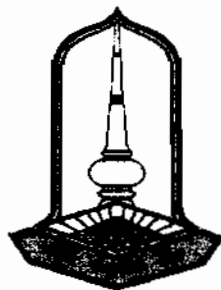


**การปลูกผลึกเดี่ยวโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ถูกเจือด้วยโครโมลัมซินซัลเฟต
แบบทิศทางเดียวและการกำหนดลักษณะเฉพาะ**

เกียรติศักดิ์ จันท์อุป

**รายงานวิชาโครงงานฟิสิกส์
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคามเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์
พฤษภาคม 2556
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม**

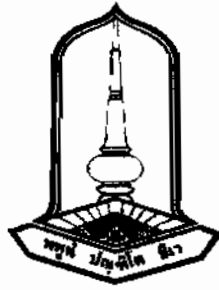


**UNIDIRECTIONAL GROWTH OF TRIGLYCINE SULPHATE DOPED POTASSIUM
DIHYDROGEN PHOSPHATE SINGLE CRYSTALS AND ITS CHARACTERIZATION**

KEATTISAK CHANOUP

**PRESENTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE IN PHYSICS, MAHASARAKHAM UNIVERSITY
MAY 2013**

ALL RIGHTS RESERVED BY MAHASARAKHAM UNIVERSITY



การปลูกผลึกเดี่ยวโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ถูกเจือด้วยไตรโคลซินซัลเฟต
แบบทิศทางเดียวและการกำหนดลักษณะเฉพาะ

เกียรติศักดิ์ จันทร์อุป

รายงานวิชาโครงงานฟิสิกส์ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์

คณะกรรมการคุมสอบ

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรณณ ฤทธิเดช)

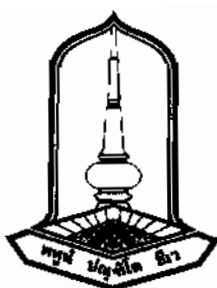
.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ปวีณา เหลากุล)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ศุภชัย ฤทธิเจริญวัตถุ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.สุภกร ทาญสูงเนิน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.อุฤทธิ์ เจริญอินทร์)

วันที่ 7 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2556



Unidirectional Growth of Triglycine Sulphate Doped Potassium Dihydrogen
Phosphate Single Crystals and Its Characterization

Keattisak Chanoup

The physics project has been approved to be partial fulfillment of
requirements for the bachelor degree of science in physics.

Examining Committee

A. RittidechChairperson
(Assistant Professor. Dr. Aurawan Rittidech)

Paveena LaokulMember
(Dr. Paveena Laokul)

Supachai RitjareonwattuMember
(Dr. Supachai Ritjareonwattu)

Supakorn HarnsoongnoenCo-advisor
(Dr. Supakorn Harnsoongnoen)

U. Charoen-InAdvisor
(Dr. Urit Charoen-In)

Date 7th May 2013

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฟิสิกส์ฉบับนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องด้วยได้กำลังใจจากบิดา มารดา ผู้ให้กำเนิดและสนับสนุนด้านการศึกษามาโดยตลอด ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. อุฤทธิ์ เจริญอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาและขอขอบคุณหัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ อาจารย์ ดร.นิติศักดิ์ ปาสาจะ ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ศุภชัย ฤทธิ์เจริญวัตถุ และอาจารย์ ดร.สุภกร หาญสูงเนิน อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ให้ความกรุณาและความช่วยเหลือให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ รวมถึงการหาข้อมูลเอกสาร ในการทำโครงการฟิสิกส์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการที่ให้คำแนะนำในการตรวจแก้ไขโครงการฟิสิกส์จนกระทั่งโครงการฟิสิกส์ครั้งนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้และประสบการณ์อย่างเต็มที่

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาฟิสิกส์ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก ทั้งในด้านสถานที่และอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการ

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือกลางคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ SEM และ FT-IR

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ XRD dielectric และ ferroelectric

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนร่วมงานทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษา รวมทั้งกำลังใจจากทุกคนทำให้โครงการครั้งนี้สำเร็จ

สุดท้ายนี้ขอมอบคุณงามความดีของโครงการนี้แด่ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ทำให้โครงการฟิสิกส์สำเร็จไปได้ด้วยดี และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจงานด้านนี้

เกียรติศักดิ์ จันท์อุป

ชื่อโครงงาน	: การปลูกผลึกเตียาโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ถูกเจือด้วยไตรกลีเซอไรด์แบบทิศทางเดียวและการกำหนดลักษณะเฉพาะ	
ผู้ศึกษาค้นคว้า	: นายเกียรติศักดิ์	จันทร์อุป
อาจารย์ที่ปรึกษา	: อาจารย์ ดร. อุฤทธิ์	เจริญอินทร์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	: อาจารย์ ดร. สุภกร	หาญสูงเนิน
ปริญญา	: วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ.) สาขาฟิสิกส์	
มหาวิทยาลัย	: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2556	

บทคัดย่อ

โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KDP) เป็นสารอินทรีย์มีสมบัติทัศนศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยปกติถูกใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น การผลิตฮาร์ดดิสก์ การเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์ ทำให้ KDP ถูกศึกษาและปรับปรุงประสิทธิภาพของผลึกอย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตามผลึก KDP มีข้อจำกัดในการใช้งานสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งการปรับปรุงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของผลึก KDP สามารถทำได้โดยการเจือสารลงในโครงสร้างผลึก ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของผลึก KDP ด้วยการเจือสารไตรกลีเซอไรด์ (TGS) โดยศึกษาที่ความเข้มข้นของสารเจือ 2% mol และ 5% mol การปลูกผลึกมี 2 วิธีคือ การปลูกผลึกแบบดั้งเดิมและการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว ผลึกที่ปลูกได้จากทั้ง 2 วิธี ถูกนำมาศึกษาสมบัติต่างๆ การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อทำการเจือสาร TGS พบว่ามีสเปกตรัมการเลี้ยวเบนที่ตรงกับผลึก KDP บริสุทธิ์ ประกอบกับการศึกษาหุ้มฟังก์ชันในช่วงเลขคลื่นต่างๆ ได้แสดงหุ้มฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์ของผลึกทั้งสองปรากฏอย่างชัดเจนแสดงว่าการเจือสาร TGS มีการแทรกตัวในผลึก KDP แต่ไม่ได้เปลี่ยนโครงสร้างของผลึก KDP ที่ถูกเจือ การศึกษาลักษณะพื้นผิวพบว่าผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS มีลักษณะเป็นแท่งยาว ภาพที่ได้อาจเป็นภาพของสารละลายที่เหลือน้ำระหว่างการเก็บผลึก ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของผลึก KDP มีค่าเท่ากับ 73 และผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS มีค่าเท่ากับ 53 การศึกษาผลของวิธีการปลูกผลึกต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก พบว่าผลึกที่ปลูกแบบดั้งเดิมมีค่าเท่ากับ 73 ในขณะที่ผลึกที่ปลูกแบบทิศทางเดียวมีค่าเท่ากับ 60 ในสภาวะที่ทดสอบด้วยความถี่ 100 Hz การศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก ไม่พบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของผลึก KDP ทั้งที่ถูกเจือและไม่ถูกเจือ แต่แสดงลักษณะสมบัติตัวต้านทานแบบเชิงเส้นในอุดมคติ

Title : Unidirectional Growth of Triglycine Sulphate Doped Potassium Dihydrogen Phosphate Single Crystals and Its Characterization

Author : Mr. Keattisak Chanoup

Adviser : Dr. Urit Charoen-In

Co-Adviser : Dr. Supakorn Harnsoonghoen

Degree : Bachelor of Science in Physics (B.Sc.Physics)

University : Mahasarakham University **Date** 2013

Abstract

Potassium dihydrogen phosphate (KDP) is an organic compound and has nonlinearly optical properties. KDP has been used widely in electronic applications, such as hard drives and lasers. However KDP has some limitations in its ferroelectric properties due to the low ferroelectricity. Improvements in ferroelectricity can be achieved by adding some dopants. The aim of this research is to enhance the ferroelectricity of KDP. In this research, two methods were used to grow KDP crystals. They were conventional and unidirectional Sankaranarayanan and Ramasamy (SR) methods. Triglycine sulphate (TGS) was doped into KDP at the concentrations of 2 and 5% mol. The XRD spectra of the grown crystals were investigated. The doped KDP has similar spectrum to that of the pure KDP. FT-IR was used to study functional groups in the lattice. These results show that TGS was probably a substitutional dopant. However, TGS did not change the structure of KDP. The crystal surface of KDP was studied using SEM. The rod-like surface of the crystal shows the influence of TGS on the growth direction in the KDP crystals. The relative dielectric constant of the crystals were measured at 100 Hz. When pure KDP was grown by the conventional methods, it has the relative dielectric constant of 73. When grown by the unidirectional technique, the pure KDP has relative dielectric constant of 60. The pure KDP has the relative dielectric constant of 73, while the KDP doped TGS with 5% mol has the relative dielectric constant of 53. The result did not show any ferroelectricity in case of both the doped and pure KDP crystals, but the characteristics of the ideal resistor.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูปภาพ.....	ช

บทที่

1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 สถานที่ทำโครงการ.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ผลึก.....	4
2.2 เทคนิคการปลูกผลึกจากสารละลาย.....	8
2.3 สารเคมี.....	10
2.4 เทคนิคการวิเคราะห์สมบัติของผลึก.....	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
3. ขั้นตอนการปลูกผลึก.....	23
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	23
3.2 แผนผังการดำเนินงานและขั้นตอนการปลูกผลึกแบบดั้งเดิม.....	24
3.3 แผนผังการดำเนินงานและขั้นตอนการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว.....	26
4. ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	28
4.1 ลักษณะและอัตราการเจริญเติบโตของผลึก.....	28
4.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	30
4.3 การศึกษาหมู่ฟังก์ชัน.....	31
4.4 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา.....	33
4.5 การศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริก.....	34
4.6 การศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก.....	35

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	38
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	38
5.2 ปัญหาข้อเสนอแนะ.....	39
บรรณานุกรม.....	40
ภาคผนวก.....	43
ประวัติผู้ศึกษา.....	46

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แกนแสดงทิศทางกับมุมระหว่างแกนของระบบผลึกต่างๆ.....	5
---	---

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 แผนภาพสเปซแลตทิซ.....	4
ภาพที่ 2.2 หน่วยเซลล์มาตรฐาน 14 แบบ แบ่งตามหลักการของบราวน์.....	6
ภาพที่ 2.3 การกำหนดแกนโคออร์ดิเนตสำหรับระบบดัชนี 3 ตัว.....	6
ภาพที่ 2.4 เวกเตอร์ระนาบทิศทาง [111] [121] [100] [0-1-1].....	7
ภาพที่ 2.5 ระนาบ (211) (111) (110) (1-2-1).....	8
ภาพที่ 2.6 ความสามารถในการละลายของสารโดยทั่วไป.....	9
ภาพที่ 2.7 การปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว.....	10
ภาพที่ 2.8 โครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล.....	10
ภาพที่ 2.9 ลักษณะออสซิลลูชันของผลึก KDP.....	11
ภาพที่ 2.10 ลักษณะผลึกไตรโกนัลซินซิลเฟด.....	12
ภาพที่ 2.11 เครื่อง Bruker's X-ray diffraction D8-discover.....	13
ภาพที่ 2.12 เครื่อง PERKIN ELMER spectrum GX FT-IR system.....	14
ภาพที่ 2.13 เครื่อง JEOL JSM-6460LV SEM.....	15
ภาพที่ 2.14 เครื่อง Agilent E4980A.....	16
ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง E-P ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก.....	17
ภาพที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง E-P ของเครื่องมือวัด.....	18
ภาพที่ 2.17 สเปกตรัมระนาบต่างๆ ของผลึก KDP	19
ภาพที่ 2.18 สเปกตรัมระนาบต่างๆ ของผลึก TGS.....	20
ภาพที่ 2.19 สเปกตรัมการส่งผ่านจากเครื่อง FT-IR ของผลึก KDP.....	20
ภาพที่ 2.20 สเปกตรัมการส่งผ่านจากเครื่อง FT-IR ของผลึก TGS.....	21
ภาพที่ 2.21 ลักษณะพื้นผิวของผลึก KDP.....	21
ภาพที่ 2.22 ความสัมพันธ์ค่าโพลาไรเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าของผลึก TGS.....	22
ภาพที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานและขั้นตอนการปลูกผลึกแบบดั้งเดิม.....	24
ภาพที่ 3.2 แผนผังการดำเนินงานและขั้นตอนการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว.....	26
ภาพที่ 4.1 ผลึกปลูกแบบวิธีดั้งเดิม.....	28
ภาพที่ 4.2 ผลึกปลูกแบบทิศทางเดียว.....	29
ภาพที่ 4.3 อัตราการเจริญเติบโตของผลึกที่ปลูกได้.....	30
ภาพที่ 4.4 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	31
ภาพที่ 4.5 สเปกตรัม FT-IR สำหรับการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลึก.....	32
ภาพที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวของผลึกที่ปลูกได้.....	33
ภาพที่ 4.7 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก.....	34
ภาพที่ 4.8 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของผลึก KDP ที่ปลูกแบบดั้งเดิม และผลึก KDP ที่ปลูกแบบทิศทางเดียว.....	35
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของ P และ E.....	36

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประวัติของกระบวนการเกิดผลึกเริ่มต้นจากการสังเกตเห็นการเกิดของเกล็ดในน้ำทะเลโดยการระเหย ซึ่งเป็นวิธีเก่าแก่ของการเกิดผลึก สำหรับพื้นฐานการเกิดผลึกได้รับมาจากในศตวรรษที่ 18 ถึง 19 จากความเข้าใจถึงทฤษฎีของอุณหพลศาสตร์และการพัฒนาการเกิดนิวเคลียสและทฤษฎีเจริญเติบโตของผลึก [1] การที่มนุษย์มีความรู้ในเรื่องเกิดผลึก มนุษย์ได้รู้จักกับผลึกชนิดต่างๆ เป็นเวลานานและมีการนำมาใช้ประโยชน์ในสังคม เช่น โลหะ และสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น แต่การนำมาใช้งานสำหรับอุปกรณ์ต่างๆ ยังมีข้อจำกัดทำให้ผลึกเกิดความเสียหาย ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาพัฒนาหรือสังเคราะห์ด้วยเทคโนโลยีใหม่ๆ เพื่อให้ผลึกมีคุณภาพที่ดีขึ้น

ในปัจจุบันเทคโนโลยีสมัยใหม่ของการปลูกผลึกเป็นสิ่งสำคัญมากต่ออุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมโฟโตนิกส์ และอุตสาหกรรมต่างๆ ประโยชน์ของการพัฒนาเทคโนโลยีการปลูกผลึกทำให้เกิดสิ่งต่างๆ เช่น เครื่องตรวจจับรังสี เครื่องขยายเสียง เลนส์ และคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ความสัมพันธ์ของเทคโนโลยีการปลูกผลึกสามารถแสดงได้ว่าผลึกเป็นสิ่งที่ครอบคลุมทุกสาขาทั้งฟิสิกส์ เคมี วัสดุศาสตร์ วิศวกรรมเคมี ได้อย่างชัดเจน เทคโนโลยีการปลูกผลึกถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องมีการปลูกผลึกโดยวิธีต่างๆ เช่น การปลูกจากสารละลาย การปลูกแบบเจล การปลูกจากการหลอมละลาย การปลูกแบบไอ หรือปลูกผลึกตามต้องการแบบลักษณะเฉพาะโดยการควบคุมสมบัติ เช่น การปลูกผลึกจำพวก GaAs และ InP ที่ต้องปลูกในอุณหภูมิที่สูง อย่างไรก็ตามยังมีปัญหาเกิดขึ้นภายใต้กระบวนการดังกล่าวไม่ว่าจะเป็นต้นทุนการผลิตหรืออุปกรณ์ในการทดลอง ดังนั้นจึงมีการคิดหรือจัดทำอุปกรณ์หาวิธีการปลูกที่ได้ผลึกตามความต้องการ

เทคโนโลยีการปลูกผลึกมี 2 ลักษณะ แบ่งตามสภาพการเกิด คือ ผลึกที่เกิดการหลอมละลาย (growth from melt) และผลึกที่เกิดจากตกผลึกของสารละลาย (solution growth) ซึ่งการปลูกผลึกจากสารละลายสามารถทำได้ง่ายและใช้งบประมาณที่ไม่สูงใช้วัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ ที่สามารถหาได้ภายในประเทศ กระบวนการพัฒนาเทคโนโลยีการปลูกผลึกเชิงทัศนศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear optic) มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการนำมาใช้สำหรับวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ การประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับโฟตอนสำหรับเก็บข้อมูลและการประมวลผลภาพ

ผลึกเชิงทัศนศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้น มีสมบัติในการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของแสงที่มีความเข้มสูงเมื่อแสงผ่านวัสดุดังกล่าว การสังเคราะห์ผลึกเชิงทัศนศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นมีข้อดีคือสามารถปลูกได้ง่ายโดยวิธีพื้นฐานของการปลูกผลึก โดยเตรียมจากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่สามารถละลายน้ำได้ สมบัติของผลึกจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความเข้มข้นและอุณหภูมิ

ผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (potassium dihydrogen phosphate; KDP) เป็นผลึกเชิงทัศนศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นชนิดหนึ่ง สามารถเจริญเติบโตได้ดีมีขนาดที่ใหญ่ ด้วยการปลูกผลึกจากสารละลาย โดยให้ตัวทำละลายระเหยไปอย่างช้าๆ [2] ผลึก KDP ถูกนำไปใช้งานได้

