



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของสารประกอบที่มีซิงค์ฟอสเฟต

เป็นองค์ประกอบหลัก

Synthesis and characterization on zinc phosphate based compounds

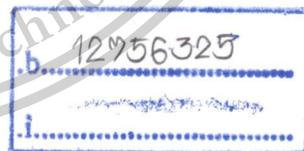
นายสมศักดิ์ วรมงคลชัย

นายบรรจง บุญชม

นายนราธิป วิทยากร

ศษ.ม.  
ค. ๒๕๖๑  
๒๕๕๕

สาขา.....  
เลขทะเบียน 141512  
รับเดือนปี 16 ค.ศ. 2559



ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของสารประกอบที่มีซิงค์ฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบหลัก

แหล่งเงิน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ประจำปีงบประมาณ 2555 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 330,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2554 ถึง 30 กันยายน 2555

1. หัวหน้าโครงการ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์  
สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
โทรศัพท์ 02-3298400-8411 E-mail : kwosomsa@kmitl.ac.th
2. ผู้ร่วมวิจัย ดร. บรรจง บุญชม ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์  
วิทยาเขตชุมพร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปะทิว ชุมพร 86160 โทรศัพท์ 0869615338
3. ผู้ร่วมวิจัย ดร. นราธิป วิทยากร ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์  
สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์ 089-7002136

บทคัดย่อ

ได้สังเคราะห์ซิงค์ฟอสเฟตไฮเดรตด้วยวิธีการตกตะกอนแบบธรรมดา ปราศจากสารปรับให้ตกตะกอน โดยใช้สารตั้งต้น 12 ระบบ จากนั้นได้ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนจากสารไฮเดรตไปเป็นแอนไฮเดรตด้วย TGA และได้ซิงค์ฟอสเฟตแอนไฮดรัส 12 ตัวอย่าง พบว่าร้อยละการผลผลิตของการเตรียมทั้งซิงค์ฟอสเฟตไฮเดรตและแอนไฮดรัสอยู่ในช่วง 79-98 ได้ตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารทั้งสองด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้ตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่า โครงสร้างของ ซิงค์ฟอสเฟตไฮเดรตทุกตัว เป็นผลึกแบบออร์โธโรมบิก และซิงค์ฟอสเฟตแอนไฮดรัสเป็นโมโนคลินิก ตรวจสอบรูปแบบการสั่นพื้นฐานด้วยเทคนิค FTIR พบว่ามีการสั่นของหน่วยย่อยของ  $PO_4^{3-}$  และ  $H_2O$  และสุดท้ายได้ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่าสารที่เตรียมได้มีรูปร่างและขนาดอนุภาคแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมชัดเจน

คำสำคัญ : ซิงค์ฟอสเฟต โครงสร้างผลึก สัณฐานวิทยา การตกตะกอนแบบธรรมดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

**Research Title:** Synthesis and characterization on zinc phosphate based compounds

**Researcher:** Somsak Woramongkolchai , Banjong Boonchom, Naratip Vittayakorn

**Faculty:** Science **Department:** Chemistry

## ABSTRACT

Zinc phosphate hydrates have been synthesized by a simple precipitation without precipitating agent using 12 raw material systems. Thermal transformations of zinc phosphate hydrates to zinc phosphate anhydrous were studied by TGA and 12 samples were obtained. Both syntheses of zinc phosphate hydrates to zinc phosphate anhydrous found percent yields in the range of 79-98. Characteristic methods were used for identification both compounds. XRD technique has been studied structural compounds, which found to be orthorhombic phase for all zinc phosphate hydrates and monoclinic phase for all zinc phosphate anhydrous. Fundamental vibrations of  $\text{PO}_4^{3-}$  anions and  $\text{H}_2\text{O}$  in structures have been determined by FTIR spectroscopy. Finally, morphologies of all samples were analyzed by SEM, which indicate that there are clearly different shapes and particle sizes depend on raw material systems.

**Keywords :** Zinc phosphate; Crystal structure; Morphology; Simple precipitation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงและราบรื่นเป็นอย่างดี ด้วยการได้รับการสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งบประมาณ 330,000 บาท คณะผู้ทำวิจัยต้องขอขอบพระคุณสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ที่เอื้ออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ ตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของสาร ด้วยเทคนิค FTIR XRD, TGA SEM และ DSC ขอขอบพระคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สำหรับความอนุเคราะห์ให้เครื่องตรวจวิเคราะห์โครงสร้าง XRD ขอขอบคุณนักศึกษาทั้งระดับปริญญาตรี โทและเอกที่ช่วยประสานงาน และทำการทดลองและทำการวิเคราะห์เครื่องมือสำหรับตรวจสอบเอกลักษณ์ที่ทำการวิจัยนี้ และต้องขอขอบพระคุณบุคคลที่ช่วยให้คำปรึกษา ชี้แนะ ประสานงาน และร่วมงานวิจัย คือ ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ และดร.สามารถ คงทวีเลิศ อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ วรณทิพย์ ฉัตรจุฑามณี อาจารย์ประจำสาขาเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์ วิทยาเขตขอนแก่น และ อาจารย์ทรงพร จึงมั่นคง อาจารย์ประจำคณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และสุดท้ายขอขอบประธานสาขาเคมีและท่านคณบดี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มีนโยบายสนับสนุนการทำวิจัยด้วยดีตลอดมาเป็นแรงบันดาลใจให้นักวิจัยมุ่งมั่นทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วง ตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

นายสมศักดิ์ วรมงคลชัย

นายบรรจง บุญชม

นายธนารัตน์ วิทยากร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 สมมุติฐานงานวิจัย และกรอบแนวความคิดในการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวกับการเตรียม	8
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวกับการตรวจสอบเอกลักษณ์ทาง โครงสร้าง	11
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเอกลักษณ์รูปแบบการสั้นของหน่วยย่อยภายใน โครงสร้าง โมเลกุล	14
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเอกลักษณ์ทางความร้อนของสารซิงค์ฟอสเฟต	17
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเอกลักษณ์ทางสัณฐานวิทยาของสารซิงค์ฟอสเฟต	18
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	20
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ	21
3.2 สารเคมี	21
3.3 วิธีการสังเคราะห์	22
3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารที่ศึกษา	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ

	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย</b>	26
4.1 ผลการสังเคราะห์ (Synthesis results)	26
4.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิคต่าง ๆ (Characteristic materials and Identification method)	29
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	60
5.1 สรุปผลการสังเคราะห์ (Synthetic results)	60
5.2 สรุปผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิคต่าง ๆ (Characteristic materials and Identification method)	61
5.3 ข้อเสนอแนะ	63
<b>บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง</b>	64
<b>ภาคผนวก: Reprints, manuscript และ บทความวิชาการ</b>	66
<b>ประวัตินักวิจัย</b>	67
สมศักดิ์ วรรณกุลชัย	67
บรรจง บุญชม	71
นาราธิป วิทยากร	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อมูลมาตรฐานทางโครงสร้างสารกลุ่ม ซิงค์ฟอสเฟตโครงสร้างต่าง ๆ	13
3.1 ปฏิกริยาการเตรียมซิงค์ฟอสเฟตด้วยตั้งต้นต่าง ๆ	23
4.1 ร้อยละผลผลิตของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ และ $Zn_3(PO_4)_2$ พร้อมจำนวนโมลของน้ำในโครงสร้างผลึก จากข้อมูล TGA	29
4.2 ขนาดผลึกและเลตติสพารามิเตอร์ ที่คำนวณได้จากรูปแบบการสะท้อนรังสี X-ray สำหรับสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$	43
4.3 ขนาดผลึกและเลตติสพารามิเตอร์ ที่คำนวณได้จากรูปแบบการสะท้อนรังสี X-ray สำหรับสารอนุพันธ์ทางความร้อน $Zn_3(PO_4)_2$	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
1.1	โครงสร้างของ (a) ไคไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $H_2PO_4^-$ ) (b) ไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $HPO_4^{2-}$ ) (c) ฟอสเฟต ( $PO_4^{3-}$ ) (d) ไพโรฟอสเฟต ( $P_2O_7^{4-}$ ) และ (e) ไซโคลเตตระฟอสเฟต ( $P_4O_{12}^{4-}$ )	3
2.1	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผลึกเชิงเดี่ยวของ (a) $KZn_2(PO_4)(HPO_4)$ และ (b) ZPAM ที่เตรียมด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล	6
2.2	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผลึก $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการตกตะกอนโดยใช้วุ้นหางจรเข้เป็นตัวกลาง	7
2.3	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ โดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นฟอสเฟตที่แตกต่างกัน คือ (a) $Na_2HPO_4$ (b) $Na_3PO_4$ (c) $NaH_2PO_4$ และ (d) $K_2HPO_4$	7
2.4	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (a) $\alpha-Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ และ $\alpha-Zn_3(PO_4)_2$ และ (b) $\beta-Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ และ $\beta-Zn_3(PO_4)_2$	11
2.5	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (a) $\alpha-Zn_3(PO_4)_2$ , $\beta-Zn_3(PO_4)_2$ และ $\gamma-Zn_3(PO_4)_2$	12
2.6	แสดงรูปร่างโครงสร้างสามมิติของครึ่งหน่วยเซลล์ของ (A) $\alpha-Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ และ (B) $\beta-Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$	12
2.7	สเปกตรัมการสั่นของ $\alpha-Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$	14
2.8	สเปกตรัมการสั่นของ $\beta-Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$	15
2.9	สเปกตรัมการสั่นของ $\alpha-Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$	15
2.10	สเปกตรัมการสั่นของ $\beta-Zn_3(PO_4)_2$ (c)	16
2.11	เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของ (a) $\alpha-Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$	17
2.12	เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของ (a) $\alpha-Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ และ (b) $\beta-Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$	17
2.13	สัณฐานวิทยาของ $\alpha-Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่เตรียมการตกตะกอนจากสารตั้งต้นต่างกัน คือ (a) $NH_4H_2PO_4-NaCl-Zn(NO_3)_2$	18
2.14	สัณฐานวิทยาของ $\alpha-Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่เตรียมโดยสารตั้งต้นต่างกัน คือ (a) $Na_2HPO_4-ZnCl_2$ (b) $Na_3PO_4-ZnCl_2$ (c) $NaH_2PO_4-ZnCl_2$ (d) $K_2HPO_4-ZnCl_2$	19
4.1	เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10^\circ C \text{ min}^{-1}$ ในแก๊ส $O_2$	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
4.2	เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + Na_2HPO_4$ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10^\circ C \text{ min}^{-1}$ ในแก๊ส $O_2$	30
4.3	เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + (NH_4)_2HPO_4$ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10^\circ C \text{ min}^{-1}$ ในแก๊ส $O_2$	31
4.4	เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10^\circ C \text{ min}^{-1}$ ในแก๊ส $O_2$	31
4.5	เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + Na_2HPO_4$ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10^\circ C \text{ min}^{-1}$ ในแก๊ส $O_2$	32
4.6	เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + (NH_4)_2HPO_4$ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10^\circ C \text{ min}^{-1}$ ในแก๊ส $O_2$	32
4.7	เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10^\circ C \text{ min}^{-1}$ ในแก๊ส $O_2$	33
4.8	เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + Na_2HPO_4$ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10^\circ C \text{ min}^{-1}$ ในแก๊ส $O_2$	33
4.9	เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + (NH_4)_2HPO_4$ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10^\circ C \text{ min}^{-1}$ ในแก๊ส $O_2$	34
4.10	เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10^\circ C \text{ min}^{-1}$ ในแก๊ส $O_2$	34
4.11	เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + Na_2HPO_4$ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10^\circ C \text{ min}^{-1}$ ในแก๊ส $O_2$	35
4.12	เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + (NH_4)_2HPO_4$ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10^\circ C \text{ min}^{-1}$ ในแก๊ส $O_2$	35
4.13	รูปแบบ XRD ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4(a)$ , $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4(b)$ , และ $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4(c)$	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
4.14 รูปแบบ XRD ของสาร $Zn_3(PO_4)_2$ ที่ได้จากการเผาที่ 200 °C 2 ชม. ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ (a), $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ (b), และ $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ (c)	39
4.15 รูปแบบ XRD ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ (a), $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ (b), และ $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ (c)	40
4.16 รูปแบบ XRD ของสาร $Zn_3(PO_4)_2$ ที่ได้จากการเผาที่ 200 °C 2 ชม. ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ (a), $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ (b), และ $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ (c)	40
4.17 รูปแบบ XRD ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$ (a), $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$ (b), และ $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$ (c)	41
4.18 รูปแบบ XRD ของสาร $Zn_3(PO_4)_2$ ที่ได้จากการเผาที่ 200 °C 2 ชม. ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$ (a), $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$ (b), และ $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$ (c)	41
4.19 รูปแบบ XRD ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$ (a), $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$ (b) และ $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$ (c)	42
4.20 รูปแบบ XRD ของสาร $Zn_3(PO_4)_2$ ที่ได้จากการเผาที่ 200 °C 2 ชม. ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$ (a), $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$ (b), และ $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$ (c)	42
4.21 FTIR สเปกตราของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ (a), $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ (b), และ $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ (c)	47
4.22 FTIR สเปกตราของสาร $Zn_3(PO_4)_2$ ที่ได้จากการเผาที่ 200 °C 2 ชม. ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ (a), $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ (b), และ $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ (c)	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
4.23	FTIR สเปกตร้าของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ (a), $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ (b), และ $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ (c)	48
4.24	FTIR สเปกตร้าของสาร $Zn_3(PO_4)_2$ ที่ได้จากการเผาที่ $200\text{ }^{\circ}C$ 2 ชม. ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ (a), $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ (b), และ $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ (c)	48
4.25	FTIR สเปกตร้าของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$ (a), $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$ (b), และ $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$ (c)	49
4.26	FTIR สเปกตร้าของสาร $Zn_3(PO_4)_2$ ที่ได้จากการเผาที่ $200\text{ }^{\circ}C$ 2 ชม. ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$ (a), $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$ (b), และ $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$ (c)	49
4.27	FTIR สเปกตร้าของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$ (a), $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$ (b) และ $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$ (c)	50
4.28	FTIR สเปกตร้าของสาร $Zn_3(PO_4)_2$ ที่ได้จากการเผาที่ $200\text{ }^{\circ}C$ 2 ชม. ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$ (a), $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$ (b), และ $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$ (c)	50
4.29	สัณฐานวิทยา SEM ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ (a), $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ (b), และ $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ (c)	51
4.30	สัณฐานวิทยา SEM ของสาร $Zn_3(PO_4)_2$ ที่ได้จากการเผาที่ $200\text{ }^{\circ}C$ 2 ชม. ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ (a), $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ (b), และ $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ (c)	52
4.31	สัณฐานวิทยา SEM ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ (a), $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ (b), และ $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ (c)	53
4.32	สัณฐานวิทยา SEM ของสาร $Zn_3(PO_4)_2$ ที่ได้จากการเผาที่ $200\text{ }^{\circ}C$ 2 ชม. ของสาร $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ (a), $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ (b), และ $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ (c)	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
4.33	55
4.34	56
4.35	57
4.36	58

4.33 สัณฐานวิทยา SEM ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$  (a),  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$  (b), และ  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$  (c)

4.34 สัณฐานวิทยา SEM ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่ได้จากการเผาที่  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  2 ชม. ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$  (a),  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$  (b), และ  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$  (c)

4.35 สัณฐานวิทยา SEM ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$  (a),  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$  (b), และ  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$  (c)

4.36 สัณฐานวิทยา SEM ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่ได้จากการเผาที่  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  2 ชม. ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$  (a),  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$  (b), และ  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$  (c)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 1

### บทนำ

จากงานวิจัยภายใต้หัวข้อเรื่อง “ การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของสารประกอบที่มีซิงค์ฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบหลัก(Synthesis and Characterization on zinc phosphate based compounds” คณะผู้ทำวิจัยได้แบ่งรายละเอียดของเนื้อเพื่อนำเสนอจัดทำเป็นรูปเล่มสมบูรณ์ประกอบด้วย เนื้อหา 5 บท ได้แก่ บทที่ 1 บทนำ บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย บทที่ 4 ผลการวิจัย และสุดท้าย บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ รายละเอียดในแต่ละบทจะประกอบด้วยหัวข้อย่อยที่เกี่ยวข้อง และในส่วนของบทที่ 1 ประกอบด้วยรายละเอียดต่าง ๆ คือ ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย สมมุติฐานงานวิจัย กรอบแนวความคิดในการวิจัย คำสำคัญของการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ นิยามศัพท์เฉพาะ โดยเนื้อเหล่านี้จะถูกกล่าวถึงดังต่อไปนี้

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน สารประกอบในกลุ่มของซิงค์ฟอสเฟตและที่มีซิงค์ฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสารประกอบกลุ่มนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมในประเภทต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย อาทิ เช่น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคลือบผิวโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อน เม็ดสีในอุตสาหกรรมเซรามิก ปุ๋ยชนิดพิเศษที่มีทั้งธาตุอาหารหลักคือ ธาตุฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและไนโตรเจน (ในกรณีที่มีองค์ประกอบเป็นโพแทสเซียมและแอมโมเนียมไอออน ตามลำดับ) และธาตุอาหารรอง คือ โลหะชนิดต่างๆ เช่น แมกนีเซียม Mg, แคลเซียม Ca, เหล็ก Fe, สังกะสี Zn, แมงกานีส Mn, ทองแดง Cu, โคบอลต์ Co เป็นต้น (ในกรณีที่มีองค์ประกอบของโลหะนั้น ๆ) เพื่อใช้สำหรับการเจริญเติบโตของพืช โดยสารเหล่านี้ จะมีความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างช้า ๆ โดยค่อย ๆ ละลายนํ้า ตามระยะเวลาที่เปลี่ยนไปเรื่อย ๆ โดยไม่ถูกชะล้างไปกับสถานการณ์ที่น้ำหลาก ทำให้พืชค่อย ๆ ดูดซึมธาตุอาหารเหล่านี้ที่ปลดปล่อยออกมาได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ยังถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ อาทิ เช่น ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดที่สามารถนำกลับมาบรรจุไฟฟ้าใหม่ได้ (rechargeable batteries) เช่น แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน เป็นต้น ซึ่งนำมาทดแทนเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดที่มีแคดเมียมหรือตะกั่วเป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและยากต่อการกำจัด ซึ่งตรงกันข้ามกับสารในกลุ่มโลหะฟอสเฟตที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า เริ่มตั้งแต่ของเสียจากกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สังเคราะห์สารและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์หรือแม้แต่ผลิตภัณฑ์ที่หมดอายุการใช้งานแล้ว สามารถที่จะกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อมด้วยกลไกทางธรรมชาติ สลายตัวเป็นปุ๋ยฟอสเฟตและจุลธาตุอาหารของพืชได้โดยไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้ยังมีสมบัติคงทนต่อการสึกกร่อน ให้พลังงานสม่ำเสมอและมีราคาค่อนข้างถูกอีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้น แบตเตอรี่เหล่านี้ยังสามารถควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ตามต้องการ เพียงแต่เปลี่ยนชนิดหรือปริมาณของโลหะที่อยู่ในสารประกอบนั่นเอง อาทิ เช่น ซิงค์คอปเปอร์ไฟโรฟอสเฟต ( $ZnCuP_2O_6$ ) ลิเทียมซิงค์ฟอสเฟต ( $LiZnPO_4$ ) ลิเทียมไอรอนฟอสเฟต ( $LiFePO_4$ ) ลิเทียมแมงกานีสฟอสเฟต ( $LiMnPO_4$ ) ลิเทียมโคบอลฟอสเฟต ( $LiCoPO_4$ ) และลิเทียมนิกเกิลฟอสเฟต ( $LiNiPO_4$ ) เป็นต้น ดังนั้น จึงสามารถเลือกแบตเตอรี่ที่มีความต่างศักย์ตามความเหมาะสมในอุปกรณ์แต่ละชนิดได้ และเมื่อไม่นานมานี้ สารกลุ่มนี้ยังได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นแบตเตอรี่เก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าในรถยนต์ระบบไฮบริดจ์ เนื่องจากมีความคงสภาพได้ในสภาวะอุณหภูมิสูงในรถยนต์ได้ดี นอกจากนี้สารในกลุ่มของ  $Zn(H_2PO_4)_2$ ,  $ZnHPO_4$  และ  $Zn_3(PO_4)_2$  ยังได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นสารเคลือบผิวเพื่อเป็นฉนวนไฟฟ้า เพื่อป้องกันไฟฟ้าลัดวงจรในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น แผงวงจรไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทรานส์ฟอร์มเมอร์ เป็นต้น เนื่องจากสารเหล่านี้มีความต้านทานไฟฟ้าสูง เป็นฉนวนที่ดี คงทนต่อการสึกกร่อน และคงสภาพต่อการใช้งานที่ภาวะอุณหภูมิสูงและกระบวนการเคลือบมีขั้นตอนไม่ยุ่งยากและใช้อุณหภูมิต่ำ ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตได้

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่า สารกลุ่มของซิงค์ฟอสเฟตมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมในประเทศไทยหลากหลายประเภท ซึ่งล้วนแต่เป็นอุตสาหกรรมหลักของประเทศทั้งสิ้น อาทิ เช่น อุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมการเกษตรและอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ดังนั้น ถ้าเรามีการวิจัย ศึกษาและพัฒนาในการผลิตสารเคมีเหล่านี้ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นหรือใช้ต้นทุนในการผลิตที่ถูกลงได้ ก็ย่อมสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์และลดต้นทุนการผลิตลงได้ ยิ่งไปกว่านั้น การวิจัยยังเป็นการสร้างองค์ความรู้ใหม่ สามารถผลิตและพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพสูงขึ้นหรือมีความแตกต่างจากสินค้าในท้องตลาด และมีความหลากหลายเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม อีกทั้งยังเป็นการยกระดับเทคโนโลยีเพื่อให้สามารถพึ่งพาเทคโนโลยีที่เป็นของตนเองได้ และนำไปสู่การพัฒนาประเทศที่ยั่งยืนในอนาคตต่อไป

ข้อความ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์ผลึกของสารประกอบที่มีซิงค์ฟอสเฟตเป็น องค์ประกอบหลัก

1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของสารประกอบที่มีซิงค์ฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ TG-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

DTA DSC XRD FTIR Raman SEM TEM และ VSM

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของวิธีการสังเคราะห์ที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของผงผลึกที่ได้

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

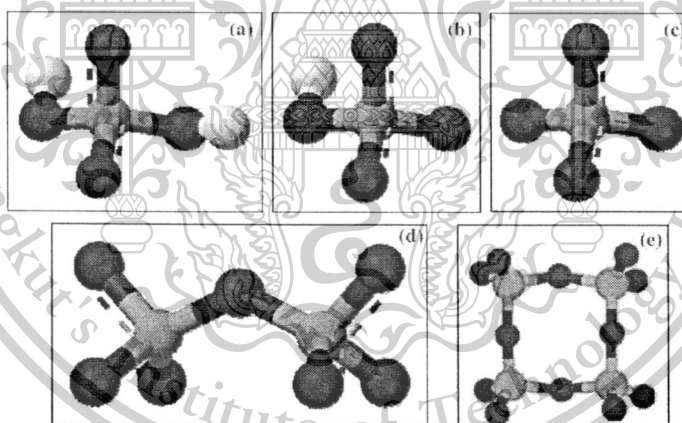
1.3.1 ทำการสังเคราะห์ผงผลึกของสารประกอบที่มีซิงค์ฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบหลัก

1.3.2 ทำการตรวจสอบ วิเคราะห์ผล เพื่อหาลักษณะเฉพาะของสารประกอบที่มีซิงค์ฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบหลักที่เตรียมได้ ด้วยเทคนิค TG-DTA DSC XRD FTIR Raman SEM TEM และ VSM

1.3.3 ทำการศึกษาผลของวิธีการสังเคราะห์ที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของผงผลึกที่ได้

### 1.4 สมมุติฐานงานวิจัย และกรอบแนวคิดในการวิจัย

สารประกอบโลหะฟอสเฟต โดยทั่วไป สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติและเกิดจากการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ สามารถเกิดสารประกอบอยู่ในหลายรูป โดยสามารถแบ่งออกตามโครงสร้างของหน่วยย่อยของฟอสเฟต ได้แก่ สารประกอบฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) ไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) ไพโรฟอสเฟต ( $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$ ) และ ไซโคลเตตระฟอสเฟต ( $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$ ) [2] ดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างของ (a) ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) (b) ไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) (c) ฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) (d) ไพโรฟอสเฟต ( $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$ ) และ (e) ไซโคลเตตระฟอสเฟต ( $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$ )

นอกจากนี้ยังพบว่า ที่สภาวะอุณหภูมิสูงค่าหนึ่ง ๆ โครงสร้างหน่วยย่อยของฟอสเฟตดังกล่าว สามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นหน่วยย่อยอื่น ๆ ได้ เช่น ไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) เปลี่ยนไปเป็น ไพโรฟอสเฟต ( $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$ ) หรือ ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) เปลี่ยนไปเป็น ไซโคลเตตระฟอสเฟต ( $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$ ) เป็นต้น ดังนั้น สารประกอบโลหะฟอสเฟต จึงสามารถเกิดสารประกอบได้หลายชนิดและหลากหลายกลุ่ม โดยความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แตกต่างของปริมาณและชนิดของโลหะที่เกิดสารประกอบ จะยิ่งทำให้ความหลากหลายของสารประกอบเพิ่มมากขึ้น โดยสารแต่ละชนิดก็มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเฉพาะตัวที่แตกต่างกันไป ส่งผลให้สามารถนำสารประกอบเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ ได้มากมายและมีความเหมาะสม จากความสำคัญของสารกลุ่มโลหะฟอสเฟตที่ได้กล่าวข้างต้น ทำให้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาเป็นจำนวนมาก โดยงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มุ่งความสนใจไปที่การสังเคราะห์สารกลุ่มนี้ด้วยเทคนิคต่างๆ อาทิ เช่น การเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอน (precipitation) การตกตะกอนร่วม (co-precipitation) ไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) โซล-เจล (sol-gel) ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction) และอื่น ๆ โดยได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี อาทิ เช่น สมบัติความเสถียรทางความร้อน ลักษณะทางโครงสร้าง สัมฐานวิทยา สมบัติการดูดกลืนแสง และสมบัติความเป็นแม่เหล็ก เป็นต้น โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ได้สารที่มีสมบัติต่างๆ ที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานตามความต้องการ

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ในกระบวนการสังเคราะห์ผลึกของสารประกอบ ที่มีซิงค์ฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบให้ได้ความบริสุทธิ์สูง
- 1.5.2 เพื่อศึกษาผลของวิธีการสังเคราะห์ที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของผลึกที่ได้
- 1.5.3 เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจเรื่องเทคนิค ในการสังเคราะห์ผลึกของสารประกอบที่มีซิงค์ฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ ซึ่งจะเป็พื้นฐานข้อมูลสำหรับการวิจัยนำไปสู่การเตรียมสารประกอบที่มีโลหะฟอสเฟตกลุ่มอื่นๆต่อไป
- 1.5.4 ได้ผลงานวิจัยที่สามารถนำไปเสนอในที่ประชุมวิชาการ และตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานลงในวารสารทางวิชาการระดับชาติและนานาชาติ ตลอดจนการนำไปเป็นกรณีศึกษาสำหรับประกอบการเรียนการสอนในกระบวนวิชาต่างๆ เช่น การประดิษฐ์วัสดุสำหรับนักศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์ วัสดุศาสตร์และเคมีอุตสาหกรรม ทุกระดับชั้นต่อไป
- 1.5.5 บุคลากรรุ่นใหม่ได้รับการฝึกฝนทักษะการวิจัย และได้รับการถ่ายทอดความรู้รวมทั้งเทคนิคต่างๆ ทำให้มีความรู้ความเชี่ยวชาญในเรื่องที่เกี่ยวข้องในระดับสูงเพิ่มมากขึ้น สามารถเป็นกำลังสำคัญของการพัฒนางานการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศ และวงการอุตสาหกรรมระดับชาติอย่างยั่งยืนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม

สำหรับสารประกอบกลุ่มของซิงค์ฟอสเฟต และที่มีซิงค์ฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ ก็สารประกอบโลหะฟอสเฟตชนิดหนึ่งที่ได้รับคามสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ อย่างหลากหลายดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า สามารถเตรียมสารประกอบซิงค์ฟอสเฟตเหล่านี้ได้หลายวิธี อาทิ เช่น งานวิจัยของ Lapshin (2005) สามารถเตรียมผลึกของ  $Zn_3(PO_4)_2$  ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็งได้ ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถเตรียมสารได้ที่ละปริมาณมากๆ วิธีการไม่ยุ่งยาก สารตั้งต้นราคาค่อนข้างถูก อย่างไรก็ตาม การเตรียมด้วยวิธีนี้ยังมีข้อด้อยอยู่ คือ มีการใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูง ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน อนุภาคที่ได้มีปัญหาเรื่องการเกาะกลุ่มกันกลายเป็นอนุภาคใหญ่และไม่สม่ำเสมอ ทำให้ต้องมีการบดย่อยอยู่เสมอ ส่งผลให้มีโอกาสปนเปื้อนได้ง่าย ทำให้ความบริสุทธิ์ของสารค่อนข้างต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพของสารด้อยลงไป ยิ่งไปกว่านั้น สารตั้งต้นที่ใช้มักจะเป็นกลุ่มของโลหะคาร์บอเนต ในกระบวนการสังเคราะห์จึงมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมตามมา และเนื่องจากอนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอจึงส่งผลให้เมื่อนำไปประยุกต์ใช้ เช่น การเคลือบผิว ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพต่ำ เช่น ความหนาไม่สม่ำเสมอ ผิวไม่เรียบ การเกาะกับผิววัสดุรองรับไม่ดี เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยหลายกลุ่มที่สามารถเตรียมผลึกเชิงเดี่ยว (single crystal) ของสารกลุ่มนี้ได้ เช่น งานวิจัยของ Echavaria และคณะ (2003) สามารถทำการสังเคราะห์ผลึกเชิงเดี่ยวของ  $KZn_2(PO_4)(HPO_4)$  ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลได้ แสดงดังภาพที่ 2.1 (a) ต่อมา Logar และคณะ (2005) ก็ สามารถเตรียมผลึกเชิงเดี่ยวของ  $[H_2NCH(CH_3)CH_2NH_3]^{2+} \cdot 0.75[COOH(CH_2)COOH] \cdot 0.25(Zn_3P_3O_{11}OH)^{2-} \cdot 0.5NH_4^+$  (ZPAM) ด้วยเทคนิคเดียวกัน แสดงดังภาพที่ 2.1(b)

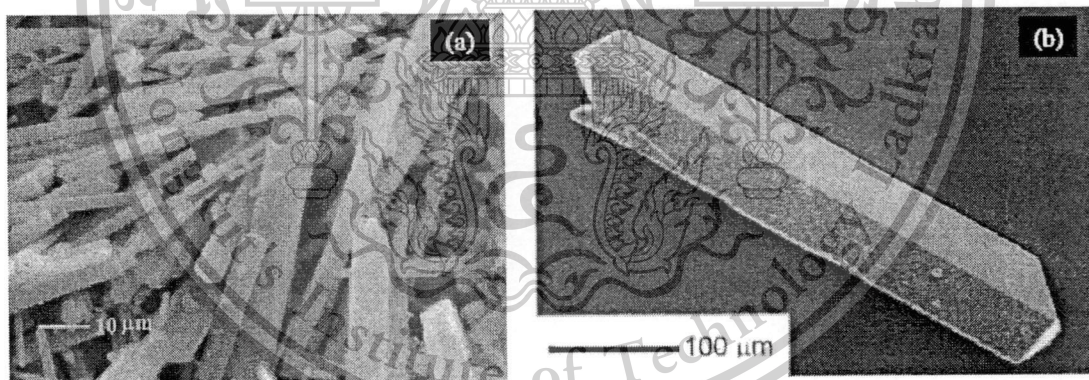
นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยหลายกลุ่มที่สามารถเตรียมสารในกลุ่มนี้ ให้มีอนุภาคนาโนเมตรได้ด้วย เช่น งานวิจัยของ Ding และคณะ (2008) ได้ทำการเตรียมผลึกของ  $CaZn_2(PO_4)_2$  ด้วยเทคนิคการตกตะกอน พบว่าผลึกที่เตรียมได้มีความบริสุทธิ์สูงและมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร (45 – 55 นาโนเมตร) แต่อย่างไรก็ตาม ผลึกที่ได้มักเกิดการเกาะกลุ่มกัน (agglomerate) ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Chung (2005) สามารถทำการเตรียมผลึกระดับนาโนเมตรของ Hydroxyapatite ( $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ , HAp) ด้วยกระบวนการโซล-เจล ได้เช่นเดียวกัน โดยพบว่า วิธีดังกล่าวสามารถเตรียมสารกลุ่มนี้ได้ดี โดยได้สารที่มีความบริสุทธิ์สูง บางเทคนิคสามารถเตรียมผลึกได้ขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ถึงระดับนาโนเมตรและมีขนาดสม่ำเสมอ อย่างก็ตาม ในการเตรียมสารด้วยวิธีนี้ยังมีข้อด้อย คือ สามารถเตรียมสารได้ในปริมาณที่น้อย สารตั้งต้นราคาค่อนข้างสูง มีกระบวนการค่อนข้างซับซ้อนและมีตัวแปรควบคุมหลายตัว ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ไม่เหมาะสมที่นำไปเตรียมสารในระดับภาคอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามเมื่อไม่นานมานี้ มีนักวิจัยได้ทำการศึกษาการเตรียมสารในกลุ่มของโลหะฟอสเฟตด้วยเทคนิคการตกตะกอนโดยผ่านตัวกลางชนิดต่างๆ อาทิ เช่น เอทานอล อะซิโตน ไซโทล วานหางจระเข้และจุลชีพ เป็นต้น ซึ่งพบว่า สารที่เตรียมได้มีความบริสุทธิ์สูงและสามารถควบคุมสมบัติทางกายภาพของสารได้โดยการควบคุมตัวแปรต่างๆ ในการเตรียมสาร เมื่อพิจารณางานวิจัยที่ผ่านมา เช่น งานวิจัยของ Tas (2009) สามารถเตรียมผงผลึกให้มีขนาดต่างๆ รวมไปถึงระดับนาโนเมตร ของ  $\text{CaHPO}_4$  ได้ โดยการเตรียมด้วยเทคนิคการตกตะกอนโดยใช้เอทานอลเป็นตัวกลางในสถานะที่อุณหภูมิห้อง งานวิจัยของ Klinkaewnarong และคณะ (2010) ได้ทำการเตรียม Hydroxyapatite ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ , HAp) (ภาพที่ 2.2) ด้วยเทคนิคการตกตะกอนโดยใช้วานหางจระเข้เป็นตัวกลางและนำไปทำการเผาแคลไซน์ที่ 400-800 องศาเซลเซียส พบว่า ผงผลึกที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง อีกทั้งยังมีขนาดของอนุภาคอยู่ในระดับนาโนเมตรอีกด้วย (43-171 นาโนเมตร) หรือจะเป็นงานวิจัยของ Yan และคณะ (2009) ได้ทำการเตรียมสารซิงค์ฟอสเฟต โดยใช้ยีสเป็นตัวช่วยการกระจายตัวของสารตั้งต้นที่เป็นซิงค์ซัลเฟต ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) และปรับทิศทางการเข้าทำปฏิกิริยากับ โซเดียมฟอสเฟต ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ) ได้อย่างเหมาะสม ทั้งเป็นตัวขัดขวางการเจริญของเกรนทำให้ผงผลึกที่ได้มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรได้

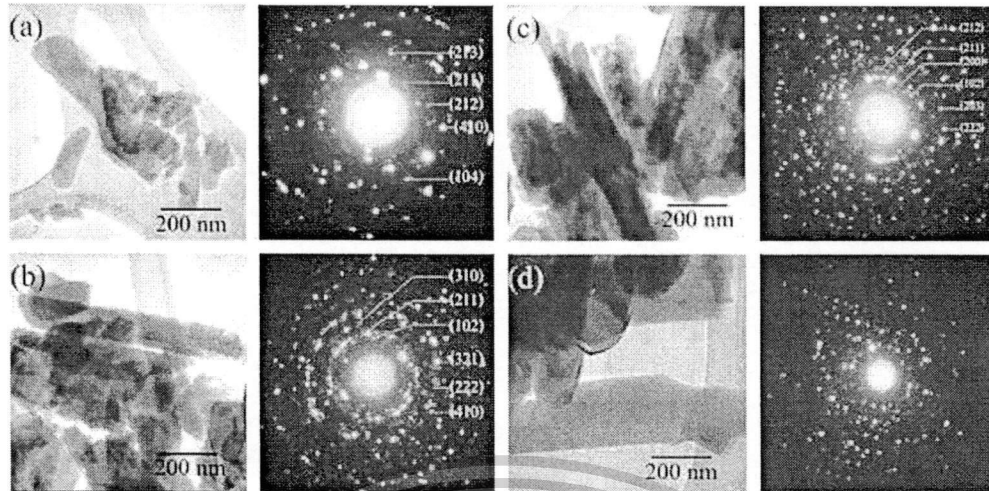


ภาพที่ 2.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผลึกเชิงเดี่ยวของ (a)  $\text{KZn}_2(\text{PO}_4)(\text{HPO}_4)$  และ (b) ZPAM ที่เตรียมด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล ที่มา: Echavarría และคณะ (2003)

