

การปลูกผลึกแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก
ด้วยวิธีแบบทิศทางเดียว <100> และการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของผลึก

ศักดิ์รินทร์ โคตรเพชร

รายงานวิชาโครงงานฟิสิกส์
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคามเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์
พฤษภาคม 2556
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การปลูกผลึกแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก
ด้วยวิธีแบบทิศทางเดียว <100> และการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของผลึก

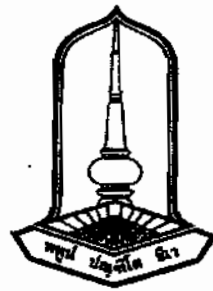
ศักดิ์รินทร์ โคตรเพชร

รายงานวิชาโครงงานฟิสิกส์
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคามเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์
พฤษภาคม 2556
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

**Unidirectional Sankaranarayanan–Ramasamy Growth of <100>
Tartaric Acid Doped Ammonium Dihydrogen Phosphate
And the Study of Its Characteristics**

Sakrin Khotpech

**Presented in partial fulfillment of requirements for
The Bachelor Degree of Science in Physics
At Mahasarakham University
May 2013
All rights reserved by Mahasarakham University**



การปลูกผลึกแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก
ด้วยวิธีแบบทิศทางเดียว <100> และการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของผลึก

ศักดิ์รินทร์ โคตรเพชร

รายงานวิชาโครงงานฟิสิกส์เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคามเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์

คณะกรรมการคุมสอบ

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

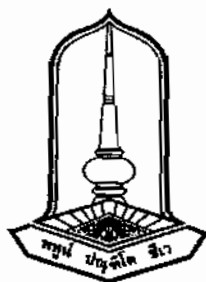
..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ปวีณา เหลากุล)

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร. สุภกร หาญสูงเนิน)

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

วันที่ 7 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2556



Unidirectional Sankaranarayanan – Ramasamy Growth of $\langle 100 \rangle$
Tartaric Acid Doped Ammonium Dihydrogen Phosphate
And the Study of Its Characteristics

Sakrin Khotpech

Presented in partial fulfillment of requirements for the degree of bachelor of
science in physics

Examination Committee:

..... *A. Rittidech* Chairperson
(Assistant Professor Dr. Aurawan Rittidech)

..... *Paveena Laokul* Member
(Dr. Paveena Laokul)

..... *Supachai Ritjareonwattu* Member
(Dr. Supachai Ritjareonwattu)

Supakorn Harnsoongnoen Co-advisor
(Dr. Supakorn Harnsoongnoen)

..... *U. Charoen-In* Advisor
(Dr. Urit Charoen-In)

Date 7 May 2013

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องการปลูกผักแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก ด้วยวิธีแบบทิศทางเดียว <100> และการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของผลึกสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำโครงการจึงขอขอบพระคุณดังนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.อุฤทธิ์ เจริญอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์ ดร.สันชัย หาญสูงเนิน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม อาจารย์ ดร.นิติศักดิ์ ปาสาจะ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่คอยช่วยเหลือ ชี้แนะแนวทางในการทำโครงการ เรื่องนี้ในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการหาข้อมูลการวิเคราะห์ข้อมูลและให้ความช่วยเหลือในทุกอย่างในการทำโครงการเล่มนี้

ขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาฟิสิกส์ ศูนย์เครื่องมือกลางคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ศูนย์เครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครู อาจารย์ทุกท่าน ที่ช่วยอบรมสั่งสอนให้ปัญญาแก่ผู้ทำโครงการจนประสบความสำเร็จ

สุดท้ายนี้ขอมอบคุณงามความดีของโครงการนี้แต่ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกๆ ท่านที่ทำให้โครงการฟิสิกส์นี้สำเร็จลงด้วยดี และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจในด้านนี้ต่อไป

ศักดิ์รินทร์ โคตรเพชร

ชื่อโครงการ	การปลูกผลึกแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริกด้วยวิธีแบบทิศทางเดียว <100> และการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของผลึก
ผู้ศึกษาค้นคว้า	นาย ศักดิ์รินทร์ โคตรเพชร
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. อุฤทธิ์ เจริญอินทร์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. สันชัย หาญสูงเนิน
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ.ฟิสิกส์)
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2556

บทคัดย่อ

แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (ADP) เป็นสารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกและทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ อย่างไรก็ตาม ADP มีขีดจำกัดในการใช้งาน ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของผลึก ADP บริสุทธิ์ โดยเจือด้วยกรดทาร์ทาริก (tartaric acid) ความเข้มข้น 2%mol ซึ่งการปลูกผลึกนี้จะใช้วิธีการตกผลึกจากสารละลาย 2 วิธี คือ การปลูกผลึกแบบดั้งเดิมและการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียวในทิศทาง <100> จากนั้นนำผลึกที่ได้ทั้ง 2 วิธี มาศึกษาเปรียบเทียบลักษณะของผลึก ADP บริสุทธิ์ และผลึก ADP ที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol จากการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของผลึก พบว่าผลึกที่ปลูกแบบทิศทางเดียวมีอัตราการเจริญเติบโต (1.40 mm/วัน) สูงกว่าผลึกที่ได้จากการปลูกแบบดั้งเดิม (1.33 mm/วัน) ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลึก ADP บริสุทธิ์ และที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก พบว่าสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากผลึกที่ถูกเจือมีลักษณะตรงกับผลึก ADP บริสุทธิ์ ผลการศึกษาสเปกตรัมของแสงจากเทคนิค FTIR พบหมู่ฟังก์ชันที่ใช้ยืนยันโมเลกุลในโครงสร้างผลึก ADP บริสุทธิ์และผลึก ADP ที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก พบว่าการปลูกผลึกวิธีแบบทิศทางเดียว มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงขึ้น และการศึกษาเบื้องต้นเฟอร์โรอิเล็กทริกของผลึกกรดทาร์ทาริกบริสุทธิ์ พบว่าสมบัติกรดทาร์ทาริกมีความสอดคล้องกับสมบัติกรดทาร์ทาริกจากรายงานวิจัยอื่นๆ ดังนั้นกรดทาร์ทาริกมีแนวโน้มปรับเปลี่ยนสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งโครงการนี้จะทำการศึกษาต่อไป

TITLE Unidirectional Sankaranarayanan–Ramasamy growth of <100> tartaric acid doped ammonium dihydrogen phosphate and the study of its characteristics.

AUTHOR Mr. Sakrin Khotpech

ADVISOR Dr. Urit Charoen-In

Co-advisor Dr. Sanchai Harnsoongnoen

DEGREE Bachelor of Science in Physics (B.Sc. Physics)

UNIVERSITY Mahasarakham University **Date** 2013

Abstract

Ammonium dihydrogen phosphate (ADP) is an organic compound with antiferroelectric and non-linear optic properties. ADP can be used in electronics industries but has limitation in the ferroelectric applications. The aim of this project is to improve ferroelectric properties of ADP crystals. The pure ADP was doped with tartaric acid at the concentration of 2 %mol. The crystals were grown by two solution methods: 1. a conventional method and 2. an unidirectional Sankaranarayanan-Ramasamy (SR) method. The pure and doped ADP crystals were studied by various techniques. The crystal growth rate was observed and the growth rate was calculated. The growth rate of the crystals grown by the unidirectional method (1.4 mm / day) was higher than that grown by the conventional method (1.33 mm / day). The XRD spectrum of the ADP crystals was studied. The tartaric acid doped ADP crystal has the similar XRD spectrum to that of the pure ADP crystal. The FTIR technique was used to confirm the functional groups within the crystals. The absorbance of the crystals was also studied. The ADP crystals grown with unidirectional method have higher relative dielectric constant than those grown by the conventional method. Basic ferroelectricity of pure tartaric acid was also studied. The properties of the pure tartaric acid crystals are consistent with those reported by Zhihua Sun et al. Some studies show that the crystals with tartaric acid can show some ferroelectric properties. Thus tartaric acid has the potential to improve ferroelectric properties of the ADP crystal. However, some further studies are needed to characterize the ferroelectricity of the doped ADP.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
 บทที่ 1 บทนำ.....	 1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 สถานที่ทำโครงการ.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
 บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	 3
2.1 ผลึก.....	3
2.1.1 โครงสร้างผลึก.....	3
2.1.2 ทิศทางและระนาบของผลึก.....	5
2.2 แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต.....	6
2.3 กรดทาร์ทาริก.....	7
2.4 หลักการปลูกผลึกจากสารละลาย.....	8
2.4.1 การปลูกผลึกแบบดั้งเดิม.....	8
2.4.2 การปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว.....	9
2.5 เครื่องมือการวิเคราะห์สมบัติของผลึก.....	10
2.5.1 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	10
2.5.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR.....	12
2.5.3 การศึกษาค่าคงที่ไดโพลทริก.....	13
2.5.4 การศึกษาเฟอร์โรอิเล็กทริก.....	15
 บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	 18
3.1 สารเคมีที่ใช้ในโครงการ.....	18
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	18
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	19
3.3.1 การปลูกวิธีแบบดั้งเดิม.....	19
3.3.2 การปลูกวิธีแบบทิศทางเดียว.....	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	24
4.1 ลักษณะทางกายภาพของผลึกที่ปลูกได้.....	24
4.1.1 ผลึกถูกปลูกแบบดั้งเดิม.....	24
4.1.2 ผลึกถูกปลูกแบบทิศทางเดียว.....	25
4.2 อัตราเจริญเติบโต.....	26
4.3 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	27
4.4 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR.....	28
4.5 การศึกษาคุณสมบัติไดโอดเปล่งแสง.....	29
4.6 การศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก.....	30
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	33
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	33
5.2 ปัญหา.....	33
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	33
บรรณานุกรม.....	34
ภาคผนวก.....	38
ภาคผนวก ก ภาพสารเคมีและชุดอุปกรณ์การทดลอง.....	39
ภาคผนวก ข การคำนวณ.....	41
ประวัติผู้ทำโครงการ.....	43

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ระบบผลึกทั้ง 7 กลุ่ม 14 แบบ.....	4
ตารางที่ 4.1 หมู่ฟังก์ชันและยอดของสเปกตรัม.....	29
ตารางที่ 4.2 ขนาดผลึกใช้ในการวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	29

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ลักษณะของแข็ง.....	3
ภาพที่ 2.2 โครงสร้าง แลตทิซ จุดแลตทิซ และยูนิตเซลล์.....	4
ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างทิศทางของผลึกในหน่วยเซลล์.....	5
ภาพที่ 2.4 ระนาบต่างๆ ของผลึก.....	6
ภาพที่ 2.5 ผลึก ADP บริสุทธิ์.....	7
ภาพที่ 2.6 ลักษณะของผลึก ADP.....	7
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างและลักษณะกรดทาร์ทาริก.....	8
ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเข้มข้น.....	8
ภาพที่ 2.9 วิธีปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว.....	9
ภาพที่ 2.10 เครื่อง Bruker's x-ray diffraction D8-discover.....	11
ภาพที่ 2.11 แผนภาพสะท้อนของรังสีเอกซ์.....	11
ภาพที่ 2.12 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึก ADP.....	11
ภาพที่ 2.13 เครื่อง FTIR.....	12
ภาพที่ 2.14 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของผลึก ADP	13
ภาพที่ 2.15 เครื่อง Agilent E4980A การทดสอบค่าไดอิเล็กทริก.....	14
ภาพที่ 2.16 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของผลึก ADP และ ADP เจือด้วย CO และ DLM.....	15
ภาพที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง E-P ของเฟอร์โรอิเล็กทริก.....	16
ภาพที่ 2.18 ค่าโพลาริเซชันของสารในกลุ่มทาร์ทาเรท	16
ภาพที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง E-P ของเครื่องวัด.....	17
ภาพที่ 3.1 แผนผังการศึกษาการปลูกผลึกแบบวิธีดั้งเดิม.....	19
ภาพที่ 3.2 แผนผังการศึกษาการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว.....	22
ภาพที่ 4.1 ลักษณะกายภาพผลึกที่ปลูกแบบวิธีดั้งเดิม.....	24
ภาพที่ 4.2 ลักษณะกายภาพผลึกที่ปลูกแบบทิศทางเดียว.....	25
ภาพที่ 4.3 อัตราการเจริญเติบโตของผลึกชนิดต่างๆ.....	26
ภาพที่ 4.4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	27
ภาพที่ 4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของผลึก.....	28
ภาพที่ 4.6 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก.....	30
ภาพที่ 4.7 ค่าโพลาริเซชันของผลึก ADP บริสุทธิ์.....	31
ภาพที่ 4.8 ค่าโพลาริเซชันของผลึกกรดทาร์ทาริก.....	31

บทที่ 1

บทนำ

1.1) ที่มาและความสำคัญ

การพัฒนาทางด้านวัสดุศาสตร์มีความเป็นมาอย่างยาวนาน โดยเกิดขึ้นควบคู่กับการพัฒนาเทคโนโลยีด้านต่างๆ ดังนั้นงานด้านวัสดุศาสตร์จึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านแสงกำลังมีบทบาทที่สำคัญต่อการพัฒนาประเทศ ซึ่งทำให้เกิดความต้องการวัสดุที่จะตอบสนองต่อเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นเหล่านั้น นับจากอดีต ผลึกเป็นวัสดุที่สามารถตอบสนองต่อแสงได้ดี และผลึกบางประเภทสามารถปรับเปลี่ยนสมบัติบางอย่างของแสงได้ [1] โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลึกที่มีสมบัติการตอบสนองที่ไม่เชิงเส้นต่อแสงย่านต่างๆ กำลังได้รับความสนใจและศึกษาจากนักวิจัยทั่วโลก

การเตรียมผลึกสำหรับใช้กับอุปกรณ์ด้านแสงต่างๆ นั้น ทำได้หลายวิธี แต่อย่างไรก็ตาม วิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดวิธีหนึ่ง คือ การปลูกผลึกจากสารละลาย โดยหลักการและแนวคิดการปลูกผลึกแบบนี้ ถูกพัฒนาดังแต่ศตวรรษที่ 18 ซึ่งมุ่งเน้นในการพัฒนาความเข้าใจต่อการเจริญเติบโต และศึกษาสมบัติพื้นฐานของผลึก เป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุอย่างกว้างขวาง เพราะวัสดุที่มีความสำคัญมากขึ้นในการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ เช่น อิเล็กทรอนิกส์ การสื่อสารโทรคมนาคม เป็นต้น

วัสดุเชิงทัศนศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear optical materials) ถูกพัฒนาและประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ โดยอาศัยสมบัติที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของแสงให้มีค่าความถี่เพิ่มขึ้นหรือลดลง [2]

สารที่มีคุณสมบัติทางแสงแบบไม่เป็นเชิงเส้นหลายชนิดมีความโปร่งแสงต่ำ ทำให้มีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งาน แต่อย่างไรก็ตาม สารแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (ammonium dihydrogen phosphates; ADP) มีสมบัติทางแสงแบบไม่เป็นเชิงเส้นและมีความโปร่งแสงสูง [3 4] ทำให้ถูกศึกษาอย่างกว้างขวาง โดยปกติสาร ADP ถูกปลูกด้วยวิธีแบบใช้สารละลาย แล้วให้ตัวทำละลายระเหยไปอย่างช้าๆ เกิดการตกผลึก ซึ่งจะได้ผลึกเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่ แต่ผลึกที่ปลูกได้มีสิ่งเจือปน ทำให้ผลึกที่ได้มีคุณภาพต่ำ โครงการนี้จึงต้องการศึกษาและพัฒนาวิธีการปลูกผลึกที่ให้ได้ผลึกที่มีสิ่งเจือปนต่ำ เพื่อปรับปรุงคุณภาพผลึกให้สูงขึ้น