หลากหลาย เช่น ถูกใช้ในการสร้างสารโมโนที่สอง สาม และสี่เพื่อเพิ่มความถี่ของเลเซอร์ ถูกใช้เป็นซัดเตอร์สำหรับการถ่ายภาพความเร็วสูง เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การนำผลึก KDP มาใช้งานยังมีข้อจำกัด จึงต้องมีการพัฒนาสมบัติของผลึก KDP ให้ดีขึ้น การพัฒนาสมบัติของผลึกทำได้หลายวิธี เช่น โครงงานนี้สนใจวิธีการเจือสารเข้าไปในโครงสร้างผลึก โดยสมบัติต่างๆ ที่แสดงออกมาขึ้นอยู่กับสารที่เจือเข้าไป ในงานวิจัย [3] เป็นการศึกษาผลของการปลูกผลึก KDP โดยการเจือสาร KCl เข้าไปในกระบวนการปลูก โดยพบว่าการเจือ KCl ช่วยให้ผลึก KDP มีสมบัติที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการเจือ L-aspartic acid และ Tl^+ [4,5] เป็นต้น

จากการรายงานในงานวิจัยต่างๆ มีการศึกษาการเจือสารที่ต่างกัน โดยโครงงานนี้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาสมบัติของผลึก KDP โดยการเลือกสารไตรไกลซีนซัลเฟต (triglycine sulphate; TGS) เป็นสารเจือเข้าไปในผลึก KDP โดย TGS เป็นสารชนิดใหม่ มีสมบัติที่เด่นชัดโดยเฉพาะสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก [6] มีการนำ TGS มาประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มากมาย โดยสนใจการปลูกผลึกแบบดั้งเดิมและการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว (SR) ในงานวิจัย [7] พบว่าการปลูกด้วยวิธีดังกล่าวเหมาะสมสำหรับการปลูกผลึกทัศนศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นโดยนำผลึกที่ได้จากการทดลองมาศึกษาเปรียบเทียบกับสมบัติต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการปลูกผลึกเดี่ยวโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่เจือด้วยไตรไกลซีนซัลเฟต

1.2.2 เพื่อศึกษาศึกษาและเปรียบเทียบการกำหนดลักษณะเฉพาะต่างๆ ของผลึกที่ปลูกได้

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1.3.1 ใช้สารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเป็นสารหลักในการปลูกผลึกจากสารละลายด้วยวิธีดั้งเดิม

1.3.2 ใช้สารไตรไกลซีนซัลเฟตเป็นสารที่เจือเพื่อศึกษาสมบัติที่เปลี่ยนแปลง

1.3.3 อธิบายลักษณะโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของผลึกโดยวิธีการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD)

1.3.4 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของผลึกโดยใช้เทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

1.3.6 อธิบายลักษณะพื้นผิวของผลึกที่สังเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิค scanning electron microscope (SEM)

1.3.7 อธิบายสมบัติไดอิเล็กทริกโดยแบ่งออกเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss)

1.3.8 อธิบายสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric)

1.4 สถานที่ทำโครงงาน

1.4.1 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

1.4.2 ศูนย์เครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 สามารถนำผลจากการศึกษาการปลูกผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแบบทิศทางเดียวที่ถูกเจือด้วยไตรกลีเซอีนซัลเฟตไปใช้ในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้

1.5.2 สามารถปลูกผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ถูกเจือด้วยไตรกลีเซอีนซัลเฟตจากวิธีแบบดั้งเดิมและแบบทิศทางเดียว

1.5.3 สามารถรู้ถึงลักษณะเฉพาะของผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ถูกเจือด้วยไตรกลีเซอีนซัลเฟต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดทั่วไปเกี่ยวกับผลึก วิธีการปลูกผลึก โดยเน้นการปลูกผลึกจากสารละลาย ประกอบด้วยการปลูกแบบดั้งเดิมและแบบทิศทางเดียว และรวมไปถึงรายละเอียดเกี่ยวกับเทคนิคการตรวจสอบสมบัติของผลึก ซึ่งมีรายละเอียดและหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.1 ผลึก

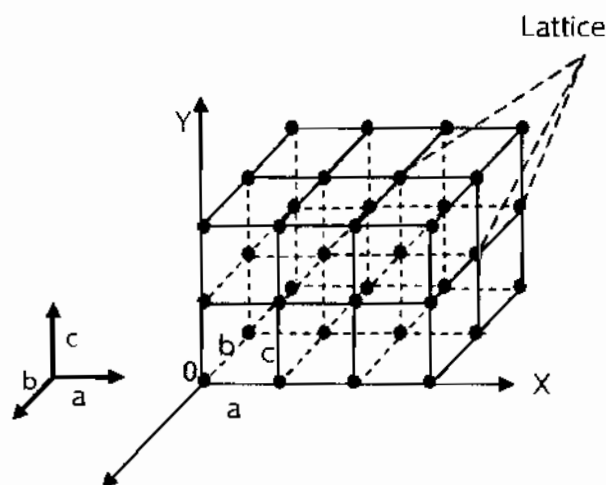
ผลึก ประกอบด้วย อะตอม ไอออน โมเลกุลมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ยึดกันด้วยแรงชนิดต่างๆ ประกอบกันเป็นลักษณะที่เป็นรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน สำหรับผลึกบางอย่างอาจมีรูปแบบผลึกได้หลายแบบ เรียกว่า ปรากฏการณ์อัญรูป (polymorphism) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น แต่ผลึกบางชนิดที่ต่างกันอาจมีรูปแบบผลึกเหมือนกัน เช่น NaCl KCl MgO เป็นต้น เรียกว่า ภาวะรูปร่างเหมือนกัน (isomorphism)

ขนาดของผลึกสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นกับสภาวะขณะที่เกิดเป็นผลึก โดยผลึกขนาดใหญ่จะเกิดจากการตกผลึกช้า ในสารละลายที่อิ่มตัวยังยวดยเล็กน้อย เช่น ผลึกที่เกิดในธรรมชาติมักจะมีขนาดใหญ่ แต่ถ้ามีการตกผลึกอย่างรวดเร็วจากสารละลายที่อิ่มตัวยวดย จะได้ผลึกที่มีขนาดเล็ก โดยอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ดังนั้น ขนาดผลึกอาจเป็นสิ่งที่แสดงถึงสภาวะการเติบโต ซึ่งจะส่งผลต่อรูปแบบโครงสร้างของผลึก

2.1.1 ระบบโครงสร้างผลึก

โครงสร้างผลึกประกอบขึ้นจากจุดพื้นฐานต่อกันอย่างเป็นระเบียบซ้ำกันไปทั้งสามทิศทาง โดยระบบจุดที่ประกอบกันขึ้นเป็นโครงข่าย เรียกว่า สเปซแลตทิซ (space lattice) แสดงดังภาพที่

2.1



ภาพที่ 2.1 แผนภาพสเปซแลตทิซ [8]

หน่วยเซลล์ (unit cell) เป็นหน่วยที่เล็กที่สุดที่สามารถแสดงลักษณะของผลึกได้ โดยความยาวด้านทั้งสามและขนาดมุมทั้งสามของหน่วยเซลล์เรียกว่า แลตทิซพารามิเตอร์ (lattice parameters) ซึ่งแลตทิซพารามิเตอร์และสมบัติความสมมาตรของผลึกเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดสมบัติต่าง ๆ ของผลึก เช่น ความแข็ง การดูดกลืนแสงและแถบพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์ โครงสร้างผลึกประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วนคือ แลตทิซ และ เบซิส (หรือ โมทิฟ)

แลตทิซ คือ โครงข่าย 3 มิติ จุดตัดของโครงข่ายเรียกว่า จุดแลตทิซ

เบซิส หรือ โมทิฟ คือ อะตอม อีออน ที่เรียงตัวอยู่ตามจุดของแลตทิซ

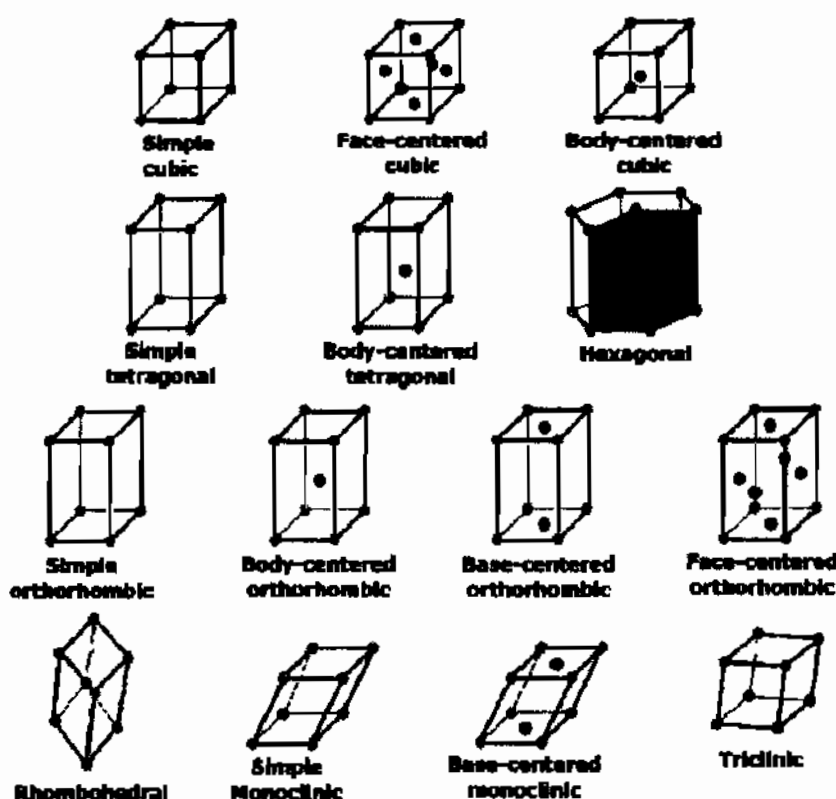
ดังนั้น ผลึกคือแลตทิซที่มีเบซิสเข้าไปอยู่ที่จุดแลตทิซอย่างสม่ำเสมอ

ในธรรมชาติมีการจัดเรียงจุดแลตทิซหลายแบบ ประกอบกับเบซิสแตกต่างกันไปตามชนิดของผลึก ทำให้แลตทิซพารามิเตอร์ต่างกัน อย่างไรก็ตาม ผลึกที่มีแลตทิซพารามิเตอร์คล้ายกันจะมีสมบัติเหมือนกัน ดังนั้น จึงมีการจัดรูปแบบโครงสร้างผลึกโดยใช้แลตทิซพารามิเตอร์เป็นตัวกำหนดกลุ่มของโครงสร้างผลึก ในปี ค.ศ.1848 Auguste Bravais นักผลึกวิทยาชาวฝรั่งเศส ได้เสนอการจัดระบบพื้นฐานของโครงสร้างผลึกไว้ทั้งหมด 7 กลุ่ม โดยแบ่งตามความยาวด้านทั้งสามและมุมทั้งสามของหน่วยเซลล์ ดังแสดงตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แกนของแลตทิซกับมุมระหว่างแกนของระบบผลึกต่างๆ

ระบบผลึก	ความยาวด้านของหน่วยเซลล์	ขนาดของมุมของหน่วยเซลล์
ลูกบาศก์	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
เตตระโกนัล	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
ออโธโรมบิก	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
โมโนคลินิก	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
ไตรคลินิก	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
เฮกซะโกนอล	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
รอมโบฮีดรัล	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$

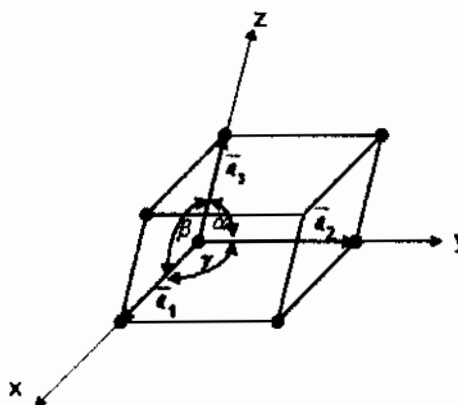
จากระบบโครงสร้างพื้นฐานของผลึกทั้ง 7 กลุ่ม สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ simple หรือ primitive (p) body-centred (i) face-centred (f) และ base-centred รวมเป็น 14 แบบ เรียกว่า แลตทิซบราเวส์ (Bravais lattice) หรือ หน่วยเซลล์มาตรฐาน (standard unit cells) แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 หน่วยเซลล์มาตรฐาน 14 แบบ แบ่งตามหลักการของบราวส์ [8]

2.1.2 การระบุทิศทางและระนาบ

การอธิบายโครงสร้างผลึก เพื่อความสะดวกต้องมีการระบุทิศทางและระนาบในหน่วยเซลล์ วิธีโดยทั่วไปใช้ระบบดัชนี 3 ตัว (three-indices system) โดยพิจารณาค่าของดัชนีต่างๆ ที่ใช้ระบบโคออร์ดิเนต 3 แกน คือ x y z ที่วางตัวในแนวของขอบหน่วยเซลล์ขนานกับแกน $\vec{a}_1$ $\vec{a}_2$ $\vec{a}_3$ ตามลำดับ ดังภาพที่ 2.3 โดยมีจุดกำเนิดอยู่ที่มุมใดมุมหนึ่งของหน่วยเซลล์ซึ่งเป็นจุดร่วมของจุดเริ่มของแกนผลึก $\vec{a}_1$ $\vec{a}_2$ $\vec{a}_3$



ภาพที่ 2.3 การกำหนดแกนโคออร์ดิเนตสำหรับระบบดัชนี 3 ตัว [8]

การระบุทิศทาง

การระบุทิศทางเพื่อความสะดวกในการอธิบายโครงสร้างของผลึก ดังนั้น จึงต้องมีการระบุสัญลักษณ์ของทิศทางให้ถูกต้อง โดยใช้สัญลักษณ์ที่เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller index) เขียนแสดงได้โดยการใช้ชุดตัวเลขสามตัวในวงเล็บใหญ่ใช้สำหรับโครงสร้างผลึกทั่วไป เช่น ทิศทาง $[100]$ และ $[011]$ แต่โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลนิยมใช้ชุดตัวเลขสี่ตัว เช่น ทิศทาง $[1100]$ และ $[0111]$ โดยวิธีการระบุทิศทาง สามารถทำได้ดังนี้

1) เขียนเวกเตอร์ให้มีจุดเริ่มต้นจากจุดกำเนิด แล้วชี้ตามแนวของเส้นตรงที่ต้องการระบุทิศทาง ความยาวของเวกเตอร์ ทำให้สะดวกต่อการอ่านตำแหน่งจุดปลาย โดยทั่วไปจุดปลายสิ้นสุดที่ผิวขอบหรือมุมของหน่วยเซลล์

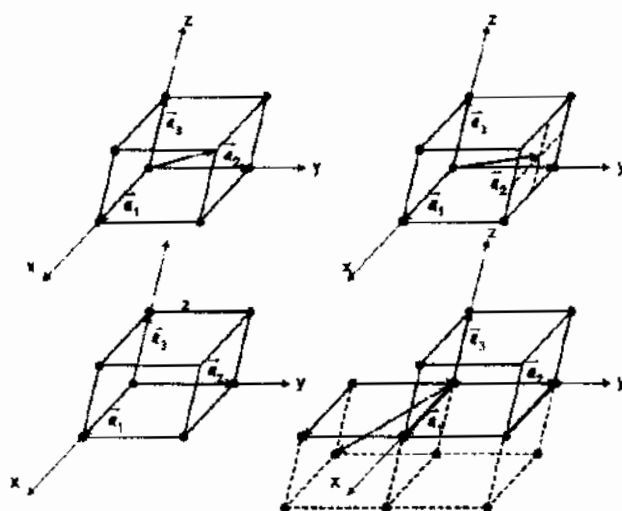
2) จากนั้น อ่านตำแหน่งจุดปลายของเวกเตอร์ในข้อ 1 จะได้ค่า $U V W$ ตามทิศทางแกนทั้งสาม โดย $U V W$ เป็นองค์ประกอบสเกลาร์ของเวกเตอร์ในทิศ $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$

3) ทำให้ $U V W$ เป็นชุดจำนวนเต็มที่น้อยสุด $u v w$ โดยการคูณหรือหารด้วยค่าคงที่ที่เหมาะสม

4) ทิศของเวกเตอร์ในข้อ 1 ระบุได้ในรูป $[u v w]$ โดย $(u v w)$ เป็นพิกัดจุดปลายของเวกเตอร์จากจุดกำเนิดไปยังจุด $u v w$

5) เวกเตอร์ใดเมื่อไม่ผ่านจุดกำเนิด ถ้าชี้ไปในทางเดียวกันกับเวกเตอร์ในข้อ 4 จะมีทิศทางเดียวกับเวกเตอร์ในข้อ 4 และระบุทิศทางด้วยดัชนีมิลเลอร์ชุดเดียวกัน

สำหรับพิกัดของจุดที่เป็นเลขลบ การกำหนดทิศทางดัชนีมิลเลอร์ให้ใส่เครื่องหมาย “-” ไว้ด้านบนหรือด้านล่างของตัวเลข เช่น $1 \bar{2} 0$ หรือ $1 -2 0$ ตัวอย่างการระบุทิศทางสามารถแสดงดังภาพที่ 2.4



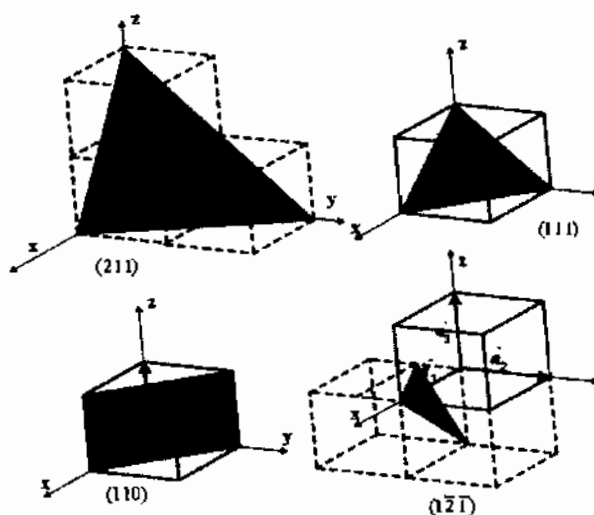
ภาพที่ 2.4 เวกเตอร์ระบุทิศ $[111]$ $[121]$ $[100]$ $[0-1-1]$ [8]

