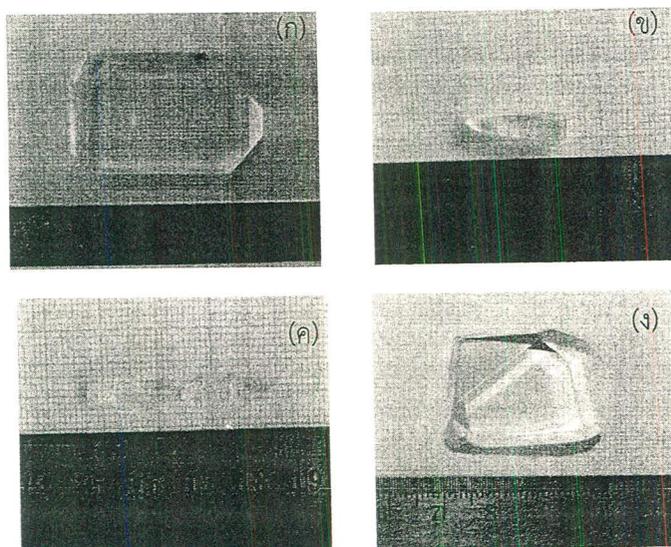


บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองในการศึกษาสมบัติพื้นฐานของผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตบริสุทธิ์ และผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ถูกเจือด้วยไตรโกลซีน ซัลเฟต ซึ่งได้จากการปลูกผลึกแบบดั้งเดิมและการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว โดยกำหนดทิศทางการเกิด <100> ผลึกที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติและวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของผลึก ได้แก่ ศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ศึกษาดูดกลืนแสงของสารละลาย ศึกษาพื้นผิวของผลึกด้วยเทคนิค SEM ศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกและศึกษาสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก รายละเอียดของการทดลองและอภิปรายผลมีดังต่อไปนี้

4.1 ลักษณะและอัตราการเจริญเติบโตของผลึก



ภาพที่ 36 ผลึกปลูกแบบวิธีดั้งเดิม

(ก) ผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์

(ข) ผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรโกลซีน ซัลเฟต 2% mol

(ค) ผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรโกลซีน ซัลเฟต 5% mol

(ง) ผลึก ไตรโกลซีน ซัลเฟต

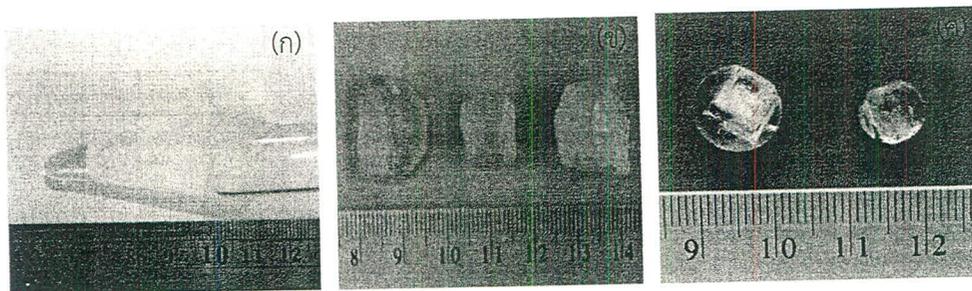
จากภาพที่ 36 แสดงผลึกที่ได้จากการปลูกผลึกด้วยดั้งเดิม โดยผลึกในภาพที่ 30(ก) คือ ผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์ จะเห็นว่าผลึกมีลักษณะผิวหน้าเรียบ โปร่งใสและมีความสมบูรณ์ของผลึก ผลึกที่ปลูกได้มีขนาด $4.2 \times 3.3 \times 1.5 \text{ cm}^3$ โดยใช้ระยะเวลาในการปลูก 28 วัน

ภาพที่ 36 (ข) คือ ผลึก โพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ถูกเจือด้วย ไตรโกลซีน ซัลเฟต 2% mol จะเห็นว่าผลึกมีลักษณะผิวหน้าของผลึกเรียบเป็นแท่งขนาดเล็ก ความโปร่งใสไม่สม่ำเสมอ อาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก ผลึกที่ปลูกได้มีขนาด $1.8 \times 0.9 \times 0.5 \text{ cm}^3$ โดยใช้ระยะเวลาในการปลูก 35 วัน

ภาพที่ 36 (ค) คือ ผลึก โพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ถูกเจือด้วย ไตรโกลซีน ซัลเฟต 5% mol จะเห็นว่าผลึกมีลักษณะเป็นแท่ง ความโปร่งใสไม่สม่ำเสมอ อาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก ผลึกที่ปลูกได้มีขนาด $2.8 \times 0.7 \times 0.5 \text{ cm}^3$ โดยใช้ระยะเวลาในการปลูก 39 วัน