การปลูกผลึกที่มีคุณภาพสูงมีหลายวิธี แต่วิธีการปลูกแบบทิศทางเดียว มีต้นทุนต่ำและอุปกรณ์ไม่ซับซ้อน ดังนั้น โครงการนี้จึงเลือกวิธีการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว มาปลูกผลึก ADP แต่อย่างไรก็ตาม สาร ADP มีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้งาน วิธีการปรับปรุงสมบัติของผลึกสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีการเจือสารต่างๆ ลงไปในผลึก จะทำให้สามารถปรับเปลี่ยนสมบัติของผลึกได้ตามต้องการ ในโครงการนี้ เลือกวิธีการเจือกรดทาร์ทาริกลงไปในผลึก ADP เพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก เนื่องจากมีงานวิจัย [5] ชี้ว่ากรดทาร์ทาริกสามารถเพิ่มสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่เจอได้ ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะปรับเปลี่ยนสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของผลึก ADP ด้วยการเจือกรดทาร์ทาริก

1.2) วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1. เพื่อศึกษาการปลูกผลึกแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก มีคุณลักษณะแตกต่างกันอย่างไร

1.2.2. เพื่อศึกษาสมบัติของผลึกที่ปลูกในด้านต่างๆ เช่น โครงสร้าง สมบัติทางไดอิเล็กทริก และสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก

1.3) ขอบเขตของโครงการ

1.3.1. การปลูกผลึกแบบดั้งเดิมและแบบวิธีแบบทิศทางเดียว ถูกทดลองที่ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

1.3.2. ในการปลูกผลึก ADP และเจือด้วยกรดทาร์ทาริก เป็นหลักในการทดลองการปลูกผลึก จากสารละลาย

1.3.3. ศึกษาคุณสมบัติต่างๆดังนี้

- ศึกษาโครงสร้างของผลึก (X-ray diffraction)
- ศึกษาการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (Fourier transform infrared spectroscopy)
- ศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectricity)
- ศึกษาคุณสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectricity)

1.4) สถานที่ทำโครงการ

1.4.1. ห้องวิจัยการปลูกผลึก ห้อง SC2-407/2 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

1.4.2. ศูนย์เครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

1.4.3. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5) ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1. ได้เงื่อนไขเบื้องต้นในการปลูกผลึก ADP ด้วยเทคนิคต่างๆ

1.5.2. ได้เงื่อนไขเบื้องต้นในการเจือด้วยกรดทาร์ทาริกลงในผลึก ADP

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปลูกผลึก โดยเน้นการปลูกผลึกจากสารละลาย ทั้งวิธีแบบดั้งเดิมและวิธีแบบทิศทางเดียว นอกจากนี้ ยังรวมถึงการวิเคราะห์สมบัติของผลึกต่างๆ ที่สำคัญ เพื่อเป็นแนวทางการศึกษาการปลูกผลึกแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตและผลึกแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก

2.1) ผลึก

ผลึก คือ ของแข็งที่โครงสร้างภายในมีการจัดเรียงตัวของอนุภาค (อะตอม ไอออนหรือโมเลกุล) อย่างเป็นระเบียบในสามมิติ แล้วก่อตัวเป็นรูปร่างคณิตเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด ผลึกประกอบด้วยหน่วยผลึกที่มีขนาดเล็กจำนวนมากมารวมตัวกัน กระบวนการที่สสารเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง เรียกว่า โซลิดิฟิเคชัน (solidification) มี 3 อัญรูป ได้แก่ ผลึกเดี่ยว ผลึกหลายรูป และอสัณฐาน ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งโครงงานนี้มุ่งเน้นการปลูกผลึกเดี่ยว ซึ่งเป็นของแข็งชนิดนี้จะมีการเรียงตัวของอนุภาคอย่างเป็นระเบียบทั้งก้อน โดยปกติผลึกที่ได้จะมีรูปร่างเรขาคณิตและมีมุมระหว่างผิวที่แน่นอน



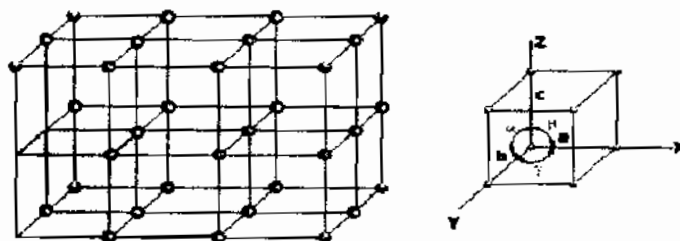
ภาพที่ 2.1 ลักษณะของของแข็ง (ก) ผลึกเดี่ยว (ข) ผลึกพอลิคริสตัลไลน์ (ค) อสัณฐาน[6]

2.1.1. โครงสร้างผลึก

โครงสร้างของผลึกประกอบด้วยอะตอมหรือโมเลกุลที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบเป็นโครงข่ายสามมิติ เรียกว่า แลตทิซ (lattice) และจุดตัดบนโครงข่ายดังกล่าว เรียกว่า จุดแลตทิซ (lattice point) อะตอมพื้นฐานของผลึกจะต้องอยู่ที่จุดแลตทิซอย่างเป็นระเบียบและต่อเนื่องทั้งโครงข่ายแลตทิซ ดังภาพที่ 2.2

หน่วยเซลล์เป็นองค์ประกอบพื้นฐานของผลึก โดยเกิดจากอะตอมหรือโมเลกุลของสารมาจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบแบบโครงข่ายสามมิติ หน่วยเซลล์ของผลึกถูกกำหนดลักษณะสมบัติด้วยความยาวทั้งสามด้าน (a b และ c) และมุมทั้งสาม (α β และ γ) ซึ่งถูกเรียกว่า แลตทิซพารามิเตอร์ (lattice parameters) ซึ่งแลตทิซพารามิเตอร์และสมบัติความสมมาตรของผลึกเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดสมบัติต่าง ๆ ของผลึก เช่น ความแข็ง การดูดกลืนแสง และ แลปพลังงานของ

อิเล็กตรอน ดังนั้น โครงสร้างผลึกจึงประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วนคือ แลตทิซ และ เบซิส (หรือ โมทิฟ) [10]



ภาพที่ 2.2 โครงสร้าง แลตทิซ จุดแลตทิซ และหน่วยเซลล์ [7]

โดยปกติการจัดเรียงจุดแลตทิซมีหลายแบบ ประกอบกับเบซิสแตกต่างกันไปตามชนิดของผลึก ทำให้แลตทิซพารามิเตอร์ต่างกัน อย่างไรก็ตาม ผลึกที่มีแลตทิซพารามิเตอร์คล้ายกันจะมีสมบัติเหมือนกัน ดังนั้น จึงมีการจัดกลุ่มโครงสร้างผลึกโดยใช้แลตทิซพารามิเตอร์เป็นตัวกำหนด ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ระบบผลึกทั้ง 7 กลุ่ม 14 แบบ

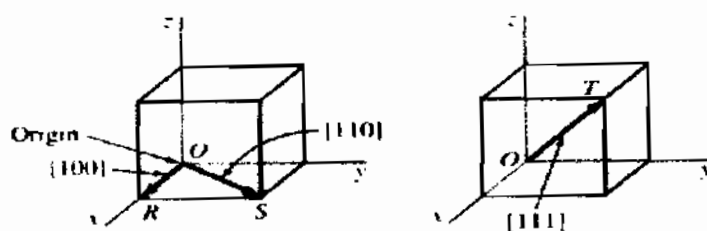
ระบบผลึก	ความยาวด้าน	ขนาดมุม	ชนิดหน่วยเซลล์
ลูกบาศก์	$a=b=c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เตตระโกนอล	$a=b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
รอมโบฮีดรัล	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เฮกซะโกนอล	$a=b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ \quad \gamma = 120^\circ$	
ออโรโรมบิก	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
โมโนคลินิก	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
ไตรคลินิก	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

โดยที่ α คือ มุมระหว่างแกน a กับแกน b
 β คือ มุมระหว่างแกน b กับแกน c
 γ คือ มุมระหว่างแกน a กับแกน c

ในปี ค.ศ.1848 Auguste Bravais นักผลึกวิทยาชาวฝรั่งเศส ได้เสนอการจัดระบบพื้นฐานของโครงสร้างผลึก ซึ่งในภายหลังถูกใช้เป็นหลักมาตรฐานในการจัดระบบผลึก โครงสร้างผลึกเมื่อแบ่งตามแลตทิซพารามิเตอร์ จะแบ่งได้ 7 กลุ่ม คือ cubic tetragonal hexagonal orthorhombic rhombohedral monoclinic และ triclinic [8]

2.1.2. ทิศทางและระนาบของผลึก

ทิศทางและระนาบต่างๆ ของโครงสร้างผลึก ถูกใช้ในการศึกษาสมบัติของผลึก เพราะผลึกที่ต่างชนิดจะมีระนาบและทิศทางที่ต่างกัน ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติเฉพาะของผลึก การบอกทิศทางในผลึก นิยมบอกเป็นตัวเลขจำนวนเต็มทีน้อยที่สุด ซึ่งตัวเลขดังกล่าวได้จากการกำหนดจุดเริ่มต้นที่มุมหรือตำแหน่งอะตอมใดๆ ของหน่วยเซลล์ แล้วลากเวกเตอร์นั้นไปตามทิศทางที่ต้องการ และสิ้นสุดที่จุดแลตทิซ จะได้เวกเตอร์บอกทิศทางตามต้องการ โดยทั่วไป กำหนดให้จุดตัดของทั้งสามแกน (จุด O) เป็นจุดเริ่มต้นของเวกเตอร์บอกทิศทาง ดังแสดงในภาพที่ 2.3 จากนั้นหาองค์ประกอบของแต่ละทิศทาง (u v w) โดยเทียบกับแกน +x +y และ +z ตามลำดับ นำองค์ประกอบในแกนต่างๆ มาใส่ในวงเล็บ [] จะได้ดัชนีของทิศทาง (direction indices) คือ [uvw] กรณีที่องค์ประกอบมีค่าลบ ให้เขียนเครื่องหมายลบไว้เหนือค่าองค์ประกอบนั้น เช่น ถ้าค่าตามแกน x เป็นลบจะได้ทิศทางเป็น $\bar{[uvw]}$



ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างทิศทางของผลึกในหน่วยเซลล์ [7]

ในกรณีที่เวกเตอร์ขนานกัน จะมีค่าดัชนีของทิศทางชุดเดียวกัน โดยเวกเตอร์ที่ขนานกันนี้อาจจะมีค่าบวกหรือลบแตกต่างกัน ซึ่งเกิดมาจากการกำหนดแกนอ้างอิงไม่ตรงกัน เช่น

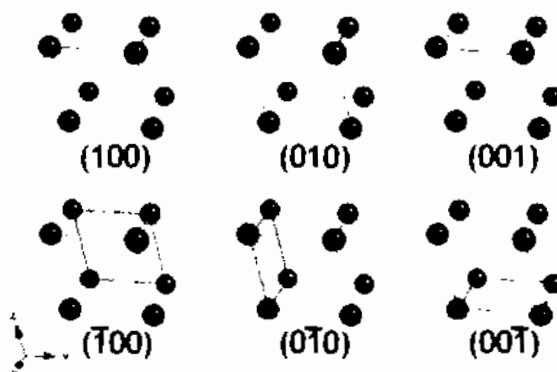
$$\langle 100 \rangle = [100] \ [010] \ [001] \ [\bar{1}00] \ [0\bar{1}0] \ [00\bar{1}]$$

ดังนั้น กลุ่มของดัชนีทิศทางในลักษณะนี้ ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นชุดดัชนีของทิศทางและมีสัญลักษณ์ คือ $\langle uvw \rangle$

ในกรณีของระนาบ (plane) ภายในผลึกนั้น จะใช้ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) เป็นตัวบอกลักษณะของระนาบ ดัชนีมิลเลอร์นี้เป็นชุดตัวเลขที่ได้มาจากค่าส่วนกลับของจุดตัดของระนาบกับแกนของหน่วยเซลล์

การหาค่าดัชนีมิลเลอร์ของระนาบ มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดแกนอ้างอิง 3 แกนในหน่วยเซลล์ โดยต้องเลือกจุดกำเนิดไม่ให้อยู่บนระนาบที่ต้องการหาค่าดัชนีมิลเลอร์
2. หาจุดตัดของระนาบกับแกนอ้างอิงทั้งสาม แล้วหารระยะห่างจากจุดตัดถึงจุดกำเนิด โดยวัดตามสัดส่วนของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยแต่ละแกน สมมติให้ ค่าที่อ่านได้เป็น $x \ y \ z$ ตามลำดับ
3. หาเศษส่วนกลับของระยะจุดตัดดังกล่าว จะได้ $\frac{1}{x} \ \frac{1}{y} \ \frac{1}{z}$
4. แปลงค่าเศษส่วนที่ได้จากข้อ 3 ให้เป็นเลขจำนวนเต็มค่าน้อยที่สุด โดยคงสัดส่วนระหว่างค่าทั้งสามไว้ดังเดิม จะได้ค่า $h \ k \ l$ ตามลำดับ
5. เขียนค่าชุดตัวเลขนี้ลงไปในวงเล็บ () จะได้ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบ คือ $(h \ k \ l)$



ภาพที่ 2.4 ระนาบต่างๆ ของผลึก [7]

ภาพที่ 2.4 แสดงระนาบของหน่วยเซลล์ ซึ่งถูกจัดอยู่ในกลุ่มระนาบเดียวกัน ระนาบเหล่านี้จะมีสมบัติเหมือนกัน แต่ค่าดัชนีมิลเลอร์มีค่าแตกต่างกัน ไปตามจุดตัดแกนที่แตกต่างกัน ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการระบุระนาบ จึงกำหนดสัญลักษณ์ของกลุ่มระนาบ คือ () เช่น กลุ่มระนาบ {100} หมายถึง ระนาบต่างๆ 6 ระนาบ ดังนี้ [9]

$$\{100\} = (100)(010)(001)(\bar{1}00)(0\bar{1}0)(00\bar{1})$$

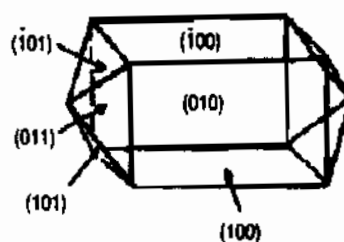
2.2) แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (ADP) คือวัสดุทัศนศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีสมบัติแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกและเพียโซอิเล็กทริก มีสูตรโมเลกุล $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ และค่า pH 3.8 – 4.4 เป็นสารที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน [10] ผลึก ADP เป็นของแข็งที่มีลักษณะแข็งแต่เปราะ มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง ทำให้ไม่เหมาะกับการปลูกผลึกด้วยวิธีของเหลวหลอมละลาย แต่อย่างไรก็ตาม โมเลกุล ADP ประกอบด้วยไอออนบวกและไอออนลบที่มีขนาดไอออนแตกต่างกัน มีการยึดเกาะกันด้วยพันธะไอออนิก ทำให้สามารถละลายน้ำได้ดี จึงเหมาะกับการปลูกผลึกด้วยวิธีสารละลาย ในสถานะของแข็ง สาร ADP ไม่นำไฟฟ้า แต่สารละลาย ADP สามารถนำไฟฟ้าได้ดี

