุดหลอมเหลวแล้วปล่อยให้เย็นตัวไปหารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การ เลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะได้ดังรูปที่ 4.26

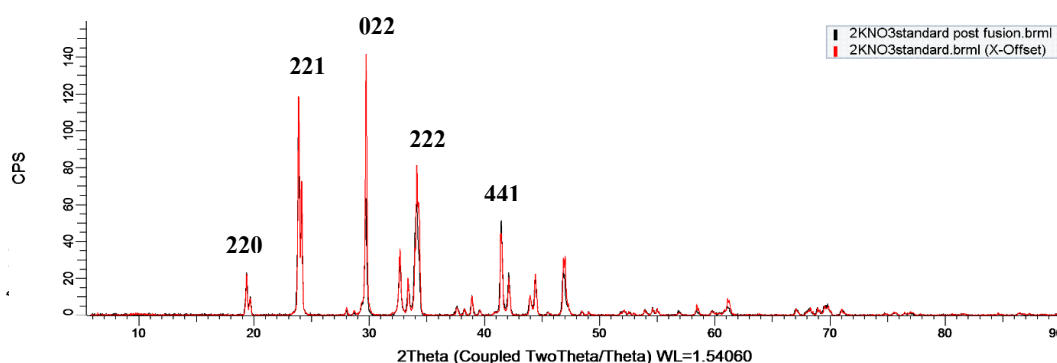


รูปที่ 4.26 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทก่อนหลอม (สีแดง) และแอมโมเนียมไนเตรทหลังหลอม (สีดำ)

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในรูปที่ 4.26 จะแสดงความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนกับมุม 2θ หน่วยของความเข้มเป็นอัตราการนับ (count/s, CPS) ความเข้มที่วัดได้นี้จะเป็นความเข้มสัมพัทธ์ จะเห็นว่าแต่ละตำแหน่งการเลี้ยวเบนนั้นมาจากการเลี้ยวเบนโดยระนาบต่าง ๆ กัน ตำแหน่งของรูปแบบการเลี้ยวเบนจากระนาบ (hkl) ของแอมโมเนียมไนเตรทก่อนหลอม (สีแดง) และแอมโมเนียมไนเตรทหลังหลอม (สีดำ) จะปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ เดียวกัน แสดงว่าระยะห่างระหว่างระนาบเท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของสารแอมโมเนียมไนเตรทกับฐานข้อมูลมาตรฐานพบว่า เป็นแอมโมเนียมไนเตรทที่มีระบบผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก และมีค่าแลตทิซพารามิเตอร์ $a = 4.9288$ Å, $b = 5.4408$ Å และ $c = 5.7529$ Å ดังนั้นแอมโมเนียมไนเตรทก่อนหลอมและหลังหลอมจึงมีระบบผลึกเป็นออร์โธโรมบิกเหมือนกัน ดังนั้น การนำสารแอมโมเนียมไนเตรทมาหลอมเพื่อส่องดูภาพโพลาไรซ์ เมื่อสารเย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้องอีกครั้งจะไม่ทำให้ระบบผลึกของสารเปลี่ยนไป

4.9.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโพแทสเซียมไนเตรท

สำหรับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโพแทสเซียมไนเตรทก่อนให้ความร้อนและหลังให้ความร้อนจนถึงจุดหลอมเหลวจะแสดงดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโพแทสเซียมไนเตรทก่อนหลอม (สีแดง) และโพแทสเซียมไนเตรทหลังหลอม (สีดำ)

จากรูปที่ 4.27 จะเห็นว่าแต่ละตำแหน่งการเลี้ยวเบนนั้น ได้จากการเลี้ยวเบนโดยระนาบต่าง ๆ กัน ตำแหน่งการเลี้ยวเบนจากระนาบ (hkl) ของโพแทสเซียมไนเตรทก่อนหลอม (สีแดง) และโพแทสเซียมไนเตรทหลังหลอม (สีดำ) จะปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ เดียวกัน แสดงว่ามีค่าระยะห่างระหว่างระนาบเท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของโพแทสเซียมไนเตรทกับฐานข้อมูลมาตรฐานพบว่าโพแทสเซียมไนเตรทที่มีระบบผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิกและมีค่าแลตทิซพารามิเตอร์ $a = 10.8250 \text{ \AA}$, $b = 18.3510 \text{ \AA}$ และ $c = 6.4350 \text{ \AA}$ ดังนั้นโพแทสเซียมไนเตรทก่อนหลอมและหลังหลอมจะมีระบบผลึกเป็นออร์โธโรมบิกเหมือนกัน การนำสารโพแทสเซียมไนเตรทมาหลอมเพื่อส่องดูภาพโพลาไรซ์ เมื่อสารเย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้องอีกครั้งจะไม่ทำให้ระบบผลึกของสารเปลี่ยนไปเช่นเดียวกับแอมโมเนียมไนเตรท

ดังนั้นในการเตรียมตัวอย่างสารแอมโมเนียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทด้วยวิธีการหลอมแล้วปล่อยให้เย็นตัวกลับมาเป็นผลึกที่อุณหภูมิห้องอีกครั้งจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระบบผลึก ดังนั้น วิธีนี้จึงเหมาะสำหรับใช้ในการตรวจสอบพิสูจน์สารเคมีที่มีปริมาณน้อย เนื่องจากเมื่อนำไปหลอมจะไม่ทำลายสารตัวอย่าง จึงสามารถนำสารเคมีที่ถูกใช้แล้วนั้นมาตรวจพิสูจน์ซ้ำด้วยวิธีอื่นหรือเครื่องมืออื่นได้อีก

4.10 เปรียบเทียบภาพโพลาไรซ์ของสารเคมีมาตรฐานกับสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุ

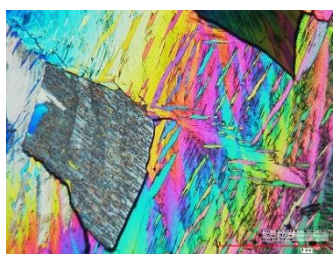
เนื่องจากรูปแบบภาพโพลาไรซ์ของสารแอมโมเนียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทมีความแตกต่างกันซึ่งได้ใช้ค่าอัตราส่วนภาพในการแยกชนิดของสารเคมีแต่ละชนิด ผู้วิจัยได้นำสารเคมีที่เก็บได้จากสถานที่เกิดเหตุมาตรวจสอบชนิดของสารเคมี โดยการเตรียมตัวอย่างสารเคมีด้วยวิธีการหลอมแล้วปล่อยให้เย็นตัว แล้วนำไปถ่ายภาพโพลาไรซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ จากนั้นใช้

รูปแบบภาพโพลาไรซ์ และค่าอัตราส่วนภาพของสารเคมีมาตรฐานเป็นมาตรฐานในการระบุชนิดของสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุ

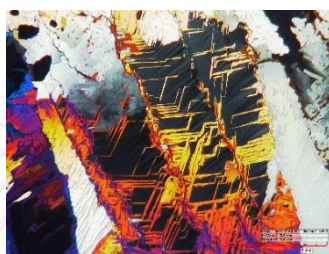
4.10.1 ภาพโพลาไรซ์ของสารแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐานกับสารแอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุ

สารแอมโมเนียมไนเตรทที่นำมาจากสถานที่เกิดเหตุจะไม่ใช้สารแอมโมเนียมไนเตรทบริสุทธิ์ จะมีการปนเปื้อนจากสิ่งต่าง ๆ ผสมอยู่ด้วย เพื่อที่จะใช้วิธีการหลอมแล้วนำมาถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์จึงได้ทำการกรองเอาสิ่งปนเปื้อนออกด้วยวิธีการเตรียมสารตามหัวข้อ