ภาพที่ 36 (ง) คือ ผลึก ไตรโกลซีน ซัลเฟต มีลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยม ปรางค์เหลี่ยมในหน้าต่างๆ มีผิวหน้าเรียบ โปร่งใส ผลึกที่ปลูกได้มีขนาด $2.9 \times 2.6 \times 1.5 \text{ cm}^3$ โดยใช้ระยะเวลาในการปลูก 65 วัน

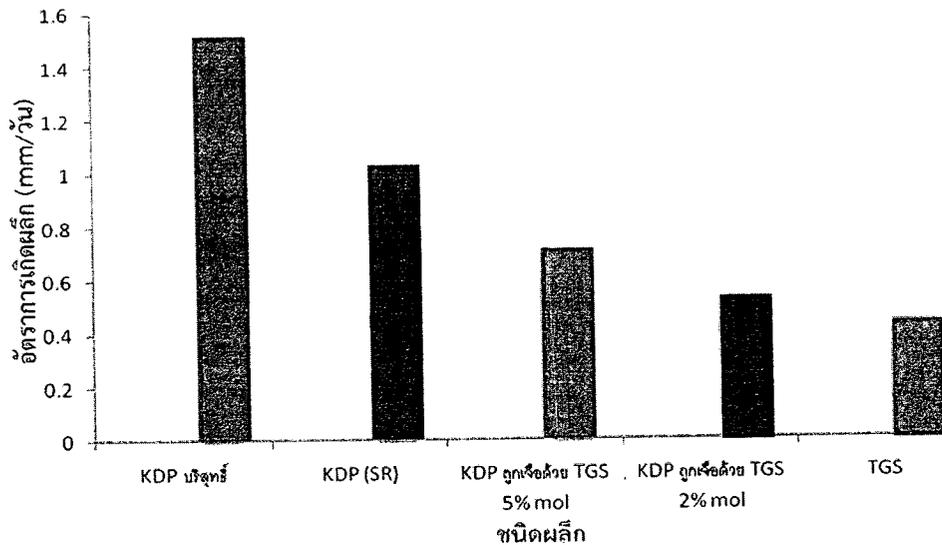
จากลักษณะของผลึกที่ปลูกได้มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน ทั้งขนาด รูปทรง และความโปร่งใส ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ อาจเนื่องมาจาก เงื่อนไขในการปลูกผลึกที่ต่างกัน จึงส่งผลต่อกระบวนการเกิดผลึก



ภาพที่ 37 ผลึกปลูกแบบทิศทางเดียว

- (ก) ผลึก โพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ปลูกแบบทิศทางเดียว
 (ข) ผลึก โพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ปลูกแบบทิศทางเดียว หลังจากการตัดจากหลอดทดลอง
 (ค) แผ่นผลึก โพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ปลูกแบบทิศทางเดียว โดยผ่านการขัด

จากภาพที่ 37 แสดงผลึกที่ได้จากการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว ภาพที่ 37 (ก) คือ ผลึก โพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่อยู่ในหลอดทดลอง พบว่ามีลักษณะร่องรอยการแตก อาจเกิดจากความสมบูรณ์ของผลึก ใช้ระยะเวลาปลูก 52 วัน ภาพที่ 37 (ข) คือ ผลึก โพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ปลูกแบบทิศทางเดียว หลังจากการตัดจากหลอดทดลอง พบว่าผลึกมีความใส่น้อย ภาพที่ 37 (ค) แผ่นผลึก โพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ปลูกแบบทิศทางเดียว โดยผ่านการขัด เห็นได้ว่าผลึกมีลักษณะมีความใส่น้อยมีร่องรอยการแตกปรากฏเห็นได้ชัดเจนอาจเกิดจากความสมบูรณ์ของผลึก ผลึกมีขนาด $1.3 \times 1.5 \times 0.2 \text{ cm}^3$