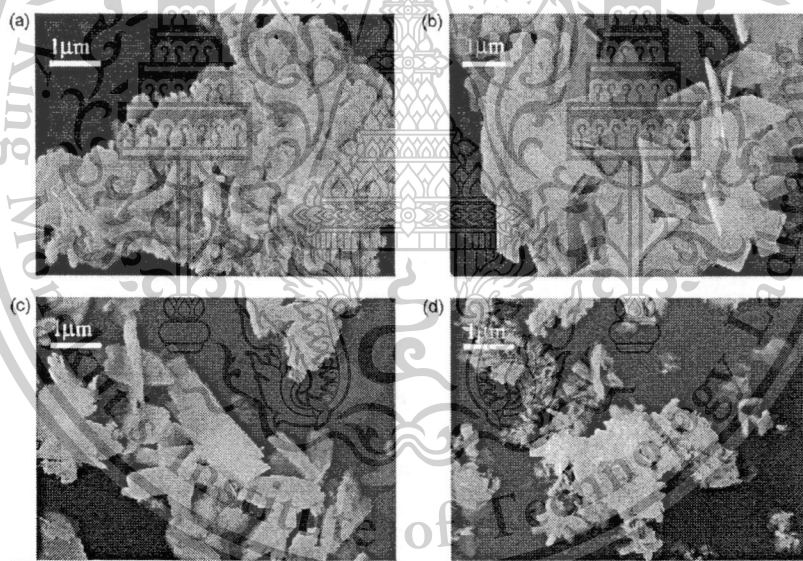
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 2.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผลึก  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  ที่เตรียมด้วยเทคนิคการตกตะกอนโดยใช้วุ้นหางจระเข้เป็นตัวกลาง  
ที่มา : Chung (2005)



ภาพที่ 2.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  โดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นฟอสเฟตที่แตกต่างกัน คือ (a)  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  (b)  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  (c)  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  และ (d)  $\text{K}_2\text{HPO}_4$   
ที่มา : Yan และคณะ (2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

นอกจากนี้ ยังมีนักวิจัยหลายกลุ่มที่ให้ความสนใจเกี่ยวกับผลของชนิดของสารตั้งต้นที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของผลึกที่ได้ อาทิ เช่น งานวิจัยของ Boonchom และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาการเตรียมผลึกของ  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  โดยใช้สารตั้งต้นที่ต่างชนิดกัน คือ แมงกานีสคาบอเนต ( $\text{MnCO}_3$ ) และโลหะแมงกานีส (Mn) พบว่า ผลึกที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาคที่ต่างกันอย่างเด่นชัด หรือจะเป็นงานวิจัยของ Pawlig และคณะ (2007) ได้ทำการเตรียมผลึก  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  โดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นฟอสเฟตที่แตกต่างกัน 4 ชนิด คือ  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  และ  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  พบว่า ผลึกที่เตรียมได้มีลักษณะทางกายภาพของผลึกแตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังภาพที่ 2.3

จากตัวอย่างที่กล่าวมาข้างบนนั้น ได้อธิบายสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารที่ศึกษานี้ บางส่วนเท่านั้น โดยคุณสมบัติจะแปรเปลี่ยนไปตามขั้นตอน กระบวนการ เทคนิค สารตั้งต้น สภาวะต่าง ๆ ของการเตรียม ด้วยเหตุนี้เอง การเตรียมสารชนิดนี้ จึงมีการศึกษาค้นคว้ากันอย่างแพร่หลาย โดยในรายละเอียดบทนี้ จึงขออธิบายวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ที่ประกอบด้วย การเตรียมสารนี้ด้วยวิธีการที่ศึกษามาก่อน และการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารนี้ โดยแบ่งออกเป็น การเตรียมเอกลักษณ์ทางด้วยความร้อน การตรวจสอบเอกลักษณ์ทางด้านโครงสร้าง การตรวจสอบเอกลักษณ์ทางด้านรูปแบบการสั่นพื้นฐานภายในหน่วยย่อยของโมเลกุล การตรวจสอบเอกลักษณ์ทางสัณฐานวิทยา และสุดท้ายการตรวจสอบทางทฤษฎีจลนพลศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์การสลายตัวทางความร้อนของสารนี้ ที่มีมาก่อนในอดีต

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวกับการเตรียม

Pawlig และ Trettin (1999) ได้เตรียม Orthorhombic  $\alpha\text{-Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\alpha\text{-hopeite}$ , จากสารละลาย zinc acetate และ orthophosphoric acid. ด้วยเทคนิคการตกตะกอน จากการปรับค่า pH 4.0 ด้วย 1M KOH แล้วนำไปปั่นกวนด้วย magnetic stirring ที่  $50^\circ\text{C}$  ประมาณ 2 h แล้วกรอง ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปอบที่  $30^\circ\text{C}$  ประมาณ 4 h

Yuan et al (2006) ได้เตรียม Nanoparticle zinc phosphate dihydrate ด้วยเทคนิค solid-state reaction ด้วยสาร  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  สัดส่วน 1 : 1.5 บดผสมด้วยกับ non-ionsurfactant OP-10 เป็นเวลา 60 นาที แล้วค่อย ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 24 h ที่สภาวะอุณหภูมิของระบบ จากนั้นกรอง ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น จากนั้นค่อยล้างด้วยเอทานอลหลายครั้ง แล้วทำให้แห้งที่  $175^\circ\text{C}$

Herschke et al. (2006) ได้ทำการเตรียม  $\alpha$  และ  $\beta\text{-hopeite}$ ,  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ด้วยเทคนิค ไฮโดรเทอร์มัล ขั้นตอน คือ ผสมสารละลาย 100 mL ของ  $0.114 \text{ mol L}^{-1}$  Zinc acetate กับ 5.5 mL ของสี่เท่าการเจือจางของกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85 wt% solution สัดส่วนโมลคือ  $\text{Zn} : \text{PO}_4 = 1:1.05$  ใช้เวลาอย่างน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2 ชม. ที่ pH 4 พร้อมคนเบาๆ ที่อุณหภูมิ 90.0 และ 20.0 °C จะได้  $\alpha$  และ  $\beta$ -hopeite,  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ตามลำดับ

Ai-Qun et al (2007) ได้เตรียม  $\alpha$ - $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ด้วยการบดผสมระหว่าง  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$  and  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  สัดส่วน 1 : 1.5 ประมาณ 60 นาที โดยบดผสมไปกับ nonionic surfactant OP-10 ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชม จากนั้นกรองแล้วล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นจนไม่มีสารตั้งต้นตกค้าง แล้วล้างอีกครั้งด้วย เอทานอล ค่อยนำไปอบที่ 80 °C

Grzmil et al (2007) ได้เตรียม  $Zn_3(PO_4)_2$  ผ่าน  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  วิธี 2 วิธี คือ

วิธีแรก การผสมสารละลาย ซึ่งค้ในเทรตกับไดแอมโมเนียมฟอสเฟต โดยตกตะกอนที่อุณหภูมิ 0-100 °C แล้วนำไปไล่น้ำออกที่อุณหภูมิ 200-300 °C ประมาณ 1-2 h

วิธีที่สอง ผสมสารละลายระหว่าง ซึ่งค้ในเทรตกับไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และสารประกอบเชิงซ้อน ซิตริก รักษาอุณหภูมิ 348-353 K ประมาณ 3 h แล้วค่อยนำไปเผาที่ 453 K ประมาณ 5-120 นาที ถัดมาค่อยเผาที่ 873-1023K เป็นเวลา 30-120 นาที

Purnendu Parhi et al (2008) ได้เตรียม  $\alpha$ -hopeite,  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ด้วยเทคนิค the metathetic pathway โดยปฏิกิริยาระหว่างแหล่งของฟอสฟอรัสต่าง ๆ ได้แก่  $Na_3PO_4$ ,  $Na_2HPO_4$ ,  $NaH_2PO_4$ , and  $K_2HPO_4$ ) กับ  $ZnCl_2$  ขั้นตอนคือ การบดผสมระหว่าง  $Na_3PO_4$  กับ  $ZnCl_2$  สัดส่วนโมล 1 : 1.5 เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นล้างผงที่ได้ด้วย 50 mL ของน้ำกลั่นและอะซิโตน ขณะที่แหล่งของฟอสฟอรัสชนิดอื่น ๆ ก็เตรียมด้วยขั้นตอนด้วยกันนี้

Roming et al (2008) ได้เตรียม Zinc phosphate nanoparticles ผ่าน a polyol-mediated synthesis. โดย polyol คือ glycerine, ethylene glycol, or diethylene glycol (DEG), ขั้นตอน คือ การผสมระหว่าง  $ZnAc_2 \cdot 2H_2O$  ใน diethylene glycol (DEG) and  $(NH_4)(H_2PO_4)$  in water. ทำการระเหยที่อุณหภูมิ 50 °C แล้วค่อยถ่ายไปรีฟลักซ์ที่ 230 °C 45 นาที

He et al (2009) ได้เตรียม zinc phosphate crystals with mesoporous structure by chemical precipitation using yeasts as a template. ชั่ง dry yeasts 2 g ใส่ในสารละลายกลูโคส 2 wt% 150 mL ที่ 36 °C ประมาณ 30 นาที จากนั้นเติมลงไปในซิงค์ซัลเฟต 4.31 g คนอย่างต่อเนื่อง ที่ 36 °C ประมาณ 2 h แล้วค่อยเติมกรดสารละลาย 0.1 M, 100 mL ของ  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$  แล้วใช้ 0.05 M NaOH ปรับค่า pH 8-10 คนไปพร้อมกันประมาณ 2 h ตั้งทิ้งไว้ที่ 25 °C ประมาณ 48 h แล้วค่อยทำการปั่นแห้งแยกตะกอนออก ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล ในที่สุด ทำให้แห้งด้วยการอบ 80 °C ประมาณ 24h นำไปเผาไล่ surfactant ที่ 500 และ 750 °C ประมาณ 2h

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Jung et al (2009) ได้ทำการเตรียม Amorphous zinc phosphate nanospheres ด้วยเทคนิค Sonochemical ขั้นตอน คือ ชั่ง 0.4582 g zinc phosphate tetrahydrate ละลายในสารผสม 15 mL ของ สารละลายแอมโมเนีย (28-30 % wt) และ 85 mL ของน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง โดยให้ สารละลายซิงค์ ฟอสเฟต และแอมโมเนียมีความเข้มข้น 0.01 และ 2.36 M ตามลำดับ รักษาสภาพ pH 12.3 จากถ้ำลงใน เครื่อง a sonochemical apparatus (frequency of 20 kHz) ให้มีคลื่นอัลตราโซนิกความเข้ม  $39.5 \text{ W/cm}^2$  เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นกรอง ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น และทำให้แห้งด้วยตู้อบ

Yan et al.(2009) ได้ทำการเตรียม zinc phosphate nanoparticles by chemical precipitation using yeast cells. ขั้นแรก คือ ชั่ง dry yeasts ใส่ในสารละลายกลูโคส 2 wt% 50 mL ที่  $36^\circ\text{C}$  ประมาณ 30 นาที จากนั้นเติมลงไป ในสารละลายซิงค์ซัลเฟต 0.1 M, 150 mL คนเป็นเวลา 24 h ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้น ค่อยหยดสารละลาย 0.1 M, 100 mL ของ  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  คนไปพร้อมกันประมาณ 2 h ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 48 h การเตรียมนี้ใช้ 0.05 M NaOH ปรับค่า pH 8-10 ของสารผสมเพื่อให้ตกตะกอน แล้วค่อยทำการปั่น แหว่งแยกตะกอนออก ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล ในที่สุด

Liang and Li (2011) ได้ทำการเตรียม Novel  $\alpha\text{-Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  hierarchical sphere structures ด้วย เทคนิค a simple chemical method ผ่านปฏิกิริยาระหว่าง zinc acetate and orthophosphoric acid by using cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) as capping reagent at room temperature. ขั้นตอนการเตรียม คือ ละลาย 0.218 g CTAB ใน 30 mL น้ำกลั่น โดยปั่นแหว่งแรงๆ หลังจากนั้นเติม zinc acetate ( $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_4\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ที่เหมาะสมลงไป สุดท้ายค่อยหยด 0.07 mol/L กรดฟอสฟอริก ลงให้มีสัดส่วนโมล Zn/P 3/2 พร้อมปั่นแหว่งอย่างรุนแรง โดยตะกอนจะเกิดขึ้น ต้องปรับ pH 7.0 ด้วย NaOH ใช้เวลาปั่น แหว่ง 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง เสร็จแล้ว กรอง ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นและ เอทานอลแห้ง แล้วอบตะกอนให้ แห้งที่  $50^\circ\text{C}$

Wondee et al (2011) ได้ทำการเตรียม  $\alpha\text{-Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ด้วยเทคนิคการตกตะกอนอย่างรวดเร็ว ระหว่างปฏิกิริยา  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  (AR grade) ในสัดส่วนโมล Zn:P 3:2.ปั่นแหว่งเป็น เวลา 15 นาที จากนั้นล้างตะกอนสีขาวด้วยน้ำกลั่นและอะซิโตน อบแห้งตะกอนที่  $110^\circ\text{C}$  ประมาณ 2 h

Xie et al (2012) ได้เตรียมสาร ซิงค์ฟอสเฟตที่สามารถควบคุมอนุภาคให้ขนาดเล็กได้ ด้วยเทคนิค สารละลาย ณ อุณหภูมิห้อง สารตั้งต้นที่ใช้เป็น  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4\text{-NaCl-Zn}(\text{NO}_3)_2$  โดยเมื่อเตรียมสารตั้งต้นที่ความ เข้มข้นที่เหมาะสม สองส่วน คือ สารละลายผสมระหว่าง  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4\text{-NaCl}$  และ สารละลาย  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$  จากนั้นค่อยผสมสารละลาย  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$  ลงใน สารละลายผสมระหว่าง  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4\text{-NaCl}$  ปั่นกวนด้วยเครื่อง Magnetic stirring จนกลายเป็นเนื้อเดียวกัน และค่อยปรับ pH ด้วย NaOH เพื่อให้ตกตะกอนปั่นกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

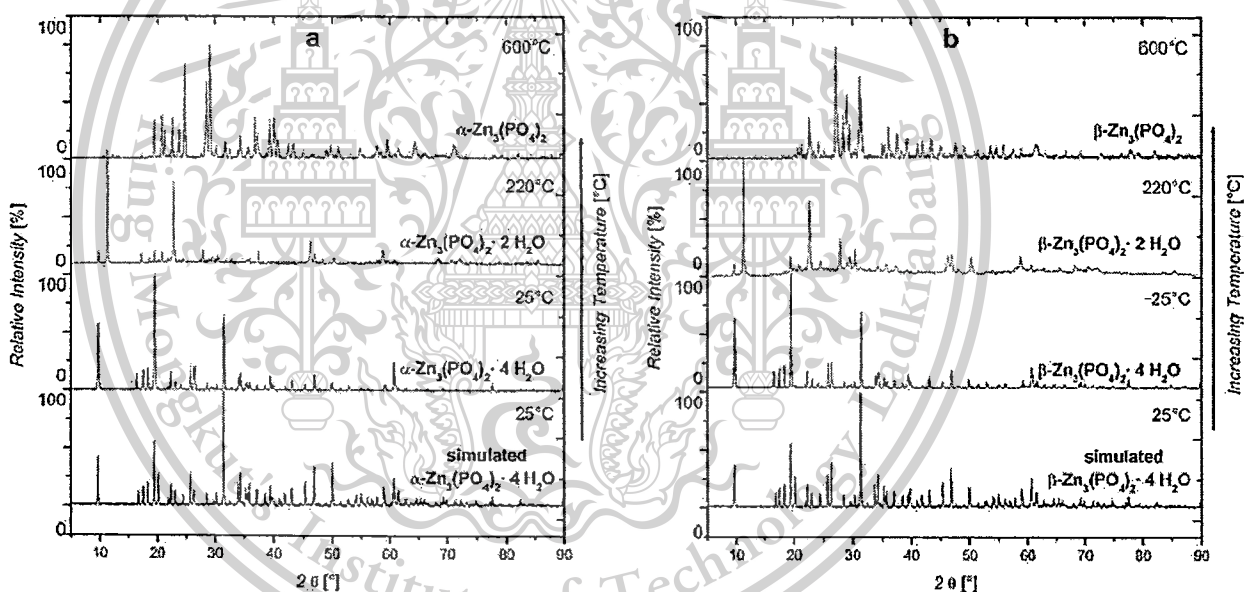
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ประมาณ 10 นาที แล้วต่อยดั่งทิ้งไว้ประมาณ 5 วัน ก็จะเกิดตะกอน ทำการแยกตะกอนด้วยการปั่นเหวี่ยง แล้วตะกอนด้วยน้ำและเอทานอล แล้วทำให้แห้งที่ 60 °C 60 นาที

### 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวกับการตรวจสอบเอกลักษณ์ทางโครงสร้าง

สารที่ทำการศึกษาวิจัยนี้ มุ่งศึกษาสารซิงค์ฟอสเฟต คือ  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  และ  $Zn_3(PO_4)_2$  โดยสารทั้งสองชนิดนี้ ก็จะมีโครงสร้างแตกต่างกันในตัวของตัวเอง คือ สาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  จะมีโครงสร้าง 2 แบบ ได้แก่ แอลฟา ( $\alpha$ ) และเบต้า ( $\beta$ ) ในขณะที่ สาร  $Zn_3(PO_4)_2$  มีโครงสร้าง 3 แบบ ได้แก่ แอลฟา ( $\alpha$ ) เบต้า ( $\beta$ ) และ แกมมา ( $\gamma$ ) ลักษณะของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD patterns) ของสารเหล่านี้ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 และภาพที่ 2.5 ส่วนโครงสร้างแบบสามมิติ แสดงไว้ในภาพที่ 2.6 และตารางที่ 2.1 แสดงสรุปพารามิเตอร์ของสารเหล่านี้ ที่ศึกษามาในอดีต



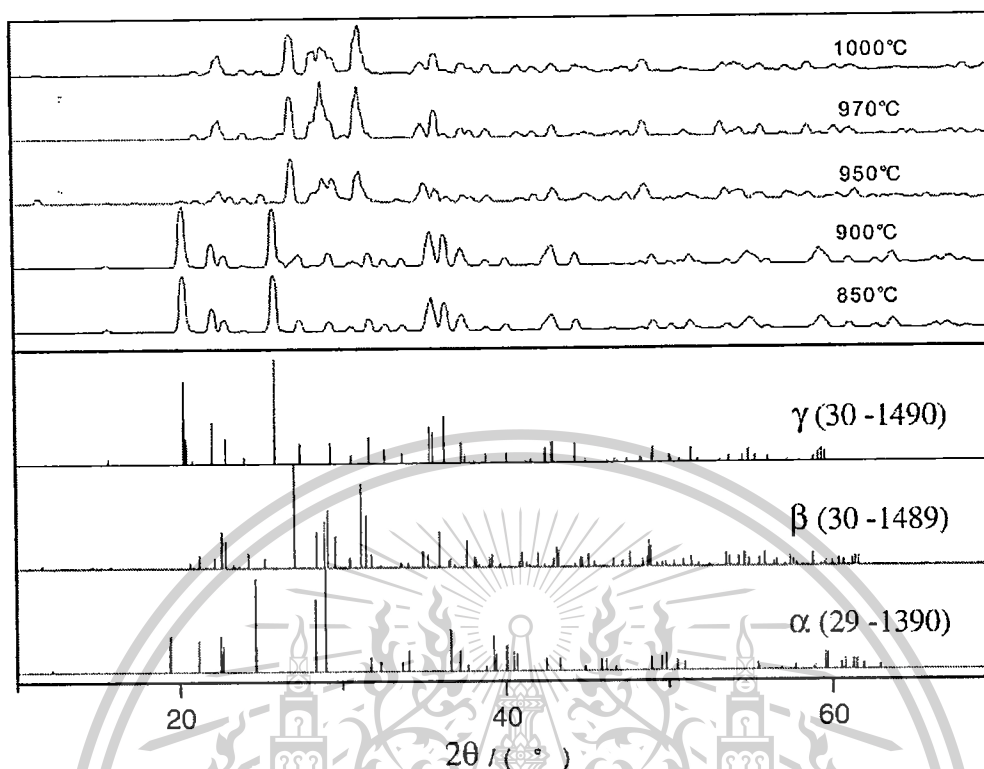
ภาพที่ 2.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (a)  $\alpha$ - $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  และ  $\alpha$ - $Zn_3(PO_4)_2$  และ (b)  $\beta$ - $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  และ  $\beta$ - $Zn_3(PO_4)_2$

ที่มา : Herschke et al., 2006

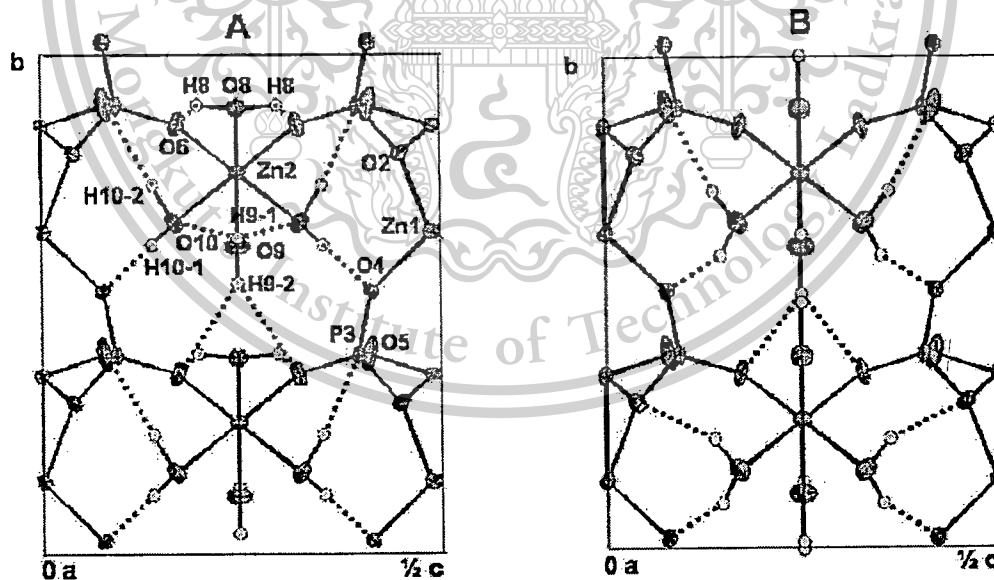
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 2.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (a)  $\alpha$ - $Zn_3(PO_4)_2$ ,  $\beta$ - $Zn_3(PO_4)_2$  และ  $\gamma$ - $Zn_3(PO_4)_2$   
ที่มา : Song et al., 2007



ภาพที่ 2.6 แสดงรูปร่างโครงร่างสามมิติของครึ่งหน่วยเซลล์ของ (A)  $\alpha$ - $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  และ (B)  $\beta$ - $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$   
ที่มา : Herschke et al., 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลมาตรฐานทางโครงสร้างสารกลุ่ม ซิงค์ฟอสเฟต โครงสร้างต่าง ๆ

ลำดับ	สาร	PDF no.	a/ nm	b/ nm	c/ nm	$\alpha$ / °	$\beta$ / °	$\gamma$ / °	d/ gmL <sup>-1</sup>	ระบบผลึก	Space group
1	Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	80-0561	8.70	4.89	16.70		94.43		3.791	Monoclinic	P2 <sub>1</sub> /c(14)
2	Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	77-1297	10.64	18.35	5.04				3.092	Orthorhombic	Pnma (62)
3	Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	76-0896	10.59	18.31	5.03				3.116	Orthorhombic	Pnma (62)
4	Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	74-2275	10.64	18.36	5.04				3.091	Orthorhombic	Pnma (62)
5	Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	72-1450	5.757	7.534	5.63	93.53	91.30	91.55	3.126	Anorthic	P $\bar{1}$ (2)
6	Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	70-1908	5.768	7.550	5.28	93.42	91.18	91.37	3.319	Anorthic	P $\bar{1}$ (2)
7	Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	70-1907	10.55	18.19	5.03				3.149	Orthorhombic	Pnma (62)
8	Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	70-0900	10.62	18.33	5.04				3.097	Orthorhombic	Pnma (62)
9	Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	41-0493	10.45	5.036	31.44		92.46		3.392	Monoclinic	P2 <sub>1</sub> /c(14)
10	Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	39-1352	5.767	7.544	5.28	93.44	91.20	91.40	3.320	Anorthic	P $\bar{1}$ (2)
11	Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	37-0465	10.60	18.30	5.03				3.118	Orthorhombic	Pnma (62)
12	Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	37-0316	8.696	4.891	16.70		94.94		3.794	Monoclinic	P2 <sub>1</sub> /c(14)
13	Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	33-1474	10.61	18.31	5.03					Orthorhombic	Pnma (62)
14	$\gamma$ -Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	76-0604	5.074	8.496	8.77		120.85		3.965	Monoclinic	P2 <sub>1</sub> /c(14)
15	$\alpha$ -Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	76-0518	8.140	5.630	15.04		105.13		3.854	Monoclinic	C2/c(15)
16	$\beta$ -Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	73-1683	9.393	9.170	8.686		125.73		4.222	Monoclinic	C2/c(15)
17	$\alpha$ -Zn <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	72-1702	20.06	8.259	9.099		106.35		4.196	Monoclinic	I2/c
18	$\gamma$ -Zn <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	49-1240	4.950	13.33	16.48				3.720	Orthorhombic	Pbcm (57)
19	$\beta$ -Zn <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	34-1275	6.610	8.290	4.51		105.40			Monoclinic	C2/m(12)
20	$\gamma$ -Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	30-1490	7.549	8.499	5.05		95.03		3.973	Monoclinic	P2 <sub>1</sub> /n(14)
21	$\beta$ -Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	30-1489	8.685	9.179	8.27		112.80		4.222	Monoclinic	P2 <sub>1</sub> /a(14)
22	$\alpha$ -Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	29-1390	15.00	5.635	8.18		105.0		3.837	Monoclinic	A2/a(15)

จากข้อมูลทางโครงสร้างของสารจะเห็นว่า  $\alpha$ -Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O  $\beta$ -Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O  $\alpha$ -Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>,  $\beta$ -Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> และ  $\gamma$ -Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> จะมีลักษณะรูปแบบการเรียงเบนริงส์อิเล็กส์ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 จึงสามารถนำเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครังสีเอกส์มาตรวจสอบเอกลักษณ์ทางโครงสร้างของสารที่เตรียมขึ้นได้ในงานวิจัยนี้ได้ อีกทั้งจากข้อมูลทางการเรียงเบนริงส์อิเล็กส์ ก็สามารถนำมาคำนวณหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

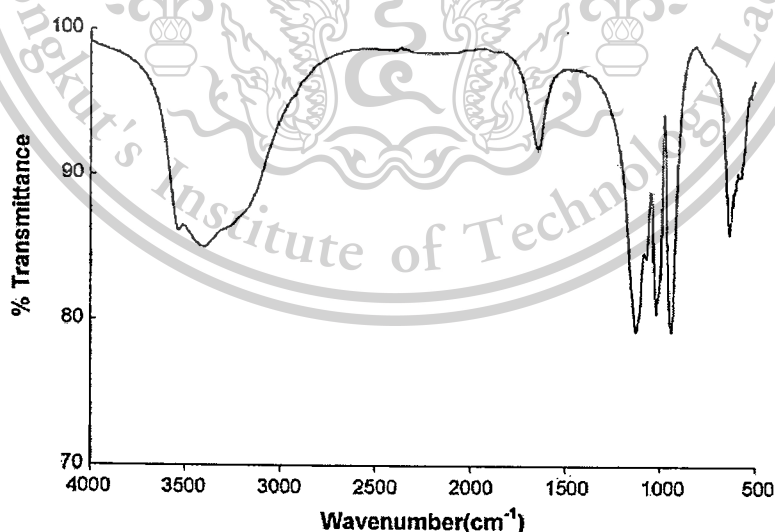
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

พารามิเตอร์ ของหน่วยเซลล์ของผลึกดังที่แสดงไว้ในตาราง ที่ 2.1 ได้ เปรียบเทียบการยืนยันข้อมูลของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ว่ามีความน่าเชื่อถือและเป็นไปได้มากที่สุด

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเอกลักษณ์รูปแบบการสั่นของหน่วยย่อยภายในโครงสร้างโมเลกุล

จากงานวิจัยที่เคยศึกษามาแล้วมีรายงานผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของการสั่นภายในหน่วยย่อยของโมเลกุล คือ การสั่นของ  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  และ  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่มีหน่วยย่อยที่เป็นองค์ประกอบทางโครงสร้างประกอบไปด้วย  $PO_4^{3-}$ ,  $ZnO_6$ , และ  $H_2O$  สำหรับสารไฮเดรต และ  $PO_4^{3-}$  และ  $ZnO_6$  สำหรับสารที่เปป็นไฮเดรตนั้น มีน้ำผลึกที่มีพื้นฐานของการสั่นภายในโมเลกุล 3 แบบ คือ H-O-H bending band ( $\nu_1$ ) ตรวจพบที่  $1630\text{ cm}^{-1}$ , O-H symmetric stretching vibration ( $\nu_1$ ) ตรวจพบในช่วง  $3000-3300\text{ cm}^{-1}$  และ O-H asymmetric stretching vibration ( $\nu_3$ ) ตรวจพบในช่วง  $3300-3500\text{ cm}^{-1}$  และ หน่วยย่อยฟอสเฟต  $PO_4^{3-}$  จะตรวจพบโหมดการสั่นอยู่สี่โหมด คือ P-O symmetric stretching vibration band ( $\nu_1$ ) ตรวจพบที่  $930$  และ  $950\text{ cm}^{-1}$  (ในช่วง  $900-1000\text{ cm}^{-1}$ ) จะเป็นการสั่นที่ไม่มีการซ้อนสภาวะ O-P-O symmetric bending band ( $\nu_2$ ) ตรวจพบที่  $\sim 385$ ,  $410$ ,  $428$ ,  $455$  และ  $470\text{ cm}^{-1}$  (ในช่วง  $370-480\text{ cm}^{-1}$ ) เป็นการสั่นที่มีการซ้อนสภาวะพลังงาน 2 สภาวะ P-O antisymmetric stretching vibration band ( $\nu_3$ ) ตรวจพบที่  $1000$ ,  $1025$ ,  $1066$ ,  $1105$ ,  $1130$  และ  $1156\text{ cm}^{-1}$  (ในช่วง  $1000-1200\text{ cm}^{-1}$ ) เป็นการสั่นที่มีการซ้อนสภาวะพลังงาน 3 สภาวะ และ O-P-O antisymmetric bending band ( $\nu_4$ ) ตรวจพบที่  $500$ ,  $524$ ,  $561$ ,  $576$ ,  $600$  และ  $635\text{ cm}^{-1}$  (ในช่วง  $500-650\text{ cm}^{-1}$ ) เป็นการสั่นที่มีการซ้อนสภาวะพลังงาน 3 สภาวะ ตามทฤษฎี จึงคำนวณหาพลังงานการสั่นของฟอสเฟตนี้ได้ทั้งสิ้น 9 แถบการสั่น โดยรูปแบบการสั่นของงานที่ได้ศึกษามาก่อนแสดงไว้ในภาพที่ 2.7-2.10



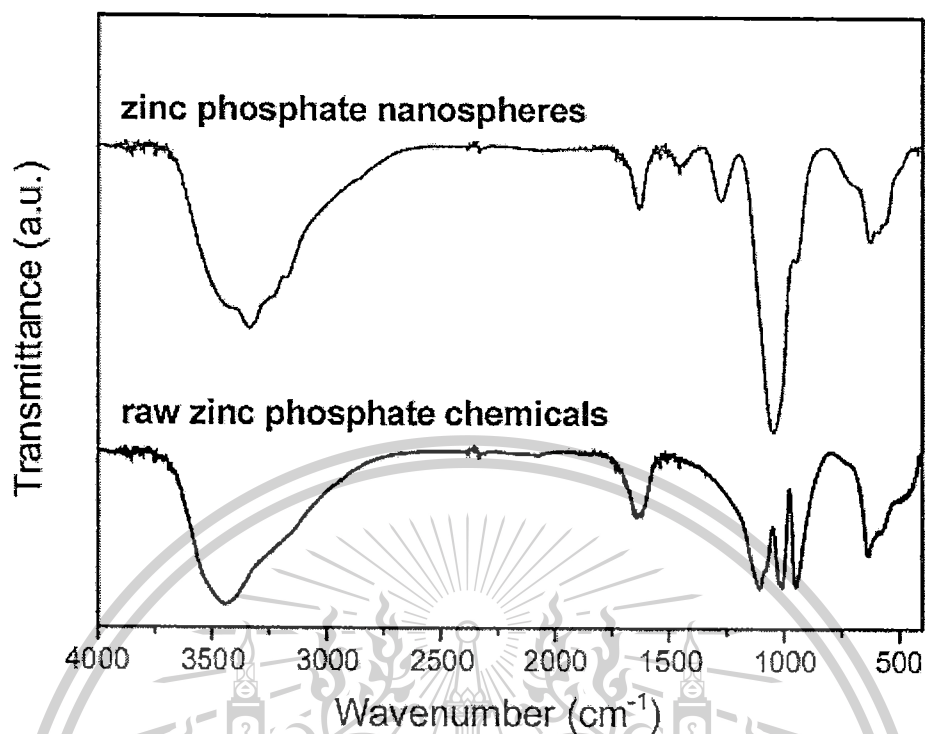
ภาพที่ 2.7 สเปกตรัมการสั่นของ  $\alpha\text{-Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

ที่มา : Pardi et al., 2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

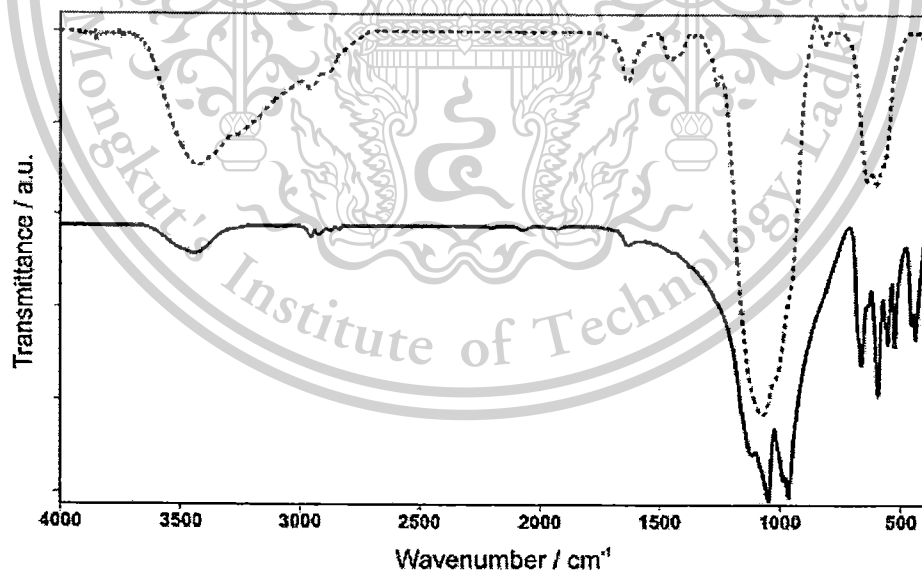
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 2.8 สเปกตรัมการสั่นของ  $\beta\text{-Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