การระบุระนาบ

ดัชนีมิลเลอร์สามารถใช้ในการระบุระนาบของโครงสร้างผลึก โดยการใช้สัญลักษณ์เป็นจำนวนเต็ม 3 ตัว เขียนติดกันภายในเครื่องหมายวงเล็บ () เช่น (222) (210) (110) เป็นต้น วิธีการหาดัชนีมิลเลอร์เพื่อระนาบใดๆ สามารถทำได้ดังนี้

- 1) กำหนดแกน xyz ในทิศทาง $\overline{a_1}$ $\overline{a_2}$ $\overline{a_3}$ เช่นเดียวกันกับการระบุทิศทาง
- 2) หาระยะที่ระนาบตัดแกน xyz
- 3) ระบุระยะที่ระนาบตัดแกน xyz ในหน่วยของ $\overline{a_1}$ $\overline{a_2}$ $\overline{a_3}$ โดยได้ค่าเป็น (Ha, Ka, La)
- 4) หาส่วนกลับ $\frac{1}{H} \frac{1}{K} \frac{1}{L}$ โดยทำให้เป็นจำนวนเต็มทีมน้อยที่สุด ตัวเลขที่ได้คือ hkl
- 5) จากตัวเลข hkl ที่ได้ตามข้อ 4 เป็นดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้ระบุระนาบ hkl โดยเขียนในรูปแบบ (hkl) อ่านว่า ระนาบ hkl

ตัวอย่างการระบุระนาบ เช่น ระนาบที่มีจุดตัดแกน xyz ที่ $1a_1$ $2a_2$ $2a_3$ ตามลำดับ ในที่นี้ $H=1$ $K=2$ $L=2$ มีส่วนกลับของระยะตัดแกน xyz คือ $\frac{1}{H} = \frac{1}{1}$ $\frac{1}{K} = \frac{1}{2}$ $\frac{1}{L} = \frac{1}{2}$ ทำให้เป็น จำนวนเต็มทีมน้อยที่สุด โดยการคูณด้วย 2 จะได้ชุดตัวเลข 2 1 1 นั่นคือ ได้ค่า $h=2$ $k=1$ $l=1$ ดังนั้นดัชนีมิลเลอร์ สำหรับระนาบนี้ คือ (211) การอ้างถึงระนาบโดยทั่วไปจะใช้คำว่า “ระนาบ” ตามด้วยดัชนีมิลเลอร์ เช่น ระนาบ (211) เป็นต้น ดังภาพที่ 2.5 แสดงระนาบ (211) พร้อมกับยกตัวอย่างระนาบอื่นๆ [8]



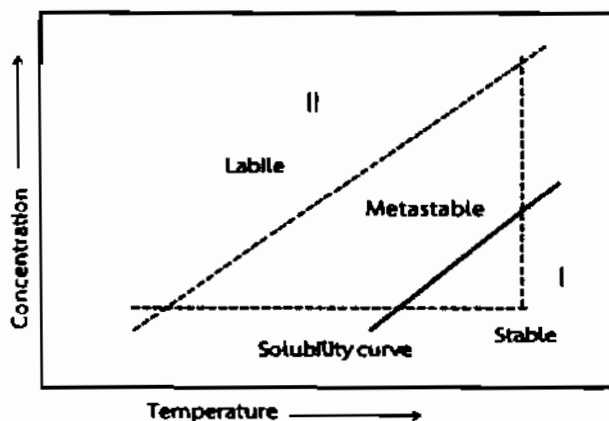
ภาพที่ 2.5 ระนาบ (211) (111) (110) (1-2-1) [8]

2.2 เทคนิคการปลูกผลึกจากสารละลาย

การปลูกผลึกจากสารละลายมีหลายวิธี ซึ่งโครงงานนี้ใช้วิธีการปลูกผลึกจากสารละลาย โดยแบ่งเป็นสองแบบ คือ วิธีปลูกแบบดั้งเดิมและแบบทิศทางเดียว

2.2.1 การปลูกผลึกแบบดั้งเดิมจากสารละลาย

การปลูกผลึกจากสารละลายเป็นการนำสารที่ต้องการทำให้เกิดผลึก ไปละลายในตัวทำละลาย จนกระทั่งได้สารละลายอิ่มตัว แล้วปล่อยให้ตัวทำละลายเกิดการระเหยอย่างช้าๆ จากนั้นสารละลายจะเกิดการอิ่มตัวยิ่งยวด โดยสารจะสารแยกตัวออกมาจากสารละลายในรูปของแข็ง กระบวนการนี้เรียกว่า การตกผลึก (crystallization) และสารละลายอื่นๆ ที่เหลืออยู่ในสารละลายเรียกว่า mother liquor

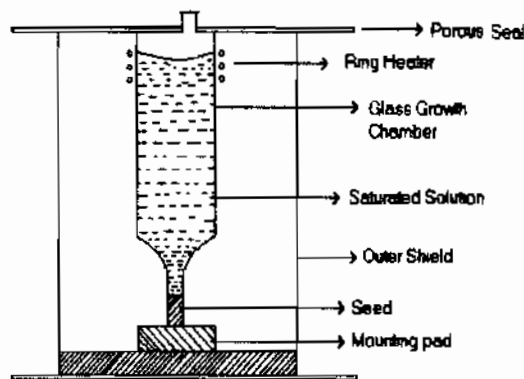


ภาพที่ 2.6 ความสามารถในการละลายของสารโดยทั่วไป [9]

การปลูกผลึกจากสารละลายสามารถทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลายให้อยู่ในบริเวณที่เรียกว่า บริเวณ metastable zone จากภาพที่ 2.6 จะเห็นว่า กราฟความเข้มข้นของสารละลายถูกแบ่งออกเป็นสองบริเวณด้วยเส้นความเข้มข้นสูงสุด (solubility curve) ที่อุณหภูมิต่างๆ ผลึกจะไม่สามารถเกิดในบริเวณที่ต่ำกว่าเส้นความสามารถในการละลายได้ เพราะสารละลายในบริเวณนี้ยังไม่เกิดการอิ่มตัว สำหรับจุดที่อยู่บนเส้นความเข้มข้นสูงสุด เป็นบริเวณที่สารละลายอิ่มตัว มีการเกิดผลึกและการละลายของสารสมดุลกัน ผลึกจึงไม่มีการเจริญเติบโต ส่วนบริเวณที่อยู่เหนือเส้นความเข้มข้นสูงสุด เป็นบริเวณที่สารละลายเกิดความอิ่มตัวยิ่งยวด ผลึกจึงสามารถเจริญเติบโตได้ โดยสามารถแบ่งออกเป็นสองบริเวณคือ labile zone เป็นบริเวณที่ผลึกเกิดขึ้นโดยไม่สามารถควบคุมลักษณะของการเกิดได้ และบริเวณ metastable zone ซึ่งเป็นบริเวณที่ผลึกเกิดขึ้นได้เมื่อถูกกระตุ้นจากภายนอก โดยปกตินิยมใช้ซีตหรือผลึกขนาดเล็กมาเหนี่ยวนำให้เกิด ต่อเนื่องจากผลึกดังกล่าว ดังนั้น จึงสามารถควบคุมการเกิดผลึกในบริเวณนี้ได้โดยการควบคุมอุณหภูมิกับความเข้มข้นที่เหมาะสม

2.2.2 การปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว (SR)

จากการศึกษาของ Sankaranarayanan และ Ramasamy [9] พบว่าสามารถเลือกขนาด และทิศทางการเกิดของผลึกได้ โดยการบังคับทิศทางการเจริญเติบโตของผลึก วิธีการนี้เรียกว่า การปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว (Sankaranarayanan- Ramasamy method, SR) อุปกรณ์การปลูกด้วยวิธีนี้ ถูกแสดงดังภาพที่ 2.7



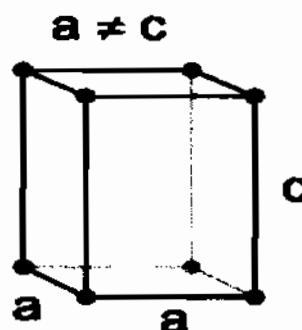
ภาพที่ 2.7 การปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว

จากภาพที่ 2.7 แสดงวิธีการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว โดยการปลูกผลึกสามารถเลือกระนาบของขีดมาเป็นตัวเหนี่ยวนำการเจริญเติบโตของผลึก ทำให้ผลึกเจริญเติบโตในระนาบหรือทิศทางที่ต้องการ โดยนำขีดไปวางไว้ด้านล่างของหลอดทดลอง จากนั้นใช้วิธีการควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้เกิดสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดในบริเวณผิวสัมผัสกับขีด โดยใช้ขดลวดความร้อนควบคุมอุณหภูมิให้บริเวณด้านบนมีอุณหภูมิสูง ในขณะที่บริเวณด้านล่าง (เหนือขีด) มีอุณหภูมิต่ำ ผลึกจะค่อยๆ เกิดตามระนาบหรือทิศทางของขีด การปลูกผลึกจากสารละลายด้วยเทคนิคการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียวได้รับความนิยมแพร่หลาย เพราะสามารถนำไปใช้ปลูกผลึกเชิงทัศนศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น และผลึกของสารอื่นๆ ได้ผลึกคุณภาพสูงที่มีต้นทุนต่ำ ในปัจจุบันเทคนิคการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อปลูกผลึกเดี่ยวของสารชนิดต่างๆ ผลึกที่ปลูกด้วยวิธีนี้มีคุณภาพที่ดีขึ้น ทั้งสมบัติทางแสงและลักษณะทางกายภาพ [10, 11]

2.3 สารเคมี

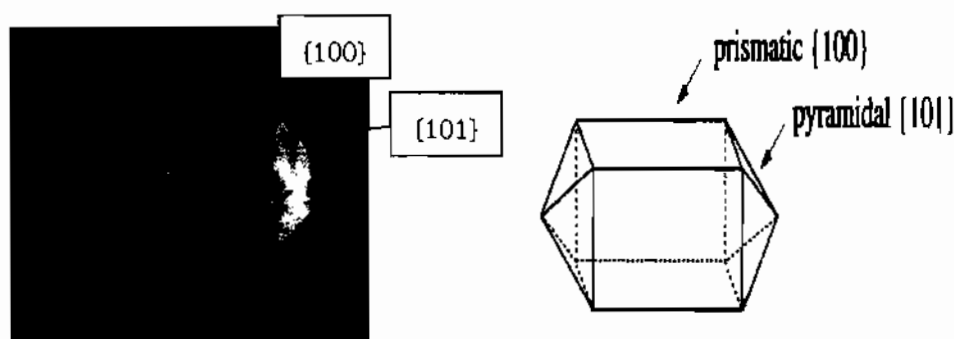
2.3.1 โพลทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

โพลทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต เป็นสารอนินทรีย์มีสูตรโมเลกุลคือ KH_2PO_4 ลักษณะเป็นเม็ดสีขาว ในสถานะที่เป็นสารละลายมีค่า pH อยู่ในช่วง 4.2-4.7 เป็นสารที่ไม่มีความสมมาตรในผลึก ซึ่งส่งผลต่อสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นทางแสงของผลึก KDP [12]



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล [12]

ผลึก KDP ประกอบด้วยไอออนบวก ไอออนลบ และพันธะไฮโดรเจน มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล ดังภาพที่ 2.8 โดยหน่วยเซลล์มีความยาวของแกน a และแกน b เท่ากับ $7.44656 \text{ \AA}$ แต่แกน c มีความยาวเท่ากับ $7.04645 \text{ \AA}$ มุมระหว่างแกน ($\alpha \beta \gamma$) ทำมุมต่อกัน 90° [12] ในปัจจุบันผลึก KDP ได้รับความสนใจเนื่องจากสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก และสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางแสง ที่เหมาะสำหรับการแปลงความถี่ฮาร์โมนิกที่สูงขึ้นของระบบเลเซอร์ โดยสร้างฮาร์โมนิกที่สองและสามจากความถี่พื้นฐาน นอกจากนี้ ความไม่เชิงเส้นทางแสงของผลึก KDP ถูกใช้เป็นมาตรฐานในการตอบสนองลักษณะทางแสงของผลึกอื่นๆ อีกด้วย [13]

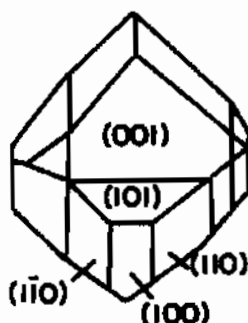


ภาพที่ 2.9 ลักษณะพื้นฐานของผลึก KDP [13]

การปลูกผลึก KDP โดยทั่วไปนิยมปลูกในทิศทาง $\langle 100 \rangle$ และ $\langle 101 \rangle$ ดังภาพที่ 2.9 เพราะทิศทางดังกล่าวสามารถปลูกได้ง่าย และมีอัตราการเจริญเติบโตของผลึกสูง จากการศึกษาของ Sankaranarayanan และ Ramasamy พบว่า วิธีการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว เหมาะสมสำหรับการปลูกผลึกเดี่ยวที่ไม่เป็นเชิงเส้นทางแสง [9]

2.3.2 ไตรไกลซินซัลเฟต

ไตรไกลซินซัลเฟต มีสูตรโมเลกุลคือ $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3\text{H}_2\text{SO}_4$ เกิดจากการสร้างพันธะระหว่างไกลซินและกรดซัลฟูริก ในอัตราส่วน 3:1 โครงสร้างผลึกไตรไกลซินซัลเฟต เป็นแบบโมโนคลินิก ตามหลักการของบราวส์ ดังภาพที่ 2.10 หน่วยเซลล์มีความยาวของแกนไม่เท่ากัน โดยแกน a มีค่าเท่ากับ $0.9417 \text{ \AA}$ แกน b มีค่าเท่ากับ $1.2643 \text{ \AA}$ และแกน c มีค่าเท่ากับ $0.5735 \text{ \AA}$ มุม α และ γ มีค่าเท่ากับ 90° แต่มุม β ทำมุมไม่เท่ากับ 90° [14] ผลึก TGS มีสมบัติเด่นในด้านเฟอร์โรอิเล็กทริก [6] จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ฮาร์ดดิส เป็นต้น



ภาพที่ 2.10 ลักษณะผลึกไตรโกไลซีนซัลเฟต [14]

2.4 เทคนิคการวิเคราะห์สมบัติของผลึก

2.4.1 เทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเพื่อการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ โดยสามารถใช้วิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารประกอบภายในโครงสร้างผลึก ได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ โดยปรากฏการณ์เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่เกิดขึ้น เป็นไปตามกฎของแบรกก์

ปรากฏการณ์เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ในโครงสร้างผลึกเกิดขึ้นลักษณะเดียวกับการสะท้อนของแสงบนกระจกเงาราบ เพราะอะตอมในผลึกจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ มีชุดระนาบของอะตอมที่เหมือนกัน ห่างกันด้วยระยะทางที่เท่ากัน ทำให้เกิดระนาบการสะท้อนขึ้นในโครงสร้างผลึก รังสีเอกซ์ได้จากการให้กระแสไฟฟ้าที่ขั้วแคโทด แล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาและถูกเร่งจากความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด เพื่อให้อิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดวิ่งเข้าชนเป้าที่ขั้วแอโนด ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา

เมื่อนำรังสีเอกซ์มาฉายลงบนผลึกที่ต้องการศึกษา ลำรังสีเอกซ์ส่วนใหญ่ผ่านผลึกไปได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่บางส่วนสะท้อนและกระจายออกไปในหลายทิศทางแล้วเป็นรูปแบบที่ไม่ต่อเนื่อง มุมของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนออกมาจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับขนาดรูปร่างและสมมาตรของหน่วยเซลล์และพบการเกิดลวดลายการเลี้ยวเบนขึ้น รังสีเอกซ์ที่สะท้อนออกจากระนาบชุดหนึ่งๆ จะแทรกสอดแบบเสริมกัน เมื่อระยะทางแต่ละลำรังสีที่ตกกระทบบนระนาบ มีความแตกต่างกันเป็นจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ดังความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.1

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.1)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

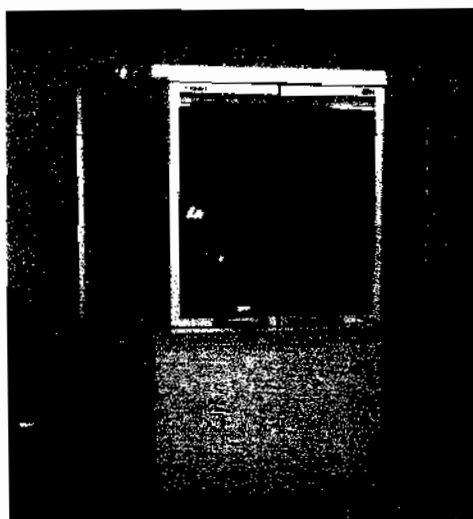
θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบของอะตอมซึ่งเท่ากับมุมตกกระทบ

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

เมื่อใช้รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับระยะห่างของอะตอมภายในผลึกและหมุนผลึกทำมุมต่างๆ กับแสงที่ตกกระทบ จะทำให้ได้รูปแบบการเลี้ยวเบน การหมุนผลึกจะทำให้ได้ข้อมูลจาก

การเลี้ยวเบนที่มุมต่างๆ การวัดสเปกตรัมของสารตัวอย่างจะหมุนผลึกเป็นมุม θ ขณะที่อุปกรณ์การตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์จะหมุนเป็นมุม 2θ ตามหลักการเลี้ยวเบนของแบรกก์