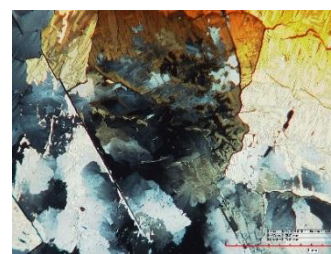
3.2.2.2 เมื่อนำมาส่องด้วยกล้องแล้วจะปรากฏภาพโพลาไรซ์ดังรูปที่ 4.28



(ก)



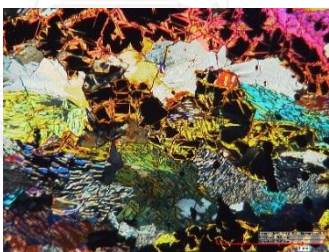
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

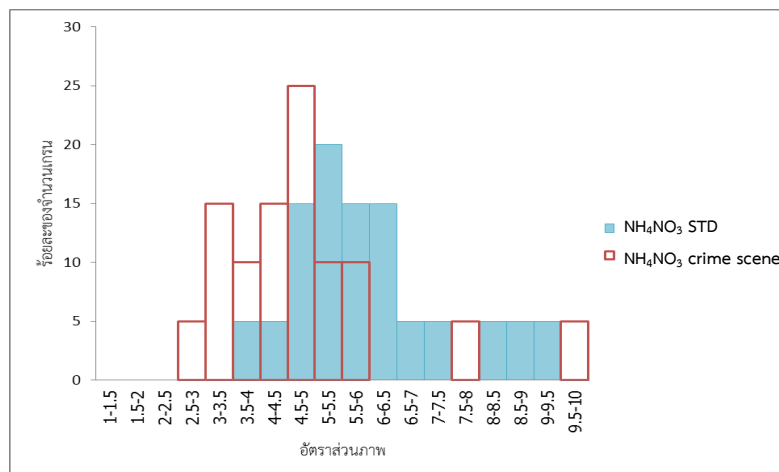


(ฉ)

รูปที่ 4.28 ตัวอย่างการเปรียบเทียบรูปแบบภาพโพลาไรซ์ของสารแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐานที่บริเวณต่าง ๆ (ก) ถึง (ค) กับสารแอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุ (ง) ถึง (ฉ)

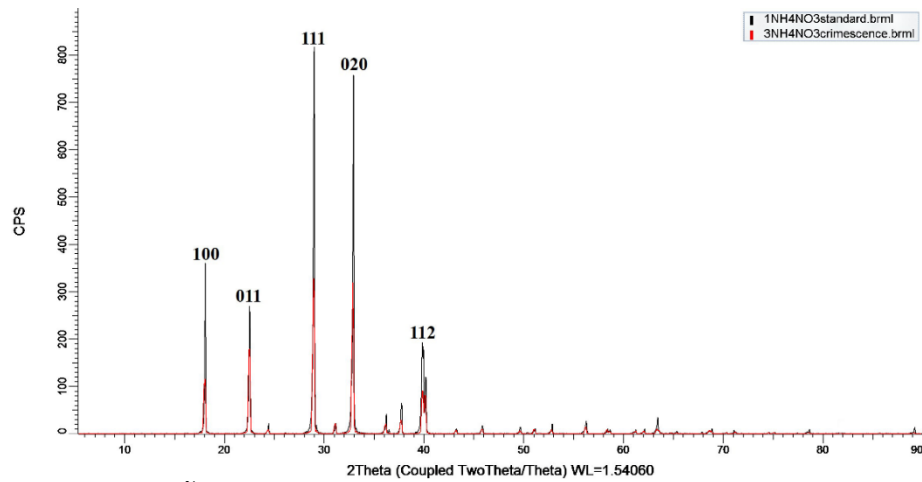
จากรูปที่ 4.28 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบรูปแบบภาพโพลาไรซ์ของสารแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐาน กับสารแอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุที่บริเวณต่าง ๆ จะเห็นได้ว่ารูปแบบภาพโพลาไรซ์ของสารแอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุตามรูปที่ 4.28 (ง) ถึง (ฉ) แสดงลักษณะเฉพาะของรูปแบบเกรนเช่นเดียวกับแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐานตามหัวข้อ 4.7.1 ดังรูปที่ 4.28 (ก) ถึง (ค) ตามลำดับ กล่าวคือมีลักษณะของเกรนที่ซ้อนทับกัน มีขอบเกรนไม่ชัดเจน ไม่สามารถแยกเกรนแต่ละเกรนจากขอบเกรนได้ ต้องอาศัยตำแหน่งสลับแสงในการหาขอบเกรน

นอกจากนี้ยังใช้วิธีการหาค่าอัตราส่วนภาพในการจำแนกรูปร่างของเกรนของสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุเทียบกับสารเคมีมาตรฐานตามรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบอัตราส่วนภาพของแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐาน (ฟ้า) และแอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุ (แดง)

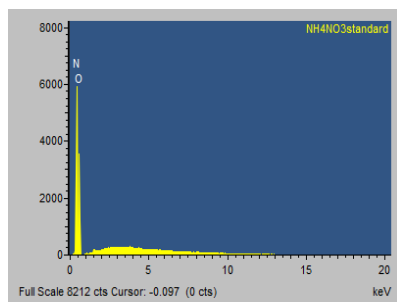
จากการหาค่าอัตราส่วนภาพของสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุพบว่า ค่าอัตราส่วนภาพส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 4.5 ถึง 6 ซึ่งสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนภาพของสารแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐาน ตามหัวข้อที่ 4.8 ดังนั้นสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุแสดงรูปแบบภาพโพลาไรซ์คล้ายกับสารแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐาน อาจเป็นไปได้ว่าสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุ นั้น คือ สารแอมโมเนียมไนเตรท เพื่อที่จะยืนยันผลการทดลองจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ว่า สารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุ คือ สารแอมโมเนียมไนเตรท จึงได้นำเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์มาช่วยในการระบุชนิดสารเคมี และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณมาใช้ในการหาปริมาณธาตุ เพื่อดูสิ่งปนเปื้อนที่มากับสารเคมีที่เก็บได้จากสถานที่เกิดเหตุ



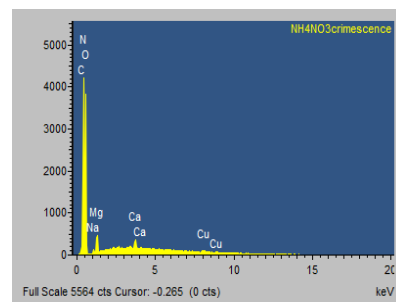
รูปที่ 4.30 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐาน (สีดำ) และแอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุ (สีแดง)

จากรูปที่ 4.30 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐาน (สีดำ) และแอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุ (สีแดง) พบว่าตำแหน่งการเลี้ยวเบนจากระนาบ (hkl) ของแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐาน (สีดำ) และแอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุ (สีแดง) จะปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ เดียวกัน แสดงว่าเป็นแอมโมเนียมไนเตรทที่มีระบบผลึกเป็นแบบออร์โทโรมบิกเช่นเดียวกัน ดังนั้นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ทำให้เราสามารถยืนยันผลการทดลองจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ได้ว่ารูปแบบภาพโพลาไรซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐานสามารถใช้ในการระบุชนิดของสารเคมีที่เก็บได้จากสถานที่เกิดเหตุได้อย่างถูกต้อง

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณถูกนำมาใช้ในการหาปริมาณธาตุ เพื่อดูสิ่งปนเปื้อนที่มากับสารเคมีที่เก็บได้จากสถานที่เกิดเหตุ พบว่าสารแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐานประกอบด้วยธาตุหลักคือ ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) ดังรูปที่ 4.31 (ก)



(ก)



(ข)