ที่มา: Jung et al., 2009



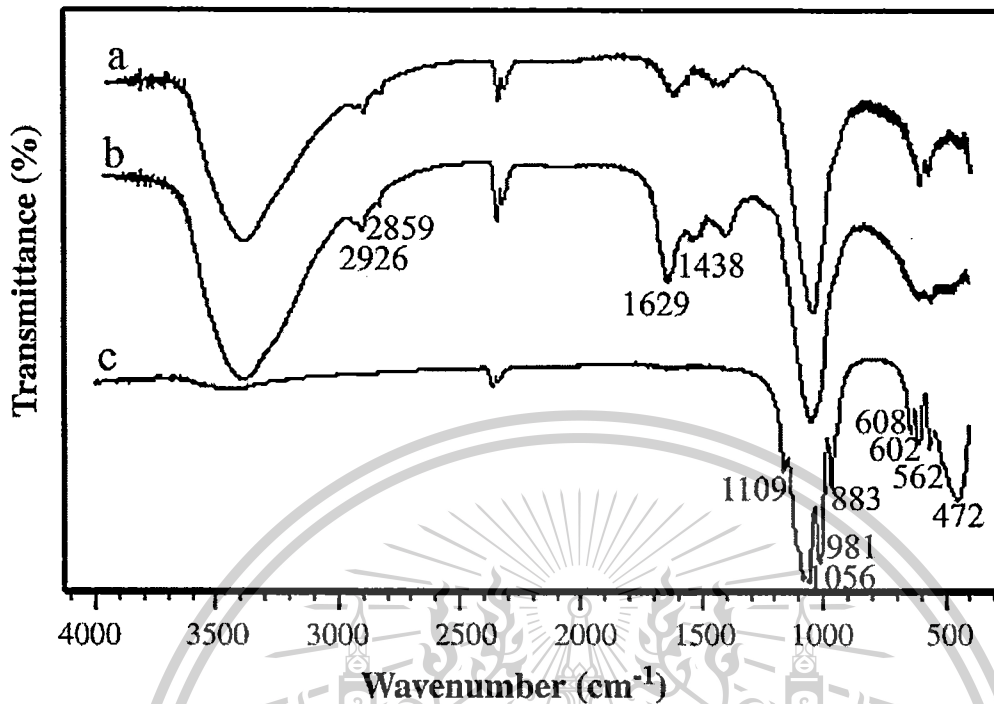
ภาพที่ 2.9 สเปกตรัมการสั่นของ  $\alpha\text{-Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

ที่มา: Roming et al., 2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

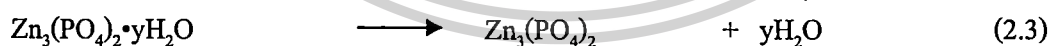
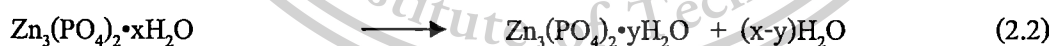
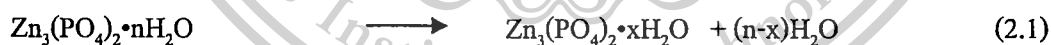


ภาพที่ 2.10 สเปกตรัมการสั่นของ  $\beta$ - $Zn_3(PO_4)_2$  (c)

ที่มา: Yan et al., 2009

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเอกลักษณ์ทางความร้อนของสารซิงค์ฟอสเฟต

ผลการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่มีมาก่อน ดังภาพที่ 2.11 และ 2.12 จากเทอร์โมแกรม จะเห็นว่า กลไกการสลายตัวทางความร้อนของสารตัวนี้ สามารถสรุปได้ดังสมการ

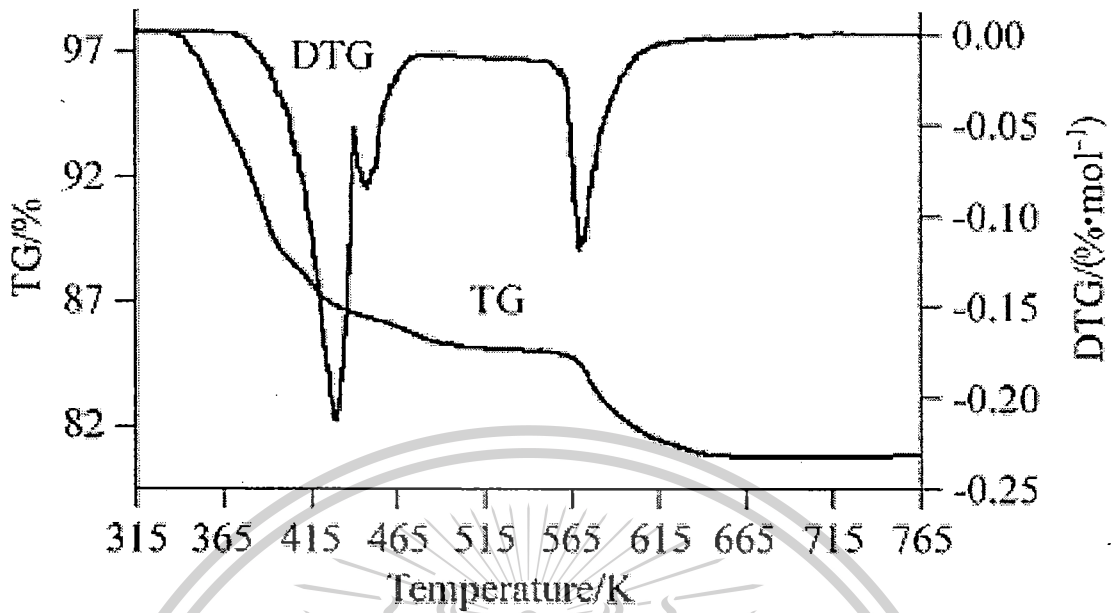


จากกลไกดังสมการ และสัมพันธ์กับภาพที่ 2.11 และ 2.12 จะมีกลไกที่แตกต่างกัน คือ รูปแรก จะสลายตัวผ่าน สามกลไก ส่วนภาพที่ถัดไป จะมีการสลายตัวทางความร้อนเพียง สองกลไก แต่มวลรวมของการสลายตัวไปจะมีค่าเท่ากับ 4 โมลของน้ำผลึก

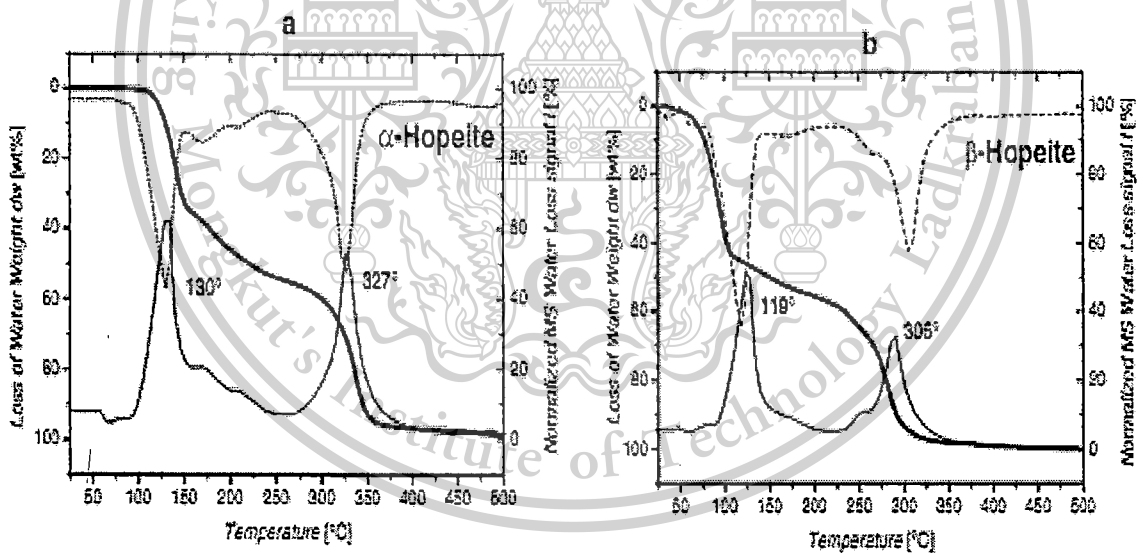
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 2.11 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของ (a)  $\alpha\text{-Zn}_3(\text{PO}_4)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$   
ที่มา: Ai-Qun et al., 2007



ภาพที่ 2.12 เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของ (a)  $\alpha\text{-Zn}_3(\text{PO}_4)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  และ (b)  $\beta\text{-Zn}_3(\text{PO}_4)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$   
ที่มา: Herschke et al., 2006

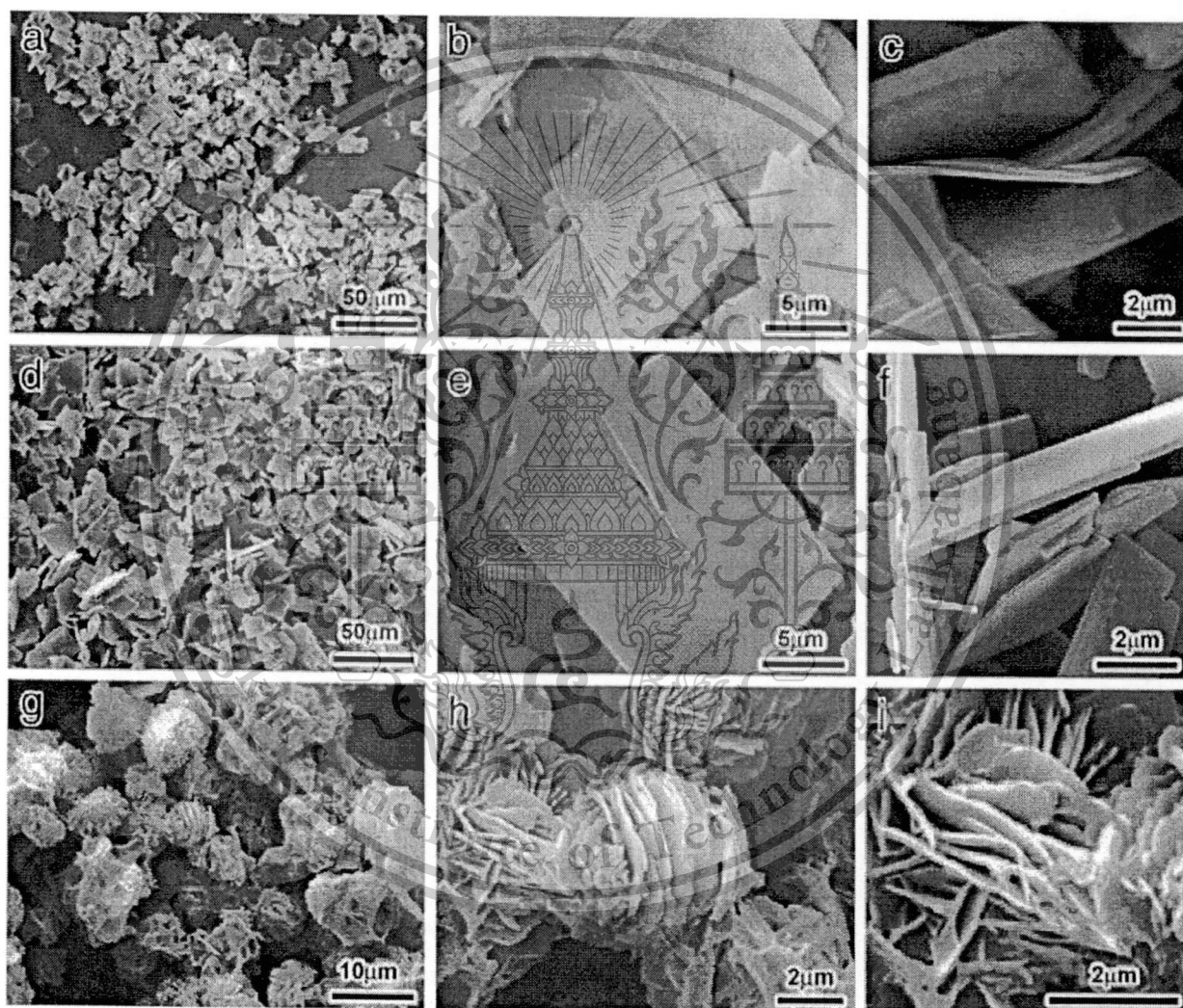
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเอกลักษณ์ทางสัณฐานวิทยาสารซิงค์ฟอสเฟต

จากรูปร่างทางสัณฐานวิทยาที่เคยมีศึกษามาในเร็วนี้ จากงานวิจัยของ Xie et al.,2012 และ Parhi et al.,2008 แสดงไว้ในภาพที่ 2.13 และ 2.14 จากรูปภาพจะเห็นว่า สารที่ถูกรเตรียมจะมีรูปร่าง ต่าง ๆ ที่น่าสนใจ ทั้งที่มีรูปเป็นแผ่นบางๆ ทรงกลม ทรงเหลี่ยม และเป็นคล้ายกลีบดอกไม้ ก็เป็นผลจากการสารตั้งต้นและกระบวนการเตรียมที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ดัง ภาพที่ 2.13 และ 2.14 ที่ได้ระบบสารตั้งต้นในการเตรียมไว้

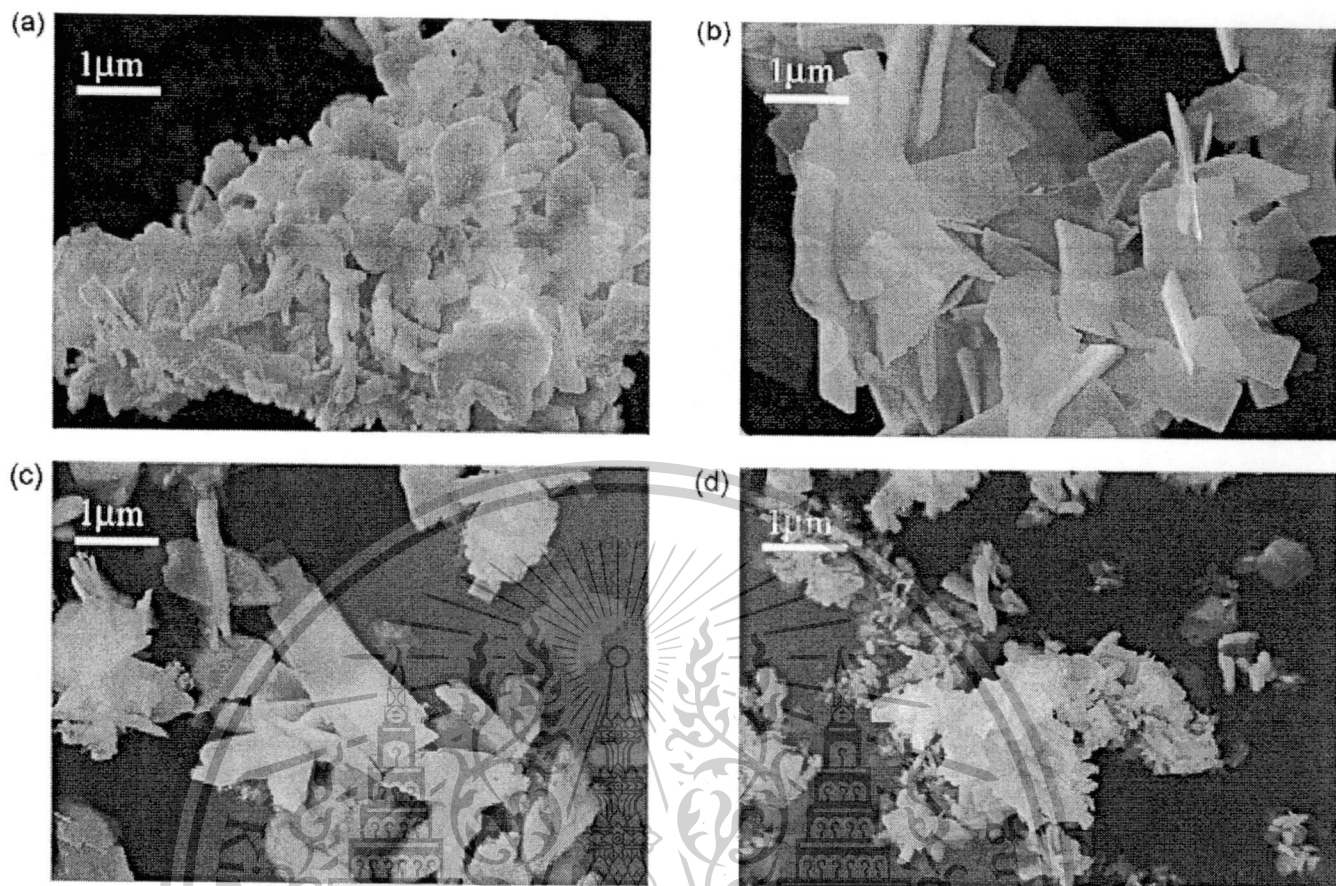


ภาพที่ 2.13 สัณฐานวิทยาของ  $\alpha\text{-Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ที่เตรียมการตกตะกอนจากสารตั้งต้นต่างกัน คือ (a)  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4\text{-NaCl-Zn}(\text{NO}_3)_2$  ที่มา: Xie et al.,2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 2.14 ลักษณะวิทยาของ  $\alpha\text{-Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ที่เตรียมโดยสารตั้งต้นต่างกัน คือ (a)  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\text{-ZnCl}_2$ , (b)  $\text{Na}_3\text{PO}_4\text{-ZnCl}_2$ , (c)  $\text{NaH}_2\text{PO}_4\text{-ZnCl}_2$ , (d)  $\text{K}_2\text{HPO}_4\text{-ZnCl}_2$   
ที่มา: Parhi et al., 2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์สารด้วยเทคนิคที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว พร้อมไม่ก่อให้เกิดอันตรายในขณะการเตรียม ด้วยเทคนิคการตกตะกอน และเทคนิคโซโนเคมีที่สภาวะปกติ สำหรับสารที่สนใจศึกษาเป็นสารซิงค์ฟอสเฟตไฮเดรต (Zinc (II) phosphate tetrahydrates,  $Zn_3(II)(PO_4)_3 \cdot 4H_2O$ ) โดยมีโครงสร้าง 2 แบบ คือ แอลฟา( $\alpha$ -  $Zn_3(II)(PO_4)_3 \cdot 4H_2O$ ) และเบต้า( $\beta$ -  $Zn_3(II)(PO_4)_3 \cdot 4H_2O$ ) ซึ่งถูกเตรียมขึ้นได้จากแหล่งของสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน โดยงานวิจัยนี้พยายามเตรียมสารนี้ทั้งสิ้นมากกว่า 24 ตัวอย่าง แต่ในรายงานวิจัยฉบับนี้จะเลือกสารที่เตรียมขึ้นได้ ด้วยทั้งสองวิธีนี้ เพียง 12 ตัวอย่างเท่านั้น จากนั้นมีรายงานวิจัยพบว่าสารในกลุ่มนี้ สามารถสลายตัวไปเป็นสารอีกชนิดหนึ่ง ที่เรียกว่า ซิงค์ฟอสเฟตแอนไฮดรัส (Zinc phosphate anhydrous,  $Zn_3(II)(PO_4)_3$ ) ที่สภาวะอุณหภูมิสูงค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง ซึ่งจากข้อมูลจะนำมาใช้สำหรับการสังเคราะห์สารซิงค์ฟอสเฟตแอนไฮดรัส อีกวิธีหนึ่ง ดังนั้นเมื่อเสร็จสิ้นโครงการวิจัย จึงได้สารกลุ่มแอนไฮดรัสของซิงค์ฟอสเฟตเพิ่มอีก 24 ตัวอย่าง แต่เลือกนำมาบรรยายในรูปเล่มวิจัยนี้ให้สอดคล้องกับสารไฮเดรตที่เตรียมขึ้นได้เพียง 12 ตัวอย่าง จากสารแอนไฮดรัสที่เตรียมได้นี้มีรายงานว่าโครงสร้างแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ แอลฟา( $\alpha$ -  $Zn_3(II)(PO_4)_3$ ) เบต้า( $\beta$ -  $Zn_3(II)(PO_4)_3$ ) และแกมมา( $\gamma$ -  $Zn_3(II)(PO_4)_3$ ) โดยงานวิจัยนี้จะทำการเตรียมสารดังกล่าวอย่างละ 2 ขี้

จากสารที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ซิงค์ฟอสเฟตไฮเดรต (Zinc (II) phosphate tetrahydrates,  $Zn_3(II)(PO_4)_3 \cdot 4H_2O$ ) จำนวน 12 ตัวอย่าง แล้วเมื่อนำเอาสารไฮเดรตนี้ไปเผาที่สภาวะอุณหภูมิสูงค่าใดๆ ค่าหนึ่ง ซึ่งจะมีค่าเฉพาะของสารตัวนั้น ๆ จะได้สารซิงค์ฟอสเฟตแอนไฮดรัส (Zinc phosphate anhydrous,  $Zn_3(II)(PO_4)_3$ ) เพิ่มมาอีก 12 ตัวอย่าง แล้วจากสารที่ถูกเตรียมขึ้นทั้ง 24 ตัวอย่างจะถูกนำไปตรวจสอบเอกลักษณ์ทางกายภาพและทางเคมีด้วยเทคนิคต่าง ๆ เรียงลำดับ คือ การวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วย Thermogravimetry analysis (TG/DTG/DTA) โดยเทคนิคนี้จะให้ข้อมูลว่า เพื่อใช้สำหรับระบุอุณหภูมิสูงสุดเพื่อการนำสารไฮเดรตนี้ไปเผาให้สลายตัวไปเป็นสารกลุ่มแอนไฮดรัส เมื่อได้สารครบทั้งสองกลุ่มรวม 20 ตัวอย่างแล้ว สารตัวอย่างทุกตัวจะถูกไปวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานเริ่มตั้งแต่ การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของสารทั้งหมด คือ ตรวจสอบปริมาณน้ำในโครงสร้าง ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เชิงความร้อนที่กล่าวมาข้างต้น ตรวจสอบปริมาณโลหะ ด้วยเทคนิค Atomic absorption spectrophotometer (AAS) ตรวจสอบปริมาณฟอสฟอรัส โดยการวิเคราะห์เทียบสี (Colorimetric analysis) ของเทคนิคสารประกอบเชิงซ้อน โมลิบโดฟอสเฟต (Molybdophosphate complex) ตรวจสอบเอกลักษณ์รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยสาร 2 กลุ่มนี้ จะมีรูปแบบการสั่นพันธะของหน่วยย่อย  $\text{PO}_4$ ,  $\text{ZnO}_4$  or  $\text{ZnO}_6$  และ  $\text{H}_2\text{O}$  ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์ม อินฟราเรด (Vibrational spectroscopy; Fourier transform infrared, FTIR) ตรวจสอบเอกลักษณ์ทางโครงสร้างและขนาดผลึก ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD) และตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.1.1 ชุดเครื่องแก้ว
- 3.1.2 โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 3.1.3 Hot plate stirrer, Heidolph MR 3001
- 3.1.4 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Sartorius), Scaltec SBC -31
- 3.1.5 pH meter (Metrom)
- 3.1.6 ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ (Suction pump), B'U'CHI Type B -169
- 3.1.7 Oven (Fisher Scientific)
- 3.1.8 เตาเผา (Furnace), Isotemp Muffle furnace, Fisher Scientific
- 3.1.9 Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR), Spectrum GX, Perkin-Elmer
- 3.1.10 Thermogravimetric/differential thermal analyzer (TG-DTA), Pyris Diamond TG/DTA, Perkin Elmer apparatus และ Alumina pan
- 3.1.11 X-Ray powder diffractometer (XRD), Bruker AXS, D8 Advance, Germany
- 3.1.12 Differential scanning calorimetry (DSC), A Perkin Elmer Diamond
- 3.1.13 Scanning electron microscope (SEM), LEO SEM VPI450

### 3.2 สารเคมี

- 3.2.1 Acetone,  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ , 99.8%, CARLO ERBA
- 3.2.2 Phosphoric acid,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , 86.4%, J.T.Baker
- 3.2.3 Zinc(II)sulphate heptahydrate,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (Mw =287.39g/mol) 99%, Riedel-deHaen
- 3.2.4 Zinc(II) chloride tetrahydrate,  $\text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (Mw =208.39 g/mol), >98%, Fluka
- 3.2.5 Zinc(II) acetate dihydrate,  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Mw =218.39 g/mol), 99.99%, Aldrich
- 3.2.6 Zinc(II) nitrate hexahydrate,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (Mw =261.39 g/mol), 98%, Aldrich

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- 3.2.7 Potassium hydrogen phosphate,  $K_2HPO_4$  (Mw =174.18 g/mol), 99.99%, Aldrich
- 3.2.8 Sodium hydrogen phosphate,  $Na_2HPO_4$  (Mw =141.91 g/mol), 99.99%, Aldrich
- 3.2.9 Ammonium hydrogen phosphate,  $(NH_4)_2HPO_4$  (Mw =124.00 g/mol), 99.99%, Aldrich
- 3.2.10 Potassium bromide, KBr, spectroscopy grade, Jasco
- 3.2.11 Water (Deionized water, DI)
- 3.2.12 Methanol,  $CH_3OH$ , Carlo Erba reagenti.
- 3.2.13 Silica gel, Merck.
- 3.2.14 Sodium hydroxide, NaOH, 98%, Carlo Erba reagent.
- 3.2.15 Hydrochloric acid 38 %, J.T.Baker.
- 3.2.16 Nitric acid,  $HNO_3$ , 65 %, Riedel – deHaën.

### 3.3 วิธีการสังเคราะห์

เทคนิคการสังเคราะห์ของสารซิงค์ฟอสเฟตไฮเดรตจะเน้นกระบวนการที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว และไม่ก่อให้เกิดอันตราย โดยเลือกวิธีการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคการตกตะกอน โดยทั้งสองวิธี จะเลือกสารตั้งต้น คือ แหล่งสารตั้งต้นซิงค์ (Zn) เป็น  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  และแหล่งสารตั้งต้นฟอสฟอรัส (P)  $K_2HPO_4$ ,  $Na_2HPO_4$ ,  $(NH_4)_2HPO_4$  จากนั้นค่อยนำเอาสารไฮเดรตที่เตรียมได้ไปเผาเพื่อให้ได้สารแอนไฮดรัส จะอธิบายวิธีดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 การสังเคราะห์สารกลุ่มไฮเดรต $Zn_3(II)(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ด้วยวิธีการตกตะกอน

##### วิธีการเตรียม

3.3.1.1 ตวงสาร 1M ของสารแหล่งสารตั้งต้นซิงค์ (Zn) 30 mL ด้วยประบอกตวงขนาด 50 mL ถ่ายในลงในบีกเกอร์ ขนาด 100 mL ที่ใส่ Magnetic stirrer แล้วทำการปั่นกวนด้วย เครื่องปั่นกวน (hot plate stirrer) ความเร็วปานกลาง

3.3.1.2 ใช้กระบอกตวงขนาด 50 mL อีกใบ ตวง 1M ของแหล่งสารตั้งต้นฟอสฟอรัส (P) 20 mL แล้วเทลงในบีกเกอร์ข้อ 1 จะสังเกตเห็นตะกอนขาวขุ่นเกิดขึ้น ให้ปั่นกวนไปเป็นเวลา 3 ชม. พร้อมทั้งวัดค่า pH และจดบันทึกลงในตาราง (หากไม่มีตะกอนขาวขุ่นเกิดขึ้น ให้ปรับ pH เพื่อให้เกิดตะกอนอยู่ในช่วง pH 4-6 ด้วย 1 M NaOH จะมีตะกอนเกิดขึ้น)

3.3.1.3 เมื่อปฏิกิริยาในข้อ 2 เกิดอย่างสมบูรณ์และสิ้นสุดเรียบร้อยแล้วจะนำมาแยกตะกอนออกจากสารละลายด้วยการกรองโดยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ และทำการล้างตะกอนที่ได้ด้วยอะซีโตน (Acetone) ประมาณ 2-3 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3.1.4 วางสารที่กรองได้ทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศประมาณ 24 ชม. จะได้สารที่เป็นผงละเอียด ไม่เหนียวติดกันเป็นก้อนและมีสีที่สม่ำเสมอ จากนั้นนำสารที่ได้มาชั่งน้ำหนักเพื่อนำไปคำนวณหา %yield ต่อไป

3.3.1.5 เก็บบรรจุสารที่เตรียมได้ลงในขวดแก้วหรือถึงพลาสติกแล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อจะถูกตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิคต่าง ๆ เพื่ออธิบายสมบัติทางเคมีและกายภาพต่อไป สำหรับงานวิจัยนี้เตรียมสารได้ทั้งหมดสอดคล้องกับปฏิกิริยาการเตรียมดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปฏิกิริยาการเตรียมซิงค์ฟอสเฟตด้วยตั้งต้นต่าง ๆ

ลำดับ	สารตั้งต้น	ผลิตภัณฑ์
<b>ระบบสารตั้งต้นเป็น <math>ZnCl_2 \cdot 4H_2O</math></b>		
1	$3ZnCl_2 \cdot 4H_2O + 2K_2HPO_4 \rightarrow$	$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O + 6Cl^- + 4K^+ + 2H^+ + 4H_2O$
2	$ZnCl_2 \cdot 4H_2O + 2Na_2HPO_4 \rightarrow$	$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O + 6Cl^- + 4Na^+ + 2H^+ + 4H_2O$
3	$3ZnCl_2 \cdot 4H_2O + 2(NH_4)_2HPO_4 \rightarrow$	$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O + 6Cl^- + 4NH_4^+ + 2H^+ + 4H_2O$
<b>ระบบสารตั้งต้นเป็น <math>ZnSO_4 \cdot 7H_2O</math></b>		
4	$3ZnSO_4 \cdot 7H_2O + 2K_2HPO_4 \rightarrow$	$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O + 3SO_4^{2-} + 4K^+ + 2H^+ + 17H_2O$
5	$3ZnSO_4 \cdot 7H_2O + 2Na_2HPO_4 \rightarrow$	$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O + 3SO_4^{2-} + 4Na^+ + 2H^+ + 17H_2O$
6	$3ZnSO_4 \cdot 7H_2O + 2(NH_4)_2HPO_4 \rightarrow$	$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O + 3SO_4^{2-} + 4NH_4^+ + 2H^+ + 17H_2O$
<b>ระบบสารตั้งต้นเป็น <math>Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O</math></b>		
7	$3Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + 2K_2HPO_4 \rightarrow$	$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O + 6NO_3^- + 4K^+ + 2H^+ + 14H_2O$
8	$3Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + 2Na_2HPO_4 \rightarrow$	$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O + 6NO_3^- + 4Na^+ + 2H^+ + 14H_2O$
9	$3Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + 2(NH_4)_2HPO_4 \rightarrow$	$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O + 6NO_3^- + 4NH_4^+ + 2H^+ + 14H_2O$
<b>ระบบสารตั้งต้นเป็น <math>Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O</math></b>		
10	$3Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + 2K_2HPO_4 \rightarrow$	$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O + 6CH_3COO^- + 4K^+ + 2H^+ + 2H_2O$
11	$3Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + 2Na_2HPO_4 \rightarrow$	$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O + 6CH_3COO^- + 4Na^+ + 2H^+ + 2H_2O$
12	$3Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + 2(NH_4)_2HPO_4 \rightarrow$	$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O + 6CH_3COO^- + 4NH_4^+ + 2H^+ + 2H_2O$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

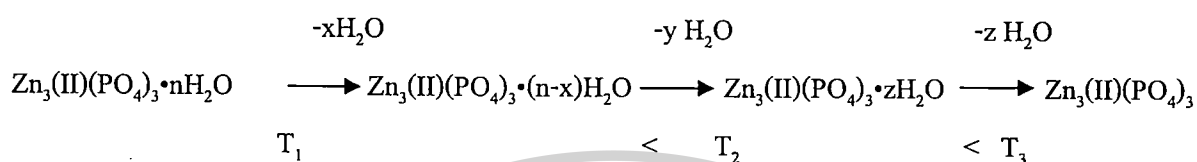
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.3.2 การสังเคราะห์สารกลุ่มแอนไฮดรัส $Zn_3(II)(PO_4)_3$

จากข้อมูลการวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเทคนิค TG-DTG ทำให้ได้อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสารกลุ่ม  $Zn_3(II)(PO_4)_3 \cdot 4H_2O$  ให้สลายตัวไปเป็นสารกลุ่ม  $Zn_3(II)(PO_4)_3$  คืออุณหภูมิสูงกว่า  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชม. โดยมีกลไกการสลายตัวทางความร้อนดังนี้

ปฏิกิริยาทั่วไป



โดยที่  $0 < (x + y + z) \leq n \cong 4$

หมายเหตุ การสลายตัวทางความร้อนจนกลายเป็นซิงค์ฟอสเฟตแอนไฮดรัสจะแตกต่างกันไปตามสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมและขึ้นกับเทคนิคการด้วยสารนั้น ๆ ด้วย สารซิงค์ฟอสเฟตไฮเดรตบางตัวอย่าง จะเกิดการสลายตัวเพียงขั้นตอนเดียว บางตัวอย่างมีกลไกการสลายตัวทางความร้อน สอง กลไก บางตัวอย่าง สามกลไก แต่โดยรวมของมวลที่เกิดการสูญหายไป สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณ โมลของน้ำได้ค่าใกล้เคียงกับ 4 โมล เรียกปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนโดยมีน้ำสูญหาย นี้ว่า ดีไฮเดรชัน(Dehydration)

#### วิธีการเตรียม

3.3.2.1 ชั่งสารกลุ่ม  $Zn_3(II)(PO_4)_3 \cdot 4H_2O$  ประมาณ 2 กรัม (ให้รู้น้ำหนักที่แน่นอนทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ใส่ลงในถ้วยกระเบื้อง (Crucible) ที่แห้งสนิทปราศจากความชื้น และทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว

3.3.2.2 นำถ้วยกระเบื้อง (Crucible) ที่บรรจุสารจากข้อ 1 ไปเผาที่อุณหภูมิ  $300^{\circ}\text{C}$  แบบ สัมผัสอากาศ ในเตาเผาเป็นเวลา 3 ชม. เมื่อเผาเสร็จ รอจนอุณหภูมิของสารเย็นลงแล้วจึงนำออกจากเตาเผา

3.3.2.3 ชั่งน้ำหนักของสารที่หายไป เพื่อนำไปคำนวณหาโมเลกุลของน้ำและเกลือที่เหลืออยู่

3.3.2.4 บรรจุสารใส่ขวดแก้วหรือถุงพลาสติกแล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีต่อไป

## 3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารที่ศึกษา

### 3.4.1 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน

นำสารกลุ่ม  $Zn_3(II)(PO_4)_3 \cdot 4H_2O$  มาศึกษาพฤติกรรมของการสลายตัวทางความร้อน เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการสลายตัวของสารและอุณหภูมิสูงสุดที่สารสลายตัวอย่างสมบูรณ์ เพื่อนำอุณหภูมินี้ไปใช้ในการเผาสารกลุ่ม  $Zn_3(II)(PO_4)_3 \cdot 4H_2O$  ให้สลายตัวไปเป็นสารกลุ่ม  $Zn_3(II)(PO_4)_3$  ได้ด้วยเครื่อง Thermogravimetric/Differential

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Thermal Analyzer ,Pyris Dimond TG/DTA ,Perkin Elmer โดยใส่สารตัวอย่างที่บดละเอียดและสารอ้างอิง (Aluminum oxide,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ลงใน Alumina pan โดยแต่ละ pan ต้องมีน้ำหนักผลรวมใกล้เคียงกัน ซึ่งน้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้อยู่ในช่วง 5-6 mg กำหนดสถานะของการวิเคราะห์ คือ ความดันของแก๊ส 3 bar ช่วงอุณหภูมิในการวิเคราะห์ 30-1000 °C อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 °C  $\text{min}^{-1}$  และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 100  $\text{mL min}^{-1}$  ข้อมูลที่ได้นำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำในโครงสร้าง วิเคราะห์จากเทอร์โมแกรมของ TG

### 3.4.2 การวิเคราะห์รูปแบบการสั่นขององค์ประกอบย่อยภายในโมเลกุล

นำสารทั้ง  $\text{Zn}_3(\text{II})(\text{PO}_4)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Zn}_3(\text{II})(\text{PO}_4)_3$  ที่ได้ไปบันทึกสเปกตรัมการสั่นด้วยเครื่อง FTIR spectrum GX Perkin-Elmer Spectrophotometer โดยใช้เทคนิค KBr-pellet มีขั้นตอนดังนี้ ใส่สารตัวอย่างลงในโถรงบดให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันกับ KBr ในอัตราส่วน sample : KBr เป็น 1 : 10 แล้วอัดให้เป็นแผ่นบางๆ ด้วย Hand press จากนั้นใส่ลงใน disc holder และทำการบันทึกสเปกตรัมการสั่น โดยกำหนดสถานะของการวิเคราะห์ คือ บันทึกความยาวคลื่น (Wavenumber) ในช่วง 4000-370  $\text{cm}^{-1}$  จำนวนครั้งการการรัน (Scan Number) เท่ากับ 4 และ Resolution : 4  $\text{cm}^{-1}$

### 3.4.3 การวิเคราะห์ทางโครงสร้าง

นำสารที่ได้ทั้ง 20 ตัวอย่าง มาตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อหาค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (a, b, c และมุม  $\beta$ ) และคำนวณขนาดผลึกด้วยสมการ Scherrer จากการเปรียบเทียบ XRD patterns ของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน ด้วยเครื่อง X-Ray powder diffractometer โดยบดสารให้ละเอียดแล้วใส่ลงใน sample holder และทำการวิเคราะห์ต่อไป โดยกำหนดสถานะของการวิเคราะห์ ดังนี้ Voltage : 40 kV; Current : 35 ml