ในทางปฏิบัติ นิยมเตรียมสารตัวอย่างจากผงของผลึกเดี่ยว ทำให้ชิ้นสารตัวอย่างประกอบขึ้นจากผลึกเล็กๆ จำนวนมาก และจัดเรียงตัวอย่างสุ่ม ทำให้แต่ละระนาบ hkl มีตำแหน่งแตกต่างกัน ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ถูกแสดงเป็นเส้นสเปกตรัมความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมากับมุมที่ทำการวัด เมื่อได้ค่า θ จะทำให้สามารถคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างระนาบ (d) ได้ตามสมการของแบรกก์และสามารถบอกโครงสร้างผลึกจากระนาบที่เกิดขึ้น โดยนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน JCPDS (joint committee on powder diffraction standard) หรือเทียบกับสเปกตรัมจากงานวิจัยต่างๆ [15] ตัวอย่างเครื่อง Bruker's X-ray diffraction D8-discover แสดงดังภาพที่ 2.11



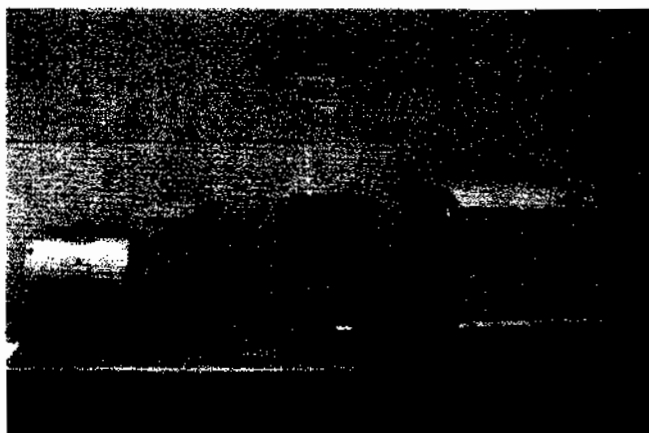
ภาพที่ 2.11 เครื่อง Bruker's X-ray diffraction D8-discover [16]

2.4.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค FT-IR

เทคนิค FT-IR เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์พันธะของโมเลกุลต่างๆ โดยพันธะเหล่านี้ สามารถแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของผลึก เทคนิคนี้สามารถใช้วิเคราะห์ทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ เป็นวิธีการวิเคราะห์ด้วยแสงเทคนิคหนึ่ง โดยอาศัยปฏิสัมพันธ์ระหว่างแสงกับพันธะในโมเลกุลของผลึก เทคนิคนี้จะใช้แสงในย่านความถี่อินฟราเรด ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.78-1000 nm แบ่งเป็น 3 ช่วง คือ อินฟราเรดย่านใกล้ อินฟราเรดย่านกลาง และ อินฟราเรดย่านไกล โดยช่วงเลขคลื่น $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ เป็นช่วงที่แสดงถึงพันธะของโมเลกุล ได้แก่ C=O O-H C-O N-H เป็นต้น

ในช่วงเลขคลื่น $1500 - 400 \text{ cm}^{-1}$ เป็นช่วง fingerprint region มีลักษณะการแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยปกติสเปกตรัมในช่วงนี้จะซับซ้อน ดังนั้น การวิเคราะห์สเปกตรัมจึงอ้างอิงจากเอกสารวิจัยหรือไฟล์อ้างอิงมาตรฐาน จากนั้น เปรียบเทียบยอดการดูดกลืนของสเปกตรัมที่จากการวัด เพื่อวิเคราะห์พันธะของหมู่ฟังก์ชัน [17] โครงการนี้ใช้เครื่อง

PERKIN ELMER spectrum GX FT-IR system ดังภาพที่ 2.12 ตั้งอยู่ที่ศูนย์เครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



ภาพที่ 2.12 เครื่อง PERKIN ELMER spectrum GX FT-IR system

2.4.3 เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่ใช้ถ่ายภาพพื้นผิวของชิ้นงาน การเตรียมชิ้นงานในกรณีที่ชิ้นสารตัวอย่างไม่นำไฟฟ้า จะต้องปรับสภาพความนำไฟฟ้าที่ผิวของตัวอย่างให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดี ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนิยมใช้การเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิค สเปตเตอร์ริง (sputtering) โดยทั่วไปนิยมเคลือบทองหรือคาร์บอน ซึ่งต้องเลือกชนิดของฟิล์มให้เหมาะสมกับชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม โครงงานนี้ปรับสภาพความนำไฟฟ้าที่ผิวของผลึก KDP โดยการเคลือบฟิล์มบางทองบนผิวชิ้นสารตัวอย่าง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดสะสมอิเล็กตรอนที่ผิวของชิ้นตัวอย่าง ในขณะที่ทำการถ่ายภาพ

ภาพที่ได้จากกล้อง SEM จะแสดงในลักษณะ 3 มิติ โดยเกิดจากการวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการตรวจสอบ โดยแหล่งกำเนิดของอิเล็กตรอนที่ชั่วแควคือ ขดลวดทังสเตน ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน จากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในช่วง 1 – 40 kV ให้วิ่งเป็นลำผ่าน condenser lens เพื่อปรับขนาดลำอิเล็กตรอน และปรับโฟกัสด้วย objective lens ถ้าต้องการให้ลำอิเล็กตรอนกวาดไปทั่วผิวของตัวอย่าง สามารถควบคุมได้โดยใช้ scanning coils เพื่อให้ลำอิเล็กตรอนกวาดบนระนาบ x-y

เมื่อลำอิเล็กตรอนกระทบลงบนผิวของชิ้นสารตัวอย่าง จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวของชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งเกิดจากลำอิเล็กตรอนถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนของอะตอมชิ้นสารตัวอย่าง เครื่อง SEM จะรวบรวมอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากผิวของสารตัวอย่าง แล้วเอาสัญญาณไปประมวลผล เพื่อสร้างภาพถ่ายพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างบนจอ CRT [18] โครงงานนี้ใช้เครื่อง SEM ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6460LV ดังภาพที่ 2.13 ตั้งอยู่ที่ศูนย์เครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



ภาพที่ 2.13 เครื่อง SEM รุ่น JEOL JSM-6460LV

2.4.4 สมบัติไดอิเล็กทริก

นักวิทยาศาสตร์ชื่อ ฟาราเดย์ ได้คิดสร้างตัวเก็บประจุที่มีลักษณะเหมือนกับทุกประการขึ้นมาสองตัว โดยช่องว่างระหว่างขนานของตัวเก็บประจุตัวแรก คือ อากาศ และตัวเก็บประจุตัวที่สอง คือ ไดอิเล็กทริกชนิดหนึ่ง เมื่อตัวเก็บประจุทั้งสองได้รับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน พบว่าประจุบนตัวเก็บประจุของสารไดอิเล็กทริกคั่นระหว่างแผ่นขนานจะมีค่าสูงกว่าประจุบนตัวเก็บประจุของอากาศระหว่างแผ่นขนาน

ไดอิเล็กทริก เป็นสมบัติหนึ่งของฉนวนไฟฟ้า เมื่อนำมาคั่นระหว่างแผ่นตัวนำในตัวเก็บประจุ จะทำให้สามารถเก็บสะสมพลังงานในรูปสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำได้ โดยจะทำให้เกิดการเรียงตัวของโพลาริเซชันขึ้นภายในเนื้อสารไดอิเล็กทริก ทำให้เกิดโครงสร้างของตัวเก็บประจุขึ้น ค่าความเก็บประจุจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารที่คั่นระหว่างแผ่นตัวนำตามการทดลองของฟาราเดย์ ดังนั้น การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารต่างๆ รวมถึงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสามารถทำได้โดยการวัดค่าตัวเก็บประจุของสารนั้นๆ ที่ค่าสนามไฟฟ้าต่างๆ วัดได้จากวงจร RLC โดยโครงงานนี้ใช้ชิ้นสารตัวอย่างที่มีสมบัติไม่นำไฟฟ้า ซึ่งใช้ในการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก เมื่อนำมาวางระหว่างตัวเก็บประจุ ดังแสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 เครื่อง Agilent E4980A

กรณีที่จ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุเท่ากัน ความสามารถในการเก็บพลังงานในรูปสนามไฟฟ้า (ประจุ) จะขึ้นกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่คั่นระหว่างแผ่นตัวนำ โดยค่าความเก็บประจุมีความสัมพันธ์กับศักย์ไฟฟ้าจากภายนอก ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$C = \frac{q}{V_{ab}} \quad (2.2)$$

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (2.3)$$

โดยที่ C คือ ค่าความจุไฟฟ้า

q คือ ประจุไฟฟ้า

V_{ab} คือ ศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุด a และจุด b

ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

A คือ พื้นที่ของแผ่นตัวนำ

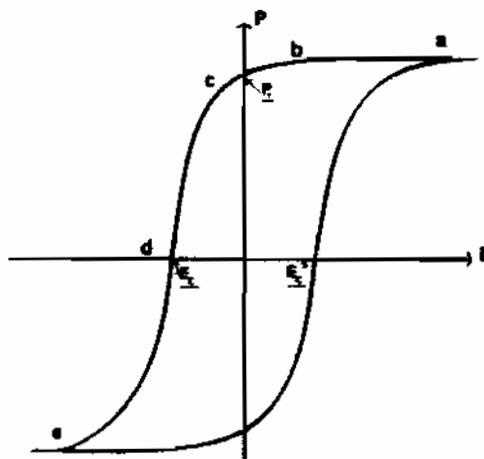
d คือ ความหนาของสารไดอิเล็กทริก

สมการที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเก็บประจุกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ซึ่งสอดคล้องการทดลองของฟาราเดย์ เห็นได้ว่าความจุของตัวเก็บประจุใดๆ มีค่าเพิ่มขึ้นถ้าตัวเก็บประจุนั้นมีไดอิเล็กทริกคั่นระหว่างแผ่นขนานทั้งสอง อัตราส่วนระหว่างความจุของตัวเก็บประจุใดๆ เมื่อไดอิเล็กทริกคั่น (ϵ) กับไม่มีไดอิเล็กทริกคั่น (ϵ_0) เรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) ดังแสดงในสมการที่ 2.4 [19]

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.4)$$

2.4.5 สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

เฟอร์โรอิเล็กทริก คือ สมบัติที่มีโมเมนต์ทางไฟฟ้าแม้ว่าไม่มีสนามไฟฟ้าจากภายนอก สารที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกจะประกอบขึ้นจากโดเมนของไดโพลโมเมนต์ถาวร ทิศทางของไดโพลจะเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในแต่ละโดเมน อย่างไรก็ตาม โดเมนมีทิศทางแบบสุ่ม ทำให้ไม่มีค่าโพลาไรเซชันสุทธิ เมื่อให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกเข้ากระตุ้นการจัดเรียงตัวของโดเมนเหล่านั้น จะทำให้โดเมนเกิดเรียงตัวไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้าอย่างเป็นระเบียบ จึงเกิดโพลาไรเซชันสุทธิขึ้น แม้ว่าจะหยุดจ่ายสนามไฟฟ้าจากภายนอก โดเมนเหล่านั้นจะยังคงเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบภายในเนื้อสาร ทำให้เกิดโพลาไรเซชันคงเหลือ



ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง E-P ของเฟอร์โรอิเล็กทริก [20]

จากภาพที่ 2.15 แสดงให้เห็นว่า เมื่อ $E = -E_c$ สารมีโมเมนต์ขั้วคู่ถาวร อาจกล่าวได้ว่าสารนั้นแสดงสถานะเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก แต่อย่างไรก็ตาม พลังงานความร้อนสามารถทำลายการจัดเรียงตัวของโดเมนได้ ดังนั้น สารเฟอร์โรอิเล็กทริกจะแสดงสมบัติได้ดังภาพที่ 2.15 จะต้องอยู่ในสภาวะที่พลังงานความร้อนไม่มากพอที่จะทำลายการจัดเรียงตัวของโดเมนภายในเนื้อสาร ซึ่งเรียกอุณหภูมิสูงสุดที่สารยังคงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ ว่า อุณหภูมิวิกฤติ (T_c) ซึ่งในสภาวะที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ ผลึกจะอยู่ในสถานะ พาราอิเล็กทริก [21]

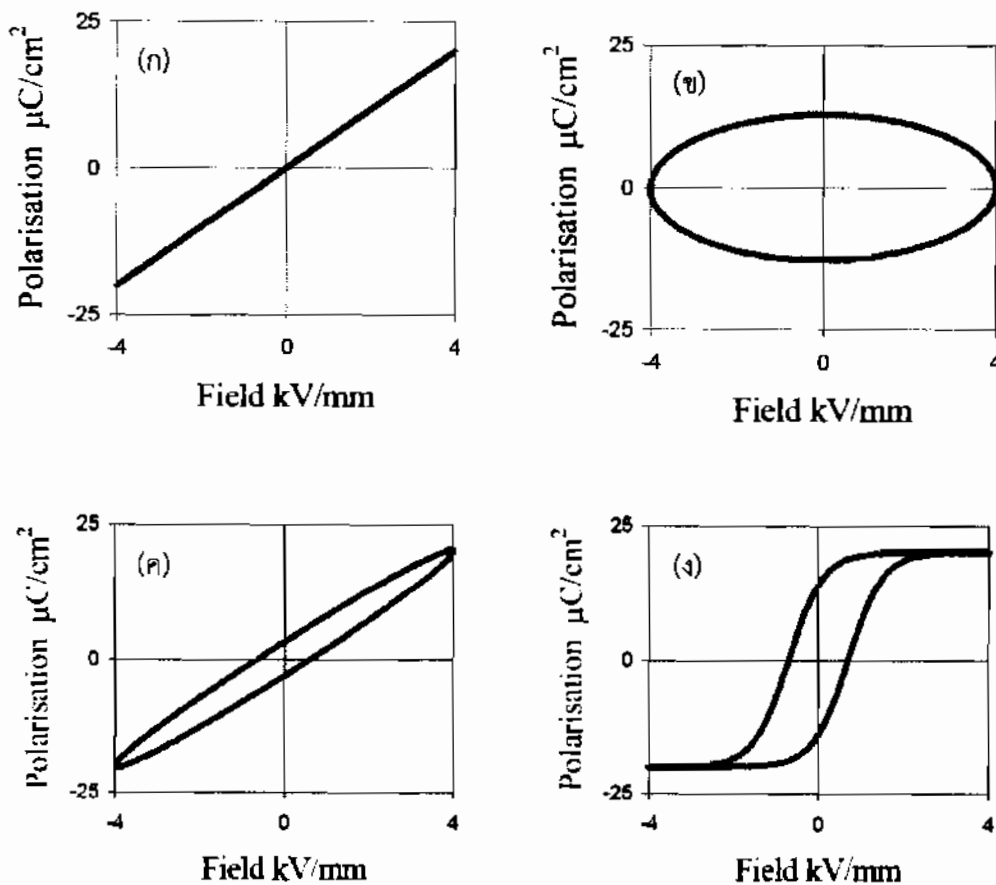
สำหรับการศึกษาการเกิดโพลาไรเซชัน ผลที่ได้จะแสดงในรูปกราฟระหว่าง ค่าสนามไฟฟ้าจากภายนอกกับโพลาไรเซชัน โดยตัวอย่างกราฟลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ในอุดมคติ แสดงดังภาพที่ 2.16 ดังนี้

(ก) กราฟลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุในอุดมคติเชิงเส้น ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุเชิงเส้นที่เป็นเส้นตรงมีสัดส่วนความชันกับค่าความจุไฟฟ้า

(ข) กราฟลักษณะสมบัติของตัวต้านทานในอุดมคติเชิงเส้น ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีการสะสมพลังงานในรูปสนามไฟฟ้าหรือแม่เหล็ก

(ค) กราฟลักษณะสมบัติของการสูญเสียตัวเก็บประจุเชิงเส้น ซึ่งเป็นผลจากการสูญเสียประจุในพื้นที่ภายในลูบที่มี สัดส่วนสัมผัสของอุปกรณ์ทำให้เกิดการสูญเสียและมีสัดส่วนความชันกับค่าความจุไฟฟ้า

(ง) การตอบสนองแบบไม่เป็นเชิงเส้นของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งมีโมเลกุลเรียงตัวกันได้เอง โดยไม่ต้องใช้สนามไฟฟ้าจากภายนอก



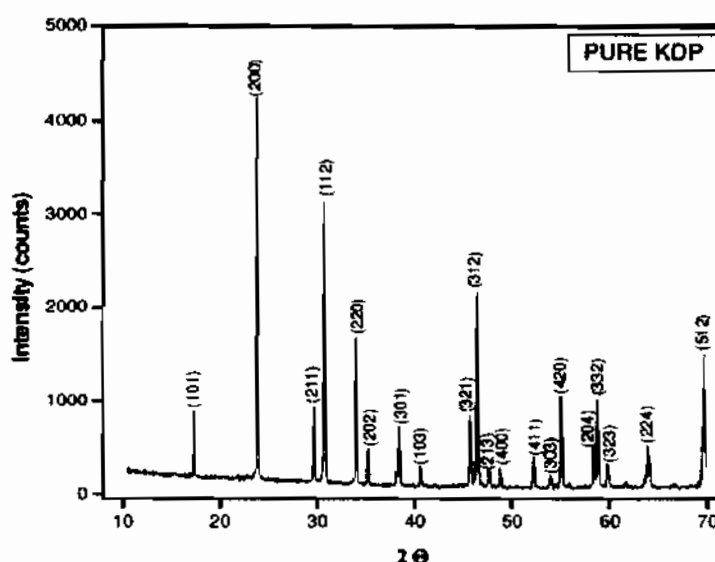
ภาพที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง E-P ของเครื่องมือวัด [22]