ผลึก ADP มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล ($a=b \neq c$) โดยแลตทิซพารามิเตอร์ $a=b=7.510 \text{ \AA}$ และ $c = 7.564 \text{ \AA}$ โดย $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง และทนทานต่อความเสียหายของเลเซอร์ได้ดี มีค่าความถี่เริ่มต้นต่ำและมีช่วงการส่องผ่านของแสงที่กว้าง ทำให้ผลึก ADP ถูกศึกษาอย่างกว้างขวาง



ภาพที่ 2.5 ผลึก ADP บริสุทธิ์



ภาพที่ 2.6 ลักษณะของผลึก ADP [11]

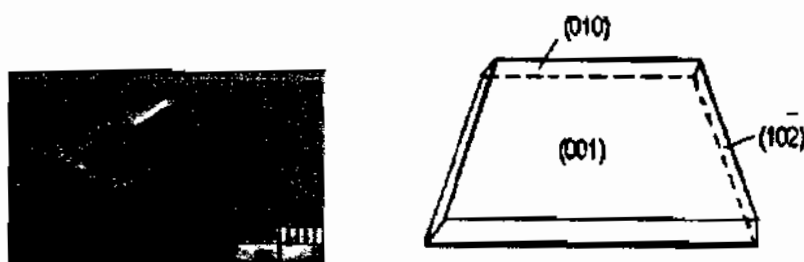
จากการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของสิ่งเจือปนในการเจริญการเติบโตของผลึก ADP พบว่าการเติมสิ่งเจือปนลงในผลึก จะส่งผลโดยตรงต่ออัตราการเจริญเติบโตของผลึก ขึ้นกับชนิดของสารเจือ จากภาพที่ 2.5 สังเกตว่าผลึกไม่โปร่งใสทั้งชิ้น แสดงให้เห็นว่ามีความไม่สมบูรณ์ที่ผิวของผลึก ซึ่งอาจเกิดจากสิ่งเจือปนหรือความบกพร่องของผลึก ภาพที่ 2.6 จะแสดงลักษณะของผลึก ADP บริสุทธิ์ในอุดมคติที่มีความสมบูรณ์

ในการเตรียมชิ้นสารสำหรับใช้เป็นผลึกหล่อหรือซิด (seed) จะต้องควบคุมอุณหภูมิกับความเข้มข้นของสารละลายอย่างเหมาะสม จะทำให้ผลึก ADP มีผิวหน้าเรียบปลายเหลี่ยม มีหน้าตัดขนาดใหญ่สามารถเตรียมเป็นผลึกหล่อ เพื่อใช้ในการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว โดยซิดที่ใช้จะต้องมีผิวเรียบ ไม่มีรอยแตกและไม่มีจุดบกพร่อง

2.3) กรดทาร์ทาริก

กรดทาร์ทาริกเป็นกรดอินทรีย์ (organic acid) มีสูตรโมเลกุล $C_4H_6O_6$ ผลึกกรดทาร์ทาริกเป็นวัสดุทัศนศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้นและมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก เป็นผลึกที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ผลึกกรดทาร์ทาริกมีโครงสร้างแบบออร์โธรมบิก ($a=b \neq c$) โดยแลตทิซพารามิเตอร์ $a = 5.056 \text{ \AA}$, $b = 9.824 \text{ \AA}$, และ $c = 1.72 \text{ \AA}$ [12] ผลึกกรดทาร์ทาริกเป็นกรดที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในผลไม้ เช่น องุ่น มะขาม เป็นต้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ภาพที่ 2.7 แสดงลักษณะของผลึกกรดทาร์ทาริกที่ได้จากการปลูกด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและผลึกกรดทาร์ทาริกในอุดมคติที่สมบูรณ์

โครงงานนี้ศึกษาผลึกแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ซึ่งโมเลกุลของผลึกยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งทำให้โมเลกุลของกรดทาร์ทาริกสามารถแทรกอยู่โครงผลึก ADP ได้ ดังนั้น กรดทาร์ทาริกจึงถูกใช้เป็นสารเจือในโครงงานนี้



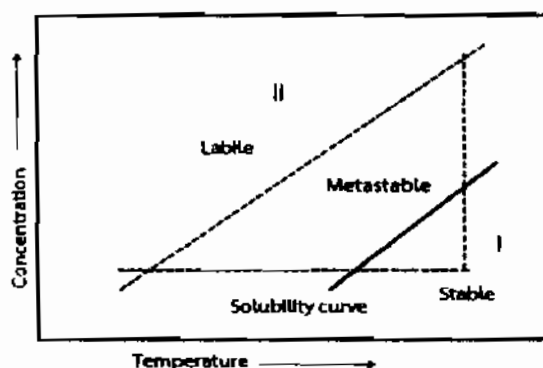
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างและลักษณะการกระจายรังสี [13]

2.4) วิธีปลูกผลึกจากสารละลาย

การปลูกผลึกมีหลายวิธี แต่โครงงานนี้ใช้วิธีการปลูกจากสารละลาย ซึ่งจะทำการปลูก 2 แบบ คือ การปลูกผลึกแบบดั้งเดิมและการปลูกแบบทิศทางเดียว ดังต่อไปนี้

2.4.1. การปลูกผลึกแบบดั้งเดิม

การปลูกผลึกจากสารละลายเป็นการนำสารละลายไปละลายกับตัวละลายที่เหมาะสม จนเกิดสถานะอิ่มตัว แล้วทำให้ตัวทำละลายระเหยไปอย่างช้าๆ เพื่อให้สารละลายอยู่ในสถานะอิ่มตัวยิ่งยวด และทำให้โมเลกุลของตัวถูกละลายมีเวลามากพอที่ก่อตัวขึ้นอย่างเป็นระเบียบ โดยตัวถูกละลายจะแยกตัวออกมาจากสารละลายในรูปของแข็งที่มีการจัดเรียงตัวเฉพาะของสารแต่ละชนิด กระบวนการนี้เรียกว่า การตกผลึก



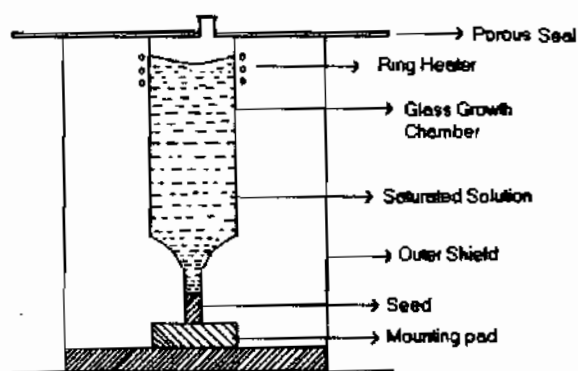
ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเข้มข้นของสารละลาย

จากภาพที่ 2.8 จะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเข้มข้นสารละลาย พบว่า กราฟถูกแบ่งออก สองบริเวณ ด้วยเส้นค่าความสามารถในการละลาย (solubility curve) ที่อุณหภูมิต่างๆ บริเวณที่หนึ่งเป็นบริเวณที่ไม่สามารถเกิดผลึกได้ เนื่องจากบริเวณใต้เส้นค่าความสามารถในการละลาย สารละลายอยู่ในสถานะไม่อิ่มตัว เรียกบริเวณนี้ว่า stable zone

บริเวณที่สอง เป็นบริเวณที่อยู่เหนือเส้นค่าความสามารถในการละลาย ซึ่งเป็นบริเวณที่สารละลายเกิดสภาวะอิมิตัว บริเวณนี้สามารถถูกแบ่งออกเป็น สองบริเวณย่อย คือ metastable zone และ labile zone ในบริเวณ metastable zone บริเวณนี้สารละลายอยู่ในสภาวะอิมิตัว ยิ่งยวดยิ่งเล็กน้อย ผลึกสามารถแยกตัวออกจากตัวทำละลายและเจริญเติบโตได้เมื่อถูกกระตุ้นจากภายนอก วิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กระตุ้นการเกิดผลึก คือ การใช้ซีตเป็นตัวล่อเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดผลึก ในขณะที่บริเวณ labile zone เป็นบริเวณที่ไม่สามารถควบคุมการเจริญเติบโตของผลึกได้ ผลึกจึงเกิดอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นการปลูกผลึกจากสารละลายต้องควบคุมอุณหภูมิกับความเข้มข้นของสารละลายให้อยู่ในบริเวณ metastable zone

2.4.2 การปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว (SR)

Sankaranarayanan และ Ramasamy เป็นนักฟิสิกส์ชาวอินเดีย ได้ทำการศึกษาคิดค้นการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว ซึ่งเป็นวิธีการปลูกผลึกโดยบังคับให้ผลึกมีการเจริญเติบโตในทิศทางเดียว การติดตั้งอุปกรณ์การปลูกผลึกด้วยวิธีนี้ แสดงดังภาพที่ 2.9 อุปกรณ์สำหรับการปลูกผลึกด้วยวิธีนี้ ประกอบไปด้วย หลอดทดลองที่วางอยู่ในอ่างน้ำและมีขดลวดความร้อนเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิ (ring heater) โดยผลึกล่อหรือซีตจะถูกวางไว้ด้านล่างของหลอดทดลอง ดังภาพ



ภาพที่ 2.9 วิธีปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว [14]

การปลูกผลึกแบบทิศทางเดียวนี เป็นวิธีการปลูกผลึกโดยการเลือกกระนาบและทิศทางการเกิดผลึกตามที่ต้องการ โดยใช้ซีตเป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกตามระนาบที่กำหนดไว้ จากนั้นเติมสารละลายลงในหลอดทดลองแล้วควบคุมอุณหภูมิ โดยด้านบนจะมีความเข้มข้นต่ำจึงทำให้เกิดสภาวะไม่อิมิตัวและที่ตำแหน่งต่ำลง ความเข้มข้นจะเพิ่มสูงขึ้น จนทำให้เกิดสภาวะอิมิตัวที่ยาวด บริเวณสารละลายสัมผัสกับผิวซีต ทำให้ผลึกเริ่มเจริญเติบโตตามระนาบหรือทิศทางของซีต

การปลูกผลึกจากสารละลายด้วยเทคนิคการปลูกแบบทิศทางเดียว ได้รับความนิยมแพร่หลาย เพราะสามารถนำไปใช้ปลูกผลึกเชิงทัศนศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น และผลึกของสารอื่นๆ ใช้ต้นทุนในการปลูกผลึกต่ำ นอกจากนี้ งานวิจัย [15] แสดงว่า ผลึกที่ปลูกด้วยวิธีนี้มีคุณภาพที่ดีขึ้น ทั้งสมบัติทางแสงและลักษณะทางกายภาพ

2.5) เครื่องมือการวิเคราะห์สมบัติของผลึก

2.5.1. การศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ถูกใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึก เพื่อดูการจัดเรียงตัวของอะตอม หรือโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ โดยสามารถวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารประกอบนั้นๆ ได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ โดยอาศัยปรากฏการณ์เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่เกิดขึ้นตามกฎของแบรกก์

แบรกก์ได้แสดงให้เห็นว่าปรากฏการณ์เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของอะตอมในผลึกเป็นลักษณะเดียวกันกับการสะท้อนแสงของกระจกเงา เนื่องจากอะตอมในผลึกมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ ทำให้เกิดชุดระนาบของอะตอมหลายชุดในโครงสร้างผลึก รังสีเอกซ์ที่ใช้ในการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ได้จากการให้กระแสไฟฟ้าที่ชั่วแคโทด เพื่อให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา ในขณะที่เดียวกันให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด เพื่อให้อิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดวิ่งเข้าชนเป้าที่ขั้วแอโนด ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา

เมื่อนำรังสีเอกซ์ที่ได้มาฉายลงบนผลึกชั้นสารตัวอย่าง ลำรังสีเอกซ์ส่วนใหญ่เมื่อผ่านผลึกจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่บางส่วนจะสะท้อนและกระจายออกไปในหลายทิศทาง ซึ่งเป็นรูปแบบเฉพาะที่ไม่ต่อเนื่องของผลึกแต่ละชนิด มุมของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนออกมาจะสามารถใช้ศึกษาหาขนาดรูปร่าง และสมมาตรของหน่วยเซลล์ ซึ่งเส้นสเปกตรัมที่ได้เป็นวิธีรอยการแทรกสอดที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในโครงผลึก เนื่องจากรังสีเอกซ์ที่สะท้อนออกจากระนาบชุดหนึ่งๆ จะมีการแทรกสอดแบบเสริมสร้างกัน เมื่อระยะทางแต่ละลำรังสีที่ตกกระทบบนระนาบมีความแตกต่างกันเป็นจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ดังสมการที่ 2.1

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

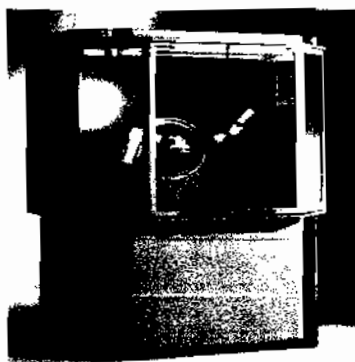
เมื่อ n คือ เลขจำนวนเต็ม 1, 2, 3,...