#### Identity

Type of scan : Continuous; Scan mode: Normal  $\theta / 2\theta$ ; Step size ( $^{\circ}2\theta$ ) : 0.020; Start angle ( $^{\circ}2\theta$ ): 10; End angle ( $^{\circ}2\theta$ ): 60; Scan time (h:m:s) : 30 min; Time / Step : 0.50 sec

### 3.4.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

นำสารที่ได้ทั้ง 20 ตัวอย่าง ที่สังเคราะห์ขึ้นได้นี้ มาตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยการเตรียมตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ด้วยการเคลือบทองแล้วค่อยวิเคราะห์ด้วย SEM using LEO SEM VP1450 และ LEO SEM VP1455

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

ผลการวิจัยการสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของสารประกอบที่มีซิงค์ฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบหลักนี้ ได้ค้นคว้าและออกแบบการสังเคราะห์สาร 2 ชนิด คือ ซิงค์ฟอสเฟตไฮเดรต  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  และ ซิงค์ฟอสเฟตแอนไฮดรัส  $Zn_3(PO_4)_2$  ด้วยวิธีที่ง่ายและสะดวกรวดเร็ว ประหยัดต้นทุนในการสังเคราะห์ จึงได้เลือกเทคนิคการตกตะกอนแบบง่าย ๆ เพียงใช้เวลาไม่เกิน 30 นาที และไม่ใช้ตัวปรับให้ตกตะกอน โดยตะกอนจะเกิดขึ้นเองเมื่อผสมสารที่เป็นแหล่งของสังกะสี และฟอสฟอรัส เข้าได้กันเพียงเท่านั้น จากสารที่เตรียมได้นั้นจะได้สารไฮเดรตจำนวน 12 ตัวอย่าง จากระบบสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน และเมื่อนำสารไฮเดรตนี้ไปวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetry, TGA) จะทราบว่าสารที่เป็นอนุพันธ์ทางความร้อนเป็น ซิงค์ฟอสเฟตแอนไฮดรัส  $Zn_3(PO_4)_2$  แล้วเมื่อนำสารไฮเดรตไปเผาในสภาวะอากาศปกติที่อุณหภูมิที่ได้จากข้อมูลการวิเคราะห์เชิงความร้อน เป็นเวลา 3 ชม. ก็จะได้สารแอนไฮดรัสเพิ่มอีก 12 ตัวอย่าง ซึ่งก็เป็นเทคนิคการเตรียมสาร ซิงค์ฟอสเฟตแอนไฮดรัส  $Zn_3(PO_4)_2$  อีกวิธีหนึ่งนั่นเอง แล้วจากสารที่เตรียมขึ้นได้ทั้งหมด จะมี 24 ตัวอย่าง ที่ต้องนำไปตรวจสอบเอกลักษณ์ เริ่มด้วยการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิครังสีเอกซ์ (XRD) ตรวจสอบรูปแบบการสั่นของหน่วยย่อยภายในโมเลกุล ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่น (FTIR) สูดท้ายการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งผลการวิจัยในหัวข้อที่กล่าวมาข้างบนนี้ จะกล่าวอย่างละเอียดดังต่อไปนี้

### 4.1 ผลการสังเคราะห์ (Synthesis results)

ซิงค์ฟอสเฟตไฮเดรต  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  โดยเลือกวิธีการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคการตกตะกอน จะเลือกสารตั้งต้น คือ แหล่งสารตั้งต้นซิงค์ (Zn) เป็น  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  และแหล่งสารตั้งต้นฟอสฟอรัส (P)  $K_2HPO_4$ ,  $Na_2HPO_4$ ,  $(NH_4)_2HPO_4$  พบว่าเป็นเทคนิคที่ง่าย สะดวก และรวดเร็ว โดยขั้นตอนการเตรียมง่ายแค่ผสมสารละลายของสารที่เป็นแหล่งของฟอสฟอรัสและแหล่งของสังกะสีเข้าด้วยกันแล้วปั่นกวนอย่างสม่ำเสมอหรือใช้การผสมด้วยเครื่องโซโนเคมี อัตราการปั่นกวนผสมและการใช้คลื่นโซโน จะทำให้ได้อนุภาคของซิงค์ฟอสเฟตที่ได้แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่ทั้งแรงและสารตั้งต้น โดยสารที่เตรียมได้รวมทั้งสิ้น 12 ตัวอย่าง ตามปฏิกิริยาเคมีตารางที่ 3.1 ซึ่งวิธีการเตรียมด้วยสารตั้งต้นที่แตกต่างกันจะถูกเปรียบเทียบผลที่ได้ ซึ่งน่าจะเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เหมาะที่จะนำเทคนิคนี้ไปใช้เตรียมสารข้างต้น ในระดับอุตสาหกรรมในอนาคต แล้วเมื่อได้สารที่เตรียมขึ้นได้นี้ ได้ศึกษาการสลายตัวทางความร้อน พบว่าสารทั้งหมดสลายตัวที่อุณหภูมิสูงสุด 300 °C กลายเป็นซิงค์ฟอสเฟตแอนไฮไดรต์  $Zn_3(PO_4)_2$  จะได้สารนี้สอดคล้องกับตัวไฮเดรตอีก 12 ตัวอย่าง จากตัวอย่างที่เตรียมขึ้นได้นั้น คำนวณหาร้อยละผลผลิตที่ได้จากการเตรียมสารแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม ตัวอย่างการคำนวณดังด้านล่างนี้ และผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยจะเห็นว่า มีร้อยละการผลิตประมาณ 80-99 ซึ่งถือบางวิธีให้ค่าสูงมาก ถือว่าเป็นระบบที่น่านำไปใช้ในการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมได้จริง

### ตัวอย่างการคำนวณหาร้อยละผลผลิตที่ได้

การคำนวณหาร้อยละผลผลิตของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  จากสารตั้งต้นระบบ  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O - K_2HPO_4$

$$3ZnCl_2 \cdot 4H_2O(aq) + 2K_2HPO_4(aq) \longrightarrow Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O(s) + 6Cl^- + 4K^+ + 2H^+(g)$$

จากสมการ 3 โมล

2 โมล

1 โมล

[ meq  $Zn^{2+}$  ]

= meq  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$

$$1/3 \left[ \frac{V_{ZnCl_2 \cdot 4H_2O} (mL) \times M_{ZnCl_2 \cdot 4H_2O} (mol/L)}{1000 mL} \right] = \frac{g_{Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O}}{MW_{Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O}}$$

$$g_{Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O} = 1/3 \left[ \frac{V_{ZnCl_2 \cdot 4H_2O} (mL) \times M_{ZnCl_2 \cdot 4H_2O} (mol/L)}{1000 mL} \right] \times MW_{Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O}$$

$$= 1/3 \left[ \frac{30.00 mL \times 1 mol/L}{1000 mL} \right] \times 458.14 = 4.5814 \text{ กรัม}$$

$$\% \text{ yield} = \frac{g_{Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O} (\text{observed})}{g_{Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O} (\text{cal.})} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

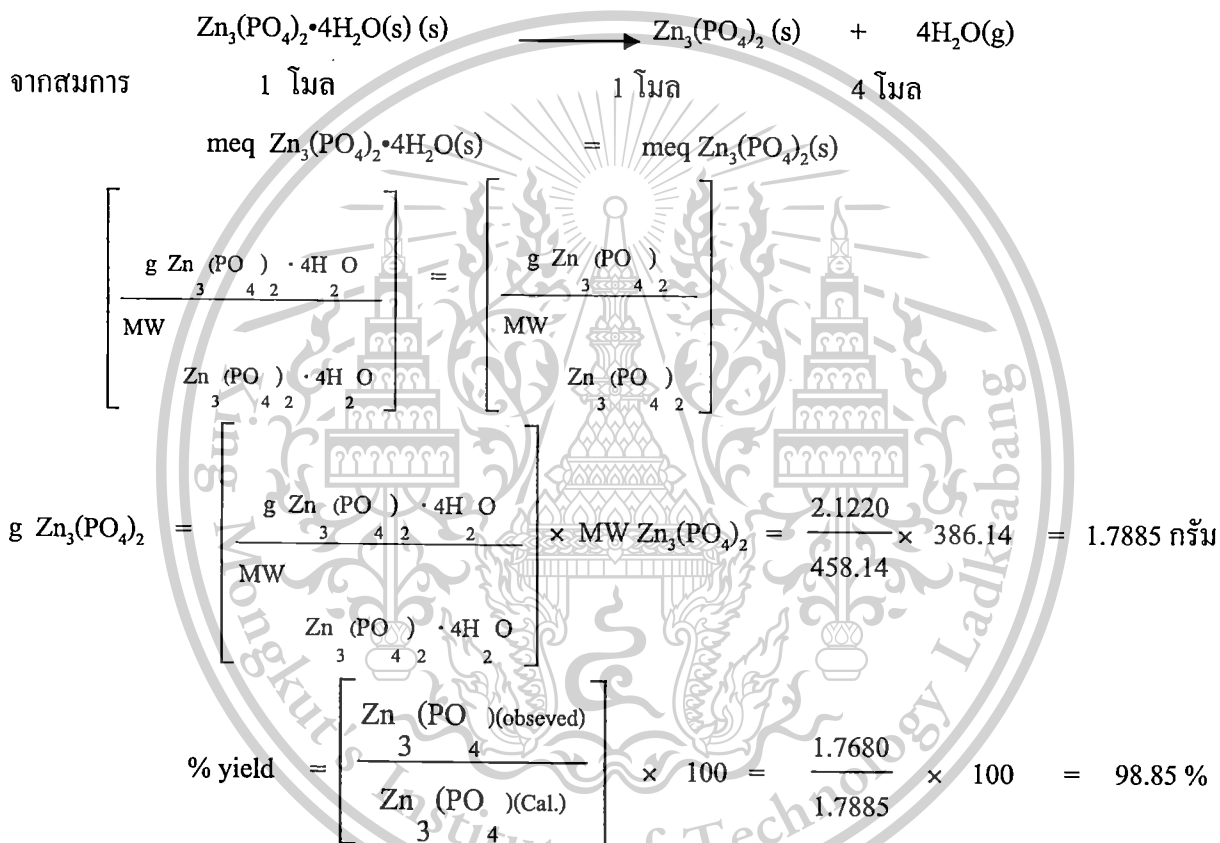
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$= \frac{4.0121}{4.5814} \times 100 = 87.57 \%$$

หมายเหตุ : ส่วนสารที่ถูกเตรียมได้ด้วยระบบอื่นสามารถคำนวณได้ด้วยลักษณะคล้ายกันนี้ ดังแสดงผลไว้ในตารางที่ 4.1

ตัวอย่างการคำนวณหาร้อยละและผลผลิตที่ได้ แสดงดังนี้

การคำนวณหาร้อยละผลผลิตของสาร  $Zn_3(PO_4)_2(s)$



หมายเหตุ : สำหรับอัตราส่วนอื่นๆ ก็สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกันนี้ ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.1 ร้อยละผลผลิตของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  และ  $Zn_3(PO_4)_2$  พร้อมจำนวนโมลของน้ำในโครงผลึก จากข้อมูล TGA

ลำดับ	ระบบสารตั้งต้น	ร้อยละผลผลิต	จำนวน โมลน้ำ	ร้อยละผลผลิต
		$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$	ในโครงผลึก	$Zn_3(PO_4)_2$
1	$ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$	89.03	3.83	98.78%
2	$ZnCl_2 \cdot 4H_2O + Na_2HPO_4$	82.74	3.89	98.74%
3	$ZnCl_2 \cdot 4H_2O + (NH_4)_2HPO_4$	86.41	3.87	98.33%
4	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$	89.38	3.54	98.35%
5	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O + Na_2HPO_4$	86.95	4.04	98.72%
6	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O + (NH_4)_2HPO_4$	83.87	3.87	98.72%
7	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$	97.34	3.80	98.71%
8	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + Na_2HPO_4$	93.93	3.80	98.25%
9	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + (NH_4)_2HPO_4$	91.03	3.85	97.98%
10	$Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$	83.32	1.61	98.29%
11	$Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + Na_2HPO_4$	80.89	3.64	98.72%
12	$Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + (NH_4)_2HPO_4$	79.70	3.62	98.74%

#### 4.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิคต่าง ๆ (Characteristic materials and Identification method)

ลำดับการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารทั้ง 2 ชนิด คือ  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  และอนุพันธ์ทางความร้อน  $Zn_3(PO_4)_2$  รวมสารที่ต้องตรวจสอบเอกลักษณ์ทั้งสิ้น 24 ตัวอย่าง จะเริ่ม การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิค TGA (ตรวจเฉพาะไฮเดรตเท่านั้น) ตรวจสอบโครงสร้างสารด้วยเทคนิค XRD ตรวจสอบรูปแบบการสั่นของโมเลกุลหรือไอออนที่เป็นองค์ประกอบภายในโครงสร้าง ด้วยเทคนิค FTIR และสุดท้ายตรวจสอบสัณฐานวิทยา เพื่อดูขนาดอนุภาค ด้วยเทคนิค SEM

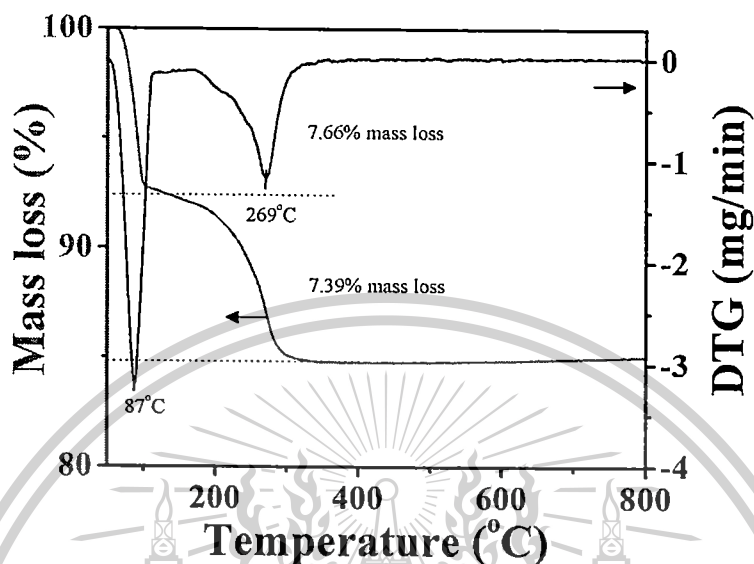
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

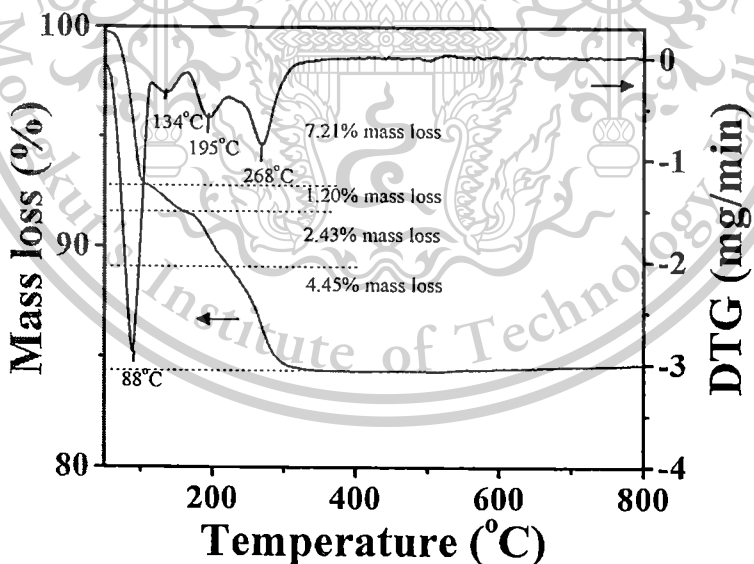
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.2.1 ผลการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของสาร

เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมขึ้นได้นี้มีตัวอย่างทั้งสิ้น 24 ตัวอย่าง ๆ ละ 12 ตัวอย่าง ผลที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.1-4.12



ภาพที่ 4.1 เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$  ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $10^\circ C \text{ min}^{-1}$  ในแก๊ส  $O_2$

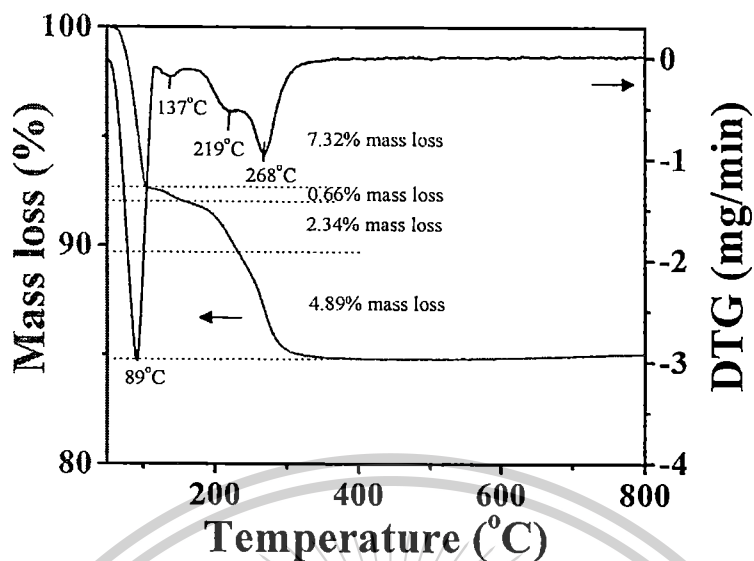


ภาพที่ 4.2 เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + Na_2HPO_4$  ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $10^\circ C \text{ min}^{-1}$  ในแก๊ส  $O_2$

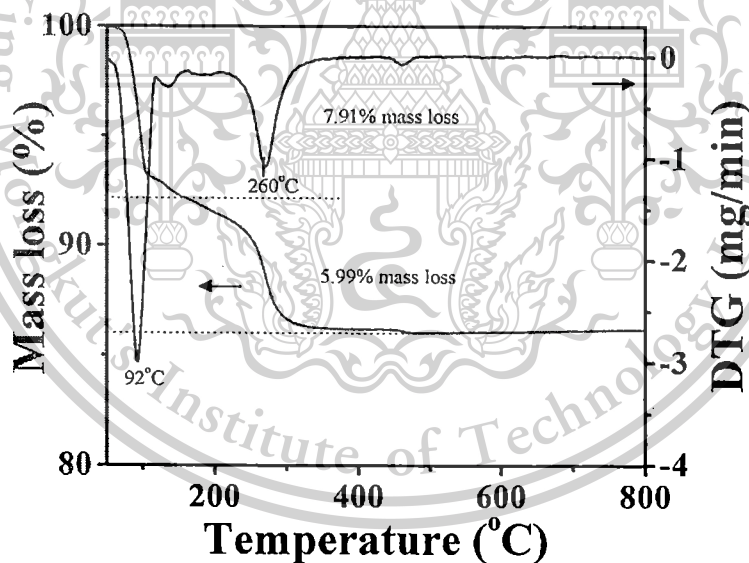
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4.3 เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $10^\circ C \text{ min}^{-1}$  ในแก๊ส  $O_2$

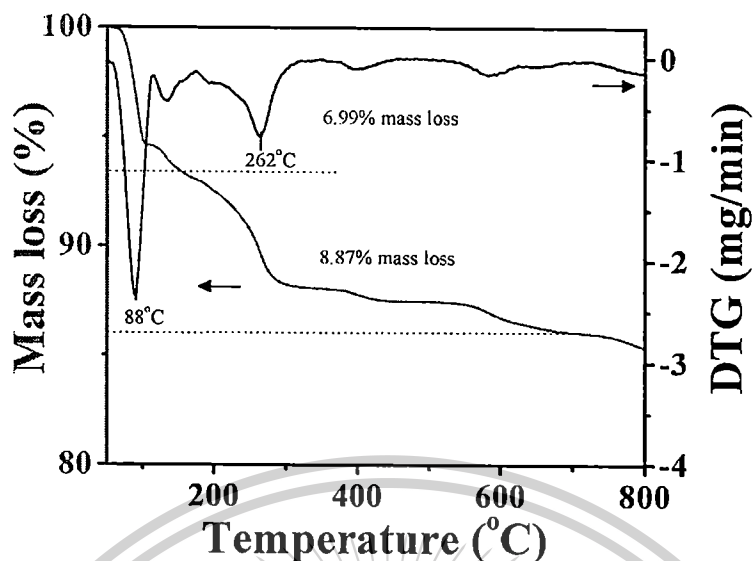


ภาพที่ 4.4 เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$  ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $10^\circ C \text{ min}^{-1}$  ในแก๊ส  $O_2$

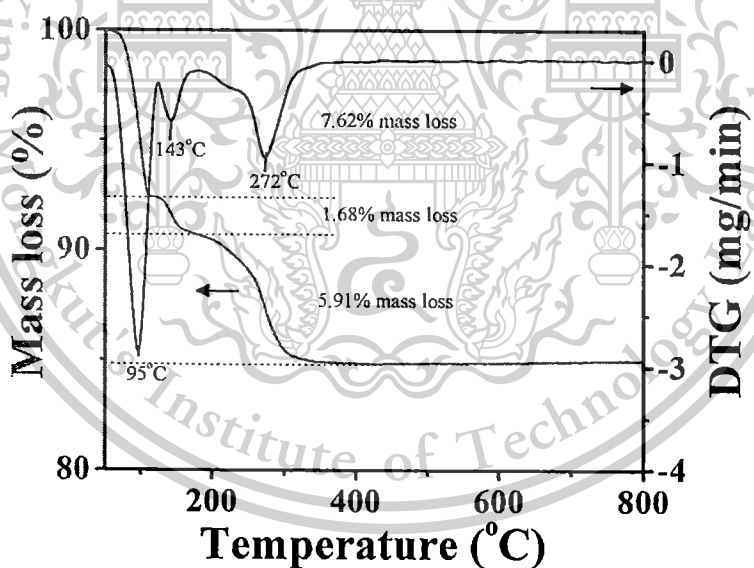
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4.5 เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + Na_2HPO_4$  ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $10^\circ C \text{ min}^{-1}$  ในแก๊ส  $O_2$

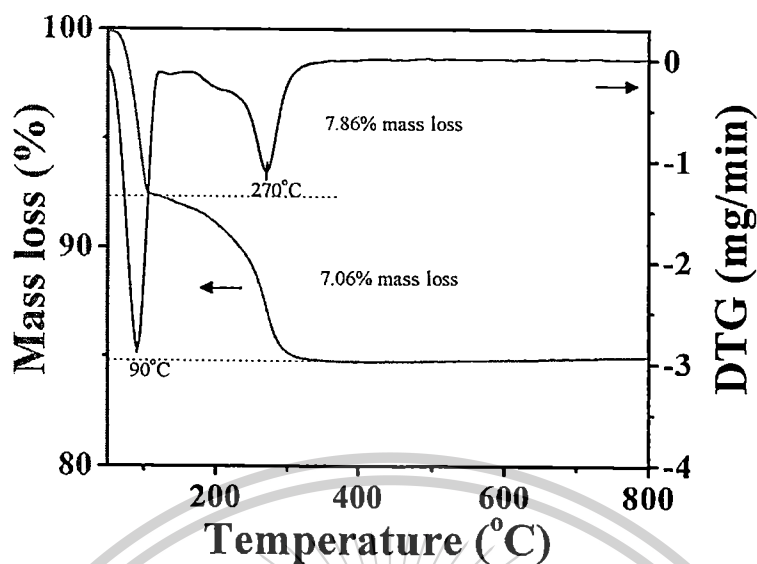


ภาพที่ 4.6 เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $10^\circ C \text{ min}^{-1}$  ในแก๊ส  $O_2$

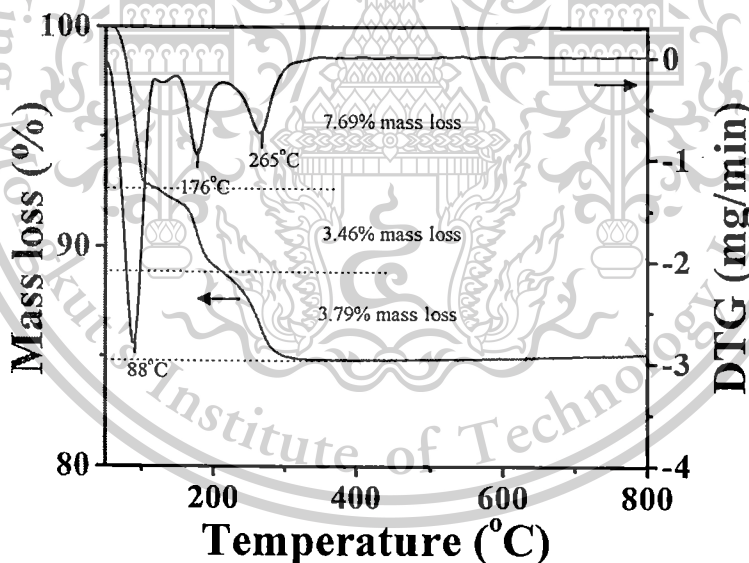
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4.7 เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$  ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $10\text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$  ในแก๊ส  $O_2$

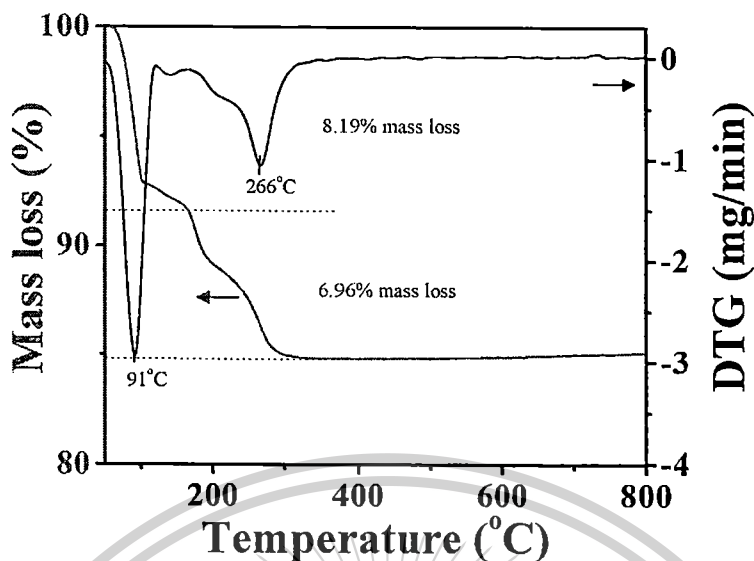


ภาพที่ 4.8 เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + Na_2HPO_4$  ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $10\text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$  ในแก๊ส  $O_2$

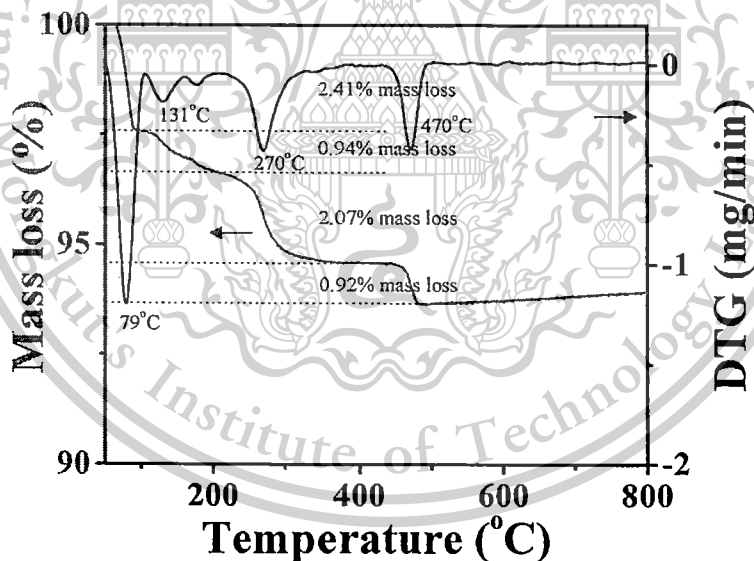
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4.9 เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $10^\circ C \text{ min}^{-1}$  ในแก๊ส  $O_2$

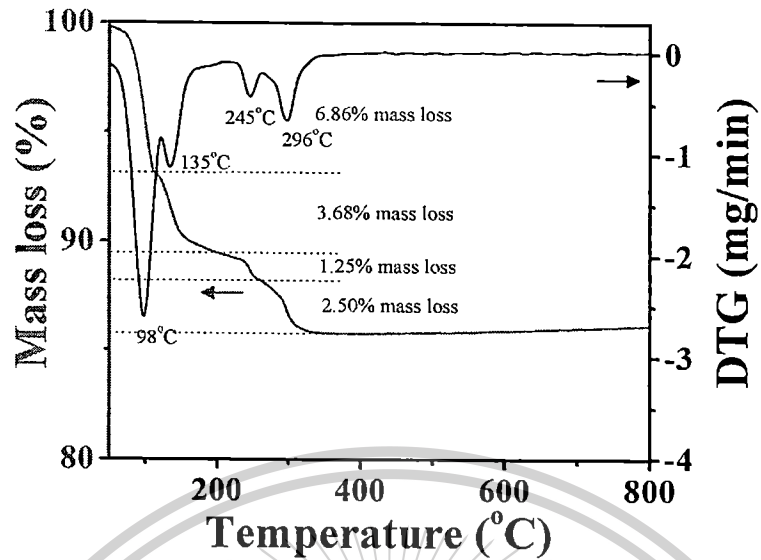


ภาพที่ 4.10 เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$  ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $10^\circ C \text{ min}^{-1}$  ในแก๊ส  $O_2$

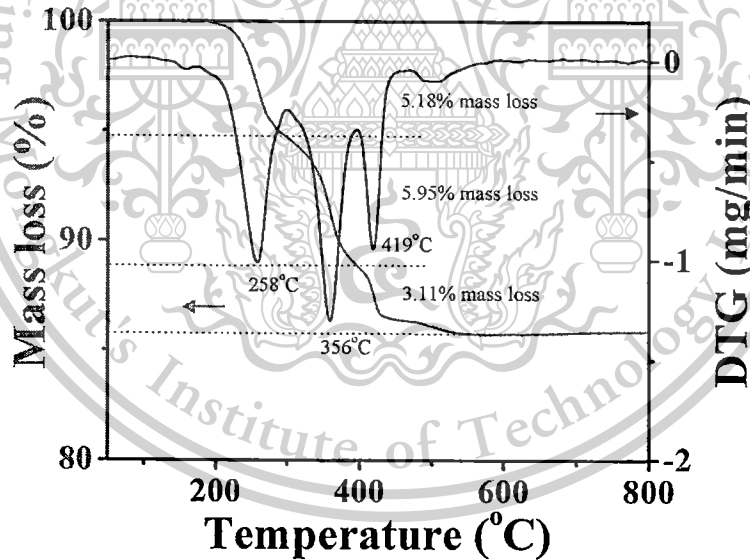
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4.11 เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{HPO}_4$  ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $10^\circ\text{C min}^{-1}$  ในแก๊ส  $\text{O}_2$



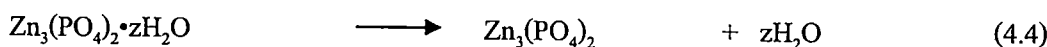
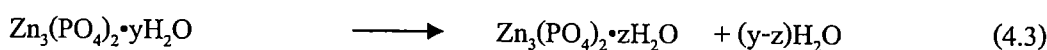
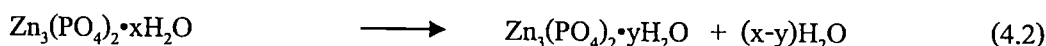
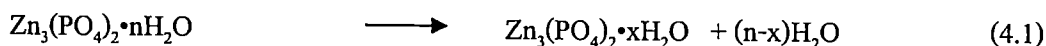
ภาพที่ 4.12 เทอร์โมแกรม TG/DTG ของสาร  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $10^\circ\text{C min}^{-1}$  ในแก๊ส  $\text{O}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากภาพที่ 4.1-4.12 สามารถสรุปกลไกการสลายตัวทางความร้อนของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่เตรียมขึ้นได้จากสารตั้งต้นและวิธีการเตรียมสองแบบได้ โดยทั่วไป คือ



จากกลไกที่นำเสนอทั้งสี่กลไกนี้ สารที่ถูกเตรียมขึ้นได้บางตัวเกิดการสลายตัวเพียงสองกลไก บางตัวสลายตัวผ่าน สามกลไก และสารบางตัวสลายตัวผ่านสี่กลไกย่อย จำนวนน้ำผลึกภายในโมเลกุลถึงจะสลายตัวออกไปจนหมดแล้วเหลือสารเป็นแอนไฮดรัส  $Zn_3(PO_4)_2$  เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย โดยจะขอสรุปกลไกการสลายตัวทางความร้อนของแต่ละระบบดังนี้

ระบบสารตั้งต้น  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$  ด้วยวิธีการตกตะกอนแบบธรรมดา (ภาพที่ 4.1) จะเกิดผ่านกลไก 2 ขั้นตอน ในช่วงอุณหภูมิ 80-110 และ 100-320 °C เกิดที่พีค DTG ที่ 87 และ 269 °C สัมพันธ์กับมวลสูญหาย 7.66 และ 7.39% สอดคล้องกับจำนวนโมลของน้ำผลึก คือ 1.95 และ 1.88 ตามลำดับ จำนวนโมลน้ำผลึกรวมเท่ากับ 3.83

ระบบสารตั้งต้น  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + Na_2HPO_4$  ด้วยวิธีการตกตะกอนแบบธรรมดา (ภาพที่ 4.2) จะเกิดผ่านกลไก 4 ขั้นตอน ในช่วงอุณหภูมิ 80-100, 100-150, 150-250 และ 250-320 °C เกิดที่พีค DTG ที่ 88, 134, 195 และ 268 °C สัมพันธ์กับมวลสูญหาย 7.21, 1.20, 2.43 และ 4.45% สอดคล้องกับจำนวนโมลของน้ำผลึก คือ 1.83, 0.31, 0.62 และ 1.13 ตามลำดับ จำนวนโมลน้ำผลึกรวมเท่ากับ 3.89

ระบบสารตั้งต้น  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  ด้วยวิธีการตกตะกอนแบบธรรมดา (ภาพที่ 4.3) จะเกิดผ่านกลไก 4 ขั้นตอน ในช่วงอุณหภูมิ 80-100, 100-150, 150-250 และ 250-320 °C เกิดที่พีค DTG ที่ 89, 137, 219 และ 268 °C สัมพันธ์กับมวลสูญหาย 7.32, 0.66, 2.34 และ 4.89% สอดคล้องกับจำนวนโมลของน้ำผลึก คือ 1.86, 0.17, 0.60 และ 1.24 ตามลำดับ จำนวนโมลน้ำผลึกรวมเท่ากับ 3.87

ระบบสารตั้งต้น  $ZnSO_4 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$  ด้วยวิธีการตกตะกอนแบบธรรมดา (ภาพที่ 4.4) จะเกิดผ่านกลไก 2 ขั้นตอน ในช่วงอุณหภูมิ 80-150 และ 150-330 °C เกิดที่พีค DTG ที่ 92 และ 260 °C สัมพันธ์กับมวลสูญหาย 7.91 และ 5.99% สอดคล้องกับจำนวนโมลของน้ำผลึก คือ 2.01 และ 1.52 ตามลำดับ จำนวนโมลน้ำผลึกรวมเท่ากับ 3.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ระบบสารตั้งต้น  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  ด้วยวิธีการตกตะกอนแบบธรรมดา (ภาพที่ 4.12) จะเกิดผ่านกลไก 3 ขั้นตอน ในช่วงอุณหภูมิ 200-300, 300-400 และ 400-600 °C เกิดที่พีค DTG ที่ 258, 356 และ 419 °C สัมพันธ์กับมวลสูญหาย 5.18, 5.95 และ 3.11% สอดคล้องกับจำนวนโมลของน้ำผลึก คือ 1.32, 1.51 และ 0.79 ตามลำดับ จำนวนโมลน้ำผลึกรวมเท่ากับ 3.62