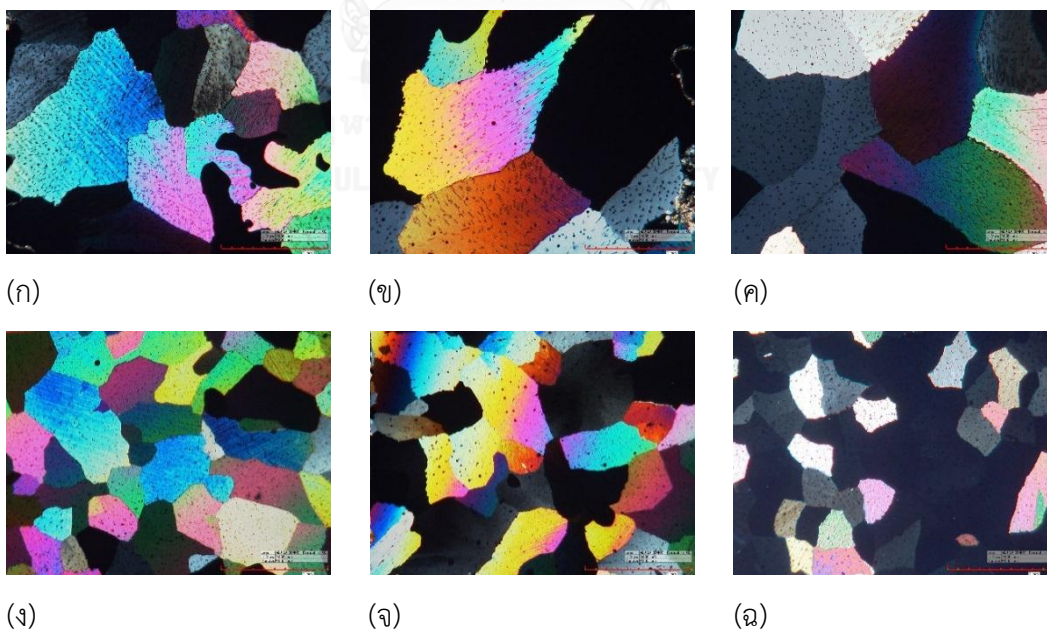
รูปที่ 4.31 สเปกตรัมของสารแอมโมเนียมไนเตรท (ก) มาตรฐาน และ (ข) จากสถานที่เกิดเหตุ

รูปที่ 4.31 (ข) แสดงสเปกตรัมของสารแอมโมเนียมไนเตรทที่เก็บได้จากสถานที่เกิดเหตุ ซึ่งประกอบด้วยธาตุหลักคือ ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) เช่นกัน แต่มีธาตุอื่นรวมอยู่ด้วยคือ คาร์บอน (C) แมกนีเซียม (Mg) โซเดียม (Na) แคลเซียม (Ca) และคอปเปอร์ (Cu) ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 5 ซึ่งธาตุเหล่านี้อาจปนเปื้อนมาจากสิ่งแวดล้อมในสถานที่เกิดเหตุหรือภาชนะบรรจุ

จากผลการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณในการหาปริมาณธาตุ พบว่าสารแอมโมเนียมไนเตรทที่เก็บได้จากสถานที่เกิดเหตุมีธาตุอื่นปนเปื้อนในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 5 ซึ่งการปนเปื้อนเหล่านี้ยังไม่ส่งผลกระทบต่อรูปแบบภาพโพลาไรซ์ที่ถ่ายได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์

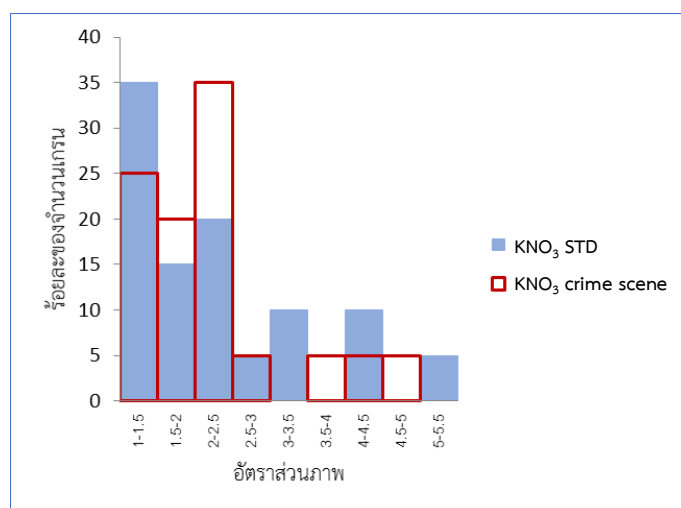
4.10.2 ภาพโพลาไรซ์ของสารโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐานกับสารโพแทสเซียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุ

สารโพแทสเซียมไนเตรทที่เก็บได้จากสถานที่เกิดเหตุจะมีการปนเปื้อนเช่นเดียวกัน ในการเตรียมสารเคมีเพื่อนำมาถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์จึงมีวิธีการกรองสิ่งปนเปื้อนออกเช่นเดียวกับสารแอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุ ภาพโพลาไรซ์ของสารโพแทสเซียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุเมื่อเปรียบเทียบกับสารโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐานแสดงตามรูปที่ 4.32



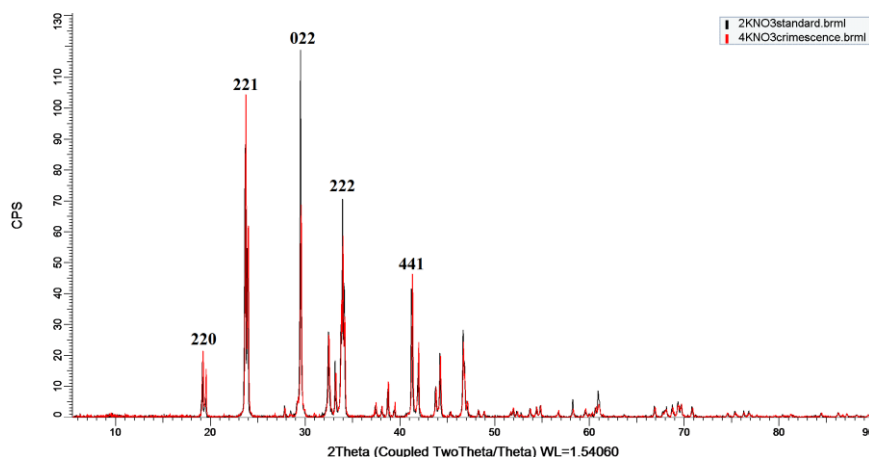
รูปที่ 4.32 ตัวอย่างการเปรียบเทียบรูปแบบภาพโพลาไรซ์ของสารโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐานที่บริเวณต่าง ๆ (ก) ถึง (ค) กับสารโพแทสเซียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุ (ง) ถึง (ฉ)

จากรูปที่ 4.32 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบภาพโฟลาริซซ์ของสารโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐาน กับสารโพแทสเซียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุที่บริเวณต่าง ๆ จะเห็นได้ว่ารูปแบบภาพโฟลาริซซ์ของสารโพแทสเซียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุตามรูปที่ 4.32 (ง) ถึง (ฉ) แสดงลักษณะเฉพาะของรูปแบบเกรนเช่นเดียวกับโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐานตามหัวข้อ 4.7.2 ดังรูปที่ 4.32 (ก) ถึง (ค) ตามลำดับ รูปแบบภาพโฟลาริซซ์ของโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐานคือ มีลักษณะของเกรนเป็นเกรนเดี่ยว แบ่งโดยขอบเกรนที่สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนโดยไม่ต้องอาศัยตำแหน่งสลับแสงเหมือนแอมโมเนียมไนเตรท นอกจากนี้ ยังใช้วิธีการหาค่าอัตราส่วนภาพในการแยกรูปร่างของเกรนของสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุเทียบกับสารเคมีมาตรฐานตามรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบอัตราส่วนภาพของโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐาน (ฟ้า) และโพแทสเซียมจากสถานที่เกิดเหตุ (แดง)