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบของอะตอมซึ่งเท่ากับมุมตกกระทบ

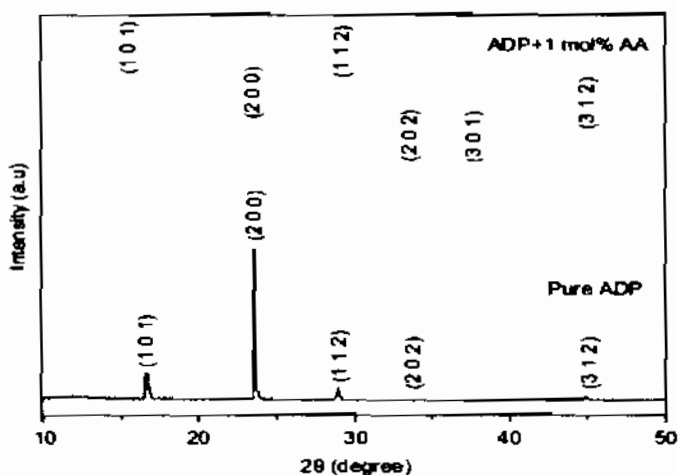
λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

เมื่อใช้รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับระยะห่างของอะตอมภายในผลึก และหมุนผลึกทำมุมต่างๆ กับแสงที่ตกกระทบ แสงที่เลี้ยวเบนออกมาจะได้จะมีรูปแบบเฉพาะของสารแต่ละชนิด เทคนิคนี้ใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบชั้นสารตัวอย่างเป็นมุม θ ทำให้ต้องเคลื่อนอุปกรณ์การตรวจวัดสัญญาณรังสีเอกซ์ให้หมุนไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้สามารถบันทึกรูปแบบการเลี้ยวเบนของผลึก ซึ่งจะสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ ดังสมการที่ 2.1 แสดงตัวอย่างเครื่อง XRD รุ่น Bruker's x-ray diffraction D8-Discover



ภาพที่ 2.10 เครื่อง Bruker's x-ray diffraction D8-Discover [16]

ผลึกเดี่ยวจะถูกบดให้ผงละเอียด แล้วอัดเป็นเม็ด เมื่อทำการวัด ผลึกเดี่ยวขนาดเล็กจำนวนมากที่จัดเรียงตัวอย่างไร้ทิศทางแบบสุ่ม ทำให้เกิดชุดระนาบ (hkl) จำนวนมากภายในชิ้นสารตัวอย่าง ระนาบเหล่านี้จะสะท้อนของรังสีเอกซ์ โดยรังสีสะท้อนจะทำมุมกับแนวทางของรังสีเอกซ์ θ_{hkl} เป็นไปตามกฎของแบรกก์ เครื่อง XRD จะทำการบันทึกความเข้มข้นที่มุมต่างๆ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกแสดงออกมาเป็นกราฟระหว่างความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมากับมุม 2θ จากข้อมูลที่ได้จะสามารถคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างระนาบ (d) ได้ตามสมการของแบรกก์ และสามารถบอกลักษณะของโครงสร้างผลึกได้



ภาพที่ 2.11 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึก ADP และเจือด้วย AA [17]

ภาพที่ 2.11 แสดงเส้นสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลึกเดี่ยวและผลึกที่ถูกเจือด้วย แอมโมเนียม อะซิเตรส (AA) เมื่อทำการวิเคราะห์เส้นสเปกตรัมการเลี้ยวเบน จะสังเกตเห็นยอดระนาบ (101) (200) (112) (202) และ (312) ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของผลึก ADP บริสุทธิ์ เมื่อเปรียบเทียบเส้นสเปกตรัมของผลึก ADP ที่ถูกเจือด้วย AA จะพบยอดของระนาบ (301) ที่เกิดขึ้นโดยเป็นผลจากการเจือแอมโมเนียม อะซิเตรส

2.5.2. การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

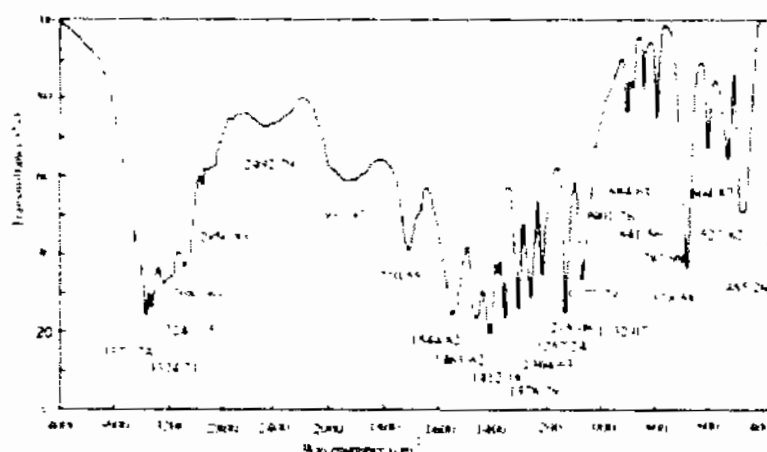
เทคนิค FTIR เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์พันธะของโมเลกุลต่างๆ ซึ่งพันธะเหล่านี้จะแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันภายในโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ต่างๆ เทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ได้ทั้ง สารอินทรีย์ และอนินทรีย์ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยแสงชนิดหนึ่งที่ใช้แสงในย่านความถี่อินฟราเรด โดยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง วิธีการนี้อาศัยการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันของแต่ละพันธะในโมเลกุล

แสงในช่วงเลขคลื่น $4000 - 1500 \text{ cm}^{-1}$ จะใช้วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล ได้แก่ O-H, C=O, N-H และ CH_3 เป็นต้น ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถพบได้ในโมเลกุลทั่วไป ในขณะที่แสงในช่วงเลขคลื่น $1500 - 400 \text{ cm}^{-1}$ อยู่ในช่วง fingerprint region ซึ่งสเปกตรัมในช่วงนี้แสดงลักษณะเฉพาะเจาะจงของสารแต่ละชนิด อย่างไรก็ตาม ยอดสเปกตรัมในช่วง fingerprint region จะมีลักษณะซับซ้อน ดังนั้นการวิเคราะห์สเปกตรัมช่วงนี้จึงยุ่งยาก ในทางปฏิบัติ นิยมนำสเปกตรัมที่ได้ไปเปรียบเทียบกับไฟล์มาตรฐานหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [18] เพื่อทำการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

2.12 แสดงตัวอย่างเครื่อง FTIR



ภาพที่ 2.12 เครื่อง FTIR



ภาพที่ 2.13 เส้นสเปกตรัมของผลึก ADP [19]

ภาพที่ 2.13 แสดงเส้นสเปกตรัมของผลึก ADP ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของผลึก ADP พบว่า มีการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่แตกต่างกันในช่วงเลขคลื่น $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ โดยเส้นสเปกตรัมในช่วง $1500 - 400 \text{ cm}^{-1}$ จะแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของผลึก ADP ได้แก่ ยอดสเปกตรัมในช่วง 1406 cm^{-1} แสดงหมู่ฟังก์ชันของ P-O และยอดสเปกตรัมในช่วง $1092-1097 \text{ cm}^{-1}$ แสดงหมู่ฟังก์ชันของ P-O-H เป็นต้น

2.5.3. การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

ฟาราเดย์ได้ทำการทดลองสร้างตัวเก็บประจุที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการขึ้นมาสองตัว 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 สำหรับทดสอบค่าไดอิเล็กทริก

ในกรณีที่จ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุเท่ากัน 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

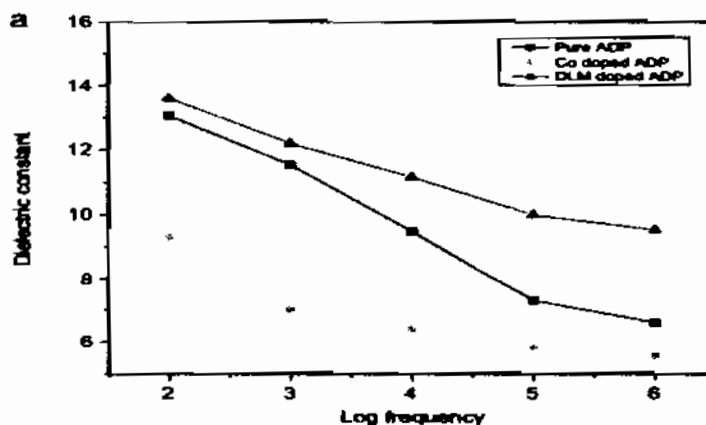
d คือ ความหนาของสารไดอิเล็กทริก

สมการที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเก็บประจุกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ซึ่งสอดคล้องการทดลองของฟาราเดย์ จะเห็นว่าความจุของตัวเก็บประจุใดๆ จะมีค่าเพิ่มขึ้นถ้าตัวเก็บประจุนั้นมีไดอิเล็กทริกคั่นระหว่างแผ่นขนานทั้งสอง อัตราส่วนระหว่างความจุของตัวเก็บประจุใดๆ เมื่อไดอิเล็กทริกคั่น (ϵ) กับไม่มีไดอิเล็กทริกคั่น (ϵ_0) เรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ดังแสดงในสมการที่ 2.4

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

สารไดอิเล็กทริกบางชนิดมีโมเลกุลที่มีขั้วทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ถาวร แต่ทิศทางของไดโพลไม่เป็นระเบียบ ดังนั้น ในสภาวะปกติที่ไม่มีสนามไฟฟ้าจากภายนอก จำไม่มีผลรวมของโพลาริเซชัน

แต่ในสภาวะที่ให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกแก่สารไดอิเล็กทริกจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของไดโพลในทิศทางเดียวกันอย่างเป็นระเบียบ [20]



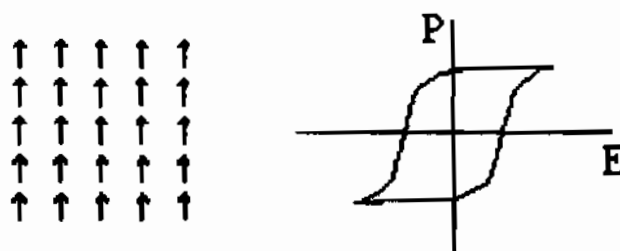
ภาพที่ 2.15 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของผลึก ADP และ ADP เจือด้วย CO และ DLM [21]

ภาพที่ 2.15 ศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ระหว่างแกนนอนจะเป็นความถี่ และแกนตั้งจะเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริก จากงานวิจัยพบว่าผลึก ADP เมื่อเจือกับสารอื่นจะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ขึ้นอยู่กับสารเจือ

2.5.4. การศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

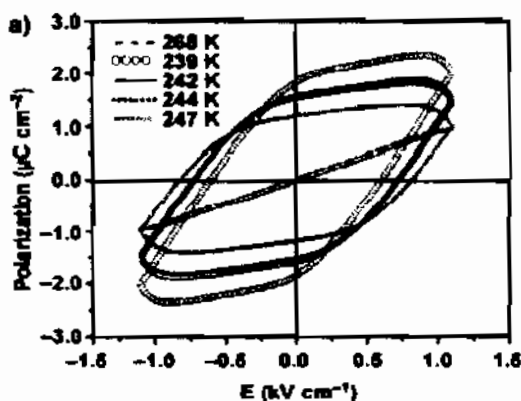
เฟอร์โรอิเล็กทริก คือการแสดงสมบัติโมเมนต์ทางไฟฟ้า โดยในสภาวะปกติ สารที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกจะประกอบขึ้นจากโดเมนของไดโพลโมเมนต์ถาวร ทิศทางของไดโพลจะเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในแต่ละโดเมน อย่างไรก็ตาม โดเมนต่างจะมีทิศทางแบบสุ่ม ทำให้ไม่มีค่าโพลาไรเซชันสุทธิ เมื่อให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกเข้ากระตุ้นการจัดเรียงตัวของโดเมนเหล่านั้น จะทำให้โดเมนเกิดเรียงตัวไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้าอย่างเป็นระเบียบ จึงเกิดโพลาไรเซชันสุทธิขึ้น แม้ว่า จะหยุดจ่ายสนามไฟฟ้าจากภายนอก โดเมนเหล่านั้นจะยังคงเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบภายในเนื้อสาร ทำให้เกิดโพลาไรเซชันคงเหลือ

ภาพที่ 2.16 แสดงให้เห็นว่า เมื่อ $E = -E_c$ สารมีโมเมนต์ขั้วคู่ถาวร อาจกล่าวได้ว่าสารนั้นแสดงสถานะเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก แต่อย่างไรก็ตาม พลังงานความร้อนสามารถทำลายการจัดเรียงตัวของโดเมนได้ ดังนั้น สารเฟอร์โรอิเล็กทริกจะแสดงสมบัติได้ดังภาพที่ 2.16 จะต้องอยู่ในสภาวะที่พลังงานความร้อนไม่มากพอที่จะทำลายการจัดเรียงตัวของโดเมนภายในเนื้อสาร ซึ่งเรียกอุณหภูมิสูงสุดที่สารยังคงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ ว่า อุณหภูมิวิกฤติ (T_c) ซึ่งในสภาวะที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ ผลึกจะอยู่ในสถานะ พาราอิเล็กทริก [22]



ภาพที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง E-P ของเฟอร์โรอิเล็กทริก [27]

ภาพที่ 2.17 แสดงกราฟการศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของสารในกลุ่มทาร์ทาเรท โดยทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 270 K พบว่า เมื่อนำกรดทาร์ทาริกไปผสมกับสารอื่น ทำให้สารผสมที่ได้แสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก [23] โครงการนี้ จึงเลือกเจือกรดทาร์ทาริกลงในผลึก ADP เพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของผลึก ADP



ภาพที่ 2.17 ค่าโพลาริเซชันของสารในกลุ่มทาร์ทาเรท [24]

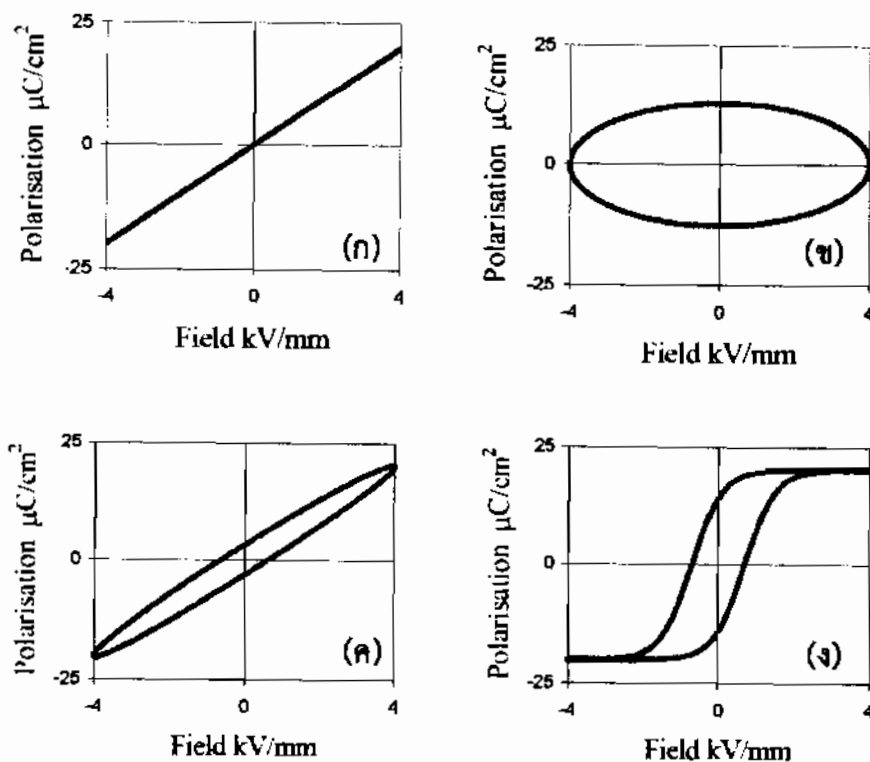
การความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลตัวอย่างกราฟที่ได้จากวงจร Sawyer-Tower circuit โดยใช้ในการศึกษาการเกิดโพลาริเซชัน ผลที่ได้จะแสดงในรูปกราฟระหว่าง ค่าสนามไฟฟ้าจากภายนอกกับโพลาริเซชัน โดยตัวอย่างกราฟลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ในอุดมคติแสดงดังภาพที่ 2.18 ดังนี้

(ก) กราฟลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุเชิงเส้น ในอุดมคติ ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุเชิงเส้นที่เป็นเส้นตรงมีสัดส่วนความชันกับค่าความจุไฟฟ้า

(ข) กราฟลักษณะสมบัติของตัวต้านทานเชิงเส้น ในอุดมคติ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีการสะสมพลังงานในรูปสนามไฟฟ้าหรือแม่เหล็ก

(ค) กราฟลักษณะสมบัติของการสูญเสียตัวเก็บประจุเชิงเส้น ซึ่งเป็นผลจากการสูญเสียประจุในพื้นที่ภายในรูปที่มี สัดส่วนสัมพัทธ์ของอุปกรณ์ทำให้เกิดการสูญเสียและมีสัดส่วนความชันกับค่าความจุไฟฟ้า