ภาพที่ 38 อัตราการเจริญเติบโตของผลึกที่ปลูกได้

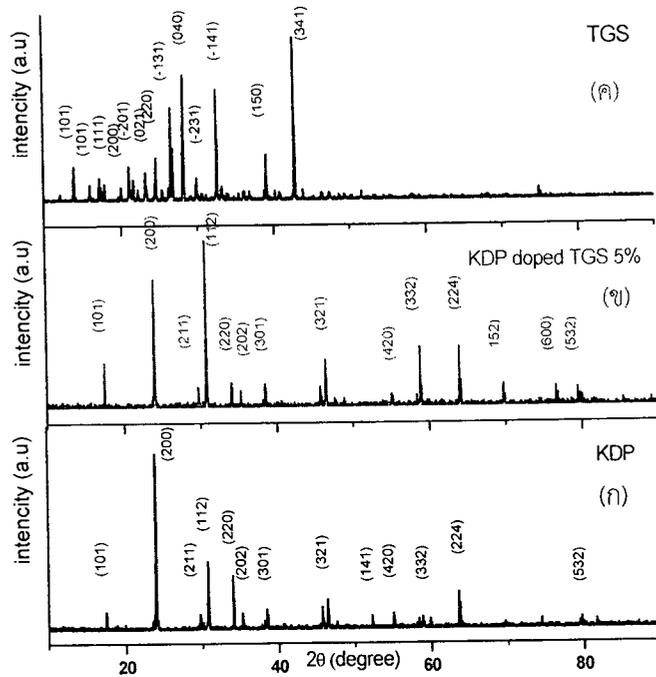
จากภาพที่ 38 แสดงอัตราการเจริญเติบโตของผลึก โดยการปลูกผลึกแบบดั้งเดิมและแบบทิศทางเดียว ดังนี้ ผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟส มีอัตราการเกิดอยู่ที่ 1.5 mm /วัน ผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟส ที่ปลูกแบบทิศทางเดียว มีอัตราการเกิดอยู่ที่ 1 mm /วัน ผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟส ที่ถูกเจือด้วย ไตรโกลซีน ซัลเฟต 5% mol มีอัตราการเกิดอยู่ที่ 0.7 mm /วัน ผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟส ที่ถูกเจือด้วย ไตรโกลซีน ซัลเฟต 2% mol มีอัตราการเกิดอยู่ที่ 0.5 mm /วัน ผลึก ไตรโกลซีน ซัลเฟต มีอัตราการเกิดอยู่ที่ 0.4 mm /วัน จากกราฟบอกได้ว่าผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟส ที่ปลูกแบบดั้งเดิมมีอัตราการเจริญเติบโตที่มากกว่าผลึกชนิดอื่นเมื่อเทียบจากการปลูกผลึกแบบเดียวกัน

4.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟส และผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟส ที่ถูกเจือด้วย ไตรโกลซีน ซัลเฟต 5% mol และผลึก ไตรโกลซีน ซัลเฟต ชิ้นงานตัวอย่างจะถูกเตรียมให้เป็นผงละเอียด โดยใช้มุมเริ่มต้น 2θ ที่ 5° และมุมสุดท้าย 2θ ที่ 90° สเปกตรัมที่แสดงออกมาจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับมุม 2θ จากภาพที่ 39 เป็นสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ประกอบด้วย (ก) กราฟ XRD ของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟส บริสุทธิ์ (ข) กราฟ XRD ของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟส ที่ถูกเจือด้วย ไตรโกลซีน ซัลเฟต 5% mol (ค) ผลึก ไตรโกลซีน ซัลเฟต บริสุทธิ์เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟ (ก) และกราฟ (ข) มียอดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของระนาบสำคัญแสดงถึงรูปแบบโครงสร้างที่

เป็นเอกลักษณ์ของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์ ในช่วงมุม 2θ ต่างๆ เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Loretta และคณะ⁴⁹ พบว่า มียอดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของระนาบสอดคล้องกัน แสดงว่าผลึกที่ปลูกได้ทั้งกรณีผลึกบริสุทธิ์และผลึกที่ถูกเจือมีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล โดยผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์ และผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซีน ซัลเฟต 5% mol มีระนาบเกิดขึ้นเหมือนกันคือ (101) (200) (112) (220) (311) แสดงว่าการเจือ ไตรไกลซีน ซัลเฟต ในผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ไม่ได้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต เพราะยังมียอดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนที่สำคัญครบถ้วน

สำหรับผลึก ไตรไกลซีน ซัลเฟต บริสุทธิ์ ปรากฏยอดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของระนาบต่างๆ ในช่วงมุม 2θ ที่ 10° ถึง 40° แสดงดังกราฟ (ค) เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Balu และคณะ พบว่า มียอดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของระนาบสอดคล้องกัน แสดงว่าผลึกที่ปลูกได้มีโครงสร้างแบบโมโนคลินิก⁵⁰