- (ก) กราฟลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุในอุดมคติแบบเชิงเส้น
- (ข) กราฟลักษณะสมบัติของตัวต้านทานในอุดมคติแบบเชิงเส้น
- (ค) กราฟลักษณะสมบัติของตัวการสูญเสียตัวเก็บประจุแบบเชิงเส้น
- (ง) กราฟลักษณะสมบัติของตัวเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบไม่เป็นเชิงเส้น

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

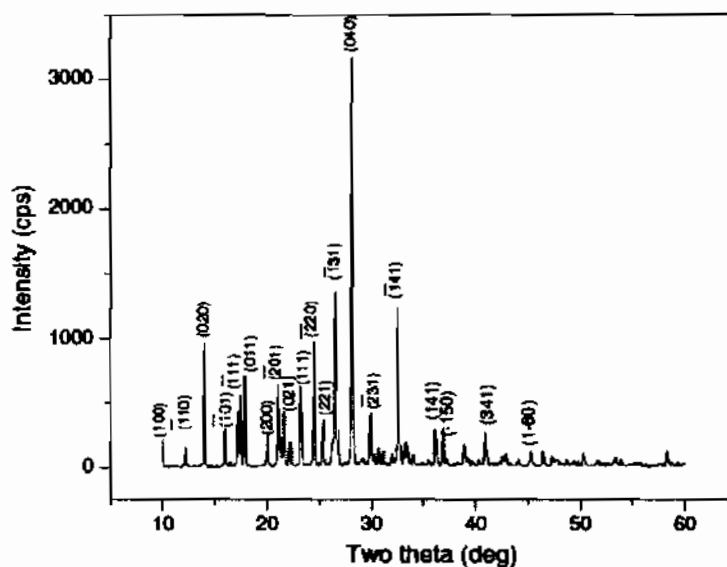
การศึกษาสมบัติของผลึก KDP และผลึก TGS มีการรายงานในงานวิจัยต่างๆ ที่หลากหลาย ซึ่งการทำโครงการครั้งนี้ ได้ยกเอางานวิจัยที่เกี่ยวกับสมบัติพื้นฐานของผลึก KDP และผลึก TGS เพื่อนำมาเป็นข้อมูลและแนวทางในการวิเคราะห์สมบัติของผลึกที่ปลูกได้

Loretta และคณะได้ศึกษาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึก โดยดูการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลของของผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต [23] เมื่อวิเคราะห์เส้นสเปกตรัมการเลี้ยวเบน จะสังเกตเห็นยอดปรากฏขึ้นที่มุม 2θ ต่างๆ คือ ยอดของระนาบ (101) (200) (112) ซึ่งแสดงถึงรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลของผลึก KDP อย่างชัดเจนดังภาพที่ 2.17



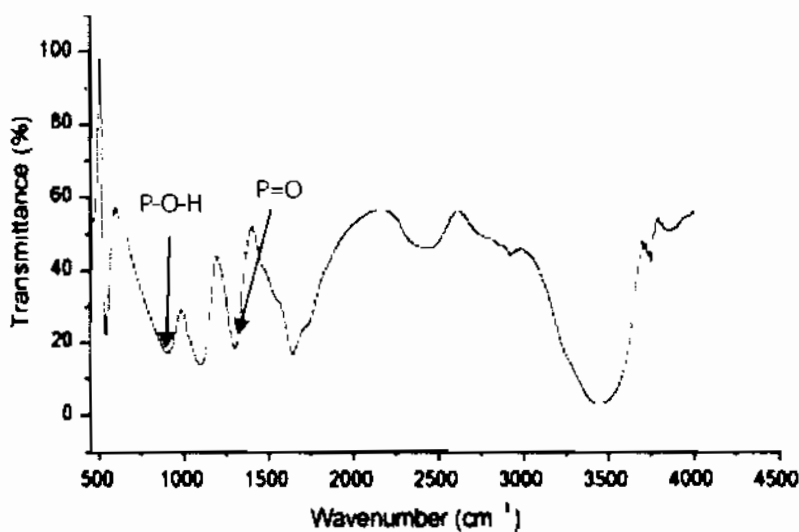
ภาพที่ 2.17 สเปกตรัมระนาบต่างๆ ของผลึก KDP [23]

การศึกษาโครงสร้างผลึกเพื่อดูการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลของของผลึก TGS [24] พบว่ามียอดของระนาบต่างๆ ปรากฏขึ้นที่มุม 2θ ในช่วง 10° - 40° ได้แก่ ระนาบ (020) (100) (040) และ (-131) โดยแสดงถึงรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิกของผลึก TGS อย่างชัดเจนดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 สเปกตรัมระนาบต่างๆ ของผลึก TGS [24]

จากงานวิจัยของ Balamurugan และ Ramasamy [7] เป็นการศึกษาสมบัติของผลึก KDP ซึ่งเป็นการปลูกผลึกจากสารละลายแบบดั้งเดิมและแบบทิศทางเดียว โดยวิธี SR โดยเลือกทิศทางการปลูกคือ $\langle 100 \rangle$ จากนั้นเปรียบเทียบสมบัติที่ได้จากทั้งสองวิธี โดยใช้เทคนิค FT-IR เพื่อการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของผลึก KDP ในช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ $500-4000\text{ cm}^{-1}$ ผลการศึกษาถูกแสดงดังภาพที่ 2.19

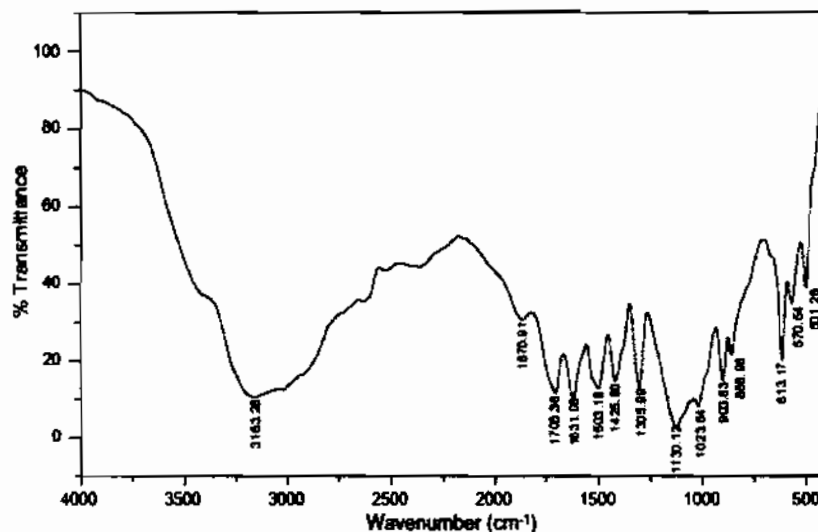


ภาพที่ 2.19 สเปกตรัมการส่งผ่านจากเครื่อง FT-IR ของผลึก KDP [7]

จากภาพที่ 2.19 สเปกตรัมจากเครื่อง FT-IR ของผลึก KDP พบว่ามีการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่แตกต่างกันในช่วงเลขคลื่น $500-4000\text{ cm}^{-1}$ โดยเส้นสเปกตรัมในช่วง $500-1500\text{ cm}^{-1}$

จะแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของผลึก KDP ได้แก่ หมู่ฟังก์ชัน $P=O$ ซึ่งมียอดสเปกตรัม 1303 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชันของ $P-O-H$ ที่มียอดสเปกตรัม 905 cm^{-1} เป็นต้น

สำหรับการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของผลึก TGS แสดงดังภาพที่ 2.20 ได้แก่ ยอดสเปกตรัม 613 cm^{-1} แสดงหมู่ฟังก์ชันของ $N-H$ และยอดสเปกตรัมในช่วง $1425\text{--}1503\text{ cm}^{-1}$ แสดงหมู่ฟังก์ชันของ $-COOH$ เป็นต้น [24]



ภาพที่ 2.20 สเปกตรัมการส่งผ่านจากเครื่อง FT-IR ของผลึก TGS [24]

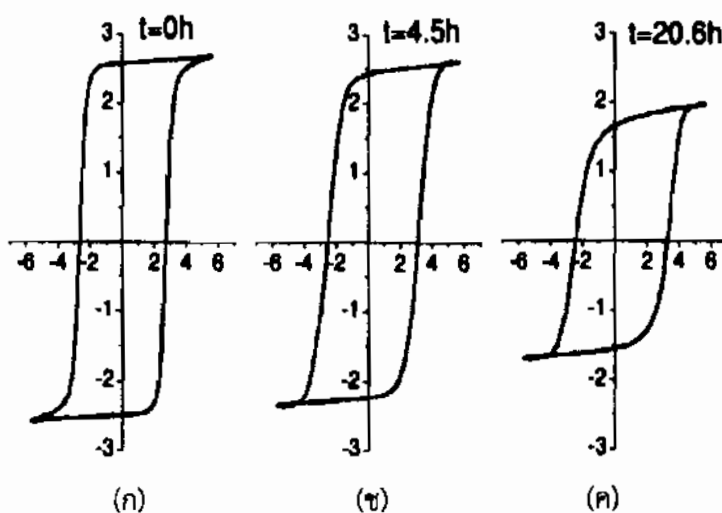
การศึกษาพื้นผิวของผลึก KDP พบว่าพื้นผิวผลึกมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยม มีเหลี่ยมปรากฏที่หัวและท้ายของผลึก ซึ่งลักษณะพื้นผิวของผลึกแสดงดังภาพที่ 2.21 เป็นการปลูกผลึก KDP แบบดั้งเดิม ซึ่งโครงงานนี้ใช้เป็นลักษณะรูปทรงมาตรฐานของผลึก KDP ที่ปลูกได้ [25]



ภาพที่ 2.21 ลักษณะพื้นผิวของผลึก KDP [25]

สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของผลึก TGS ได้ถูกศึกษาอย่างกว้างขวาง เช่น ผลการวัดลักษณะสมบัติการโพลาไรเซชันของผลึก TGS บริสุทธิ์ แสดงดังภาพที่ 2.22 [6] โดยศึกษาเปรียบเทียบการ

เปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันของผลึก TGS เมื่อได้รับสนามไฟฟ้าเป็นระยะเวลาแตกต่างกันตั้งแต่ 0 - 20.6 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าโพลาไรเซชันมีค่าลดลงเมื่อได้รับสนามไฟฟ้าเป็นระยะเวลานาน



ภาพที่ 2.22 ความสัมพันธ์ค่าโพลาไรเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าของผลึก TGS [6]

- (ก) การวัดค่าโพลาไรเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าของผลึก TGS ใช้เวลาทดสอบ 0 h
- (ข) การวัดค่าโพลาไรเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าของผลึก TGS ใช้เวลาทดสอบ 4.5 h
- (ค) การวัดค่าโพลาไรเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าของผลึก TGS ใช้เวลาทดสอบ 20.6 h

บทที่ 3

ขั้นตอนการปลูกผลึก

ในบทนี้กล่าวถึงสารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึก รวมไปถึงกระบวนการปลูกผลึก โพลีเอทิลีนไดออกไซด์โครเจนฟอสเฟต โดยการปลูกแบบดั้งเดิมและการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว (SR) ทำการเจือด้วยสารไตรโกลซีนซัลเฟต 2% โมล และ 5% โมล เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ของผลึกดังกล่าวว่ามีสมบัติเปลี่ยนแปลงอย่างไร ซึ่งรายละเอียดกระบวนการเตรียมและเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษามีดังต่อไปนี้

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในโครงการ

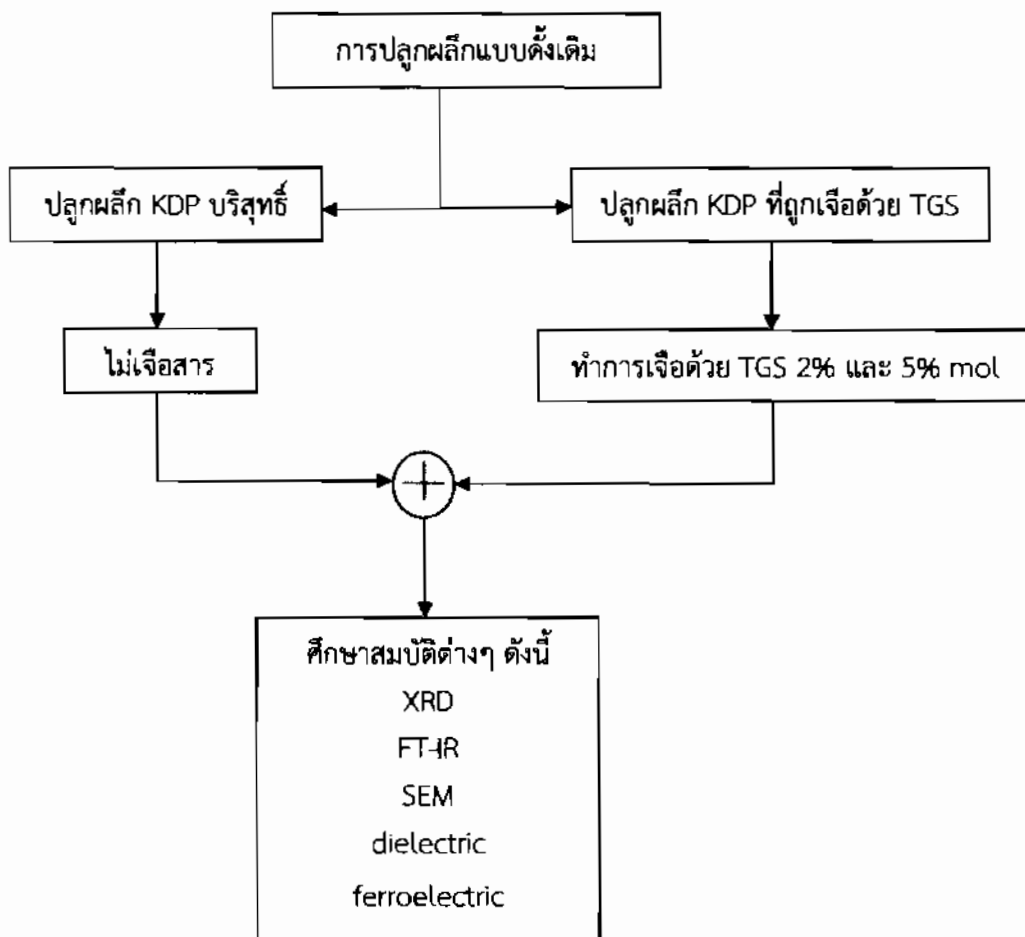
1. โพลีเอทิลีนไดออกไซด์โครเจนฟอสเฟต คุณภาพระดับ reagents ความบริสุทธิ์ 99.0% ยี่ห้อ CARLO ERBA REAGENTI ความสามารถในการละลายน้ำ 28 g/100 ml ที่อุณหภูมิ 25 °C
2. ไทโรซีน คุณภาพระดับ analytical ความบริสุทธิ์ 99.0% ยี่ห้อ CARLO ERBA REAGENTI ความสามารถในการละลายน้ำ 24.99 g/100 ml ที่อุณหภูมิ 25 °C
3. กรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 98.08 g/mol ความเป็นกรด 95-98%
4. น้ำปราศจากไอออน (deionized water) หรือน้ำดีไอ (DI)

อุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการ

1. บีกเกอร์
2. อ่างควบคุมอุณหภูมิ
3. หลอดทดลอง
4. ถังพลาสติก
5. เทอร์โมมิเตอร์ แบบปรอท
6. เครื่องกวนสาร
7. กระจกทรง
8. แมกเนติกสเตอร์โรร์
9. อ่างกระจก
10. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
11. ซ้อนตักสาร
12. โกร่งบดสาร
13. เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 2 ตำแหน่ง
14. เครื่อง XRD รุ่น Bruker's X-ray diffraction D8-discover
15. เครื่อง FT-IR รุ่น PERKIN ELMER spectrum GX FT-IR system
16. เครื่อง SEM รุ่น JEOL JSM-6460LV

17. เครื่อง Agilent E4980A

3.2 แผนผังการดำเนินงานและขั้นตอนการปลูกผลึกแบบดั้งเดิม



ภาพที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานการปลูกผลึกแบบดั้งเดิม

จากภาพที่ 3.1 การดำเนินงานการปลูกผลึกแบบดั้งเดิมโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การปลูกผลึก KDP บริสุทธิ์ และผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS ด้วยการเจือ 2% mol และ 5% mol เมื่อได้ผลึกจากการปลูกแบบดั้งเดิมทั้งสองกระบวนการ นำผลึกที่ได้ไปศึกษาสมบัติด้วยเทคนิค XRD FT-IR SEM ศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกและศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

3.2.1 การปลูกผลึกแบบวิธีดั้งเดิม

ตอนที่ 1 ปลูกผลึก KDP บริสุทธิ์ และผลึก TGS บริสุทธิ์

ตอนที่ 1.1 ปลูกผลึก KDP บริสุทธิ์

1. ล้างบีกเกอร์ด้วยน้ำ DI ทั้งหมด 2 รอบ
2. ชั่งสาร KDP ปริมาณ 50 g
3. ทำการละลายสาร KDP ในน้ำ DI ในอัตราส่วน สาร KDP ต่อ น้ำ DI ปริมาตร 180 ml
4. เติมสาร KDP ที่ละลายจนกว่าสารจะหมด
5. ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการกรองโดยนำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรอง
6. นำถุงพลาสติกมาเจาะรู นำไปปิดบีกเกอร์ที่ใช้ใส่สารละลาย แล้วนำไปเก็บที่อ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 35°C ปล่อยให้เกิดการตกผลึกพร้อมบันทึกผลการทดลอง
7. ทำการเก็บผลึกและนำไปวิเคราะห์ผล