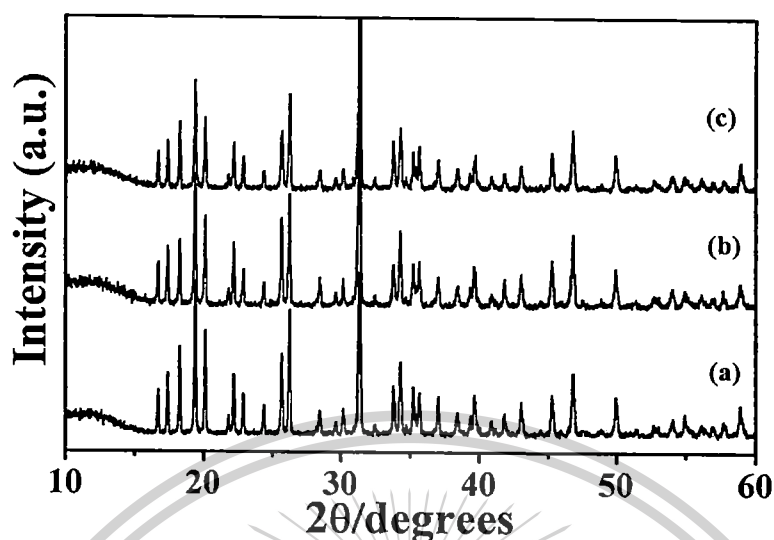
#### 4.2.2 ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของสาร

การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสี X-Ray ได้รูปแบบการสะท้อนรังสี X-Ray แสดงในภาพที่ 4.13-4.20 สำหรับสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  และอนุพันธ์ทางความร้อน คือ  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่ถูกเตรียมขึ้นด้วยสารตั้งต้นระบบต่าง ๆ และด้วยเทคนิคการเตรียม 2 แบบ ตามลำดับ จากผลกราฟที่ได้ นำไปคำนวณแลตติสพารามิเตอร์และขนาดผลึกได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค XRD รูปแบบที่ได้ สอดคล้องกับ รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มาตรฐาน (PDF no. 77-1297) ของ  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ซึ่งมีโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก เมื่อนำไปคำนวณหาค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของสารที่เตรียมได้ สรุปไว้ในตารางที่ 4.3 นอกจากนี้ยังพบว่า ผงผลึกที่ทำการสังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากไม่ตรวจพบเฟสแปลกปลอมอื่นใด ส่วนผงผลึกที่ผ่านการเผา ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า สอดคล้องกับ รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มาตรฐาน (PDF no. 76-0518) ของ  $Zn_3(PO_4)_2$  โดยมีลักษณะโครงสร้างแบบมอนอคลินิก โดยมีค่าแลตทิซพารามิเตอร์คำนวณได้ แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 พบว่า ผงผลึกที่ผ่านการเผาจะกลายเป็น  $Zn_3(PO_4)_2$  อย่างสมบูรณ์ โดยไม่พบการเปลี่ยนแปลงเป็นเฟสอื่นเลย ผลึกที่เตรียมได้ทั้ง  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  และ  $Zn_3(PO_4)_2$  มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ไม่พบเฟสแปลกปลอมเกิดขึ้น

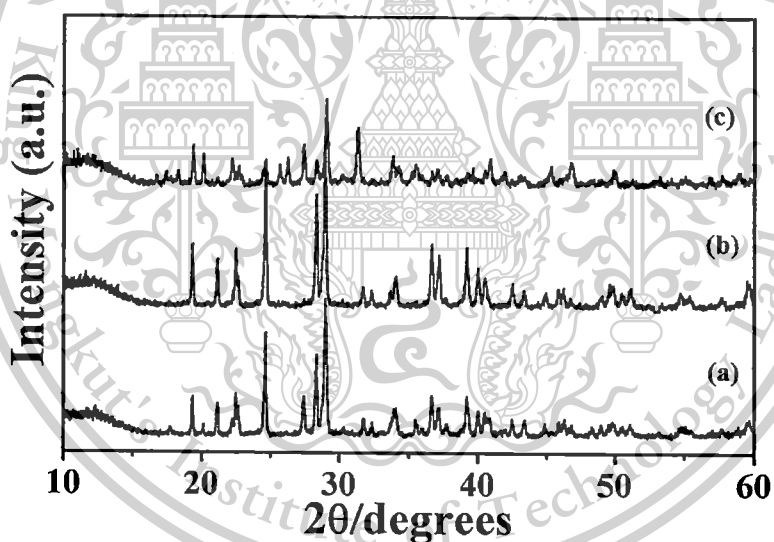
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4.13 รูปแบบ XRD ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$  (a),  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + Na_2HPO_4$  (b), และ  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (c)

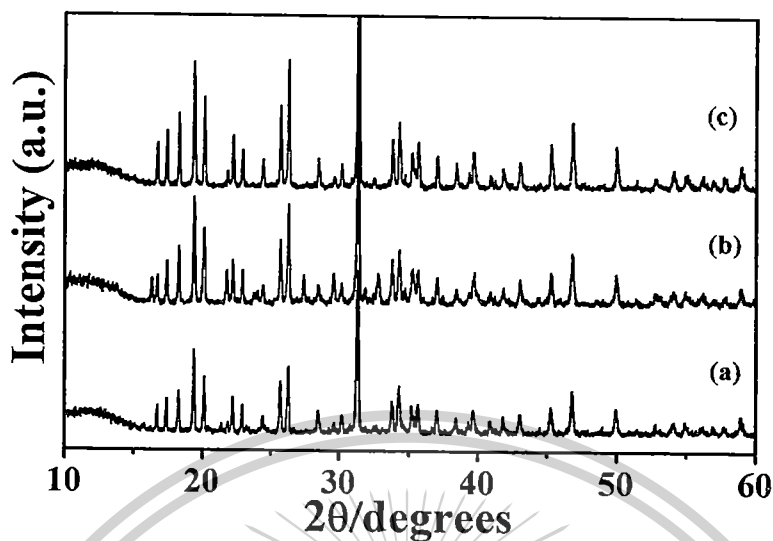


ภาพที่ 4.14 รูปแบบ XRD ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่ได้จากการเผาที่  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  2 ชม. ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$  (a),  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + Na_2HPO_4$  (b), และ  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (c)

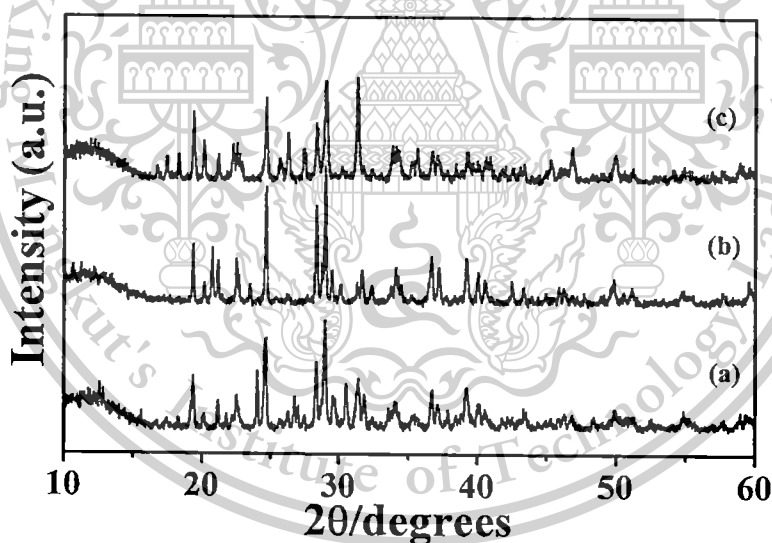
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4.15 รูปแบบ XRD ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  +  $K_2HPO_4$  (a),  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + Na_2HPO_4$  (b), และ  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (c)

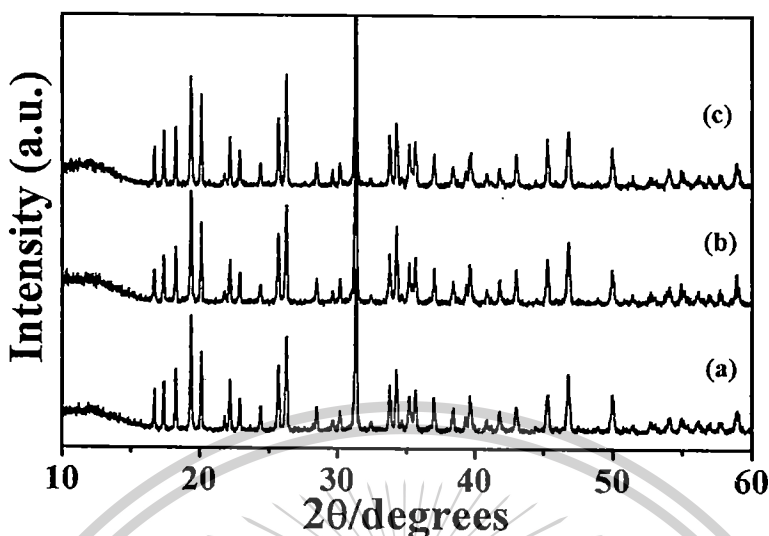


ภาพที่ 4.16 รูปแบบ XRD ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่ได้จากการเผาที่  $200\text{ }^{\circ}C$  2 ชม. ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$  (a),  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + Na_2HPO_4$  (b), และ  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (c)

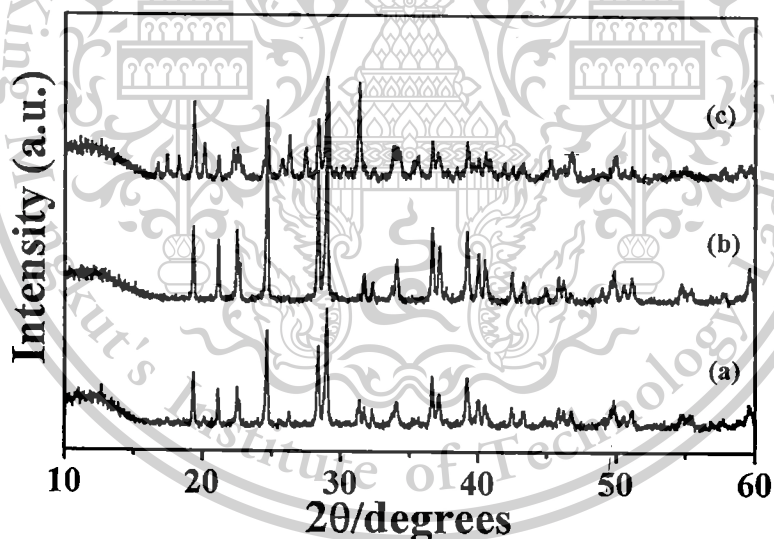
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4.17 รูปแบบ XRD ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$  (a),  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + Na_2HPO_4$  (b), และ  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (c)

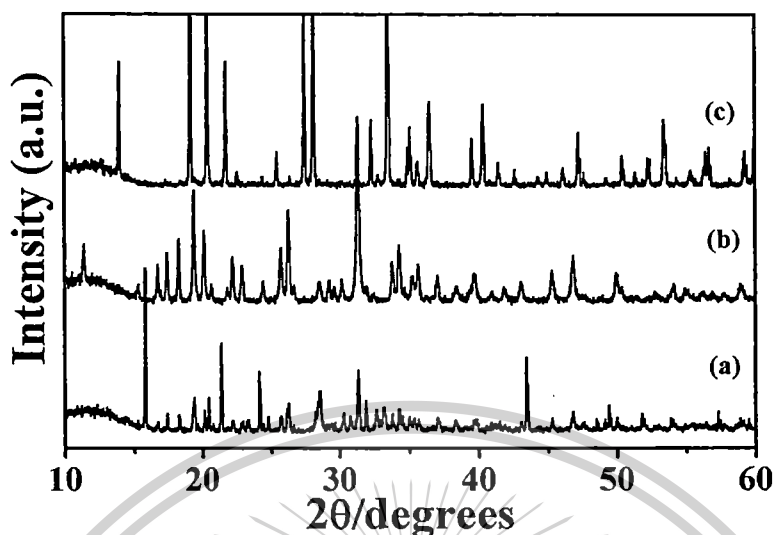


ภาพที่ 4.18 รูปแบบ XRD ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่ได้จากการเผาที่  $200\text{ }^{\circ}C$  2 ชม. ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$  (a),  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + Na_2HPO_4$  (b), และ  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (c)

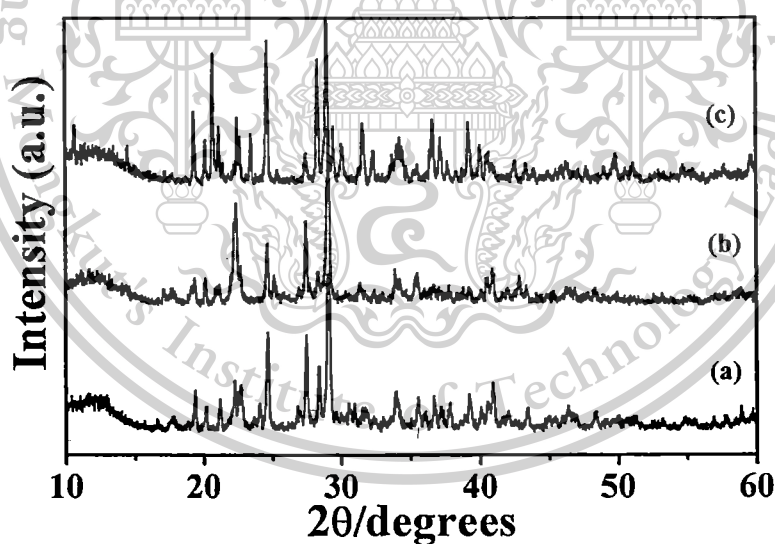
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4.19 รูปแบบ XRD ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$  (a),  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + Na_2HPO_4$  (b), และ  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (c)



ภาพที่ 4.20 รูปแบบ XRD ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่ได้จากการเผาที่ 200 °C 2 ชม. ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$  (a),  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + Na_2HPO_4$  (b), และ  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.2 ขนาดผลึกและแลตติสพารามิเตอร์ ที่คำนวณได้จากรูปแบบการสะท้อนรังสี X-ray สำหรับสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$

ลำดับ	ระบบสารตั้งต้น	a (Å)	b(Å)	c(Å)	ขนาดผลึกเฉลี่ย (nm)
1	$ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$	1.059	1.826	0.501	84±18
2	$ZnCl_2 \cdot 4H_2O + Na_2HPO_4$	1.053	1.817	0.499	76±16
3	$ZnCl_2 \cdot 4H_2O + (NH_4)_2HPO_4$	1.043	1.798	0.494	89±16
4	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$	1.048	1.807	0.496	77±23
5	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O + Na_2HPO_4$	1.055	1.820	0.500	84±15
6	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O + (NH_4)_2HPO_4$	1.059	1.826	0.501	70±16
7	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$	1.052	1.815	0.498	87±19
8	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + Na_2HPO_4$	1.062	1.831	0.503	76±16
9	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + (NH_4)_2HPO_4$	1.049	1.809	0.497	84±18
10	$Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$	1.056	1.821	0.500	80±14
11	$Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + Na_2HPO_4$	1.052	1.814	0.498	85±22
12	$Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + (NH_4)_2HPO_4$	1.055	1.820	0.500	88±17

#### 4.2.3 ผลการตรวจเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของสาร

ผลการบันทึกสเปกตรัม FTIR แสดงในภาพที่ 4.21-4.28 สำหรับสารที่เตรียมขึ้นได้ทั้งหมด แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  และ  $Zn_3(PO_4)_2$  โดยหน่วยย่อยที่เป็นองค์ประกอบทางโครงสร้าง ประกอบไปด้วย  $PO_4^{3-}$ ,  $ZnO_6$  และ  $H_2O$  สำหรับสารไฮเดรต และ  $PO_4^{3-}$  และ  $ZnO_6$  สำหรับสารที่เป็นไฮเดรตนั้น มีน้ำผลึกที่มีพื้นฐานของการสั่นภายในโมเลกุล 3 แบบ คือ H-O-H bending band ( $\nu_1$ ) ตรวจพบที่  $1630\text{ cm}^{-1}$ , O-H symmetric stretching vibration ( $\nu_1$ ) ตรวจพบในช่วง  $3000-3300\text{ cm}^{-1}$  และ O-H asymmetric stretching vibration ( $\nu_3$ ) ตรวจพบในช่วง  $3300-3500\text{ cm}^{-1}$  โดยพบว่าแถบการสั่นของน้ำนี้จะไม่ปรากฏในสเปกตรัมของสารแอนไฮดรัส  $Zn_3(PO_4)_2$  และกับสารไฮเดรต ในระบบสารตั้งต้นทุกตัว คือ  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ ,  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + Na_2HPO_4$ ,  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + (NH_4)_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + Na_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + (NH_4)_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + Na_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + (NH_4)_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

+Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, Zn(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>•2H<sub>2</sub>O +(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, รวม 12 ระบบ พบว่า สารที่เกิดขึ้นเป็นสารไฮเดรตที่แถบการสั่นพื้นฐานของโมเลกุลของในช่วงดังที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่จะมีการเลื่อนไปสูงหรือต่ำกว่าค่าตามทฤษฎีเพียงเล็กน้อยไม่เกิน 10 cm<sup>-1</sup>

ตารางที่ 4.3 ขนาดผลึกและแลตทิซพารามิเตอร์ ที่คำนวณได้จากรูปแบบการสะท้อนรังสี X-ray สำหรับสารอนุพันธ์ทางความร้อน Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>

ลำดับ	ระบบสารตั้งต้น	a (Å)	b(Å)	c(Å)	β (°)	ขนาดผลึกเฉลี่ย (nm)
1	ZnCl <sub>2</sub> •4H <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.810	0.560	1.496	104.60	74±16
2	ZnCl <sub>2</sub> •4H <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.806	0.557	1.489	104.08	72±14
3	ZnCl <sub>2</sub> •4H <sub>2</sub> O + (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.798	0.552	1.474	103.03	78±16
4	ZnSO <sub>4</sub> •7H <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.802	0.555	1.481	103.55	72±10
5	ZnSO <sub>4</sub> •7H <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.807	0.558	1.492	104.29	74±15
6	ZnSO <sub>4</sub> •7H <sub>2</sub> O + (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.810	0.560	1.496	104.60	72±16
7	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> •6H <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.805	0.557	1.487	103.97	77±13
8	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> •6H <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.812	0.562	1.501	104.92	71±11
9	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> •6H <sub>2</sub> O + (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.802	0.555	1.483	103.64	74±12
10	Zn(CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub> •2H <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.808	0.559	1.493	104.34	70±14
11	Zn(CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub> •2H <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.805	0.557	1.487	103.95	75±17
12	Zn(CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub> •2H <sub>2</sub> O + (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.807	0.558	1.491	104.25	78±13

สำหรับแถบการสั่นพื้นฐานของ Zn-O ในหน่วยย่อย ZnO<sub>6</sub> นั้น จะมีการสั่น คือการสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตร (symmetric stretching) ปรากฏในช่วง 200-400 cm<sup>-1</sup> และ การสั่นแบบยืดหดแบบไม่สมมาตร (symmetric stretching) ปรากฏในช่วง 400-550 cm<sup>-1</sup> สำหรับสารไฮเดรต Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>•4H<sub>2</sub>O พบว่ารูปแบบการสั่นของ Zn-O จะถูกซ้อนทับด้วยแถบการสั่นของฟอสเฟต PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> และในส่วนของแถบการสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตร (symmetric stretching) จะปรากฏในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าขีดจำกัดของเครื่อง FTIR สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ จะตรวจวัดได้ แต่สำหรับสารแอนไฮดรัส Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> นั้น รูปแบบการสั่นพื้นฐานของ Zn-O ในหน่วยย่อย ZnO<sub>6</sub> จะปรากฏเด่นชัดมาก พบว่า มีการสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตร (symmetric

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

stretching) ปรากฏในช่วง  $200-400\text{ cm}^{-1}$  และ การสั่นแบบยืดหดแบบไม่สมมาตร (symmetric stretching) ปรากฏในช่วง  $400-550\text{ cm}^{-1}$  โดยปรากฏที่การสั่นที่แยกการซ้อนทับของพันธะ Zn-O ออกเป็นหลายพีค อันเป็นผลจากการจัดเรียงตัวภายในโครงสร้างสารดังกล่าว มีความเป็นระเบียบแตกต่างกันทำให้ความยาวพันธะแตกต่างกันตามสิ่งแวดล้อมที่ล้อมรอบพันธะดังกล่าวนี้ จากที่กล่าวมา สามารถแบ่งชนิดของสารแอนไฮดริส  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$  ตามรูปแบบการสั่นออกเป็น 2 กลุ่ม แล้วให้รูปแบบการสั่นคล้ายกัน โดยจัดตามระบบสารตั้งต้นที่ใช้เตรียม คือ

กลุ่มที่ 1 สารตั้งต้นจำนวน 11 ระบบ :  $\text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{HPO}_4$

กลุ่มที่ 2 สารตั้งต้นจำนวน 1 ระบบ :  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$

ความแตกต่างของรูปแบบการสั่นของสารแอนไฮดริสทั้งหมดแสดงไว้ในภาพที่ 4.21-4.28 ตามลำดับ

สำหรับฟอสเฟต  $\text{PO}_4^{3-}$  นั้นเป็นหน่วยย่อยหลัก ของสารทั้งสารไฮเดรต  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  และแอนไฮดริส  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$  จากทฤษฎีแล้วหน่วยย่อยฟอสเฟต  $\text{PO}_4^{3-}$  จะตรวจพบโหมดการสั่นอยู่ที่โหมดคือ P-O symmetric stretching vibration band ( $\nu_1$ ) ตรวจพบที่  $930$  และ  $950\text{ cm}^{-1}$  (ในช่วง  $900-1000\text{ cm}^{-1}$ ) จะเป็นการสั่นที่ไม่มีการซ้อนสถานะ O-P-O symmetric bending band ( $\nu_2$ ) ตรวจพบที่  $\sim 385$   $410$   $428$   $455$  และ  $470\text{ cm}^{-1}$  (ในช่วง  $370-480\text{ cm}^{-1}$ ) เป็นการสั่นที่มีการซ้อนสถานะพลังงาน 2 สถานะ P-O antisymmetric stretching vibration band ( $\nu_3$ ) ตรวจพบที่  $1000$   $1025$   $1066$   $1105$   $1130$  และ  $1156\text{ cm}^{-1}$  (ในช่วง  $1000-1200\text{ cm}^{-1}$ ) เป็นการสั่นที่มีการซ้อนสถานะพลังงาน 3 สถานะ และ O-P-O antisymmetric bending band ( $\nu_4$ ) ตรวจพบที่  $500$   $524$   $561$   $576$   $600$  และ  $635\text{ cm}^{-1}$  (ในช่วง  $500-650\text{ cm}^{-1}$ ) เป็นการสั่นที่มีการซ้อนสถานะพลังงาน 3 สถานะ ตามทฤษฎี จึงคำนวณหาพลังงานการสั่นของฟอสเฟตนี้ได้ทั้งสิ้น 9 แถบการสั่น แต่ความเป็นจริงการซ้อนสถานะการสั่นอาจไม่แยกให้เห็น โดยอาจเกิดเป็นแถบการสั่นเพียงหนึ่งเดียวก็ได้ ขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อม และการจัดเรียงตัวทางโครงสร้างของสารที่เตรียมขึ้นได้ รูปแบบการสั่นของฟอสเฟต  $\text{PO}_4^{3-}$  ของสารไฮเดรต  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  และแอนไฮดริส  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$  มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน อธิบายได้โดย รูปแบบการสั่นสำหรับ  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  จะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มที่มีความคล้ายกัน คือ

กลุ่มที่ 1 มีแถบการสั่น P-O antisymmetric stretching vibration band ( $\nu_3$ ) อยู่ในช่วง  $900-1250\text{ cm}^{-1}$  ประมาณ 3 พีค และมีไหล่พีค 1-2 ไหล่ และ O-P-O antisymmetric bending band ( $\nu_4$ ) อยู่ในช่วง  $450-650\text{ cm}^{-1}$  ประมาณ 2 พีคคู่กัน ที่เรียกว่า doublet peaks สารนี้เกิดขึ้นจากการเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้นจำนวน 11 ระบบ :  $\text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{HPO}_4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กลุ่มที่ 2 มีแถบการสั่น P-O antisymmetric stretching vibration band ( $\nu_3$ ) อยู่ในช่วง 900-1250  $\text{cm}^{-1}$  ประมาณ 2-3 พีค O-P-O antisymmetric bending band ( $\nu_4$ ) อยู่ในช่วง 450-650  $\text{cm}^{-1}$  ประมาณ 2 พีค และมีพีคที่ตำแหน่ง 1400-1500  $\text{cm}^{-1}$  เกิดขึ้นมาอีก 2 พีค น่าจะเป็นการสั่นแบบโอเวอร์โทน P-O antisymmetric stretching vibration band ( $\nu_3$ ) หรือการสั่นแบบควมร่วมของ P-O antisymmetric stretching vibration band ( $\nu_3$ ) และ O-P-O antisymmetric bending band ( $\nu_4$ ) สารนี้เกิดขึ้นจากการเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น จำนวน 1 ระบบ :  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$

สำหรับการสั่นของฟอสเฟต  $\text{PO}_4^{3-}$  ของแอนไฮดรัส  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$  จะปรากฏการแยกของรูปแบบการสั่นของทั้ง 4 โหมดการสั่นอย่างชัดเจนและมีความซับซ้อนมาก โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

กลุ่มแรกมีแถบการสั่น P-O antisymmetric stretching vibration band ( $\nu_3$ ) ที่ตำแหน่ง 1200-900  $\text{cm}^{-1}$  จำนวน 6 พีค O-P-O antisymmetric bending band ( $\nu_4$ ) อยู่ในช่วง 450-650  $\text{cm}^{-1}$  ประมาณ 3-4 พีค และมี O-P-O symmetric bending band ( $\nu_2$ ) อยู่ในช่วง 450-400  $\text{cm}^{-1}$  ประมาณ 1 พีค สารแอนไฮดรัสนี้ถูกเตรียมได้จากสารตั้งต้นจำนวน 11 ระบบ :  $\text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{HPO}_4$

ส่วนกลุ่มที่สองมีแถบการสั่น P-O antisymmetric stretching vibration band ( $\nu_3$ ) ที่ตำแหน่ง 1200-900  $\text{cm}^{-1}$  จำนวน 6 พีค P-O symmetric stretching vibration band ( $\nu_1$ ) ที่ตำแหน่ง 900-700  $\text{cm}^{-1}$  จำนวน 2 พีค O-P-O antisymmetric bending band ( $\nu_4$ ) อยู่ในช่วง 450-650  $\text{cm}^{-1}$  ประมาณ 6 พีค และมี O-P-O symmetric bending band ( $\nu_2$ ) อยู่ในช่วง 450-400  $\text{cm}^{-1}$  ประมาณ 1 พีค สารแอนไฮดรัสนี้ถูกเตรียมได้จากสารตั้งต้น จำนวน 1 ระบบ :  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$

จากผลที่การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่น ทำให้เราทราบว่า รูปแบบการสั่นของสารที่ถูกเตรียมขึ้นผ่านระบบสารตั้งต้นและขั้นตอน หรือเทคนิคการเตรียมที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้มีแถบการสั่นที่ตรวจวิเคราะห์ทางเครื่องมือแตกต่างกันไปด้วย ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 4.21-4.28 เป็นการยืนยันว่าเทคนิคที่วิเคราะห์นี้สามารถจำแนกเอกลักษณ์ของสารที่กำลังศึกษาได้อย่างดี และมีประสิทธิภาพอย่างมาก ทั้งที่เป็นเทคนิคง่ายและสะดวกรวดเร็ว

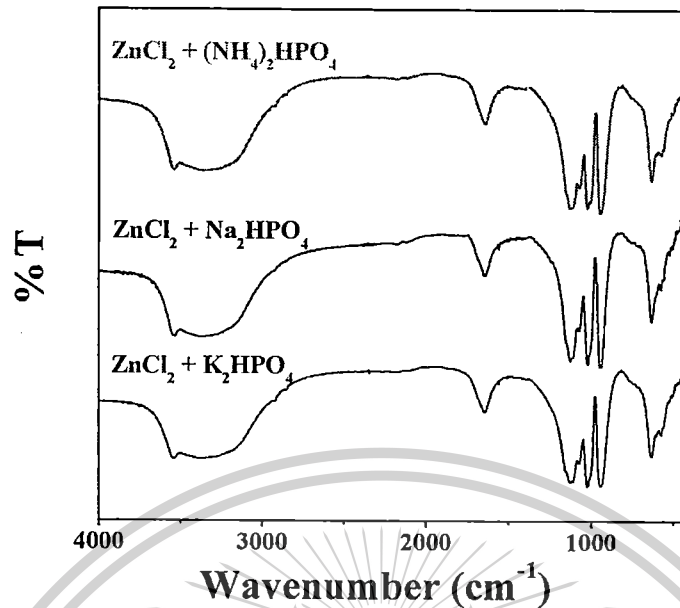
#### 4.2.4 ผลการตรวจลักษณะสัณฐานวิทยาของสาร

การตรวจสอบพฤติกรรมทางสัณฐานวิทยาของสารที่เตรียมขึ้นได้และอนุพันธ์ทางความร้อนของสารทั้งหมดแสดงดังภาพในภาพที่ 4.29-4.36 สำหรับสาร  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$  จากรูป SEM ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสารที่เตรียมขึ้นแม้จะเป็นสารชนิดเดียวกัน มีโครงสร้างอันเดียวกัน และมีรูปแบบการสั่นของหน่วยย่อยเหมือนกัน แต่ หากเตรียมจากสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้รูปร่างทางสัณฐานวิทยา มีความแตกต่างกันไปด้วย

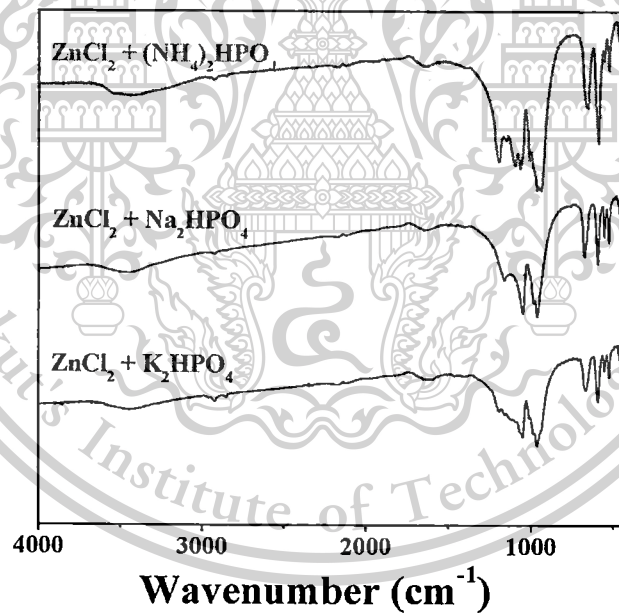
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4.21 FTIR สเปกตร้าของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ ,  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + Na_2HPO_4$ , และ  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + (NH_4)_2HPO_4$

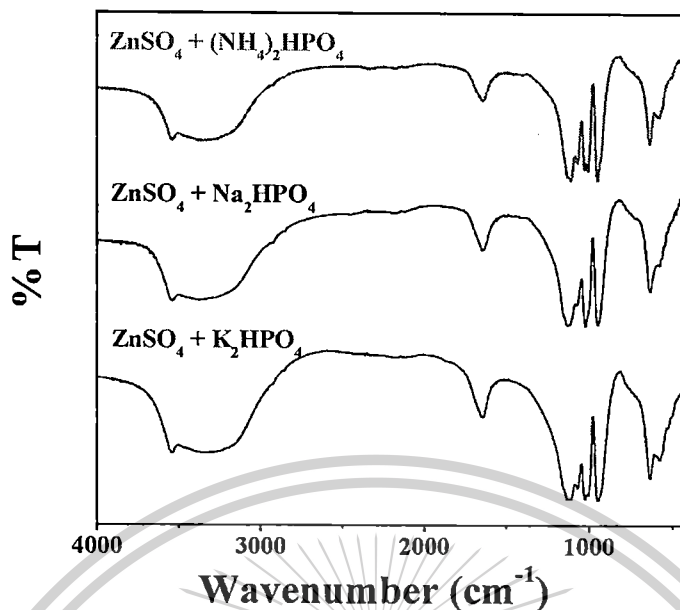


ภาพที่ 4.22 FTIR สเปกตร้าของสาร  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่ได้จากการเผาที่ 200 °C 2 ชม. ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ ,  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + Na_2HPO_4$ , และ  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + (NH_4)_2HPO_4$

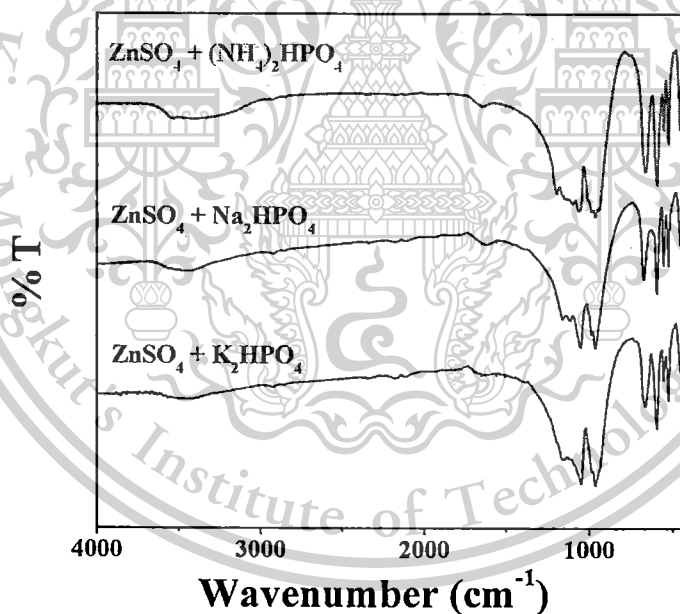
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4.23 FTIR สเปกตร้าของสาร Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, และ ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O + (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>

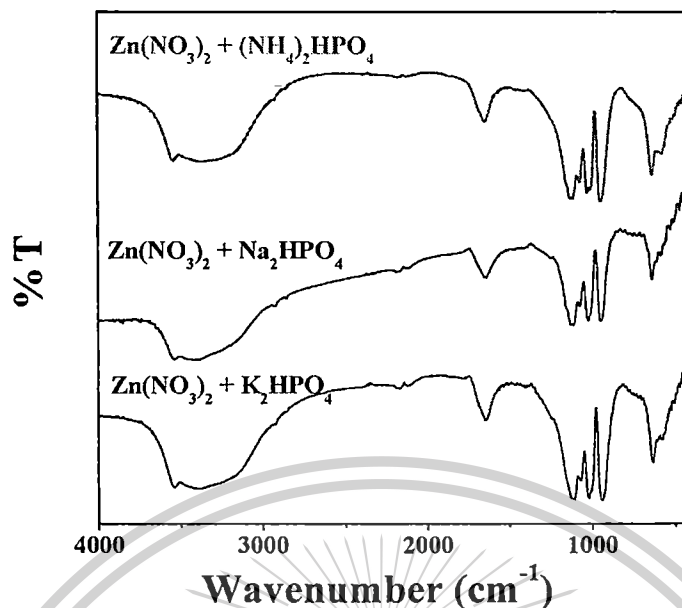


ภาพที่ 4.24 FTIR สเปกตร้าของสาร Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> ที่ได้จากการเผาที่ 200 °C 2 ชม. ของสาร Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, และ ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O + (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>

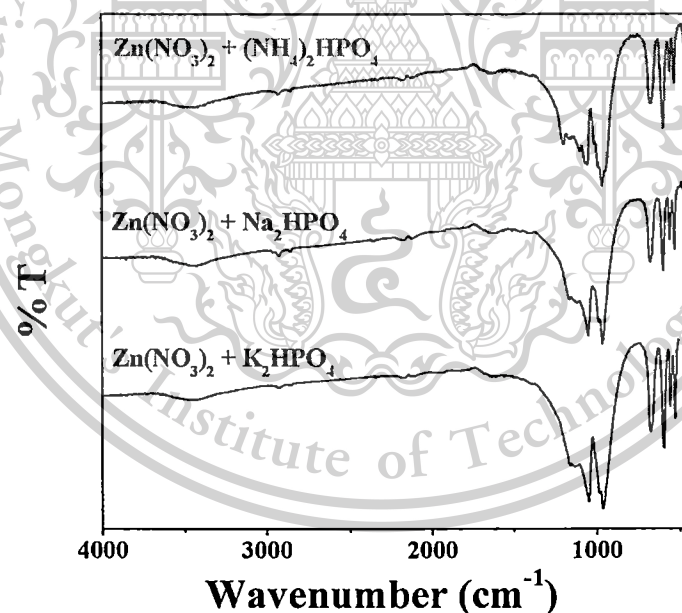
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4.25 FTIR สเปกตรัมของสาร  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{HPO}_4$ , และ  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$