ภาพที่ 39 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

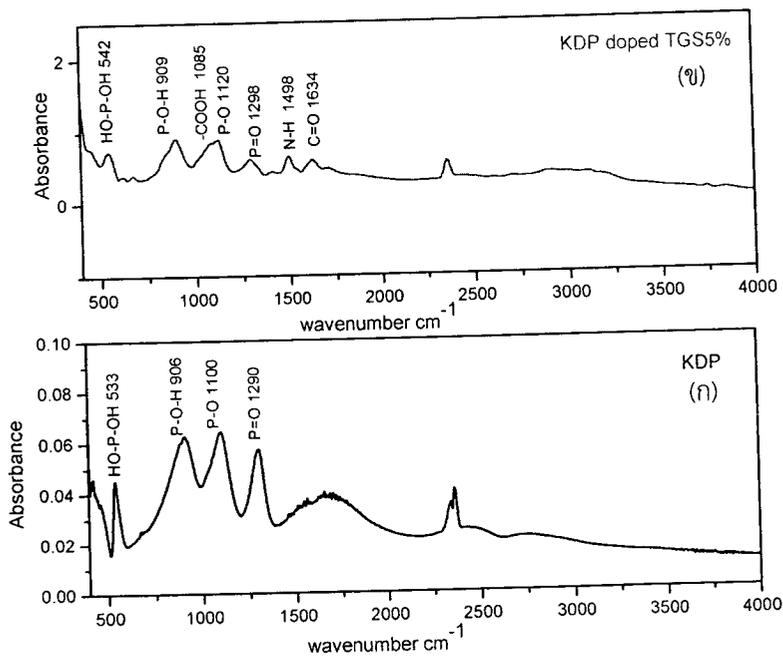
⁴⁹ Fernando Loretta, T. Josephine Rani, P. Selvarajan, S. Perumal, S.Ramalingom World Journal Science and Technology, 1(3) 2011 01-06.

⁵⁰ T. Balu , T.R. Rajasekaran , P. Murugakoothan, Current Applied Physics 9 (2009) 435–440.

- (ก) ผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์
 (ข) ผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซิน ซัลเฟต 5% mol
 (ค) ผลึก ไตรไกลซิน ซัลเฟต บริสุทธิ์

4.3 การศึกษาหมู่ฟังก์ชัน

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันโดยเทคนิค FTIR เป็นการวัดการดูดกลืน (absorbance) พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ ของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์ และผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซิน ซัลเฟต 5% mol โดยใช้เครื่อง PERKIN ELMER spectrum GX FTIR system สำหรับการนำผลึกไปตรวจสอบ ผลึกตัวอย่างจะถูกบดให้เป็นผงละเอียดแล้วนำไปผสมกับสาร KBr จากนั้นนำไปอัดให้เป็นแผ่นบาง ผลการวัดในแต่ละสเปกตรัมจะแสดงการสั่นของพันธะ ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันภายในโมเลกุล ดังแสดงในภาพที่ 40



ภาพที่ 40 สเปกตรัม FTIR สำหรับการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลึก

- (ก) ผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์
 (ข) ผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซิน ซัลเฟต 5% mol

ภาพที่ 40 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ 400-4000 cm^{-1} ของผลึก โพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์ และผลึก โพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรโกลซีน ซัลเฟต 5% mol เมื่อพิจารณากราฟในภาพที่ 34 (ก) พบว่ามียอดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของผลึก โพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 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 Ramasamy⁵¹ พบว่า มียอดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่สอดคล้องกัน แสดงว่าโมเลกุลที่อยู่ในผลึกที่ปลูกได้ คือ โมเลกุลของโพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ดังนั้น การปลูกผลึกจากสารละลาย ทำให้ไอออนในสารละลายกลับมารวมตัวกันเป็นโพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

ภาพที่ 40 (ข) พบว่ายอดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของผลึก โพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือ เลื่อนจากค่ามาตรฐาน เนื่องจากการเจือสาร ไตรโกลซีน ซัลเฟต อาจส่งผลต่อการสั่นของพันธะของ โพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 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 P=O จากผลดังกล่าวพบว่าการเจือสาร ไตรโกลซีน ซัลเฟต ส่งผลให้ยอดสเปกตรัมมีเลขคลื่นเพิ่มขึ้น แสดงว่าการเจือ ไตรโกลซีน ซัลเฟต ทำให้ความถี่การสั่นของพันธะเพิ่มขึ้น