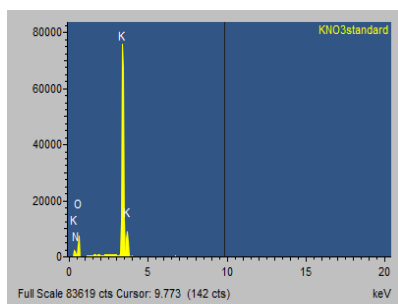
จากการหาค่าอัตราส่วนภาพของสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุพบว่า ค่าอัตราส่วนภาพส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 1 ถึง 2.5 ซึ่งสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนภาพของสารโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐาน ตามหัวข้อที่ 4.8 ดังนั้นสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุแสดงรูปแบบภาพโฟลาริซซ์คล้ายกับสารโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐาน อาจเป็นไปได้ว่าสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุ นั้น คือ สารโพแทสเซียมไนเตรท เพื่อที่จะยืนยันผลการทดลองจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโฟลาริซซ์ว่าสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุ คือ สารโพแทสเซียมไนเตรท จึงได้นำเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์มาช่วยในการระบุชนิดสารเคมี และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณมาใช้ในการหาปริมาณธาตุ เพื่อดูสิ่งปนเปื้อนที่มากับสารเคมีที่เก็บได้จากสถานที่เกิดเหตุ



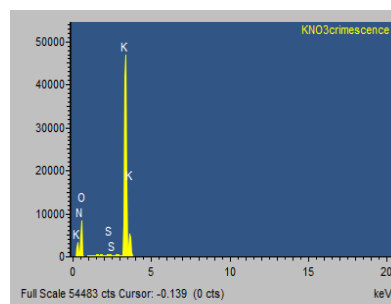
รูปที่ 4.34 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐาน (สีดำ) และโพแทสเซียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุ (สีแดง)

จากรูปที่ 4.34 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐาน (สีดำ) และโพแทสเซียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุ (สีแดง) พบว่าตำแหน่งการเลี้ยวเบนจากระนาบ (hkl) ของสารทั้งสองปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ เดียวกัน แสดงว่าเป็นโพแทสเซียมไนเตรทที่มีระบบผลึกเป็นแบบออร์โทโรมบิกเช่นเดียวกัน ดังนั้นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ทำให้เราสามารถยืนยันรูปแบบภาพโพลาไรซ์ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ได้ว่าเป็นสารโพแทสเซียมไนเตรทเช่นเดียวกัน

ผลจากเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณที่ติดตั้งอยู่กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าสเปกตรัมของสารโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐานจะประกอบด้วยธาตุหลักคือไนโตรเจน (N) ออกซิเจน (O) และโพแทสเซียม (K) ตามรูปที่ 4.35 (ก) ในขณะที่สารโพแทสเซียมไนเตรทที่เก็บได้จากสถานที่เกิดเหตุมีธาตุหลักเช่นเดียวกับสารโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐานแต่จะมีกำมะถัน (S) รวมอยู่ด้วยในปริมาณที่น้อยกว่าร้อยละ 1 ซึ่งกำมะถันเป็นส่วนผสมของดินดำนั่นเองตามรูปที่ 4.34 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.35 สเปกตรัมของสารโพแทสเซียมไนเตรท (ก) มาตรฐาน และ (ข) จากสถานที่เกิดเหตุ

จากผลการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณในการหาปริมาณธาตุ พบว่าสารแอมโมเนียมไนเตรทและสารโพแทสเซียมไนเตรทที่เก็บได้จากสถานที่เกิดเหตุมีธาตุอื่นปนเปื้อนในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 5 และร้อยละ 1 ตามลำดับ ซึ่งการปนเปื้อนเหล่านี้ไม่ส่งผลกระทบต่อภาพโพลาไรซ์ที่ถ่ายได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์

ดังนั้นเราสามารถใช้รูปแบบภาพโพลาไรซ์ของสารเคมีมาตรฐานที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบรูปแบบภาพโพลาไรซ์ของสารเคมีที่เก็บได้จากสถานที่เกิดเหตุในการระบุชนิดสารเคมีสองชนิด คือ แอมโมเนียมไนเตรท และโพแทสเซียมไนเตรท โดยการใช้ค่าอัตราส่วนภาพที่แสดงลักษณะเฉพาะของสารเคมีแต่ละชนิด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัยตั้งแต่กระบวนการเตรียมสารเคมีที่ใช้เป็นส่วนผสมของวัตถุระเบิดเพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงด้วยการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์และงานวิจัยในอนาคต ผู้วิจัยสนใจศึกษาสารแอมโมเนียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทซึ่งเป็นสารประกอบไนเตรทที่ผู้ก่อการร้ายนิยมนำมาทำเป็นส่วนผสมของวัตถุระเบิดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงแสงของสารเคมี

5.1 ผลการวิจัย

การวิเคราะห์ภาพโพลาไรซ์ของสารแอมโมเนียมไนเตรท และโพแทสเซียมไนเตรททำได้โดยการนำสารเคมีที่เตรียมบนกระจกสไลด์ไปห่อมบนเครื่องห่อมจนถึงจุดห่อมเหลว ปิดด้วยแผ่นกระจกปิดสไลด์แล้วปล่อยให้เย็นตัว นำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์จะปรากฏเป็นภาพโพลาไรซ์ของสารเคมีที่มีสีสั่นอย่างหลากหลาย เพื่อที่จะทราบว่าอัตราการเย็นตัวของสารเคมีมีผลอย่างไรกับภาพโพลาไรซ์ของสารเคมี ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขการเย็นตัวอย่างช้า ๆ และการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว พบว่าภาพโพลาไรซ์ของผลึกสารเคมีทั้งสองชนิดที่ปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ บนเครื่องห่อมจะมีฟองอากาศเป็นจำนวนมาก ส่วนภาพโพลาไรซ์ของผลึกสารเคมีทั้งสองชนิดที่ปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจะมีฟองอากาศน้อยกว่า เนื่องจากสารเคมีที่เย็นตัวอย่างช้า ๆ จะมีช่วงเวลาที่วางอยู่บนเครื่องห่อมนาน จะได้รับความร้อนจนสังเกตเห็นไอของสารเคมี ทำให้ในขณะที่ของเหลวกลายเป็นของแข็งจะพบฟองอากาศที่เกิดจากไอน้ำปรากฏอยู่ด้วย

ในขณะที่สารเคมีเย็นตัวนั้นถ้าสารเคมีสัมผัสอยู่กับสิ่งใดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ก็จะถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งนั้น ในการทดลองนี้จะห่อมสารเคมีจนถึงจุดห่อมเหลวแล้วยกตัวอย่างออกจากเครื่องห่อมมาวางไว้บนแท่นโลหะที่มีรูปทรงเป็นทรงกระบอกที่มีรูตรงกลาง โดยให้สารเคมีอยู่ตรงกลางของรูทรงกระบอกเพื่อให้แสงจากกล้องส่องผ่านได้ ภาพโพลาไรซ์ที่ได้จะแสดงการเย็นตัวจากขอบเข้าสู่จุดศูนย์กลาง นอกจากนี้ถ้าให้สารเคมีเย็นตัวโดยการถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม ด้วยการวางตัวอย่างสัมผัสกับแท่นวางตัวอย่างของกล้องจุลทรรศน์โดยตรง ภาพโพลาไรซ์ที่ปรากฏจะแสดงการเย็นตัวอย่างไม่มีทิศทางแน่นอน ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิที่ถ่ายเทในแต่ละบริเวณ ดังนั้นทิศทางการเย็นตัวของสารแอมโมเนียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทขึ้นกับการถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม โดยเมื่อบริเวณใดบริเวณหนึ่งของตัวอย่างสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า บริเวณนั้นจะเกิดเป็นผลึกก่อน