(ง) การตอบสนองแบบไม่เป็นเชิงเส้นของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งมีโมเลกุลเรียงตัวกันได้เอง โดยไม่ต้องใช้สนามไฟฟ้าจากภายนอก



ภาพที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง P-E ของเครื่องวัด [25]

- (ก) กราฟลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุเชิงเส้นในอุดมคติ
- (ข) กราฟลักษณะสมบัติของตัวต้านทานเชิงเส้นในอุดมคติแบบ
- (ค) กราฟลักษณะสมบัติของการสูญเสียตัวเก็บประจุแบบเชิงเส้น
- (ง) กราฟลักษณะสมบัติของเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบไม่เป็นเชิงเส้น

บทที่ 3

ขั้นตอนการทดลอง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงกระบวนการปลูกผลึกแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตและผลึก ADP ที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก โดยปลูก 2 วิธี คือ 1) วิธีการปลูกแบบดั้งเดิม 2) วิธีการปลูกแบบทิศทางเดียว โดยศึกษาเปลี่ยนแปลงสมบัติของผลึก โครงการนี้วิเคราะห์ชั้นผลึกตัวอย่าง 5 สมบัติ คือ 1) ศึกษาอัตราการเจริญเติบโต 2) ศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR 3) ศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 4) ศึกษาค่าไดอิเล็กทริก และ 5) ศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งรายละเอียดของกระบวนการเตรียมชิ้นสารตัวอย่างและเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษามีดังต่อไปนี้

3.1) สารเคมีที่ใช้ในโครงการ

1. สารแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟส ค่าความสามารถในการละลาย 40.4 g/100 ml ความบริสุทธิ์ 98.0% ระดับคุณภาพของสารละลาย CARLO ERBA REAGENTI
2. กรดทาร์ทาริก ค่าความสามารถในการละลาย 133 g/100 ml (20 °C) ความบริสุทธิ์ 99.0% ระดับคุณภาพของสารละลาย CARLO ERBA REAGENTI
3. น้ำ DI

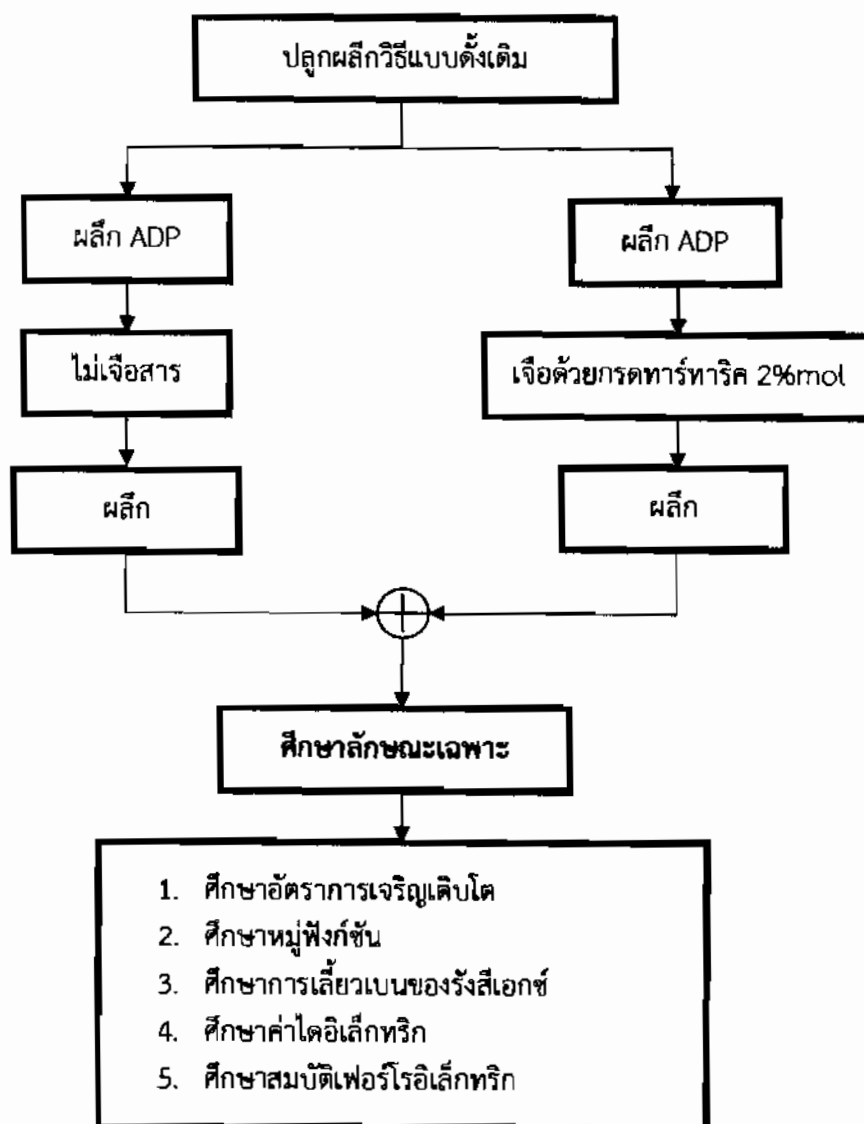
3.2) เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งดิจิทัลความละเอียด 2 ตำแหน่ง
2. บีกเกอร์
3. กรวยกรอง
4. กระดาษกรอง
5. พลาสติกใส
6. ยางรัด
7. ซ้อนตักสาร
8. ที่คืบ
9. กระบอกตวง
10. แมกเนติกสเตอร์เรอร์
11. อ่างสีเหลือง
12. หลอดทดลองวิธี SR
13. เทอร์โมมิเตอร์ แบบปรอท
14. สายไฟ
15. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
16. โกร่งบดสาร
17. เครื่อง XRD รุ่น Rigaku Geigerflex X-ray diffractometer
18. เครื่อง FTIR รุ่น PERKIN ELMER Spectrum GX FT-IR System

19. เครื่อง uv-vis spectrometer รุ่น T80+ uv/vis spectrometer PG
 20. เครื่อง Agilent E4980A

3.3) ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3.1. ขั้นตอนที่ 1 วิธีปลูกผลึกแบบดั้งเดิม



ภาพที่ 3.1 แผนผังการศึกษการปลูกผลึกแบบดั้งเดิม

ตอนที่ 1 การปลูกผลึก ADP บริสุทธิ์

1. ทำการเตรียมสาร ADP ปริมาตร 125 g แล้วนำไปทำละลายกับน้ำ DI โดยเติมครั้งแรก 100 ml แล้วเติมสารลงไปทีละน้อยอย่างสม่ำเสมอ
2. เมื่อสาร ADP ไม่ละลายน้ำ จึงเติมน้ำ DI โดยใช้กระบอกตวงขนาด 10 ml เติมครั้งละ 10 ml เติมกระทั่งได้สารละลายที่ไม่มีตะกอน ปริมาตร 250 ml
3. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองใส่ในบีกเกอร์ขนาด 500 ml
4. เจาะแผ่นพลาสติกใส่ให้ทั่วแผ่นแบบสุ่ม แล้วนำมาครอบบีกเกอร์ที่ใส่สารละลาย
5. นำไปวางที่ชั้นวางผลึก รอให้ตัวทำละลายระเหยไปอย่างช้าจนเกิดการตกผลึก
6. ทำการตกผลึกซ้ำ (recrystallization) 2 ครั้ง ทำตามขั้นตอน 1-5 ตามลำดับ
7. เก็บผลึกที่ได้แล้วนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตอนที่ 2 ปลูกผลึกกรดทาร์ทาริก

1. ทำการเตรียมสารกรดทาร์ทาริก ปริมาตร 183 g ไปทำละลายกับน้ำ DI โดยเติมครั้งแรก 100 ml แล้วเติมสารลงไปทีละน้อยอย่างสม่ำเสมอ
2. เมื่อสารละลายไม่ละลายน้ำ จึงเติมน้ำ DI โดยใช้กระบอกตวงขนาด 10 ml เติมครั้งละ 10 ml เติมกระทั่งได้สารละลายที่ไม่มีตะกอน ปริมาตร 270 ml
3. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองใส่ในบีกเกอร์ขนาด 500 ml
4. เจาะแผ่นพลาสติกใส่ให้ทั่วแผ่นแบบสุ่ม แล้วนำมาครอบบีกเกอร์ที่ใส่สารละลาย
5. นำไปวางที่ชั้นวางผลึก รอให้ตัวทำละลายระเหยไปอย่างช้าเกิดการตกผลึก
6. ทำการตกผลึกซ้ำ (recrystallization) 2 ครั้ง ทำตามขั้นตอน 1-5 ตามลำดับ
7. เก็บผลึกที่ได้แล้วนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง

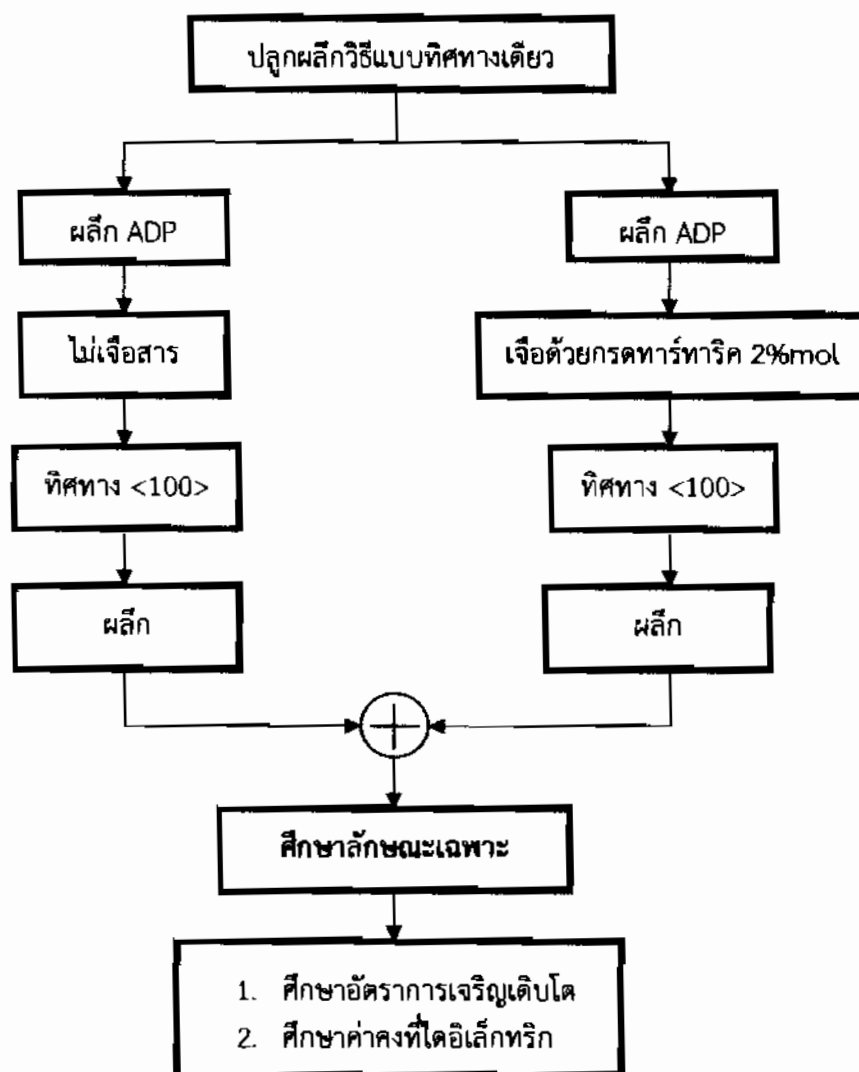
ตอนที่ 3 การปลูกผลึก ADP ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol

1. เตรียมผลึก ADP และผลึกกรดทาร์ทาริก ที่ได้จากตอนที่ 1 และ 2 มาบดให้เป็นผงละเอียด
2. นำผงผลึก ADP ปริมาตร 79.71 g โดยการชั่งน้ำหนัก แล้วนำมาคิดคำนวณที่จะทำการเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol ปริมาตร 5.2 g ดังในภาคผนวก
3. เตรียมสาร ADP ทำละลายกับน้ำ DI โดยเติมครั้งแรก 100 ml แล้วเติมสาร ADP ลงไปทีละน้อยอย่างสม่ำเสมอ จนกระทั่งสารละลายไม่มีตะกอน
4. เติมสารกรดทาร์ทาริกลงในสารละลาย ADP ทีละน้อย
5. เมื่อสารไม่ละลายน้ำ จึงเติมน้ำ DI โดยใช้กระบอกตวงเติมครั้งละ 10 ml ไปจนกระทั่งได้สารละลายเนื้อเดียวกัน ได้ปริมาตร 500 ml
6. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองใส่บีกเกอร์ขนาด 800 ml
7. เจาะรูพลาสติกให้ทั่วแผ่นพลาสติกแบบสุ่ม แล้วนำมาครอบบีกเกอร์ที่ใส่สารละลาย
8. นำไปวางที่ชั้นวางผลึก รอให้ตัวทำละลายระเหยไปอย่างช้าเกิดการตกผลึก
9. เก็บผลึกที่ได้แล้วนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง

การนำผลไปวิเคราะห์ผล

1. ศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของผลึก เตรียมโดยนำผลึกที่ได้มาทำการวัดขนาดแล้วนำด้านที่ยาวที่สุดหารด้วยระยะเวลาในการปลูก เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผล
2. ศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การเตรียมชิ้นตัวอย่างโดยการนำผลึกทั้ง 2 ชิ้นตัวอย่างมาทำการบดเป็นผงให้ละเอียดในปริมาณ 5 กรัม แล้วทำการอัดเป็นแผ่นบาง โดยมีขนาดไม่เกิน $2.5 \times 1.5 \times 1 \text{ cm}^3$ แล้วทำการวัดโดยใช้เครื่อง XRD รุ่น Rigaku Geigerflex X-ray diffractometer
3. ศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR การเตรียมชิ้นสารตัวอย่างโดยการนำผลึกที่ได้มาทำการบดให้ละเอียดแล้วทำไปผสมกับผง KBr ในอัตราส่วน ชิ้นงาน 1 ส่วนต่อผง KBr 10 ส่วนแล้วทำการวัดผลโดยใช้เครื่อง FTIR รุ่น PERKIN ELMER Spectrum GX FT-IR System
4. ศึกษาการดูดกลืนแสง การเตรียมชิ้นสารตัวอย่างโดยนำผลึกบดให้ละเอียดแล้วทำการละลายด้วยน้ำ DI ทำการวัดโดยใช้เครื่อง uv-vis spectrometer รุ่น T80+ uv/vis spectrometer PG Instrument Ltd หาค่าการดูดกลืนแสงในช่วงเลขคลื่นที่ 200-800 nm
5. ค่าไดอิเล็กทริก การเตรียมชิ้นสารตัวอย่างโดยการนำผลึกไปทำการขัดให้มีขนาดอยู่ที่ $7.1 \times 7.5 \times 2 \text{ mm}^3$ และ $7.2 \times 9.6 \times 2 \text{ mm}^3$ ตามลำดับ ซึ่งจะหาค่าด้วยกาวเงินสองด้าน แล้วทำการวัดในเครื่อง Agilent E4980A
6. เฟอโรโรอิเล็กทริก เตรียมโดยโดยการนำผลึกไปทำการขัดให้มีขนาดอยู่ที่ $5 \times 4.5 \times 2 \text{ mm}^3$ และ $5 \times 4 \times 2 \text{ mm}^3$ ตามลำดับแล้วหาค่าด้วย ซิลเวอร์เพนท์ทั้งสองด้านแล้วทำการวัด