ตอนที่ 1.2 ปลูกผลึก TGS บริสุทธิ์

1. ล้างบีกเกอร์ด้วยน้ำ DI ทั้งหมด 2 รอบ
2. เตรียมไกลซีนและกรดซัลฟูริกในอัตราส่วน 3:1 โดยทำการชั่งสารไกลซีนปริมาณ 45.08 g ใช้กรดซัลฟูริก 11.2 cm^3
3. ทำการละลายสารไกลซีนในน้ำ DI ในอัตราส่วนคือสารไกลซีน 45.08 g ต่อ น้ำ DI ปริมาตร 180 ml โดยเติมสารไกลซีนที่ละลายจนกว่าสารจะหมด
4. เติมกรดซัลฟูริกจำนวนทั้งหมด 11.2 cm^3 ลงไปที่ละลายจนกว่าสารจะหมด
5. ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการกรอง โดยนำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรอง
6. นำถุงพลาสติกมาเจาะรู นำไปปิดบีกเกอร์ที่ใช้ใส่สารละลาย แล้วนำไปเก็บที่อ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 35°C ปล่อยให้เกิดการตกผลึกพร้อมบันทึกผลการทดลอง
7. ทำการเก็บผลึกและนำไปวิเคราะห์ผล

ตอนที่ 2 ปลูกผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS

ตอนที่ 2.1 ปลูกผลึก KDP โดยการเจือ TGS 2% mol

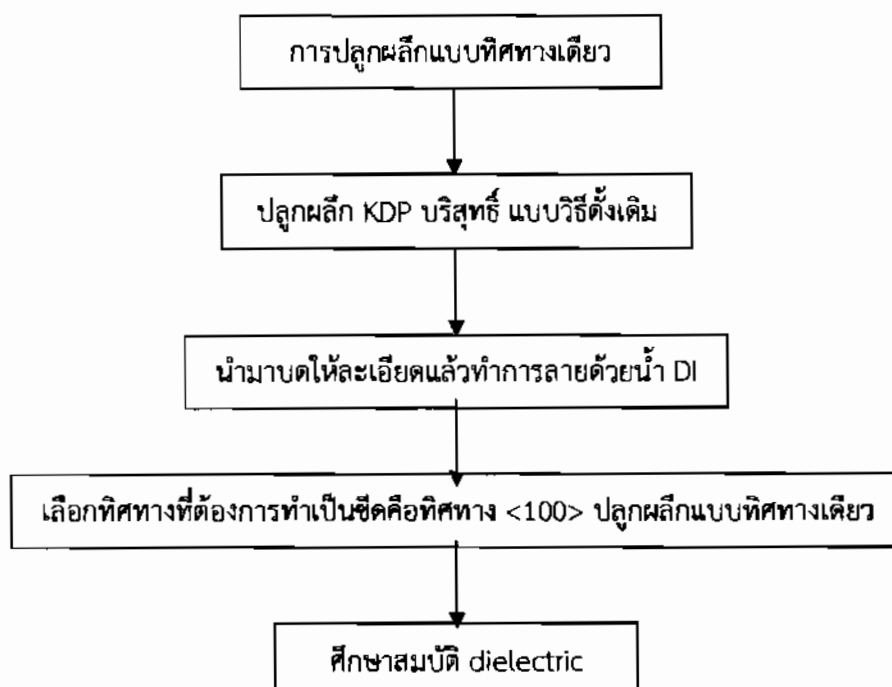
1. ล้างบีกเกอร์ด้วยน้ำ DI ทั้งหมด 2 รอบ
2. นำผลึก KDP และผลึก TGS ที่ปลูกได้ในขั้นตอนที่ 1 มาบดให้ละเอียด โดยผ่านกระบวนการ recrystallization จำนวนทั้งหมด 2 ครั้ง
3. ชั่งสาร KDP ที่ได้จากการบดละเอียดปริมาณ 50 g
4. ทำการละลายสาร KDP ในน้ำ DI ในอัตราส่วน สาร KDP 50 g ต่อ น้ำ DI ปริมาตร 180 ml โดยเติมสารที่ละลายจนกว่าสารจะหมด
5. ทำการเจือสาร TGS โดยชั่งสารปริมาณ 2.37 g (จากการคำนวณในภาคผนวก ก)

6. ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการกรองโดยนำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรอง
7. นำถุงพลาสติกมาเจาะรู นำไปปิดปากเกอร์ที่ใช้ใส่สารละลาย แล้วนำไปเก็บที่อ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 35°C แล้วปล่อยให้เกิดการตกผลึกพร้อมบันทึกผลการทดลอง
8. ทำการเก็บผลึกและนำไปวิเคราะห์ผล

ตอนที่ 2.2 ปลุกผลึก KDP โดยการเจือ TGS 5% mol

1. ล้างบีกเกอร์ด้วยน้ำ DI ทั้งหมด 2 รอบ
2. นำผลึก KDP และผลึก TGS ที่ปลูกได้ในขั้นตอนที่ 1 มาบดให้ละเอียด โดยผ่านกระบวนการ recrystallization จำนวนทั้งหมด 2 ครั้ง
3. ชั่งสาร KDP ที่ได้จากการบดละเอียดปริมาณ 50 g
4. ทำการละลายสาร KDP ในน้ำ DI ในอัตราส่วน สาร KDP 50 g ต่อน้ำ DI ปริมาณ 180 ml โดยเติมสารทีละน้อยจนกว่าสารจะหมด
5. ทำการเจือด้วยสาร TGS โดยชั่งสารปริมาณ 5.90 g (จากการคำนวณในภาคผนวก ก)
6. ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการกรองโดยนำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรอง
7. นำถุงพลาสติกมาเจาะรู นำไปปิดปากเกอร์ที่ใช้ใส่สารละลาย แล้วนำไปเก็บที่อ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 35°C แล้วปล่อยให้เกิดการตกผลึกพร้อมบันทึกผลการทดลอง
8. ทำการเก็บผลึกและนำไปวิเคราะห์ผล

3.3 แผนผังการดำเนินงานและขั้นตอนการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว



ภาพที่ 3.2 แผนผังการดำเนินงานการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว

จากภาพที่ 3.2 การดำเนินงานการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว โดยปลูกผลึก KDP บริสุทธิ์ จากวิธีการปลูกผลึกแบบดั้งเดิม นำมาบดให้ละเอียดแล้วละลายด้วยน้ำ DI เพื่อทำให้เป็นสารละลาย จากนั้นเลือกผลึก KDP บริสุทธิ์ ที่มีคุณภาพดีเพื่อทำเป็นซีด โดยเลือกทิศทางการปลูกคือ <100> เมื่อได้ผลึกจากการปลูกแบบทิศทางเดียวแล้วนำผลึกไปศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริก

3.3.1 การปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว

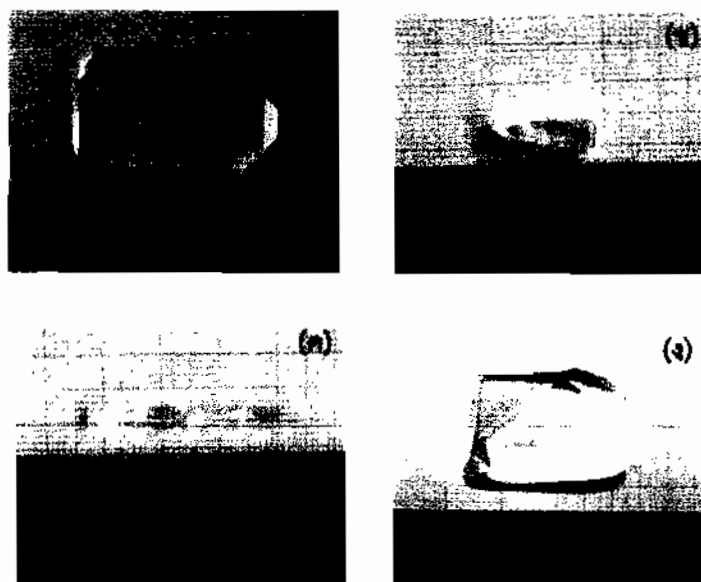
1. ล้างบีกเกอร์และหลอดทดลองด้วยน้ำ DI ทั้งหมด 2 รอบ
2. นำผลึก KDP ที่ปลูกได้ในขั้นตอนที่ 1 มาบดให้ละเอียด โดยผ่านกระบวนการ recrystallization จำนวนทั้งหมด 2 ครั้ง
3. ชั่งสาร KDP ที่ได้จากการบดละเอียดปริมาณ 50 g
4. ทำการละลายสาร KDP ในน้ำ DI ในอัตราส่วน สาร KDP 50 g ต่อน้ำ DI ปริมาณ 180 ml โดยเติมสารละลายทีละน้อยจนกว่าสารจะหมด
3. ทำการเลือกทิศทางในการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว โดยทิศทางในการปลูกคือ <100> ด้วยการนำผลึก KDP บริสุทธิ์ ที่มีคุณภาพดีมาตัดหรือขัดให้ได้ขนาดพอดีตามความเหมาะสมกับหลอดทดลอง
4. ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการกรองโดยนำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรอง
5. เทสารใส่ในหลอดทดลองที่ได้เลือกทิศทางในการปลูกคือ <100>
6. ติดตั้งระบบการปลูกผลึกแบบวิธีทิศทางเดียว โดยควบคุมอุณหภูมิด้านบนของระบบที่อุณหภูมิ 36°C ด้านล่างที่อุณหภูมิ 32°C ปลอ่ยให้เกิดการตกผลึกพร้อมบันทึกผลการทดลอง
7. ทำการเก็บผลึกและนำไปวิเคราะห์ผล

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองเกี่ยวกับการศึกษาสมบัติพื้นฐานของผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเมื่อทำการเจือด้วยไตรกลีเซอไรด์ ด้วยการปลูกผลึกแบบดั้งเดิมและการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว โดยกำหนดทิศทางการเกิด <100> ซึ่งจะนำผลึกที่ได้มาเปรียบเทียบกับคุณลักษณะและวิเคราะหสมบัติต่างๆ ของผลึก ได้แก่ ศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR ศึกษาพื้นผิวของผลึกด้วยเทคนิค SEM ศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกและศึกษาสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก รายละเอียดของการทดลองและอภิปรายผลมีดังต่อไปนี้

4.1 ลักษณะและอัตราการเจริญเติบโตของผลึก



ภาพที่ 4.1 ผลึกปลูกแบบวิธีดั้งเดิม

- (ก) ผลึก KDP บริสุทธิ์
- (ข) ผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 2% mol
- (ค) ผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol
- (ง) ผลึก TGS

จากภาพที่ 4.1 แสดงผลึกที่ได้จากการปลูกผลึกด้วยดั้งเดิม โดยผลึกในภาพที่ 4.1(ก) คือผลึก KDP บริสุทธิ์ จะเห็นว่าผลึกมีลักษณะผิวหน้าเรียบ โปร่งใสและมีความสมบูรณ์ของผลึก ผลึกที่ปลูกได้มีขนาด $4.2 \times 3.3 \times 1.5 \text{ cm}^3$ โดยใช้ระยะเวลาในการปลูก 28 วัน

ภาพที่ 4.1(ข) คือ ผลึก KDP ถูกเจือด้วย TGS 2% mol จะเห็นว่าผลึกมีลักษณะผิวหน้าของผลึกเรียบเป็นแท่งขนาดเล็ก ความโปร่งใสไม่สม่ำเสมอ อาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก ผลึกที่ปลูกได้มีขนาด $1.8 \times 0.9 \times 0.5 \text{ cm}^3$ โดยใช้ระยะเวลาในการปลูก 35 วัน

ภาพที่ 4.1(ค) คือ ผลึก KDP ถูกเจือด้วย TGS 5% mol จะเห็นว่าผลึกมีลักษณะเป็นแท่ง ความโปร่งใสไม่สม่ำเสมอ อาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก ผลึกที่ปลูกได้มีขนาด $2.8 \times 0.7 \times 0.5 \text{ cm}^3$ โดยใช้ระยะเวลาในการปลูก 39 วัน

ภาพที่ 4.1(ง) คือ ผลึก TGS มีลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยม ปรากฏเหลี่ยมในหน้าต่างๆ มีผิวหน้าเรียบ โปร่งใส ผลึกที่ปลูกได้มีขนาด $2.9 \times 2.6 \times 1.5 \text{ cm}^3$ โดยใช้ระยะเวลาในการปลูก 65 วัน

จากลักษณะของผลึกที่ปลูกได้มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน ทั้งขนาด รูปทรง และความโปร่งใส ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ อาจเนื่องมาจาก เงื่อนไขในการปลูกผลึกที่ต่างกัน จึงส่งผลต่อกระบวนการเกิดผลึก



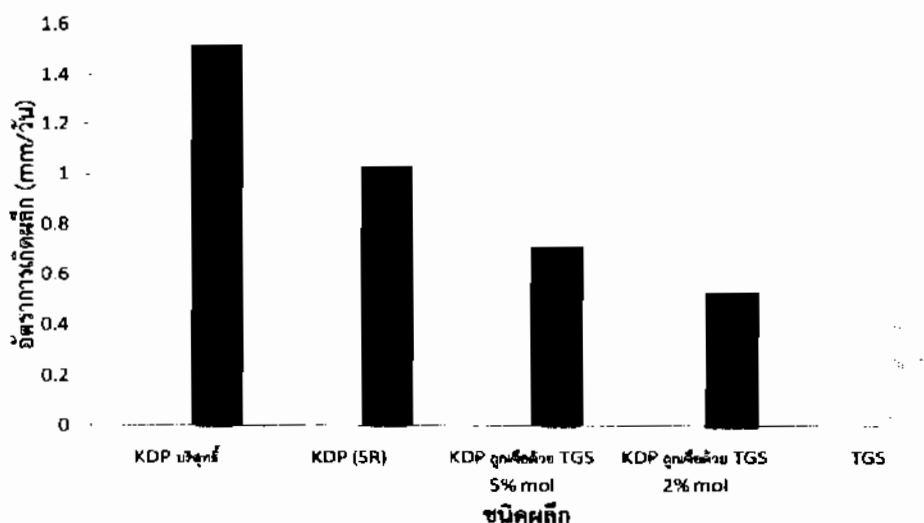
ภาพที่ 4.2 ผลึกปลูกแบบทิศทางเดียว

(ก) ผลึก KDP ปลูกแบบทิศทางเดียว

(ข) ผลึก KDP ปลูกแบบทิศทางเดียว หลังจากการตัดจากหลอดลอง

(ค) แผ่นผลึก KDP ปลูกแบบทิศทางเดียว โดยผ่านการขัด

จากภาพที่ 4.2 แสดงผลึกที่ได้จากการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว ภาพที่ 4.2 (ก) คือ ผลึก KDP ที่อยู่ในหลอดทดลอง พบว่ามีลักษณะร่องรอยการแตก อาจเกิดจากความสมบูรณ์ของผลึก ใช้ระยะเวลาปลูก 52 วัน ภาพที่ 4.2 (ข) คือ ผลึก KDP ปลูกแบบทิศทางเดียว หลังจากการตัดจากหลอดทดลอง พบว่าผลึกมีความใส่น้อย ภาพที่ 4.2 (ค) แผ่นผลึก KDP ปลูกแบบทิศทางเดียว โดยผ่านการขัดเห็นได้ว่าผลึกมีลักษณะมีความใส่น้อยมีร่องรอยการแตกปรากฏเห็นได้ชัดเจนอาจเกิดจากความสมบูรณ์ของผลึก ผลึกมีขนาด $1.3 \times 1.5 \times 0.2 \text{ cm}^3$



ภาพที่ 4.3 อัตราการเจริญเติบโตของผลึกที่ปลูกได้

จากภาพที่ 4.3 แสดงอัตราการเจริญเติบโตของผลึก โดยการปลูกผลึกแบบดั้งเดิมและแบบทิศทางเดียว ดังนี้ ผลึก KDP มีอัตราการเกิดอยู่ที่ 1.5 mm /วัน ผลึก KDP ที่ปลูกแบบทิศทางเดียว มีอัตราการเกิดอยู่ที่ 1 mm /วัน ผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol มีอัตราการเกิดอยู่ที่ 0.7 mm /วัน ผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 2% mol มีอัตราการเกิดอยู่ที่ 0.5 mm /วัน ผลึก TGS มีอัตราการเกิดอยู่ที่ 0.4 mm /วัน จากกราฟบอกได้ว่าผลึก KDP ที่ปลูกแบบดั้งเดิมมีอัตราการเจริญเติบโตที่มากกว่าผลึกชนิดอื่นเมื่อเทียบจากการปลูกผลึกแบบเดียวกัน

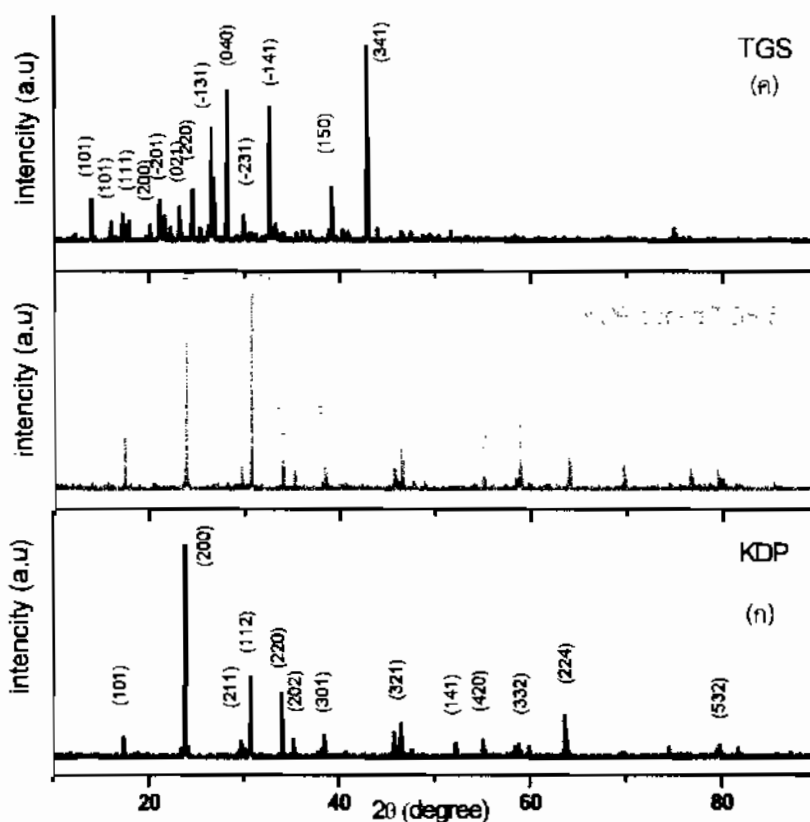
4.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การศึกษากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลึก KDP และผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol และผลึก TGS ขึ้นงานตัวอย่างจะถูกเตรียมให้เป็นผองละเอียด โดยใช้มุมเริ่มต้น 2θ ที่ 5° และมุมสุดท้าย 2θ ที่ 90° สเปกตรัมที่แสดงออกมาจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับมุม 2θ