การควบคุมแรงกดที่กระทำบนแผ่นกระจกปิดสไลด์ได้นำแผ่นโลหะที่มีน้ำหนัก 127 กรัม มาปิดทับลงบนแผ่นกระจกสไลด์จำนวน 1 2 และ 3 แผ่น พบว่าเมื่อใช้น้ำหนักกดทับลงบนแผ่นกระจกปิดสไลด์มากขึ้นทำให้สารเคมีมีความหนาน้อยลง ซึ่งได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการวัดความหนาจากภาคตัดขวางของสารเคมี และยิ่งความหนาน้อยภาพโพลาริซ์ที่ปรากฏจะพบสีน้ำเงินมากขึ้น จะเห็นได้ว่าสีที่เกิดขึ้นมีผลมาจากความหนา

ตำแหน่งสลัวแสงคือตำแหน่งที่แกนแสงของสารวางตัวขนานกับแกนยอมผ่านของแสงของโพลาริเซอร์หรืออะนาไลเซอร์ ความเข้มของแสงหลังผ่านอะนาไลเซอร์เป็นศูนย์ ภาพที่เห็นจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาริซ์จะมีสี เมื่อหมุนตัวอย่างไปทุก ๆ 45° ภาพของเกรนนั้นจะเห็นเป็นมืดสลับกับสว่าง เมื่อเราต้องการทราบขอบเกรนของเกรนที่มีการจัดวางตัวของแกนแสงของผลึกในแนวเดียวกัน ให้หมุนตัวอย่างไปยังตำแหน่งสลัวแสง นอกจากนี้ยังพบว่าภายในหนึ่งเกรนที่มีการจัดวางตัวของแกนแสงของผลึกในแนวเดียวกัน อาจปรากฏสีการแทรกสอดได้หลายสี

การประมาณความหนาของผลึกสารโดยใช้ตัวห้วงและแผนภาพของมิเชล-เลวี พบว่าความแตกต่างระยะทางซึ่งแสดงภาพเป็นสีต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับความหนา และค่าไบรีฟรินเจนซ์ เมื่อค่าไบรีฟรินเจนซ์ของแอมโมเนียมไนเตรท คือ 0.224 และโพแทสเซียมไนเตรท คือ 0.171 ด้วยสมบัติของตัวห้วงมีผลทำให้ผลต่างระยะทางเชิงแสงเปลี่ยนไป 1 อันดับ สีที่เกิดขึ้นแต่ละสีภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาริซ์เกิดจากการแตกต่างกันของความหนา ไม่ขึ้นกับการจัดวางตัวของแกนแสงของผลึก นอกจากนี้ภาพโพลาริซ์ของหนึ่งเกรนยังพบการไล่ระดับของสีที่สอดคล้องกับแผนภาพของมิเชล-เลวีอีกด้วย

รูปแบบภาพโพลาริซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทมาตรฐานจะมีลักษณะของเกรนที่ซ้อนทับกัน มีขอบเกรนไม่ชัดเจน ไม่สามารถแยกเกรนแต่ละเกรนจากขอบเกรนได้ ต้องอาศัยตำแหน่งสลัวแสงในการหาขอบเกรน ภาพโพลาริซ์ในบริเวณสีเขียวและสีชมพูจะมีเกรนขนาดเล็ก โดยอัตราส่วนภาพของแอมโมเนียมไนเตรทส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 4.5 ถึง 6.5 แสดงให้เห็นว่ารูปร่างของเกรนของแอมโมเนียมไนเตรทส่วนใหญ่มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและเป็นเกรนที่ยาว ส่วนรูปแบบภาพโพลาริซ์ของโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐานจะมีขอบเกรนชัดเจน ไม่ต้องใช้ตำแหน่งสลัวแสงในการหาขอบเกรนเหมือนแอมโมเนียมไนเตรท มีค่าอัตราส่วนภาพส่วนใหญ่เข้าใกล้ 1 และอยู่ในช่วงประมาณ 1 ถึง 2.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปร่างของเกรนของโพแทสเซียมไนเตรทส่วนใหญ่มีลักษณะเกรนที่สั้นขนาดใกล้เคียงกับรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแอมโมเนียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรทมาตรฐานก่อนให้ความร้อนและหลังให้ความร้อน มีตำแหน่งการเลี้ยวเบนโดยระนาบที่ตำแหน่ง 2θ เดียวกัน ซึ่งเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของสารเคมีทั้งสองกับฐานข้อมูลมาตรฐาน พบว่ามีระบบผลึก

แบบออร์โทโรมบิก จะเห็นได้ว่าการนำสารเคมีทั้งสองมาหลอมเพื่อส่องดูภาพโพลาไรซ์ เมื่อสารเย็นตัวกลับไปที่อุณหภูมิห้องอีกครั้งจะไม่ทำให้ระบบผลึกของสารเปลี่ยนไป

รูปแบบภาพโพลาไรซ์ของสารเคมีมาตรฐานสามารถนำมาใช้เป็นมาตรฐานในการระบุชนิดของสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุ โดยใช้ค่าอัตราส่วนภาพในการแยกสารแอมโมเนียมไนเตรท และสารโพแทสเซียมไนเตรท แม้สารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุจะมีการปนเปื้อนด้วยสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ แต่ไม่มีผลต่อรูปแบบภาพโพลาไรซ์ จึงสามารถใช้ภาพโพลาไรซ์ของสารเคมีมาตรฐานที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ในการระบุชนิดของสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุได้

5.2 งานวิจัยในอนาคต (Future Research)

งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดหลายอย่างตั้งแต่กระบวนการหลอมสารเคมีเพื่อนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ เนื่องจากเครื่องหลอมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถควบคุมอัตราการลดอุณหภูมิได้ ทำให้การศึกษาเรื่องอัตราการเย็นตัวของสารเคมีมีข้อจำกัด เนื่องจากการเย็นตัวของสารเคมีที่อยู่บนเครื่องหลอมแล้วถูกลดอุณหภูมิด้วยอัตราการเย็นตัวของเครื่องหลอมเอง ไม่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการลดอุณหภูมิเพื่อศึกษารูปแบบภาพโพลาไรซ์จากการเย็นตัวด้วยอัตราแตกต่างกันได้ หากต้องการศึกษารูปแบบการเกิดเกรนที่เป็นลักษณะเฉพาะของสารเคมีจำเป็นต้องมีกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ที่ติดตั้งบนเครื่องหลอมที่สามารถปรับอัตราการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิไว้ด้วยเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารเคมีที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในขณะที่สารเคมีเริ่มเย็นตัว อาจจะทำให้เราทราบถึงการเกิดเกรนในแต่ละเฟสของสารเคมีแต่ละชนิด ซึ่งสามารถนำมาใช้อธิบายลักษณะของเกรนที่เกิดขึ้นอย่างแตกต่างกัน การนำวิธีนี้ไปใช้งานจริงกับสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุ หากผู้ทดลองไม่มีเครื่องหลอมสำหรับหลอมสารเคมี สามารถใช้อุปกรณ์ที่หาได้ง่าย เช่น การใช้ตะเกียงแอลกอฮอล์ในการให้ความร้อนกับสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุ ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถทราบจุดหลอมเหลวของสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุได้ จึงไม่สามารถแยกชนิดของสารเคมีโดยใช้จุดหลอมเหลวของสารได้ แต่กระบวนการหลังจากหลอมเสร็จยังเหมือนเดิม คือนำมาถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์แล้วยังสามารถใช้รูปแบบภาพโพลาไรซ์ของสารเคมีมาตรฐานในการระบุชนิดสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุได้