3.3.2 ขั้นตอนที่ 2 วิธีปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว



ภาพที่ 3.2 แผนผังการศึกษาการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว

ตอนที่ 1 การปลูกผลึก ADP บริสุทธิ์

1. ทำการเตรียมสาร ADP ปริมาตร 125 g แล้วนำไปทำละลายกับน้ำ DI โดยเติมครั้งแรก 100 ml เติมน้ำลงไปทีละน้อยอย่างสม่ำเสมอ
2. เมื่อสารละลายไม่ละลายน้ำ จึงเติมน้ำ DI โดยใช้กระบอกตวงขนาด 10 ml เติมครั้งละ 10 ml เติมนจนกระทั่งได้สารละลายที่ไม่มีตะกอน ปริมาตร 250 ml
3. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองใส่ในบีกเกอร์ขนาด 500 ml
4. เจาะแผ่นพลาสติกใสให้ทั่วแผ่นแบบสุ่ม แล้วนำมาครอบบีกเกอร์ที่ใส่สารละลาย
5. นำไปวางที่ชั้นวางผลึก รอให้ตัวทำละลายระเหยไปอย่างช้าจนเกิดการตกผลึก

6. ทำการตกผลึกซ้ำ (recrystallization) 2 ครั้ง ทำตามขั้นตอน 1-5 ตามลำดับ
7. เก็บผลึกที่ได้แล้วนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตอนที่ 2 ปลุกผลึกกรดทาร์ทาริก

1. ทำการเตรียมสารกรดทาร์ทาริก มาซึ่งปริมาณ 183 g ไปทำละลายกับน้ำ DI โดยเติมครั้งแรก 100 ml เติมสารลงไปทีละน้อยอย่างสม่ำเสมอ
2. เมื่อสารละลายไม่ละลายน้ำ จึงเติมน้ำ DI โดยใช้กระบอกตวงเติมครั้งละ 10 ml ไปจนกว่าสารละลายจะละลายหมด จนกระทั่งได้สารละลายที่ไม่มีตะกอน ปริมาตร 270 ml
3. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองใส่ในบีกเกอร์ขนาด 500 ml
4. เจาะแผ่นพลาสติกใสให้ทั่วแผ่นแบบสุ่ม แล้วมาครอบบีกเกอร์ที่ใส่สารละลาย
5. นำไปวางที่ชั้นวางผลึก รอให้ตัวทำละลายระเหยไปอย่างช้าเกิดการตกผลึก
6. ทำการตกผลึกซ้ำ (recrystallization) 2 ครั้ง ทำตามขั้นตอน 1-5 ตามลำดับ
7. เก็บผลึกที่ได้แล้วนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตอนที่ 3 การปลูกผลึก ADP ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol

1. เตรียมผลึก ADP และผลึกกรดทาร์ทาริก ที่ได้จากตอนที่ 1 และ 2 มาบดให้เป็นผงละเอียด
2. นำผงผลึก ADP ปริมาตร 44.31 g แล้วนำมาคิดคำนวณที่จะทำการเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol ปริมาตร 1.16 ดังในภาคผนวก
3. เตรียมสาร ADP ทำละลายกับน้ำ DI โดยเติมครั้งแรก 100 ml แล้วเติมสาร ADP ลงไปทีละน้อยอย่างสม่ำเสมอ จนกระทั่งสารละลายไม่มีตะกอน
4. เติมสารกรดทาร์ทาริกลงในสารละลาย ADP ทีละน้อยอย่างสม่ำเสมอ
5. เมื่อสารไม่ละลายน้ำ จึงเติมน้ำ DI โดยใช้กระบอกตวงเติมครั้งละ 10 ml ไปจนกระทั่งได้สารละลายเนื้อเดียวกัน ปริมาตร 120 ml
6. ติดตั้งอุปกรณ์การปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว ดังภาพที่ 2.12
7. ทำการเลือกกระนาบและทิศทางการปลูกผลึก โดยใช้ขีดเป็นตัวเหนี่ยวนำการเกิดผลึก
8. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองใส่ในหลอดทดลอง
9. ปิดหลอดทดลอง โดยใช้แผ่นพลาสติกใสแข็ง
10. รอให้ตัวทำละลายระเหยไปอย่างช้าเกิดการตกผลึก
11. เก็บผลึกที่ได้แล้วนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง

การนำผลึกไปวิเคราะห์ผล

1. ศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของผลึก เตรียมโดยนำผลึกที่ได้มาทำการวัดขนาดแล้วนำด้านที่ยาวที่สุดหารด้วยระยะเวลาในการปลูก เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผล
2. ค่าไดโอมิเตอร์ การเตรียมชิ้นสารตัวอย่างโดยการนำผลึกไปทำการขัดให้มีขนาดอยู่ที่ $7.1 \times 7.5 \times 2 \text{ mm}^3$ และ $7.2 \times 9.6 \times 2 \text{ mm}^3$ ตามลำดับ ซึ่งจะหาด้วยกาวเงินสองด้าน แล้วทำการวัดในเครื่อง Agilent E4980A

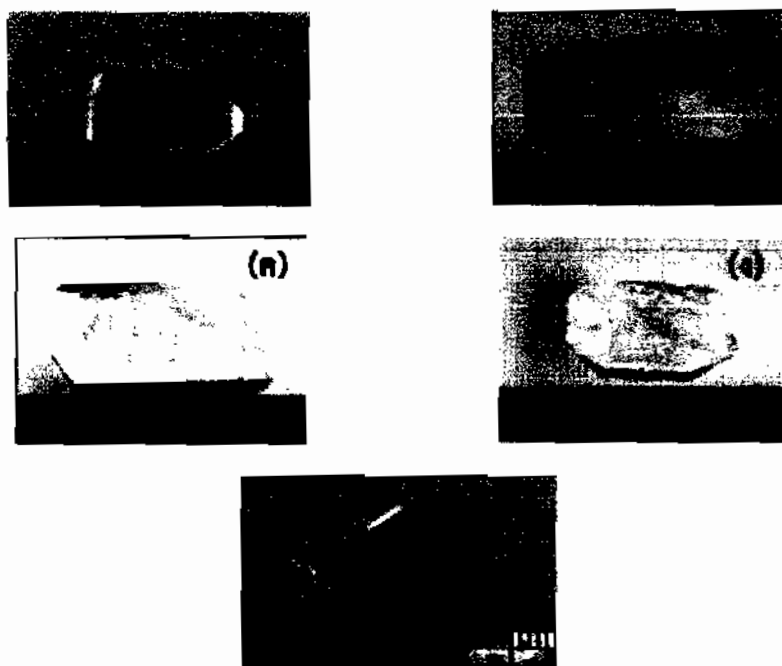
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองเกี่ยวกับการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของผลึก ADP บริสุทธิ์ และผลึก ADP ที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก ซึ่งจะนำผลึกที่ได้มาเปรียบเทียบคุณลักษณะและวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของผลึก ได้แก่ การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ศึกษาค่าไดอิเล็กทริก และศึกษาสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก โดยรายละเอียดของผลการทดลองและอภิปรายผลมีดังต่อไปนี้

4.1) ลักษณะทางกายภาพของผลึกที่ปลูกได้

4.1.1 ผลึกถูกปลูกแบบดั้งเดิม



ภาพที่ 4.1 ลักษณะกายภาพของผลึกปลูกแบบวิธีดั้งเดิม

(ก) ผลึก ADP บริสุทธิ์

(ข) ผลึก ADP เจือกรดทาร์ทาริก 1%mol

(ค) ผลึก ADP เจือกรดทาร์ทาริก 2%mol

(ง) ผลึก ADP เจือกรดทาร์ทาริก 5%mol

(ฉ) ผลึกกรดทาร์ทาริก

ภาพที่ 4.1(ก) คือ ผลึก ADP บริสุทธิ์ จะเห็นว่าผลึกมีลักษณะผิวน้ำเรียบ โปร่งใสและมีความสมบูรณ์ของผลึก ผลึกที่ปลูกได้มีขนาด $3.2 \times 5.3 \times 1.5 \text{ cm}^3$ โดยใช้ระยะเวลาในการปลูก 30 วัน

ภาพที่ 4.1(ข) คือ ผลึก ADP ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 1%mol จะเห็นว่าผลึกมีลักษณะผิวน้ำของผลึกเรียบ เหมือนกรณีผลึก ADP บริสุทธิ์ (ภาพที่ 4.1(ก)) แต่มีความโปร่งใสไม่สม่ำเสมอ

อาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก ผลึกที่ปลูกได้มีขนาด $3.2 \times 4.3 \times 2.0 \text{ cm}^3$ ซึ่งผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยใช้ระยะเวลาในการปลูก 29 วัน

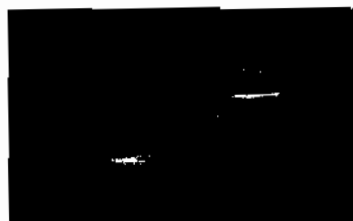
ภาพที่ 4.1(ค) คือ ผลึก ADP ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol จะเห็นว่าบางบริเวณผลึกมีลักษณะโปร่งใส ในขณะที่บางบริเวณมีลักษณะโปร่งแสง อาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก ผลึกที่ปลูกได้มีขนาด $3.2 \times 5.3 \times 1.5 \text{ cm}^3$ โดยใช้เวลา 28 วัน

ภาพที่ 4.1(ง) แสดงภาพผลึก ADP ที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 5%mol จะเห็นว่าลักษณะผิวของผลึกไม่เรียบ แต่ผลึกมีลักษณะโปร่งใส ผลึกที่ปลูกได้ขนาด $3.2 \times 5.5 \times 1.5 \text{ cm}^3$ ใช้เวลา 32 วัน

ภาพที่ 4.1(ฉ) แสดงผลึกของกรดทาร์ทาริก มีลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู โดยมีผิวหน้าเรียบ โปร่งใส และมีขนาด $1.3 \times 2.3 \times 1.5 \text{ cm}^3$ ใช้ระยะเวลาในการปลูก 28 วัน

จากลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ ผลึกที่ปลูกได้มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน ทั้งขนาด รูปทรง และ ความโปร่งใส ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ อาจเนื่องมาจาก เงื่อนไขในการปลูกผลึกที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้กระบวนการเกิดผลึกแตกต่างกัน

4.1.2 ผลึกถูกปลูกแบบทิศทางเดียว



ภาพที่ 4.2 ลักษณะกายภาพของผลึกปลูกแบบทิศทางเดียว

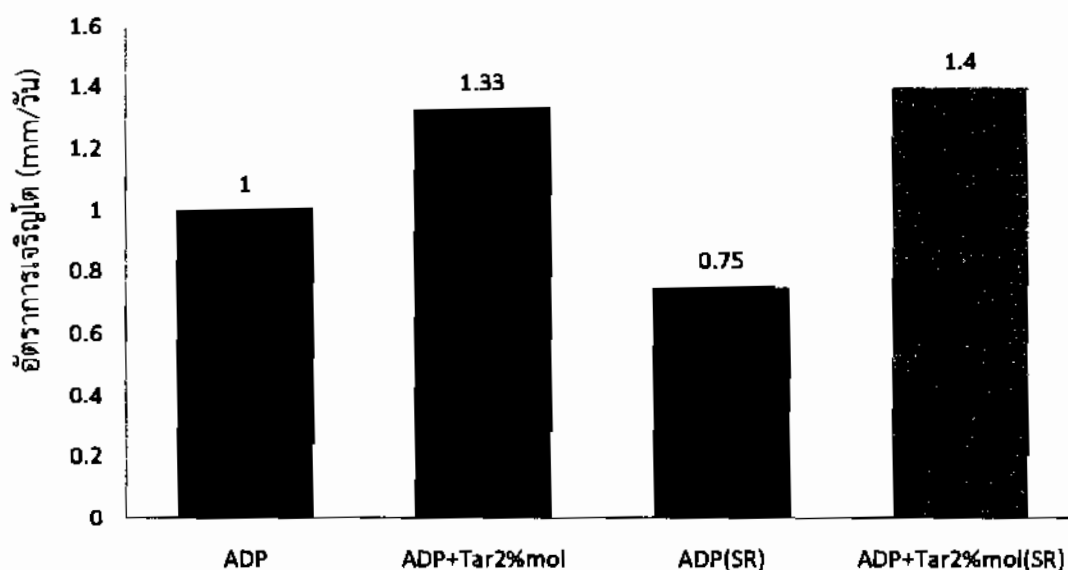
- (ก) ผลึก ADP บริสุทธิ์ ในหลอดทดลอง (ข) ผลึก ADP เจือกรดทาร์ทาริก 2%mol ในหลอดทดลอง
(ค) ผลึก ADP ที่ตัดและขัด (ง) ผลึก ADP เจือกรดทาร์ทาริก 2%mol ที่ตัดและขัด

จากภาพที่ 4.2 แสดงผลึกที่ได้จากการปลูกแบบทิศทางเดียว ภาพที่ 4.2(ก) แสดงภาพผลึก ADP บริสุทธิ์ จะเห็นว่าความโปร่งใสไม่สม่ำเสมอ อาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก ผลึกเจริญเติบโตตามทิศทางตามที่กำหนดทิศทาง $<100>$ ผลึกที่ปลูกได้สูง 4.4 cm ใช้ระยะเวลาในการปลูก 60 วัน ภาพที่ 4.2(ข) คือ ผลึก ADP เจือกรดทาร์ทาริก 2%mol จะเห็นว่ามีความโปร่งใสไม่สม่ำเสมอ แต่บางบริเวณมีความโปร่งแสง อาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก และมีทิศทางการ

เจริญเติบโตของผลึก เหมือนกรณี ผลึก ADP บริสุทธิ์ (ภาพที่ 4.2(ก)) ผลึกที่ปลูกได้สูง 7.2 cm ใช้ระยะเวลาในการปลูก 58 วัน ภาพที่ 4.2(ค) แสดงลักษณะของผลึก ADP บริสุทธิ์ ที่ได้จาก (ภาพที่ 4.2(ก)) ในหลอดทดลองเดียวกัน ซึ่งทำการตัดแล้วนำมาขัดด้วยกระดาษทรายละเอียด จากภาพที่ 1 จะเห็นว่าผลึกมีลักษณะผิวหน้าเรียบ มีความโปร่งใสและมีความสมบูรณ์ของผลึกและมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 cm หนา 0.2 cm ในส่วนภาพที่ 2 ลักษณะของผิวของผลึกมีความโปร่งใสและมีร่องรอยเกิดในชั้นสารตัวอย่าง อาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึกและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 cm หนา 0.2 cm และ ภาพที่ 4.2(ง) แสดงผลึก ADP เจือกรดทาร์ทาริก 2%mol ที่ได้จาก (ภาพที่ 4.2(ข)) ในหลอดทดลองเดียวกัน ซึ่งทำการตัดแล้วนำมาขัดด้วยกระดาษทรายละเอียด จากภาพที่ 1 และ 2 เห็นว่าลักษณะของผลึกมีความโปร่งใสและมีร่องรอยเกิดขึ้นในชั้นสารตัวอย่าง อาจเป็นเพราะความไม่สมบูรณ์ของผลึก ขนาดผลึกหนา 0.2 cm ทั้งสองชิ้นสารตัวอย่างและเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.54 cm และ 1.55 cm ตามลำดับ