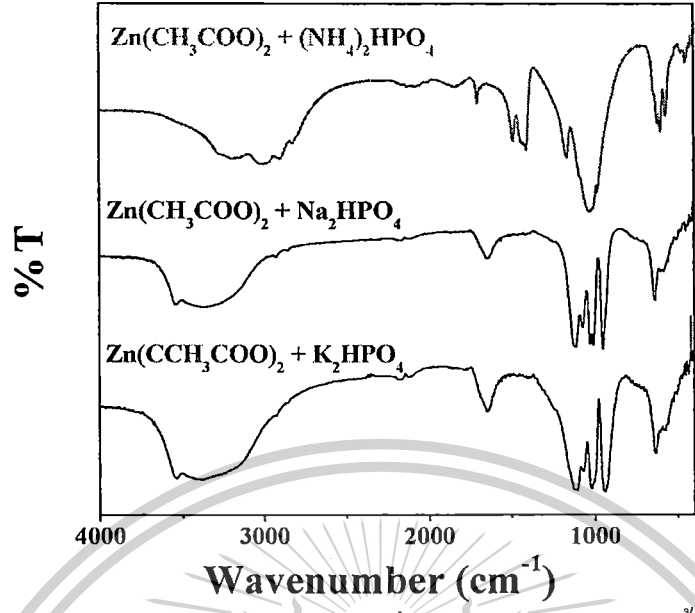


ภาพที่ 4.26 FTIR สเปกตรัมของสาร  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$  ที่ได้จากการเผาที่ 200 °C 2 ชม. ของสาร  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{HPO}_4$ , และ  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$

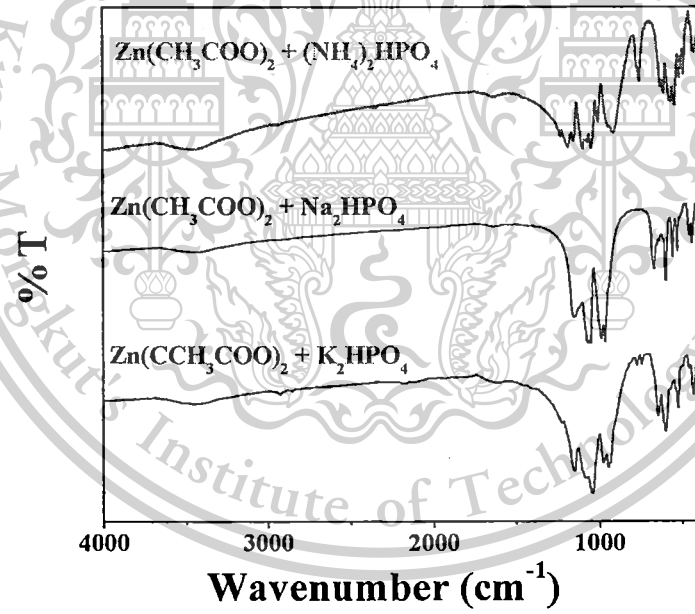
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4.27 FTIR สเปกตร้าของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + Na_2HPO_4$ , และ  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + (NH_4)_2HPO_4$

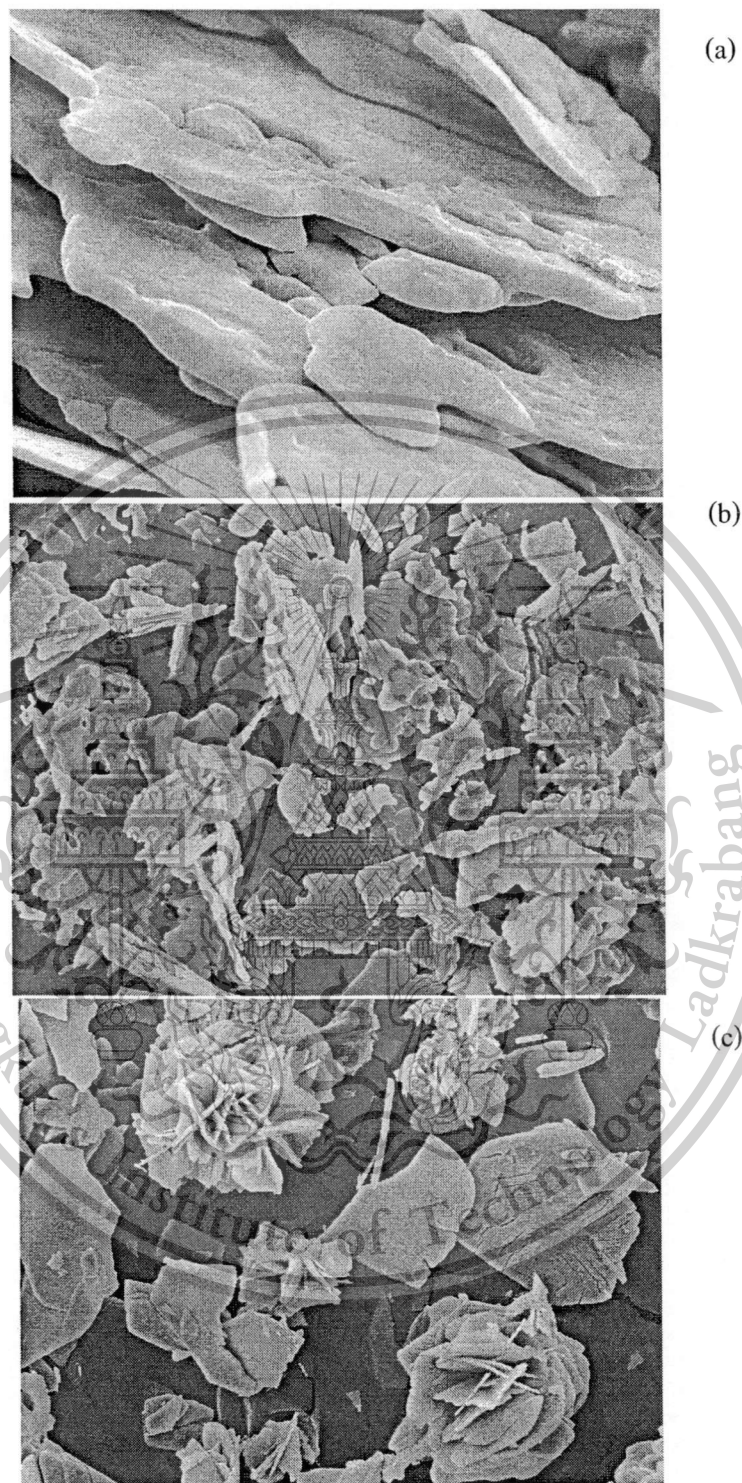


ภาพที่ 4.28 FTIR สเปกตร้าของสาร  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่ได้จากการเผาที่ 200 °C 2 ชม. ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + Na_2HPO_4$ , และ  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + (NH_4)_2HPO_4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

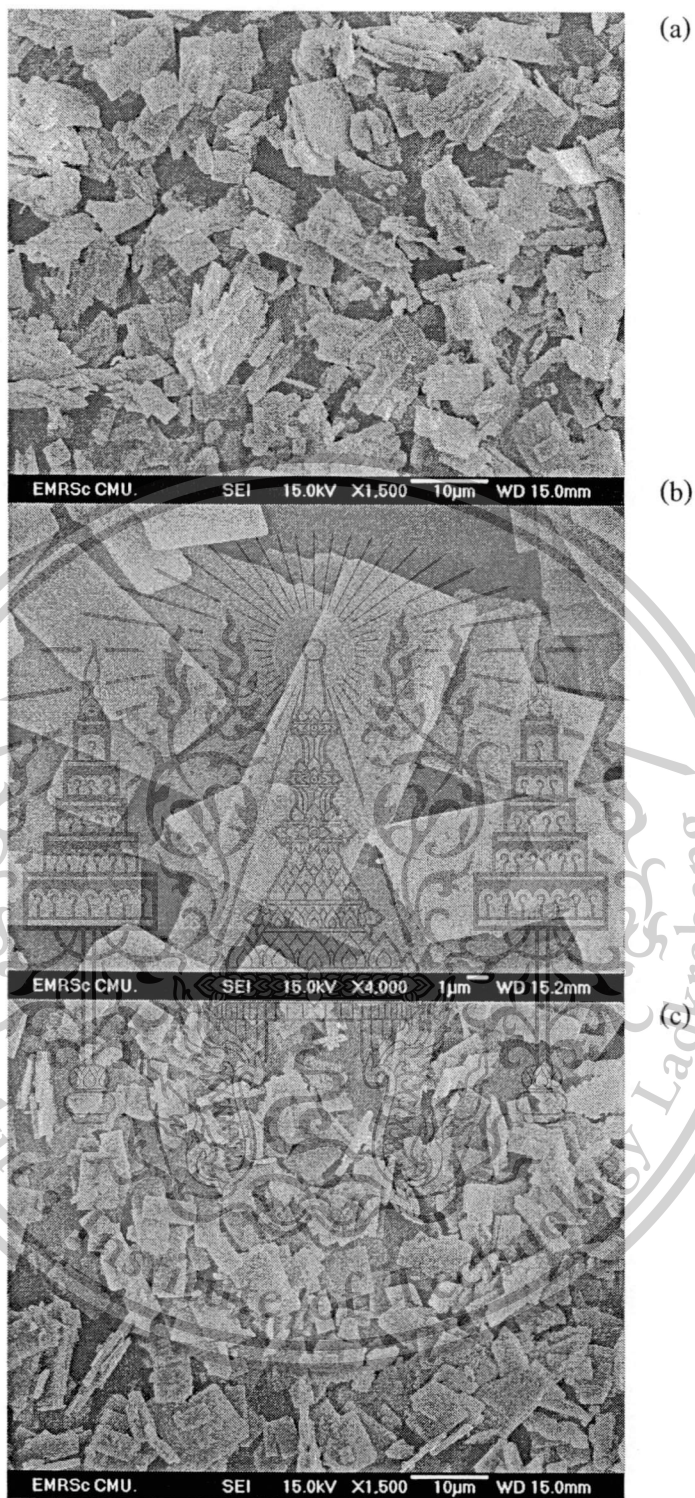


ภาพที่ 4.29 สัณฐานวิทยา SEM ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$  (a),  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + Na_2HPO_4$  (b), และ  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

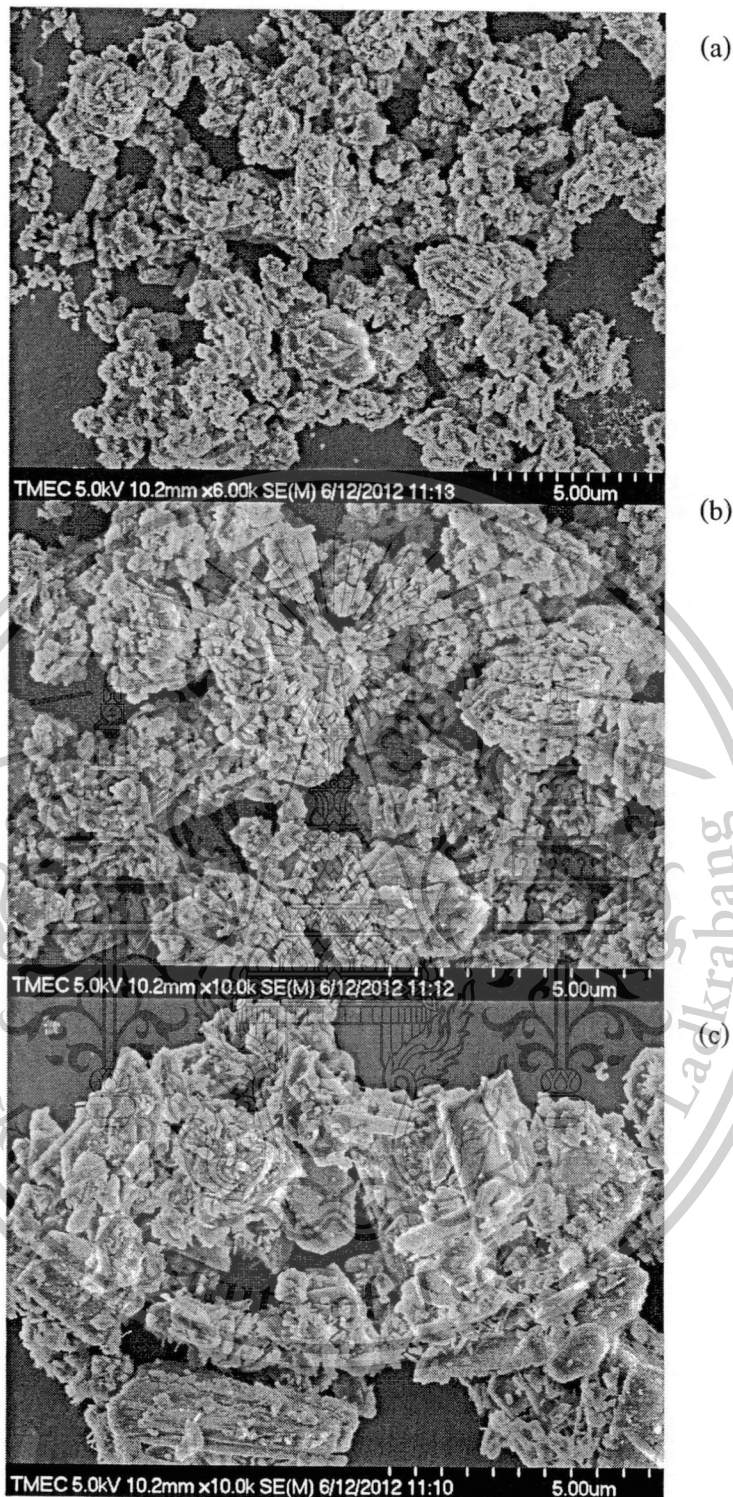


ภาพที่ 4.30 สัณฐานวิทยา SEM ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่ได้จากการเผาที่  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  2 ชม. ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$  (a),  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + Na_2HPO_4$  (b), และ  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

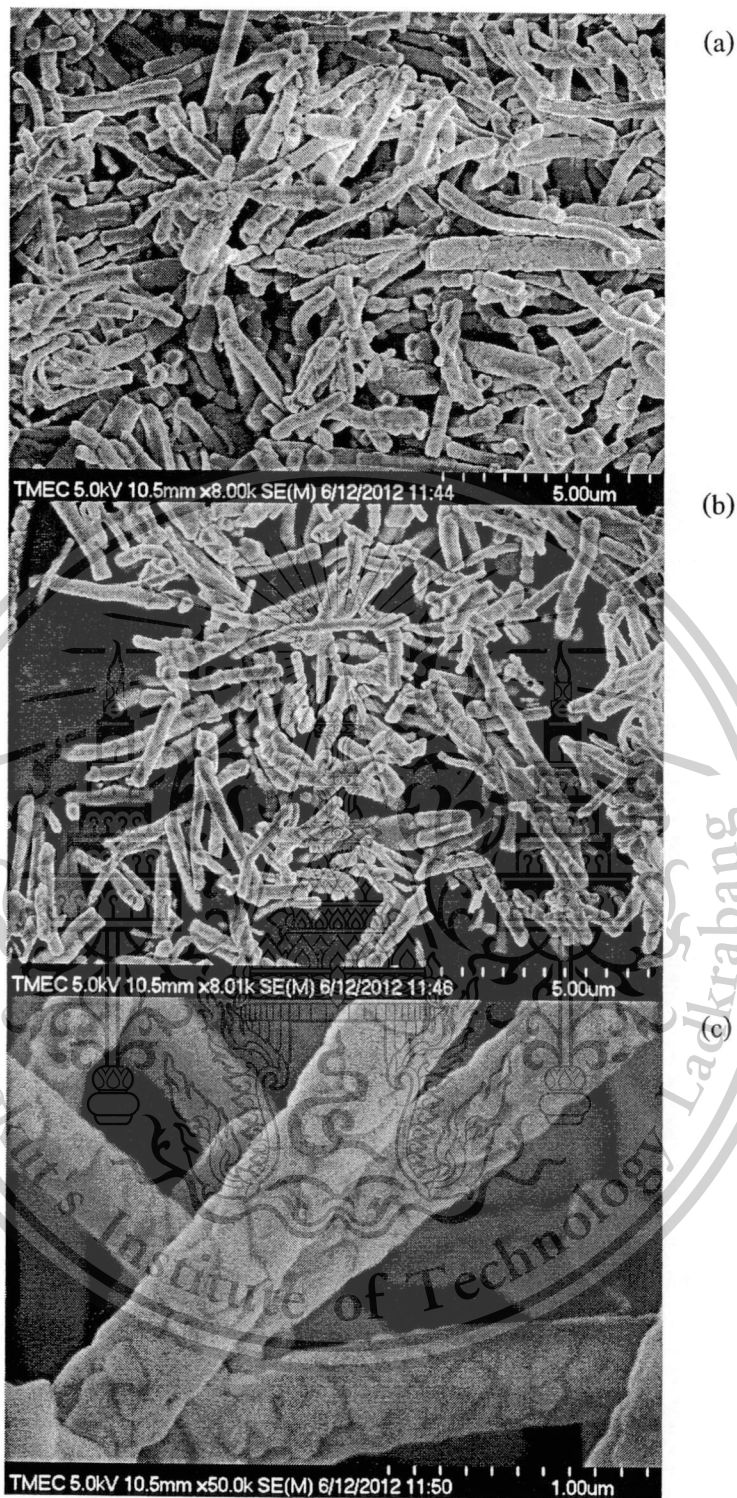


ภาพที่ 4.31 สัณฐานวิทยา SEM ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$  (a),  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + Na_2HPO_4$  (b), และ  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

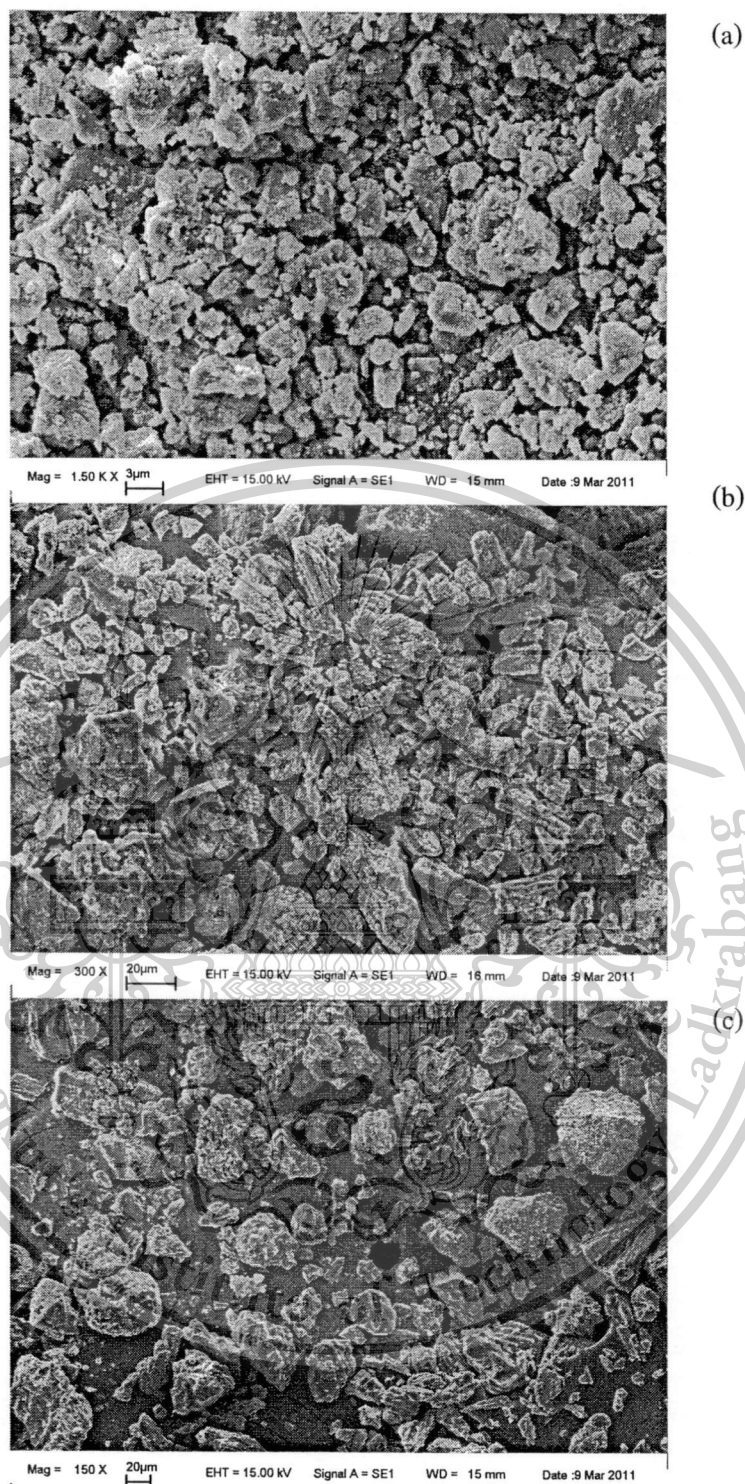


ภาพที่ 4.32 สัณฐานวิทยา SEM ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่ได้จากการเผาที่  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  2 ชม. ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$  (a), และ  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + Na_2HPO_4$  (b),  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

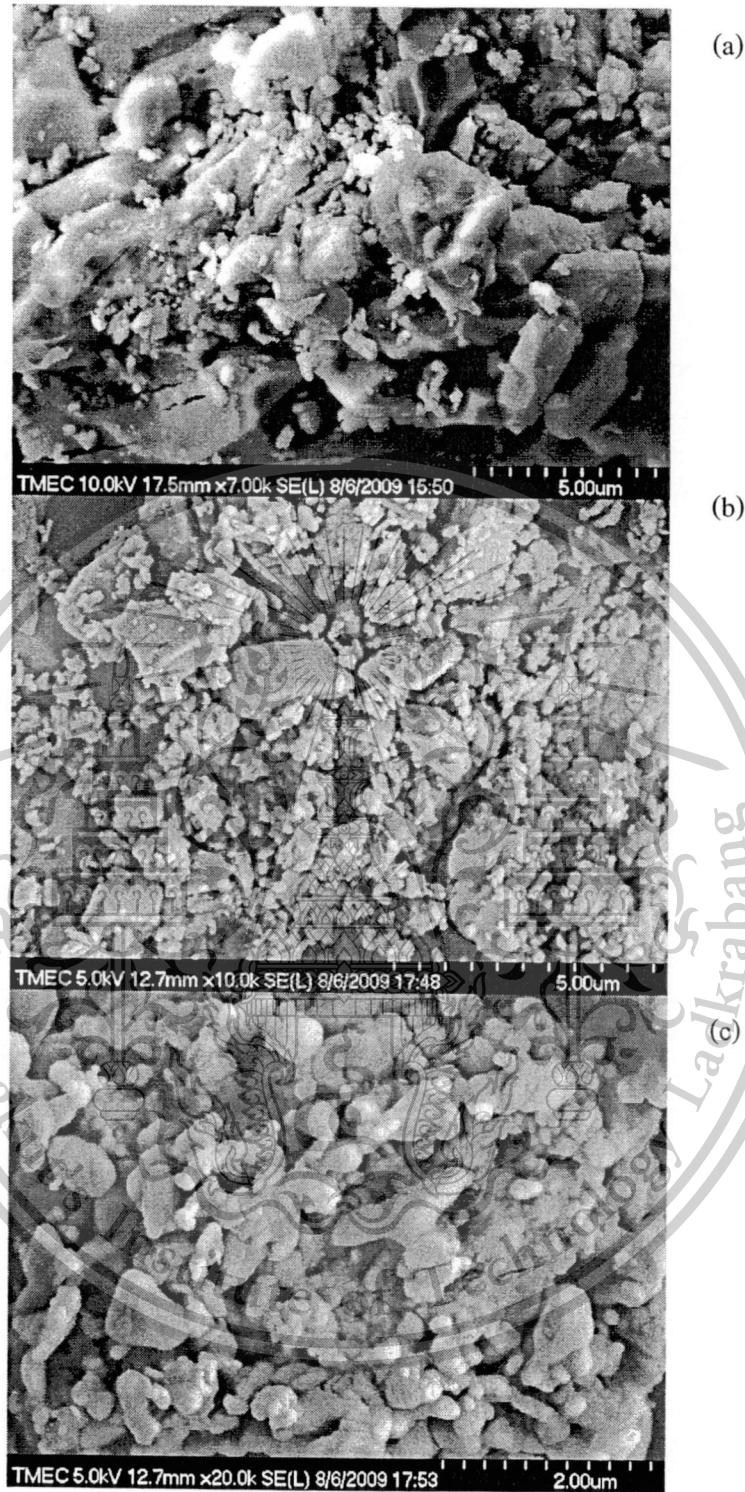


ภาพที่ 4.33 สัณฐานวิทยา SEM ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$  (a),  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + Na_2HPO_4$  (b), และ  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

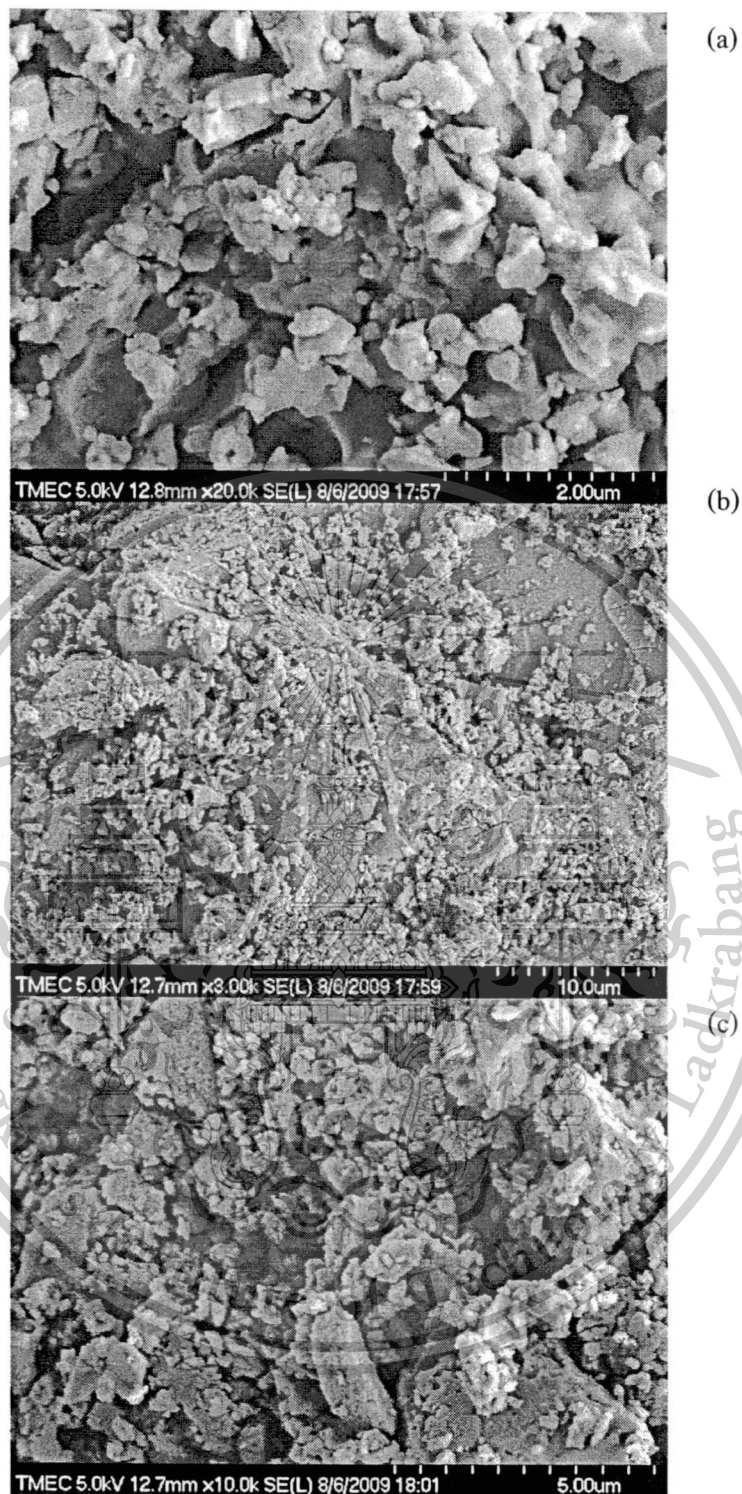


ภาพที่ 4.34 สัณฐานวิทยา SEM ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่ได้จากการเผาที่  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  2 ชม. ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$  (a),  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + Na_2HPO_4$  (b), และ  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

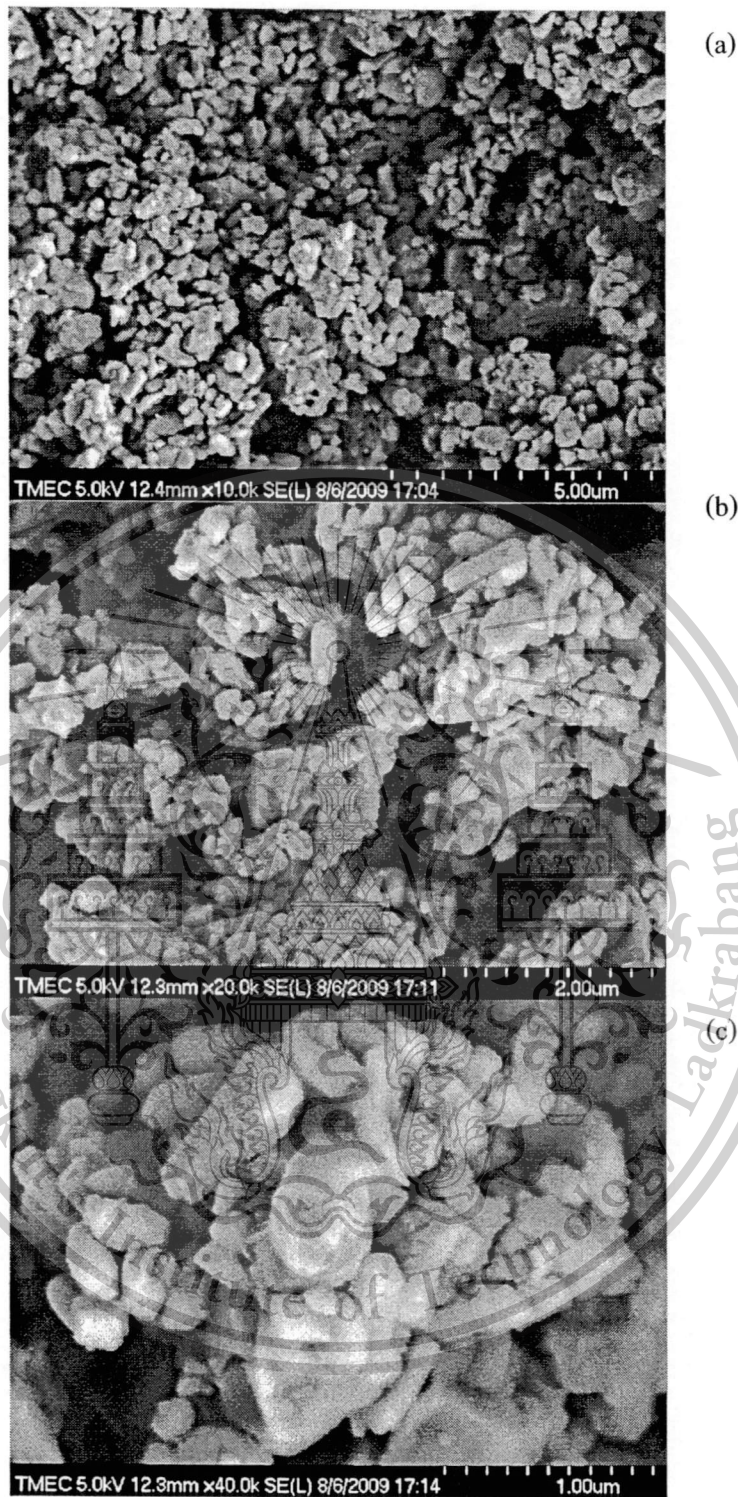


ภาพที่ 4.35 สัณฐานวิทยา SEM ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$  (a),  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + Na_2HPO_4$  (b), และ  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4.36 สัณฐานวิทยา SEM ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่ได้จากการเผาที่  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  2 ชม. ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$  (a),  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + Na_2HPO_4$  (b), และ  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากภาพที่ 4.29-4.36 รูปร่างสัณฐานวิทยาของ  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  และ  $Zn_3(PO_4)_2$  จำแนกรูปร่างได้ตามระบบการเตรียมได้ คือ รูปร่างสัณฐานวิทยาของ  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ ,  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + Na_2HPO_4$ , และ  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (ภาพที่ 4.29) ลักษณะเป็นแผ่น ๆ ขนาดที่แตกต่างกัน ในระดับไมโครเมตร พร้อมทั้งมีพื้นที่ผิวขรุขระ ไม่เรียบบนปรากฏบนแต่ละแผ่น รูปร่างสัณฐานวิทยาของ  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่ได้จากการเผาที่  $200^\circ C$  2 ชม. ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + K_2HPO_4$ ,  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + Na_2HPO_4$ , และ  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (ภาพที่ 4.30) ลักษณะเป็นแผ่น ๆ ขนาดที่แตกต่างกัน ในระดับไมโครเมตร พร้อมทั้งมีพื้นที่ผิวขรุขระ ไม่เรียบบนปรากฏบนแต่ละแผ่น จะมีรูปร่างคล้ายกับตัวไฮดรอตที่ยังไม่ผ่านการเผา แต่มีความรูปร่างจะมีการกระจายตัว ที่สม่ำเสมอกว่า

รูปร่างสัณฐานวิทยาของ  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น ต้น  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + Na_2HPO_4$ , และ  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (ภาพที่ 4.31) ลักษณะเป็นก้อนเหลี่ยม ๆ หลายเหลี่ยม และส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม และมีการรวมตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ขึ้น รูปร่างสัณฐานวิทยาของ  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่ได้จากการเผาที่  $200^\circ C$  2 ชม. ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + K_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + Na_2HPO_4$ , และ  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (ภาพที่ 4.32) ลักษณะเป็นเส้นด้าย ยาว และยังมีลักษณะเป็นเหมือนตัวหนอนขนาดเล็ก ไมโครเมตร คล้าย ๆ ทั้งสามระบบของสารตั้งต้น

รูปร่างสัณฐานวิทยาของ  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น ต้น  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + Na_2HPO_4$ , และ  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (ภาพที่ 4.33) ลักษณะเป็นก้อนเหลี่ยม ๆ หลายเหลี่ยม คล้ายก้อนดิน แต่มีขนาดของก้อนที่แตกต่างกัน ไม่สม่ำเสมอ ของขนาด บางก้อนใหญ่ บางก้อนเล็ก รูปร่างสัณฐานวิทยาของ  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่ได้จากการเผาที่  $200^\circ C$  2 ชม. ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + Na_2HPO_4$ , และ  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (ภาพที่ 4.34) ลักษณะก้อนที่ไม่มีขอบ และมีพื้นที่ผิวขรุขระ หยาบ ที่ไม่รูปร่างที่ไร้ระเบียบ

รูปร่างสัณฐานวิทยาของ  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น ต้น  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + Na_2HPO_4$ , และ  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (ภาพที่ 4.35) ลักษณะรูปร่างเป็นผงหยาบ ๆ คล้ายดิน แต่มีขนาดของก้อนที่แตกต่างกัน รูปร่างสัณฐานวิทยาของ  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่ได้จากการเผาที่  $200^\circ C$  2 ชม. ของสาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ถูกเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้น  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + Na_2HPO_4$ , และ  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  (ภาพที่ 4.36) ลักษณะก้อนกลมม้วนไม่มีขอบ จับรวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยการสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของสารประกอบที่มีซิงค์ฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบหลักนี้ ได้ค้นคว้าและออกแบบการสังเคราะห์สาร 2 ชนิด คือ ซิงค์ฟอสเฟตไฮเดรต  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  และซิงค์ฟอสเฟตแอนไฮดรัส  $Zn_3(PO_4)_2$  ด้วยวิธีที่ง่ายและสะดวกรวดเร็ว ประหยัดต้นทุนในการสังเคราะห์ ที่ได้เลือกเทคนิคการตกตะกอนแบบง่าย ๆ และใช้เวลาไม่เกิน 30 นาที และไม่ต้องปรับให้ตกตะกอน โดยตะกอนจะเกิดขึ้นเองเมื่อผสมสารที่เป็นแหล่งของสังกะสี และฟอสฟอรัส เข้าได้กันเพียงเท่านั้น จากสารที่เตรียมได้นั้นจะได้สารไฮเดรตจำนวน 12 ตัวอย่าง จากระบบสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน และเมื่อนำไปเผาเพื่อสังเคราะห์แอนไฮดรัส จะได้สารอนุพันธ์ทางความร้อน คือ ซิงค์ฟอสเฟตแอนไฮดรัส  $Zn_3(PO_4)_2$  จะได้สารอีกชนิดหนึ่งอีก 12 ตัวอย่าง รวมแล้วงานวิจัยการสังเคราะห์สารซิงค์ฟอสเฟตนี้จะได้สารตัวอย่างรวมทั้งสิ้น 24 ตัวอย่าง จึงได้นำไปตรวจสอบเอกลักษณ์ในลำดับถัดไป คือ การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิครังสีเอกซ์ (XRD) ตรวจสอบรูปแบบการสั่นของหน่วยย่อยภาคในโมเลกุล ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่น (FTIR) ศึกษาการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งผลการวิจัยในรายละเอียดที่กล่าวมานั้น จะอธิบายผลที่ได้รับดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปผลการสังเคราะห์ (Synthetic results)