นอกจากนั้น งานวิจัยนี้ศึกษาสารเคมีที่ใช้ทำเป็นส่วนผสมของวัตถุระเบิดเพียงสองชนิดคือแอมโมเนียมไนเตรท และโพแทสเซียมไนเตรท การนำรูปแบบภาพโพลาไรซ์มาใช้ในการระบุชนิดสารเคมีจากสถานที่เกิดเหตุเพื่อนำไปใช้งานด้านพิสูจน์หลักฐานนั้น จำเป็นต้องศึกษาสารเคมีที่นำมาใช้ทำเป็นวัตถุระเบิดทุกชนิดเพื่อนำรูปแบบภาพโพลาไรซ์ของสารเคมีแต่ละชนิดมาทำเป็นฐานข้อมูล จากนั้นพัฒนาฐานข้อมูลดังกล่าวให้เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการเปรียบเทียบรูปแบบภาพ

โพลาไรซ์ของสารเคมีแบบอัตโนมัติ โดยอาศัยการเปรียบเทียบอัตราส่วนภาพ สี หรือลักษณะอื่น ๆ ที่แสดงเป็นเอกลักษณ์เฉพาะของสารเคมีแต่ละชนิด ปัจจัยที่ต้องควบคุมสำหรับการเตรียมตัวอย่างเพื่อเก็บเป็นฐานข้อมูลของรูปแบบภาพโพลาไรซ์ของสารเคมีคือ ความหนาซึ่งมีผลต่อสีของภาพโพลาไรซ์ สำหรับแอมโมเนียมไนเตรทควรเตรียมสารเคมีให้มีความหนาประมาณ 2.455 ถึง 6.920 ไมโครเมตร ส่วนโพแทสเซียมไนเตรทควรเตรียมให้มีความหนาในช่วงประมาณ 3.216 ถึง 9.064 ไมโครเมตร

อย่างไรก็ตาม สารเคมีที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมของวัตถุระเบิดบางชนิดอาจจะมีสมบัติเป็นไอโซทรอปิก ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ของสารดังกล่าวจะไม่ปรากฏสีของการแทรกสอด และจะเป็นภาพมืด ทำให้ไม่สามารถนำภาพของสารเคมีที่มีสมบัติเป็นไอโซทรอปิกไปใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบภาพโพลาไรซ์ด้วยวิธีการนี้ได้



รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

1. บุญรอด สมทัศน์, กำหนดยุทธศาสตร์ที่ต้องขออนุญาตตามพระราชบัญญัติควบคุมยุทธภัณฑ์ พ.ศ. 2530, กระทรวงกลาโหม. 2008. p. 48-66.
13. ธนุสิทธิ์ บุรินทร์ประโคน, ทฤษฎีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2014. p. 1-28.

ภาษาอังกฤษ

2. C. N. R. Rao, B. Prakash, and M. Natarajan, *Crystal structure transformations in inorganic nitrites, nitrates, and carbonates*. Vol. 53. 1975: National Standard Reference Data System.
3. H. B. Wu, M. N. Chan, and C. K. Chan, *FTIR Characterization of Polymorphic Transformation of Ammonium Nitrate*. *Aerosol Science and Technology*, 2007. **41**: p. 581-588.
4. M. M. Lunden, K. L. Revzan, and M. L. Fischer, *Transformation of Ammonium Nitrate*. Vol. 6. 2007: *Aerosol Science and Technology*.
5. B. E. Sorensen, *A revised Michel-Levy interference colour chart based on first-principles calculations*. *European Journal of Mineralogy*, 2013. **25**: p. 5-10.
6. M. Magnus, *Michel-Lévy Color Chart Identification of Minerals in Polarized Light*. 2011, Institute of Geology and Paleontology. p. 2-7.
7. J. G. Delly, *Selected Topics from Essentials of Polarized Light Microscopy*. Vol. 5. 2008: College of Microscopy.
8. R. A. Carlton, *Pharmaceutical Microscopy*. *Polarized Light Microscopy*. 2011: Springer Science. 7-64.
9. Olympus, *Basics of Polarizing Microscopy*. 2012, University of California. p. 6-8.
10. M. M. Raith, *Guide to Thin Section Microscopy*. Vol. 2. 2012: University of Bonn.
11. S. A. Nelson, *Interference Phenomena, Compensation, and Optic Sign*. 2010, Tulane University. p. 1-6.

12. J. M. Ziman, *Model of Disorder: The Theoretical Physics of Homogeneously Disordered Systems*. 1979: CUP Archive.
14. B. Cheney, *Introduction to Scanning Electron Microscopy*, in *Materials Engineering*. 2015, San Jose State University. p. 13.
15. R. R. Sowell, M. M. Karnowsky, and L. C. Walters, *The transition in phases 2-3-4 in high purity ammonium nitrate*. *Journal of Thermal Analysis*, 1970. **3**: p. 119-129.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
ขั้นตอนการดำเนินงาน

| ขั้นตอน | เดือนที่ 1-4 | 5-8 | 9-12 | 13-16 | 17-20 | 21-24 |
|--|--------------|-----|------|-------|-------|-------|
| 1.ศึกษาข้อมูลที่จำเป็นและเอกสารอ้างอิง | ↔ | | | | | |
| 2.ออกแบบการทดลองและฝึกใช้เครื่องมือ | | ↔ | | | | |
| 3.ทำการทดลอง | | | ↔ | | | |
| 4.วิเคราะห์สรุปผล | | | | ↔ | | |
| 5.เขียนรายงาน | | | | | ↔ | |

ขั้นตอนที่ 1

ศึกษาข้อมูล

ตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม 2557 ถึงวันที่ 30 มิถุนายน 2557

1. ศึกษาสารเคมีที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำวัตถุระเบิด
2. ศึกษาวิธีการหาจุดหลอมเหลวโดยใช้เครื่องหลอม
3. ศึกษาหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์
4. ศึกษาหลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
5. ศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์
6. ศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

ขั้นตอนที่ 2

ออกแบบการทดลอง และฝึกใช้เครื่องมือในการทดลอง

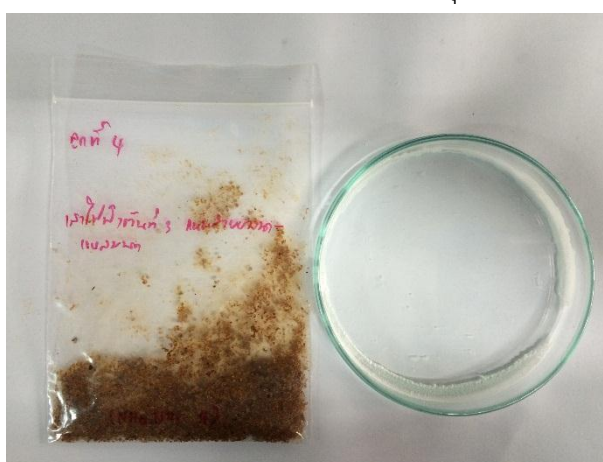
ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2557 ถึงวันที่ 31 ตุลาคม 2557

1. ออกแบบเครื่องหลอมที่สามารถควบคุมอุณหภูมิ และสามารถบันทึกข้อมูลอุณหภูมิกับเวลาได้ ฝึกการใช้เครื่องหลอมเพื่อใช้ในการหลอมสารเคมีให้ถึงจุดหลอมเหลวของสารเคมีแต่ละชนิดแล้วปล่อยให้สารเย็นตัวลงกลายเป็นผลึกเพื่อนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์
2. ฝึกใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์โดยการหมุนแท่นตัวอย่าง ซึ่งจะให้รูปที่มีสีของการแทรกสอดของแสงแตกต่างกัน