จากภาพที่ 4.4 เป็นสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ประกอบด้วย (ก) กราฟ XRD ของผลึก KDP บริสุทธิ์ (ข) กราฟ XRD ของผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol (ค) ผลึก TGS บริสุทธิ์ เมื่อเปรียบเทียบกราฟ (ก) และกราฟ (ข) มียอดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของระนาบสำคัญแสดงถึงรูปแบบโครงสร้างที่เป็นเอกลักษณ์ของผลึก KDP บริสุทธิ์ ในช่วงมุม 2θ ต่างๆ เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Loretta และคณะ [23] พบว่า มียอดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของระนาบสอดคล้องกัน แสดงว่าผลึกที่ปลูกได้ทั้งกรณีผลึกบริสุทธิ์และผลึกที่ถูกเจือมีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล โดยผลึก KDP บริสุทธิ์ และผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol มีระนาบเกิดขึ้นเหมือนกันคือ (101) (200) (112) (220) (311) แสดงว่าการเจือ TGS ในผลึก KDP ไม่ได้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก KDP เพราะยังมียอดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนที่สำคัญครบถ้วน

สำหรับผลึก TGS บริสุทธิ์ ปรากฏยอดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของระนาบต่างๆ ในช่วงมุม 2θ ที่ 10° ถึง 40° แสดงดังกราฟ (ค) เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Balu และคณะ พบว่า มียอด

สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของระนาบสอดคล้องกัน แสดงว่าผลึกที่ปลูกได้มีโครงสร้างแบบโมโนคลินิก [24]



ภาพที่ 4.4 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

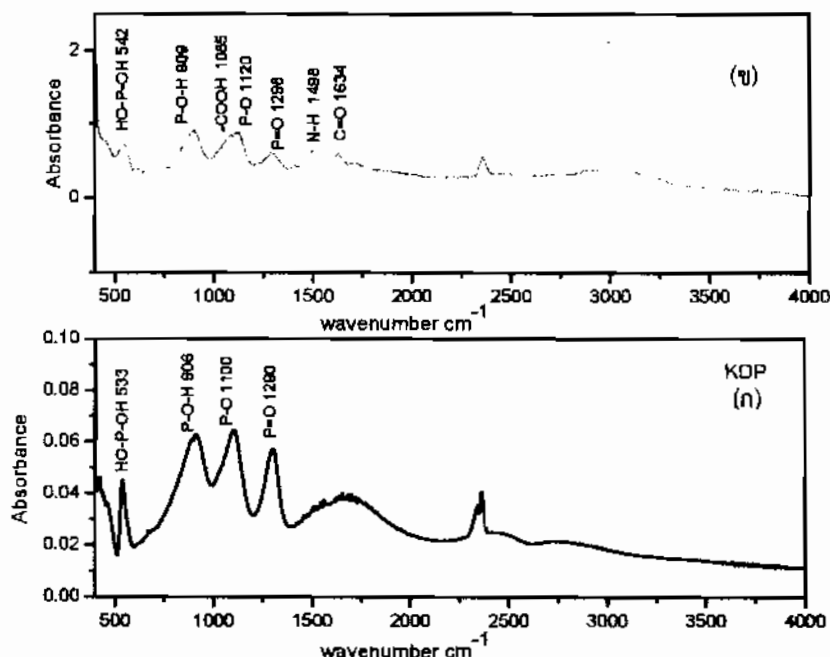
(ก) ผลึก KDP บริสุทธิ์

(ข) ผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol

(ค) ผลึก TGS บริสุทธิ์

4.3 การศึกษาหมู่ฟังก์ชัน

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันโดยเทคนิค FT-IR เป็นการวัดการดูดกลืน (absorbance) พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ $400-4000\text{ cm}^{-1}$ ของผลึก KDP บริสุทธิ์ และผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol โดยใช้เครื่อง PERKIN ELMER spectrum GX FT-IR system สำหรับการนำผลึกไปตรวจสอบ ผลึกตัวอย่างจะถูกบดให้เป็นผงละเอียดแล้วนำไปผสมกับสาร KBr จากนั้นนำไปอัดให้เป็นแผ่นบาง ผลการวัดในแต่ละสเปกตรัมจะแสดงการสั่นของพันธะ ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันภายในโมเลกุล ดังแสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 สเปกตรัม FT-IR สำหรับการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลึก

(ก) ผลึก KDP บริสุทธิ์

(ข) ผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol

ภาพที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ 400-4000 cm^{-1} ของผลึก KDP บริสุทธิ์ และผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol เมื่อพิจารณาสเปกตรัมในภาพที่ 4.5 (ก) พบว่ามียอดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของผลึก KDP ดังนี้ ยอดที่เลขคลื่น 533 cm^{-1} ซึ่งเป็นผลจากการสั่นของพันธะ OH-P-OH ยอดที่เลขคลื่น 906 cm^{-1} เป็นผลจากการสั่นของพันธะ P-O-H ยอดที่เลขคลื่น 1100 cm^{-1} เป็นผลจากการสั่นของพันธะ P-O ยอดที่เลขคลื่น 1299 cm^{-1} เป็นผลจากการสั่นของพันธะ P=O และในช่วงยอดที่เลขคลื่น 2400 - 3500 cm^{-1} เป็นผลจากการสั่นจากพันธะ O-H เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Balamurugan และ Ramasamy [7] พบว่า มียอดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่สอดคล้องกัน แสดงว่าโมเลกุลที่อยู่ในผลึกที่ปลูกได้ คือ โมเลกุลของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ดังนั้น การปลูกผลึกจากสารละลาย ทำให้ไอออนในสารละลายกลับมารวมตัวกันเป็นโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

ภาพที่ 4.5(ข) พบว่ายอดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของผลึก KDP ที่ถูกเจือ เลื่อนจากค่ามาตรฐาน เนื่องจากการเจือสาร TGS อาจส่งผลต่อการสั่นของพันธะของ KDP ได้ผลดังนี้ ยอดที่เลขคลื่น 533 cm^{-1} เลื่อนเป็น 542 cm^{-1} เป็นผลจากการสั่นของพันธะ OH-P-OH ยอดที่เลขคลื่น 906 cm^{-1} เลื่อนเป็น 909 cm^{-1} เป็นผลจากการสั่นของพันธะ P-O-H ยอดที่เลขคลื่น 1100 cm^{-1} เลื่อนเป็น 1120 cm^{-1} เป็นผลจากการสั่นของพันธะ P-O ยอดที่เลขคลื่น 1299 cm^{-1} เลื่อนเป็น 1298

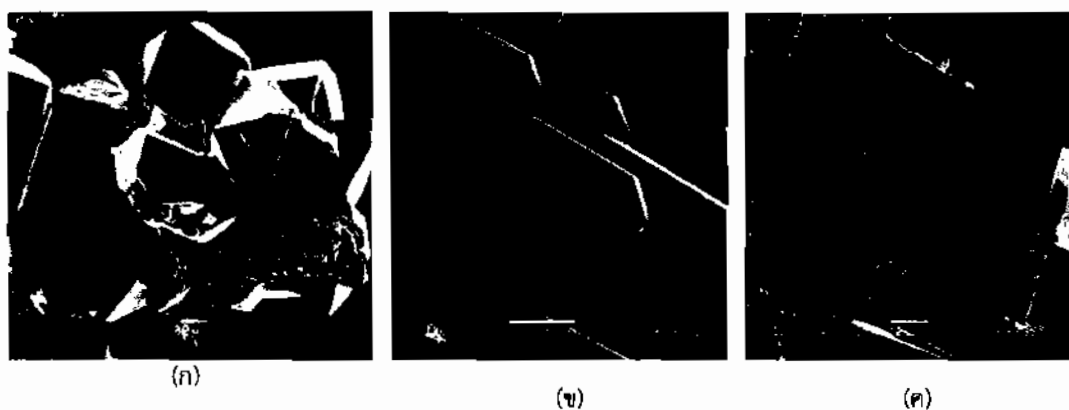
cm^{-1} เป็นผลจากการสั่นของพันธะ $\text{P}=\text{O}$ จากผลดังกล่าวพบว่าการเจือสาร TGS ส่งผลให้ยอดสเปกตรัมมีเลขคลื่นเพิ่มขึ้น แสดงว่าการเจือ TGS ทำให้ความถี่การสั่นของพันธะเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ยังพบยอดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของ TGS ดังนี้ ยอดที่เลขคลื่น 1085 cm^{-1} เป็นผลจากการสั่นของพันธะ $-\text{COOH}$ ยอดที่เลขคลื่น 1634 cm^{-1} เป็นผลจากการสั่นของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ เมื่อเทียบยอดสเปกตรัมดังกล่าวกับงานวิจัยของ Balu และคณะ [24] พบว่า ผลึกที่ปลูกได้มีโมเลกุลของ TGS เข้าไปแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างผลึก KDP ที่ถูกเจือ

4.4 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของผลึก

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของผลึก KDP บริสุทธิ์ ผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 2% mol และผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol โดยศึกษาจากภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6460LV โดยเตรียมชิ้นงานสำหรับถ่ายภาพด้วยกล้อง SEM ให้มีขนาดความหนา 2-3 mm จากนั้นนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มบางทอง

ภาพที่ 4.6(ก) เป็นลักษณะพื้นผิวของผลึก KDP บริสุทธิ์ ที่ได้จากการใช้ศักย์ไฟฟ้า 12 kV ภาพที่ได้มีลักษณะเป็นทรงเรขาคณิต โดยมีขนาดแต่ละด้านแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม รูปทรงสัณฐานมีลักษณะตรงกับผลึกที่ถูกรายงานโดย Dongli Xu [25] ส่วนลักษณะพื้นผิวของผลึกที่ถูกเจือ ในภาพที่ 4.6(ข) และภาพที่ 4.6(ค) เป็นลักษณะพื้นผิวของผลึก ในกรณีที่ถูกเจือด้วย TGS 2% mol และ 5% mol ซึ่งพื้นผิวผลึกมีลักษณะเป็นแท่งยาว แต่อย่างไรก็ตาม สเปกตรัมจากการวัด XRD แสดงให้เห็นว่า ขนาดของยูนิตเซลล์ของผลึก KDP บริสุทธิ์ และที่ถูกเจือด้วย TGS มีค่าเท่ากัน ภาพที่ได้จากกล้อง SEM จึงควรมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ดังนั้น ลักษณะที่แตกต่างกันในภาพที่ 4.6 อาจไม่ใช่ลักษณะสัณฐานของโดเมนผลึก KDP แต่อาจเป็นลักษณะพื้นผิวที่เกิดจากคราบของสารละลายที่เหลือค้างในระหว่างการเก็บผลึก



ภาพที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวของผลึกที่ปลูกได้

(ก) ลักษณะพื้นผิวของผลึก KDP บริสุทธิ์

(ข) ลักษณะพื้นผิวของผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 2% mol

(ค) ลักษณะพื้นผิวของผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol

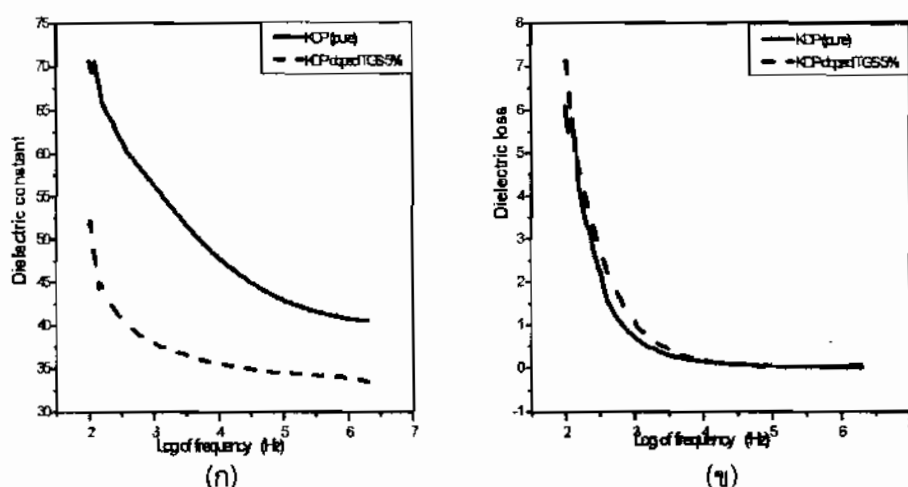
4.5 การศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริก

การศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของผลึก KDP สามารถทำได้โดยตัดชิ้นผลึกตัวอย่างให้เป็นแผ่นบาง ความหนา 2 mm และเคลือบกาวเงินไว้ที่ด้านหน้าและหลัง เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างของตัวเก็บประจุ และใช้เครื่อง Agilent E4980A วัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ที่ความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ที่อุณหภูมิห้อง

ภาพที่ 4.7(ก) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของผลึก KDP บริสุทธิ์ และที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol ค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของผลึก KDP บริสุทธิ์ มีค่ามากกว่าของผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol โดยมีค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์สูงสุดของผลึก KDP บริสุทธิ์ คือ 73 ส่วนผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol มีค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์สูงสุด คือ 53 ที่ความถี่ 100 Hz

เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น พบว่าค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์จะลดลง และเริ่มคงที่ เมื่อความถี่มากกว่า 10 kHz นั้นแสดงว่า ที่ความถี่มากกว่า 10 kHz ไดโพลโมเมนต์ไม่สามารถกลับตัวตามทิศทางสนามไฟฟ้า [26] เมื่อเจือ TGS ลงในผลึก KDP พบว่าค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์มีค่าลดลง อาจเกิดจาก TGS ไปแทรกตัวอยู่ภายในโครงสร้างผลึก KDP ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวไดโพลของผลึก KDP ทำให้การตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าลดลง [27]

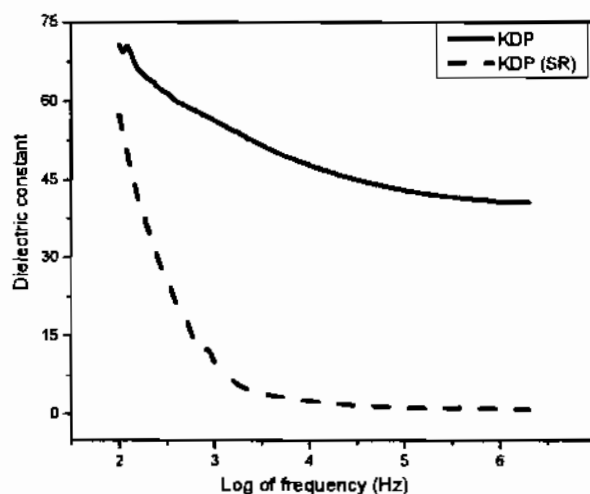
ภาพที่ 4.7(ข) แสดงค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของผลึก KDP บริสุทธิ์ และที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol จากกราฟพบว่าผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมากกว่ากรณีผลึก KDP บริสุทธิ์ แสดงให้เห็นว่า การเจือส่งผลให้มีพาหะเพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดกระแสรั่วเพิ่มขึ้น ดังนั้น ความสามารถในการเก็บพลังงานในรูปแบบไฟฟ้าลดลง [26-28]



ภาพที่ 4.7 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก

(ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของผลึก KDP และผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol

(ข) ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของผลึก KDP และผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol

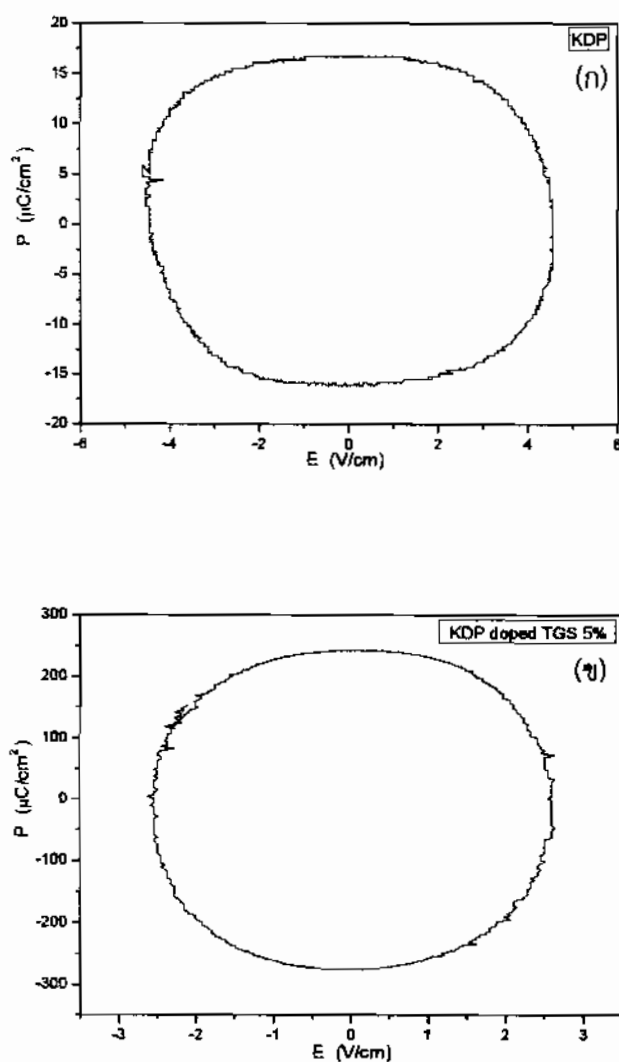


ภาพที่ 4.8 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของผลึก KDP ที่ปลุกแบบดั้งเดิม และผลึก KDP ที่ปลุกแบบทิศทางเดียว (SR)