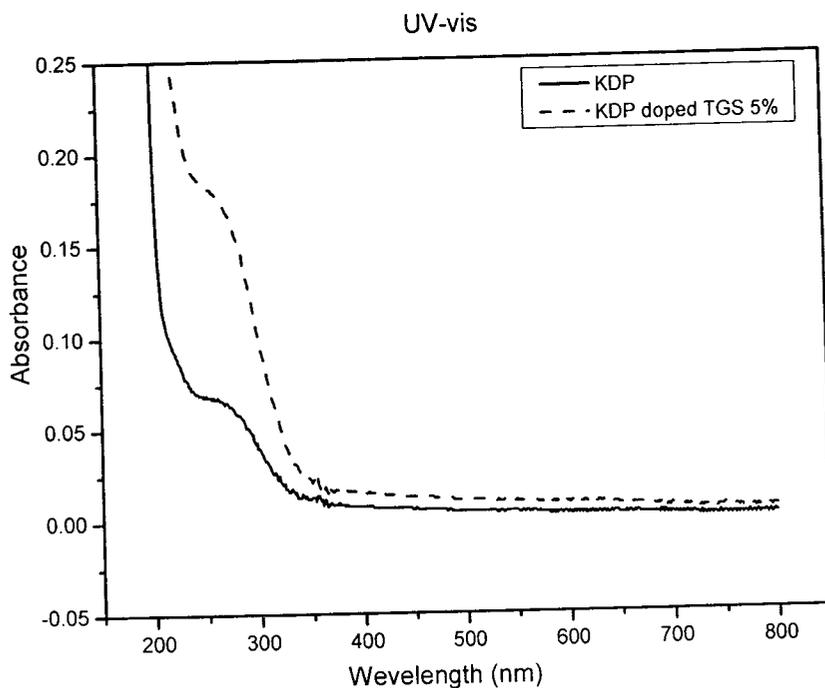
นอกจากนี้ยังพบยอดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของ ไตรโกลซีน ซัลเฟต ดังนี้ ยอดที่เลขคลื่น 1085 cm^{-1} เป็นผลจากการสั่นของพันธะ -COOH ยอดที่เลขคลื่น 1634 cm^{-1} เป็นผลจากการสั่นของพันธะ C=O เมื่อเทียบยอดสเปกตรัมดังกล่าวกับงานวิจัยของ Balu และคณะ⁵² พบว่าผลึกที่ปลูกได้มีโมเลกุลของ ไตรโกลซีน ซัลเฟต เข้าไปแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างผลึก โพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือ

⁵¹ S. Balamurugan, P. Ramasamy, Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 71 (2009) 1979-1983.

⁵² T. Balu, T.R. Rajasekaran, P. Murugakoothan, Current Applied Physics 9 (2009) 435-440.

4.4 การศึกษาการดูดกลืนของแสงโดยใช้เทคนิค UV-visible spectroscopy

การศึกษาการดูดกลืนแสงของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย TGS 5% โมล ถูกตรวจสอบโดยใช้เทคนิค UV-Vis ใช้เครื่อง T80+ UV/VIS Spectrometer PG Instrument ใช้ความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-800 nm ในการตรวจสอบชิ้นงานจะถูกละลายด้วยน้ำ DI เพื่อทำให้เป็นสารละลาย กราฟเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของผลึกทั้งสองแสดงในภาพที่ 41



ภาพที่ 41 แสดงการดูดกลืนของแสงของสารละลายผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และสารละลายผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซีน ซัลเฟต 5% โมล

จากภาพที่ 41 เมื่อพิจารณาการดูดกลืนของแสงเมื่อผ่านสารละลายผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และสารละลายผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซีน ซัลเฟต 5% โมล พบว่ามีการดูดกลืนของแสงในช่วงความยาวคลื่น 200-800 nm สารละลายผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต จะมีค่าการดูดกลืนที่น้อยกว่าค่าของสารละลายผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซีน ซัลเฟต 5% โมล แสดงว่าการเจือสาร ไตรไกลซีน ซัลเฟต เข้าไปทำให้ผลึกมีการดูดกลืนแสงมากขึ้น อาจเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์ภายในผลึก⁵³ ที่

⁵³ N.B. Singh, T.A. Gould, R.H. Hopkins, Journal of Crystal Growth, 78 (1986) 43–50.

เกิดจากการแทรกตัวของอะตอมของสาร ไตรไกลซีน ซัลเฟต ส่งผลให้ความโปร่งแสงของสารละลาย ผลึกนั้นต่ำลงและการดูดกลืนแสงที่มากขึ้นแสดงว่าตัวของสารละลายผลึกยอมให้แสงนั้นผ่านออกไปได้น้อย จากกราฟสามารถสังเกตได้ว่าในช่วงความยาวคลื่นที่ 320 nm จะมีการเปลี่ยนของกราฟที่เลื่อนขึ้นและค่าของ UV-cutoff ของสารละลายผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และสารละลายผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซีน ซัลเฟต 5% โมล อยู่ที่ 200 nm⁵⁴ และ 220 nm ตามลำดับ สมบัติที่แสดงออกมาจากข้อมูลที่ได้นี้ตรงกับกราฟของสารละลายผลึก จะถูกนำไปประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกันออกไป

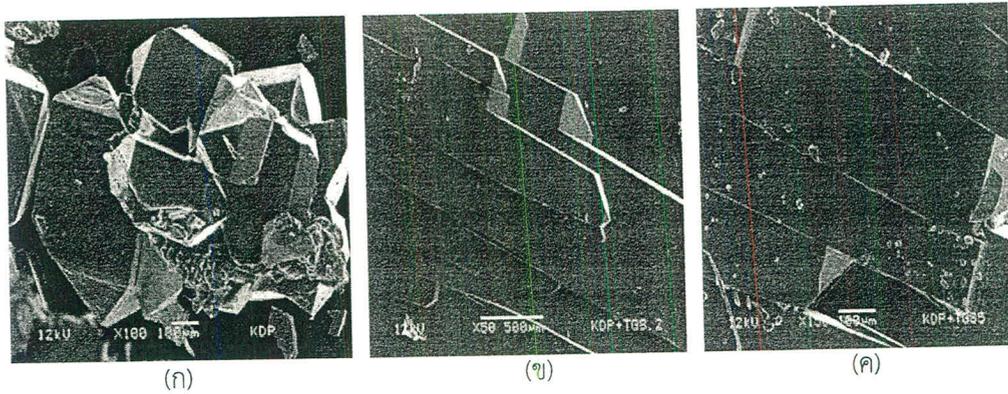
4.5 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของผลึก

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์ ผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซีน ซัลเฟต 2% mol และผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซีน ซัลเฟต 5% mol โดยศึกษาจากภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6460LV โดยเตรียมชิ้นงานสำหรับถ่ายภาพด้วยกล้อง SEM ให้มีขนาดความหนา 2-3 mm จากนั้นนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มบางทอง

ภาพที่ 42 (ก) เป็นลักษณะพื้นผิวของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์ ที่ได้จากการใช้ศักย์ไฟฟ้า 12 kV ภาพที่ได้มีลักษณะเป็นทรงเรขาคณิต โดยมีขนาดแต่ละด้านแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม รูปทรงสัณฐานมีลักษณะตรงกับผลึกที่ถูกรายงานโดย Dongli Xu⁵⁵ ส่วนลักษณะพื้นผิวของผลึกที่ถูกเจือ ในภาพที่ 42 (ข) และภาพที่ 42 (ค) เป็นลักษณะพื้นผิวของผลึก ในกรณีที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซีน ซัลเฟต 2% mol และ 5% mol ซึ่งพื้นผิวผลึกมีลักษณะเป็นแท่งยาว แต่อย่างไรก็ตาม สเปกตรัมจากการวัด XRD แสดงให้เห็นว่า ขนาดของยูนิตเซลล์ของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์ และที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซีน ซัลเฟต มีค่าเท่ากัน ภาพที่ได้จากกล้อง SEM จึงควรมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ดังนั้น ลักษณะที่แตกต่างกันในภาพที่ 42 อาจไม่ใช่ลักษณะสัณฐานของโดเมนผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต แต่อาจเป็นลักษณะพื้นผิวที่เกิดจากคราบของสารละลายที่เหลือค้างในระหว่างการเก็บผลึก

⁵⁴ S. Balamurugan, P. Ramasamy, Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 71 (2009) 1979–1983.

⁵⁵ Dongli Xu, Dongfeng Xue, Physica B: Condensed Matter, 370: 84-89.



ภาพที่ 42 ลักษณะพื้นผิวของผลึกที่ปลูกได้

- (ก) ลักษณะพื้นผิวของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์
- (ข) ลักษณะพื้นผิวของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซินซัลเฟต 2% mol
- (ค) ลักษณะพื้นผิวของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซินซัลเฟต 5% mol

4.6 การศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริก

การศึกษสมบัติไดอิเล็กทริกของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต สามารถทำได้โดยตัดชิ้นผลึกตัวอย่างให้เป็นแผ่นบาง ความหนา 2 mm และเคลือบกาวยางที่ด้านหน้าและหลัง เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างของตัวเก็บประจุ และใช้เครื่อง Agilent E4980A วัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ที่ความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ที่อุณหภูมิห้อง

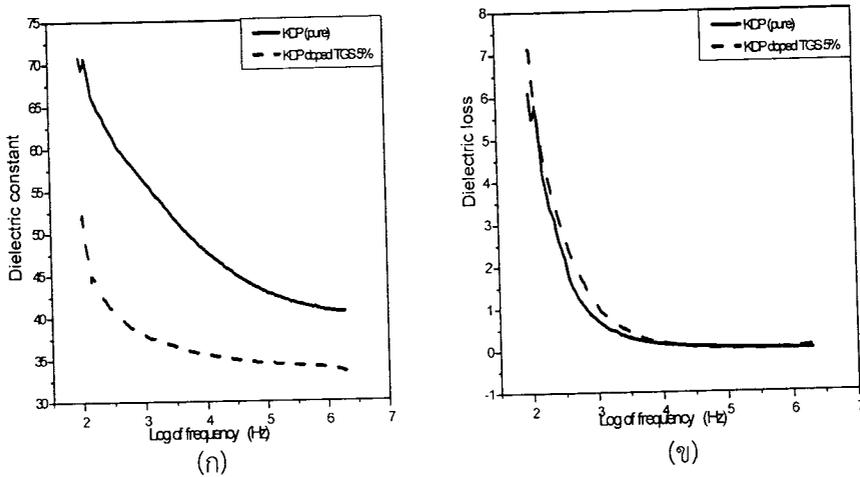
ภาพที่ 43(ก) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์ และที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซิน ซัลเฟต 5% mol ค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์ มีค่ามากกว่าของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วยไตรไกลซิน ซัลเฟต 5% mol โดยมีค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์สูงสุดของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์ คือ 73 ส่วนผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซิน ซัลเฟต 5% mol มีค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์สูงสุด คือ 53 ที่ความถี่ 100 Hz

เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น พบว่าค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์จะลดลง และเริ่มคงที่ เมื่อความถี่มากกว่า 10 kHz นั้นแสดงว่า ที่ความถี่มากกว่า 10 kHz ไดโพลโมเมนต์ไม่สามารถกลับตัวตามทิศทางสนามไฟฟ้า⁵⁶ เมื่อเจือ ไตรไกลซิน ซัลเฟต ลงในผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต พบว่า

⁵⁶ N.B. Singh, T.A. Gould, R.H. Hopkins, Journal of Crystal Growth, 78 (1986) 43–50.

ค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกสัมพันธ์มีค่าลดลง อาจเกิดจาก ไตรไกลซีน ซัลเฟต ไปแทรกตัวอยู่ภายในโครงสร้างผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟส ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวไดโพลของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟส ทำให้การตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าลดลง⁵⁷

ภาพที่ 43 (ข) แสดงค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์ และที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซีน ซัลเฟต 5% mol จากกราฟพบว่าผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซีน ซัลเฟต 5% mol มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมากกว่ากรณีผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์ แสดงให้เห็นว่า การเจือส่งผลให้มีพาหะเพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดกระแสรั่วเพิ่มขึ้น ดังนั้น ความสามารถในการเก็บพลังงานในรูปแบบไฟฟ้าลดลง^{42 43 58}

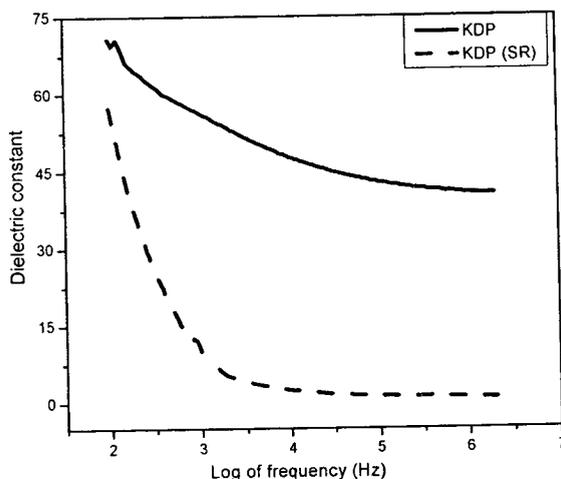


ภาพที่ 43 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก

- (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพันธ์ของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซีน ซัลเฟต 5% mol
- (ข) ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซีน ซัลเฟต 5% mol

⁵⁷ M. Senthil Pandian, P. Ramasamy, Journal of Crystal Growth, 311 (2009) 944-947.

⁵⁸ K. Rajarajan, S. Selvakumar, Ginson P. Joseph, S. Samikkannu, I. Vetha Potheher, P. Sagayara, Optical Materials, 28 (2006) 1187-1191.



ภาพที่ 44 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ปลูกแบบดั้งเดิม และผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ปลูกแบบทิศทางเดียว (SR)