จากการสังเคราะห์ซิงค์ฟอสเฟตไฮเดรต  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ด้วยระบบสารตั้งต้น 12 ระบบ ได้แก่  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O - K_2HPO_4$ ,  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O - Na_2HPO_4$ ,  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O - (NH_4)_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O - K_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O - Na_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O - (NH_4)_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O - K_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O - Na_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O - (NH_4)_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O - K_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O - Na_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O - (NH_4)_2HPO_4$  พบว่าสารที่เตรียมได้สารไฮเดรตมีร้อยละของการสังเคราะห์อยู่ในช่วง 79-97 % โดยพบว่าการเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้นเป็น  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  จะให้ผลผลิตต่ำที่สุด คือร้อยละ 79 ส่วนการเตรียมด้วยระบบ  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + K_2HPO_4$  จะให้ร้อยละผลผลิตสูงที่สุด คือ 97 ส่วนการเตรียมด้วยระบบสารตั้งต้นที่เหลือ จะมีค่าใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 82 เหตุผลของการที่ระบบสารตั้งต้นที่ให้ผลผลิตน้อยที่สุด อาจจะมาจากการผลิตกัมมันต์ที่ได้ อาจไม่บริสุทธิ์มีสารอื่นหรือเฟสอื่นเจือปน และจากการนำสารไฮเดรตที่เตรียมได้นี้ 12 ตัวอย่างไปเผาที่  $300^\circ C$  เป็นเวลา 3 ชม จะได้สารแอนไฮดรัสพบว่า ได้ร้อยละผลผลิตอยู่ในช่วง 97-98 ซึ่งทุกระบบของสารตั้งต้นจะให้ร้อยละการผลิตที่ใกล้เคียงกันอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

มาก บ่งบอกถึงว่า สารแอนไฮดรัสที่เตรียมได้มีความบริสุทธิ์ ค่อนข้างสูง ไร้การเจือปนหรือปนเปื้อนของเฟสอื่น ๆ ซึ่งก็เป็นผลจากการให้ความร้อนสูง ไปกำจัดเฟสเจือปนให้สลายไปตามความร้อน ซึ่งก็ถือว่าเป็นเทคนิคหนึ่งของการทำให้สารมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น จากตัวอย่างที่เตรียมขึ้นได้ในงานวิจัย การคำนวณหาร้อยละผลผลิตที่ได้จากการเตรียมสารทั้งสองชนิดนี้ จะเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการจะเลือกกระบวนการตั้งต้นใด ที่มีความคุ้มค่าในการจะผลิตขึ้นมาใช้ในระดับอุตสาหกรรม เพราะต้นทุนของสารตั้งต้นเอง จะเป็นตัวควบคุมราคาของผลิตภัณฑ์ที่จะถูกนำไปใช้ในท้องตลาด อีกทั้งเทคนิคการผลิตด้วยการตกตะกอนของสารในระบบที่ได้รายงานนี้ ยังเป็นเทคนิคที่ง่าย และใช้สารตั้งต้นเพียงสองชนิดเท่านั้น และแก่ผสมก็เกิดเป็นตะกอนของซิงค์ฟอสเฟตไฮเดรตแล้ว คาดว่างานวิจัยนี้จะถูกใช้ได้จริงในอนาคตอันใกล้ ภายในประเทศไทย

## 5.2 สรุปผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิคต่าง ๆ (Characteristic materials and Identification method)

ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารหกชนิดที่เตรียมขึ้นได้เรียงลำดับการวิเคราะห์ คือ เริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์เชิงความร้อน TGA จากนั้นนำสารไปตรวจสอบเอกลักษณ์ทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แล้วตรวจสอบรูปแบบการสั่นภายใน โมเลกุล และสุดท้ายตรวจสอบรูปร่างสัณฐานวิทยา ผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

### 5.2.1 สรุปผลการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของสาร

สารไฮเดรตที่นำไปศึกษาการสลายตัวทางความร้อนเพื่อดูการเปลี่ยนแปลง ไปเป็นแอนไฮดรัส คือ สาร  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่เตรียมได้จากระบบสารตั้งต้น 12 ระบบ ได้แก่  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O - K_2HPO_4$ ,  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O - Na_2HPO_4$ ,  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O - (NH_4)_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O - K_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O - Na_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O - (NH_4)_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O - K_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O - Na_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O - (NH_4)_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O - K_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O - Na_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O - (NH_4)_2HPO_4$  พบว่ากลไกการสลายตัวทางความร้อนของสารทั้ง 12 ตัวอย่างจาก 12 ระบบสารตั้งต้น มีกลไกการสลายตัวแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ใหญ่ คือ กลุ่มที่แรกสลายตัวทางความร้อน 2 กลไก กลุ่มที่สอง สลายตัวทางความร้อน 3 กลไก และกลุ่มสุดท้ายมีการสลายตัวมากกว่า 3 กลไก แต่ทั้งหมดล้วนสลายตัวทางความร้อนไปเป็น  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $300^\circ C$  และช่วงการสลายตัวในแต่ละขั้นตอนจะอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน หรือ อยู่ในช่วงเดียวกัน แต่มีสารหนึ่งตัวที่เตรียมจากระบบสารตั้งต้นเป็น  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + K_2HPO_4$  ที่มีลักษณะการสลายตัวทางร้อนที่แตกต่างจากสารอื่นชัดเจน และมีจำนวน โมลของน้ำผลึกที่วิเคราะห์ได้ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น คือ 1.61 โมลน้ำ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากสารที่เตรียมได้นั้นอาจไม่ใช่สารตั้งต้นเป็นซิงค์ฟอสเฟต หรือเป็นสารที่มีการปนเปื้อนของเฟสอื่นสูงนั่นเอง ส่วนสารที่เตรียมจากระบบสารตั้งต้นอื่น ๆ พบว่า มีจำนวน โมลของน้ำผลึกอยู่ในช่วง 3.62-4.04 โดยพบว่าระบบสารตั้งต้นที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โลหะสังกะสี เป็นอะซิเตทจะให้ปริมาณจำนวนโมลน้ำน้อย อีกทั้งยังสอดคล้องกับข้อมูลร้อยละผลผลิตที่น้อยกว่าสารตั้งต้นระบบอื่น ๆ ด้วย

### 5.2.2 สรุปผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของสาร

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ทำให้ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีของสารทั้งหมดที่เตรียมขึ้นได้ทั้ง 24 ตัวอย่าง ซึ่งนำมาวิเคราะห์โครงสร้าง โดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานของสารซิงค์ฟอสเฟตในตารางที่ 2.1 ถึงแม้ว่าสารซิงค์ฟอสเฟตนี้จะมีหลายฟอร์ม แต่ในการเตรียมด้วยเทคนิคการตกตะกอนนี้ และสารตั้งต้น 12 ระบบ คือ  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O \cdot K_2HPO_4$ ,  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O \cdot Na_2HPO_4$ ,  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O \cdot (NH_4)_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O \cdot K_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O \cdot Na_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O \cdot (NH_4)_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O \cdot K_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O \cdot Na_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O \cdot (NH_4)_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O \cdot K_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O \cdot Na_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O \cdot (NH_4)_2HPO_4$  พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จะมีลักษณะที่คล้าย ๆ กัน และเมื่อนำไปเทียบกับไฟล์มาตรฐานของ XRD จึงสามารถสรุปได้ว่าสารที่เตรียมได้นี้ มีโครงสร้างแบบ แบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) ใกล้เคียงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มาตรฐาน ของ PDF no. 77-1297 และยังสามารถคำนวณแลตติสพารามิเตอร์ (Lattice parameters) ได้ใกล้เคียงกับไฟล์มาตรฐานเป็นอย่างดี ในขณะที่สารแอนไฮดรัสนั้น รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มีความคล้ายคลึงอย่างมากกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มาตรฐานของ PDF no. 76-0518 แสดงว่าเป็น โครงสร้างแบบมอนอคลินิก (Monoclinic) โดยมีค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice parameters) คำนวณได้ใกล้เคียงกับไฟล์มาตรฐานเช่นเดียวกัน จากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์บ่งบอกให้ทราบว่าสารที่เตรียมขึ้นได้มีความบริสุทธิ์สูงมาก มีเฟสของสารอื่นเจือปนน้อยมาก

### 5.2.3 สรุปผลการตรวจเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของสาร

จากสารที่เตรียม  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  จากระบบสารตั้งต้น 12 ระบบ ได้แก่  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O \cdot K_2HPO_4$ ,  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O \cdot Na_2HPO_4$ ,  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O \cdot (NH_4)_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O \cdot K_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O \cdot Na_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O \cdot (NH_4)_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O \cdot K_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O \cdot Na_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O \cdot (NH_4)_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O \cdot K_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O \cdot Na_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O \cdot (NH_4)_2HPO_4$  พบว่าสารมีรูปแบบการสั่นคล้ายคลึงกัน ยกเว้น  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O + (NH_4)_2HPO_4$  ที่ความแตกต่าง คือการปรากฏพีคที่ตำแหน่ง  $1500-1400 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งมีความเป็นไปได้ตามว่าสารตั้งต้น คือ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ยังทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้นไม่สมบูรณ์ เพราะตำแหน่งของการสั่นนี้เป็นตำแหน่งการสั่นของ N-H ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์อื่นๆ ว่า สารที่เตรียมจากระบบนี้ มีร้อยละผลผลิตน้อยและมีปริมาณน้ำในโครงสร้างผลึกน้อยไปด้วย ส่วนสารที่ถูกเตรียมด้วยระบบอื่น ก็จะแสดงรูปแบบการสั่นที่เป็นเอกลักษณ์ของ หน่วยย่อยคือ  $PO_4^{3-}$ ,  $ZnO_6$ , และ  $H_2O$  โดย ผลของ FTIR วิเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้ คล้ายกันอย่างมากกับงานวิจัยอื่นๆ ที่เคยศึกษาสารตัวนี้มาก่อน สำหรับสารแอนไฮดรัส  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่ได้จากเอกสารไฮเดรตทั้ง 12 ตัวอย่างนั้น จะมีรูปแบบการสั่นที่คล้ายคลึงกันมาก ยกเว้น สารที่ถูกเตรียมจากระบบ  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$+(NH_4)_2HPO_4$  ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการเตรียม  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  ที่มีเฟสอื่นเจือปน ไม่บริสุทธิ์นั่นเอง แต่ถึงอย่างไร จากผล FTIR ก็ยังแสดงว่าสาร แอนไฮดรรัสที่ได้จากระบบนี้ เป็น  $Zn_3(PO_4)_2$  ที่มีโครงสร้างแตกต่างจากระบบสารตั้งต้นอื่น ๆ ที่เหลือ และผลจากวิเคราะห์ FTIR จากงานวิจัย มีลักษณะของสเปกตราการสันที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่เคยศึกษามาในอดีตเป็นอย่างดี

#### 5.2.4 สรุปผลการตรวจลักษณะพื้นฐานวิทยาของสาร

สำหรับผลการวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าสารที่เตรียมได้ทั้งหมดมีขนาดอนุภาคใหญ่ และมีการจับกันเป็นกลุ่มก้อน มีพื้นผิวขรุขระ ไม่มีรูปแบบพื้นฐานที่แน่นอน และจากการเตรียมด้วยสารตั้งต้นที่ต่างกัน ก็ส่งผลให้เห็นชัดเจนว่า พื้นฐานวิทยา รูปร่าง ขนาดอนุภาค แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด จากข้อมูลที่ได้ จะเป็นแนวทางที่จะนำเอาระบบสารตั้งต้นเหล่านี้ไปประยุกต์ในการเตรียม เพื่อให้ได้สารกลุ่มนี้ให้มีระดับอนุภาคขนาดนาโนเมตร ที่กำลังเป็นที่สนใจในปัจจุบัน

#### 5.3 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในหัวข้อ “การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของสารประกอบที่มีซิงค์ฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบหลักนี้” ได้ออกแบบการเตรียมด้วยเทคนิคการตกตะกอนที่ปราศจากตัวปรับให้ตกตะกอนและใช้สารตั้งต้น 12 ระบบ ประกอบด้วย  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O - K_2HPO_4$ ,  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O - Na_2HPO_4$ ,  $ZnCl_2 \cdot 4H_2O - (NH_4)_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O - K_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O - Na_2HPO_4$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O - (NH_4)_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O - K_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O - Na_2HPO_4$ ,  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O - (NH_4)_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O - K_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O - Na_2HPO_4$ ,  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O - (NH_4)_2HPO_4$  พบว่าระบบสารตั้งต้นและเทคนิคการเตรียม สามารถทำได้ง่าย ประหยัด รวดเร็ว และผู้ทำการสังเคราะห์เอง ไม่ต้องมีความรู้ความเชี่ยวชาญ ก็สามารถทำได้ ยังพบอีกว่า การใช้สารตั้งต้นเพียงสองชนิดในการทำปฏิกิริยาแล้วเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ก็ได้ว่าเป็นข้อดีในหลาย ๆ แง่ คือประหยัดสารตั้งต้น แต่ในด้านของคุณสมบัติทางกายภาพที่ต้องการ อาทิ เช่น ขนาดอนุภาค การสลายตัวที่อุณหภูมิสูง หรือต่ำ หรือการคงสภาพ นั้น ยังเป็นสิ่งที่ต้องศึกษาต่อในอนาคต ตัวอย่างเช่น อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงเทคนิคการเตรียมเป็นการเตรียมด้วยวิธีทางโซโนเคมี หรือการเตรียมแอนไฮดรรัส ด้วยวิธี ทางโซล-เจล โดยจุดหมายเพื่อให้ได้สารซิงค์ฟอสเฟตที่มีขนาดอนุภาคนาโนเมตร หรือมีรูปร่างทางพื้นฐานวิทยาแปลกใหม่ เพื่อให้เหมาะที่จะไปประยุกต์ใช้ในอนาคต อีกทั้งที่ควรจะดำเนินการวิจัยต่อ คือการผสมโลหะชนิดอื่น ๆ เช่น Ca, Mg, Mn, Cu, Fe, Ni, หรือ อื่น ๆ ลงไปในโครงสร้างทั้งตัวไฮเดรตและแอนไฮดรรัสเอง ซึ่งกำลังเป็นที่สนใจศึกษากันอยู่ในปัจจุบัน ด้วยเหตุผลเพื่อให้ได้สารตัวใหม่ที่มีโครงสร้างเดิม แต่ให้สมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมที่จะถูกเลือกไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ ในอนาคต และที่ต้องทำต่อไป คือ การใช้ข้อมูลจากงานวิจัยนี้เขียนตีพิมพ์ในวารสารทั้งระดับชาติและระดับนานาชาติต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง

- Amo, B. del; Romagnoli, R.; Vetere, V. F.; Hernández, L. S. (1998), Study of the anticorrosive properties of zinc phosphate in vinyl paints. *Prog. Org. Coatings*, 33, 28-35.
- Boonchom, B. (2008), Kinetics and thermodynamic properties of the thermal decomposition of manganese dihydrogenphosphate dihydrate. *J. Chem. Eng. Data*, 53, 1533-1538.
- Cullity, B.D. Elements of X-ray Diffraction, second ed., Addison-Wesley Publishing, 1977.
- He, W.; Yan, S.; Wang, Y.; Zhang, X.; Zhou, W.; Tian, X.; Sun, X.; Han, X. (2009), Biomimetic synthesis of mesoporous zinc phosphate nanoparticles, *J. Alloys Compd.* 477, 657-660.
- Herschke, L.; Rottstegge, J.; Lieberwirth, I.; Wegner, G. (2006), Zinc phosphate as versatile material for potential biomedical applications Part 1, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* 17, 81-94.
- Grzmil, B.; Kic, B.; Lubkowski, K. (2007), Studies on obtaining of Zinc phosphate nanomaterials. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 14, 46-48.
- Liang, J.; Li Li, (2011), A facile chemical route to  $\alpha$ -Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O hierarchical sphere structures assembled by nanosheets, *Materials Letters*, 65, 285-288.
- Nicholson J. W.; Czarnecka B. (2008), The kinetics of water loss from zinc phosphate and zinc polycarboxylate dental cements. *J Mater Sci: Mater Med.* 19, 1719-1722.
- Norquist, A.J.; O'Hare, D. (2004), Kinetic and mechanistic investigation of hydrothermal transformation in zinc phosphates. *J. Am. Chem. Soc.* 126, 6673-6679.
- Parhi, P.; Manivannan, V.; Kohli, S.; McCurdy, P. (2008), Room temperature metathetic synthesis and characterization of  $\alpha$ -hopeite, Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O, *Materials Research Bulletin* 43, 1836-1841.
- Pawlig, O.; Schellenschläger, V.; Lutz, H. D.; Trettin, R. (2001), Vibrational analysis of iron and zinc phosphate conversion coating constituents. *Spectrochim Acta.* 57, 581-590.
- Pawlig, O.; Trettin, R. (1999), Synthesis and characterization of  $\alpha$ -hopeite, Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O. *Mater. Res. Bull.* 34, 1959-66.
- Roming, M.; Feldmann, C.; Avadhut, Y. S.; Schmedt auf der Günne, J. (2008), Characterization of Noncrystalline Nanomaterials: NMR of Zinc Phosphate as a Case

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- Study. *Chem. Mater.* 20, 5787–5795.
- Samuskevich, V.V.; Lukyanchenko, O.A.; Samuskevich, L.N. (1997), Disproportionation of  $Zn(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  Crystals (Topochemical Particularities) *Ind. Eng. Chem. Res.* 36, 4791-4796.
- Sankara Narayanan, T.S.N. (2005), Surface pretreatment by phosphate conversion coating A Review. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 9, 130-177.
- Shiwen, D; Maosheng, (2008), W. Studies on synthesis and mechanism of nano- $CaZn_2(PO_4)_2$  by chemical precipitation. *Dyes Pigm.* 76, 94–6.
- Shunpu Y.; Wen H.; Caiyun S.; Xudong Z.; Hongshi Z.; Zhengmao L.; Weijia Z.; Xiuying T. Xianan S.; Xiuxiu H. (2009) The biomimetic synthesis of zinc phosphate nanoparticles, *Dyes and Pigments* 80, 254–258.
- Wondee, B.; Danvirutai, C.; Srithanratana, T.; (2010) Rapid synthesis and dehydration kinetics of  $\alpha$ - $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ , 35th Congress on Science and Technology of Thailand.
- Yan, S.; He, W.; Sun, C.; Zhang, X.; Zhao, H.; Li, Z.; Zhou, W.; Tian, X.; Sun, X.; Han, X. (2009), The biomimetic synthesis of zinc phosphate nanoparticles. *Dyes Pigm.* 80, 254–258.
- Yuan, A.Q.; Liao, S.; Tong, Zh.F.; Wu, J.; Huang, Z.Y. (2006), Synthesis of nanoparticle zinc phosphate dihydrate by solid state reaction at room temperature and its thermochemical study. *Mater. Lett.* 60, 2110–2114.
- Yuan, A.; Jian, W.; Huang, Z.; Zhou, Z.; Wen, Y.; Tong, Z. (2007), Dehydration Kinetics of Zinc Phosphate Tetrahydrate  $\alpha$ - $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  Nanoparticle, *Chinese Journal of Chemistry*, 25, 857–862.
- Zou, H.T.; Tang, W.H.; Liu, J.P.; Su, Y.F.; Yu, Z.F. (2006), Synthesis of zinc phosphate Microcrystal bars by solid-phase chemical reaction at low temperature. *Ind. Min. Proc.* 35, 19–26.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

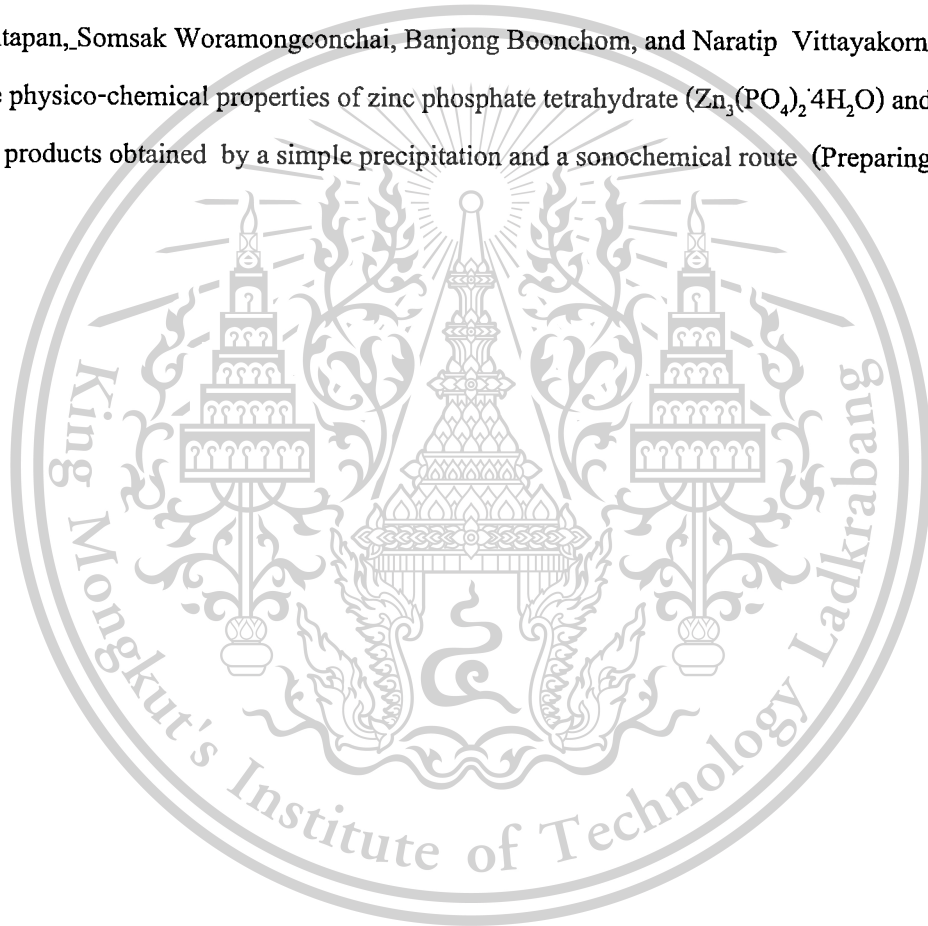
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## ภาคผนวก

(Reprints, manuscript และ บทความวิชาการ)

ผลงานรอมผลการพิจารณาตอบรับตีพิมพ์ระดับนานาชาติสำหรับงานวิจัย 1 เรื่อง

Manoon Suntapan, Somsak Woramongconchai, Banjong Boonchom, and Naratip Vittayakorn,  
Comparative physico-chemical properties of zinc phosphate tetrahydrate ( $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ) and its  
decomposed products obtained by a simple precipitation and a sonochemical route (Preparing Submit)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล สมศักดิ์ วรมงคลชัย

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ	เคมี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2529
วท.ม	เคมีเทคนิค	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2532
Ph.D	วิศวกรรมพลาสติก	U. of Massachusetts-Lowell	2540

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

Biodegradable Plastics, Recycling Plastics, Polymer Processing

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้

### ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้

### ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1. Vasile, C.; **Woramongchai, S.**; Deannin, R. D., Chaala, A.; and Roy, C., "Recycling the Mixed Plastics Fraction from Junked Auto. IV. Pyrolysis Products of Polymer Wastes as Melt Flow Improvers and Compatibilizing Agents", *Inter. J. Polymeric. Mater.*, 38, 1997, pp. 263-273
2. **Woramongchai, S.**, "The Effects of Fillers and PVC Compounds on Fusion Properties Studied by Torque Rheometer", *Journal of Science-Ladkrabang*, 8, June 1998, pp.27-42
3. Deanin, R. D.; Barry, C. M.; **Woramongchai, S.**; and Parikh, S. C., "Recycling of Mixed Automotive Plastics", *Macromol. Symp.*, 135, 1998, pp.55-62
4. **Woramongchai, S.** and Mingmuang, W., " Mechanical Properties of Polypropylene and Nylon-6 Blends from Recycled Toothbrushes with a Compatibilizer", *Polymer Processing Society (PPS) Asia/Australia Regional Meeting 1999 Proceedings*, Bangkok, Thailand, 1-3 December 1999. pp. 362-363
5. Pukdee Rattanachan and **Somsak Woramongkolchai**, "Design of Rotational Molding Machine for Laboratory Scale" , 8 th Pacific Polymer Conference, Organized by Polymer Society (Thailand), November 24-27, 2003, Bangkok, Thailand. pp 133
6. Chonlada Ritvirulh, Prappon Liawsomboon and **Somsak Woramongkolchai**, "Compatibilisation Effect of SBS on Recycling PS/NR Blends" 8 th Pacific Polymer Conference, Organized by Polymer Society (Thailand), November 24-27, 2003, Bangkok, Thailand. pp.120
7. **Somsak Woramongchai**, Chatchawan Lohitsit and Aree Wichianchai, " Effects of Magnetic Powder Loading on Mechanical Properties and Magnetic Properties of Natural Rubber", *Advances. in Science and Technology* , Vol. 45 1423-1428, 2006.
8. สมศักดิ์ วรมงคลชัย 2542 พลาสติกในวันนี้ วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 9 ( 1 ):8-12
9. สมศักดิ์ วรมงคลชัย 2542 อุปกรณ์ช่วยในการผสมและเหนียววัสดุของเครื่องอัดรีด วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 9 ( 1 ): 20-26
10. สมศักดิ์ วรมงคลชัย 2542 ผลของสภาวะหลอมเหลวที่มีต่อสมบัติของพลาสติกในรถยนต์ วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 9 ( 1 ): 45-51
11. สมศักดิ์ วรมงคลชัย, บุษราภรณ์ ศิริอัสวกุล และ วิไลรัตน์ เชื้อฟัก 2542 การผสมเข้ากันได้ของ ไนลอน-6 อะริโกลไนไตรด บิวทาไดอิน สไตรีน และ พอลิโอฟีนส์ที่ใช้แล้ว 1. สมบัติเชิงกล วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 9 ( 2 ): 75-87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

12. สมศักดิ์ วรมงคลชัย, ณัฐศิริ ศรีสิทธิพันธกุล และ สุชีวิน สงกะมิลินท์ 2542 การผสมเข้ากันได้ของ ไนลอน-6 อะครีโลไนไตรล บิวทาไดอิน สไตรีน และ พอลิโอเลฟินส์ที่ใช้แล้ว 2. สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา และ การดูดซับน้ำ วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 9 (2) : 30-41
13. สมศักดิ์ วรมงคลชัย, สุรัชชัย จิรศักดิ์สิริกุล และ ธวิพันธ์ อ่างเกตสกุล 2543 การศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีต่อพอลิโอเลฟินส์ผสมและโพลีโพลีสไตรีนที่ใช้แล้ว วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 10 (1) : 42-57
14. สมศักดิ์ วรมงคลชัย 2543 วัสดุชีวภาพในร่างกายมนุษย์ และกายวิภาคของกระดูก วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 10 (1) : 20-26
15. สมศักดิ์ วรมงคลชัย, รัชฎญารัตน์ อิมจิตร และธีรศักดิ์ พลอยเจริญ 2543 การสืบค้นสูตรผสมสำหรับ บล็อกยางปูพื้น โดยใช้ถุงมือยางและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ วารสารมหาวิทยาลัยรัตนนคร 8 (2) : 1-11
16. สมศักดิ์ วรมงคลชัย ณัฐดิอร รัชฎญประกอบ และ วิภา ลีลาเอกเลิศ 2543 กระบวนการผสมระหว่าง พอลิโอเลฟินส์กับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลทที่ใช้แล้ว วารสารมหาวิทยาลัยบูรพา 5(1) : 40-52
17. สมศักดิ์ วรมงคลชัย กัญญาวีร์ สุวรรณชัย ภัทรภูมิ สุพรรณสมบุรณ์ และ สุภาณี ชนะวงศ์ 2543 พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโอเลฟินส์ที่ใช้แล้วกับแป้งมันสำปะหลัง วารสารเทคโนโลยีสุรนารี 7 (2) : 105-114
18. สมศักดิ์ วรมงคลชัย กษมา สุขพ่องศรี และ กรุงไกร เวียงนาค 2543 ผลของการใช้อนุภาคยางรถยนต์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของอะครีโลไนไตรล-บิวทาไดอิน-สไตรีน โคลพอลิเมอร์ วารสารพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 10(4) : 33-41
19. สมศักดิ์ วรมงคลชัย นันทพล จรรโลงศิริชัย และ คมฤทธิ์ ร่วมฤกษ์ 2543 ผลของสารปรับสภาพพลาสติกชนิดทุติยภูมิที่มีต่อสารพีวีซีคอมปาวน์. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 10(2) : 44-59  
 สมศักดิ์ วรมงคลชัย ลลิตา บุญโถม วราภรณ์ พุทธิสสะ และ วิภา ชูโชติ 2543 การผลิตวัสดุโพลีเมอร์ผสมระหว่างพอลิโอเลฟินส์ และ สาหร่ายแดง วารสารวิทยาศาสตร์ มก. 18(1-3) : 37-48
20. สมศักดิ์ วรมงคลชัย ณัฐดิอร รัชฎญประกอบ และ วิภา ลีลาเอกเลิศ 2543 กระบวนการผสมระหว่าง พอลิโอเลฟินส์กับพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลทที่ใช้แล้ว วารสารมหาวิทยาลัยบูรพา 5(1) : 40-52
21. สมศักดิ์ วรมงคลชัย รัชฎญรัตน์ อิมจิตร และ ธีรศักดิ์ พลอยเจริญ 2543 การสืบค้นสูตรผสมสำหรับ บล็อกยางปูพื้น โดยใช้ถุงมือยางและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ วารสารมหาวิทยาลัยรัตนนคร 8(2) : 1-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

22. สมศักดิ์ วรมงคลชัย พัทณี เจริญยิ่ง จุฑารัตน์ ศิริชัยสิทธิ์ ชลธิชา ระภักดี และ พิไลพร ตั้งสกุลมงคล 2544 การสกัดสารสารให้สีจากเปลือกมังคุดเพื่อประยุกต์ใช้ในการย้อม วารสารวิทยาศาสตร์ มก. 19 (1-3) : 37-51
23. สมศักดิ์ วรมงคลชัย ทิพวรรณ พรปัญญาวุฒิ ศิริอร ประสพพชัยชนะ 2544 การใช้ไบโอพอลิเมอร์ เป็นสารตัวเติมไว้นิลพอลิเมอร์ วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง 9 (2) : 29-34
24. สมศักดิ์ วรมงคลชัย พัทณี เจริญยิ่ง พัทรินทร์ หอเพชรรุ่งเรือง และ วนิกา อัสวเลิศระกุล 2545 กระบวนการผลิตเส้นใยจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นำกลับมาใช้ใหม่และผลของ สารช่วยหน่วงการติดไฟ วารสารเทคโนโลยีสุรนารี 9 (3) : 174-179
25. อัมมพ รักษ์รัตน์ และ สมศักดิ์ วรมงคลชัย 2552 ผล ของสารเบนโซฟีโนนที่มีต่อการสลายตัวของ แสงของฟิล์ม ระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และแป้งมันสำปะหลัง การประชุมเสนอ ผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 12 มหาวิทยาลัยขอนแก่น: 785-794
26. วชิรี ธรรมรภา และ สมศักดิ์ วรมงคลชัย 2552 ผลของออร์แกนโอเคลย์ที่มีต่อสมบัติเชิงกล และ สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ การประชุมเสนอผลงานวิจัย ระดับ บัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 12 มหาวิทยาลัยขอนแก่น: 795-804
28. พรชัย ชินสา เก่งวลี พุกษาทร และสมศักดิ์ วรมงคลชัย 2552 การเตรียมแผ่นนำ กระแสไฟฟ้าแบบ สองขั้วชนิดคาร์บอนคอมพอลิติกเคลือบโลหะการประชุมเสนอผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษา แห่งชาติครั้งที่ 12 : มหาวิทยาลัยขอนแก่น 494-499
29. พัฒนา บัวดี และ สมศักดิ์ วรมงคลชัย 2553 ผลของสารคาร์บอนที่มีต่อสมบัติเชิงกล และ สมบัติ ทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/เทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ การประชุม เสนอผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษาครั้งที่ 11 มหาวิทยาลัยขอนแก่น: 341-347
30. วิไลรัตน์ ทวีวงศ์สุนทร และ สมศักดิ์ วรมงคลชัย 2553 ผลของกลูเตนที่มีต่อสมบัติเชิงกล และ สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/เทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ การ ประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี ครั้งที่ 8 “ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อพัฒนา ชุมชน สังคมมีความสุข” มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย (ปรับได้ตามความเหมาะสม)

### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นายบรรจง บุญชม

ตำแหน่งปัจจุบัน พนักงานมหาวิทยาลัย (ผู้ช่วยศาสตราจารย์)

### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ.	เคมี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	2541
วท.ม.	เคมี(เคมีเชิงฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	2546
ปร.ด.	เคมี(เคมีเชิงฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	2551

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา).....จลนพลศาสตร์การสลายตัวทางความร้อนของ Solid state แบบ Non-isothermal, เทอร์โม ไดนามิกส์ของการสลายตัวทางความร้อน, การสังเคราะห์สารกลุ่ม โลหะฟอสเฟตอนภาคไมโครหรือนาโนเมตรด้วยการตกตะกอนแบบง่ายและประหยัด, การวิเคราะห์รูปแบบ การสั่นของพันธะด้วยเทคนิค FTIR และ FT-Raman, การวิเคราะห์เชิงความร้อน ด้วย TG/DTG/DTA

เทคนิค

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2553	นักวิทยาศาสตร์รุ่นใหม่ (เคมี)	มูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์
2553	บุคคลสร้างชื่อเสียงให้สถาบันฯ (ด้านงานวิจัย)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2543-46	ทุนการศึกษาระดับปริญญาโท	The Center Innovation of Chemistry : (PERCH-CIC)
2548-51	ทุนการศึกษาระดับปริญญาเอก	The Center Innovation of Chemistry : (PERCH-CIC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2548	งบประมาณแผ่นดิน	สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
2552-53	ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของ อาจารย์รุ่นใหม่	สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
2553-55	ทุนพัฒนากลุ่มและเครือข่ายวิจัย	กองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าลาดกระบัง
2555-57	ทุนพัฒนานักวิจัย	กองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าลาดกระบัง
2555-57	ทุนวิจัยเพื่อสร้าง Nanotechnology Platform	ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงาน พัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งชาติ

### ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

#### ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Danvirutai C, **Boonchom B**, Youngme S. Nanocrystalline manganese dihydrogen phosphate dihydrate  $Mn(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  and its decomposition product ( $Mn_2P_4O_{12}$ ) obtained by simple precipitation route. *J. Alloys Compd.* 2008;457:75-80.
2. **Boonchom B**, Danvirutai C. The thermal decomposition kinetics of  $FePO_4 \cdot 3H_2O$  precursor to synthesize spherical nanoparticles  $FePO_4$ . *Ind. Eng. Chem. Res.* 2007;46(26): 9071-9076.
3. **Boonchom B**, Danvirutai C, Youngme S. A rapid co-precipitation and non-isothermal decomposition kinetics of new binary  $Mn_{0.5}Co_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ . *Solid State Sciences.* 2008;10: 129-136.
4. **Boonchom B**, Youngme S, Srithanratana T, Danvirutai C. Synthesis of  $AlPO_4$  and Kinetics of thermal decomposition of  $AlPO_4 \cdot H_2O$ -H4 precursor. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2008; 91: 511-516.
5. Maensiri S, Masingboon C, **Boonchom B**, Seraphin S. A simple route to synthesize nickel ferrite ( $NiFe_2O_4$ ) nanoparticles using egg white. *Scripta Materialia.* 2007;56:797-80.
6. **Boonchom B**, Maensiri S, Danvirutai C. Soft solution synthesis, non-isothermal decomposition kinetics and characterization of manganese dihydrogen phosphate dihydrate  $Mn(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  and its thermal transformation products. *Mater. Chem. Physics.* 2008;109: 404-410.
7. **Boonchom B**, Danvirutai C. Rapid coprecipitation and nonisothermal Decomposition kinetics of new binary  $Mn_{0.5}Cu_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 1.5H_2O$ . *Ind. Eng. Chem. Res.* 2008; 47(9): 2941-2947.
8. **Boonchom B**, Danvirutai C. A simple route to synthesize manganese hydrogen phosphate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- monohydrate  $\text{MnHPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  rod-like microparticles J. Optoelec. Adv.Mater. 2008;10: 492-499.
9. Noisong P, Danvirutai C, Srithanratana T, **Boonchom B**. Synthesis, characterization and non-isothermal decomposition kinetics of manganese hypophosphite monohydrate. Solid State Sciences. 2008;10:1598-1604.
  10. **Boonchom B**, Danvirutai C. Synthesis of  $\text{MnNiP}_2\text{O}_7$  by nonisothermal decomposition kinetics of a new binary  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{HPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  precursor obtained from a rapid coprecipitation at ambient temperature. Ind. Eng. Chem. Res. 2008;47(9): 2941-2947.
  11. **Boonchom B**. Kinetics and Thermodynamic Properties of the Thermal Decomposition of Manganese Dihydrogenphosphate Dihydrate. J. Chem. Eng. Data. 2008;53(7):1533-1538.
  12. **Boonchom B**, Maensiri S, Youngme S, Danvirutai C. A simple synthesis and room temperature magnetic properties of new binary  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  obtained from a rapid co-precipitation at ambient temperature. Solid State Sciences. 2009;11(2): 485-490.
  13. **Boonchom B**, Maensiri S, Youngme S, Danvirutai C. Simple synthesis, magnetic properties and non-isothermal decomposition kinetics of  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Ind. Eng. Chem. Res. 2008;47:7642-7647.
  14. Noisong P, Danvirutai C, **Boonchom B**. Thermodynamic and kinetic properties of the formation of  $\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$  by thermal decomposition of  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . J. Chem. Eng. Data. 2009;54(3): 871-875.
  15. **Boonchom B**. Synthesis of  $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  porous structure and non-isothermal decomposition kinetics of  $\text{Co}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  precursor in air atmosphere. J. Optoelec. Biomed.Mater.2009;1:103-114.
  16. **Boonchom B**, Danvirutai C. The morphology and thermal behaviour of calcium dihydrogen phosphate Monohydrate ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) obtained by a rapid at precipitation route ambient temperature in different media J. Optoelec.Biomed.Mater. 2009;1:115-123.
  17. **Boonchom B**, Danvirutai C. Study of the Dehydration of  $\text{Co}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . J. Chem. Eng. Data. 2009;54(4): 1225-1230.
  18. **Boonchom B**. Parallelogram-like microparticles of calcium dihydrogen phosphate monohydrate ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) obtained by a rapid precipitation route in aqueous and acetone media J. Alloys Compd, 2009;482(1-2):199-202.
  20. **Boonchom B**, Phuvongpha N. Synthesis of new binary cobalt iron pyrophosphate  $\text{CoFeP}_2\text{O}_7$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- Mater. Lett. 2009;63(20): 1709-1711.
21. **Boonchom B**, Danvirutai C, Thongkam M. Non-isothermal decomposition kinetics of synthetic serrabrancaite ( $\text{MnPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) precursor in  $\text{N}_2$  atmosphere. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2010;99(1):357-362.
  22. **Boonchom B**, Kongtaweelert S. Study of kinetics and thermodynamics of the dehydration reaction of  $\text{AlPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . *J. Therm. Anal. Calorim.* 2010;99(2):531-538.
  23. **Boonchom B**, Danvirutai C. Kinetics and thermodynamics of thermal decomposition of synthetic  $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . *J. Therm. Anal. Calorim.* 2009;98(3): 771-777.
  24. **Boonchom B**. Kinetics and thermodynamics studies of  $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  by Non-isothermal decomposition data. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2009;98(3): 863-871.
  25. **Boonchom B**, Danvirutai C. Rapid synthesis, kinetics and thermodynamics of binary  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . *J. Therm. Anal. Calorim.* 2009;98(3):717-723.
  26. **Boonchom B**, Maensiri S. Non-isothermal decomposition kinetics of  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles synthesized using egg white solution route. *J. Therm. Anal. Calor.* 2009;97(3):879-884.
  27. **Boonchom B**, Thongkam M, Vittayakorn N, Kongtaweelert S. A simple route to synthesize new binary cobalt iron cyclotetraphosphate,  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  synthesized by aqueous and acetone media. *J. Alloys Compd.* 2009;486(1-2):689-692.
  28. **Boonchom B**, Baitahe R. Synthesis and characterization of nanocrystalline manganese pyrophosphate  $\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ . *Mater. Lett.* 2009;63(26):2218.
  29. **Boonchom B**, Thongkam M, Vittayakorn N, Kongtaweelert S. Flower-like microparticles and novel superparamagnetic properties of new binary  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  obtained by a rapid solid state route at ambient temperature. *Mater. Res. Bull.* 2009;44(12):2206-2210.
  30. Vittayakorn N, Charoonsuk P, Kasiansin P, Wirunchit S, **Boonchom B**. Dielectric properties and phase transitions behaviors in  $(1-x)\text{PbZrO}_3-x\text{Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$  ceramics. *J. Apply Physics.* 2009;106:064104.
  31. **Boonchom B**, Thongkam M. Kinetics and thermodynamics of the formation of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ . *J. Chem. Eng. Data.* 2010;55 (1):211–216.
  32. **Boonchom B**, Vittayakorn N. One-step thermal synthesis of binary manganese iron cyclotetraphosphate  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ . *J. Mater. Sci.* 2010;45 (6): 1459-1463.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

33. **Boonchom B.** Kinetics and thermal transformation of  $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  to  $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ .  
Int. J. Thermophys. 2010;31(2):416-429.
34. Chaiyo N, **Boonchom B**, Vittayakorn N. Solid-state reaction synthesis of sodium niobate ( $\text{NaNbO}_3$ ) powder at low temperature. J. Mater. Sci. 2010;45(6):1443-1447.
35. **Boonchom B**, Baitahe R, Kongtaweelert S, Vittayakorn N. Kinetics and thermodynamics of zinc phosphate hydrate synthesized by a simple route in aqueous and acetone media. Ind. Eng. Chem. Res. 2010;49(8): 3571-3576.
36. **Boonchom B**, Vittayakorn N. Floral-like microarchitectures of cobalt iron cyclotetraphosphate obtained by solid state synthesis. Powder Technol. 2010;198(1): 25-28.
37. **Boonchom B**, Puttawong S. Thermodynamics and kinetics of the dehydration reaction of  $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Physica B : Condensed Matter. 2010;45(9): 2350-2355.
38. **Boonchom B**, Vittayakorn N. Synthesis and ferromagnetic property of new binary copper iron pyrophosphate  $\text{CuFeP}_2\text{O}_7$ . Mater. Lett. 2010;64(3):275-277.
39. Charoonsuk P, Wirunchit S, Muanghlua R, Niemcharoen S, **Boonchom B**, Vittayakorn N. The phase evolution with temperature in  $0.9\text{PbZrO}_3 - 0.06\text{Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$  antiferroelectric ceramic. J. Alloys. Compd. 2010;506:313-316.
40. **Boonchom B**, Baitahe R, Joungmunkong Z, Vittayakorn N. Grass blade-like microparticle  $\text{MnPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  prepared by a simple precipitation at room temperature. Powder Technol. 2010;203:310-314.
41. **Boonchom B**, Vittayakorn N. Dehydration behavior of synthetic  $\text{Al}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{PO}_4 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ . J. Chem. Eng. Data. 2010;55:3307-3311.
42. Sukkha U, Muanghlua R, Niemcharoen S, **Boonchom B**, Vittayakorn N. Antiferroelectric-ferroelectric phase transition in lead zinc niobate modified lead zirconate ceramics: crystal studies, microstructure, thermal and electrical properties. Applied Physics A. 2010;100:551-559.
43. **Boonchom B**, Danvirutai, C, Vittayakorn, N. A simple synthesis and characterization of binary  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and its final decomposition product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . Solid State Sciences, 2010; 13(1):77-81.44.
44. Chaiyo, N, Muanghlua, R, Niemcharoen, S, **Boonchom B**, Vittayakorn, N. Synthesis of potassium niobate ( $\text{KNbO}_3$ ) nano-powder by a modified solid-state reaction. J. Mater.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- Sciences. 2011; 46(6): 1585-1590.
- 45 Vittayakorn, N., **Boonchom, B.** Effect of BiAlO<sub>3</sub> modification on the stability of antiferroelectric phase in PbZrO<sub>3</sub> ceramics prepared by conventional solid state reaction. *J. Alloys and Compounds*. 2011; 509(5): 2445-2449.
46. Chaiyo, N., Muanghlua, R., Niemcharoen, S., **Boonchom, B.**, Vittayakorn, N. Solution combustion synthesis and characterization of lead-free piezoelectric sodium niobate (NaNbO<sub>3</sub>) powders. *J. Alloys and Compounds*. 2011; 509(5): 2304-2310.
47. Muanghlua R, Niemcharoen S, Sutapun, M. **Boonchom B**, Vittayakorn N. Phase transition behaviour and electrical properties of lead-free(K<sub>0.5</sub>Na<sub>0.5</sub>)NbO<sub>3</sub>-LiNbO<sub>3</sub>- LiSbO<sub>3</sub> piezoelectric ceramics. *Current Applied Physics* 2011; 11(3) 434-437.
48. **Boonchom, B.**, Vittayakorn, N. Soft synthesis route and characterization of superparamagnetic Mn<sub>1/2</sub>Fe<sub>1/2</sub>(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>•2H<sub>2</sub>O and its decomposed product. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2011;50(4) 2021-2030.
49. Chaiyo, N., Muanghlua, R., Niemcharoen, S., **Boonchom, B.**, Seecharaj, P., Vittayakorn, N. Non-isothermal kinetics of the thermal decomposition of sodium oxalate Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *J. Therm. Anal. Calor.* 2012;107(3):1023-1029.
50. Sukkha U, Muanghlua R, Niemcharoen S, **Boonchom B**, Vittayakorn N. Effect of Pb(Y<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub> additions on thermal and electrical properties of PbZrO<sub>3</sub> ceramics. *Ferroelectrics* 2011;416(1) 8-15.
51. Chaiyo, N., Ruangphanit, A., **Boonchom, B.**, Vittayakorn, N. Facile synthesis of lead-free piezoelectric sodium niobate (NaNbO<sub>3</sub>) Powders via the solution combustion method. *Ferroelectrics* 2011;415(1) 75-82.
52. Boonchom, B. Vittayakorn, V. Simple fabrication of polyhedral grain-like microparticle Cu<sub>1/2</sub>Zn<sub>1/2</sub>HPO<sub>4</sub>•H<sub>2</sub>O and porous structure CuZnP<sub>2</sub>O<sub>7</sub>. *Ceramics International*. 2012;38(1):411-415.
53. Baitahe, R., Vittayakorn, N., Boonchom, B. Study on thermal transformation of CuHPO<sub>4</sub>•H<sub>2</sub>O obtained by acetone-mediated synthesis at ambient temperature. *J. Therm. Anal. Calor.* (In Press)
54. Sukkha U, Muanghlua R, Niemcharoen S, **Boonchom B**, Vittayakorn W. Vittayakorn N. Effect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

of Pb (Yb<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub> on phase transition and thermal and electrical properties of PZ-PYbN solid solution on PZ-rich side. J. Mater. Sci. 2012;47(3):1452-1459.

55. Sukkha U, Muanghlua R, Niemcharoen S, **Boonchom B**, Vittayakorn N. Influence of Pb(In<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub> on the phase transitions, electrical, and thermal properties of a PbZrO<sub>3</sub> ceramic. J. Amer. Ceram. Soc. 2011; 94(10) 2297-3404.

### การเสนอผลงานวิชาการ

#### การประชุมวิชาการใน National Conferences

1. **Banjong Boonchom**, Sujittra Youngme and Chanaiporn Danvirutai. Synthesis, Vibrational Spectroscopy and Non-Isothermal Kinetic Decomposition of Fe(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>•2H<sub>2</sub>O. 18 Jan 2008, Oral presented at Postgraduate KKU Conference 2007. Khon Kaen.
2. **Banjong Boonchom**, Chanaiporn Danvirutai, and Sujittra Youngme, Non- isothermal dehydration kinetics of AlPO<sub>4</sub>•H<sub>2</sub>O-H<sub>4</sub> in air, The PERCH-CIC Congress. Jhom Tien Resort Pattaya, Chonburi 12-15 May 2007.
3. **Banjong Boonchom**, Sujittra Youngme, Chanaiporn Danvirutai, Vibrational spectroscopic study of AlPO<sub>4</sub>•H<sub>2</sub>O by deuterium isotopic dilution technique. Poster presented at the 32<sup>nd</sup> Congress on Science and Technology of Thailand, C4\_0258, 196 Oct. (2006).
4. **Banjong Boonchom**, Sujittra Youngme, Chanaiporn Danvirutai, FTIR and FT-Raman Spectroscopic Study of Manganese Phosphate Hydrate by Deuterated Isotope Dilution and some Thermal Properties. Poster presented at the 31<sup>st</sup> Congress on Science and Technology of Thailand, Oct. (2005).
5. **Banjong Boonchom**, Sujittra Youngme and Chanaiporn Danvirutai, FTIR and FT-Raman Spectroscopic Study of Manganese Phosphate Hydrate by Deuterated Isotope Dilution and some Thermal Properties. Poster presented at the 31<sup>st</sup> Congress on Science and Technology of Thailand, C0248, 187 20-22 Oct 2005.
6. Chanaiporn Danvirutai, Paiboon Danvirutai, and **Banjong Boonchom**, Physico-Chemical Characterization of Sato Loong Pang by Vibrational Spectroscopy (STT-29). 29th Congress on Science and Technology of Thailand. 20-22 Oct 2003.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

7. **Banjong Boonchom**, Chanaiporn Danvirutai, and Sujitra Youngme. Vibrational Spectroscopic Study of Hydrogen Bonding Interactions and Correlation Field Splitting in  $Mn_3(PO_4)_2 \cdot 3H_2O$ ,  $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 3H_2O$ ,  $FePO_4 \cdot 4H_2O$  and Deuterated Analogues, (STT-29). 29th Congress on Science and Technology of Thailand 20-22 Oct. 2003.
8. **Banjong Boonchom**, Chanaiporn Danvirutai, and Sujitra Youngme. Vibrational Spectroscopic Study of Hydrogen Bonding Interactions and Correlation Field Splitting in  $MnHPO_4 \cdot 3H_2O$ ,  $Mn_3(PO_4)_2 \cdot 3H_2O$  and Deuterated analogues, ,p.64, The Second PERCH Annual Science Conference. Jhom Toeing Resort Pattaya, Chonburi. 12-15 May 2003.
9. **Banjong Boonchom**, Chanaiporn Danvirutai, and Sujitra Youngme. Vibrational Spectroscopic Study of Hydrogen Bonding Interactions and Correlation Field Splitting in Same M (III) Phosphate Hydrates. (STT-28), p.81. 28th Congress on Science and Technology of Thailand, Bangkok. 22-25 Oct. 2002.
10. **Banjong Boonchom**, Chanaiporn Danvirutai, and Sujitra Youngme. Vibrational Spectroscopic Study of Hydrogen Bonding Interactions and Correlation Field Splitting in Some Metal (III) Phosphate Hydrates :Part I Manganese Phosphate Monohydrate ( $MnPO_4 \cdot H_2O$ , Serrabrancaite): Preparation and Vibrational . Spectra, p.209 The First PERCH Annual Science Conference. Garden Sea View Report Pattaya, Chonburi. 12-15 May 2002.

#### การประชุมวิชาการใน International Conferences

1. Nopsiri Chaiyo, **Banjong Boonchom** and Naratip Vittayakorn "A modified solid-state reaction synthesis and characterization of sodium niobate ( $NaNbO_3$ ) powders " The 3rd International Symposium on Functional Materials (ISFM2009) 15-18 June 2009, Jinju, KOREA
2. Usa Sukkha, Wanwimon Banlue, **Banjong Boonchom** and Naratip Vittayakorn "Antiferroelectric-ferroelectric phase transition in lead zinc niobate modified lead zirconate ceramics: Crystal studies, Raman spectroscopy, Thermal expansion and electrical properties" The 3rd International Symposium on Functional Materials (ISFM2009) 15-18 June 2009, Jinju, KOREA
3. Manoon Sutapun, Rangson Muanghlua, Surasak Niemcharoen, **Banjong Boonchom** and Naratip Vittayakorn "Phase transition and dielectric properties of lead – free ( $K_{0.5}Na_{0.5}$ ) $NbO_3$  –  $LiNbO_3$  –

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

LiSbO<sub>3</sub> piezoelectric ceramics” The 3rd International Symposium on Functional Materials (ISFM2009) 15-18 June 2009, Jinju, KOREA.

4. U. Sukkha, W. Vittayakorn, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, B. Boonchom and N. Vittayakorn. Effect of A-site and B-site Ion Replacement with Small Ions on the Stability of Ferroelectric Phase in PbZrO<sub>3</sub> Ceramic. The 8<sup>th</sup> Asian Meeting on Electroceramics (AMEC-8) 1-5 July 2012. Penang, Malaysia.
5. Nopsiri Chaiyo, Wanwilai C. Vittayakorn, Rangson Muanghlua, Banjong Boonchom and Naratip Vittayakorn. Phase formation and Characterization of Lead-free Piezoelectric Potassium Niobate (KNbO<sub>3</sub>) Powders Prepared via Solution Combustion. The 8<sup>th</sup> Asian Meeting on Electroceramics (AMEC-8) 1-5 July 2012. Penang, Malaysia.
6. P. Charoonsuk, W. Vittayakorn, R. Muanghlua, B. Boonchom and N. Vittayakorn. Aqueous Coprecipitated Spherical Shape PbZrO<sub>3</sub> Nanopowders : Perovskite Phase Formation. The 8<sup>th</sup> Asian Meeting on Electroceramics (AMEC-8) 1-5 July 2012. Penang, Malaysia.
7. B. Boonchom and N. Vittayakorn. A Rapid Synthesis of Cobalt Cyclotetraphosphate Co<sub>2</sub>P<sub>4</sub>O<sub>12</sub> at Low Temperature. The 8<sup>th</sup> Asian Meeting on Electroceramics (AMEC-8) 1-5 July 2012. Penang, Malaysia.
8. Panpailin Seeharaj, Banjong Boonchom and Naratip Vittayakorn. Nanocrystalline Barium Zirconium Titanate Synthesized by Sonochemical Method. The 8<sup>th</sup> Asian Meeting on Electroceramics (AMEC-8) 1-5 July 2012. Penang, Malaysia.
9. Nopsiri Chaiyo, Wanwilai C. Vittayakorn, Rangson Muanghlua, Banjong Boonchom and Naratip Vittayakorn Rapid Synthesis of Potassium Sodium Niobate (K<sub>1/2</sub>Na<sub>1/2</sub>NbO<sub>3</sub>) Lead-free Piezoelectric Powder using Combustion Method. The 8<sup>th</sup> Asian Meeting on Electroceramics (AMEC-8) 1-5 July 2012. Penang, Malaysia.

#### ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

1. กรรมวิธีการผลิต ไดแคลเซียมฟอสเฟต ไดไฮเดรต (CaHPO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) จากเปลือกหอยแครง และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกรรมวิธีดังกล่าว เลขที่คำขอ 120100726 (กำลังอยู่ระหว่างการพิจารณา)
2. กรรมวิธีการผลิต ไดแคลเซียมฟอสเฟต แอนไฮเดรต (CaHPO<sub>4</sub>) จากเปลือกหอยแครง และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกรรมวิธีดังกล่าว เลขที่คำขอ 120100727 (กำลังอยู่ระหว่างการพิจารณา)
3. กรรมวิธีการผลิต โมโนแคลเซียมฟอสเฟต โมโนไฮเดรต (Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O) จากเปลือกหอยแครง และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกรรมวิธีดังกล่าว เลขที่คำขอ 120100728 (กำลังอยู่ระหว่างการพิจารณา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นราธิป วิทยากร

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ	วัสดุศาสตร์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	2542
วท.ม	วัสดุศาสตร์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	2544
วท.ด	วัสดุศาสตร์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	2548

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

Electroceraic synthesis, Crystal Chemistry, Piezoelectric and Dielectric Materials

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2550	รางวัลนักวิจัยรุ่นใหม่ดีเด่น จาก ปี 2550	สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย - สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกว.- สกอ.)
2551	รางวัลนักวิทยาศาสตร์รุ่นใหม่ (วัสดุศาสตร์)	มูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับนานาชาติย้อนหลัง 3 ปี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- 1 Muangjai Unruan, **Naratip Vittayakorn**, Rewadee Wongmaneerung, Anurak Prasatkhetragarna, Supon Ananta and Rattikorn Yimnirun “Fabrication and Electrical Properties of  $\text{Pb}(\text{Co}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  Ceramics” *Ceramics International*, Volume 35, Issue 1, January 2009, Pages 169-172; Impact Factor 2006 = 1.128
- 2 W. Qu, X. Tan, **N. Vittayakorn**, S. Wirunchit and M. F. Besser “High temperature phases in the  $0.98\text{PbZrO}_3-0.02\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  ceramic” *Journal of Applied Physics*; Vol.105, Page 014106 (2009); Impact factor = 2.316
- 3 Manoon Sutapun, Chien-Chih Huang David P. Cann and **Naratip Vittayakorn** “Phase transitional behavior and dielectric properties of lead free  $(\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{NbO}_3 - \text{Bi}(\text{Zn}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$  ceramics” *Journal of Alloy and Compound.* ; Vol. 479 Page 462-466 (2009); Impact Factor 2007:1.455
- 4 Nopsiri Chaiyo, Anucha Ruangphanit, Rangson Muanghlua, Surasak Niemcharoen, Atchara Sangseub, Saowanee Taopen, Sunanta Leelapattana, Wanwilai C. Vittayakorn, **Naratip Vittayakorn** “Synthesis and Morphology Evolution of Lead-Free Piezoelectric  $\text{K}_{1/2}\text{Na}_{1/2}\text{NbO}_3$  Powder at Low Temperature” *Ferroelectrics*, Volume 383, Issue 1 2009 , pages 8 – 14; Impact Factor: 0.427
- 5 Rangson Muanghlua; Surasak Niemcharoen; Wanwilai C. Vittayakorn; Nattapong Tungsvitsetkul; Pimjan Chinwaro; Anucha Ruangphanit; Nopsiri Chaiyo; **Naratip Vittayakorn** “Preparation and Properties of Lead Free Bismuth Sodium Titanate-Bismuth Zinc Titanate Ceramics” *Ferroelectrics*, Volume 383, Issue 1 2009 , pages 1 – 7; Impact Factor: 0.427
- 6 Theerachai Bongkarn; Nalinee Phungjitt; **Naratip Vittayakorn** “Effect of Firing Temperatures on Phase Formation and Microstructure of  $\text{Ba}(\text{Zr}_{0.3}\text{Ti}_{0.7})\text{O}_3$  Ceramics Prepared via Mixed Oxide Method” *Ferroelectrics*, Volume 383, Issue 1 2009 , pages 65 – 72; Impact Factor: 0.427
- 7 Wanwilai C. Vittayakorn and **Naratip Vittayakorn** “Hysteresis Response of Lead Zirconate —Lead Nickel Niobate Ferroelectric Ceramic Under Compressive Stress” *Ferroelectrics*, Volume 382, Issue 1 2009 , pages 1– 6; Impact Factor: 0.427

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- 8 **Naratip Vittayakorn**; Wanwimon Banlue “Synthesis, Ferroelectric Phase Stabilization, Phase Transition and Thermal Properties in  $(1-x)\text{PbZrO}_3\text{-}x\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  Solid Solution” *Ferroelectrics*, Volume 382, Issue 1 2009 , pages 110– 114; Impact Factor: 0.427
- 9 Manoon Sutapun; **Naratip Vittayakorn** “Phase Transition and Dielectric Properties of Lead Free  $(\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{NbO}_3\text{-} \text{Bi}(\text{Zn}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$  Piezoelectric Ceramics” *Ferroelectrics*, Volume 382, Issue 1 2009 , pages 115– 121; Impact Factor: 0.427
- 10 Wanwimon Banlue; **Naratip Vittayakorn** “Effect of  $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  Additions on Phase Structure, Ferroelectric and Dielectric Properties of  $\text{PbZrO}_3$  Ceramics” *Ferroelectrics*, Volume 382, Issue 1 2009 , pages 122– 126; Impact Factor: 0.427
- 11 Supamas Wirunchit; **Naratip Vittayakorn** “Crossover from Antiferroelectric to Normal Ferroelectric Behavior in Lead Zirconate—Lead Nickel Niobate Ceramics Prepared by the Reaction Sintering Process” *Ferroelectrics*, Volume 382, Issue 1 2009 , pages 135– 140; Impact Factor: 0.427
- 12 Supamas Wirunchit; Rangson Muanghlua; Surasak Niemcharoen; Wanwilai C. Vittayakorn; Pitak Laoratanakul; **Naratip Vittayakorn** “Preparation of Lead Zirconate-Lead Nickel Niobate Ceramics by the Reaction Sintering Process” *Ferroelectrics*, Volume 380, Issue 1 2009 , pages 14– 19; Impact Factor: 0.427
- 13 G. Rujijanagul; **N. Vittayakorn**; S. Nabunmee “Effect of Annealing Time on Electrical and Mechanical Properties of  $0.7(\text{Pb}(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3) - 0.3(\text{Pb}(\text{Zn}_{1/2}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3)$  Ceramics” *Ferroelectrics*, Volume 384, Issue 1 2009 , pages 68 – 72; Impact Factor: 0.427
- 14 Chien-Chih Huang **Naratip Vittayakorn** and David P. Cann “Structure and ferroelectric properties of  $\text{Bi}(\text{Zn}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3\text{-}(\text{Bi}_{1/2}\text{K}_{1/2})\text{TiO}_3$  perovskite solid solutions” *IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control* 56(7) art. No 5116856 pp 1304-1308 2009 , Impact Factor: 2.16
- 15 Chien-Chih Huang, **Naratip Vittayakorn**, Anulak Prasatkhetragarn B. J. Gibbons and David P. Cann “Phase transitions and dielectric properties in  $\text{Bi}(\text{Zn}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3\text{-}(\text{Na}_{1-y}\text{Li}_y)\text{NbO}_3$  perovskite solid solutions” *Japanese Journal of Applied Physics* 48(3) pp. 460-466 2009 Impact Factor: 1.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- 16 B. Boonchom, M. Thongkam, S. Kongtaweelert and N. Vittayakorn "A simple route to synthesis new binary cobalt iron cyclotetraphosphate  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  using aqueous and acetone media" *Journal of Alloys and compounds* 486 pp. 689–692 2009 Impact Factor 1.455
- 17 Naratip Vittayakorn, Piyanut Charoonsuk, Panisara Kasiansin, Supamas Wirunchit and Banjong Boonchom "Dielectric properties and phase transitions behaviors in  $(1-x)\text{PbZrO}_3-x\text{Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$  ceramics" *Journal of applied Physics* 106(6) pp. 064104-6 2009 Impact factor = 2.316
- 18 Nopsiri Chaiyo, Banjong Boonchom and Naratip Vittayakorn "Solid-state reaction synthesis of sodium niobate ( $\text{NaNbO}_3$ ) powder at low temperature" *Journal of Materials Science* 45(6) pp.1443-1447 2009 Impact factor = 1.855
- 19 Usa Sukkha, Wanwimon Banlue, Banjong Boonchom and Naratip Vittayakorn "Antiferroelectric-ferroelectric phase transition in lead zinc niobate modified lead zirconate ceramics: Crystal studies, Raman spectroscopy, Thermal expansion and electrical properties" *Applied Physics A: Material Sciences and Processing* 100(2) pp.551-559 2010 Impact factor = 1.76
- 20 Manoon Sutapun, Rangson Muanghlua, Surasak Niemcharoen, Banjong Boonchom and Naratip Vittayakorn "Phase transition behaviour and electrical properties of lead – free  $(\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{NbO}_3 - \text{LiNbO}_3 - \text{LiSbO}_3$  piezoelectric ceramics" *Current Applied Physics* 11(3) pp.434-437 2011 Impact factor = 1.74
- 21 Banjong Boonchom and Naratip Vittayakorn "Floral-like microarchitectures of cobalt iron cyclotetraphosphate obtained by solid state synthesis" *Powder Technology* 198(1) pp.25-28 2010 Impact factor = 1.887
- 22 Banjong Boonchom and Naratip Vittayakorn "Synthesis and ferromagnetic property of new binary copper iron pyrophosphate  $\text{CuFeP}_2\text{O}_7$ " *Materials Letters* 64(3) pp.275-277 2010 Impact factor = 2.117
- 23 Banjong Boonchom, Montree Thongkam, Samart Kongtaweelert and Naratip Vittayakorn "Flower-like microparticles and novel superparamagnetic properties of new binary  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  obtained by a rapid solid state route at ambient temperature" *Materials Research Bulletin* 44(12) pp.2206-2210 2010 Impact factor = 2.145

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- 24 Prapapim Phetnoi, Surasak Niemcharoen, Rangson Muanghlua, Manoon Sutapun and **Naratip Vittayakorn** “Electrical properties of bismuth potassium titanate-strontium titanate ferroelectric ceramics” ECTI-CON 2010 - The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology , art. no. 5491563 pp. 962-965 2010
- 25 Banjong Boonchom and **Naratip Vittayakorn** “Dehydration behavior of synthetic  $Al_{0.5}Fe_{0.5}PO_4 \cdot 2.5H_2O$ ” *Journal of Chemical and Engineering Data* 55(9) pp.3307-3311 2010 Impact factor = 2.089
- 26 Piyanut Charoonsuk, Supamas Wirunchit, Rangson Muanghlua, Surasak Niemcharoen, Banjong Boonchom and **Naratip Vittayakorn** “The phase evolution with temperature in  $0.94PbZrO_3-0.06Pb(Mg_{1/2}W_{1/2})O_3$  antiferroelectric ceramic” *Journal of Alloys and Compounds* 506(1) pp.313-316 2010 Impact factor = 2.134
- 27 Boonchom, B., Baitahe, R., Joungmunkong, Z., **Vittayakorn, N.** “Grass blade-like microparticle  $MnPO_4 \cdot H_2O$  prepared by a simple precipitation at room temperature” *Powder Technology* 203(2) pp.310-314 2010 Impact factor = 1.887
- 28 Phungjitt, N., Panya, P., **Vittayakorn, N.**, Bongkarn, T. “Use of the combustion technique for the preparation of  $Ba(Ti_{0.70}Zr_{0.30})O_3$  ceramics” *Ferroelectrics* 403(1) pp.142-149 2010 Impact factor = 0.511
- 29 Boonchom, B., Danvirutai, C., **Vittayakorn, N.** “A simple synthesis and characterization of binary  $Co_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  and its final decomposition product  $CoFeP_4O_{12}$ ” *Solid State Sciences* 13(1) pp.77-81 2011 Impact factor = 1.828
- 30 Chaiyo, N., Muanghlua, R., Niemcharoen, S., Boonchom, B., **Vittayakorn, N.** “Solution combustion synthesis and characterization of lead-free piezoelectric sodium niobate ( $NaNbO_3$ ) powders” *Journal of Alloys and Compounds* 509(5) pp. 2445-2449 2011 Impact factor = 2.134
- 31 **Vittayakorn, N.**, Boonchom, B. “Effect of  $BiAlO_3$  modification on the stability of antiferroelectric phase in  $PbZrO_3$  ceramics prepared by conventional solid state reaction” *Journal of Alloys and Compounds* 509(5) pp.2304-2310 2011 Impact factor = 2.134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- 32 Boonchom, B., **Vittayakorn, N.** “Soft synthesis route and characterization of superparamagnetic  $Mn_{1/2}Fe_{1/2}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  and its decomposed product” *Industrial and Engineering Chemistry Research* 50(4) pp.2021-2030, 2011 Impact factor = 2.071
- 33 Chaiyo, N., Ruangphanit, A., Muanghlua, R., Niemcharoen, S., Boonchom, B., **Vittayakorn, N.** “Synthesis of potassium niobate ( $KNbO_3$ ) nano-powder by a modified solid-state reaction” *Journal of Materials Science*, 46(6) pp. 1585-1590, 2011 Impact factor = 1.855
- 34 Muanghlua, R., Niemcharoen, S., Sutapun, M., Boonchom, B., **Vittayakorn, N.** “Phase transition behaviour and electrical properties of lead-free  $(K_{0.5}Na_{0.5})NbO_3-LiNbO_3-LiSbO_3$  piezoelectric ceramics” *Current Applied Physics*, 11(3) pp. 434-437, 2011 Impact factor = 1.74
- 35 Sukkha, U., Muanghlua, R., Niemcharoen, S., Boonchom, B., **Vittayakorn, N.** “Effect of  $Pb(Y_{1/2}Nb_{1/2})O_3$  additions on thermal and electrical properties of  $PbZrO_3$  ceramics” *Ferroelectrics*, 416(1) pp. 8-15, 2011 Impact factor = 2.134
- 36 Chaiyo, N., Ruangphanit, A., Boonchom, B., **Vittayakorn, N.** “Facile synthesis of lead-free piezoelectric sodium niobate ( $NaNbO_3$ ) Powders via the solution combustion method” *Ferroelectrics*, 415(1) pp. 75-82, 2011 Impact factor = 0.511
- 37 Sukkha, U., Muanghlua, R., Niemcharoen, S., Boonchom, B., **Vittayakorn, N.** “Influence of  $Pb(In_{1/2}Nb_{1/2})O_3$  on the Phase Transitions, Electrical, and Thermal Properties of a  $PbZrO_3$  Ceramic” *Journal of The American Ceramic Society* 94(10) pp.3397-3404 2011 Impact factor = 2.167
- 38 Chaiyo, N., Muanghlua, R., Niemcharoen, S., Boonchom, B., Seeharaj, P., **Vittayakorn, N.** “Non-isothermal kinetics of the thermal decomposition of sodium oxalate  $Na_2C_2O_4$ ” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 107(3) pp.1023-1029 2011 Impact factor = 1.752
- 39 Baitahe, R., **Vittayakorn, N.**, Boonchom, B. “Study on thermal transformation of  $CuHPO_4 \cdot H_2O$  obtained by acetone-mediated synthesis at ambient temperature” *Journal of The Thermal Analysis and Calorimetry* DOI 10.1007/s10973-011-1832-y 2011 Impact factor = 1.752
- 40 Kolodiaznyi, T., Sakurai, H., **Vittayakorn, N.** “Spin-flop driven magneto-dielectric effect in  $Co_4Nb_2O_9$ ” *Applied Physics Letters* 99 (13), art. no. 132906, 2011 Impact factor = 3.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- 41 Boonchom, B., **Vittayakorn, N.** "Simple fabrication of polyhedral grain-like microparticle  $\text{Cu}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{HPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and porous structure  $\text{CuZnP}_2\text{O}_7$ " *Ceramics International* 38(1) pp. 411-415 2011 Impact factor = 1.471
- 42 Sukkha, U., Muanghlua, R., Niemcharoen, S., Boonchom, B., Vittayakorn, W., **Vittayakorn, N.** ".Effect of Pb  $(\text{Yb}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$  on phase transition and thermal and electrical properties of PZ-PYbN solid solution on PZ-rich side" *Journal of Materials Science* 47(3) pp.1452-1459 2012 Impact factor = 1.855
- 43 Wongpisutpaisan, N., Ruangphanit, A., **Vittayakorn, N.**, Pecharapa, W. "Cu-doped  $\text{TiO}_2$  nanopowder synthesized by sonochemical process" 2012 International Conference on Enabling Science and Nanotechnology, ESciNano 2012 - Proceedings , art. no. 6149671 2012
- 44 Sutapun, M., Boonchom, B., **Vittayakorn, N.** "Sonochemical synthesis of  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$  powders" *Advanced Materials Research* 506 pp. 94-97 2012 Impact factor = 1.752
- 45 Sukkha, U., Vittayakorn, W., Muanghlua, R., Niemcharoen, S., Boonchom, B., **Vittayakorn, N.** "Phase Transition Behavior of the  $(1-x)\text{PbZrO}_3$ - $x\text{Ba}(\text{Al}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$  Solid Solution" *Journal of the American Ceramic Society* (Article in Press)
- 46 Nawani, C., Boonchom, B., Prachayawarakorn, J., Vittayakorn, W.C., **Vittayakorn, N.** "Synthesis and phase evolution of electrospun antiferroelectric lead zirconate ( $\text{PbZrO}_3$ ) nanofibers" *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology* 177 (13) pp.1009-1016 2012 Impact factor = 1.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.