ภาพที่ 4.8 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของผลึก KDP บริสุทธิ์ ที่ถูกปลุกแบบดั้งเดิมและที่ถูกปลุกแบบทิศทางเดียว พบว่าผลึกที่ปลุกแบบดั้งเดิมมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์มากกว่าผลึกที่ปลุกแบบทิศทางเดียว แต่อย่างไรก็ตาม ผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของผลึก KDP ที่ปลุกแบบทิศทางเดียว พบว่าบางช่วงความถี่ ค่าที่วัดได้น้อยกว่า 1 ซึ่งขัดแย้งกับค่าเชิงทฤษฎี แสดงให้เห็นว่า อาจเกิดความผิดพลาดขึ้นในขณะที่ทำการวัด ดังนั้น จึงควรทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกซ้ำ เพื่อดูเส้นแนวโน้มค่าที่วัดได้ที่ต้องการ เพราะจากทฤษฎีการปลุกแบบทิศทางเดียวควรได้ผลึกที่มีความสมบูรณ์มากกว่าผลึกที่ปลุกแบบดั้งเดิม ดังนั้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของผลึกที่ปลุกแบบทิศทางเดียวจึงควรสูงกว่าผลึกที่ปลุกแบบวิธีดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม หากแนวโน้มที่ได้ตามภาพที่ 4.8 เป็นจริง แสดงว่า ผลึกที่ปลุกแบบทิศทางเดียวในโครงงานนี้มีความบกพร่องของผลึกมาก ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ต่ำ ซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดในการควบคุมปัจจัยต่างๆ ในการปลุกผลึกแบบทิศทางเดียว [9]

4.7 การศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

การศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของผลึก KDP บริสุทธิ์ และที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol เป็นการวัดค่าโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นภายในผลึก ผลที่ได้อยู่ในรูปของกราฟระหว่างค่าโพลาไรเซชันกับค่าสนามไฟฟ้า โดยสามารถเตรียมชิ้นผลึกตัวอย่างได้โดยตัดให้เป็นแผ่นบาง ความหนา 2 mm จากนั้นเคลือบภาวเงินไว้ที่ด้านข้างทั้ง 2 ของชิ้นงาน และใช้วงจร Sawyer-Tower circuit วัดค่าโพลาไรเซชัน ที่อุณหภูมิ 0 °C [6] ได้ผลแสดงดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของ P และ E

(ก) ผลึก KDP บริสุทธิ์

(ข) ผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol

ภาพที่ 4.9 แสดงลักษณะสมบัติค่าโพลาไรเซชันของผลึก KDP บริสุทธิ์ และที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol กราฟที่ได้มีลักษณะโพลาไรเซชันตรงกับกราฟในภาพที่ 2.16 ซึ่งเป็นลักษณะของตัวต้านทานแบบเชิงเส้นในอุดมคติ แสดงว่า ผลึกที่ปลูกได้ไม่สามารถเก็บสะสมพลังงานในรูปสนามไฟฟ้าได้ เนื่องจากผลึก KDP แสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 122 K แต่ในการวัดค่าโพลาไรเซชันในโครงงานนี้ ถูกวัดที่อุณหภูมิ 273 K ทำให้ไดโพลโมเมนต์ไม่สามารถรวมตัวกันเกิดโดเมนของเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ [29]

การเจือ TGS ลงในผลึก KDP พบว่า ไม่สามารถปรับเปลี่ยนสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของผลึก KDP ได้ อาจเนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของ TGS ไม่เพียงพอที่จะช่วยให้เกิดโดเมนของเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ 273 K [29]

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการปลูกผลึกและการกำหนดลักษณะเฉพาะของผลึก KDP บริสุทธิ์ และผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS ในเปอร์เซ็นต์โมลต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 2% mol และ KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% mol ที่ปลูกแบบดั้งเดิมและการศึกษาลักษณะเฉพาะของผลึก KDP บริสุทธิ์ ที่ปลูกแบบทิศทางเดียว เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมบัติจากสองวิธี โดยการนำผลึกไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD FT-IR SEM และศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก ในการทดลองนี้สามารถสรุปผลโดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ผลจากการศึกษาด้วยเทคนิค XRD ของผลึก KDP โดยการเจือสาร TGS ในเปอร์เซ็นต์โมลที่แตกต่างกัน ไม่พบการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก KDP

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันโดยเทคนิค FT-IR

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของผลึก KDP จากเทคนิค FT-IR เมื่อเทียบจากลักษณะของเส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรด มีลักษณะสเปกตรัมที่คล้ายคลึงกัน แสดงให้เห็นว่าผลึกที่ปลูกได้มีการแทรกตัวของโมเลกุล TGS ในโครงสร้างผลึก KDP

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของผลึก

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของผลึก พบว่า ภาพที่ได้จากกล้อง SEM ในโครงงานนี้ไม่สามารถแสดงลักษณะสัณฐานของผลึกที่ปลูกได้ แต่อาจเป็นภาพที่แสดงคราบของสารละลายที่เหลือค้างในขณะที่เก็บผลึก

การศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริก

การศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของผลึก พบว่าการเจือ TGS ลงในผลึก KDP บริสุทธิ์ ไม่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของผลึก KDP อย่างไรก็ตาม วิธีการปลูกผลึกส่งผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของผลึก KDP

การศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

การศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก พบว่าการเจือ TGS ลงในผลึก KDP ไม่ส่งผลต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของผลึก KDP แต่ลักษณะโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นแสดงลักษณะสมบัติของตัวต้านทานแบบเชิงเส้นในอุดมคติ

5.2 ปัญหาจากการทดลองและข้อเสนอแนะ

ปัญหา

- การศึกษาภาพถ่ายจากกล้อง SEM ไม่สามารถเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาได้
- การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ไม่ได้ผลตามตัวเลขเชิงทฤษฎี
- การปลูกผลึกแบบทิศทางเดียวไม่สามารถปลูกผลึกให้มีความสมบูรณ์ตามทฤษฎี
- การศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกไม่พบการสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกเกิดขึ้น

ข้อเสนอแนะ

- การศึกษาภาพถ่ายจากกล้อง SEM ควรเตรียมชิ้นงานโดยการย้อมสีเพื่อให้เห็นขอบของเกรนผลึก
 - การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของผลึก ควรเตรียมชิ้นผลึกอย่างระมัดระวัง เพื่อให้ผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้าติดแน่นกับผิวของผลึกและไม่สัมผัสกัน
 - การปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว ควรควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการเกิดผลึก ได้แก่ อุณหภูมิ สิ่งเจือปนต่างๆ เป็นต้น
 - การศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก ควรเปลี่ยนอุณหภูมิในการวัดและเพิ่มปริมาณสารที่เจือลงในผลึก

บรรณานุกรม

- [1] P. Ramasamy, P. Santhanaraghavan, Crystal growth processes and methods, KUR publication (2001).
- [2] C. Justin Raj, S. Krishnan, S. Dinakaran, R. Uthakaran, S. Jerome Das, Growth and optical absorption studies on potassium dihydrogen phosphate single crystal, **Crystal Research Technology**, 43 (2008) 245–247.
- [3] S. Balamurugan, P. Ramasamy, Yuttapong Inkong, Prapun Manyum, Effect of KCL on the bulk growth KDP crystals by Sankaranarayanan-Ramasamy method, **Materials Chemistry and Physics**, 113 (2009) 622–625.
- [4] R. Krishnamurthy, R. Rajasekaran, Bincy Susan Samuel, Growth and characterization of KDP crystals doped with L-aspartic acid, **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, 104 (2013) 310–314.
- [5] I.N. Ogorodnikov, V.A. Pustovarov, V.M. Puzikov, V.I. Salo, A.P. Voronov, A luminescence and absorption spectroscopy study of KH_2PO_4 crystals doped with Tl^+ ions, **Optical Materials**, 34 (2012) 1522–1528.
- [6] K. Cwikiel, B. Fugiel, M. Mierzwa, Quasi-stable states of TGS ferroelectric induced by an electric field perpendicular to the ferroelectric axis, **Physica B: Condensed Matter**, 296 (2001) 361–368.
- [7] [3] S. Balamurugan, P. Ramasamy, Growth and characterization of unidirectional $\langle 100 \rangle$ KDP single crystal by Sankaranarayanan–Ramasamy (SR) method, **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, 71 (2009) 1979–1983.
- [8] สุภาสินี ลิ้มปานภาพ เอกสารประกอบการสอนโครงสร้างของของแข็งผลึก 2552
- [9] K. Sankaranarayanan, P. Ramasamy, Unidirectional seeded single crystal growth from solution of benzophenone, **Journal of Crystal growth**, 208 (2005) 467–473.
- [10] Urit Charoen-in, P. Ramasamy, P. Manyum, Unidirectional growth of organic nonlinear optical L-arginine maleate dihydrate single crystal by Sankaranarayanan-Ramasamy (SR) method and its characterization, **Journal of Crystal growth**, 318 (2011) 745–750.
- [11] Urit Charoen-in, P. Ramasamy P. Manyum, Compararitive study on L-arginine maleate dihydrate single crystal by Sankaranarayanan-Ramasamy (SR) method and conventional slow evaporation solution technique, **Journal of Crystal growth**, 312 (2011) 3269–3275.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] Yusuke Asakuma, Qin Li, H. Ming Ang, Moses Tade, Kouji Maeda, Keisuke Fukui, A study of growth mechanism of KDP and ADP crystals by means of Quantum, **Chemistry, Applied Surface Science**, 254 (2008) 4524–4530.
- [13] C. Justin Raj, S. Krishnan, S. Dinakaran, R. Uthrakumar, S. Jerome Das, Growth and optical absorption studies on potassium dihydrogen phosphate single crystal, **Crystal Research Technology**, 43 (2008) 245–247.
- [14] N. Balamurugan, M. Lenin, G. Bhagavannarayana, P. Ramasamy, Growth of TGS Crystal using uniaxially solution-crystallization method of Sankaranarayanan-Ramasamy (SR), **Crystal Research Technology**, 42 (2007) 151–156.
- [15] Geochemical Instrumentation and Analysis [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก (<http://serc.carleton.edu/XRD.html>) (วันที่สืบค้น 23 มกราคม 2556)
- [16] (http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html) [ออนไลน์] (วันที่สืบค้น 22 มกราคม 2556)
- [17] แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ.หลักการและเทคนิควิเคราะห์เครื่องมือ.กรุงเทพฯ 2554
- [18] สันติ กระแสเทพ การเตรียมและสมบัติทางแม่เหล็กของ CoFe_2O_4 และ NiFe_2O_4 มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 2554
- [19] Dielectric properties [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก (http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dielectrics/dielectric_constant.php) (วันที่สืบค้น 22 มกราคม 2556)
- [20] www.doitpoms.ac.uk/tlplib/ferroelectrics/printall.php [ออนไลน์] (วันที่สืบค้น 31 พฤษภาคม 2556)
- [21] Ferroelectric [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก (http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2548/mat0948sh_ch2.pdf) (วันที่สืบค้น 22 มกราคม 2556)
- [22] Ferroelectric [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก ([http://interactive.npl.co.uk/multiferroics/images/7/7a/CMMT_A\(152\).pdf](http://interactive.npl.co.uk/multiferroics/images/7/7a/CMMT_A(152).pdf)) (วันที่สืบค้น 13 พฤษภาคม 2556)
- [23] Fernando Loretta, T. Josephine Rani, P. Selvarajan, S. Perumal, S. Ramalingom, Growth, structural and optical studies of pure and bithiourea zinc chloride doped potassium dihydrogen phosphate single crystals, **World Journal of Science and Technology**, 1(3) 2011 01–06.
- [24] T. Balu , T.R. Rajasekaran , P. Murugakoothan, Studies on the growth, structural, optical and mechanical properties of ADP admixed TGS crystals, **Current Applied Physics** 9 (2009) 435–440.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [25] Dongli Xu, Dongfeng Xue, Morphology control of KDP crystallites, **Physica B: Condensed Matter**, 370: 84-89.
- [26] N.B. Singh, T.A. Gould, R.H. Hopkins, Etching studies on crystals of thallium arsenic selenide, **Journal of Crystal Growth**, 78 (1986) 43–50.
- [27] M. Senthil Pandian, P. Ramasamy, Unidirectional growth of <0 0 1> tetra glycine barium chloride (TGBC) single crystal by Sankaranarayanan–Ramasamy method, **Journal of Crystal Growth**, 311 (2009) 944-947.
- [28] K. Rajarajan, S. Selvakumar, Ginson P. Joseph, S. Samikkannu, I. Vetha Potheher, P. Sagayara, Optical, dielectric and photoconductivity studies of bis(dimethylsulfoxide) tetrathiocyanato-cadmium(II) mercury(II) NLO single crystals, **Optical Materials**, 28 (2006) 1187-1191.
- [29] Dalibor Merunka, Boris Rakvin, Correlation between hydrogen bond geometry and phase transition temperature in KDP-type ferroelectrics, **Chemical Physics Letters**, 393 (2004) 558-562.

ภาคผนวก

การคำนวณค่าไดอิเล็กทริก

คำนวณได้จากสมการ

$$\epsilon' = \frac{C_p d}{\epsilon_0 A}$$

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

ข้อมูลผลึก KDP ที่ใช้คำนวณ $d = 0.00145 \text{ m}$, $A = 0.00003959 \text{ m}^2$

ข้อมูลผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS ที่ใช้คำนวณ $d = 0.00125 \text{ m}$, $A = 0.00001528 \text{ m}^2$

การคำนวณเฟอร์โรอิเล็กทริก

คำนวณได้จากสมการ

Polarization; $P = CV/A$

$E = V/D$

เมื่อ P คือ โพลาริเซชัน

C คือ ความจุไฟฟ้า

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า

A คือ พื้นที่ของชิ้นงาน

E คือ สนามไฟฟ้า

D คือ ความหนาของชิ้นงาน

ข้อมูลผลึก KDP ที่ใช้คำนวณ $D = 2.32 \text{ mm}$ $R = 0.98 \text{ mm}$ $A = \pi r^2 = 301.6 \text{ mm}^2$

ข้อมูลผลึก KDP ที่ถูกเจือด้วย TGS ที่ใช้คำนวณ $D = 2.02 \text{ mm}$ $R = 1.155 \text{ mm}$

$$A = \pi r^2 = 418.8 \text{ mm}^2$$

$$E = (2000 \times 10^{-3} \times \text{channel B}) / ((D \times 1000) / 100)$$

$$P = ((10^{-6} \times \text{channel C} \times 10^{-3} \times 10) / ((A / 1000) \times 1000000))$$

หมายเหตุ ถ้า mV ให้คูณ 10^{-3} และ ไม่มี mV ไม่ต้องคูณ 10^{-3} ทั้ง Channel A และ Channel B

การคำนวณหาอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์การเจือสาร TGS

การคำนวณเปอร์เซ็นต์ในการเจือสาร TGS 2% mol

ถ้าต้องการเจือสาร TGS 2% mol ในสาร KDP ปริมาณ 50 g สามารถทำได้โดยนำสาร TGS ปริมาณ 2.37 g มาผสมในขั้นตอนการเตรียมสารละลายซึ่งปริมาณการเจือดังกล่าวสามารถคำนวณจาก

$\text{โมล} = \text{มวล (g)}/\text{มวลโมเลกุล (g/mol)}$

$$\text{mol} = \frac{\text{KDP(g)}}{136.09(\text{g/mol})}$$

$$= \frac{50(\text{g})}{136.09(\text{g/mol})}$$

$$= 0.367(\text{mol})$$

เปอร์เซ็นต์ในการเจือคือ 2% กำหนดคือตัวแปร x จะได้ว่า

$$\frac{x}{0.367} = \frac{2\%}{100}$$

$$x = 0.00734$$

มวลโมเลกุลของ TGS 323.28 จะได้

$$0.00734 \times 323.28 = 2.37 \text{ g}$$

ดังนั้น เปอร์เซ็นต์ในการเจือสาร TGS 2% mol = 2.37 g

ในทำนองเดียวกันในการเจือสาร TGS 5% mol = 5.90 g

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติผู้ทำการศึกษา

ชื่อ นายเกียรติศักดิ์ จันทร์อุป
 วันเกิด 26 สิงหาคม 2534
 ที่อยู่ปัจจุบัน 80/1 ม.2 ตำบลบ้านเหล่า อำเภอบ้านฝาง จังหวัดขอนแก่น 40270
 อีเมลล์ i-k-ch@hotmail.com
 เบอร์โทรศัพท์ 0836779399

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2545 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนหนองซาดพิทยาคม
 พ.ศ. 2548 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนนครขอนแก่น
 พ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนนครขอนแก่น
 พ.ศ. 2556 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์
 มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผลงาน

นำเสนอผลงานในงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยครั้งที่ 38 ในรูปแบบโปสเตอร์ เรื่อง Unidirectional growth of triglycine sulphate doped potassium dihydrogen phosphate single crystal and its characteristics.

นำเสนอผลงานวิทยาศาสตร์สำหรับนิสิต มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ครั้งที่ 12 ในรูปแบบโปสเตอร์ เรื่อง Growth of TGS doped KDP and tartaric acid doped ADP and their characterization.