3. ฝึกการเตรียมตัวอย่างสารเคมีโดยการบดเป็นผงละเอียดสำหรับนำไปใช้กับเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
 4. ออกแบบแบบบันทึกข้อมูลการทดลอง
- ขั้นตอนที่ 3** ทำการทดลอง
- ตั้งแต่วันที่ 1 พฤศจิกายน 2557 ถึงวันที่ 30 มิถุนายน 2558
- เตรียมตัวอย่างสำหรับส่องกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์ โดยการนำสารประกอบเคมีวางบนแผ่นกระจกสไลด์แล้วนำมาหลอมจนถึงจุดหลอมเหลว นำกระจกปิดสไลด์มาปิดทับแล้วยกออกจากเครื่องหลอม เมื่อสารเคมีเย็นตัวลงจนกลายเป็นผลึก นำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์โดยการหมุนแท่นวางตัวอย่างทำมุมมต่าง ๆ กับแกนยอมผ่านของแสงของโพลาไรเซอร์แล้วบันทึกภาพเพื่อคุณสมบัติทางแสง
- ขั้นตอนที่ 4** วิเคราะห์และสรุปผล
- ตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม 2558 ถึงวันที่ 31 ตุลาคม 2558
1. นำรูปที่ที่บันทึกได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์มาศึกษาสมบัติทางแสง และคุณลักษณะพิเศษที่บ่งบอกถึงชนิดของสารเคมี
 2. นำข้อมูลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เช่น มุมการเลี้ยวเบน ระยะระหว่างระนาบ มาวิเคราะห์ผลเพื่อระบุโครงสร้างผลึก ของสารประกอบแอมโมเนียมไนเตรทและสารประกอบโพแทสเซียมไนเตรท
 3. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์และจากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแอมโมเนียมไนเตรทและสารประกอบโพแทสเซียมไนเตรทว่าสอดคล้องกันหรือไม่
 4. สรุปผลการวิจัย
- ขั้นตอนที่ 5** เขียนรายงาน
- ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2558 ถึงวันที่ 29 กุมภาพันธ์ 2559
1. ร่างรูปแบบรายงานผลการวิจัย
 2. ตรวจสอบข้อผิดพลาดและจัดทำรูปเล่มรายงานผลการวิจัย

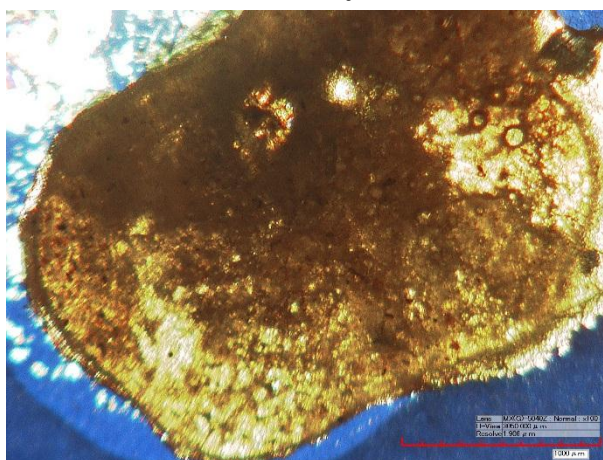
ภาคผนวก ข
การเตรียมตัวอย่างและการตั้งค่าเครื่องมือ

สารแอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุ ลูกที่ 4 เส้าไฟฟ้าตันที่ 3 ถนนสายบานา-แหลมบก อ.เมือง จ.ปัตตานี เมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2557 ได้เกิดเหตุระเบิดจำนวนหลายจุดในพื้นที่อำเภอเมืองปัตตานี เป็นเหตุให้มีผู้ได้รับบาดเจ็บและเสียชีวิต มีทรัพย์สินเสียหาย ไฟฟ้าดับและการประปาไม่สามารถจ่ายน้ำได้ทั้งอำเภอเมืองปัตตานี จึงตรวจเก็บหลักฐานมาให้ตรวจพิสูจน์ ซึ่งเก็บได้จากเส้าไฟฟ้าตันที่ 3 ถนนสายบานา-แหลมบก ในภาชนะบรรจุระเบิด



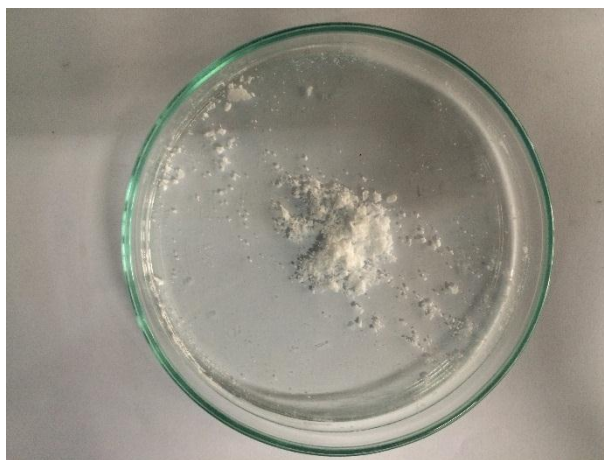
รูปที่ ข.1 สารเคมีที่เก็บได้จากที่เกิดเหตุ

ลักษณะของสารเคมีดังกล่าวมีสีน้ำตาลมีฝุ่น ดิน ปนเปื้อนเยอะ เมื่อนำมาหลอมจนถึงจุดหลอมเหลวแล้วนำกระจกปิดสไลด์ปิด ปรากฏว่ากระจกปิดสไลด์ไม่สามารถปิดทับสารได้สนิท เนื่องจากติดเม็ดผง ฝุ่น ทำให้เมื่อสารเคมีเย็นตัวกลายเป็นผลึกจึงมีความหนามาก เมื่อนำไปส่องดูภาพใต้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์จึงปรากฏภาพดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 สารเคมีที่เก็บได้จากที่เกิดเหตุถูกหลอมแล้วปล่อยให้เย็นตัวนำไปส่องใต้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์

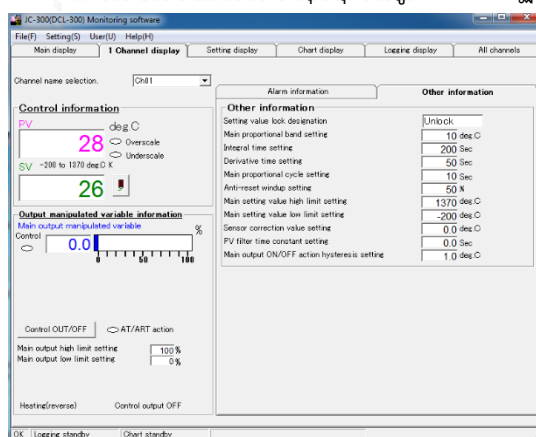
เนื่องจากสารเคมีมีการปนเปื้อนจากฝุ่น ดิน ต่างๆ จึงทำการกรองเอาสิ่งสกปรกออก ซึ่งสารแอมโมเนียมไนเตรทสามารถละลายได้ดีในน้ำ จึงใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย โดยการนำสารเคมีจากที่เกิดเหตุใส่ลงไปในบีกเกอร์แล้วใส่น้ำเป็นตัวทำละลาย จากนั้นใช้กระบอกฉีดยาคูดสารละลายขึ้นมาแล้วใส่ตัวกรองที่ปลายกระบอกฉีดยา ฉีดสารละลายแอมโมเนียมไนเตรทลงบนจานเพาะเชื้อจะเป็นน้ำใสๆ ส่วนผง ฝุ่นจะถูกกรองออกไปโดยตัวกรอง นำสารละลายแอมโมเนียมไนเตรทในจานเพาะเชื้อไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เพื่อให้น้ำระเหยออกไปจนหมด แล้วจะได้ผลึกของสารแอมโมเนียมที่มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวดังรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.3 ผลึกของสารแอมโมเนียมไนเตรทจากสถานที่เกิดเหตุหลังการอบ