4.2) อัตราการเจริญเติบโต

จากผลการปลูกผลึกจากสารละลายที่ได้ เมื่อพิจารณาอัตราการเจริญเติบโตของผลึกที่ได้จากการปลูกแบบวิธีดั้งเดิมและวิธีทิศทางเดียว เมื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตได้กราฟดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 อัตราการเจริญเติบโตของผลึกชนิดต่างๆ

การปลูกผลึกแบบวิธีดั้งเดิมของผลึก ADP บริสุทธิ์ มีอัตราเจริญเติบโตอยู่ที่ 1 mm/วัน และขนาดของผลึก ADP ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol มีอัตราเจริญเติบโตอยู่ที่ 1.33 mm/วัน

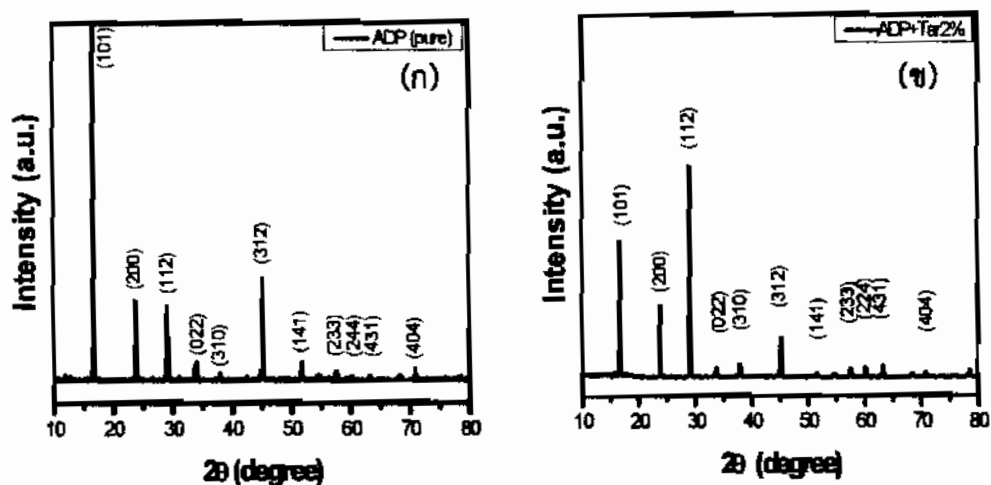
การปลูกผลึกแบบทิศทางเดียวของผลึก ADP บริสุทธิ์ มีอัตราเจริญเติบโต 0.75 mm/วัน และ ADP ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol มีอัตราเจริญเติบโตอยู่ที่ 1.4 mm/วัน ตามลำดับ

จากผลที่ได้ พบว่าอัตราการเจริญเติบโตของผลึกที่ถูกปลูกด้วยวิธีดั้งเดิมและวิธีทิศทางเดียว มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยกรณีของผลึก ADP บริสุทธิ์ วิธีแบบดั้งเดิมมีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าวิธีแบบทิศทางเดียว ในขณะที่กรณีผลึกที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol พบว่าวิธีแบบทิศทางเดียวมีอัตราการเจริญเติบโตที่สูงกว่าวิธีแบบดั้งเดิม ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ อาจเนื่องมาจากความไม่แน่นอนในการควบคุมปัจจัยในการปลูกผลึก จึงทำให้เกิดความแปรปรวนในการเจริญเติบโตของผลึก

เมื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของผลึก ADP บริสุทธิ์ และที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก พบว่า ผลึก ADP บริสุทธิ์ มีอัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่าผลึกที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก ทั้งกรณีที่ถูกปลูกด้วยวิธีแบบดั้งเดิม และวิธีแบบทิศทางเดียว แสดงให้เห็นว่า โมเลกุลของกรดทาร์ทาริกมีอิทธิพลต่ออัตราการเจริญเติบโตของผลึก ADP อาจเป็นเพราะโมเลกุลของกรดทาร์ทาริกสามารถยึดเกาะกับผลึก ADP ได้ดีและสามารถเหนี่ยวนำโมเลกุลของ ADP กับโครงผลึกได้ง่ายขึ้น [26-28] แต่อย่างไรก็ตาม ข้อมูลยังไม่เพียงพอต่อการศึกษากลไกการยึดเกาะของโมเลกุล ADP และโมเลกุลของกรดทาร์ทาริก จึงต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม เพื่ออธิบายกลไกที่เกิดขึ้นต่อไป

4.3) การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การศึกษาลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยใช้เครื่อง x-ray powder diffraction ซึ่งสแกนมุมระหว่าง 10° ถึง 80° เพื่อศึกษาลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลึก ADP บริสุทธิ์ และผลึก ADP เจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol สเปกตรัมการเลี้ยวเบนที่ได้ถูกแสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

(ก) สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของผลึก ADP บริสุทธิ์

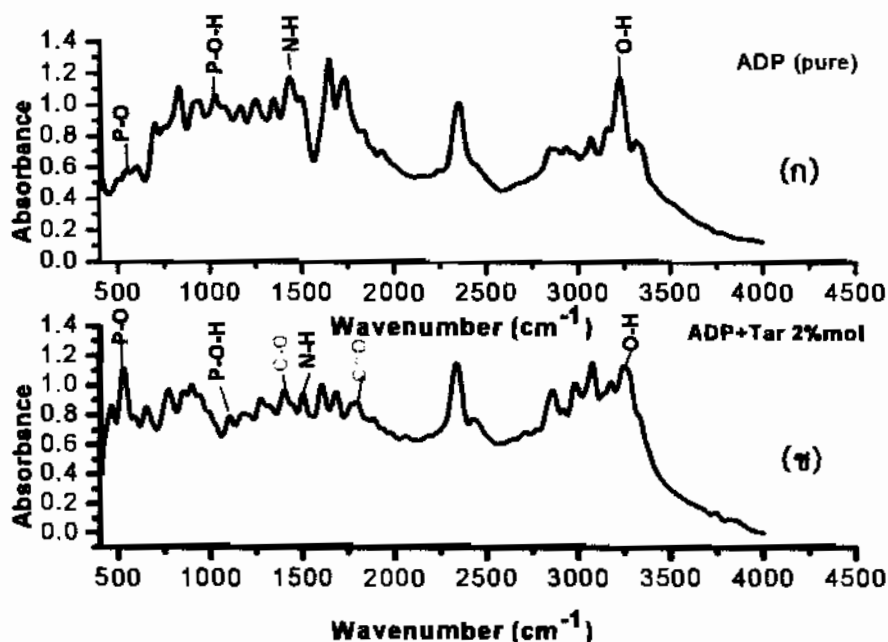
(ข) สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของผลึก ADP ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol

ภาพที่ 4.4(ก) แสดงเส้นสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของผลึก ADP บริสุทธิ์ จะเห็นว่าระนาบที่สำคัญของผลึก ADP ที่เกิดขึ้นในมุมการเลี้ยวเบนต่างๆ คือ ระนาบ (1 0 1) เกิดขึ้นที่มุม 16° ระนาบ (200) เกิดขึ้นที่มุม 14° ระนาบ (112) เกิดขึ้นที่มุม 29° ระนาบ (022) เกิดขึ้นที่มุม 34° และระนาบ (312) เกิดขึ้นที่มุม 45° เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Rajesh และคณะ [19] พบว่าระนาบที่เกิดขึ้นตรงกับเส้นสเปกตรัมใน ภาพที่ 4.4(ก) แสดงว่าโครงสร้างของผลึก APD ที่ปลูกได้เป็นแบบเตตระโกนอล

ภาพที่ 4.4(ข) คือ เส้นสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของผลึก ADP ที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol จากการศึกษาเส้นสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของผลึก พบว่ามีเส้นสเปกตรัมมียอดขึ้นที่มุมต่างๆ ตรงกับยอดของสเปกตรัมที่ Rajesh และคณะ วัดได้ แสดงว่าโครงสร้างของผลึกที่ถูกเจือเป็นแบบเตตระโกนอล ดังนั้น การเจือกรดทาร์ทาริกลงไปผลึก ADP จึงไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึก ADP อาจเป็นเพราะ ความเข้มข้นของกรดทาร์ทาริกต่ำ [28] เมื่อโมเลกุลของกรดทาร์ทาริกเข้าไปแทรกอยู่ในโครงผลึก ADP จึงไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของผลึก ADP ทำให้เกิดระนาบหลักของผลึก ADP ครบถ้วน

4.4) การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคของผลึก ADP บริสุทธิ์ และผลึก ADP ที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol โดยใช้เทคนิค FTIR ในช่วงเลขคลื่นระหว่าง $400-4000\text{ cm}^{-1}$ นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของผลึก
(ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของผลึก ADP บริสุทธิ์
(ข) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดผลึก ADP ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol

จากภาพที่ 4.5(ก) แสดงเส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของผลึก ADP บริสุทธิ์ โดยมียอดสเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของพันธะของหมู่ฟังก์ชันภายในตัวของผลึก ADP ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Deshpande และคณะ [19] พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันตรงกับภาพที่ 4.5(ก) ซึ่งแสดงว่าโมเลกุลที่อยู่ในผลึกที่ปลูกได้ คือ โมเลกุลของแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ดังนั้น การปลูกผลึกด้วยวิธีแบบดั้งเดิม จะทำให้ไอออนในสารละลายกลับมารวมตัวกันเป็นโมเลกุลแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

จากภาพที่ 4.5(ข) คือ เส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของผลึก ADP ที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol พบว่ามียอดการสั่นของพันธะของหมู่ฟังก์ชันภายในตัวของผลึกที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริกขึ้นในช่วงระหว่างเลขคลื่นต่างๆ รายละเอียดดังตารางที่ 4.1 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Deshpande และคณะ [19] ดังนั้น เมื่อนำกราฟทั้งสองมาเปรียบเทียบ พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันของกรดทาร์ทาริกที่เจือลงในผลึก ADP จึงสามารถยืนยันว่ามีโมเลกุลของกรดทาร์ทาริกแทรกตัวอยู่ในผลึก ADP [21]

ตารางที่ 4.1 หมู่ฟังก์ชันและยอดของสเปกตรัม

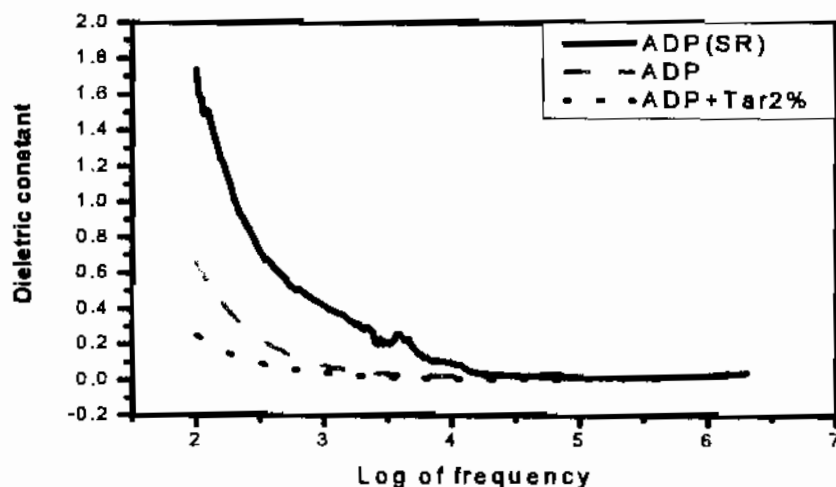
หมู่ฟังก์ชัน	ADP บริสุทธิ์ (cm^{-1})	ADP เจือกรดทาร์ทาริก 2%mol (cm^{-1})
P-O	522	527
P-O-H	1092	1102
O-H	3260	3273
N-H	1409	1415
C-O	-	1450
C=O	-	1737

4.5) การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Agilent e4980a จากการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของผลึก ADP บริสุทธิ์ และ ADP เจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol รวมถึงผลึกที่ถูกปลูกด้วยวิธีแบบดั้งเดิม และแบบทิศทางเดียว ผลการเตรียมชิ้นสารตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขนาดผลึกใช้ในการวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

ชนิดผลึก	พื้นที่หน้าตัด (mm^2)	ความหนา (mm)
ADP (SR)	65.5	2
ADP ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol (SR)	7.5	2
ADP	7.1x7.5	2
ADP ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol	7.2x9.6	2



ภาพที่ 4.6 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

ภาพที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์กับความถี่ พบว่า เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ การปลูกแบบทิศทางเดียวมีแนวโน้มที่จะให้ค่าไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์สูงกว่าการปลูกแบบดั้งเดิม การเจือด้วยกรดทาร์ทาริกมีแนวโน้มให้ค่าไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ลดลง และค่าไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์คงที่ เมื่อความถี่สูงกว่า 10000 Hz แต่อย่างไรก็ตาม ค่าไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ที่วัดได้มีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งไม่สามารถเกิดขึ้นได้ [29] แสดงว่าเกิดความผิดพลาดในการวัด ดังนั้น จึงควรวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ เพื่อยืนยันผลของการเจือต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่อไป

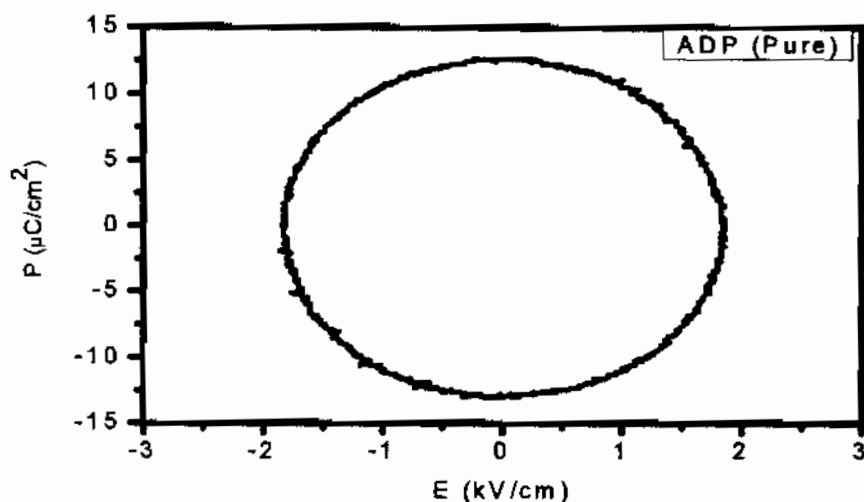
4.6) การศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

จากวัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของผลึก ADP บริสุทธิ์ และที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก 2%mol ที่อุณหภูมิ 273 K ด้วยวงจร Sawyer-Tower circuit ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.7 และ 4.8

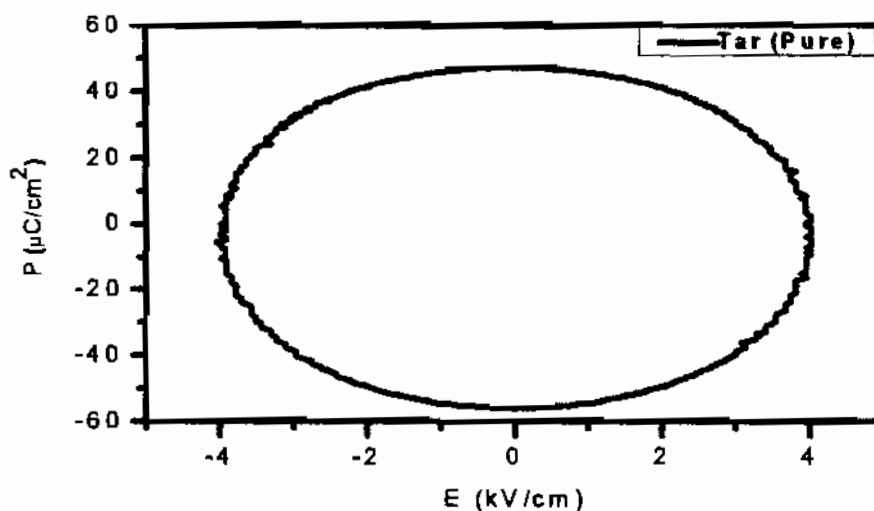
ภาพที่ 4.7 แสดงค่าโพลาริเซชันของผลึก ADP บริสุทธิ์ เมื่อสนามไฟฟ้าถูกเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -1.8 ถึง 1.8 kV/cm พบว่าผลึก ADP บริสุทธิ์ ไม่แสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก แต่มีลักษณะค่าโพลาริเซชันที่ตรงกับกราฟในภาพที่ 2.23(ข) ซึ่งแสดงลักษณะของตัวต้านทานเชิงเส้นในอุดมคติ แสดงว่าผลึกที่ปลูกได้ไม่สามารถสะสมพลังงานในรูปแบบสนามไฟฟ้าได้ [25] โดยมีค่าโพลาริเซชันสูงสุดเท่ากับ $12.5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่า 0 kV/cm

ภาพที่ 4.8 แสดงค่าโพลาริเซชันของผลึกกรดทาร์ทาริก เมื่อสนามไฟฟ้าถูกเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -4 ถึง 4 kV/cm พบว่าของผลึกกรดทาร์ทาริก ไม่แสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก แต่มีลักษณะค่าโพลาริเซชันที่ตรงกับกราฟในภาพที่ 2.18(ข) ซึ่งแสดงลักษณะของตัวต้านทานเชิงเส้นในอุดมคติ แสดงว่าผลึกที่ปลูกได้ไม่สามารถสะสมพลังงานในรูปแบบสนามไฟฟ้าได้ โดยมีค่าโพลาริเซชันสูงสุดเท่ากับ $46.1 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่า 0 kV/cm แต่อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยของ Zhihua และคณะ [24] พบว่า เมื่อผสมกรดทาร์ทาริกกับสารอื่นแล้วทำให้เกิดสารในกลุ่มทาร์ทาเรท สารที่เกิดขึ้นสามารถแสดงสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ ผลึกที่ปลูกได้ในโครงงานนี้ไม่สามารถแสดงสมบัติ

เฟอร์ไรต์เล็กหักได้ อาจเนื่องจาก ปริมาณของกรดทาร์ทาริกไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดสารในกลุ่มทาร์ทาเรท นอกจากนี้ อุณหภูมิที่วัดสูงกว่าค่าอุณหภูมิวิกฤติ ทำให้ผลึกที่ปลูกได้ไม่สามารถแสดงสมบัติเฟอร์ไรต์เล็กหักได้



ภาพที่ 4.7 ค่าโพลาริเซชันของผลึก ADP บริสุทธิ์



ภาพที่ 4.8 ค่าโพลาริเซชันของผลึกทาร์ทาริก

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1) สรุปผลการทดลอง

จากการปลูกผลึกจากสารละลาย โดยทำการปลูกแบบวิธีดั้งเดิมและการปลูกแบบวิธีแบบทิศทางเดียว ซึ่งทำการศึกษาด้วยเทคนิคต่างๆ พบว่า ผลึก ADP ที่ถูกปลูกด้วยวิธีแบบทิศทางเดียรมีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าผลึก ADP ที่ถูกปลูกด้วยวิธีแบบดั้งเดิม การเจือด้วยกรดทาร์ทาริกทำให้ผลึกที่ปลูกได้มีอัตราการเจริญเติบโตที่สูงขึ้น

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าสเปกตรัมการเลี้ยวเบนที่ระนาบของผลึก ADP บริสุทธิ์ มีระนาบตรงกับสเปกตรัมของผลึกที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก ดังนั้น การเจือกรดทาร์ทาริกจึงไม่ส่งผลต่อโครงสร้างของผลึก ADP ในขณะที่ผลจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR แสดงให้เห็นว่า ภายในโครงสร้างของผลึก ADP ที่ถูกเจือมีโมเลกุลของกรดทาร์ทาริก ดังนั้น โมเลกุลของกรดทาร์ทาริก อาจแทรกตัวอยู่ในโครงผลึก ADP

การศึกษาค่าคงที่ไดโพลทริกสัมพัทธ์ แสดงให้เห็นว่า การปลูกผลึกแบบทิศทางเดียวจะทำให้ได้ผลึกที่มีค่าคงที่ไดโพลทริกสัมพัทธ์สูงกว่าผลึกที่ได้จากการปลูกแบบวิธีดั้งเดิม แต่อย่างไรก็ตาม ไม่พบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก ทั้งในผลึก ADP บริสุทธิ์และผลึกของกรดทาร์ทาริกบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 273 K โดยกราฟโพลาริเซชันที่ได้แสดงลักษณะของตัวต้านทานเชิงเส้นในอุดมคติ

5.2) ปัญหา

5.2.1 การปลูกผลึกแบบทิศทางเดียวไม่ได้ผลตามทฤษฎี เนื่องจากพบจุดบกพร่องในเนื้อผลึก ทำให้ผลึกมีความโปร่งใสไม่สม่ำเสมอ

5.2.2 ค่าคงที่ไดโพลทริกสัมพัทธ์ที่วัดได้ไม่ถูกต้องตามหลักการของทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า

5.2.3 อุณหภูมิที่วัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกไม่เหมาะสม ทำให้ผลึกกรดทาร์ทาริกไม่แสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

5.2.4 โครงการนี้ขาดผลการศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของผลึก ADP ที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริก

5.3) ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรควบคุมปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดผลึกต่างๆ เช่น ความบริสุทธิ์ และอุณหภูมิ
- 2) ควรเตรียมชิ้นสารตัวอย่างสำหรับการวัดค่าคงที่ไดโพลทริกสัมพัทธ์อย่างระมัดระวัง เพื่อให้สามารถวัดค่าได้ตรงตามทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า
- 3) ควรลดอุณหภูมิที่ใช้ในการวัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกให้ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ
- 4) ควรศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของผลึก ADP ที่ถูกเจือด้วยกรดทาร์ทาริกเพิ่มเติม

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- [1] D. William Callister. หนังสือวัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน; กรุงเทพฯ: ทิพย์ 2548.
- [2] P. SanthanaRaghavan and P.Ramasamy. Crystal growth processes and method, KUR publication (2001).
- [3] V. Tripadus, M. Gugiu, M. Statescu and A. Podlesnyak. Molecular dynamics in ammonium dihydrogen phosphate using incoherent neutron scattering Original Research Article, **Chemical Physics**. 335 (2007) 233-241
- [4] Dongle Xu and Dongfeng Xue. Chemical bond simulation of KADP single-crystal growth Original Research Article , **Journal of Crystal Growth**, 310 (2008) 1385-1390.
- [5] Z. Dega-Szafran, G. Dutkiewicz, Z. Kosturkiewicz, M. Szafran and P. Barczyski Molecular, structure of hydrated complex of trigonelline with l(+)-tartaric acid, **Journal of Molecular Structure**, 991 (2011) 178–185.
- [6] Raymond Chang, เคมี1, กรุงเทพฯ: แมคกรอ-ฮิลล์, 2555.
- [7] http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/miller_indices/lattice_examples.php
(วันที่สืบค้น 25 พฤษภาคม 2556)
- [8] <http://khtpschool.ning.com/profiles/blogs/6295747:BlogPost:31589>
(วันที่สืบค้น 12 พฤษภาคม 2556)
- [9] ที่มา: www.physics.kku.ac.th/315205/sites/default/files/chapter03.pdf
(วันที่สืบค้น 12 พฤษภาคม 2556)
- [10] Richard J.D. Tilley. Crystals and crystal structures, Wiley Publication (2006).
- [11] Hans J.Scheel and Tsuguo Fukuda, Crystal Growth Technology, Wiley publication (2003).
- [12] Tartaric acid [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก http://en.wikipedia.org/wiki/Tartaric_acid
(วันที่สืบค้น 22 มกราคม 2556)
- [13] Jun Shen, Jimin Zheng and Yunxia Che, Bin Xi. Growth and properties of organic nonlinear optical crystals l-tartaric acid–nicotinamide and d-tartaric acid–nicotinamide. **Journal of Crystal Growth** (2003) 136–140.
- [14] P. Rajesh and P. Ramasamy. Influence of NH_4Cl on the $\langle 1\ 0\ 0 \rangle$ directed growth and properties of ADP crystal. **Materials Letters** 64 (2010) 798–801.
- [15] K. Sethuraman, R. Ramesh Babu, R. Gopalakrishnan, P. Ramasamy. Unidirectional growth of $\langle 110 \rangle$ ammonium dihydrogen orthophosphate single crystal by Sankaranarayanan–Ramasamy method. **Journal of Crystal Growth** 294 (2006) 349–352

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [16] Geochemical Instrumentation and Analysis [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก
http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html (วันที่สืบค้น 22 มกราคม 2556)
- [17] P. Rajesh, K.Boopathi and P.Ramasamy. Investigations on the solubility, growth, structural, optical, mechanical, dielectric and SHG behaviour of ammonium acetate doped ammonium dihydrogen phosphate crystals. **Journal of Crystal Growth**. 318 (2011) 751–756.
- [18] Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก
<http://cste.sut.ac.th/articles/?p=294> (วันที่สืบค้น 23 มกราคม 2556)
- [19] Sunil Chaki, M. P. Deshpande, Jiten P. Tailor, Mahesh D. Chaudhary and Kanchan Mahato. Growth and Characterization of ADP Single Crystal. **American Journal of Condensed Matter Physics**. 2(1) (2012) 22-26.
- [20] Dielectric properties [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก
http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dielectrics/dielectric_constant.php
 (วันที่สืบค้น 22 มกราคม 2556)
- [21] P.V. Dhanaraj a, G. Bhagavannarayanab and N.P. Rajesha. Effect of amino acid additives on crystal growth parameters and properties of ammonium dihydrogen orthophosphate crystals, **Materials Chemistry and Physics** 112 (2008) 490–495.
- [22] Ferroelectric [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก
http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2548/mat0948sh_ch2.pdf
 (วันที่สืบค้น 22 มกราคม 2556)
- [23] Ferroelectric [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก
<http://www.mc2.chalmers.se/pl/lc/engelska/tutorial/flc.html>
 (วันที่สืบค้น 13 พฤษภาคม 2556)
- [24] Zhihua Sun, Tianliang Chen, Junhua Luo and Maochun Hong. Bis(imidazolium) l-Tartrate. A Hydrogen-Bonded Displacive-Type. **Phase Transitions**. 51 (2012) 3871–3876.
- [25] 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)

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [26] P. Rajesh and P. Ramasamy. A study on optical, thermal, mechanical, dielectric, piezoelectric and NLO properties of unidirectional ammonium chloride added ammonium dihydrogen phosphate crystal, **Materials Chemistry and Physics** 117 (2009) 465–470.
- [27] P. Rajesh and P. Ramasamy. Effect of oxalic acid on the optical, thermal, dielectric and mechanical behaviour of ADP crystals, **Physica B: Condensed Matter**, 404 (2009) 1611-1616.
- [28] P. Rajesh and P. Ramasamy. Growth of dl-malic acid-doped ammonium dihydrogen phosphate crystal and its characterization Original Research Article, **Journal of Crystal Growth**, 311 (2009) 3491-3497.
- [29] P. Rajesh, K. Boopathi and P. Ramasamy. Investigations on the solubility, growth, structural, optical, mechanical, dielectric and SHG behaviour of ammonium acetate doped ammonium dihydrogen phosphate crystals Original Research Article. **Journal of Crystal Growth** 318 (2011) 751-756.

ภาคผนวก

ภาคผนวก

การคำนวณ

การคำนวณหาอัตราส่วน%mol

การคำนวณเปอร์เซ็นต์ในการเจือกรดทาร์ทาริก 2%mol

แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต = 44.31 g

มวลโมเลกุลของแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต = 115.03 g/mol
กรดทาร์ทาริก

มวลโมเลกุลของกรดทาร์ทาริก = 150.087 g/mol

$$X_{ADP} = \frac{44.31 \text{ g}}{115.03 \text{ g/mol}} \quad (ผ.1)$$

$$X_{ADP} = 0.385 \text{ mol}$$

หาเปอร์เซ็นต์เจือกรดทาร์ทาริก 2%mol

$$\text{จะได้ว่า} \quad X_{\text{lactic}} = \frac{1\% \times 0.385 \text{ mol}}{100\%}$$

$$= 0.0077 \text{ mol} \times 150.087 \text{ g/mol}$$

$$= 1.156 \text{ g}$$

ดังนั้น จะได้กรดทาร์ทาริก คือ 1.16 g



ตารางผลการทดลองเฟอร์โรอิเล็กทริก

ลำดับ	ผลึก	D	R	$A = \pi r^2$
1	ADP	28.6	2.90	2640.7
2	Tartaric acid	26.4	1.92	1157.5

$$E = V/D \quad (\text{ผ.2})$$

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

$$P = CV/A \quad (\text{ผ.3})$$

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

โดยที่ P คือ โพลาริเซชัน

C คือ ประจุไฟฟ้า

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า

A คือ พื้นที่ของชิ้นงาน

E คือ สนามไฟฟ้า

D คือ ความหนาของชิ้นงาน

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

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติผู้จัดทำโครงการ

ชื่อ-สกุล	นายศักดิ์รินทร์ โคตรเพชร
วันเดือนปีเกิด	13 กุมภาพันธ์ 2534
ภูมิลำเนา	บ้านเลขที่ 69 หมู่ 4 ตำบลขาว อำเภอสลภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด 45120
เบอร์โทรศัพท์	083-5448648
E-mail	sakrin_bas@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2545	สำเร็จการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนบ้านทรายมูล ตำบลขาว อำเภอสลภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด 45120
พ.ศ. 2548	สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 3 จากโรงเรียนขาววิทยาคาร ตำบลขาว อำเภอสลภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด 45120
พ.ศ. 2551	สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนร้อยเอ็ดวิทยาลัย ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด 45120
พ.ศ. 2555	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผลงาน

- ผลงานวิจัยในงานการประชุมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 38 ระหว่างวันที่ 17-19 ตุลาคม พ.ศ. 2555 ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติเอ็มเพรส โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่ ในหัวข้อ Unidirectional growth of triglycine sulphate doped potassium dihydrogen phosphate single crystal and its characteristics.

- นำเสนองานนิสิตชั้นปีที่ 4 และวิทยานิพนธ์นิสิตระดับบัณฑิตศึกษาครั้งที่ 12 ประจำปีการศึกษา 2556 วันศุกร์ที่ 15 กุมภาพันธ์ 2556 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ในหัวข้อ Growth of TGS doped KDP and tartaric acid doped ADP and their characterization.