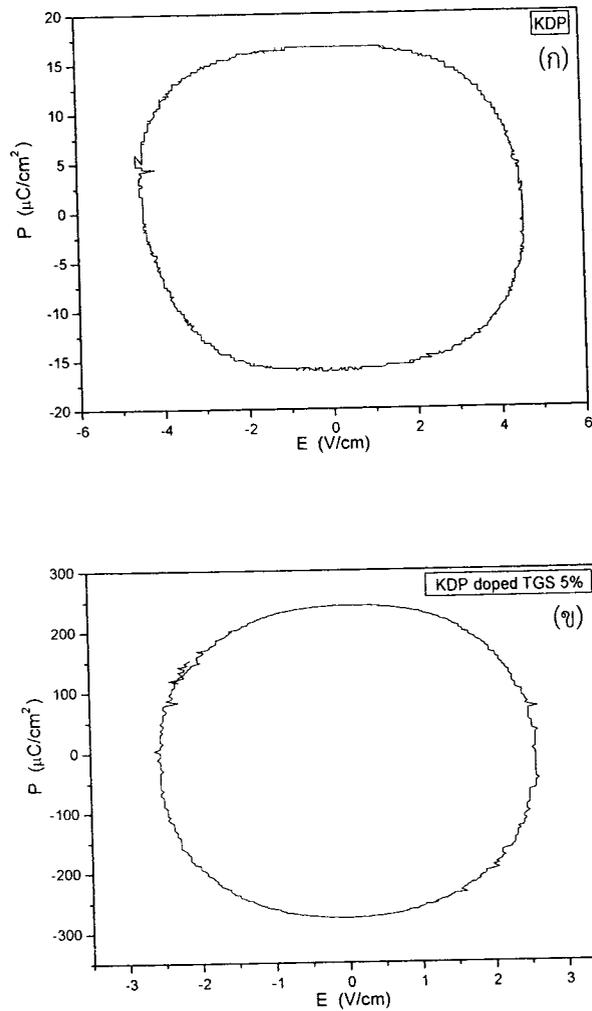
ภาพที่ 44 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์ ที่ถูกปลูกแบบดั้งเดิมและที่ปลูกแบบทิศทางเดียว พบว่าผลึกที่ปลูกแบบดั้งเดิมมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์มากกว่าผลึกที่ปลูกแบบทิศทางเดียว แต่อย่างไรก็ตาม ผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ปลูกแบบทิศทางเดียว พบว่าบางช่วงความถี่ ค่าที่วัดได้น้อยกว่า 1 ซึ่งขัดแย้งกับค่าเชิงทฤษฎี แสดงให้เห็นว่า อาจเกิดความผิดพลาดขึ้นในขณะที่ทำการวัด ดังนั้น จึงควรทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกซ้ำ เพื่อดูเส้นแนวโน้มค่าที่วัดได้ที่ต้องการ เพราะจากทฤษฎีการปลูกแบบทิศทางเดียวควรได้ผลึกที่มีความสมบูรณ์มากกว่าผลึกที่ปลูกแบบดั้งเดิม ดังนั้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของผลึกที่ปลูกแบบทิศทางเดียวจึงควรสูงกว่าผลึกที่ปลูกแบบวิธีดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม หากแนวโน้มที่ได้ตามภาพที่ 44 เป็นจริงแสดงว่า ผลึกที่ปลูกแบบทิศทางเดียวในโครงการนี้มีความบกพร่องของผลึกมาก ทำให้ค่าคงที่ ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ต่ำ ซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดในการควบคุมปัจจัยต่างๆ ในการปลูกผลึกแบบทิศทางเดียว⁵⁹

4.7 การศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

การศึกษาศสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของผลึก โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์ และที่ถูกเจือด้วย ไตรโกลซีน ซัลเฟต 5% mol เป็นการวัดค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นภายในผลึก ผลที่ได้อยู่ในรูปของกราฟระหว่างค่าโพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้า โดยสามารถเตรียมชิ้นผลึกตัวอย่างได้โดย

⁵⁹ K. Sankaranarayanan, P. Ramasamy, Journal of Crystal growth, 208 (2005) 467-473

ตัดให้เป็นแผ่นบาง ความหนา 2 mm จากนั้นเคลือบกาวเงินไว้ที่ด้านข้างทั้ง 2 ของชิ้นงาน และใช้ วงจร Sawyer-Tower circuit วัดค่าโพลาริเซชัน ที่อุณหภูมิ $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ⁶⁰ ได้ผลแสดงดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ของโพลาริเซชันและสนามไฟฟ้า

(ก) ผลึก โพลแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์

(ข) ผลึก โพลแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซีน ซัลเฟต 5% mol

ภาพที่ 45 แสดงลักษณะสมบัติค่าโพลาริเซชันของผลึก โพลแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต บริสุทธิ์ และที่ถูกเจือด้วย ไตรไกลซีน ซัลเฟต 5% mol กราฟที่ได้มีลักษณะโพลาริเซชันตรงกับกราฟ ในภาพที่ 20 ซึ่งเป็นลักษณะของตัวต้านทานแบบเชิงเส้นในอุดมคติ แสดงว่า ผลึกที่ปลูกได้ไม่สามารถ

⁶⁰ K. Cwikiel, B. Fugiel, M. Mierzwa, Physica B: Condensed Matter, 296 (2001) 361–368.

เก็บสะสมพลังงานในรูปสนามไฟฟ้าได้ เนื่องจากผลึก โพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต แสดงสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 122 K แต่ในการวัดค่า โพลาริเซชันในโครงงานนี้ ถูกวัดที่อุณหภูมิ 273 K ทำให้ไดโพลโมเมนต์ไม่สามารถรวมตัวกันเกิดโดเมนของเพอร์โรอิเล็กทริกได้⁶¹

การเจือ ไตรไกลซีน ซัลเฟต ลงในผลึก โพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต พบว่า ไม่สามารถปรับเปลี่ยนสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริกของผลึก โพลีเอทิลีนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ได้ อาจเนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของ ไตรไกลซีน ซัลเฟต ไม่เพียงพอที่จะช่วยให้เกิดโดเมนของเพอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ 273 K

⁶¹ Dalibor Merunka, Boris Rakvin, Chemical Physics Letters, 393 (2004) 558-562.