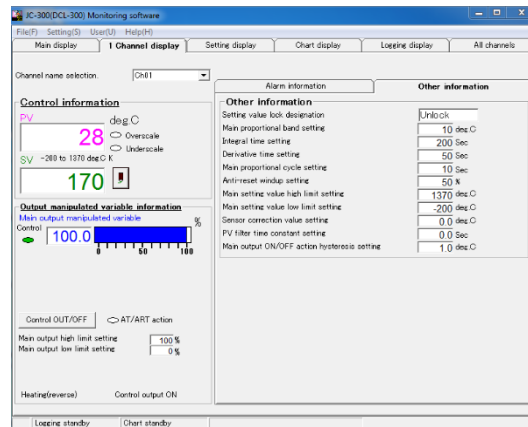
สำหรับการใช้งานเครื่องหลอมที่มีการติดตั้งโปรแกรม JC-300(DCL-300) monitoring software ทำได้ดังนี้

1. เปิดโปรแกรม JC-300(DCL-300) สำหรับควบคุมอุณหภูมิจะปรากฏหน้าจอตามรูปที่ ข.4



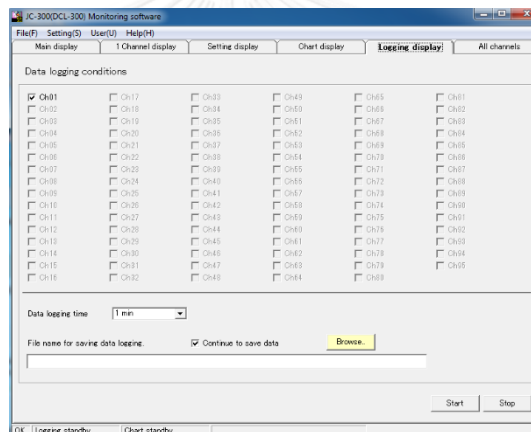
รูปที่ ข.4 หน้าต่าง 1channel display ของโปรแกรม JC-300(DCL-300)

2. เข้าไปที่หน้าต่าง 1channel display ตามรูปที่ ข.5 เพื่อกำหนดค่าอุณหภูมิที่ต้องการให้สารเคมีถึงจุดหลอมเหลว ถ้าเป็นสารแอมโมเนียมไนเตรทจะตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 170 องศาเซลเซียส และถ้าเป็นสารโพแทสเซียมไนเตรทจะตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 340 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข.5 กำหนดค่าอุณหภูมิของสารแอมโมเนียมไนเตรทที่ 170 องศาเซลเซียส

3. เข้าไปที่หน้าต่าง Logging display เพื่อเลือกที่เก็บข้อมูลอุณหภูมิกับเวลาที่ Browse แล้วกด Start เพื่อเริ่มบันทึกข้อมูลตามรูปที่ ข.6



รูปที่ ข.6 หน้าต่าง Logging display เพื่อเลือกที่เก็บข้อมูลอุณหภูมิกับเวลา
การใช้งานกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์จะมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรซ์

| | |
|----------------------------------|--------|
| ความเข้มแสง (intensity) | Max |
| โหมด (mode) | E |
| ความเร็วชัตเตอร์ (speed shutter) | 1/60 |
| ระดับ (level) | Middle |
| สมดุลความขาว (white balance) | Auto |

การใช้งานเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.2 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

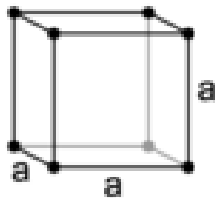
| | |
|---------------------------|-----------|
| อุปกรณ์ตรวจวัด (detector) | Lynxeye |
| Cu ความยาวคลื่น | 1.54184 Å |
| ศักย์ไฟฟ้า | 30 kV |
| กระแส | 10 mA |
| 2θ | 5 ถึง 90 |

การใช้งานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ ข.3

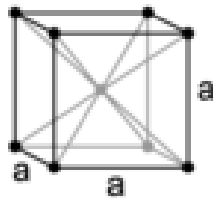
ตารางที่ ข.3 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

| | |
|--------------------|-------------------------------------|
| Mode | Secondary Electron Detector (S.E.D) |
| Voltage | 20 kV |
| S.t.d.Prob Current | 60 |
| W.D. | 10 |

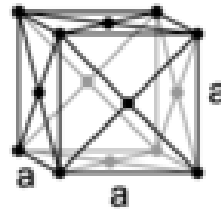
ภาคผนวก ค
ระบบผลึก



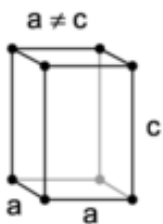
Simple Cubic (P)



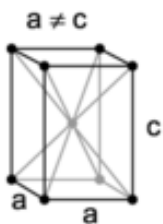
Body-centered Cubic (I)



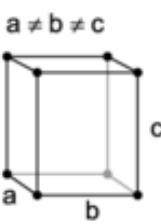
Face-centered Cubic (F)



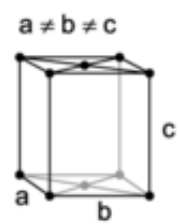
Simple Tetragonal (P)



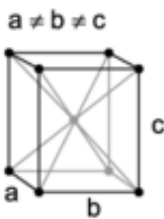
Body-centered Tetragonal (I)



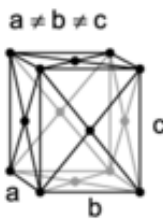
Simple Orthorhombic (P)



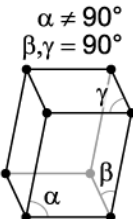
Base-centered Orthorhombic (C)



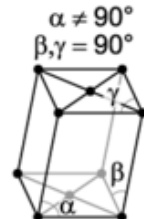
Body-centered Orthorhombic (I)



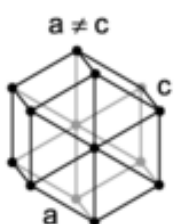
Face-centered Orthorhombic (F)



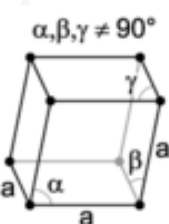
Simple Monoclinic (P)



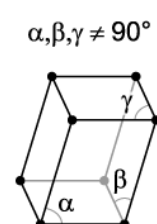
Base-centered Monoclinic (C)



Simple Hexagonal (P)



Simple Rhombohedral (P)



Simple Triclinic (P)

รูปที่ ค.1 แลตทิซบราวเวียส 14 แบบ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ว่าที่ ร.ต.ท.หญิงสุพัตรา สัชฌา เกิดเมื่อวันที่ 25 มิถุนายน พ.ศ. 2533 ภูมิลำเนาอยู่ที่ อำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554

การทำงาน

บรรจุแต่งตั้งเป็นข้าราชการตำรวจ เมื่อวันที่ 6 มกราคม 2557 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ สัญญาบัตร 1 กลุ่มงานตรวจทางเคมี ฟิสิกส์ กองพิสูจน์หลักฐานกลาง สำนักงานพิสูจน์หลักฐานตำรวจ สำนักงานตำรวจแห่งชาติ

การนำเสนอผลงาน

1. Suphattra Sachana, Somrit Wongmanerod and Narumon Suwonjandee. "Analysis of Explosive Chemical Compound Crystal Using Image from Polarized Light Microscope" Siam Physics Congress 2016. Ubon ratchathani, Thailand (8-10 June 2016)
2. Suphattra Sachana, Somrit Wongmanerod and Narumon Suwonjandee. "Identification of Ammonium Nitrate and Potassium Nitrate Using Images From Polarized Light Microscope" The 1 Thai Forum of Forensic Science Conference. Songkhla, Thailand (23-24 June 2016)

ทุนการศึกษา

1. ทุนอุดหนุนการศึกษา ปีการศึกษา 2555 และ 2556 จากคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต ครั้งที่ 2/2558 ภาคการศึกษาปลาย ปีการศึกษา 2557 จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย