



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การสังเคราะห์, จลนพลศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์ของ  
การสลายตัวทางความร้อนสารโลหะฟอสเฟตไฮเดรต

(Synthesis, Kinetics and Thermodynamics of Thermal  
Decomposition of Metal Phosphate Hydrates)

โดย ดร.บรรจง บุญชม

เสร็จสิ้นโครงการ มีนาคม 2554

สัญญาเลขที่ **MRG5280073**

# รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การสังเคราะห์, จลนพลศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์ของ

การสลายตัวทางความร้อนสารโลหะฟอสเฟตไฮเดรต

(Synthesis, Kinetics and Thermodynamics of Thermal

Decomposition of Metal Phosphate Hydrates)

คณะผู้วิจัย

สังกัด

ดร.บรรจง บุญชม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

[ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ.และสกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป]

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงและราบรื่นเป็นอย่างดี ด้วยการได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ขอขอบพระคุณสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ที่เอื้ออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ ตรวจสอบวิเคราะห์เอกลักษณ์ของสาร ด้วยเทคนิค FTIR, XRD, TGA และ DSC ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สำหรับความอนุเคราะห์ใช้เครื่องตรวจสอบวิเคราะห์โครงสร้าง XRD ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สำหรับความอนุเคราะห์เครื่องมือ VSM และ UV-Vis Near IR และต้องขอขอบพระคุณบุคคลที่ช่วยให้คำปรึกษาชี้แนะ ประสานงาน และร่วมงานวิจัย คือ ผศ.ดร.ไฉนพร ด้านวิรุฑัย รศ.ดร. สุจิตรา ยังมี รศ.ดร.สันติ แม้นศิริ ผศ.ดร.นราธิป วิทยากร ดร.มนต์วี ทองคำ ดร.สามารถ คงทวีเลิศ อาจารย์ วรุณทิพย์ จัตรจุฑามณี และอาจารย์ทรงพร จึงมั่นคง และสุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ชายพร้อมครอบครัวและแฟนสาวที่คอยเป็นกำลังให้การสนับสนุนอยู่เบื้องหลังตลอดมา

(ดร. บรรจง บุญชม)

หัวหน้าโครงการ

มีนาคม 2554

สัญญาเลขที่ **MRG5280073**

ชื่อโครงการ การสังเคราะห์, จลนพลศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์ของการสลายตัวของสาร

โลหะฟอสเฟตไฮเดรต

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน ดร.บรรจง บุญชม

ชื่อนักวิจัยที่ปรึกษา ผศ.ดร.ไฉนพร ด้านวิรุทย์

ระยะเวลาโครงการ 24 เดือน (15 มีนาคม พ.ศ. 2552 ถึงวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ. 2554)

**บทคัดย่อ**

ได้สังเคราะห์ไฮเดรตของโลหะ (II) ฟอสเฟต ได้แก่  $Mn_{0.5}Ca_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ ,  $Mn_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  และ  $Co_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  ด้วยวิธีอย่างง่าย รวดเร็วและประหยัด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวของสารเหล่านี้พบว่าเป็น  $MnCaP_4O_{12}$ ,  $MnFeP_4O_{12}$  และ  $MnFeP_4O_{12}$  ตามลำดับ ได้คำนวณพลังงานกระตุ้นของการสลายตัวของสารเหล่านี้โดยหลักการไอโซคอนเวอร์ชันของ Kissinger เพื่ออธิบายกลไกการสลายตัวและพิกัดจุดเปลี่ยนของน้ำในสถานะของแข็งไฮเดรต พบว่าตัวแปรจลนพลศาสตร์ (พลังงานกระตุ้น;  $E_a$ , แฟกเตอร์พรีเอกซ์โปเนนเชียล;  $A$ , และรูปแบบจลนพลศาสตร์) และฟังก์ชันเทอร์โมไดนามิกส์ (เอนทัลปี;  $\Delta H^*$ , เอนโทรปี;  $\Delta S^*$ , พลังงานอิสระกิบส์;  $\Delta G^*$ ) ของการสลายตัวของสารที่เตรียมขึ้นให้ค่าที่สอดคล้องกัน ได้นำสารที่เตรียมขึ้นและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวของสารไปตรวจสอบด้วยเทคนิค กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์, พูเรียร์แทรนซ์ฟอร์มอินฟราเรด อธิบายสเปกตรัมของสารที่เตรียมขึ้นและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวของสารในรูปแบบการสั่นของหน่วยย่อย  $H_2PO_4^-$ ,  $P_4O_{12}^{4-}$  และ  $H_2O$  ที่เป็นองค์ประกอบหลักภายในสารที่เตรียมขึ้นได้ ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการสลายตัวของสารกับความยาวคลื่นของการสั่นพันธะที่ก่อให้เกิดการสลายพันธะในแต่ละกลไกทางความร้อน ซึ่งให้ผลการเปรียบเทียบกับผลการทดลองสเปกโทรสโกปีการสั่นเป็นอย่างดี ได้รายงานสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารที่เตรียมได้ทั้งหมดนี้เป็นครั้งแรก ซึ่งมีความสำคัญต่อการนำไปประยุกต์ใช้อย่างจำเพาะเจาะจง

คำสำคัญ: ทวิโลหะ(II)ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรต; ทวิโลหะไฮโคเลเตอร์ฟอสเฟต; การสลายตัวของความร้อน; จลนพลศาสตร์การสลายตัว; เทอร์โมไดนามิกส์การสลายตัว;

สัญญาเลขที่ **MRG5280073**

---

**Research title:** Synthesis, Kinetics and Thermodynamics of Thermal Decomposition of Metal Phosphate Hydrates

**Investigator** Dr. Banjong Boonchom

**Mentor** Asst. Prof. Dr. Chanaiporn Danvirutai

**Research periods** 24 mouths (15 March 2009 -15 March 2011)

---

### ABSTRACT

Metal(II) phosphates hydrates namely  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  were synthesized by a simple, rapid and cost-effective method. Their thermal decomposition products were found to be  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  and  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ , respectively. The activation energies of the decomposition reactions of three phosphates hydrates were calculated by isoconversional methods of Kissinger, which were used to determine the mechanism and identify the type of water in solid hydrates. The kinetic parameters (activation energies;  $E_a$ , pre-exponential factor;  $A$ , kinetic models,  $n$ ) and thermodynamic functions (enthalpy;  $\Delta H^*$ , entropy;  $\Delta S^*$ , Gibb's free energy;  $\Delta G^*$ ) calculated for the decomposition of the synthesized solids were found to be consistent. The synthesized solids and their thermal transformation products were characterized by scanning electron microscopy (SEM), X-ray powder diffraction (XRD) and Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. FTIR spectra of the synthesized solids and their thermal transformation products were assigned base on the  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  and  $\text{H}_2\text{O}$  subunits in each structures. The relations between thermal decomposition temperatures and wavenumbers of breaking bond in each thermal mechanism were proposed, which give to be a good agreement with spectroscopic result. Chemical and physical properties of the synthesized solids and their thermal transformation products were reported for the first time, which are important for specific applications.

**Keywords:** Binary metal (II) dihydrogen phosphate hydrates, Binary cyclotetraphosphate, Thermal decomposition, Thermal decomposition kinetic, Thermal decomposition thermodynamics

## สรุปเนื้อหาสำคัญ (Executive summary)

จุดประสงค์งานวิจัยนี้ มุ่งศึกษาการเตรียมสารใหม่ในกลุ่มทวิโลหะไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

ไฮเดรต  $M_{0.5}A_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$  (เมื่อ M และ A = Ca, Mn, Fe, Cu, Co, Ni, หรือ Zn) และศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนจากการสลายตัวจนได้สารกลุ่มใหม่อีกชนิดหนึ่ง คือสารกลุ่มทวิโลหะไฮโคเลเตตระฟอสเฟต  $MnAP_4O_{12}$  โดยใช้หลักการเตรียมในสารละลายตัวกลางชนิดต่าง ๆ อาทิเช่น เมทิลแอลกอฮอล์ เอทิลแอลกอฮอล์ โพรพิลแอลกอฮอล์ และอะซิโตน เป็นต้น จากนั้นจะนำสารที่เตรียมขึ้นได้ไปตรวจสอบสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมี ด้วยเทคนิค X-ray powder diffraction (XRD), Fourier transform infrared (FT-IR), Scanning electron microscope (SEM), Thermogravimetry analysis (TG/DTG/DTA), UV-Vis near IR และ VSM โดยการดำเนินงานวิจัยได้เตรียมสารใหม่ทวิโลหะไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรตได้สามตัว คือ  $Co_{1/2}Fe_{1/2}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ ,  $Mn_{1/2}Fe_{1/2}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  และ  $Mn_{1/2}Ca_{1/2}(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$  แล้วได้ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนกลุ่มนี้ พบว่าได้สารกลุ่มทวิโลหะไฮโคเลเตตระฟอสเฟตสารชนิดที่สอดคล้องกับสารตั้งต้น คือ  $CoFeP_4O_{12}$ ,  $MnFeP_4O_{12}$  และ  $MnCaP_4O_{12}$  จากการตรวจสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ด้วยเทคนิคที่กล่าวมาข้างบน แล้วได้รวบรวมข้อมูลของสารแต่ละชนิด พร้อมทั้งได้ศึกษาจลนพลศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์ของการสลายตัวจากทวิโลหะไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรตไปเป็นทวิโลหะไฮโคเลเตตระฟอสเฟต สามารถนำมาจัดทำเอกสารเพื่อตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ ได้จำนวน 10 เรื่อง ใน 6 วารสารคือ Journal Chemical Engineering Data, Journal Materials Science, Powder Technology, Journal Thermal Analysis and Calorimetry, Materials Research Bulletin และ Journal Alloys and Compounds และในระหว่างการเตรียม เมื่อเตรียมแล้วไม่ได้สารในกลุ่มที่ศึกษา แต่ได้สารชนิดอื่น ก็สามารถจัดทำเอกสาร รวบรวมข้อมูลเพื่อตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติได้เช่นเดียวกัน เช่น  $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ ,  $CuFeP_2O_7$ ,  $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  อีกทั้งยังได้ทดลองศึกษาจลนพลศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์ของสารโลหะฟอสเฟตที่ชื่อจากบริษัททางการค้า คือ  $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$ ,  $AlPO_4 \cdot H_2O$ ,  $Mg_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$  ก็สามารถตีพิมพ์ผลงานในวารสารนานาชาติเฉพาะด้านได้ รวมแล้วมีผลงานตีพิมพ์ระดับนานาชาติทั้งหมด สิ้นสุด ณ วันที่ 16 มีนาคม พ.ศ. 2553 คือ 20 เรื่อง และยังมีงานที่ยังรออยู่ในขั้นตอนการพิจารณาอีก 1 เรื่อง

## Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับจากทุนโครงการพัฒนาศักยภาพอาจารย์รุ่นใหม่

### ผลงานตีพิมพ์ระดับนานาชาติทั้งหมด 21 เรื่อง

ประกอบด้วย 10 เรื่องเกี่ยวกับสารที่ศึกษาภายในโครงการ และอีก 11 เรื่องเกี่ยวข้องกับสารที่เป็นผลพลอยได้จากการเตรียมสารที่ศึกษาในโครงการนี้

1. **Banjong Boonchom.** 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*, 482(1-2) 2009; 199-202.
2. **Banjong Boonchom** Montree Thongkam, Naratip Vittayakorn and Samart Kongtaweelert. A simple route to synthesize new binary cobalt iron cyclotetraphosphate,  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  using aqueous and acetone media. *J. Alloys Compd*, 486 (1-2):2009; 689-692.
3. **Banjong Boonchom**, Montree Thongkam, Naratip Vittayakorn and Samart Kongtaweelert. 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 Res. Bull.* 44(12):2009; 2206-2210
4. **Banjong Boonchom** and Chanaiporn Danvirutai. 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. Calor.* 98(3):2009; 717-723.
5. **Banjong Boonchom** and Naratip Vittayakorn. Floral-like microarchitectures of cobalt iron cyclotetraphosphate obtained by solid state synthesis. *Powder Technology* 198(1):2010; 25-28 .
6. **Banjong Boonchom** and Montree Thongkam. Kinetics and thermodynamics of the formation of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  . *J. Chem. Eng. Data* 55 (1):2010; 211-216
7. **Banjong Boonchom** and Naratip Vittayakorn. One-step thermal synthesis of binary manganese iron cyclotetraphosphate  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ . *J. Mater. Sc.* 45 (6):2010; 1459-1463
8. **Banjong Boonchom**, Chanaiporn Danvirutai, Naratip Vittayakorn, 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 Sci.* 13(1):2010:77-81.44. .

9. Banjong Boonchom, Naratip Vittayakorn. Soft synthesis route and characterization of superparamagnetic  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and its decomposed product. *Ind. Eng. Chem. Res.* 50(4); 2011:2021-2030.
10. Banjong Boonchom and Naratip Vittayakorn. Study of thermal transformation of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . **Submitted to J. Chem. Eng Data**
11. **Banjong Boonchom** and Nart Phuvongpha. Synthesis of new binary cobalt iron pyrophosphate  $\text{CoFeP}_2\text{O}_7$ , *Material Letters* 63 (20): 2009; 1709-1711.
12. **Banjong Boonchom**, Rattana Baitahe. Synthesis and characterization of nanocrystalline manganese pyrophosphate  $\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ . *Mater. Lett.* 63(26):2009;2218-2220
13. **Banjong Boonchom**. Kinetics and thermodynamics studies of  $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  by Non-isothermal decomposition data. *J. Therm. Anal. Calor.* 98(3):2009; 863-871.
14. **Banjong Boonchom** and Naratip Vittayakorn. Synthesis and ferromagnetic of new binary copper iron pyrophosphate  $\text{CuFeP}_2\text{O}_7$ , *Material Letters* 64(3):2010; 275-277.
15. **Banjong Boonchom**, Chanaiporn Danvirutai and Montree Thongkam. Non-isothermal decomposition kinetics of synthetic serra-brancaite ( $\text{MnPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) precursor in  $\text{N}_2$  atmosphere. *J. Therm. Anal. Calor.* 99(1):2010; 357-362.
16. **Banjong Boonchom** and Samart Kongtaweelert. Study of kinetics and thermodynamics of the dehydration reaction of  $\text{AlPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . *J. Therm. Anal. Calor.* 99(2):2010; 531-538.
17. **Banjong Boonchom**. Kinetics of Thermal Transformation of  $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  to  $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ , *International Journal of Thermophysics*, 31: 2010; 416-429.
18. **Banjong Boonchom**, Rattana Baitahe, Samart Kongtaweelert and Naratip Vittayakorn. Kinetics and Thermodynamics of Zinc Phosphate Hydrate Synthesized by Simple Route in Aqueous and Acetone Media *Ind. Eng. Chem. Res.* 49:2010; 3571-3576.
19. **Banjong Boonchom** and Supote Puttawong. Thermodynamics and kinetics of the dehydration reaction of  $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . *Physica B* . 405: 2010; 2350-2355.
20. **Banjong Boonhom**, Rattana Baitahe, Zongporn Joungmunkong, Naratip Vittayakorn. Grass blade-like microparticle  $\text{MnPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  prepared by a simple precipitation at room temperature. *Powder Techn.* 203 (2010) 310-314.

21. **Banjong Boonchom**, Naratip Vittayakorn. 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. 55(9):2010; 3307-3311.

กิจกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

(1) ผลงานอื่น ๆ เช่น การไปเสนอผลงาน การได้รับเชิญไปเป็นวิทยากร

(2) การเชื่อมโยงทางวิชาการกับนักวิชาการอื่น ๆ ทั้งในประเทศและต่างประเทศ

1. ได้รับเชิญเป็น Reviewer ของ The Arabian Journal for Science and Engineering.
2. ได้รับเชิญเป็น Reviewer ของ Journal of Chemistry and Engineering Data
3. ได้รับเชิญเป็น Reviewer ของ Journal of Thermal Analysis and Calorimetry
4. ได้รับเชิญเป็น Reviewer ของ Materials Science and Engineering B
5. ได้รับเชิญเป็น Reviewer ของ Journal of Material Science
6. ได้รับเชิญเป็น Reviewer ของ Solid State Science
7. ได้รับเชิญเป็น Reviewer ของ Journal of Alloy and compound
8. ได้รับเชิญเป็นอาจารย์พี่เลี้ยง ประจำศูนย์บัณฑิตศึกษา เพื่อตรวจข้อสอบเคมีในการสอบแข่งขันเคมีโอลิมปิกระดับประเทศ ครั้งที่ 5 ณ มหาวิทยาลัยนเรศวร 6-10 พ.ค. 2552
9. ได้รับเชิญเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์นักศึกษานิพนธ์ปริญญาตรี เคมี ของสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง กรุงเทพฯ จำนวน 3 กลุ่มๆ ละ 3 คน
10. ได้รับเชิญเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์นักศึกษานิพนธ์ปริญญาตรี เคมี ของสาขาวิชาเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น จำนวน 1 กลุ่มๆ ละ 2 คน
11. ได้รับเชิญเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์นักศึกษานิพนธ์ปริญญาโท นาโนและวัสดุศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง กรุงเทพฯ จำนวน 2 คน
12. ได้รับเชิญเป็นวิทยากรบรรยาย ในหัวข้อเรื่อง “พัฒนาความรู้การเขียนบทความทางวิชาการ” ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ในวันที่ 24 พฤษภาคม 2553
13. ได้รับเชิญเป็นวิทยากรบรรยาย ในหัวข้อเรื่อง “Fabrication and characterization of metal phosphates” ณ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ในวันที่ 25 พฤศจิกายน 2553
14. ได้รับเชิญเป็นวิทยากรบรรยาย ในหัวข้อเรื่อง “การสังเคราะห์ ตรวจสอบ จลพลศาสตร์ และเทอร์โมไดนามิกส์ของการสลายตัวทางความร้อนสารโลหะฟอสเฟตไฮเดรต” ในงานประชุมวิชาการ นักวิจัยรุ่นใหม่ พบเมธีวิจัยอาวุโส สกว. ครั้งที่ 10 วันที่ 14-16 ตุลาคม 2553 ณ โรงแรมฮอติเดย์อินน์ รีสอร์ท รีเจนท์ บีช ชะอำ จังหวัดเพชรบุรี

15. บทความวิชาการ **บรรจง บุญชม**. ไฮโดรเตตระฟอสเฟตสำหรับการเคลือบเซรามิกวารสารวิชาการ วิทยาศาสตร์ ลาดกระบัง 9(1) 98-108 (2553).
16. บทความวิชาการ **บรรจง บุญชม**. การศึกษาจลนพลศาสตร์การสลายตัวของความร้อนแบบนอนไอโซเทอร์มอล วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์ มข. 38 (3) 325-337 (2553).

## สารบัญ

|                                                                                                | หน้า      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| กิตติกรรมประกาศ                                                                                | ค         |
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย)                                                                             | ง         |
| ABSTRACT (IN ENGLISH)                                                                          | จ         |
| สรุปเนื้อหาสำคัญ (Executive summary)                                                           | ฉ         |
| Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับจากทุนโครงการพัฒนาศักยภาพอาจารย์รุ่นใหม่                        | ช         |
| กิจกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง                                                                    | ฌ         |
| สารบัญ                                                                                         | ฎ         |
| สารบัญตาราง                                                                                    | ฒ         |
| สารบัญรูป                                                                                      | ด         |
| บทที่ 1 บทนำ (Introduction)                                                                    | 1         |
| 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย (Importance of the Research)                                          | 1         |
| 1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (literature review) และเอกสารอ้างอิง (Related References)          | 2         |
| 1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย (Objectives of the Research)                                          | 4         |
| 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย (The Scope of the Research)                                              | 5         |
| 1.5 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ (The Anticipated Outcomes)                                    | 5         |
| บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี (Methodology and Theory)                                               | 7         |
| 2.1 หลักการสังเคราะห์ (Synthesis method)                                                       | 7         |
| 2.2 เอกลักษณะของสารและเทคนิคการตรวจสอบ<br>(Characteristic materials and Identification method) | 9         |
| 2.2.1 หลักการวิเคราะห์เชิงความร้อนและพฤติกรรมทางความร้อน<br>ของสาร                             | 9         |
| 2.2.2 หลักการวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะโครงสร้างของสาร                                        | 14        |
| 2.2.3 หลักการวิเคราะห์รูปแบบการสั่นและเอกลักษณ์พื้นฐานของ<br>การสั่นของสาร                     | <b>20</b> |
| 2.2.4 หลักการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและลักษณะสัณฐานวิทยาของ<br>สาร                                | 24        |
| 2.3 หลักการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์แบบนอนไอโซเทอร์มอล                                              | 25        |
| 2.4 หลักการวิเคราะห์เทอร์โมไดนามิกส์ของการสลายตัวทางความร้อน                                   | 38        |
| 2.5 หลักการคำนวณพลังงานสลายพันธะด้วยเทคนิคทางความร้อน                                          | 39        |
| บทที่ 3 วิธีการทดลอง (Experiment)                                                              | 41        |
| 3.1 บทนำ                                                                                       | 41        |

## สารบัญ(ต่อ)

|                                                                                                                    | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ                                                                                           | 42   |
| 3.3 สารเคมี                                                                                                        | 42   |
| 3.4 วิธีการสังเคราะห์                                                                                              | 43   |
| 3.4.1 การสังเคราะห์สารกลุ่ม Binary metal dihydrogen<br>phosphate hydrate $M_{1/2}A_{1/2}(II)(H_2PO_4) \cdot nH_2O$ | 43   |
| 3.4.2 การสังเคราะห์สารกลุ่ม Binary cyclo-tetraphosphate<br>$MAP_4O_{12}$                                           | 44   |
| 3.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารที่ศึกษา                                                                              | 44   |
| 3.5.1 การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี                                                                          | 44   |
| 3.5.2 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน                                                                               | 45   |
| 3.5.3 การวิเคราะห์รูปแบบการสั่นขององค์ประกอบย่อยภายในโมเลกุล                                                       | 45   |
| 3.5.4 การวิเคราะห์ทางโครงสร้าง                                                                                     | 45   |
| 3.5.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา                                                                                      | 45   |
| 3.6 การศึกษาจลนพลศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์ของการสลายตัวทางความร้อน                                                 | 46   |
| 3.6.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์                                                                                          | 46   |
| 3.6.2 การศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์                                                                                     | 47   |
| 3.6.3 การคำนวณพลังงานความร้อนเพื่อให้พันธะเคมีสลายตัว                                                              | 47   |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง (Experimental results)                                                                          | 49   |
| 4.1 ผลการสังเคราะห์ (Synthesis results)                                                                            | 49   |
| 4.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิคต่าง ๆ (Characteristic materials and Identification method)               | 52   |
| 4.2.1 ผลการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของสาร                                                                        | 53   |
| 4.2.2 ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของสาร                                                                            | 56   |
| 4.2.3 ผลการตรวจเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของสาร                                                                    | 59   |
| 4.2.4 ผลการตรวจลักษณะสัณฐานวิทยาของสาร                                                                             | 63   |
| 4.3 ผลการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์แบบนอนไอโซเทอร์มอล                                                                    | 67   |
| 4.4 ผลการวิเคราะห์เทอร์โมไดนามิกส์ของการสลายตัวทางความร้อน                                                         | 71   |
| 4.5 ผลการคำนวณพลังงานสลายพันธะด้วยเทคนิคทางความร้อน                                                                | 71   |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง (Conclusion)                                                                                | 75   |
| 5.1 สรุปผลการสังเคราะห์ (Synthesis results)                                                                        | 75   |

## สารบัญ(ต่อ)

|                                                                                                             | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 5.2 สรุปผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิคต่าง ๆ<br>(Characteristic materials and Identification method) | 75   |
| 5.2.1 สรุปผลการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของสาร                                                             | 75   |
| 5.2.2 สรุปผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของสาร                                                                 | 76   |
| 5.2.3 สรุปผลการตรวจเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของสาร                                                         | 76   |
| 5.2.4 สรุปผลการตรวจลักษณะสัณฐานวิทยาของสาร                                                                  | 77   |
| 5.3 สรุปผลการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์แบบนอนไอโซเทอร์มอล                                                         | 77   |
| 5.4 สรุปผลการวิเคราะห์เทอร์โมไดนามิกส์ของการสลายตัวทางความร้อน                                              | 78   |
| 5.5 สรุปผลการการคำนวณพลังงานสลายพันธะด้วยเทคนิคทางความร้อน                                                  | 79   |
| 5.6 ข้อเสนอแนะ                                                                                              | 79   |
| เอกสารอ้างอิง (References)                                                                                  | 81   |
| ภาคผนวก (Reprints)                                                                                          | 87   |

## สารบัญตาราง

|              | หน้า                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ตารางที่ 2.1 | ระบบของผลึก 7 ชนิด                                                                                                                                                                                                                                        |
| ตารางที่ 2.2 | ความสัมพันธ์ของหน่วยเซลล์ผลึกและหน่วยเซลล์ส่วนกลับของระบบโมโนคลินิก                                                                                                                                                                                       |
| ตารางที่ 2.3 | ตัวแปรหน่วยผลึก สำหรับสารกลุ่ม $M(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ และ $M_2P_4O_{12}$                                                                                                                                                                              |
| ตารางที่ 2.4 | แถบการสั่นพื้นฐานของโมเลกุลน้ำภายในโครงสร้างของแข็ง ( $cm^{-1}$ ).                                                                                                                                                                                        |
| ตารางที่ 2.5 | ค่าความถี่ของการสั่นของ $PO_4$ (Boonchom, 2006)                                                                                                                                                                                                           |
| ตารางที่ 2.6 | ตัวอย่างฟังก์ชันของ $f(\alpha)$ and $g(\alpha)$ เพื่อใช้ในการคำนวณหาฟังก์ชันการสลายตัวของสาร                                                                                                                                                              |
| ตารางที่ 4.1 | น้ำหนักของสารที่ได้จากการทดลองและทฤษฎีรวมทั้งร้อยละผลผลิตของสารกลุ่ม $M_{0.5}A_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$ และ $MAP_4O_{12}$                                                                                                                            |
| ตารางที่ 4.2 | ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสารกลุ่ม $M_{0.5}A_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$ และ $MAP_4O_{12}$ ที่วิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคต่าง ๆ                                                                                                                              |
| ตารางที่ 4.3 | ขนาดผลึกและแลตติสพารามิเตอร์ ที่คำนวณได้จากรูปแบบการสะท้อนรังสี X-ray สำหรับสาร $Mn_{0.5}Ca_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ , $Mn_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ และ $Co_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ พร้อมเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีมาก่อน |
| ตารางที่ 4.4 | ขนาดผลึกและแลตติสพารามิเตอร์ ที่คำนวณได้จากรูปแบบการสะท้อนรังสี X-ray สำหรับสาร $MnCaP_4O_{12}$ , $MnFeP_4O_{12}$ และ $CoFeP_4O_{12}$ พร้อมเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีมาก่อน                                                                              |
| ตารางที่ 4.5 | แถบการสั่นและการจำแนกรูปแบบการสั่นของสาร $M_{0.5}A_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$ เมื่อ $M$ และ $A=Ca, Mn, Fe$ และ $Co$ ; $n=1$ หรือ $2$                                                                                                                   |
| ตารางที่ 4.6 | แถบการสั่นและการจำแนกรูปแบบการสั่นของสาร $MAP_4O_{12}$ เมื่อ $M$ และ $A=Ca, Mn, Fe$ และ $Co$                                                                                                                                                              |
| ตารางที่ 4.7 | ตัวแปรจลนพลศาสตร์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การชน ( $A$ ) พลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) และอันดับของการสลายตัว ( $n$ ) พิจารณาจากสมการของ Kissinger และ Ozawa                                                                                                         |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

|                    |                                                                                                                                                                                                                                                 | หน้า |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 4.8       | ฟังก์ชันเทอร์โมไดนามิกส์ คือ พลังงานอิสระกิบส์( $\Delta G^*$ ) พลังงานเอนทาลปี( $\Delta H^*$ ) และเอนโทรปี( $\Delta S^*$ ) ของการสลายตัวของสารประกอบไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรต                                                                      | 71   |
| ตารางที่ 4.9       | อุณหภูมิสูงสุดของการสลายตัวแต่ละกลไก จำนวนควอนตัม พลังงานพันธะการสันจากการคำนวณและการจำแนกแถบการสั่นสำหรับสาร $Mn_{0.5}Ca_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ , $Mn_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ , $Co_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  | 72   |
| ตารางที่ 4.9 (ต่อ) | อุณหภูมิสูงสุดของการสลายตัวแต่ละกลไก จำนวนควอนตัม พลังงานพันธะการสันจากการคำนวณ และการจำแนกแถบการสั่นสำหรับสาร $Mn_{0.5}Ca_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ , $Mn_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ , $Co_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ | 73   |

## สารบัญรูป

|             | หน้า                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 2.1  | เทอร์โมแกรม TG/DTG/DTA ของสาร $\text{Co}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ในอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $1^\circ\text{C min}^{-1}$ ของสภาวะบรรยากาศ (Trojan & Bradová)                                             | 11 |
| รูปที่ 2.2  | เทอร์โมแกรม TG/DTG/DTA ของสาร $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ เมื่อ $x = 0.25$ (1), $0.50$ (2) และ $0.75$ (3) บันทึกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $2.5^\circ\text{C min}^{-1}$ (Antraptseva และคณะ, 2007) | 12 |
| รูปที่ 2.3  | แผนภาพพลการสลายตัวทางความร้อนของสาร $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ เมื่อ $x = 0.25, 0.50$ และ $0.75$ สอดคล้องกับรูปที่ 2.2 (Antraptseva และคณะ, 2007)                                               | 13 |
| รูปที่ 2.4  | เทอร์โมแกรม TG/DTG/DTA ของสาร $\text{Mn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ บันทึกในอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10^\circ\text{Cmin}^{-1}$ ในสภาพบรรยากาศ (Boonchom และคณะ, 2008)                                    | 13 |
| รูปที่ 2.5  | การเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ผิวหน้าของผลึก                                                                                                                                                                                                    | 15 |
| รูปที่ 2.6  | (ก) หน่วยเซลล์โมโนคลินิก<br>(ข) ระนาบ ac ของหน่วยเซลล์ใน (ก) และระยะห่างของระนาบ (100) และ (001)<br>(ค) หน่วยเซลล์ผลึกและหน่วยเซลล์ส่วนกลับของระบบโมโนคลินิก                                                                                         | 17 |
| รูปที่ 2.7  | ลักษณะทางโครงสร้างของ $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (a) และโครงสร้างในสามมิติในหน่วยเซลล์ $\text{P}_{21}/n$ (b) และโครงสร้างของหมู่ $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ (Koleva & Effenberger, 2007)                           | 18 |
| รูปที่ 2.8  | ลักษณะทางโครงสร้างของไอออน $(\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-})$ (A) แบบวงแหวน และ (B) แบบเส้นตรง(Dammak และคณะ, 2008)                                                                                                                                    | 18 |
| รูปที่ 2.9  | Vibrational modes ของโมเลกุลน้ำ                                                                                                                                                                                                                      | 21 |
| รูปที่ 2.10 | Vibrational modes ของโมเลกุล Tetrahedral $\text{XY}_4$                                                                                                                                                                                               | 21 |
| รูปที่ 2.11 | สเปกตรัม IR ของ $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ เมื่อ M คือ Mg, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Cd บันทึกในช่วง $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ ด้วยเทคนิค เกล็ด KBr (Koleva & Effenberger, 2007)                                 | 23 |
| รูปที่ 2.12 | สเปกตรัม IR ของ $\text{MnCoP}_4\text{O}_{12}$ บันทึกในช่วง $2000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ ด้วยเทคนิค เกล็ด KBr เปรียบเทียบกับสารโลหะเดี่ยวไฮโดรเจนฟอสเฟต (บรรจง บุญชม, 2553)                                                                       | 24 |
| รูปที่ 2.13 | หลักการทำงานของเครื่อง scanning electron microscope (SEM) [http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html]                                                                                                                               | 26 |

## สารบัญรูป(ต่อ)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 2.14 ภาพ SEM ของสาร $\text{Co}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (a), $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (b), $\text{Mn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (c) and $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ (d), $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ (e), $\text{MnCoP}_4\text{O}_{12}$ (f).                 | 27   |
| รูปที่ 2.15 ภาพ SEM ของสาร $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{MnCO}_3\text{-H}_3\text{PO}_4)$ , $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{Mn-H}_3\text{PO}_4)$ , $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ( $\text{MnCO}_3\text{-H}_3\text{PO}_4$ at 500 °C), และ $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ( $\text{Mn-H}_3\text{PO}_4$ at 500 °C) | 27   |
| รูปที่ 2.16 เทอร์โมแกรมของ $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ที่ถูกเตรียมได้ในสภาวะการเตรียมที่แตกต่างกัน                                                                                                                                                                                                                                                                | 28   |
| รูปที่ 2.17 เทอร์โมแกรม TG ของ $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ทำการทดลองในสภาพบรรยากาศและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5, 10, 15 และ 20 °C/min                                                                                                                                                                                                                                | 32   |
| รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log \beta$ กับ 1000/T ตามสมการของ Ozawa                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 33   |
| รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ตามสมการของ Coats and Redfern โดยใช้ฟังก์ชันที่มีความเป็นไปได้มากที่สุด คือ $D_3$ model                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 36   |
| รูปที่ 2.20 DSC เทอร์โมแกรมของ $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ทำการทดลองที่ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 4 ค่า (5, 10, 15 และ 20 K min <sup>-1</sup> )                                                                                                                                                                                                                       | 37   |
| รูปที่ 3.1 แผนภาพการเตรียมสาร การตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะของสาร การศึกษาจลนพลศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์การสลายตัวทางความร้อน                                                                                                                                                                                                                                                                              | 48   |
| รูปที่ 4.1 เทอร์โมแกรม TG/DTG/DTA ของสาร $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ที่ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 K min <sup>-1</sup> ในแก๊ส O <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                    | 53   |
| รูปที่ 4.2 เทอร์โมแกรม TG/DTG/DTA ของสาร $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ที่ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 Kmin <sup>-1</sup> ในแก๊ส O <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                    | 54   |
| รูปที่ 4.3 เทอร์โมแกรม TG/DTG/DTA ของสาร $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ที่ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 Kmin <sup>-1</sup> ในแก๊ส O <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                    | 55   |
| รูปที่ 4.4 รูปแบบ XRD ของสาร $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ และอนุพันธ์ทางความร้อน $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$                                                                                                                                                                                                                                  | 56   |
| รูปที่ 4.5 รูปแบบ XRD ของสาร $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และอนุพันธ์ทางความร้อน $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$                                                                                                                                                                                                                                 | 57   |
| รูปที่ 4.6 รูปแบบ XRD ของสาร $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และอนุพันธ์ทางความร้อน $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$                                                                                                                                                                                                                                 | 57   |

สารบัญรูป(ต่อ)

|             |                                                                                                                                                                                               | หน้า |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 4.7  | สเปกตรัม FTIR ของสาร $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ และอนุพันธ์ทางความร้อน $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$                                  | 60   |
| รูปที่ 4.8  | สเปกตรัม FTIR ของสาร $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และอนุพันธ์ทางความร้อน $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$                                 | 61   |
| รูปที่ 4.9  | สเปกตรัม FTIR ของสาร $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และอนุพันธ์ทางความร้อน $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$                                 | 61   |
| รูปที่ 4.10 | สัณฐานวิทยา SEM ของสาร $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (a) และอนุพันธ์ทางความร้อน $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ (b)                        | 64   |
| รูปที่ 4.11 | สัณฐานวิทยา SEM ของสาร $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (a) และอนุพันธ์ทางความร้อน $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ (b)                        | 65   |
| รูปที่ 4.12 | สัณฐานวิทยา SEM ของสาร $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (a) และอนุพันธ์ทางความร้อน $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ (b)                       | 66   |
| รูปที่ 4.13 | เทอร์โมแกรม DTA ของสาร $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5, 10, 15, และ 20 $\text{K min}^{-1}$ ในแก๊ส $\text{O}_2$  | 67   |
| รูปที่ 4.14 | เทอร์โมแกรม DTA ของสาร $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5, 10, 15, และ 20 $\text{K min}^{-1}$ ในแก๊ส $\text{O}_2$ | 68   |
| รูปที่ 4.15 | เทอร์โมแกรม DTA ของสาร $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5, 10, 15, และ 20 $\text{K min}^{-1}$ ในแก๊ส $\text{O}_2$ | 68   |
| รูปที่ 4.16 | กราฟความสัมพันธ์ตามสมการ Kissinger ของการสลายตัวทางความร้อนของสาร $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$                                          | 69   |
| รูปที่ 4.17 | กราฟความสัมพันธ์ตามสมการ Kissinger ของการสลายตัวทางความร้อนของ $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                                            | 69   |
| รูปที่ 4.18 | กราฟความสัมพันธ์ตามสมการ Kissinger ของการสลายตัวทางความร้อนของ $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                                            | 70   |

# บทที่ 1 บทนำ

## (Introduction)

### 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย (Importance of the Research)

สารประกอบโลหะฟอสเฟตไฮเดรตมีการศึกษาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันอย่างแพร่หลาย อันเนื่องมาจากสารในกลุ่มนี้ มีความสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน อาทิเช่นเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์เซลล์ทางแสง, สารเคลือบผิวกันการกัดกร่อน, เป็นสีในอุตสาหกรรมเซรามิก, ปุ๋ยที่มีทั้งธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองแก่พืช คือให้ทั้งธาตุฟอสฟอรัสและธาตุโลหะ, ใช้เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมี และที่สำคัญอีกประการหนึ่งสารบางชนิดยังมีสมบัติทางแม่เหล็กที่สามารถนำไปใช้งานอย่างอื่นนอกเหนือจากที่กล่าวมาาก่อนนี้ และจากงานวิจัยในอดีตพบว่า สารประกอบกลุ่มโลหะฟอสเฟตนั้นมีที่มาอยู่ 2 แหล่ง คือ เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เรียกว่า แร่ธาตุกลุ่มฟอสเฟต โดยเกิดขึ้นผ่านกระบวนการตามธรรมชาติที่ต้องใช้เวลาและสภาวะที่เหมาะสม โดยการตกตะกอนเกิดจากฟอสฟอรัสที่มาจากปุ๋ยฟอสเฟตกับโลหะที่เป็นจุลธาตุอาหารของพืช สารประกอบโลหะฟอสเฟตที่เกิดขึ้นนี้ค่อนข้างจะมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยหรือแทบจะไม่ละลายน้ำเลย จึงก่อให้เกิดปัญหาทำให้ดินจับกันแน่น แข็ง พืชไม่สามารถดูดซับธาตุฟอสฟอรัสและโลหะที่เป็นจุลธาตุอาหารไปใช้ประโยชน์ได้ เมื่อเกิดการตกตะกอนของโลหะฟอสเฟตนี้ สิ่งที่เกิดขึ้นนี้เองที่เป็นปัญหาของการเสื่อมโทรมของดิน ที่มาของโลหะฟอสเฟตแหล่งที่สองนั้น มาจากการเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ วิธีการเตรียมก็มีอยู่หลายวิธี อาทิเช่น การเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอน (precipitation) การตกตะกอนร่วม (co-precipitation) แบบไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal synthesis) การสังเคราะห์สารแบบโซล-เจล (sol gel method) และอื่น ๆ ในอดีตนั้น มีทั้งการเตรียมสารโลหะฟอสเฟตที่มีอยู่ในธรรมชาติและเตรียมขึ้นแล้วได้สารชนิดใหม่ โดยได้มีการพบว่าสารตัวเดียวกันนั้น หากเตรียมด้วยวิธีหรือพบในแหล่งที่ต่างกัน จะส่งผลให้สมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน อาทิเช่น ขนาดอนุภาค สมบัติทางแสง สีที่ปรากฏ สมบัติแม่เหล็ก ความเสถียรทางความร้อน สมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และอื่น ๆ ดังตัวอย่างงานวิจัยของบรรจง บุญชม และคณะ(2008) ที่ได้ศึกษาการเตรียมสาร  $Mn(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  โดยใช้สารตั้งต้นที่ต่างกัน คือ แมงกานีสคาบอเนต และโลหะแมงกานีส พบสารผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาคที่ต่างกันอย่างชัดเจน และเมื่อได้นำสารที่เตรียมได้ไปเผาที่อุณหภูมิหนึ่ง พบว่าสารโลหะฟอสเฟตที่เตรียมขึ้นนี้จะสลายตัวและเปลี่ยนแปลงไปสารฟอสเฟตในหน่วยย่อยอื่น โดยพบว่าสารประกอบฟอสเฟตถูกแบ่งออกตามโครงสร้างของหน่วยย่อยของฟอสเฟต คือ  $PO_4^{3-}$ ,  $HPO_4^{2-}$ ,  $H_2PO_4^-$ ,  $P_2O_7^{4-}$  และ  $P_4O_{12}^{4-}$  เป็นต้น โดยสมารถที่จะเปลี่ยนแปลงรูปโครงสร้างของหน่วยย่อยตามสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมตามความเสถียรซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารตั้งต้นแต่ละตัว ทำให้ความหลากหลายของการใช้งานของสารในกลุ่มฟอสเฟตเพิ่มสูงมากขึ้น เพราะเมื่อมันสามารถเปลี่ยนไปเป็นตัวอื่นได้ ยิ่งทำให้มีความหลากหลายที่จะนำไปประโยชน์ในด้านต่างๆ ที่เหมาะสมมากขึ้นไปด้วย จากความสำคัญของสารกลุ่มฟอสเฟตที่กล่าวมานั้น ทำให้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสารในกลุ่มนี้ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาเป็นอย่างมาก แต่

ความรู้เคมีพื้นฐานที่จำเป็นอย่างยิ่งที่มีการศึกษาอย่างจำกัด ณ ปัจจุบันนี้ คือ จลนพลศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์ของการสลายตัวทางความร้อนของสารในกลุ่มโลหะฟอสเฟต ซึ่งเป็นข้อมูลที่บ่งบอกให้ทราบว่ากระบวนการทางความร้อนของการสลายตัวเกิดเร็วหรือช้า เกิดได้เองหรือเกิดเองไม่ได้ มีตัวแปรอะไรที่เกี่ยวข้อง เช่น อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่อเวลา เวลาและอุณหภูมิในการเผา ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่จะใช้ควบคุมการสังเคราะห์สารเพื่อให้ได้สมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านที่เหมาะสม ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะศึกษา การสังเคราะห์สารกลุ่มโลหะฟอสเฟตแล้วตรวจสอบการสลายตัวทางความร้อนไปเป็นสารฟอสเฟตที่มีโครงสร้างแบบอื่น ด้วยหลักการจลนพลศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์ อันเป็นหลักการที่มีการศึกษาอย่างจำกัดและในกลุ่มวิจัยของเรา ก็เป็นกลุ่มแรกทั้งในประเทศและต่างประเทศที่กำลังศึกษาสารในกลุ่มโลหะฟอสเฟตนี้อยู่

## 1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (literature review) และเอกสารอ้างอิง (Related references)

Trojan และคณะได้ศึกษาสารในกลุ่มโลหะทั้งผสมและโลหะเดี่ยวไดไฮโดรเจนฟอสเฟตและไฮโคเลเตตระฟอสเฟตในช่วงปลายศตวรรษที่ 18 ต้นศตวรรษที่ 19 โดยในห้องปฏิบัติการของกลุ่มนี้สนใจนำสารไฮโคเลเตตระฟอสเฟตไปใช้เป็นสียเคลือบในอุตสาหกรรมเซรามิคและประยุกต์ใช้เป็นปุ๋ยในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากความสามารถในการละลายอย่างช้า สารที่กลุ่มของ Trojan ได้ศึกษาไปแล้วนั้น มีดังต่อไปนี้  $c\text{-Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ (1985),  $\text{Ni}^{II}$ ,  $\text{Co}^{II}$  and  $\text{Mn}^{II}$  cyclo-tetraphosphates(1985), Binary manganese(II)-zinc(II)cyclo-tetraphosphates(1989), Binary cyclo-tetraphosphates  $\text{Cu}_{2-x}\text{Mg}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  (1989),  $c\text{-Zn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ (1990),  $\text{Co}_{2-x}\text{Ni}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  and  $\text{Mn}_{2-x}\text{Ni}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$ (1990),  $\text{Mn}_{2-x}\text{Ca}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$ (1990),  $\text{Zn}_{2-x}\text{Ca}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  (1990),  $c\text{-Ni}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ (1990),  $c\text{-Cd}_{4/3}\text{Ca}_{2/3}\text{P}_4\text{O}_{12}$  (1990),  $\text{Mg}_{2-x}\text{Zn}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  and  $\text{Mg}_{2-x}\text{Ca}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  (1991),  $\text{Ni}_{2-x}\text{Mg}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$ (1991),  $\text{Mn}_{2-x}\text{Co}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  and  $\text{Zn}_{2-x}\text{Co}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$ (1993), Binary cobalt(II)-copper(II) cyclo-tetraphosphates(1993), cadmium(II) cyclo-tetraphosphate(1993), binary Cd(II)-Zn(II) cyclo-tetraphosphates(2000), binary zinc(II)-nickel(II) cyclo-tetraphosphates(2000) และ Binary Cu(II)-Mn(II) cyclo-tetraphosphates(2000) โดยรายงานวิธีการเตรียมด้วยเทคนิคทางความร้อน จากการเตรียมด้วยการตกตะกอนโลหะ(II)คาร์บอเนต กับฟอสฟอริกที่อุณหภูมิในช่วง 60-150 °C จะได้ตะกอน จากนั้นนำตะกอนไปเผาที่อุณหภูมิ ประมาณ 400-500 °C จะได้สารที่เป็นโลหะเดี่ยวไฮโคเลเตตระฟอสเฟต ( $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ) แล้วจากนั้นหากอยากได้สารที่เป็น  $\text{M}_{2-x}\text{A}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  ของโลหะตัวไหน ค่อยนำสารโลหะเดี่ยวไปเผาพร้อมกันในสัดส่วนโมล ตามต้องการที่อุณหภูมิที่สภาวะเหนือจุดหลอมเหลวของสารตัวที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าประมาณ 20 °C ใช้เวลาประมาณ 3 ชม ปล่อยให้เย็นจะเกิดจากจัดเรียงตัวใหม่ได้เป็น สารที่เป็นกลุ่ม  $\text{M}_{2-x}\text{A}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  อุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ในช่วงประมาณ 800-1200 °C เพราะอุณหภูมิในช่วงนี้เป็นจุดหลอมเหลวของสารในกลุ่มไฮโคเลเตตระฟอสเฟตและเมื่อนำไปใช้ในการเคลือบผิวเซรามิคแล้ว สารเคลือบเหล่านี้ จึงแสดงสภาพการทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดี

ในส่วนของการเตรียมสารตั้งต้นเป็นโลหะเดี่ยวหรือผสมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรตนั้น Trojan และคณะ ก็มีการศึกษามาบางส่วน โดยวิธีการเตรียมสารตั้งต้นนั้น ได้รายงานเฉพาะ สารตั้งต้นที่มี โลหะ (II) ตกตะกอนกับกรดฟอสฟอริก ที่อุณหภูมิ ราวๆ 60 °C ระยะเวลาของการตกตะกอนบางตัว

ก็ค่อนข้างนาน(2-60ชม) และบางตัวก็ไม่ได้ระบุไว้ โดยสารที่ได้ศึกษาไปแล้วนั้น ได้แก่  $\text{Co}_{1/2}\text{Mg}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (1990),  $\text{Zn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (1990),  $\text{Zn}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (1990),  $\text{Mn}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (1990),  $\text{Cu}_{1/2}\text{Mg}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ (1990),  $\text{Co}_{1/2}\text{Ca}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (1990) และ  $\text{Mn}_{1/2}\text{Ca}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (1990) โดยเมื่อนำสารกลุ่มนี้ไปเผาที่อุณหภูมิจนเกิดการสลายไปเป็นสารโลหะเดี่ยวหรือโลหะผสมไฮดรอกไซด์หรือฟอสเฟตซึ่งก็ขึ้นอยู่กับสารโลหะแต่ละชนิด โดยอุณหภูมิส่วนใหญ่ของการเผาจะอยู่ในช่วง 400-600 °C

ในส่วนของการวิจัยกลุ่มอื่นที่มีการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์สารทั้งสองกลุ่มนี้ ในเร็วนี้คือ Koleva และคณะ ได้ศึกษาการเตรียมและวิเคราะห์โครงสร้างของสาร  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (M = Mn, Co, Ni)(2006) และ  $\text{M}[\text{PO}_2(\text{OH})_2]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  compounds (M=Mg, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Cd)(2007) โดยเตรียมจากสารตัวโลหะ(II) กับกรดฟอสฟอริก ที่อุณหภูมิ 60 °C และใช้เวลาในการตกตะกอน 2 วัน ในเวลาใกล้เคียงกัน Antraptsevaและคณะ(2006) ได้รายงานวิธีการเตรียม  $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  โดยการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้น ด้วยการผสมระหว่างกรดฟอสฟอริก(63.13 wt %  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) กับแมงกานีสคาร์บอเนต (53.87 wt% MnO) และ ซิงค์ ไฮดรอกไซด์คาร์บอเนต (77.23 wt% ZnO) ในปีถัดมา Viter และคณะ(2007) ได้รายงานวิธีการเตรียม  $\text{M}_{1-x}\text{Ni}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (M=Mg, Mn, Co, Zn) ด้วยใช้เวลาในกระบวนการเตรียม 2 ถึง 90 วัน ในส่วนของกลุ่มวิจัยเรานั้น ก็ได้ศึกษาวิธีการเตรียมสารในกลุ่มโลหะทั้งผสมและโลหะเดี่ยวไดไฮดรเจนฟอสเฟตและไฮดรอกไซด์ฟอสเฟตบางตัว เช่น  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ (2007) และ  $\text{Mn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (2007) โดยใช้เทคนิคการเตรียมที่ค่อนข้างจะรวดเร็วมากใช้เวลาในการเตรียมสารประมาณ 5-10 นาทีและเทคนิคที่ใช้ก็ไม่มีการปลดปล่อยก๊าซ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังที่งานคนอื่นๆ เคยเตรียมมาก่อนหน้านี้ด้วย พร้อมทั้งขนาดอนุภาคที่เล็กและพฤติกรรมทางความร้อนก็ความแตกต่างกันอย่างชัดเจนด้วยโดยผลดังกล่าวเกิดจากสภาวะกระบวนการในการเตรียมสารดังกล่าว ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่จะทำให้ได้สารที่มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เพื่อเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

ในด้านการศึกษาทางด้านจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวทางความร้อน แบบนอนไอโซเทอร์มอล ของสารในกลุ่มโลหะฟอสเฟตและในกลุ่มที่จะศึกษานี้ ก็มีความจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่ง อันเนื่องมาจากเมื่อสลายตัวไปเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายแล้ว สารนั้น ก็ยังมีความสำคัญและมีประโยชน์ในการนำไปใช้ที่หลากหลายไม่แพ้สารตั้งต้น ดังที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ ดังนั้นความจำเป็นที่จะทำความเข้าใจถึงกลไกและรูปแบบของการสลายตัวของสารเหล่านี้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยที่ผ่านมานงานวิจัยที่ศึกษาทางด้านนี้ พึ่งจะศึกษากันอย่างมากในช่วง 10-20 ปีที่ผ่านมา แต่ศึกษาการสลายตัวของสารตั้งต้นที่สามารถสลายไปเป็นโลหะออกไซด์ อาทิเช่น การสลายตัวของ โลหะออกซาลेट โลหะอะซีเตต และโลหะซัลไฟด์ (โลหะ ได้แก่ Cu, Zn, Ni ) โดยเมื่อสลายตัวได้ CuO, ZnO, NiO เป็นต้น ในส่วนสมการทางจลนพลศาสตร์ที่ใช้อยู่และมีการกล่าวอ้างถึงและมีการพัฒนาอยู่เรื่อยๆ จนถึงปัจจุบัน อาทิเช่น สมการของ Ozawa, Coats and Redfern, Kissinger Akihara Sunose (KAS), Achar , Kissinger และอื่นๆ โดยที่ผ่านจะมีการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวของสารโลหะในกลุ่มไดไฮดรเจน

ฟอสเฟตน้อย ซึ่งในกลุ่มวิจัยของเราได้ศึกษา จลนพลศาสตร์ของสารในกลุ่มโลหะฟอสเฟตไปบ้างแล้ว บางตัว ที่มีการตอบรับให้ตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ เช่น  $\text{AlPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ใน J. Therm. Anal. Calor. (2007),  $\text{FePO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ใน Ind. Eng. Chem. Res. (2007), และ  $\text{Mn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ใน Solid States Science (2007) โดยในการศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของกลุ่มเรานั้น ได้อาศัยสมการการคำนวณ จากที่กล่าวก่อนหน้านี้ เพื่อคำนวณ activation energy และรูปแบบกลไกการสลายตัวของกระบวนการสลายตัวของสารในแต่ละตัว ตัวอย่างผลงาน อาทิเช่น ในปี 2008 บรรจง บุญชม ได้รับตอบรับการตีพิมพ์ ในวารสาร J. Chem. Eng. Data ของสาร  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ในหัวข้อการศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์ และเทอร์โมไดนามิกส์ของการสลายตัวของสารตัวนี้ โดยสารตัวนี้ กลุ่มงานวิจัยเราได้ตีพิมพ์เกี่ยวกับการสังเคราะห์สารตัวนี้ 2 เรื่องด้วยกันในวารสาร J. Alloys. Compd. (2008) และ Mater. Chem. Phys. (2008) ผู้ทำวิจัยเล็งเห็นว่า องค์ความรู้ทางด้านนี้ เป็นองค์ความรู้ใหม่ที่สามารถส่งผลงานตีพิมพ์ได้ในระดับนานาชาติ แม้สารจะเป็นสารที่มีอยู่เดิมแต่ยังไม่ได้ศึกษาทางด้านนี้และสารตัวใหม่ที่ถูกเตรียมขึ้นก็สามารถแยกเนื้อหาส่งแยกตีพิมพ์ผลงานเฉพาะเจาะจงให้เหมาะสมกับวารสารได้ดังตัวอย่างข้างบน อีกทั้งยังทำให้ได้ข้อมูลที่มีความสำคัญต่อพื้นฐานทางเคมี และสร้างนักวิจัยของไทยเพื่อแข่งขันกับนักวิจัยด้านเดียวกันกับนานาชาติ ได้ยิ่งโดยเฉพาะกลุ่มงานวิจัยของเราเป็นกลุ่มแรกๆ ที่มีการศึกษาเรื่องนี้ อีกทั้งเมื่อพิจารณาเกี่ยวกับนานาชาติผลงานของเราเองก็เริ่มต้นในเวลาที่ไม่ได้ห่างไกลกับต่างประเทศมากนัก ดังนั้นผู้ทำวิจัยคิดว่าจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการสนับสนุนงานวิจัยเรื่องนี้ที่จะมีการศึกษาทั้ง ด้านการสังเคราะห์สาร จลนพลศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์ของการสลายตัวทางความร้อนตามที่กล่าวมาก่อนหน้าเป็นอย่างยิ่ง

### 1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย (Objectives of the Research)

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการเตรียมสารใหม่ในกลุ่มโลหะสองชนิด ไตไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรต  $\text{M}_{0.5}\text{A}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (เมื่อ M และ A = Ca, Mn, Fe, Cu, Co, Ni, หรือ Zn) และศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนจากการสลายตัวจนได้สารกลุ่มใหม่อีกชนิดหนึ่ง คือสารกลุ่มโลหะผสมไฮโคเลเตตระฟอสเฟต  $\text{MnAP}_4\text{O}_{12}$  โดยสารทั้งสองกลุ่มนี้มีการรายงานถึงประโยชน์ในการนำไปใช้หลาย ๆ ด้าน โดยปัจจัยหลักที่ผลต่อการนำไปใช้งาน ได้แก่ ลักษณะสีปรากฏ ขนาดอนุภาคเล็กสม่ำเสมอ ขนาดรูพรุน สมบัติทางความร้อน สมบัติทางแสงและสมบัติทางความเป็นแม่เหล็ก เป็นต้น ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงแบ่งวัตถุประสงค์ออกเป็น 3 ข้อ คือ

1. สังเคราะห์สารโลหะสองชนิด ไตไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรต  $\text{M}_{0.5}\text{A}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (เมื่อ M และ A = Ca, Mn, Fe, Cu, Co, Ni, หรือ Zn) ด้วยการตกตะกอนร่วมที่มีความสะดวกรวดเร็ว ประหยัดเวลา ค่าใช้จ่าย และไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสภาพแวดล้อม จากนั้นนำสารในกลุ่มโลหะสองชนิด ไตไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรตไปเผาที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง จะได้ โลหะผสมไฮโคเลเตตระฟอสเฟส  $\text{MAP}_4\text{O}_{12}$  (เมื่อ M และ A = Ca, Mn, Fe, Cu, Co, Ni, หรือ Zn) ที่ใช้เป็นสื่เคลือบเซรามิค
2. ตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray powder diffraction (XRD), Fourier transform

Infrared (FT-IR), Scanning electron microscope (SEM), Thermogravimetry analysis (TG/DTG/DTA), UV-Vis near IR และ VSM

### 3. ศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนแบบจลนพลศาสตร์นอนไอโซเทอร์มอล

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย (The Scope of the Research)

1.4.1 เพื่อพัฒนาหลักการสังเคราะห์สาร  $M_{0.5}A_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$  3 ตัว และอนุพันธ์ทางความร้อน  $MAP_4O_{12}$  อีก 3 ตัว อันเกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของสารตั้งต้นไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรต

1.4.2 เพื่อตรวจสอบเอกลักษณ์ทางโครงสร้าง แลตติสพารามิเตอร์ ขนาดผลึกและตรวจสอบรูปแบบการสั่นพื้นฐานของหน่วยโครงย่อยภายในโครงสร้างโมเลกุลของสารที่เตรียมได้ทั้ง 6 ตัว

1.4.3 เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของไฮเดรต และตรวจสอบสัญญาณวิทยาของสารที่เตรียมขึ้นได้ทั้งหมด

1.4.4 เพื่อความเข้าใจเกี่ยวกับศาสตร์ทั้งจลนพลศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์การสลายตัวทางความร้อนของสาร  $M_{0.5}A_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$  ไปเป็น สารกลุ่ม  $MAP_4O_{12}$  เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการใช้เตรียมสารผลิตภัณฑ์สุดท้ายของอนุพันธ์ทางความร้อนของตั้งต้น

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ (The Anticipated Outcomes)

จากงานวิจัยนี้เมื่อเสร็จสมบูรณ์ คาดว่าจะได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1.5.1 ได้ความรู้ความเข้าใจสำหรับการเตรียมสารแบบใหม่ ที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว และไม่เป็นอันตรายขณะเตรียม พร้อมกันนั้นยังได้สารใหม่และเก่าเกิดขึ้นมาอีก 6 ตัว และยังได้ข้อมูลทางด้านกายภาพและทางเคมีของสารทั้งหมดที่เตรียมขึ้นได้

1.5.2 ได้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการการสลายตัวทางความร้อนจากสารกลุ่มหนึ่งไปเป็นสารอีกกลุ่มโดยอาศัยศาสตร์ทางจลนพลศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ต่อการนำเอาผลิตภัณฑ์อนุพันธ์ทางความร้อนไปใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมในอนาคต

1.5.3 ได้เผยแพร่ผลงานตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ 10 เรื่อง และได้เผยแพร่ผลงานของสารที่เกี่ยวข้องในระบบที่ศึกษาไม่ต่ำกว่า 11 เรื่อง ได้รับเชิญเป็นวิทยากรบรรยายงานทางวิชาการและเป็นผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิจัยในระดับนานาชาติ ไม่ต่ำกว่า 10 ครั้ง และได้รับรางวัลนักวิทยาศาสตร์รุ่นใหม่ ปี 2553 จากมูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์

จากข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ ในอนาคตน่าจะมีส่วนที่จะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการเลือกใช้สารที่ศึกษานี้ เพื่อใช้ในกระบวนการทั้งระดับภาคการศึกษาและระดับอุตสาหกรรม โดยอาจนำไปใช้ในด้านต่าง ๆ อาทิเช่น alloys, cements, ceramics, glasses, enamels, glazes, polymer and composite materials.

## บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี (Methodology and Theory)

### 2.1 หลักการสังเคราะห์ (Synthesis method)

สารโลหะฟอสเฟตมีแหล่งที่มาสำคัญ 2 แหล่ง คือ เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เรียกว่า แร่ฟอสเฟต และเกิดขึ้นจากฝีมือมนุษย์ด้วยการสังเคราะห์ขึ้น โดยหน่วยย่อยของฟอสเฟตที่มักพบ คือ  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$  และ  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  เป็นต้น สำหรับสารแร่ฟอสเฟตที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ จะเกิดผ่านกลไกที่เรียกว่า “กระบวนการเฟอร์โรไลซิส(Ferrolysis process)” โดยเกิดผ่านปฏิกิริยารีดักชันด้วยสภาวะความเป็นกรด เบส ระยะเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสม ส่วนใหญ่เกิดตะกอนโลหะฟอสเฟตที่มีความสามารถละลายน้ำได้น้อยมาก เช่น  $\text{MnPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MnHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  และ/หรือ  $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  โดยจะเกิดจากการตกตะกอนระหว่างปฏิกิริยาฟอสเฟตที่มาจากปฏิกิริยาของเกษตรกรและแร่ธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบภายในดินเองที่สภาวะที่เป็นกรดหรือเบสที่เหมาะสม เมื่อเกิดตะกอนแล้วทำให้ดินแข็ง เกิดภาวะเสื่อมโทรม ส่งผลให้พืชไม่สามารถดูดซับธาตุอาหารดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ได้

สำหรับสารโลหะฟอสเฟตที่เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้นจากฝีมือมนุษย์นั้น มีทั้งการเตรียมสารที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติหรือเตรียมสารโลหะฟอสเฟตชนิดใหม่ๆ ขึ้นมาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทั้งภาคการศึกษาและระดับภาคอุตสาหกรรม โดยเทคนิคการเตรียมสารโลหะฟอสเฟตนั้นมีหลายเทคนิค อาทิ เช่น หลักการเตรียมแบบไฮโดรเทอร์มอล(hydrothermal method) หลักการเตรียมแบบสภาวะของแข็ง(solid state method) หลักการเตรียมแบบโซล-เจล(sol-gel method) หลักการเตรียมด้วยตัวกลาง(media method) หลักการเตรียมไมโครเวฟ(microwave) หลักการเตรียมแบบสภาวะอุณหภูมิสูง(high thermal method) หลักการเตรียมแบบการตกตะกอน(precipitation method) และ หลักการเตรียมแบบการตกตะกอนร่วม (co-precipitation method) จากหลักการเตรียมที่ต่างกันนั้น พบว่าก่อให้เกิดสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของสารที่ต้องการตัวหนึ่งๆ นั้นมีความแตกต่างกัน และยังพบว่าสภาวะตัวแปรการเตรียม เช่น อุณหภูมิ เวลา ความเป็นกรดและเบสและสารตั้งต้น จะแตกต่างกันขึ้นกับเทคนิคของการเตรียม

การเตรียมแบบไฮโดรเทอร์มอล(hydrothermal method) มีหลักการง่ายๆ คือ การผสมสารตั้งต้นที่ประกอบไปด้วยสารโลหะ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารในกลุ่มโลหะออกไซด์(metal oxide) สารแหล่งของฟอสฟอรัส ได้แก่  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  และ  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  และสารสุดท้ายคือน้ำ โดยผสมตามสัดส่วนโมลของสาร ขึ้นอยู่กับสารโลหะฟอสเฟตที่ต้องการ จากนั้นบรรจุในอุปกรณ์ ปิดสนิท นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิสูงค่าที่เหมาะสม พร้อมกำหนดระยะเวลา

การเตรียมแบบใช้สภาวะตัวกลาง(media synthetic method) ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้สารตั้งต้นผสมกันในตัวกลางที่ไม่ใช่ น้ำ อาจเป็นแอลกอฮอล์ สารโพลีเมอร์หรือสารโปรตีน เป็นต้น เมื่อผสมแล้วอาจทำให้เกิดตะกอน อาจใช้สภาวะอุณหภูมิ หรือ สภาพกรดหรือเบส ก็จะได้สารโลหะฟอสเฟตที่ต้องการ

การเตรียมแบบตกตะกอน(precipitation) กระบวนการง่าย ๆ คือเตรียมสารตั้งต้นให้เป็นสารละลายความเข้มข้นตามที่ต้องการ จากนั้นหาสารที่ทำให้เกิดตะกอน ส่วนใหญ่ สารโลหะฟอสเฟตจะตกตะกอนในสภาพความเป็นกรดหรือเบสต่างกัน ดังนั้นตัวทำให้เกิดตะกอนจึงมัก เป็นสารที่เป็นกรดแก่หรือเบสแก่ เช่นการเตรียม  $\text{MnHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ จากระบบสารตั้งต้น 0.1 M  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ +0.1 M  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ที่ pH =7ด้วย 0.1 M NaOH

หลักการเตรียมแบบการตกตะกอนร่วม (co-precipitation method) สำหรับงานวิจัยนี้ ความพยายามนำสารโลหะมากกว่าสองชนิด เข้าไปอยู่ในตำแหน่งแลตติสภายในโครงสร้างสารโลหะฟอสเฟต ทำให้เกิดสารประกอบตัวใหม่ที่เรียกว่า ทวิโลหะฟอสเฟต(binary metal phosphates) หลักการเหมือนกับการตกตะกอนแบบธรรมดา คือเตรียมสารละลายโลหะสองชนิด แล้วนำไปผสมกับแหล่งฟอสฟอรัส แล้วปรับความเป็นกรดหรือเบสให้เหมาะสม เพื่อให้เกิดตะกอนขึ้น ตัวอย่างเช่นการเตรียม  $\text{Mn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  จากระบบสารตั้งต้น 0.1M  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  + 0.1M  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  + 0.1M  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ที่ pH =7 ด้วย 0.1M NaOH โดยสัดส่วน x เปลี่ยนแปลงตามสูตรสารทวิโลหะฟอสเฟตตามที่ต้องการ

สำหรับงานวิจัยนี้ เลือกใช้เทคนิคการเตรียมแบบการตกตะกอนร่วมในปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous co-precipitation) โดยได้ประยุกต์ใช้สารตัวกลางสำหรับการตกตะกอน ซึ่งเลือกใช้สารที่เป็นมิตรและช่วยลดกลไกปฏิกิริยาที่รุนแรงในระหว่างการเตรียม คือใช้อะซิโตนหรือแอลกอฮอล์ ร่วมกับน้ำส่วนสารตั้งต้นของโลหะก็เลือกใช้สารโลหะแหล่งต่างกัน คือโลหะซัลเฟต โลหะออกไซด์ โลหะคาร์บอเนต โลหะไนเตรท โลหะแอสไนด์ โลหะอะซิเตรท หรืออื่นๆ แล้วนำมาผสมกับตัวกลางแล้วค่อยเติมสารที่เป็นแหล่งฟอสเฟต แล้วปล่อยให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้น จะสังเกตมีตะกอนตามสีของโลหะที่ต้องการ แล้วค่อยนำไปแยกตะกอนและของเหลวออกจากกัน สำหรับตัวอย่างปฏิกิริยา คือ

Acetone, room temp.



จากปฏิกิริยาเคมีข้างต้น ความสัมพันธ์เรื่องปริมาณสารสัมพันธ์จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ เพื่อใช้ในการคำนวณหา ปริมาณสารตั้งต้นที่ต้องใช้ในการเตรียมสารผลิตภัณฑ์ และคำนวณหาร้อยละผลผลิตที่ได้จากการเตรียมทุกครั้งและเมื่อเตรียมสารที่เป็นระบบทวิโลหะฟอสเฟตเรียบร้อยแล้ว ต้องนำมาตรวจสอบหาองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ภายในสูตร โดยหากเป็นธาตุโลหะจะใช้เทคนิคการตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะด้วยเทคนิคการดูดซับโลหะด้วย Atomic absorption spectrophotometer และตรวจวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัส ด้วยเทคนิคการตรวจสอบสีของหลักการฟอสฟอตอมลิเบต ด้วยเครื่อง UV spectrophotometer ส่วนการวิเคราะห์หาปริมาณจำนวนโมลของน้ำภายในโครงสร้าง ตรวจด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เชิงความร้อน

## 2.2 เอกลักษณะของสารและเทคนิคการตรวจสอบ(Characteristic materials and Identification method)

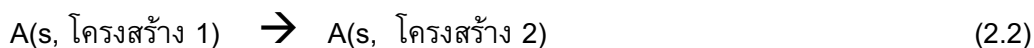
### 2.2.1 หลักการวิเคราะห์เชิงความร้อนและพฤติกรรมทางความร้อนของสาร

การวิเคราะห์เชิงความร้อนเป็นกลุ่มเทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเพื่อติดตามพฤติกรรมของตัวอย่างเมื่อเวลาหรืออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ด้วยการควบคุมจากโปรแกรมอุณหภูมิ โปรแกรมอุณหภูมิอาจเกี่ยวกับการทำให้ร้อนขึ้นหรือการทำให้เย็นลงในอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิคงที่หรือเรียกว่า "อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคงที่"

การวิเคราะห์เชิงความร้อนของตัวอย่างปกติแล้ว ตัวอย่างจะอยู่ในสถานะ ของแข็ง ลักษณะเอกลักษณะหลักของสารสถานะของแข็งคือ การจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของอะตอม โมเลกุล หรือไอออนต่างๆ ภายในโครงสร้าง เมื่อตัวอย่างของแข็งได้รับความร้อนในสภาพบรรยากาศเฉื่อยต่อปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ในระดับโมเลกุล อะตอม หรือ ไอออนเพิ่มขึ้น นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก sintering การหลอมเหลว หรือการทำให้บริสุทธิ์ ของแข็งบางชนิดอาจสลายตัวเกิดเป็นโมเลกุลย่อย กลายเป็นของแข็งชนิดใหม่ เกิดจากบางส่วนที่ระเหยกกลายเป็นไอ ออกไปที่อุณหภูมิเหมาะสมหนึ่งๆ สารบางชนิดอาจมีการสลายตัวจากการระเหยกกลายเป็นไอขององค์ประกอบได้หลายส่วนย่อย ทำให้เกิดโมเลกุลย่อยชนิดใหม่หลายตัว สำหรับของแข็งสมบูรณ์แบบที่ 0 K องค์ประกอบย่อยคือ อะตอม โมเลกุล หรือไอออน มีแรงยึดเหนี่ยวอย่างเป็นระเบียบในสามมิติที่สมบูรณ์แบบด้วยอันตรกิริยาทางพันธะเคมี เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ ก่อให้เกิดพลังงานความร้อนส่งผลให้เพิ่มการสั่น และการหมุนขององค์ประกอบย่อยโครงสร้าง โดยการเคลื่อนที่เหล่านี้ เป็นการเคลื่อนที่แบบสุ่ม และจะขึ้นอยู่กับชนิดขององค์ประกอบนั้น ๆ

เมื่อของแข็งชนิดหนึ่งได้รับความร้อน แอมพลิจูดการสั่นขององค์ประกอบในตำแหน่งแลตติสจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่อาจจะเกิดขึ้น คือ

1. การเปลี่ยนแปลงวิภาค(Phase transition) เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ขององค์ประกอบ กลายเป็นสารที่มีความเสถียรมากกว่าสารเริ่มต้น



กระบวนการเกิดได้ทั้งดูดและคายความร้อน โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร

2. การหลอมเหลว(Melting) เมื่อสารได้รับความร้อนที่มากพอ แรงดึงดูดภายในโครงสร้างจะไม่เพียงพอที่จะรักษาสภาพของแข็งไว้ ทำให้ของแข็งสูญเสียความเป็นระเบียบกลายเป็นของเหลวของแข็งบางชนิดอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของแข็งไปเป็นของเหลวหลายขั้นตอน สารอินเตอร์มีเดียตที่เกิดขึ้น เรียกว่า ของแข็งกึ่งเหลว(liquid crystals)



เกิดกระบวนการแบบดูดร้อน โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร

3. การระเหย(sublimation) เมื่อพลังงานจลน์ขององค์ประกอบย่อยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยตรงต่อความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้าง ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแข็งกลายเป็นแก๊ส โดยปราศจากอินเตอร์มีเดียตในสถานะของเหลว



เกิดกระบวนการแบบดูดร้อน และมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเกิดขึ้น

4. การสลายตัวทางความร้อน(Thermal decomposition) เมื่อแรงยึดเหนี่ยวพันธะของโมเลกุลหรือไอออนที่เป็นองค์ประกอบย่อยอ่อนนุ่มกว่าแรงยึดเหนี่ยวอะตอม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้เกิดการจัดเรียงพันธะขึ้นใหม่และเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ต่างจากสารตั้งต้น ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า การสลายตัวทางความร้อน หรือ crytolysis



กระบวนการเกิดได้ทั้งดูดและคายความร้อนโดยมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารที่ระเหยออกไปเป็นไอ

### เทคนิคการวิเคราะห์เชิงความร้อนหลัก

1. การวิเคราะห์เทอร์โมแกรวิเมทรี (Thermogravimetry analysis) เป็นเทคนิคที่พิจารณากระบวนการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตั้งต้นที่เป็นฟังก์ชันของเวลา อุณหภูมิและสภาวะแวดล้อมอื่นๆ ที่สร้างขึ้นจากเครื่องมือ โดยเมื่อให้ความร้อนแก่สาร ในสภาวะของแก๊สที่เหมาะสม ณ เวลาผ่านไป สารของแข็งจะได้รับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการสั่น หรือการหมุนขององค์ประกอบย่อยภายในโครงสร้างเริ่มต้น จนกระทั่งทำให้แรงยึดเหนี่ยวพันธะเกิดสภาวะเครียด แล้วไม่เสถียร ทำให้เกิดการจัดเรียงทางโครงสร้างใหม่ จึงทำให้มีองค์ประกอบย่อยโมเลกุล หรือไอออน บางส่วน ระเหย หรือสลายออกไป ทำให้เกิดการสูญหายของมวลเกิดขึ้น โดยมวลที่หลงเหลืออยู่จะเป็นสารใหม่ที่มีความเสถียรมากกว่าสารตั้งต้น และในส่วนมวลของสารที่หายไป จะเท่ากับจำนวนโมลของโมเลกุลหรือไอออนที่หลุดออกไป หากนำมาคำนวณตามหลักปริมาณสารสัมพันธ์ของ “กฎทรงมวล” ก็จะสามารถระบุชนิดสารที่หลงเหลือและโมเลกุลหรือไอออนที่หลุดออกไปได้

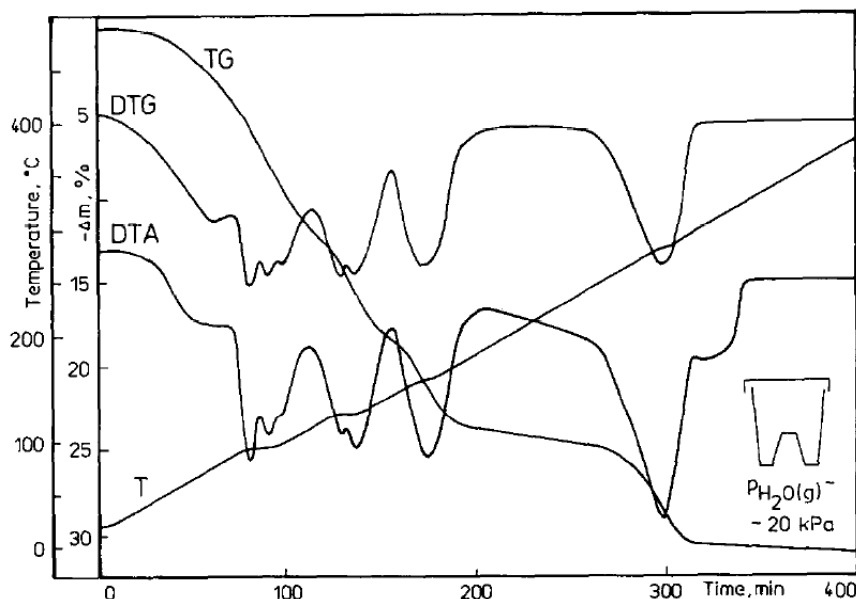
2. เตรีเวทีฟเทอร์โมกราวิเมทรี(Derivative Thermogravimetry, DTG) เป็นการวัดอัตราเร็ว (Rate) ของการสูญเสียมวล(Mass loss,  $dm/dt$ ) เทียบกับอุณหภูมิ T โดยเทคนิคนี้ เป็นการนำเอาข้อมูล TG มาทำการ ดิฟ (dif.) ดังนั้นเทอร์โมแกรมของ DTG จะเกิดพีคที่สอดคล้องกับเส้นกราฟของ TG โดยตำแหน่งพีค DTG จะตรงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางการสูญเสียมวลของเส้นกราฟ TG หากเทอร์โมแกรม TG แสดงการสูญเสียมวลหลายขั้นตอน เส้นกราฟเทอร์โมแกรม DTG ก็ sẽแสดงพีคหลายพีค สอดคล้องกับเส้นกราฟเทอร์โมแกรม TG หรือแม้ TG แสดงการสูญเสียมวลเพียงขั้นตอนเดียว แต่พีค DTG มีหลายพีค นั้นแสดงว่า ลักษณะการสลายตัวทางความร้อนของสารนั้น เกิดจากการหลุดออกของโมเลกุลหรือไอออน ที่แตกต่างกัน หรืออาจจะเหมือนกันแต่อยู่ในตำแหน่งที่มีสิ่งแวดล้อมโครงสร้างต่างกัน ทำให้มีพลังงานยึดเหนี่ยวทางโครงสร้างแข็งแรงหรืออ่อนนุ่มต่างกัน เมื่อได้รับพลังงานความร้อนจึงทำให้เกิดการหลุดหรือสลายตัวออกไปที่สภาวะอุณหภูมิต่างกัน

3. ดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์มัลอะนาลิซิส(Differential Thermal Analysis, DTA) เป็นเทคนิคที่วิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของตัวอย่างกับสารอ้างอิง โดยวัดได้จากโปรแกรมอุณหภูมิ เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจะเกี่ยวข้องกับความร้อนที่ดูดเข้าไปหรือคายออกมาจากสารตัวอย่าง เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยขึ้นอยู่กับสารตัวอย่างที่นำมาให้ความร้อนด้วย

อัตราสม่ำเสมอ โดยเทอร์โมแกรม DTA จะเกิดได้ทั้งพีคที่เป็นกระบวนการดูด(endothermic) หรือคายความร้อน(exothermic) ซึ่งพื้นที่ใต้พีคจะเกี่ยวข้องกับค่าพลังงานการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี( $\Delta H$ ) ของแต่ละขั้นตอนที่เกิดขึ้น ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพซึ่งเป็นกระบวนการดูดความร้อน ได้แก่ การหลอมเหลว การระเหย การระเหิด เป็นต้น การเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ อาจเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนหรือปฏิกิริยาดูดความร้อนจะขึ้นกับชนิดของปฏิกิริยา

4. ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคาลอริเมทรี(Differential Scanning Calorimetry, DSC) เป็นเทคนิคที่วิเคราะห์ที่ควบคุมให้อุณหภูมิของสารตัวอย่างและสารอ้างอิงเท่ากัน โดยการติดตามอัตราการไหลของความร้อนระหว่างสารตัวอย่างกับสารอ้างอิง ที่ทำให้อุณหภูมิแตกต่างกันขึ้น เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจะคล้ายกันกับผลที่ได้จากเทคนิค DTA คือ กระบวนการที่สารตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงจะสามารถระบุ ด้วย เทอร์โมแกรม DSC ที่เกิดได้ทั้งพีคที่เป็นกระบวนการดูด(endothermic) หรือคายความร้อน(exothermic) และพื้นที่ใต้พีคจะเกี่ยวข้องกับค่าพลังงานการเปลี่ยนแปลง เอนทาลปี( $\Delta H$ ) ของแต่ละขั้นตอนที่เกิดขึ้น

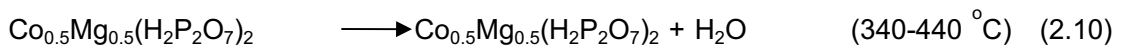
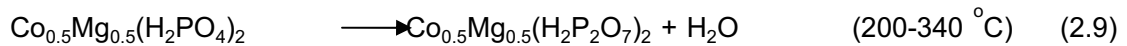
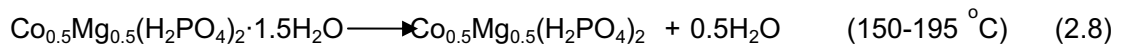
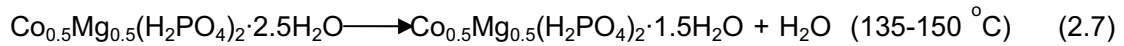
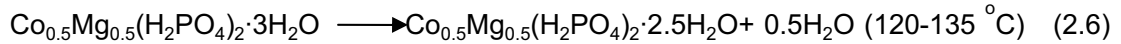
สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสารในกลุ่มทวิโลหะไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรต มีสูตรทั่วไปคือ  $M_{0.5}A_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$  (เมื่อ M หรือ A = Mg, Ca, Mn, Fe, Co, Cu, Ni หรือ Zn;  $0 < n < 1$ ) การศึกษาการวิเคราะห์เชิงความร้อนของสารในกลุ่มนี้ มีกลุ่มวิจัยต่างๆ ให้ความสนใจ ดังนี้



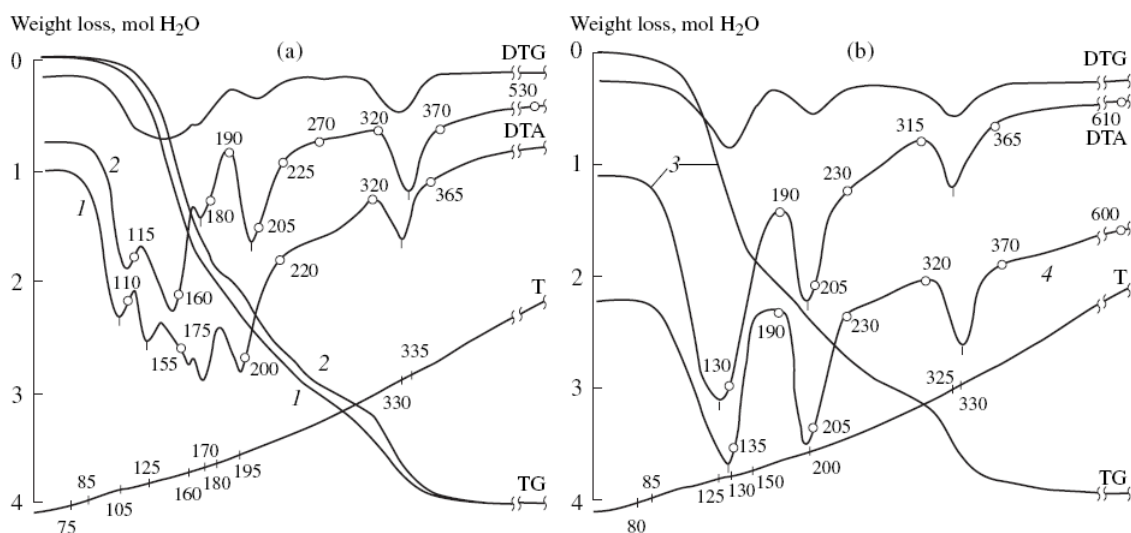
รูปที่ 2.1 เทอร์โมแกรม TG/DTG/DTA ของสาร  $Co_{0.5}Mg_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 3H_2O$  ในอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $1^\circ C \text{ min}^{-1}$  ของสภาวะบรรยากาศ (Trojan & Bradová)

กลุ่มวิจัย Trojan และคณะ(1990) ได้มีการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยหลักการTG/DTG/DTA อาทิเช่นสาร  $Mn_{0.5}Ca_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ ,  $Co_{0.5}Mg_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 3H_2O$ ,  $Co_{0.5}Ca_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ ,  $Cu_{0.5}Mg_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ ,  $Zn_{0.5}Mg_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ ,  $Zn_{0.5}Ca_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ , และ  $Mn_{0.5}Mg_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 4H_2O$  โดยตัวอย่างเทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.1 เป็นเทอร์โมแกรม TG/DTG/DTA ของสาร

$\text{Co}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ในอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $1^\circ\text{C min}^{-1}$  ของสภาวะบรรยากาศ จากรูปที่ 2.1 Trojan และคณะ ได้สรุปกลไกการสลายตัวทางความร้อนของสารดังกล่าวนี้ เป็น 5 กลไกย่อย สอดคล้องกับกับจำนวนพีคของ DTG และ DTA ในขณะมวลที่หายไปสอดคล้องกับจำนวนโมลของน้ำที่หลุดออกในแต่ละกลไก ปฏิกริยาทั้งห้าแสดงดังด้านล่าง

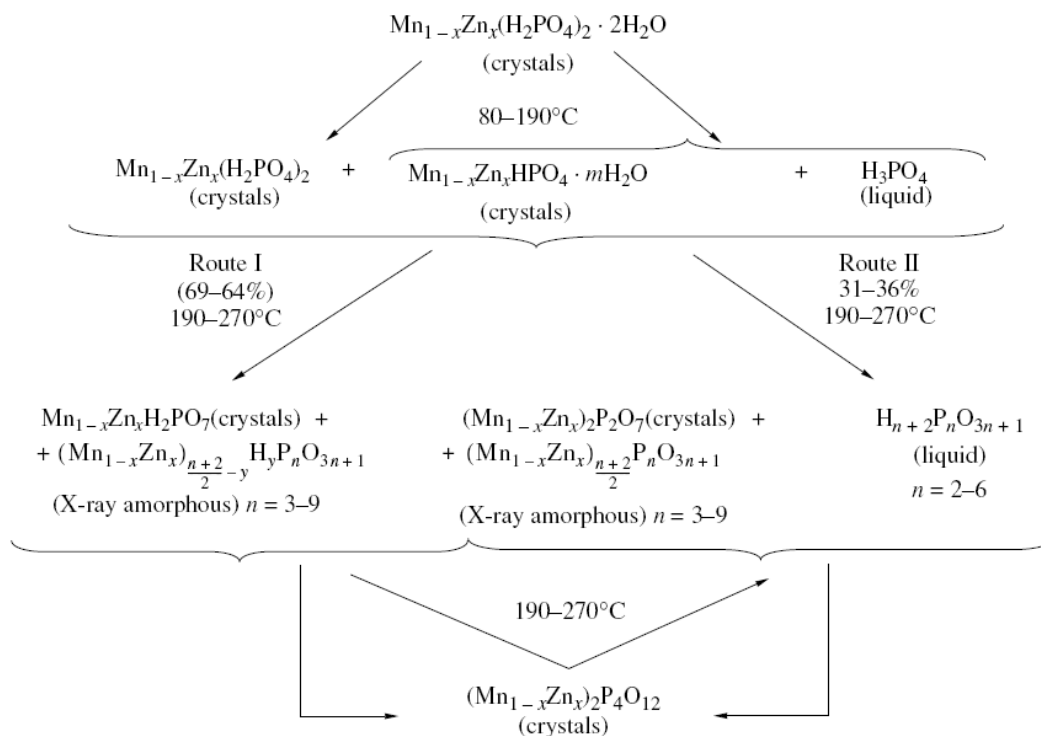


กลุ่มวิจัย Antraptseva และคณะ(2007) ได้อธิบายการสลายตัวทางความร้อนของสารทวิโลหะของ  $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  เมื่อ  $x = 0.25, 0.50$  และ  $0.75$  ตัวอย่างเทอร์โมแกรมของสารกล่าว แสดงไว้ในรูปที่ 2.2



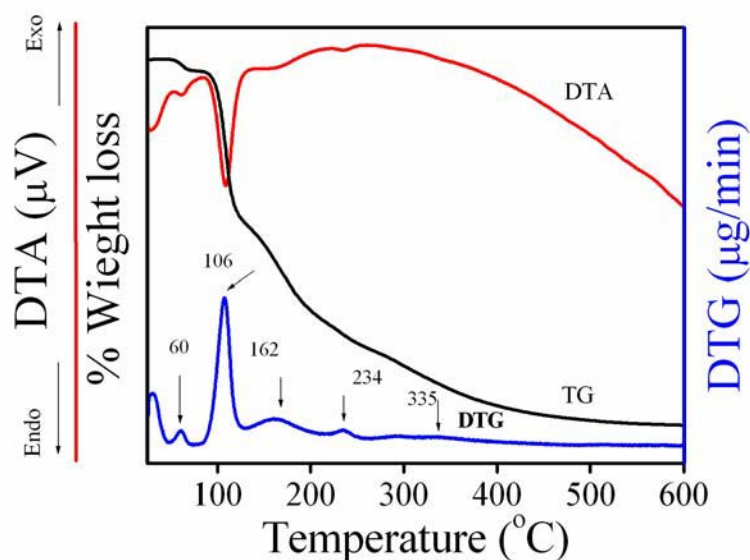
รูปที่ 2.2 เทอร์โมแกรม TG/DTG/DTA ของสาร  $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  เมื่อ  $x = 0.25(1), 0.50(2)$  และ  $0.75(3)$  บันทึกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $2.5^\circ\text{C min}^{-1}$  (Antraptseva และคณะ, 2007)

จากรูปที่ 2.2 กลุ่มวิจัยนี้ได้สรุปกลไกย่อยของการสลายตัวทางความร้อนของสารที่ศึกษาไว้ได้ ดังนี้ แผนภาพรูปที่ 2.3



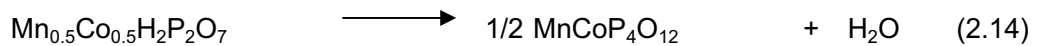
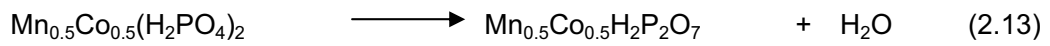
**รูปที่ 2.3** แผนภาพกลไกการสลายตัวทางความร้อนของสาร  $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  เมื่อ  $x = 0.25$ , 0.50 และ 0.75 สอดคล้องกับรูปที่ 2.2 (Antraptseva และคณะ, 2007)

สุดท้าย กลุ่มวิจัย Boonchom และคณะ(2008-ปัจจุบัน) ได้วิเคราะห์ทางความร้อนของสารทวิโลหะกลุ่มนี้บางตัวได้แก่  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Mn}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  เทอร์โมแกรมของสารทั้งสามตัวดังแสดงในรูปที่ 2.4

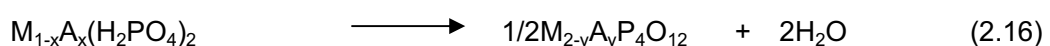
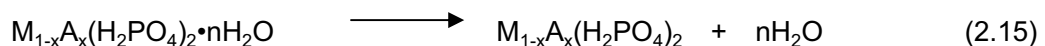


**รูปที่ 2.4** เทอร์โมแกรม TG/DTG/DTA ของสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  บันทึกในอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $10^\circ\text{C min}^{-1}$  ในสภาพบรรยากาศ (Boonchom และคณะ, 2008)

จากรูปที่ 2.4 กลุ่มวิจัย Boonchom และคณะ (2008-ปัจจุบัน) สรุปกลไกการสลายตัวทางความร้อนได้ของสารนี้ได้ 5 กลไก ดังปฏิกิริยาข้างล่าง



จากงานวิจัยที่ผ่านมา ที่ได้มีการศึกษาวิเคราะห์ทางความร้อน เพื่อระบุกลไกปฏิกิริยาการสลายตัว และจำนวนโมลของน้ำที่สูญหาย ทำให้ทราบจำนวนโมลน้ำในโครงผลึกของสาร และทราบอนุพันธ์ทางความร้อนของสารในกลุ่มนี้ว่า เป็นสารอีกกลุ่มคือ โลหะไฮดรอกไซด์เตตระฟอสเฟต( $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$ ) โดยสามารถสรุปกลไกการสลายตัวทางความร้อนทั่วไป คือ ปฏิกิริยาการสูญเสียน้ำในผลึก(dehydration reaction) จำนวน  $n$  โมล เมื่อ  $n$  คือ จำนวนโมลของน้ำ และปฏิกิริยาการสูญเสียน้ำจำนวน 2 โมล เนื่องจากการสลายตัวของไฮดรอกไซด์ไฮโดรเจนฟอสเฟต (deprotonated hydrogenphosphate reaction) แล้วเกิดการควบรวมกันของฟอสเฟต (polycondensation) ทั้ง 2 ปฏิกิริยาเขียนเป็นสมการการสลายตัวทางความร้อนโดยทั่วไป ดังสมการด้านล่าง



เมื่อ  $M$  และ  $A$  คือ  $\text{Mg}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Cd}$ ;  $0 < n < 4$ ,  $0 < x < 1$ ,  $0 < y < 2$

สำหรับสารในกลุ่ม  $\text{M}_{1-x}\text{A}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  นี้จะมีสมบัติทางความร้อน คือ กลไกการสลายตัวทางความร้อน รูปแบบการสลายตัว ที่อาจมีหลายกลไกที่ซับซ้อนหรือมีกลไกเดียว ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมเฉพาะของสารโลหะนั้น แต่ถึงแม้จะเป็นสารโลหะชนิดเดียวกัน แต่ถ้าหากเตรียมหรือได้มาด้วยกระบวนการต่างกัน ก็ส่งผลต่อพฤติกรรมทางความร้อนให้มีรูปแบบกลไกต่างกันไปด้วยเช่นกัน (Boonchom และคณะ, 2006, 2007)

## 2.2.2 หลักการวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะโครงสร้างของสาร

เทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างของสาร คือ เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เรย์ โดยรังสีเอกซ์ (X-rays) เป็นสเปกตรัมของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงหนึ่ง มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง  $0.1-100 \text{ \AA}$  หรือ  $0.01-10 \text{ nm}$  แต่ที่ใช้ในทางเคมีวิเคราะห์จะอยู่ในช่วง  $0.07-0.2 \text{ nm}$  โดยเกิดการเกิดอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสารนั้นก่อให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น เกิดการเปล่งแสงบางชนิด(Emission) การดูดกลืน(Absorption) การกระเจิง(Scattering) หรือเกิดการเลี้ยวเบน(Diffraction) เป็นต้น

ปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นลักษณะเฉพาะ(Characteristic) ของแต่ละสารที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้ดังนี้คือ

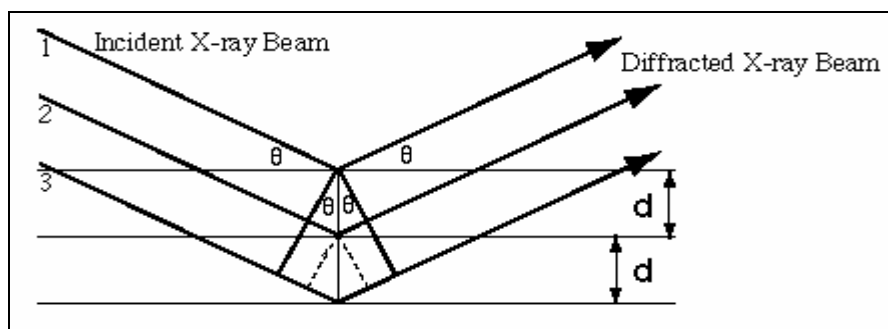
1. ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในสาร(Elemental analysis) ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative)

2. ใช้ศึกษาหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์(Electronic structure) ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดพันธะเคมี(Chemical bonding)

3. ใช้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก(Crystal structure)หรือโมเลกุลของสารด้วยการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์(X-Ray Diffraction)

#### เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction)

รังสีเอ็กซ์เกิดขึ้นได้จากการระดมยิง(Bombard) วัตถุ เช่น โลหะหรือสารประกอบ เป็นต้น ด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เช่น ลำอิเล็กตรอน โปรตอน หรือ โฟตอน (รังสีเอ็กซ์ หรือรังสีแกมมา) อิเล็กตรอนของอะตอมที่ประกอบอยู่ในวัตถุนั้น เมื่อถูกระดมยิง ทำให้อิเล็กตรอนในเชลล์(shell) ในหลุดออกมา เมื่อเกิดที่ว่างขึ้นอิเล็กตรอนจากเชลล์นอกซึ่งมีพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ การตกกระทบของรังสีเอ็กซ์ที่ผิวหน้าของผลึกทำมุม  $\theta$  กับผิวหน้าผลึก และรังสีเอ็กซ์ส่วนที่เหลือเกิดการทะลุทะลวงต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.5



**รูปที่ 2.5** การเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ผิวหน้าของผลึก

การเลือกใช้วิธีการเก็บข้อมูลการเลี้ยวเบนขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อได้เปรียบเสียเปรียบ รวมทั้งความเหมาะสมกับลักษณะงานที่แตกต่างกันออกไป โดยจะแบ่งออกเป็น 2 เทคนิคตามลักษณะของสาร ดังนี้

#### 1. เทคนิคการเลี้ยวเบนสำหรับผลึกเดี่ยว(Single Crystal X-Ray Diffraction Technique)

ผลึกที่ใช้ในการศึกษาโดยเทคนิคนี้ต้องเป็นผลึกเดี่ยว ซึ่งหมายถึง ของแข็งที่ภายในมีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบและมีรูปแบบการจัดเรียงตัวแบบเดียวกันเท่านั้น ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาโดยวิธีนี้จะนำไปใช้หาโครงสร้าง

#### 2. เทคนิคการเลี้ยวเบนสำหรับผง(X-Ray Powder Diffraction Technique)

เป็นเทคนิคในการศึกษาผลึกที่ไม่สามารถเลี้ยวเบนให้เป็นผลึกเดี่ยวที่มีขนาดเหมาะสมกับการเก็บข้อมูลด้วยเทคนิคสำหรับผลึกเดี่ยวได้ แม้ว่าสารที่กำลังศึกษาอยู่สามารถตกผลึกเดี่ยวได้ แต่ถ้าต้องการข้อมูลที่เพียงแสดงเอกลักษณ์(Identification) ของสารเท่านั้นสามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ เพราะเป็นเทคนิคที่ทำ

ได้ง่าย สะดวกและรวดเร็ว และเทคนิคนี้ยังมีประโยชน์ในการหาข้อมูลเบื้องต้น เช่น ขนาด รูปร่างของหน่วยเซลล์ และสมมาตร เป็นต้น เพื่อเป็นข้อมูลเสริมร่วมกับวิธีการอื่นๆ นำไปสู่ข้อมูลที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น เทคนิคการเลี้ยวเบนสำหรับผงมีวิธีการบันทึกข้อมูลที่แตกต่างกัน 2 แบบคือ

### 2.1 Debye-Scherrer powder camera

เป็นกล้องสำหรับบันทึกแพทเทิร์นการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ของสารในรูปของตัวอย่างที่เป็นผลึกที่มีรูปร่างเป็นสมมาตรสูงๆ (polycrystalline sample) หรือตัวอย่างที่เป็นผง (powder sample) โดยรัศมีของกล้องมีค่าที่แน่นอนเท่ากับ 57.4 มิลลิเมตร และมุมที่รังสีเอ็กซ์กระทำกับจุดศูนย์กลางของกล้อง เท่ากับ  $2\theta$  การสะท้อนของระนาบหนึ่งๆ จะเกิดขึ้นได้ ภายใต้สภาวะที่แน่นอนเท่านั้น คือ สภาวะที่เป็นไปตามสมการของแบรกก์ (Bragg's equation)

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta_{hkl} \quad (2.17)$$

และการสะท้อน (reflection) ที่เกิดขึ้นจะบันทึกบนแผ่นฟิล์ม (photographic film) ซึ่งเกิดจากการหักเหกระจาย (scattering) จากแถวของอะตอมใน 3 มิติ แบบเสริมกัน ถ้าชุดของระนาบในผลึกใดทำมุมกับรังสีที่ตกกระทบได้พอเหมาะตามสมการของแบรกก์ ก็จะทำให้การสะท้อนที่ชัดเจนบนแผ่นฟิล์ม เนื่องจากระนาบเดียวกันนี้มีมากมายและมีอยู่ทุกทิศทาง ทำให้เกิดการสะท้อนเป็นรูปทรงกรวยตกกระทบบนแผ่นฟิล์ม และเนื่องจากมีชุดของระนาบ hkl ที่ต่างกันหลายชุด จึงทำให้เกิดอนุกรมรูปทรงกรวยของแสงซ้อนกันอยู่หลาย ๆ ชั้น ซึ่งวงในจะมีค่า  $\theta$  ต่ำกว่าวงนอก เมื่อคลี่แผ่นฟิล์มออกจะปรากฏความเข้มของการสะท้อน hkl ต่างๆ เป็นส่วนของวงกลมหลายๆ เส้นบนแผ่นฟิล์ม และวงกลม 1 วงจะแสดงถึงชุดของระนาบชนิดเดียวกัน 1 ชุด ที่กระจายอยู่หลายๆ ทิศทาง จากตำแหน่งของการสะท้อนและความเข้มที่วัดได้สามารถนำไปหาขนาดและชนิดของหน่วยเซลล์ได้

### 2.2 Powder diffractometer

ใช้บันทึกรูปแบบการเลี้ยวเบนของสารตัวอย่างที่อยู่ในรูปผง หรืออยู่ในรูปที่เป็นแผ่นฟิล์ม ลักษณะของการบันทึกรังสีเอ็กซ์จะเกิดโดยฐานที่มีสารตัวอย่างวางอยู่จะหมุนได้ หรือเครื่องบันทึกหมุนได้ หรือหมุนทั้งสองอย่าง โดยจะหมุนแค่ครึ่งวงกลม สำหรับเครื่องบันทึกจะหมุนทวนเข็มนาฬิกาเสมอ ซึ่งหมุนไปพร้อมกับเครื่องตรวจวัดขณะตรวจวัด (หมุนทวนเข็มนาฬิกา) แหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์จะทำมุม  $\theta = 1.5^\circ$  ในการบันทึกสารตัวอย่างนั้นจะทำการวางตัวอย่างติดกับแท่นวางตัวอย่าง ซึ่งหมุนไปพร้อมกับเครื่องตรวจวัดขณะตรวจวัด (หมุนทวนเข็มนาฬิกา) แหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์จะทำมุม  $\theta$  กับสารตัวอย่าง reflection beam ค่า  $\theta$  ที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นำไปหาค่า d จากสมการของแบรกก์ต่อไป

สำหรับระบบผลึกที่มีแกนของหน่วยเซลล์ผลึกไม่ตั้งฉากซึ่งกันและกันนั้นจะมีความยุ่งยากมากขึ้นโดยสารกลุ่มทวิโลหะไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรตและอนุพันธ์ทางความร้อน คือ สารทวิโลหะไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ศึกษาจัดอยู่ในระบบผลึก โมโนคลินิก ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) แกน a และ c ทำมุมป้านกันขณะที่แกน B ตั้งฉากกับแกนทั้งสองนี้ ในกรณีนี้เส้นตั้งฉากกับระนาบ (100) ยังคงอยู่บนระนาบ ac และตั้งฉากกับแกน b แต่ไม่ได้อยู่บนแกน a อีกต่อไป ทำนองเดียวกับเส้นตั้งฉากกับระนาบ (001) ซึ่งก็ยังคงอยู่บนระนาบ ac แต่ไม่อยู่บนแกน c ถ้ามองในทิศแกน b จะเห็นความสัมพันธ์ของเส้น

ตั้งฉากทั้งสองนี้กับแกน  $a$  และ  $b$  ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ข) และตำแหน่งแลตทิซส่วนกลับ 100 จะปรากฏอยู่บนเส้นตั้งฉากกับระนาบ (100) ที่ระยะ  $1/d_{100}$  จากจุดกำเนิด เมื่อ  $d_{100}$  คือ ระยะห่างระหว่างชุดระนาบ (100) ซึ่งในกรณีนี้  $d_{100}$  ไม่เท่ากับ  $a$  และถ้ามุมระหว่างแกน  $a$  และ  $c$  คือ  $\beta$

$$d_{100} = a \sin (180^\circ - \beta) \quad (2.18)$$

หรือ

$$d_{100} = a \sin \beta \quad (2.19)$$

ดังนั้น ระยะ  $a^*$  ซึ่งเป็นระยะจากจุดกำเนิดไปถึงตำแหน่งแลตทิซส่วนกลับ 100 มีค่าดังนี้

$$a^* = 1/(d_{100}) = 1/(a \sin \beta) \quad (2.20)$$

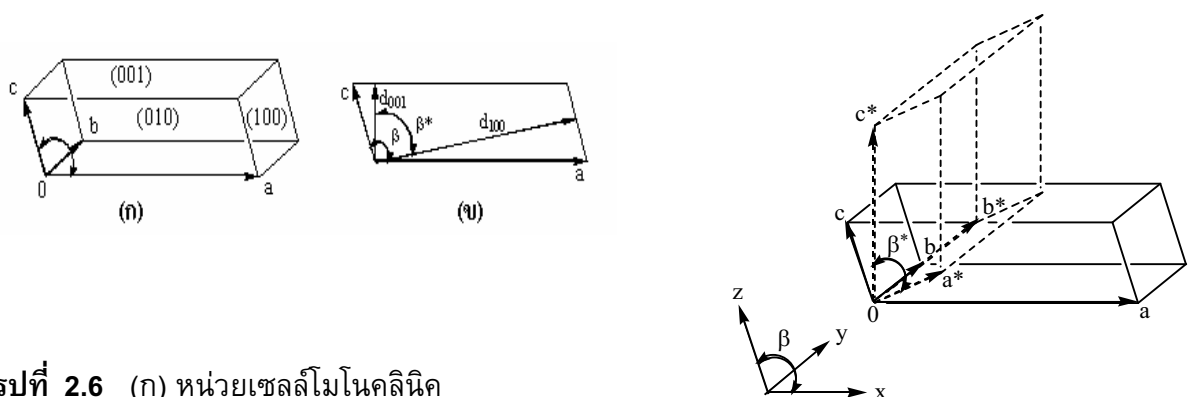
ในทำนองเดียวกัน

$$c^* = 1/(c \sin \beta) \quad (2.21)$$

แต่สำหรับ  $b^*$  เนื่องจากแกน  $b$  ตั้งฉากกับระนาบ  $ac$  หรือ (010) ดังนั้น  $b^*$  จึงยังคงอยู่บนแกน  $b$  โดยมีระยะจากจุดกำเนิดเป็น  $1/b$  ตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ของเซลล์ทั้งสองในระบบโมโนคลินิกดังนี้

ตารางที่ 2.1 ระบบของผลึก 7 ชนิด

| ระบบ                    | มุม                                                | ความยาวของแกน     |
|-------------------------|----------------------------------------------------|-------------------|
| Triclinic               | $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$      | $a \neq b \neq c$ |
| Monoclinic              | $\alpha = \gamma = 90^\circ ; \beta \neq 90^\circ$ | $a \neq b \neq c$ |
| Orthorhombic            | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$               | $a \neq b \neq c$ |
| Tetragonal              | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$               | $a = b \neq c$    |
| Rhombohedral (Trigonal) | $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$            | $a = b = c$       |
| Hexagonal               | $\alpha = \beta = 90^\circ ; \gamma = 120^\circ$   | $a = b \neq c$    |
| Cubic                   | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$               | $a = b = c$       |



รูปที่ 2.6 (ก) หน่วยเซลล์โมโนคลินิก

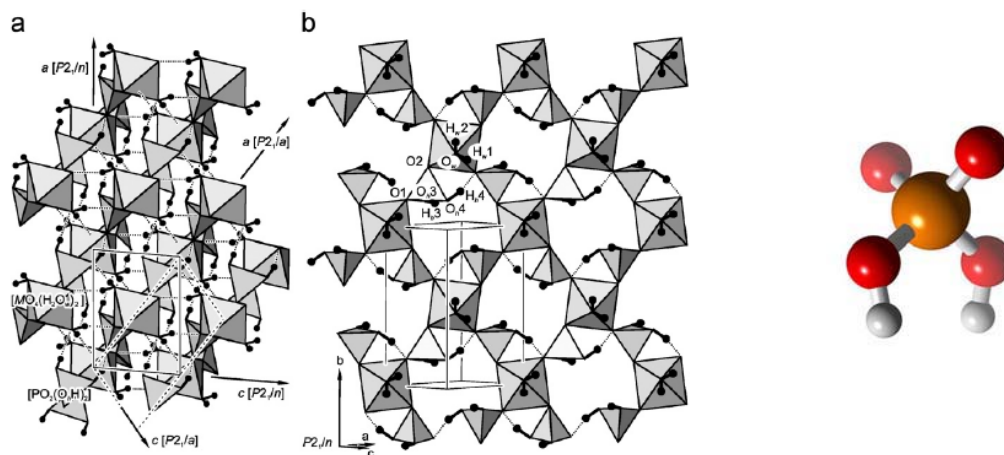
(ข) ระนาบ  $ac$  ของหน่วยเซลล์ใน (ก) และระยะห่างของระนาบ (100) และ (001)

(ค) หน่วยเซลล์ผลึกและหน่วยเซลล์ส่วนกลับของระบบโมโนคลินิก

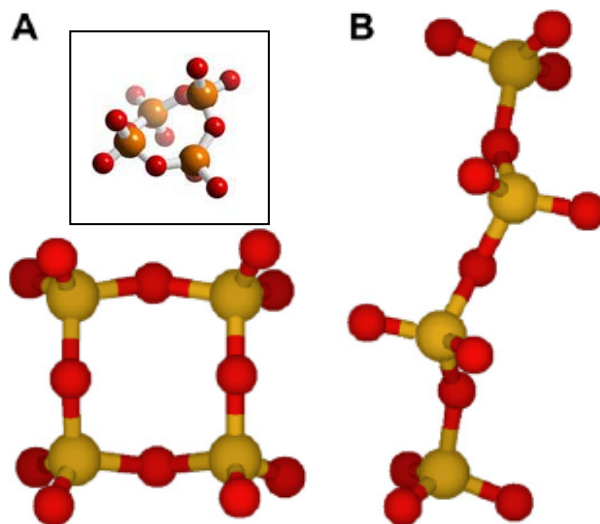
ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของหน่วยเซลล์ผลึกและหน่วยเซลล์ส่วนกลับของระบบโมโนคลินิก

|                              |                            |                                                    |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------|
| $a^* = 1/(a \sin \beta)$     | $a = 1/(a^* \sin \beta^*)$ | $\alpha = \gamma = \alpha^* = \gamma^* = 90^\circ$ |
| $b^* = 1/b$                  | $b = 1/b^*$                | $\beta^* = 180^\circ - \beta$                      |
| $c^* = 1/(a \sin \beta)$     | $c = 1/(a \sin \beta^*)$   | $V^* = 1/V = a^*b^*c^*\sin \beta^*$                |
| $V = 1/V^* = abc \sin \beta$ |                            |                                                    |

สำหรับสารในกลุ่มไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรตและกลุ่มไซโคลเตตระฟอสเฟตนั้นได้มีการศึกษาโครงสร้างระบบผลึกและรายงานหน่วยย่อยเซลล์ไว้ดังตารางที่ 2.3 โดยลักษณะโครงสร้างของสารทั้งสองกลุ่มประกอบด้วยหน่วยย่อยของ ไอออน ( $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ ) และ ( $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$ ) ลักษณะโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 ลักษณะทางโครงสร้างของ  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (a) และโครงสร้างใน สามมิติในหน่วยเซลล์  $\text{P2}_1/\text{n}$  (b) และ โครงสร้างของหมู่  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  (Koleva & Effenberger, 2007)



รูปที่ 2.8 ลักษณะทางโครงสร้างของไอออน( $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$ ) (A) แบบวงแหวน และ(B) แบบเส้นตรง (Dammak และคณะ, 2008)

โครงสร้างของสารกลุ่มโลหะสองชนิดไดไฮโดรเจนฟอสเฟต( $M_{1-x}A_x(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$ ) โดยมีระบบผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก หมู่ปริภูมิ  $P2_1/n$  เมื่อ  $Z=2$  (Koleva & Effenberger, 2007) ประกอบด้วยอะตอมโลหะ(metal) ที่มีโคออร์ดิเนชันแบบออกตะฮีดรา(octahedra) ซึ่งมีหมู่ฟอสเฟตเป็นลิแกนด์สะพานเชื่อมระหว่างโลหะ เกิดเป็นโครงสร้างแบบชั้น (layer) ขนานไปในแนวระนาบ(101) ของระบบ โดยแต่ละชั้นเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่มาจากโมเลกุลของน้ำและหมู่ฟอสเฟต ซึ่ง 6 โคออร์ดิเนชันของโลหะประกอบด้วยอะตอมออกซิเจน 6 อะตอม ที่มาจากโมเลกุลของน้ำ 2 อะตอมและหมู่ฟอสเฟต 4 อะตอม ดังในรูปที่ 2.7 ซึ่งได้การจากพิสูจน์โครงสร้างของสาร  $Ni(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงโครงสร้างของสารกลุ่มโลหะสองชนิดไซโคลเตตระฟอสเฟต( $M_{2-x}A_xP_4O_{12}$ ) ซึ่งได้จากการสลายตัวทางความร้อนของสารกลุ่ม  $M_{1-x}A_x(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$  มีระบบผลึกโมโนคลินิก หมู่ปริภูมิ  $C2/c$  เมื่อ  $Z=4$  โดยโครงสร้างของสารประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด ที่มีโคออร์ดิเนชันแบบออกตะฮีดราเรียงสลับกัน และมีหมู่ฟอสเฟตที่มีโคออร์ดิเนชันแบบเตตระฮีดรา (tetrahedra) เป็นลิแกนด์สะพานเชื่อมระหว่างโลหะ ทั้ง 2 ชนิด โดยหมู่ฟอสเฟตจะสร้างพันธะต่อกันเกิดเป็นวงของ  $P_4O_{12}^{2-}$  ขึ้นภายในโครงสร้าง 3 มิติ โดยแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบสายโซ่แหวน และแบบสายโซ่ตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และจากระบบผลึกของสารทั้งสองกลุ่ม นั้น สำหรับสารโลหะเดี่ยว คือ  $M(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  และ  $M_2P_4O_{12}$  ได้มีการคำนวณหาขนาดตัวแปรหน่วย (lattice parameters) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.3 โดยค่าเหล่านี้จะถูกใช้เปรียบเทียบกับของสารกลุ่มทวิโลหะ คือ  $M_{1-x}A_x(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$  และ  $M_{2-x}A_xP_4O_{12}$  ซึ่งเป็นสารใหม่ที่ยังไม่มีการรายงานขนาดตัวแปรของหน่วยผลึก

ตารางที่ 2.3 ตัวแปรหน่วยผลึก สำหรับสารกลุ่ม  $M(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  และ  $M_2P_4O_{12}$

| สาร                         | a(Å)   | b(Å)   | c(Å)   | $\beta^*$ | เอกสารอ้างอิง               |
|-----------------------------|--------|--------|--------|-----------|-----------------------------|
| $Mg(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ | 7.289  | 9.938  | 5.344  | 95.48     | Viter & Nagorny, 2007       |
| $Mn(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ | 7.315  | 10.170 | 5.377  | 94.79     | Viter & Nagorny, 2007       |
| $Fe(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ | 7.297  | 9.925  | 5.337  | 95.13     | Viter & Nagorny, 2007       |
| $Co(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ | 7.269  | 9.881  | 5.331  | 94.86     | Viter & Nagorny, 2007       |
| $Ni(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ | 7.240  | 9.794  | 5.313  | 94.81     | Koleva & Effenberger, 2007) |
| $Zn(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ | 7.266  | 9.901  | 5.332  | 94.76     | Viter & Nagorny, 2007       |
| $Cd(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ | 7.352  | 10.425 | 5.406  | 93.79     | Viter & Nagorny, 2007       |
| $Mg_2P_4O_{12}$             | 9.661  | 8.835  | 4.977  | 108.02    | Bagieu-Beucher และคณะ, 1976 |
| $Mn_2P_4O_{12}$             | 9.943  | 9.144  | 4.968  | 107.23    | Bagieu-Beucher และคณะ, 1976 |
| $Fe_2P_4O_{12}$             | 9.777  | 8.994  | 4.968  | 107.22    | Bagieu-Beucher และคณะ, 1976 |
| $Co_2P_4O_{12}$             | 9.730  | 8.872  | 4.978  | 108.15    | Bagieu-Beucher และคณะ, 1976 |
| $Ni_2P_4O_{12}$             | 9.609  | 8.743  | 4.980  | 108.26    | Bagieu-Beucher และคณะ, 1976 |
| $Zn_2P_4O_{12}$             | 9.758  | 8.898  | 4.968  | 108.49    | Bagieu-Beucher และคณะ, 1976 |
| $Cd_2P_4O_{12}$             | 12.319 | 8.631  | 10.382 | 119.33    | Bagieu-Beucher และคณะ, 1976 |

### 2.2.3 หลักการวิเคราะห์รูปแบบการสั่นและเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของสาร

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared, IR) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาข้อมูลทางโครงสร้างของสารประกอบ ซึ่งอาจอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือ แก๊ส จะได้ข้อมูลที่เกิดจากการสั่น (Vibration) และการหมุน (Rotation) ของโมเลกุลเมื่อได้รับรังสีอินฟราเรด โมเลกุลจะประกอบด้วยอะตอมที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะเคมี ซึ่งโดยปกติแล้วอะตอมจะมีการเคลื่อนไหวหรือสั่น (Vibrate) อยู่ตลอดเวลา การสั่นแบบพื้นฐานของพันธะเคมีมีอยู่ 2 แบบ คือ การยืดหด (Stretching) และการโค้งงอ (Bending)

หลักการของอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จะเกี่ยวข้องกับการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของสารตัวอย่าง โดยพลังงานในช่วงอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงอินฟราเรดใกล้ ช่วงอินฟราเรดช่วงอินฟราเรดไกล

สำหรับช่วงอินฟราเรดที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์พื้นฐานการสั่นของสารโดยทั่วไป มักจะเป็นอินฟราเรดกลาง ที่มีความยาวคลื่นระหว่าง  $4000-400\text{ cm}^{-1}$  โดยพันธะเคมีแต่ละชนิดจะมีพลังงานการสั่นของพันธะที่แตกต่างกันไป ทำให้สามารถจำแนกชนิดของหมู่ฟังก์ชันในองค์ประกอบของสารนั้น ๆ ได้ ดังนั้นเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จึงได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีทั้งแบบลำแสงเดี่ยว (Single beam) และแบบลำแสงคู่ (Double beam) เพื่อใช้วิเคราะห์สารที่สนใจทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

สำหรับสารกลุ่มไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรตและสารไซโคลเตตระฟอสเฟต พลังงานการสั่นพันธะเกิดจากหน่วยย่อยของโครงสร้างของสารทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบไปด้วย แอนไอออน  $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$  และ  $\text{H}_2\text{O}$  สำหรับกลุ่มโลหะไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรต และ แอนไอออน  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  สำหรับสารโลหะไซโคลเตตระฟอสเฟต

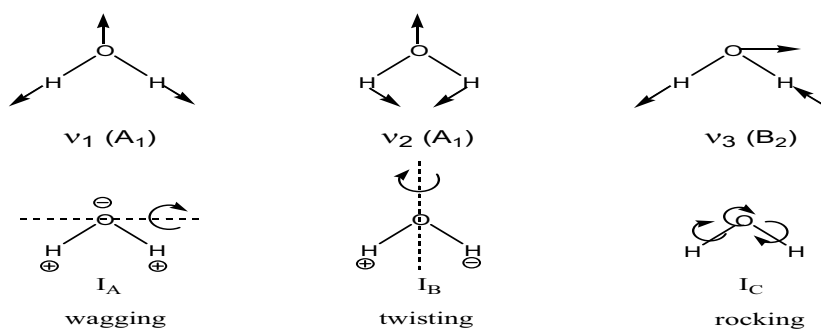
สำหรับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของโมเลกุลน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) จากการคำนวณจำนวนการสั่นพื้นฐาน  $3N-6 = 3 \times 3 - 6 = 3$  พลังงานการสั่นพื้นฐาน ซึ่งประกอบไปด้วย การสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตร (Symmetric stretching:  $V_1$ ) การสั่นแบบยืดหดแบบไม่สมมาตร (Asymmetric stretching:  $V_3$ ) และสั่นแบบการโค้งงอ (Bending) หรือการผิดรูป (Deformation) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างพันธะ 2 อัน ที่เรียกว่า Scissoring ( $V_2$ ) แล้วยังมีการการหมุนที่ถูกขัดขวาง (hindered rotation) หรือที่เรียกว่า “ไลเบรชัน (Libration)” เกิดจากการหมุนแบบกลับไปกลับมา (rotational oscillations) ของโมเลกุลน้ำซึ่งเกิดอันตรกิริยากับอะตอมข้างเคียง แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ขึ้นอยู่กับทิศทางของแกนหมุนหลัก ได้แก่ Rocking ( $R_x$ ), Wagging ( $R_y$ ) และ Twisting ( $R_z$ ) รูปแบบการสั่นและการหมุนของโมเลกุลน้ำแสดงในรูปแบบที่ 1.3 และแถบการสั่นแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

สำหรับการดูดกลืนคลื่นแสงอินฟราเรดของแอนไอออนแอนไอออน  $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$  และ  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  ประกอบไปด้วยรูปแบบการสั่นพื้นฐาน ที่คำนวณได้จากสมการ  $3N-6$  คือ 15 และ 30 รูปแบบการสั่นโดยแถบการสั่นโดยทั่วไปแสดงไว้ในตารางที่ 2.5 และรูปแบบโครงสร้างแสดงไว้ในรูปที่ 2.10

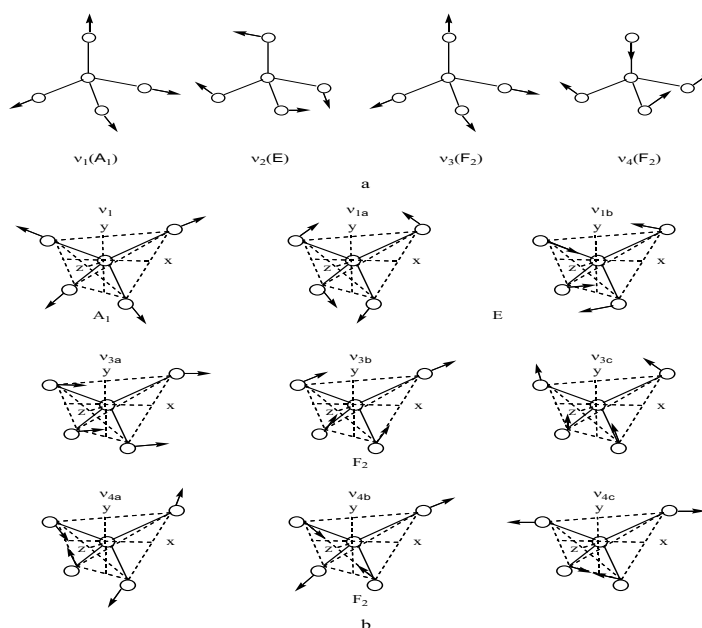
ตารางที่ 2.4 แถบการสั่นพื้นฐานของโมเลกุลน้ำภายในโครงสร้างของแข็ง( $\text{cm}^{-1}$ )

| Solid hydrates             | $\text{H}_2\text{O}$ | $\text{HOD}$ | $\text{D}_2\text{O}$ |
|----------------------------|----------------------|--------------|----------------------|
| Stretching modes ( $\nu$ ) | 3600-3000            | 2600-2300    | 2650-2300            |
| Bending modes ( $\delta$ ) | 1660-1590            | 1460-1400    | 1225-1175            |
| Librations ( $\rho$ )      | 900-350              | 900-260      | 680-260              |
| Translatory modes ( T )    | 350-100              |              | 330-95               |

(Luck, 1973)



รูปที่ 2.9 Vibration modes ของโมเลกุลน้ำ

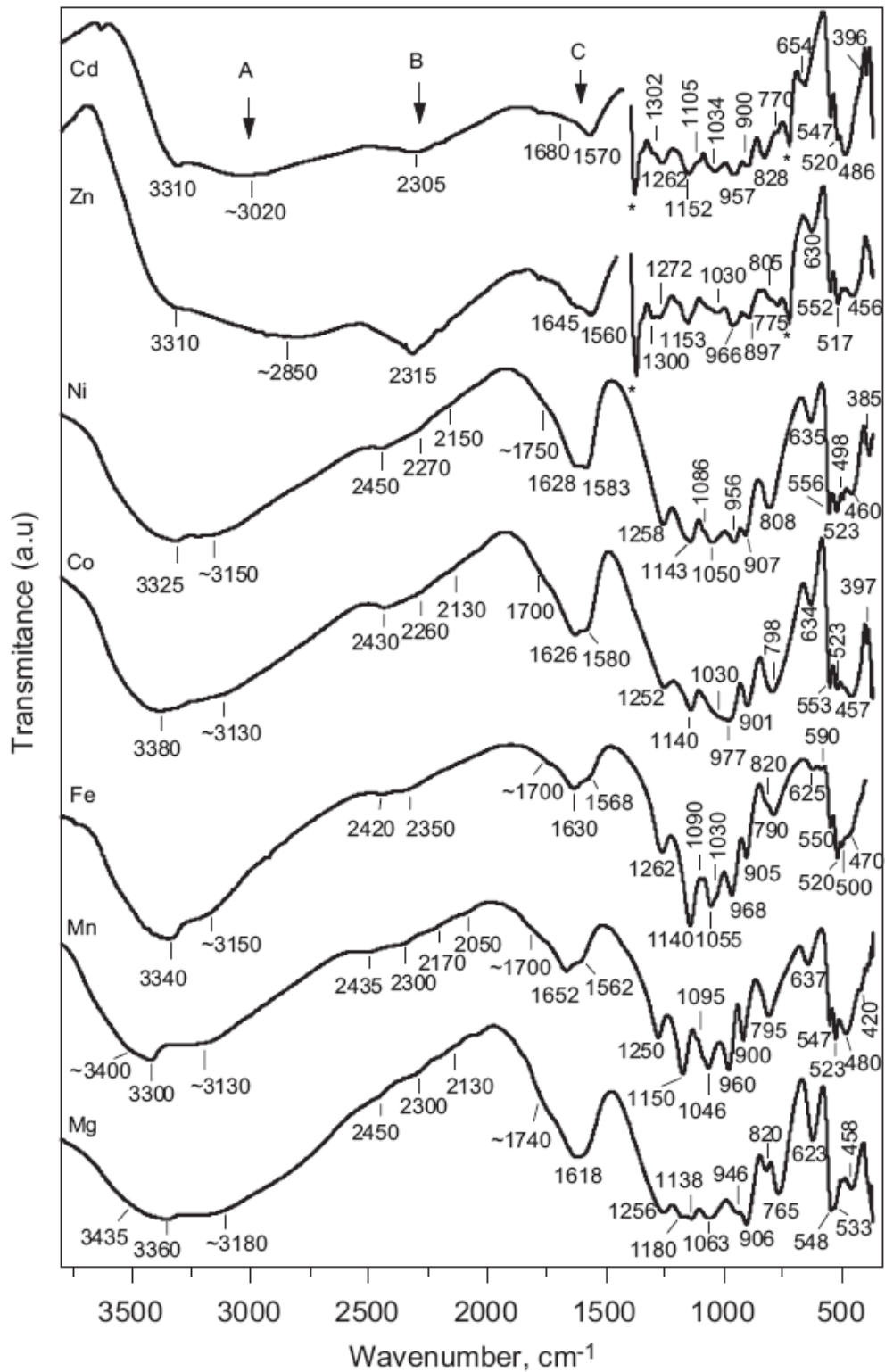


รูปที่ 2.10 Vibrational modes ของโมเลกุล Tetrahedral  $\text{XY}_4$

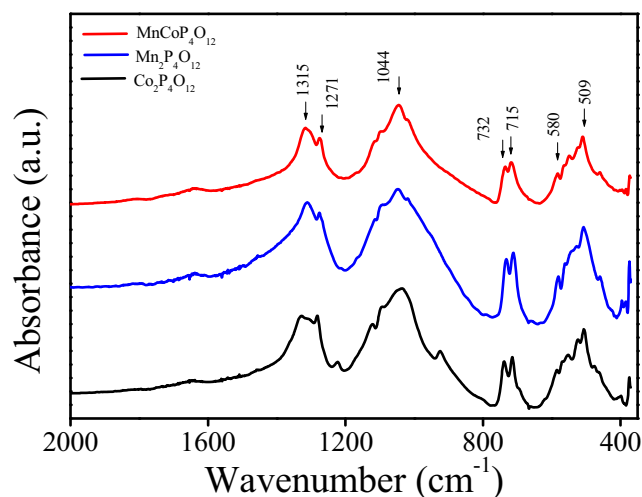
ตารางที่ 2.5 ค่าความถี่ของการสั่นของ  $\text{PO}_4^{3-}$  (Boonchom, 2006)

| Ion                               | Calculation frequencies ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Symmetry species | Description              |
|-----------------------------------|----------------------------------------------|------------------|--------------------------|
| $\text{PO}_4^{3-}, T_d$           | 1010                                         | $F_2$            | $\nu_{as}(\text{P-O})$   |
|                                   | 934                                          | $A_1$            | $\nu_s(\text{P-O})$      |
|                                   | 566                                          | $F_2$            | $\delta_d(\text{O-P-O})$ |
|                                   | 422                                          | E                | $\delta_d(\text{O-P-O})$ |
| $\text{HPO}_4^{2-}, C_{3v}$       | 1076                                         | E                | $\nu_{as}(\text{P-O})$   |
|                                   | 989                                          | $A_1$            | $\nu_s(\text{P-O})$      |
|                                   | 846                                          | $A_1$            | $\nu(\text{P-OH})$       |
|                                   | 582                                          | E                | $\delta(\text{O-P-O})$   |
|                                   | 536                                          | $A_1$            | $\delta(\text{O-P-O})$   |
|                                   | 395                                          | E                | $\rho(\text{P-O}_3)$     |
| $\text{H}_2\text{PO}_4^-, C_{2v}$ | 1155                                         | $A_1$            | $\nu_{as}(\text{P-O})$   |
|                                   | 1076                                         | $B_1$            | $\nu_s(\text{P-O})$      |
|                                   | 942                                          | $B_2$            | $\nu_{as}(\text{P-OH})$  |
|                                   | 874                                          | $A_1$            | $\nu_s(\text{P-OH})$     |
|                                   | 572                                          | $A_1$            | $\delta(\text{O-P-O})$   |
|                                   | 545                                          | $B_2$            | $\rho(\text{P-O}_2)$     |
|                                   | 538                                          | $B_1$            | $\rho(\text{P-O}_2)$     |
|                                   | 502                                          | $A_2$            | $\rho(\text{P-O}_2)$     |
|                                   | 378                                          | $A_1$            | $\delta(\text{HO-P-OH})$ |
| $\text{H}_3\text{PO}_4, C_{3v}$   | 1174                                         | $A_1$            | $\nu(\text{P=O})$        |
|                                   | 1007                                         | E                | $\nu_{as}(\text{P-OH})$  |
|                                   | 888                                          | $A_1$            | $\nu_s(\text{P-OH})$     |
|                                   | 560                                          | E                | $\delta(\text{HO-P-OH})$ |
|                                   | 399                                          | $A_1$            | $\delta(\text{HO-P-OH})$ |
|                                   | 354                                          | E                | $\rho(\text{P-(OH)}_3)$  |

สำหรับสาร  $M(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  และ  $M_2P_4O_{12}$  จะมีเอกลักษณ์การสั่นที่เหมือนๆ กัน แม้จะมีโลหะที่เป็นองค์ประกอบแตกต่างกันก็ตาม โดยตัวอย่างสเปกตรัม FTIR ของสารทั้งสองกลุ่ม แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 และ 2.12



รูปที่ 2.11 สเปกตรัม IR ของ  $M(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  เมื่อ  $M$  คือ Mg, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Cd บันทึกในช่วง  $4000-400$   $cm^{-1}$  ด้วยเทคนิค เกล็ด KBr (Koleva & Effenberger, 2007)



**รูปที่ 2.12** สเปกตรัม IR ของ  $\text{MnCoP}_4\text{O}_{12}$  บันทึกในช่วง  $2000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$  ด้วยเทคนิคเกล็ด KBr เปรียบเทียบกับสารโลหะเดี่ยวไฮโดรเจนเตตระฟอสเฟต (บรรจง บุญชม, 2553)

จากรูปที่ 2.11 แสดงเอกลักษณ์การสั่นของสาร  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  จะเห็นว่าไม่ว่า M จะเปลี่ยนแปลงไป แต่ลักษณะรูปแบบการสั่นจะมีลักษณะเหมือนเดิม คือ ประกอบไปด้วยการสั่นพื้นฐานของ  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  และ  $\text{H}_2\text{O}$  ที่ปรากฏในช่วง  $3130\text{--}3180$ ,  $2380\text{--}2440$ ,  $1680\text{--}1800$ ,  $950\text{--}1150$ , และ  $450\text{--}600\text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับการจำแนกรูปแบบการสั่นของ A band, B band, C band,  $\text{V}_{\text{OH}}(\text{H}_2\text{PO}_4^-)$  และ  $\delta(\text{OPO})$  ตามลำดับ มีการสั่นพื้นฐานของน้ำสามแบบ ตรงตำแหน่ง  $3180\text{--}3350$ ,  $3100\text{--}3000$  และ  $1580\text{--}1680\text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับรูปแบบการสั่นแบบอสมมาตร แบบสมมาตร และแบบโค้งงอของ OH ตามลำดับ และยังปรากฏรูปแบบการหมุนของโมเลกุลน้ำที่ตำแหน่งประมาณ  $630\text{--}650\text{ cm}^{-1}$  สุดท้ายคือมีรูปแบบการสั่นของโลหะ M-O ในช่วง  $380\text{--}420\text{ cm}^{-1}$  โดยการสั่นตำแหน่งนี้จะขึ้นอยู่กับโลหะแต่ละชนิดและการที่โลหะแตกต่างกัน จะก่อให้เกิดรูปแบบการสั่นพื้นฐานของ  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  และ  $\text{H}_2\text{O}$  เลื่อนขึ้นหรือเลื่อนลงเพียงเล็กน้อย แต่ยังคงรูปร่างแบบเดิม เรียกปรากฏการณ์ผลกระทบของโลหะ นี้ว่า “cooperative effect” ซึ่งเป็นผลจากขนาดอะตอมโลหะที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ความแรงของพันธะภายในต่างกันไปด้วย ก่อให้เกิดการสั่นของพันธะใช้พลังงานต่างกันไป

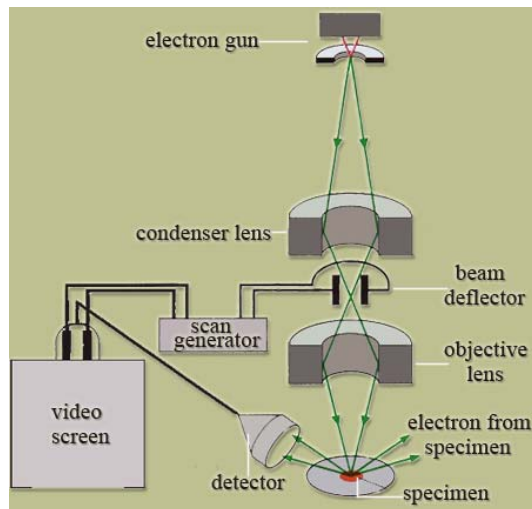
จากสเปกตรัม FTIR ของสารกลุ่มโลหะไฮโดรเจนเตตระฟอสเฟต (รูปที่ 2.12) พิจารณาลักษณะของการสั่นของหมู่ฟังก์ชันองค์ประกอบหรือหน่วยย่อยภายในโมเลกุล ประกอบด้วย  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  ไอออนและ  $\text{MO}_6$  ดังนั้นการสั่นพื้นฐานของพันธะหลักๆ ของสารนี้ จึงมีเฉพาะการสั่นที่เกิดจาก  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  ไอออน เพราะในส่วนของการสั่นของ M-O ที่มาจาก  $\text{MO}_6$  (octahedral) นั้นจะอยู่ที่ความถี่ต่ำกว่า  $400\text{ cm}^{-1}$  มีความเข้มพีดค่อนข้างน้อยมากและขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะเดี่ยวในบางครั้งอาจเห็นการแยกออกเป็นหลายพีด เนื่องจากสิ่งแวดล้อมที่อยู่ภายในโครงสร้างที่พันธะ M-O เชื่อมต่อภายในโมเลกุลแตกต่างกัน FTIR ของสารในกลุ่มนี้ การสั่นของ  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  ไอออนจะมีลักษณะเด่นที่หากเป็นโครงสร้างแบบวงจะมีพีดประมาณ  $732$  และ  $715\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีดของ POP bending ที่ทำให้ระบุได้ว่าไอออนนี้เป็น ไฮโดรเจนเต

ตระฟอสเฟต (cyclotetraphosphate) ไม่ใช่โครงสร้างแบบเส้นตรง (polytetraphosphate) และจะมีพิกัดที่สำคัญแบ่งออกเป็น สามช่วง คือ ประมาณ 1315-1271 และ 1100-1000  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งถูกจำแนกเป็นรูปแบบการสั่นยืดหดของ  $\text{PO}_2^{2-}$  radical แบบสามมาตรและไม่สมมาตร ในช่วง 600-400  $\text{cm}^{-1}$  ของ เป็นรูปแบบการสั่นแบบโค้งงอของ  $\text{PO}_2^{2-}$  radical

#### 2.2.4 หลักการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและลักษณะสัณฐานวิทยาของสาร

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องแบบส่องกราดใช้ศึกษารายละเอียดและรูปร่างภายนอกของวัตถุขนาดเล็กที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ภาพที่ปรากฏเป็นภาพ 3 มิติ เหมือนกล้อง Stereomicroscope หรือ dissecting microscope หลักการทำงานก็คล้ายกัน ภาพเกิดจากอนุภาคอิเล็กตรอนวิ่งกระทบตัวอย่างซึ่งถูกเคลือบผิวด้วยโลหะแล้วสะท้อนกลับออกมา อิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับออกมาเนื่องจากการวิ่งเข้าชนตัวอย่างและอิเล็กตรอนของโลหะที่เคลือบผิวถูกกระแทกหลุดออกมาจะถูกเครื่องจับอิเล็กตรอนรวบรวม อิเล็กตรอนทั้ง 2 แบบ โดยสามารถแยกรายละเอียดของวัตถุที่เล็กขนาด 10 อังสตรอม หรือ 0.1 นาโนเมตร (กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะแจจจรายละเอียดได้ประมาณ 0.2 ไมโครเมตร) จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงมากถึง 500,000 เท่า และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมี 2 ชนิด ได้แก่ transmission electron microscope (TEM) และ scanning electron microscope (SEM) ให้ไปปรากฏบนจอภาพกล้องชนิดนี้มีกำลังขยายประมาณ 28-15,000 เท่า สำหรับงานวิจัยนี้อาศัยกล้องจุลทรรศน์แบบ scanning electron microscope (SEM)

สำหรับ scanning electron microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น หลักการทำงานของเครื่อง SEM (รูปที่ 2.13) จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี(condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ(objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ(secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย



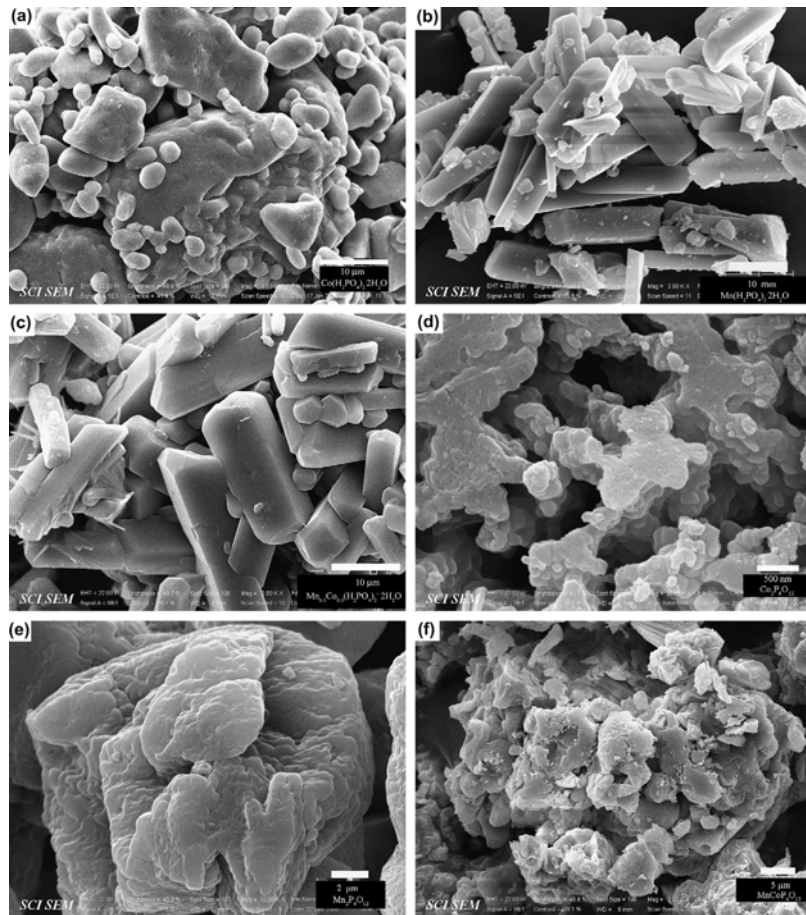
รูปที่ 2.13 หลักการทำงานของเครื่อง scanning electron microscope (SEM)

[<http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>]

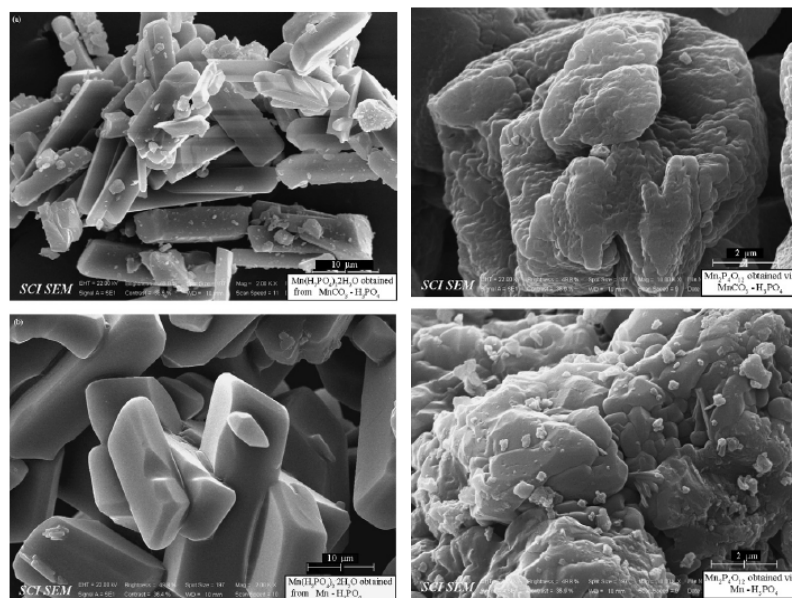
สำหรับรูปภาพ SEM ที่แสดงสัญญาณของสารในกลุ่ม  $M(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  และ  $M_2P_4O_{12}$  และกลุ่มทวิโลหะ คือ  $M_{1-x}A_x(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$  และ  $M_{2-x}A_xP_4O_{12}$  มีตัวอย่างดังรูปที่ 2.14 ซึ่งเป็นภาพสัญญาณของสาร  $Co(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ ,  $Mn(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ ,  $Mn_{0.5}Co_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ ,  $Co_2P_4O_{12}$ ,  $Mn_2P_4O_{12}$ ,  $MnCoP_4O_{12}$  จะเห็นว่าจะมีลักษณะที่แตกต่างกันชัดเจนและแม้จะเป็นสารชนิดเดียวกัน แต่หากเตรียมด้วยเทคนิคและกระบวนการ ขั้นตอน สารตั้งต้น หรืออื่นๆ ที่แตกต่างกันก็ส่งผลต่อลักษณะทางสัญญาณนี้ด้วย ดังจะเห็นจากสาร  $Mn(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  และอนุพันธ์ทางความร้อน  $Mn_2P_4O_{12}$  ที่เตรียมด้วยสารตั้งต้นที่ต่างกัน คือ  $Mn$  และ  $MnCO_3$  จะแสดงลักษณะพื้นผิว ขนาดอนุภาคและสัญญาณต่างกันชัดเจน (รูปที่ 2.15) ดังนั้นการเตรียมสารด้วยเทคนิคต่าง จะส่งผลโดยตรงต่อรูปร่างสัญญาณวิทยาและขนาดอนุภาคเป็นสำคัญแน่นอน

## 2.3 หลักการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์แบบนอนไอโซเทอร์มอล

การศึกษาจลนพลศาสตร์และกลไกของการสลายตัวทางความร้อนของสารเคมีในกลุ่มต่างๆ เช่น โลหะของมาโลเนต ออกซาเลต ฟอर्मेट อะซิเตรท ซัลเฟต คาร์บอเนต ไนเตรท ซิรีเนต ฟอสเฟตและอื่นๆ มีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง (Vlaev และคณะ, 2008; Janković, 2008; Boonchom และ Danvirutai, 2008; Boonchom, 2008) เนื่องจากสารที่กล่าวมาทั้งหมด เป็นสารตั้งต้นสำหรับการนำไปสังเคราะห์สารชนิดอื่นที่มีความสำคัญในด้านอุตสาหกรรม เช่น การนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์โลหะออกไซด์ โดยโลหะออกไซด์นี้มีประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม หลายด้านอาทิเช่น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เซลล์ไฟฟ้า เซลล์ทางแสง สารเซรามิก สีเคลือบผิว ตัวนำและตัวเก็บประจุไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอื่น ๆ โดยก่อนนำไปใช้ต้องผ่านการเตรียมที่สภาวะอุณหภูมิสูง เพื่อให้เกิดการสลายตัวทางร้อน จนสุดท้ายได้สารในกลุ่มโลหะออกไซด์ซึ่งสารโลหะตั้งต้นแตกต่างกันจะส่งผลให้สภาวะอุณหภูมิของการเตรียมแตกต่างกันไปด้วย

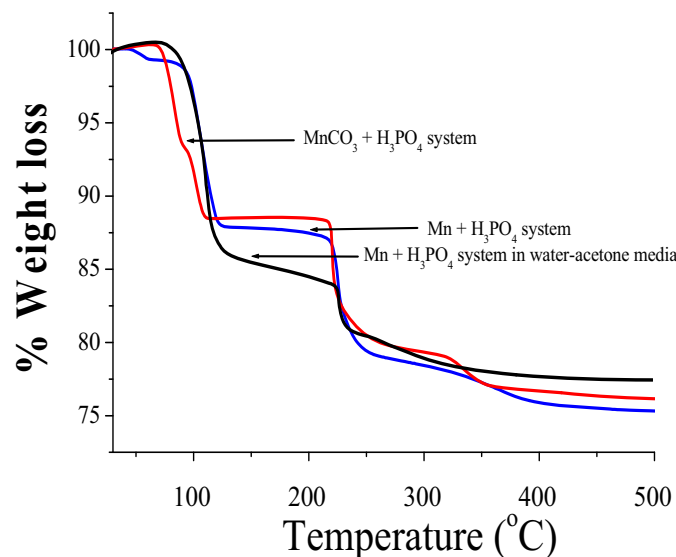


รูปที่ 2.14 ภาพ SEM ของสาร  $\text{Co}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (a),  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (b),  $\text{Mn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (c) and  $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (d),  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (e),  $\text{MnCoP}_4\text{O}_{12}$  (f).



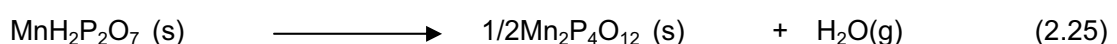
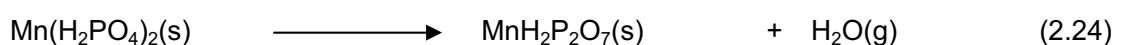
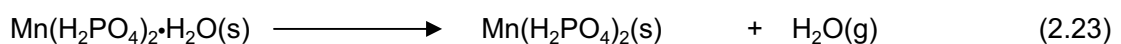
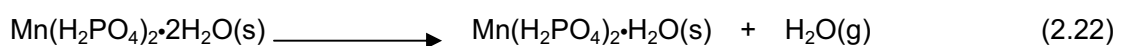
รูปที่ 2.15 ภาพ SEM ของสาร  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{MnCO}_3\text{-H}_3\text{PO}_4$ ),  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{Mn-H}_3\text{PO}_4$ ),  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $\text{MnCO}_3\text{-H}_3\text{PO}_4$  at  $500^\circ\text{C}$ ) และ  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $\text{Mn-H}_3\text{PO}_4$  at  $500^\circ\text{C}$ )

ตัวอย่างเช่น สารโลหะออกซาลेट ส่วนใหญ่จะสลายตัวไปเป็นโลหะออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 °C สารโลหะไนเตรท จะสลายตัวที่ อุณหภูมิต่ำกว่า 300 °C ในขณะที่โลหะคาร์บอเนตจะสลายตัวที่ต่ำกว่า 1,000 °C อีกทั้งกลไกการสลายตัวของสารแต่ละชนิดก็มีความซับซ้อนแตกต่างกัน และถึงแม้จะเป็นสารชนิดเดียวกันก็ยังแสดงพฤติกรรมทางความร้อนต่างกัน อันได้แก่ กลไกการสลายตัวและความเสถียรที่อุณหภูมิที่แตกต่าง โดยสิ่งเหล่านี้ ขึ้นอยู่กับ สมบัติของสารชนิดนั้นๆ คือ ขนาดอนุภาค ปริมาณของสาร และสภาวะการเตรียม โดยถ้าเตรียมในสภาวะอัตราการเพิ่มอุณหภูมิและสภาพบรรยากาศที่ใช้ในเตรียม ต่างกันก็ส่งผลต่อกลไกการสลายตัวที่ต่างกันออกไป และถ้าใช้สารตั้งต้นในการเตรียมแตกต่าง สมบัติทางกายภาพ เช่น อนุภาคเล็กหรือใหญ่ ก็มีผลต่างกันก็ส่งผลต่อกลไกการสลายตัวทางความร้อน เช่นเดียวกัน ยกตัวอย่าง การสลายตัวทางความร้อนของ สาร  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ที่ผ่านการเตรียมโดยใช้สารตั้งต้นและตัวกลางที่ต่างกัน คือ ใช้  $\text{MnCO}_3$   $\text{Mn(c)}$  และ  $\text{Mn(c)}$  ในระบบผสมน้ำและอะซิโตน (รูปที่ 2.16)



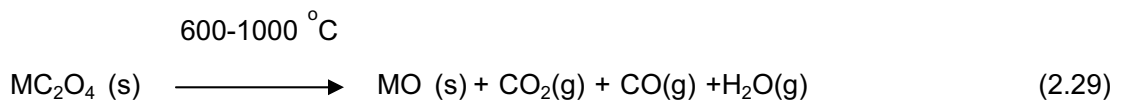
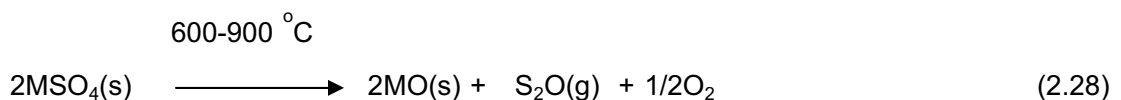
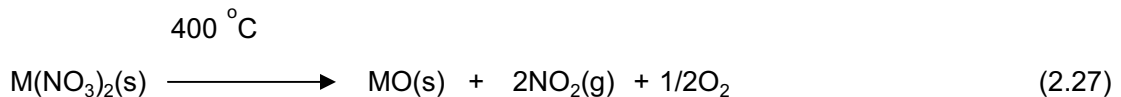
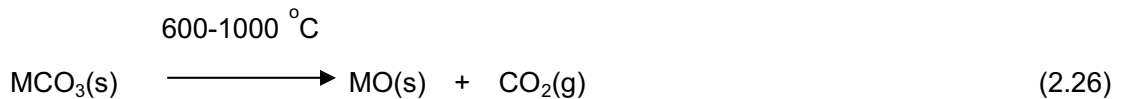
รูปที่ 2.16 เทอร์โมแกรมของ  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ที่ถูกเตรียมได้ในสภาวะการเตรียมที่แตกต่างกัน

ปฏิกิริยาแสดงกลไกการสลายตัวของสารตัวนี้ คือ



จากเทอร์โมแกรมรูปที่ 2.16 สรุปได้ว่า สาร  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{s})$  ที่เตรียมจากระบบ  $\text{MnCO}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4$  จะมีกลไกการสลายตัวสอดคล้องกับกลไกทั้ง 4 กลไกข้างบน แต่หากเตรียมจากระบบ  $\text{Mn} + \text{H}_3\text{PO}_4$

และ  $Mn + H_3PO_4$  ในตัวกลางน้ำและอะซิโตน จะมีกลไกการสลาย 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ (1) และ (2) จะเกิดร่วมกัน และในการเตรียมที่ใช้ตัวกลางจะใช้อุณหภูมิเผาต่ำกว่าเพื่อให้ได้สารผลิตภัณฑ์สุดท้าย คือ  $Mn_2P_4O_{12}$  โดยเหตุผลสนับสนุนก็คือการเตรียมด้วยสารตั้งต้นและสภาวะที่ต่างกันทำให้ได้สารที่มีขนาดอนุภาคต่างกันนั่นเอง (Boonchom, 2006) โดยเฉพาะหากการเตรียมด้วยสารตั้งต้นต่างกันก็จะส่งผลให้ได้สารผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีสมบัติทางกายภาพบางอย่างแตกต่างกัน เช่น ขนาดอนุภาค สมบัติทางแสง การนำไฟฟ้า สมบัติแม่เหล็ก เป็นต้น ด้วยหลักการนี้ไปสู่การเลือกใช้สารตั้งต้นที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้เตรียมสารตามที่ต้องการ โดยมุ่งไปในด้านสะดวก ประหยัดและคุ้มค่า โดยจะเป็นข้อมูลที่จะนำไปเข้าสู่กระบวนการผลิตที่ไม่ก่อให้เกิดสภาวะที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม อันจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม เพราะการสลายตัวทางความร้อนของสารบางกลุ่มก่อให้เกิดแก๊สพิษ อีกทั้งยังต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเตรียมที่สภาวะต่างกัน ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการลงทุนการผลิตไปด้วย ดังเช่นปฏิกิริยาการสลายตัวของสารต่อไปนี้



โดยที่  $M = Ca, Ba, Mg, Mn, Fe, Co, Ni, Zn$  และอื่นๆ

โดยกลไกของการสลายตัวที่แสดงให้เห็นเป็นกลไกโดยรวม แต่ในความเป็นจริงแล้ว สารตั้งต้นแต่ละชนิดจะมีกลไกย่อยของการสลายตัวที่มีความเฉพาะเจาะจง ตามแต่ชนิดของสารตั้งต้นนั้น ๆ ดังนั้น เพื่อที่จะศึกษาและเข้าใจถึงพื้นฐานการเตรียมของสารที่กล่าวมาข้างต้น หรือเพื่อเข้าใจสารตั้งต้นที่นำมาใช้นั้น สิ่งหนึ่งที่จะต้องศึกษาก็คือ จลนพลศาสตร์ และ กลไกการสลายทางความร้อนของสารตั้งต้นดังกล่าว โดยเป็นการศึกษาปฏิกิริยาต่าง ๆ ของสารในสถานะของแข็งที่มีความยากและซับซ้อน และจะเป็นประโยชน์สำคัญต่อการควบคุมปัจจัยของสารสถานะของแข็ง ได้แก่ ขนาดแลตติซ, การเกิดและการเติบโตของนิวเคลียส การแพร่ผ่านของแก๊สในสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ เพื่อก่อให้เกิดรูพรุน และขนาดรูพรุน, ความหนาของชั้นสาร, การกระจายตัวของอนุภาค และการเป็นหนึ่งเดียวของวัสดุที่สำคัญอีกประการ คือการเข้าใจพฤติกรรมทางความร้อนของสารตั้งต้นที่จะเป็นประโยชน์ต่อการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมสารตัวอื่นที่มีประโยชน์มากกว่าได้อย่างถูกต้องเมื่อศึกษาแล้วนั้น ข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปใช้ โดยจะก่อให้เกิดความปลอดภัย การประหยัดและความคุ้มค่าในขั้นตอนการผลิตที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้โดยตรงกับการเตรียมสารทางด้านวัสดุศาสตร์ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานด้านต่าง ๆ

จลนพลศาสตร์และกลไกของการสลายตัวทางความร้อนของสารเคมีกลุ่มต่างๆ นั้นได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลายในอดีตจนถึงปัจจุบัน(Boonchom และคณะ, 2008 ,2008; Jankovic, 2008; Koga & Yamane, 2008; Vlaev และคณะ,2005, 2008)โดยเทคนิคที่ใช้ศึกษา คือหลักการวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal analysis; TA method) โดยเทคนิคที่สำคัญ เช่น เทอร์โมกราวิเมตรี (Thermogravimetry; TG) การวิเคราะห์ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง เทอร์มอล (Differential scanning thermal analysis; DTA) และดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริเมตรี (Differential scanning calorimetry; DSC) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ให้ข้อมูลการทดลองที่มีค่าทางวิทยาศาสตร์เพื่อนำไปใช้คำนวณเพื่อหาตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ อันเรียกว่า ตัวแปรทั้งสามเชิงจลนพลศาสตร์ (Kinetic triplet parameters) อันได้แก่ พลังงานการกระตุ้นของการสลายตัว(Activation energy;  $E_a$ ), อันดับของการสลายตัว (Order of reaction;  $n$ ), ฟังก์ชันการสลายตัวที่อธิบายกลไกหรือชนิดการสลายด้วยตัวแปรทางคณิตศาสตร์ (Kinetic function;  $g(\alpha)$  or  $f(\alpha)$ ) โดยปัจจุบันมีฟังก์ชันที่นักวิทยาศาสตร์หลาย ๆ ท่านได้เสนอไม่ต่ำกว่า 35 ฟังก์ชันแล้ว (Vlaev et al 2005, 2008) (ตารางที่ 2.6) ในขณะที่สมการทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวทางความร้อนนั้น เรียกว่า จลนพลศาสตร์แบบนอนไอโซเทอร์มอล (Non-isothermal kinetics) ซึ่งสมการที่ใช้ศึกษาจลนพลศาสตร์นั้น ล้วนเริ่มต้นจากสมการอาร์เรเนียสทั้งสิ้น จากปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของ



จะได้สมการ

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \quad (2.31)$$

เมื่อ  $\alpha = (m_t - m_i)/(m_f - m_i)$ , เมื่อ  $m_i$ ,  $m_t$  และ  $m_f$  เป็นน้ำหนักของสารที่สภาวะเริ่มต้น, สภาวะเวลาใด ๆ และที่สภาวะสุดท้าย ในสภาวะอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่าง ๆ (heating rates ; $\beta$ )

จากสมการอาร์เรเนียส

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.32)$$

เมื่อ A คือ สัมประสิทธิ์การชน (pre-exponential factor/ $s^{-1}$ ),  $E$  คือพลังงานกระตุ้น (activation energy/ $kJ\ mol^{-1}$ ),  $T$  คืออุณหภูมิสมบูรณ์ (K) and  $R$  คือค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ ( $8.314\ kJ\ mol^{-1}\ K^{-1}$ ). แทนสมการที่ (2,31) ใน สมการ (2.32) จะได้:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)f(\alpha) \quad (2.33)$$

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มด้วยอัตราคงที่,

$$\frac{d\alpha}{dT} = \beta = \text{const}, \quad (2.34)$$

ดังนั้น:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (2.35)$$

ฟังก์ชัน  $f(\alpha)$  เป็นฟังก์ชันการสลายตัวที่อธิบายกลไกหรือชนิดการสลายตัวของสารสถานะของแข็งด้วยตัวแปรทางคณิตศาสตร์ อธิบายชนิดของปฏิกิริยาเคมี (Chemical reactions) การเติบโตของนิวไคลด์และการเกิดนิวคลีเอชันแบบสุ่ม (Random nucleation and nuclei growth) ปฏิกิริยาการขยายขอบเขตวัฏภาคหรือการแพร่ (Phase boundary reaction or diffusion.)

โดยจากสมการที่ (2.37) นั้น มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้ทำการศึกษาและแก้สมการทางคณิตศาสตร์ และได้นำเสนอสมการเพื่อใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ แบบนอนไอโซเทอร์มอล โดยสมการที่มีชื่อเสียงและเป็นที่รู้จักและใช้กันจนถึงปัจจุบันอย่างแพร่หลาย มีชื่อเรียกทั่วไปว่า สมการแบบอิสระ (Model-free) อาทิเช่น สมการ Ozawa, Kissinger, Friedman, Coats and Redfern, Freeman and Carroll, และ Achar เป็นต้น (Vlaev et al., 2008) และยังมีสมการที่มีการพัฒนาจากสมการในอดีตแล้วเรียกชื่อผู้พัฒนาเสริมเพิ่มเติมเข้าไปในชื่อสมการ อาทิเช่น สมการ Flynn, Wall and Ozawa (FWO) และ Kissinger, Akahira and Sunose (KAS) และมีสมการที่ลักษณะคล้ายกันกับสมการของ Coats and Redfern แต่เรียกชื่ออีกแบบ คือ Madhysudaman, Krishnan และ Ninan (MKN), Tang et al. และ Wanjun et al (TW).

$$\text{สมการ Ozawa: } \log \beta = \log \left( \frac{AE_\alpha}{Rg(\alpha)} \right) - 2.315 - 0.4567 \left( \frac{E_\alpha}{RT} \right) \quad (2.36)$$

$$\text{สมการ KAS: } \ln \left( \frac{\beta}{T^2} \right) = -\frac{E_a}{RT_p} + \ln \left( \frac{AR}{E_a} \right). \quad (2.37)$$

$$\text{สมการ Coats and Redfern: } \ln \left( \frac{g(\alpha)}{T^2} \right) = \ln \left( \frac{AR}{\beta E_\alpha} \right) \left( 1 - \frac{2RT}{E_\alpha} \right) - \left( \frac{E_\alpha}{RT} \right) \cong \ln \left( \frac{AR}{\beta E_\alpha} \right) - \left( \frac{E_\alpha}{RT} \right) \quad (2.38)$$

$$\text{สมการ Friedman: } \ln \left( \frac{d\alpha}{dt} \right) \equiv \ln \left( \beta \frac{d\alpha}{dT} \right) = \ln \left( A f(\alpha) \right) - \left( \frac{E_\alpha}{RT} \right) \quad (2.39)$$

$$\text{สมการ Freeman and Carroll: } \Delta \ln \left( \frac{d\alpha}{dT} \right) = n \Delta \ln(1-\alpha) - \left( \frac{E_\alpha}{RT} \right) \Delta \left( \frac{1}{T} \right) \quad (2.40)$$

$$\text{สมการ Achar: } \ln \left( \frac{1}{f(\alpha)} \frac{d\alpha}{dT} \right) = \ln \left( \frac{AE_\alpha}{Rg(\alpha)} \right) - \left( \frac{E_\alpha}{RT} \right) \quad (2.41)$$

$$\text{สมการ Flynn, Wall and Ozawa (FWO): } \ln \beta = \ln \left( \frac{AE_\alpha}{Rg(\alpha)} \right) - 5.3305 - 1.0516 \left( \frac{E_\alpha}{RT} \right) \quad (2.42)$$

$$\text{สมการ Kissinger และ Akahira and Sunose (KAS): } \ln \left( \frac{\beta}{T^2} \right)_\alpha = \ln \left( \frac{AE}{g(\alpha)R} \right) - \left( \frac{E_\alpha}{RT} \right) \quad (2.43)$$

สมการ Madhysudaman, Krishnan and Ninan:

$$\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^{1.921503}}\right) = \left[ \ln\left(\frac{AE_\alpha}{\beta R}\right) + 3.772050 - 1.921503 \ln E_\alpha \right] - \left( 0.120394 \frac{E_\alpha}{T} \right) \quad (2.44)$$

สมการ Tang et al.

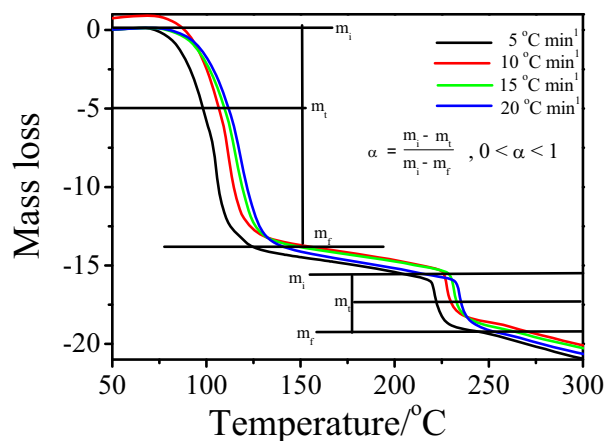
$$\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^{1.894661}}\right) = \left[ \ln\left(\frac{AE_\alpha}{\beta R}\right) + 3.63504095 - 1.894661 \ln E_\alpha \right] - \left( 1.0014533 \frac{E_\alpha}{RT} \right) \quad (2.45)$$

สมการ Wanjun et al.

$$\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{AE_\alpha}{\beta(1.00198882E_\alpha + 1.87391198RT)}\right) - \left(\frac{E_\alpha}{RT}\right) \quad (2.46)$$

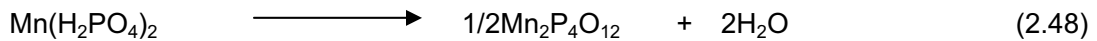
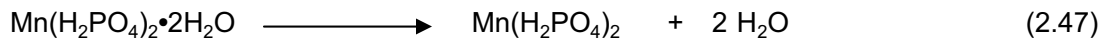
นอกเหนือจากสมการจลนพลศาสตร์ที่กล่าวมาข้างบน ยังมีสมการที่ใช้เพื่อคำนวณทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวทางความร้อนแบบนอนไอโซเทอร์มอลอีกจำนวนมากทั้งที่เสนอไว้ในอดีตและเสนอขึ้นมาในเร็ว ๆ นี้ หากต้องการนำสมการมาใช้ในการศึกษาแล้วนั้น สิ่งที่ต้องพิจารณาก่อนเริ่มต้น คือ พฤติกรรมของการสลายตัวทางความร้อนของสารที่สนใจศึกษา โดยพิจารณาจาก ผลการทดลองด้วยเทคนิค การวิเคราะห์เชิงความร้อน คือเทคนิค TG, DTG, DTA และ DSC ก่อน เพราะเส้นทางการสลายตัวจะมีความซับซ้อนหรือยากง่ายอย่างไร จะมีส่วนทำให้เราเลือกใช้สมการทางจลนพลศาสตร์ได้ โดยจะต้องทำการทดลองด้วยเทคนิคดังกล่าวที่สภาวะอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (Heating rates) ที่แตกต่างกัน 3 ค่า โดยจะยกตัวอย่างการศึกษาทางด้านนี้ 2 กรณี คือ กลไกที่แสดงการสลายตัวทางความร้อนที่มีการสูญเสียน้ำหนักชัดเจน และกลไกซับซ้อนในการสูญเสียน้ำหนัก

**ตัวอย่าง** การสลายตัวทางความร้อนของ  $Mn(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  ที่ไม่ซับซ้อน แสดงดังรูปที่ 2.17

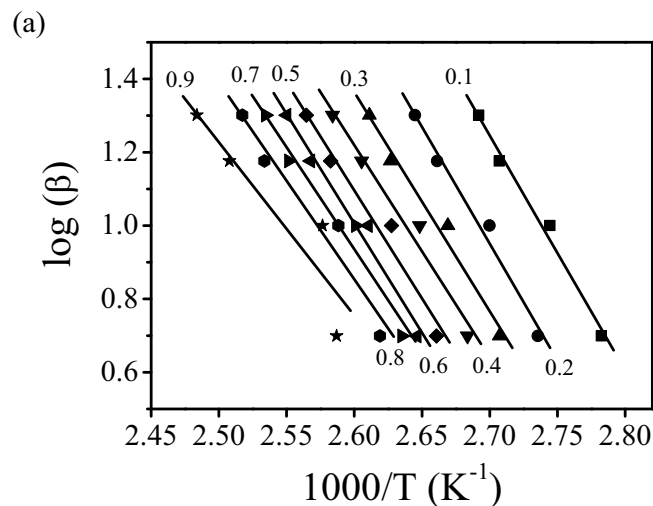


**รูปที่ 2.17** เทอร์โมแกรม TG ของ  $Mn(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  ทำการทดลองในสภาพบรรยากาศและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5, 10, 15 และ 20 °C/min

จากรูปที่ 2.17 ปฏิกริยาการสลายตัวของ  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  จะมี 2 กลไก ดังต่อไปนี้



จากทั้งสองกลไกของการสลายตัวทางความร้อน เราสามารถคำนวณหาพลังงานกระตุ้นของการสลายตัวในแต่ละขั้นตอนได้ โดยสามารถใช้สมการ Ozawa, Kissinger, Friedman, Flynn, Wall and Ozawa (FWO) และ Kissinger หรือ Akahira and Sunose (KAS) ซึ่งสมการเหล่านี้ เรียกว่าสมการ “Isoconversional method” เป็นสมการที่กำหนดให้ ค่า อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักคงที่ (Extent of conversion;  $\alpha$ ) โดยทำให้คำนวณค่าพลังงานกระตุ้นได้ ณ สภาวะคงที่ของค่า  $\alpha$  ต่าง ๆ (มีค่าอยู่ในช่วง 0-1) ในการนำเสนอนี้จะยกตัวอย่างการใช้สมการของ Ozawa จากสมการที่ (2.36) เราจะต้องเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log \beta$  กับ  $1000/T$  โดย  $\beta$  ทราบแล้วว่ามี 4 ค่า คือ 5, 10, 15 และ 20 °C/min แต่ อุณหภูมิ  $T$  ต้องหาจากค่า  $\alpha$  ที่อยู่ในช่วง 0-1 โดยคำนวณได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 2 และปกติแล้วจะพิจารณาค่าที่ 0.1, 0.2, 0.3,...0.9 ซึ่งจะได้อุณหภูมิ  $T$  สอดคล้องตามค่า  $\alpha$  หนึ่ง ๆ ที่มีค่าเฉพาะขึ้นกับค่า  $\beta$  ใดๆ ซึ่งก็คือ ที่  $\alpha = 0.1$  อุณหภูมิ  $T$  จะมี 4 ค่า ตามค่า  $\beta$  ที่มี 4 ค่า จากนั้นเมื่อนำไปเขียนกราฟเส้นตรงตามสมการ Ozawa ก็จะได้กราฟดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log \beta$  กับ  $1000/T$  ตามสมการของ Ozawa

โดยความชันของกราฟสามารถคำนวณหาพลังงานกระตุ้นของการสลายตัวในขั้นตอนที่หนึ่งได้ จากสมการ Ozawa ซึ่งคำนวณจาก  $-0.4567E_\alpha/R$  จะได้ค่าพลังงานกระตุ้น( $E_\alpha$ ) ของการสลายตัวที่สภาวะของค่า  $\alpha$  ใด จากค่าที่คำนวณได้นั้น หาก ค่า  $E_\alpha$  มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่า  $\alpha$  ในช่วง 0.1-0.9 สามารถสรุปได้ว่ากลไกการสลายตัวเป็นแบบขั้นตอนเดียว(Single mechanism) แต่หาก

ค่า  $E_\alpha$  มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่า  $\alpha$  ในช่วง 0.1-0.9 สามารถสรุปได้ว่ากลไกการสลายตัวเป็นแบบขั้นตอนซับซ้อนหลายกลไก(multi-step mechanism) หากเกิดการสลายเป็นแบบแรกนั้น เราจะสามารถพิจารณาฟังก์ชันและอันดับของการสลายตัวทางความร้อนในขั้นตอนต่อไปได้โดยพิจารณาจากใช้สมการของ Coats and Redfern, Freeman and Carrol, Achar, Madhysudaman, Krishnan และ Ninan (MKN), Tang et al. และ Wanjun et al. แต่หากเกิดการสลายตัวแบบหลังแล้ว เราจะไม่พิจารณาฟังก์ชันและอันดับของการสลายตัวทางความร้อนต่อไปได้ เพราะค่าที่ได้ไม่มีความหมายใดๆ ในศาสตร์ของ จลนพลศาสตร์ แต่มีความหมายเฉพาะในทางคณิตศาสตร์เพียงเท่านั้น

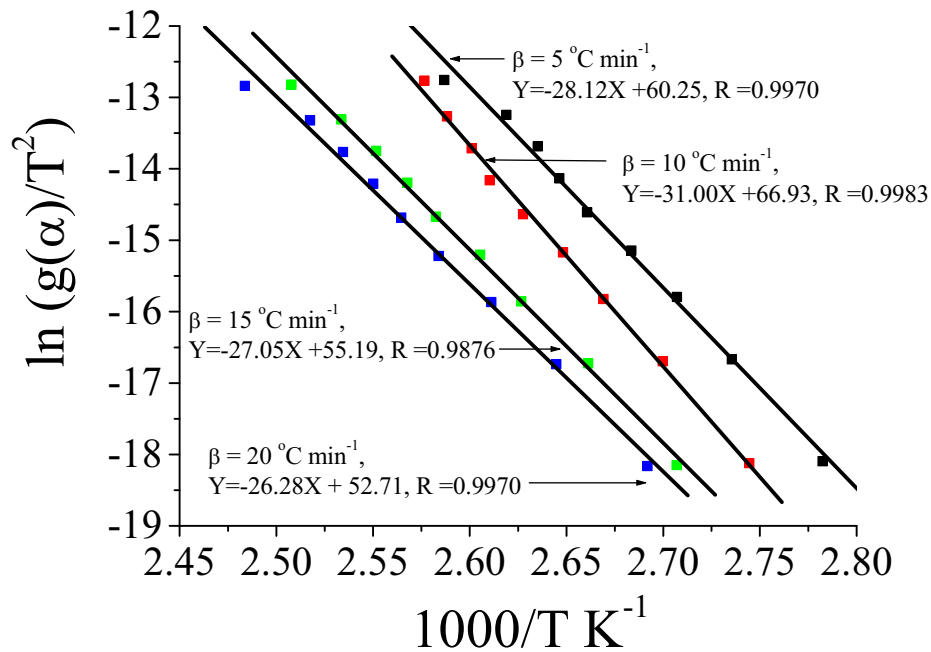
ในกรณีของกลไกการสลายตัวในขั้นตอนที่สองก็สามารถพิจารณาจลนพลศาสตร์ได้เช่นเดียวกันกับวิธีที่กล่าวมาและปกติแล้วต้องใช้สมการทางจลนพลศาสตร์ 2 สมการร่วมกันในการคำนวณหา ค่า  $E_\alpha$  เพราะค่าที่ได้หากมีค่าใกล้เคียงกันแล้ว จะเป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่คำนวณได้ โดยมักจะเลือกใช้ สมการ Ozawa หรือ Friedman เป็นสมการหลัก แล้วเอาสมการอื่นมารวมหรือใช้ร่วมกันทั้งคู่ เพราะสมการทั้งสอง เป็นสมการที่ค่า  $E_\alpha$  มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงกับค่า  $\alpha$  ได้ง่ายซึ่งสามารถระบุกลไกของการสลายตัวทางความร้อนดังที่กล่าวไว้ข้างบน

ในกรณีที่กลไกการสลายตัวเป็นแบบขั้นตอนเดียว(Single mechanism) เราสามารถคำนวณหาฟังก์ชันและอันดับของการสลายตัวทางความร้อนได้ โดยขอยกตัวอย่าง โดยใช้สมการของ Coats and Redfern ในขั้นตอนการสลายตัวในขั้นตอนที่ 1 ของ  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ซึ่งจะเป็นการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right)$  ที่คำนวณได้จากค่า  $\alpha$  ต่างๆ ที่  $\beta$  ค่าหนึ่งๆ กับ  $1000/T$  โดยค่า  $T$  เป็นค่าเดียวกันกับที่ใช้พิจารณาในสมการ Ozawa ในส่วนของค่าฟังก์ชัน  $g(\alpha)$  เป็นฟังก์ชัน algebra ที่มีมากกว่า 35 สมการ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.6 ซึ่งการคำนวณต้องแทน  $g(\alpha)$  แต่ละฟังก์ชันลงไปใน  $\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right)$  แล้วนำไปเขียนกราฟตามสมการของ Coats and Redfern โดยที่ ฟังก์ชัน  $g(\alpha)$  ฟังก์ชันหนึ่งจะได้กราฟๆ หนึ่ง แต่มีจำนวนเส้นตรง 4 เส้น สอดคล้องกับอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 4 ค่า ดังนั้น เราจะได้จำนวนกราฟสอดคล้องกับจำนวนฟังก์ชันที่ใช้พิจารณา (ปกติจะมีโปรแกรมคำนวณทั้ง 35 ฟังก์ชัน เพียงแค่ใส่ค่า  $T$  ที่ค่า  $\alpha$  ต่าง ๆ ที่  $\beta$  ค่าหนึ่ง ๆ แล้วโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าตัวแปรที่ต้องการให้เรียบร้อย) จากนั้นเราจะต้องเลือกฟังก์ชันที่ให้ค่าความเป็นเส้นตรงสูงที่สุด คือมีค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นตรงใกล้ 1 ( $R^2 = 1.000$ ) โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของ  $E_\alpha$  ที่คำนวณได้จากความชันของกราฟเส้นตรงแต่ละเส้นตามอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 4 ค่า (5, 10, 15 และ 20 °C/min) จะต้องได้ค่าใกล้เคียงกับค่าของสมการ Ozawa และมีค่า  $r^2$  หรือ  $R$  เข้าใกล้ 1.0000 ด้วย โดยปกติแล้วจะใช้สมการเพื่อคำนวณหาฟังก์ชันของการสลายตัว สองสมการควบคู่กัน อาทิเช่นอาจใช้ สมการของ Achar ร่วมกับ Coats and Redfern ซึ่งถ้าได้ผลที่สอดคล้องกันแล้วจะเป็นการยืนยันความถูกต้องซึ่งกันและกัน ทำให้ผลที่คำนวณได้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น โดย รูปที่ 2.18 จะแสดงความสัมพันธ์ตามสมการของ Coats and Redfern โดยใช้ฟังก์ชันที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดนั้น คือ กลไกปฏิกิริยาการแพร่แบบสองมิติ ( $D_3$  Two-dimension diffusion)

**ตารางที่ 2.6** ตัวอย่างฟังก์ชันของ  $f(\alpha)$  and  $g(\alpha)$  เพื่อใช้ในการคำนวณหาฟังก์ชันการสลายตัวของสาร

| No.                                                                          | $f(\alpha)$                             | $g(\alpha)$                               | Kinetic function name                 |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>1. Acceleratory equations</b>                                             |                                         |                                           |                                       |
| $P_{3/2}$                                                                    | $\alpha^{-1/2}$                         | $(2/3) \alpha^{3/2}$                      | Power law ( $\alpha = kt^{2/3}$ )     |
| $P_2$                                                                        | $\alpha^{1/2}$                          | $2\alpha^{1/2}$                           | Power law ( $\alpha = kt^2$ )         |
| $P_3$                                                                        | $\alpha^{2/3}$                          | $3\alpha^{1/3}$                           | Power law ( $\alpha = kt^3$ )         |
| <b>2. Chemical decomposition process or mechanism non-invoking equations</b> |                                         |                                           |                                       |
| $F_{1/2}$                                                                    | $2(1-\alpha)^{1/2}$                     | $[1-(1-\alpha)^{1/2}]$                    | Reaction order ( $n = 1/2$ )          |
| $F_{1/3}$                                                                    | $3(1-\alpha)^{2/3}$                     | $[1-(1-\alpha)^{1/3}]$                    | Reaction order ( $n = 1/3$ )          |
| $F_n$                                                                        | $(1-\alpha)^n$                          | $2[1-(1-\alpha)^{1-n}]/(1-n)$             | n-th-order kinetics ( $n \neq 1$ )    |
| <b>3. Sigmoid rate equations or random nucleation and subsequent growth</b>  |                                         |                                           |                                       |
| $A_1, F_1$                                                                   | $(1-\alpha)$                            | $-\ln(1-\alpha)$                          | Avrami-Erofeyev ( $n=1$ )             |
| $A_{3/2}$                                                                    | $(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{1/3}/2$   | $(3/2)[- \ln(1-\alpha)]^{2/3}$            | Avrami-Erofeyev ( $n = 1.5$ )         |
| $A_2$                                                                        | $(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{1/2}$     | $2[- \ln(1-\alpha)]^{1/2}$                | Avrami-Erofeyev ( $n = 2$ )           |
| <b>4. Deceleratory rate equations</b>                                        |                                         |                                           |                                       |
| $R_1, P_1$                                                                   | $(1-\alpha)^0$                          | $\alpha$                                  | One-dimensional advance               |
| $R_2, F_{1/2}$                                                               | $(1-\alpha)^{1/2}$                      | $2[1-(1-\alpha)^{1/2}]$                   | One-half-order                        |
| $R_3, F_{2/3}$                                                               | $[\ln(1-\alpha)]^{2/3}$                 | $3[1-\ln(1-\alpha)]^{2/3}$                | Two-thirds order                      |
| $D_1$                                                                        | $1/\alpha$                              | $\alpha^2/2$                              | One-dimension ( $\alpha = kt^{1/2}$ ) |
| $D_2$                                                                        | $[1/\ln(1-\alpha)]$                     | $\alpha + (1-\alpha)\ln(1-\alpha)$        | Two-dimension diffusion               |
| $D_3$                                                                        | $(1-\alpha)^{2/3}/[1-(1-\alpha)^{1/3}]$ | $(3/2)[1-\ln(1-\alpha)^{1/3}]^2$          | Two-dimension diffusion               |
| $D_4$                                                                        | $(1-\alpha)^{1/3}/[1-(1-\alpha)^{1/3}]$ | $(3/2)[1-(2/3)\alpha - (1-\alpha)^{2/3}]$ | Three-dimension diffusion             |

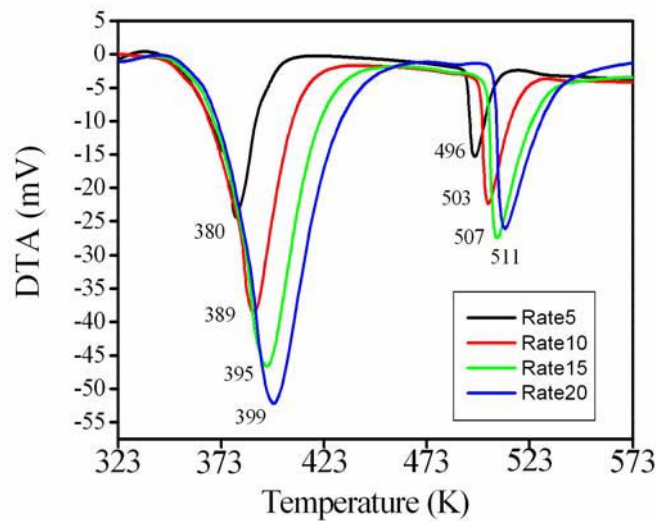
จากเส้นกราฟในรูปที่ 2.19 สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการชน (Pre-exponential factor, A) จากจุดตัดแกน X คือ  $\ln\left(\frac{AR}{\beta E_\alpha}\right)$  ถึงตรงนี้ เราจะได้ตัวแปร triplet kinetic parameter คือ  $E_\alpha$ , A และ ฟังก์ชัน  $g(\alpha)$  ในขั้นตอนสุดท้าย คือการอธิบายความหมายทางกายภาพของตัวแปรดังกล่าว ที่ต้องใช้ความรู้ และการค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องมาอธิบาย ซึ่งปัจจุบันก็มีการพัฒนาแนวความคิดใหม่ ๆ ของนักจลนพลศาสตร์ ที่ได้ศึกษาทางด้านนี้ ได้อธิบายเพิ่มเติมอยู่เรื่อย ๆ และสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ตามสมการของCoats and Redfern โดยใช้ฟังก์ชันที่มีความเป็นไปได้มากที่สุด คือ  $D_3$  model

#### สำหรับกลไกซับซ้อนในการสูญเสียน้ำหนัก

หากกลไกการสลายตัวมีความซับซ้อนหรือค่า  $E_\alpha$  ขึ้นกับค่า  $\alpha$  เราอาจจะพิจารณาได้เพียง  $E_\alpha$  แต่มีวิธีที่สามารถคำนวณหาค่า อันดับปฏิกิริยาและค่าสัมประสิทธิ์การชนของการสลายตัวได้ โดยสามารถเลือกใช้เทคนิคในการวิเคราะห์ได้โดยการใช้พีคของ DTG, DTA หรือ DSC ก็ได้ โดยยกตัวอย่างการพิจารณา ด้วยเทคนิค DTA ของ  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (รูปที่ 2.20) ต้องทำการทดลองที่ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 4 ค่า เช่นกัน



รูปที่ 2.19 DSC เทอร์โมแกรมของ  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ทำการทดลองที่ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 4 ค่า (5, 10, 15 และ 20  $\text{K min}^{-1}$ )

จากนั้น เลือกใช้สมการการคำนวณของ Kissinger โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right)$  กับ  $1000/T$  ซึ่ง  $T$  ได้จากพีคในแต่ละค่า  $\beta$  โดยกราฟที่ได้จะมี 2 เส้น สอดคล้องกับ 2 กลไกของการสลายตัวทางความร้อน จากสมการ Kissinger ความชันของกราฟสามารถคำนวณหาค่า  $E_\alpha$  ได้ ในขณะที่จุดตัดแกนสามารถนำไปคำนวณหาค่า  $A$  ได้ ในส่วนของอันดับปฏิกิริยาการสลายตัวสามารถคำนวณโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$n = \frac{2.5}{\Delta T} \cdot \frac{T_p^2}{E_a / R} \quad (2.49)$$

$$-n = \frac{d \ln[-\ln(1-x)]}{d \ln(\beta)} \quad (2.50)$$

เมื่อ  $n$  คือ ค่าคงของของ Avrami,  $\Delta T$  คือ ความกว้างที่ความสูงกึ่งหนึ่งของพีคที่สูงที่สุดในแต่ละเทคนิค คือ DTG, DTA หรือ DSC,  $\ln(1-x)$  คือ ปริมาณพื้นที่ใต้พีคในขั้นตอนการสลายตัวทางความร้อนแต่ละกลไกภายใต้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิใด ๆ

จากค่าที่ได้ในการพิจารณากลไกการสลายตัวที่ซับซ้อนนี้ ทำให้ได้ตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ทั้ง 3 ตัว ครบถ้วน ซึ่งเหลือเฉพาะการอธิบายผลของตัวแปรทั้งสาม ที่ต้องใช้ความรู้พื้นฐานและข้อมูลจากการค้นคว้ากับงานด้านนี้ที่ได้มีการศึกษามาก่อน มาช่วยอธิบาย และสำหรับสารในกลุ่ม  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และกลุ่มทวิโลหะ คือ  $\text{M}_{1-x}\text{A}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  มีกลไกการสลายตัวทางความร้อนที่มีความซับซ้อนอยู่ สอง กลไก คือ ปฏิกิริยาการสูญเสียน้ำผลึก และปฏิกิริยาการสูญเสียน้ำเนื่องการสลายตัวของไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน ดังนั้นตัวแปรสามทางจลนพลศาสตร์ของกลไกดังกล่าวนี้ จึงน่าสนใจ ที่จะนำมาใช้อธิบาย

## 2.4 หลักการวิเคราะห์เทอร์โมไดนามิกส์ของการสลายตัวทางความร้อน

การศึกษาฟังก์ชันเทอร์โมไดนามิกส์ สามารถคำนวณได้จาก 2 วิธี คือ วิธีแรกคำนวณได้จากเครื่องมือ DSC และวิธีที่สอง คำนวณผ่านตัวแปรจลนพลศาสตร์ (Vlase และคณะ, 2006, Vlaev และคณะ, 2006,2007)

การคำนวณฟังก์ชันเทอร์โมไดนามิกส์จากเครื่อง DSC จากเทอร์โมแกรมของ DSC จะบ่งบอกให้ทราบกลไกการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารตั้งต้น ว่ามีกี่ขั้นตอนและเป็นกลไกการสลายตัวเป็นแบบ ดูดความร้อน (endothermic process) หรือคายความร้อน (exothermic process) จากกลไกการสลายตัวของสารแต่ละตัว พื้นที่ใต้พีคจะบ่งบอกเอนทัลปี (Enthalpy,  $\Delta H$ ) ซึ่งสามารถใช้ค่านี้ไปคำนวณหาตัวแปรเทอร์โมไดนามิกส์อื่นๆ ได้ จากสมการ คือ

$$C_p = \frac{\Delta H}{\Delta T} \quad (2.51)$$

$$\Delta S^* = 2.303C_p \log \frac{T_2}{T_1} \quad (2.52)$$

$$\Delta G^* = \Delta H^* - T_p \Delta S^* \quad (2.53)$$

เมื่อ  $\Delta T = T_2 - T_1$ ,  $T_1$  และ  $T_2$  คือ อุณหภูมิเริ่มต้น และสุดท้ายของพีคการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนบนกราฟ DSC ส่วน  $T_p$  คือ พีคสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนบนกราฟ DSC

การคำนวณผ่านตัวแปรจลนพลศาสตร์จากการพิจารณาจลนพลศาสตร์แบบนอนไอโซเทอร์มอล ตัวแปรที่คำนวณได้ สองตัว คือ สมประสิทธิ์ของการชน หรือ ค่าพรีเอ็กซ์โพเนนเชียล (A, Pre-exponential factor) และพลังงานกระตุ้น (E, activation energy) จะนำมาใช้คำนวณหาฟังก์ชันเทอร์โมไดนามิกส์ เริ่มต้นจาก สมการทฤษฎีเชิงซ้อนก่อกัมมันต์ (transition state) ของ Eyring

$$A = \left( \frac{e \chi k_B T_p}{h} \right) \exp \left( \frac{\Delta S^*}{R} \right) \quad (2.54)$$

เมื่อ  $e = 2.7183$  คือ the Neper number;  $\chi$ : transition factor, เป็นตัวแปรของปฏิกิริยาโมเลกุลเดี่ยว;  $k_B$ : Boltzmann constant;  $h$ : Plank constant, and  $T_p$  คือ อุณหภูมิที่ตำแหน่งพีคสูงสุดของกราฟ DTA. จัดสมการใหม่ได้สมการ:

$$\Delta S^* = R \ln \left( \frac{Ah}{e \chi k_B T_p} \right) \quad (2.55)$$

จาก

$$\Delta H^* = E^* - RT_p, \quad (2.56)$$

เมื่อ  $E^*$  คือพลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้จากจลนพลศาสตร์ เมื่อคำนวณค่า เอนทาลปี (Enthalpy,  $\Delta H$ ) และเอนโทรปี (Entropy,  $\Delta S$ ) ได้แล้ว ก็สามารถนำค่าทั้งคู่มาคำนวณหา พลังงานอิสระกิบส์ (Gibb' free energy,  $\Delta G$ ) จากสมการความสัมพันธ์ (2.56-2.58)

จากตัวแปรเทอร์โมไดนามิกส์ทั้งสาม จะบอกให้ทราบข้อมูลทางทฤษฎีเกี่ยวกับกลไกการสลายตัวของความร้อนในแต่ละกลไกที่เกิดขึ้นสำหรับสารแต่ละชนิด คือ ค่าเอนทาลปี (Enthalpy,  $\Delta H$ ) หากค่าเป็นบวก บ่งบอก กระบวนการสลายตัวแบบดูดความร้อน หากเป็นค่าติดลบ บ่งบอก กระบวนการสลายตัวแบบคายความร้อน เอนโทรปี (Entropy,  $\Delta S$ ) หากค่ามากกว่าศูนย์ บ่งบอกความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างสาร ลักษณะการหมุนของพันธะ การสั่นของพันธะภายในโมเลกุล ก่อนที่จะเกิดการสลายตัวของความร้อน ทำให้ทราบว่าปฏิกิริยาการสลายตัวเกิดยาก หรือง่ายอย่างไร สารก่อนสลายตัวกับสารหลังสลายตัวไปนั้น สารใดมีความเป็นระเบียบทางโครงสร้างมากกว่า สำหรับ พลังงานอิสระกิบส์ (Gibb' free energy,  $\Delta G$ ) บ่งบอกให้ทราบว่ากลไกการสลายตัวของความร้อนนั้นสามารถเกิดขึ้นได้เอง หรือไม่ได้เอง และอยู่ใกล้ หรือไกลจากสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยพิจารณาจากค่าที่คำนวณได้ว่า น้อยกว่า เท่ากับ หรือมากกว่าศูนย์หรือไม่ ตามลำดับ

## 2.5 หลักการคำนวณพลังงานสลายพันธะด้วยเทคนิคทางความร้อน

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตำแหน่งสูงสุดของการสลายตัวของความร้อนและระดับพลังงานการสั่นของพันธะภายในโมเลกุลของสาร เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง โดยการสลายพันธะ จะเกิดจากการสั่นเนื่องจากความร้อนที่ได้รับทำให้สั่นพันธะแบบ Morse oscillator และการสั่นแบบฮาร์โมนิก แบบควบคู่ไม่เป็นเส้นตรง (coupled non-linear harmonic oscillators) จากสมการฟังก์ชันย่อยของระดับการสั่นของโมเลกุล (the molecular vibrational partition functions)

$$Z_v = \frac{1}{1 - e^{-x}} \quad (2.57)$$

จะสัมพันธ์กับฟังก์ชันเทอร์โมไดนามิกส์ ของสถานะกระตุ้นก่อกัมมันต์ คือ (Vase และคณะ, 2006)

$$H = k_B T^2 \frac{\partial \ln Z_v}{\partial T} \quad (2.58)$$

แล้วจะได้ว่า

$$S = k_B \left[ \ln Z_v + T \frac{\partial \ln Z_v}{\partial T} \right] \quad (2.59)$$

จากสมการ Eq. (2.59),  $x = \Theta/T$  is dimensionless และเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ

$$\Theta = \frac{hc}{k_B} \omega \quad (2.60)$$

เมื่อ  $c$  คือความเร็วแสง and  $\omega$  คือ ความยาวคลื่นของ the discussed oscillation ถ้า  $T$  มีค่าสูงมากพอ,  $e^{-x} \approx 1 + x$  ดังนั้น  $Z_v = 1/x$  และ  $\partial \ln Z_v / \partial T = 1/T \approx 0$ . ดังนั้นจะได้สมการใหม่ คือ

$$\Delta S = b\Delta H + c \quad (2.61)$$

$$k_B = k_B \left[ \ln \frac{T}{\Theta} + 1 \right] \quad (2.62)$$

จะได้

$$T = \frac{hc}{k_B} \omega \quad (2.63)$$

จากสมการนี้ ค่า  $T$  คืออุณหภูมิที่ตำแหน่งพีคของการสลายตัวทางความร้อนโดยอาศัยจากเทอร์โมแกรมของเทคนิค DTA หรือ DTG โดยจัดสมการใหม่จะได้

$$\omega_{cal} = \frac{k_B}{hc} T = 0.695T \quad (2.64)$$

จากนั้น ความถี่ของการสลายพันธะคำนวณได้จาก สมการ  $\omega_{sp} = q\omega_{cal}$  เมื่อ  $q$  คือ ค่าควอนตัม ซึ่งมีค่าตั้ง 1 ขึ้นไป  $q \in N = 1, 2, 3, \dots$  จากความถี่ของการสลายพันธะที่คำนวณได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสเปกตรัม FTIR ของสารก่อนการสลายตัวและของสารหลังการสลายตัว เพื่อระบุชนิดพันธะที่สูญหายไปของสารในแต่ละกลไก ผลที่ได้นี้ จะนำมาใช้ระบุชนิดปฏิกิริยาของการสลายตัวไปในแต่ละกลไก อาทิเช่น การสูญเสียโมเลกุลน้ำ เรียกว่า ดีไฮเดรชัน (dehydration reaction) สูญเสียไฮโดรเจนในไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแอนไอออน ( $H_2PO_4^-$ ) เรียกว่า ดีโปรโตเนชัน (deprotonation reaction of dihydrogen phosphate) เป็นต้น

## บทที่ 3 วิธีการทดลอง (Experiment)

### 3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์สารด้วยเทคนิคที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว พร้อมไม่ก่อให้เกิดอันตรายในขณะการเตรียม สำหรับสารที่สนใจศึกษา ได้แก่ สารในกลุ่ม ทวิโลหะ(II) ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรต (Binary metal (II) dihydrogen phosphate hydrates,  $M_{1/2}A_{1/2}(II)(H_2PO_4) \cdot nH_2O$ ) เมื่อ M หรือ A คือ Ca, Mn, Fe, Co, Cu, Ni, Zn หรืออื่น ๆ โดยงานวิจัยนี้พยายามเตรียมสาร 3 ตัว คือ  $Mn_{1/2}Ca_{1/2}(II)(H_2PO_4) \cdot nH_2O$ ,  $Mn_{1/2}Fe_{1/2}(II)(H_2PO_4) \cdot 2H_2O$  และ  $Co_{1/2}Fe_{1/2}(II)(H_2PO_4) \cdot nH_2O$  จากนั้นพบว่าสารในกลุ่มนี้ สามารถสลายตัวไปเป็นสารกลุ่ม ทวิโลหะ(II) ไฮโคลเตตระฟอสเฟต (binary cyclotetraphosphates,  $MAP_4O_{12}$ ) ที่สภาวะอุณหภูมิสูงค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) และเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics) ของการสลายตัวทางความร้อนจากสารกลุ่ม ทวิโลหะ(II) ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรต ไปเป็นสารกลุ่ม ทวิโลหะ(II) ไฮโคลเตตระฟอสเฟต อีกทั้งยังได้นำเสนอการศึกษาสมการการคำนวณหาพลังงานทางความร้อนที่ส่งผลต่อการสลายพันธะเคมีภายในโมเลกุลของสารไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ไฮเดรต เพื่อใช้ระบุหรือจำแนกกลไกปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนในแต่ละขั้นตอนที่เกิดขึ้นสำหรับสารแต่ละตัว ซึ่งจากข้อมูลจะนำมาใช้สำหรับการสังเคราะห์สารกลุ่มทวิโลหะ(II) ไฮโคลเตตระฟอสเฟตอีกวิธีหนึ่ง ดังนั้นเมื่อเสร็จสิ้นโครงการวิจัย จึงได้สารเพิ่มอีก 3 ตัว ได้แก่  $MnCaP_4O_{12}$ ,  $MnFeP_4O_{12}$  และ  $CoFeCoP_4O_{12}$  โดยการเตรียมทั้งหมดในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองอย่างละ 3 ขั้ว

จากสารที่เตรียมขึ้นได้ทั้งหมด 6 ตัว จะถูกนำไปตรวจสอบเอกลักษณ์ทางกายภาพและทางเคมีด้วยเทคนิคต่าง ๆ เรียงลำดับ คือ โดยสารกลุ่มไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ไฮเดรต 3 ตัว จะนำไปศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค การวิเคราะห์เชิงความร้อน Thermogravimetry analysis (TG/DTG/DTA) และ Differential scanning calorimetry (DSC) เพื่อใช้ข้อมูลสำหรับระบุอุณหภูมิสูงสุดเพื่อการนำสารดังกล่าวไปเผาให้สลายตัวไปเป็นสารกลุ่มไฮโคลเตตระฟอสเฟต อีก 3 ตัว เมื่อได้สารครบ 6 ตัวแล้ว ค่อยนำสารทั้งหมดไปศึกษาด้วยเทคนิคต่าง ๆ ต่อไป เริ่มต้นจาก การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของสารทั้งหมด คือ ตรวจสอบปริมาณน้ำในโครงผลึก ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เชิงความร้อนที่กล่าวมาข้างต้น ตรวจสอบปริมาณโลหะ ด้วยเทคนิค Atomic absorption spectrophotometer (AAS) ตรวจสอบปริมาณฟอสฟอรัส โดยการวิเคราะห์เทียบสี (Colorimetric analysis) ด้วยเทคนิคสารประกอบเชิงซ้อนโมลิบโดฟอสเฟต (Molybdophosphate complex) ตรวจสอบเอกลักษณ์รูปแบบการสั่นของพันธะภายในโมเลกุล โดยสาร 2 กลุ่มนี้ จะมีรูปแบบการสั่นพันธะของแอนไอออน  $H_2PO_4^-$  และ  $H_2O$  สำหรับสารกลุ่ม  $M_{1/2}A_{1/2}(II)(H_2PO_4) \cdot nH_2O$  และแอนไอออน  $P_4O_{12}^{4-}$  สำหรับกลุ่ม  $MAP_4O_{12}$  ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบฟูเรียร์แทรนสฟอร์ม อินฟราเรด (Vibrational spectroscopy; Fourier transform infrared, FTIR) ตรวจสอบเอกลักษณ์ทางโครงสร้างและขนาดผลึก ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD) ตรวจสอบฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ

ส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) และตรวจสอบสมบัติแม่เหล็กและสมบัติเชิงแสงด้วยเครื่องมือ VSM และ UV-Vis Near IR

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ชุดเครื่องแก้ว
2. โถดูดความชื้น (Desicator)
3. Hot plate stirrer, Heidolph MR 3001
4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Sartorius), Scaltec SBC -31
5. pH meter (Metrom)
6. ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ (Suction pump), B'U'CHI Type B – 169
7. Oven (Fisher Scientific)
8. เตาเผา (Furnace), Isotemp Muffle furnace, Fisher Scientific
9. Atomic absorption spectrophotometer, AAS (Perkin Elmer, Analyst100),
10. Solid state UV-Vis near IR, A Shimadzu UV-3100 spectrophotometer
11. Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR), Spectrum GX, Perkin-Elmer
12. Thermogravimetric/differential thermal analyzer (TG-DTA), Pyris  
Diamond TG/DTA, Perkin Elmer apparatus และ Alumina pan
13. X-Ray powder diffractometer (XRD), Bruker AXS, D8 Advance, Germany
14. Differential scanning calorimetry (DSC), A Perkin Elmer Diamond
15. Scanning electron microscope (SEM), LEO SEM VPI450

### 3.3 สารเคมี

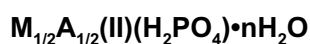
1. Acetone,  $C_3H_6O$ , 99.8%, CARLO ERBA
2. Phosphoric acid,  $H_3PO_4$ , 86.4%, J.T.Baker
3. Manganese powder, Mn(c), 99%, Riedel-deHaen
4. Calcium(II) carbonate,  $CaCO_3$ , >98%, Fluka
5. Cobalt(II) carbonate,  $CoCO_3$ , Analyze reagent grade, Baker
6. Iron powder (Fe (c), 98%, Riedel – deHaën.
7. Potassium bromide, KBr, spectroscopy grade, Jasco
8. Aluminium(III) Oxide,  $Al_2O_3$ , 99.99%, Aldrich
9. Water (Deionized water, DI)
10. Methanol,  $CH_3OH$ , Carlo Erba reagenti.
11. Silica gel, Merck.
12. Sodium hydroxide, NaOH, 98%, Carlo Erba reagent.

13. Standard solution of Mn 1000 ppm, Merck.
14. Standard solution of Fe 1000 ppm, Merck.
15. Standard solution of Ca 1000 ppm, Merck.
16. Standard solution of Co 1000 ppm, Merck.
17. Hydrochloric acid 38 %, J.T.Baker.
18. Nitric acid, HNO<sub>3</sub>, 65 %, Riedel – deHaën.

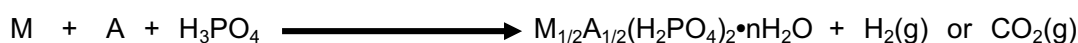
### 3.4 วิธีการสังเคราะห์

การสังเคราะห์สารจะเน้นกระบวนการที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว และไม่ก่อให้เกิดอันตราย โดยจะแบ่งการการสังเคราะห์ออกเป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่ม  $M_{1/2}A_{1/2}(II)(H_2PO_4) \cdot nH_2O$  และกลุ่ม  $MAP_4O_{12}$  โดยมีกระบวนการดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 การสังเคราะห์สารกลุ่ม Binary metal dihydrogen phosphate hydrate



ปฏิกิริยาทั่วไป



เมื่อ M หรือ A = Mn(c), Fe(c), CaCO<sub>3</sub> หรือ CoCO<sub>3</sub>

#### กระบวนการ

1. ชั่งสารตั้งต้นสองชนิด คือ M และ A ตามอัตราส่วนโมล 1: 1 ใส่ปิกเกอร์ขนาด 100 mL แล้วบดละเอียดผสมให้เข้ากันเป็นอย่างดี ค่อยนำไปเติมอะซีโตนปริมาตร 20 mL

2. เติม 5 mL ของ 70% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ลงในปิกเกอร์ข้อ 1 อย่างช้าๆ พร้อมคนด้วยแท่งแก้วคนสารตลอดเวลาอย่างสม่ำเสมอจนกระทั่งของผสมจะปรากฏเป็นของแข็ง(หนืด)และมีฟองแก๊สเกิดขึ้น แต่จะถูกป้องกันไม่ให้แพร่สู่อากาศภายนอกด้วยอะซีโตน ปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ โดยสังเกตได้จากไม่เกิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นอีก ใช้เวลาประมาณ 2-30 นาที ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและอัตราส่วนจำนวนโมลของสารที่ใช้

3. เมื่อปฏิกิริยาในข้อ 2 เกิดอย่างสมบูรณ์และสิ้นสุดเรียบร้อยแล้ว จะนำมาแยกตะกอนออกจากสารละลายด้วยการกรองโดยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ และทำการล้างตะกอนที่ได้ด้วยอะซีโตน (Acetone) ประมาณ 2-3 ครั้ง (ห้ามล้างตะกอนด้วยน้ำ เนื่องจากตะกอนมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี)

4. วางสารที่กรองได้ทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศประมาณ 24 ชม. จะได้สารที่เป็นผงละเอียดไม่เหนียวติดกันเป็นก้อนและมีสีที่สม่ำเสมอ จากนั้นนำสารที่ได้มาชั่งน้ำหนักเพื่อนำไปคำนวณหา %yield ต่อไป

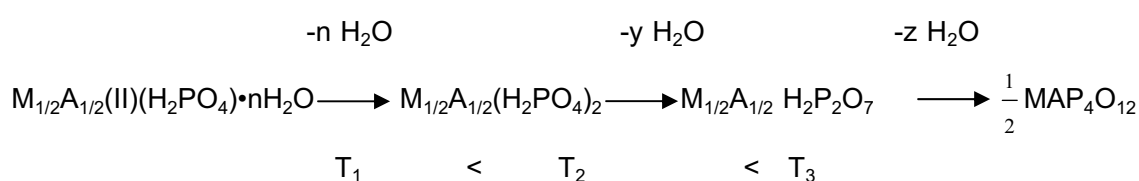
5. เก็บบรรจุสารที่เตรียมได้ลงในขวดแก้วหรือถุงพลาสติกแล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น สำหรับงานวิจัยนี้เตรียมสารได้ 3 ตัว คือ  $Mn_{1/2}Ca_{1/2}(II)(H_2PO_4) \cdot H_2O$ ,  $Mn_{1/2}Fe_{1/2}(II)(H_2PO_4) \cdot 2H_2O$

และ  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{II})(\text{H}_2\text{PO}_4) \cdot n\text{H}_2\text{O}$  โดยสารเหล่านี้จะถูกตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิคต่าง ๆ เพื่ออธิบายสมบัติทางเคมีและกายภาพต่อไป

### 3.4.2 การสังเคราะห์สารกลุ่ม Binary cyclo-tetraphosphate $\text{MAP}_4\text{O}_{12}$

จากข้อมูลการวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเทคนิค TG-DTA ทำให้ได้อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา สารกลุ่ม  $\text{M}_{1/2}\text{A}_{1/2}(\text{II})(\text{H}_2\text{PO}_4) \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ให้สลายตัวไปเป็นสารกลุ่ม  $\text{MAP}_4\text{O}_{12}$  คือ 873 K เป็นเวลา 3 ชม. โดยมีกลไกการสลายตัวทางความร้อนดังนี้

**ปฏิกิริยาทั่วไป**



โดยที่  $0 < (n + y + z) \leq 4$  สำหรับ M or A = Ca, Mn, Fe, Co)

#### กระบวนการ

1. ชั่งสารกลุ่ม  $\text{M}_{1/2}\text{A}_{1/2}(\text{II})(\text{H}_2\text{PO}_4) \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ประมาณ 2 กรัม (ให้น้ำหนักที่แน่นอน ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ใส่ลงในถ้วยกระเบื้อง (Crucible) ที่แห้งสนิทปราศจากความชื้น และทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว
2. นำถ้วยกระเบื้อง (Crucible) ที่บรรจุสารจากข้อ 1 ไปเผาที่อุณหภูมิ 873 K แบบสัมผัส อากาศ ในเตาเผาเป็นเวลา 3 ชม. เมื่อเผาเสร็จ รอจนอุณหภูมิของสารเย็นลงแล้วจึงนำออกจากเตาเผา
4. ชั่งน้ำหนักของสารที่หายไป เพื่อนำไปคำนวณหาโมเลกุลของน้ำและเกลือที่เหลืออยู่
5. บรรจุสารใส่ขวดแก้วหรือถุงพลาสติกแล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีต่อไป

### 3.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารที่ศึกษา

#### 3.5.1 การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี

การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในสารที่เตรียมได้ สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณน้ำ ในโครงผลึก วิเคราะห์จากเทอร์โมแกรมของ TG วิเคราะห์ปริมาณโลหะวิเคราะห์ด้วยการเตรียมตัวอย่าง ด้วยการละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.0126 M แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์ปริมาณ โลหะด้วยเทคนิค Atomic absorption spectrophotometer (AAS) สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ ฟอสฟอรัส ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเทียบสี โดยหลักการโมลิบโดฟอสเฟต

### 3.5.2 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน

นำสารกลุ่ม  $M_{1/2}A_{1/2}(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$  มาศึกษาพฤติกรรมของการสลายตัวทางความร้อน เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการสลายตัวของสารและอุณหภูมิสูงสุดที่สารสลายตัวอย่างสมบูรณ์ เพื่อนำอุณหภูมินี้ไปใช้ในการเผาสารกลุ่ม  $M_{1/2}A_{1/2}(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$  ให้สลายตัวไปเป็นสารกลุ่ม  $MAP_4O_{12}$  ได้ด้วยเครื่อง Thermogravimetric/Differential Thermal Analyzer, Pyris Dimond TG/DTA, Perkin Elmer โดยใส่สารตัวอย่างที่บดละเอียดและสารอ้างอิง (Aluminum oxide,  $Al_2O_3$ ) ลงใน Alumina pan โดยแต่ละ pan ต้องมีน้ำหนักผลรวมใกล้เคียงกัน ซึ่งน้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใส่อยู่ในช่วง 5-6 mg กำหนดสภาวะของการวิเคราะห์ คือ ความดันของแก๊ส 3 bar ช่วงอุณหภูมิในการวิเคราะห์ 303-1273 K อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ  $10\text{ K min}^{-1}$  และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน  $100\text{ mL min}^{-1}$

### 3.5.3. การวิเคราะห์รูปแบบการสั่นขององค์ประกอบย่อยภายในโมเลกุล

นำสารทั้ง  $M_{1/2}A_{1/2}(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$  และ  $MAP_4O_{12}$  ที่ได้ไปบันทึกสเปกตรัมการสั่นด้วยเครื่อง FTIR spectrum GX Perkin-Elmer Spectrophotometer โดยใช้เทคนิค KBr-pellet มีขั้นตอนดังนี้ ใส่สารตัวอย่างลงในโถงบดให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันกับ KBr ในอัตราส่วน sample : KBr เป็น 1:10 แล้วอัดให้เป็นแผ่นบางๆ ด้วย Hand press จากนั้นใส่ลงใน disc holder และทำการบันทึกสเปกตรัมการสั่น โดยกำหนดสภาวะของการวิเคราะห์ คือ บันทึกความยาวคลื่น (Wavenumber) ในช่วง  $4000-370\text{ cm}^{-1}$  จำนวนครั้งการรัน (Scan Number) เท่ากับ 4 และ Resolution :  $4\text{ cm}^{-1}$

### 3.5.4 การวิเคราะห์ทางโครงสร้าง

นำสารที่ได้ทั้ง 6 ตัว มาตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อหาค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (a, b, c และมุม  $\beta$ ) และคำนวณขนาดผลึกด้วยสมการ Scherrer จากการเปรียบเทียบ XRD patterns ของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน ด้วยเครื่อง X-Ray powder diffractometer โดยบดสารให้ละเอียดแล้วใส่ลงใน sample holder และทำการวิเคราะห์ต่อไป โดยกำหนดสภาวะของการวิเคราะห์ ดังนี้ Voltage : 40 kV; Current : 35 mA

#### 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

### 3.5.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

นำสารที่ได้ทั้ง 6 ตัว ที่สังเคราะห์ขึ้นได้นี้ มาตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยการเตรียมตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ด้วยการเคลือบทองแล้วค่อยวิเคราะห์ด้วย SEM using LEO SEM VP1450 และ LEO SEM VP1455

### 3.6 การศึกษาจลนพลศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์ของการสลายตัวทางความร้อน

#### 3.6.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์

การศึกษาจลนพลศาสตร์ จะศึกษาอัตราการสลายตัวทางความร้อนของสารตั้งต้นที่เป็นไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรต บนพื้นฐานเครื่องมือการวิเคราะห์เชิงความร้อน Thermogravimetry, TG; differential thermogravimetry, DTG; and differential thermal analysis, DTA) ยี่ห้อ a Pyris Diamond Perkin Elmer apparatus ทำการวิเคราะห์ในสภาพการเผาไหม้ด้วยอากาศออกซิเจนในอัตราการไหล (Flow rate)  $100 \text{ mL min}^{-1}$ , อุณหภูมิการวิเคราะห์ในช่วง 303-1273 K สารอ้างอิงมาตรฐานเป็น  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  powder และอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Heating rate) สำหรับการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ 4 ค่า คือ 5, 10, 15 และ  $20 \text{ K min}^{-1}$  ปริมาณน้ำหนักของสารสำหรับการวิเคราะห์ควรอยู่ในช่วง 6.0-10.0 mg

การเก็บข้อมูลอุณหภูมิ (T) และปริมาณสัดส่วนโมลของสารที่สูญหายไป (extent of conversion,  $\alpha$ ) สำหรับการวิเคราะห์ทางจลนพลศาสตร์ จะสัมพันธ์กับสมการในการคำนวณเพื่อหา ค่าพลังงานกระตุ้น  $E_a$  และฟังก์ชันรูปแบบการสลายตัวทางความร้อน  $n$  หรือฟังก์ชัน  $f(\alpha)$  หรือ  $g(\alpha)$  โดยอธิบายได้ดังนี้

สมการคำนวณพลังงานกระตุ้นของการสลายตัวทางความร้อนสำหรับงานวิจัยนี้ เลือกใช้สมการของ Ozawa และ Kissinger ทั้งสองสมการเป็นสมการเชิงเส้นตรงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\beta$  กับ  $1000/T$  และ  $\ln\beta/T^2$  กับ  $1000/T$  โดย  $T$  ที่ค่า  $\alpha$  (0.0-1.0) ใดๆ สามารถเก็บข้อมูลได้จากเทอร์โมแกรม TG สำหรับกรณีที่การสลายตัวทางความร้อนมีกลไกที่ไม่ซับซ้อน หากมีกลไกที่มีความซับซ้อนจะเก็บ  $T$  ของพีคของการสลายตัวจะเก็บจากเทอร์โมแกรม DTG หรือ DTA ในกรณีแรกจะคำนวณได้เฉพาะ ค่าพลังงานกระตุ้นจากความชันของเส้นตรงแต่ละเส้น แต่ในกรณีที่สองสามารถคำนวณได้ทั้งพลังงานกระตุ้นจากความชันของเส้นกราฟและสัมประสิทธิ์การชน หรือพรีเอกซ์โปเนนเชียล (A) จากจุดตัดแกน X

สมการคำนวณฟังก์ชันรูปแบบการสลายตัวทางความร้อน  $n$  หรือฟังก์ชัน  $f(\alpha)$  หรือ  $g(\alpha)$  สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้สมการ Avrami, Coats-Redfern และ Achar โดยการเลือกใช้สมการใดในการพิจารณาขึ้นอยู่กับความเฉพาะเจาะจงของเทอร์โมแกรมของสารที่ศึกษา หากมีความซับซ้อนของกลไกการสลายตัวทางความร้อน จะพิจารณาหาเฉพาะฟังก์ชันรูปแบบการสลายตัวทางความร้อน  $n$  ที่เป็นค่าคงที่ของ Avrami แต่ถ้าหากกลไกการสลายตัวที่มีเทอร์โมแกรมที่ชัดเจน สมการคำนวณฟังก์ชัน  $f(\alpha)$  หรือ  $g(\alpha)$  และสัมประสิทธิ์การชน หรือพรีเอกซ์โปเนนเชียล (A) จะถูกคำนวณจากสมการ Coats-Redfern และ Achar โดยฟังก์ชันที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดพิจารณาจากสัมประสิทธิ์ความเป็นเส้นตรง (Linear correlation coefficient) ที่เข้าใกล้ 1 มีค่าพลังงานกระตุ้นใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากสมการ Ozawa และ Kissinger มากที่สุด พร้อมมีค่าเบี่ยงเบนของค่าทั้งสองน้อยที่สุด

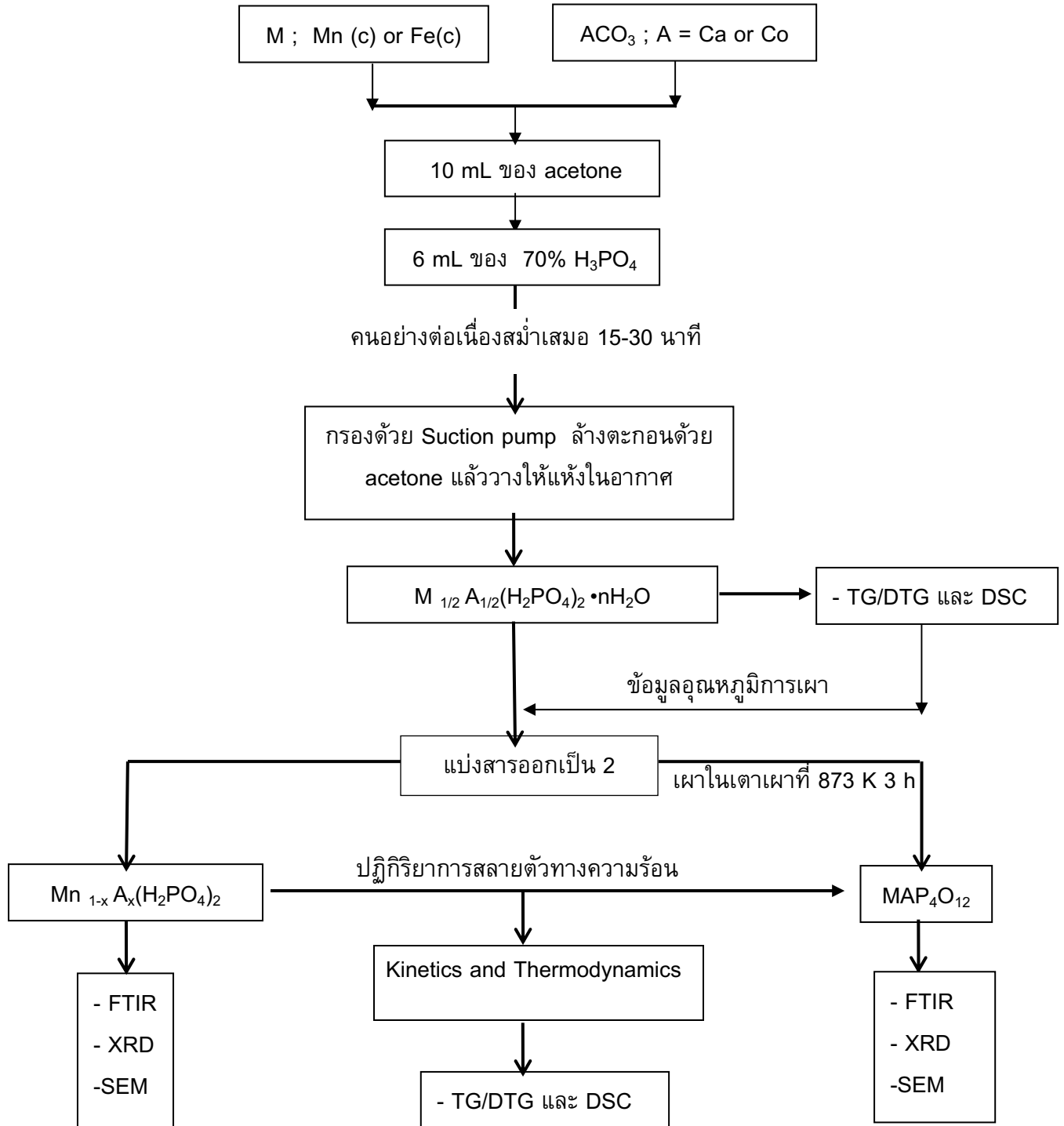
### 3.6.2 การศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์

การคำนวณหาฟังก์ชันเทอร์โมไดนามิกส์  $\Delta H$ ,  $\Delta G$  และ  $\Delta S$  สามารถคำนวณได้ 2 วิธี คือ วิธีแรกได้จากการทดลองด้วยเครื่อง DSC ยี่ห้อ A Perkin Elmer Pyris One สภาวะการวิเคราะห์ในสภาพแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหลของแก๊ส  $100 \text{ mL min}^{-1}$  อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ  $10 \text{ K min}^{-1}$  ช่วงอุณหภูมิคือ  $303\text{-}823 \text{ K}$  พื้นที่ใต้กราฟสามารถนำมาคำนวณหา ฟังก์ชัน  $\Delta H$  แล้วค่อยนำค่านี้ไปคำนวณหาฟังก์ชันอื่น ตามสมการพื้นฐานเทอร์โมไดนามิกส์ต่อไป

วิธีที่สองได้จากการคำนวณ โดยการวิเคราะห์ฟังก์ชันทางจลนพลศาสตร์ จะได้ตัวแปร A ซึ่งจะเป็นตัวแปรที่จะถูกนำมาคำนวณหาฟังก์ชัน  $\Delta S$  ตามสมการที่ 2.51-2.56 จากนั้นค่อยนำค่าฟังก์ชัน  $\Delta S$  คำนวณหาฟังก์ชันตัวอื่นที่เหลือ

### 3.6.3 การคำนวณพลังงานความร้อนเพื่อทำให้พันธะเคมีสลายตัว

การคำนวณพลังงานพันธะของการสลายตัวทางความร้อน ถูกพิจารณาจากอุณหภูมิของการสลายตัว โดยเลือกจากพีคของกลไกการสลายตัวของแต่ละกลไก เทคนิคที่ใช้ในการคำนวณ สามารถเลือกได้หลายเทคนิคตามความเหมาะสมและเจตนาของผู้วิเคราะห์ ได้แก่ พีคจาก DTG, DTA หรือ DSC โดยสภาวะการทดลองมักจะใช้ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $10 \text{ K min}^{-1}$  เมื่อได้พีคแล้ว จะถูกนำมาคำนวณตามสมการที่ 2.64 ค่าพลังงานการสลายพันธะที่คำนวณได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสเปกตรัม FTIR ของสารก่อนการสลายตัว เพื่อจำแนกพันธะที่แตกออก แล้วส่งผลให้โมเลกุลหรือไอออนใดๆ ภายในโครงสร้างสารนั้นหลุดออกไป จึงเป็นข้อมูลที่ระบุให้ทราบว่า ณ อุณหภูมินั้น มีการสลายตัวออกไปของอะไร จึงทำให้ระบุกลไกการสลายตัว ณ อุณหภูมินั้นได้ว่าเป็นกลไกปฏิกิริยาชนิดใด อาทิเช่น กลไกปฏิกิริยากำจัดน้ำ(Dehydration reaction) หรือ กลไกปฏิกิริยากำจัดคาร์บอนेट (Decarbocination) เป็นต้น



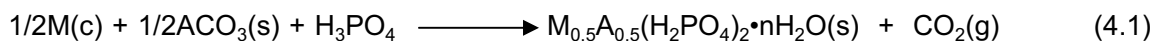
รูปที่ 3.1 แผนภาพการเตรียมสาร การตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะของสาร การศึกษาจลนพลศาสตร์ และเทอร์โมไดนามิกส์การสลายตัวทางความร้อน

## บทที่ 4 ผลการทดลอง

### (Experimental results)

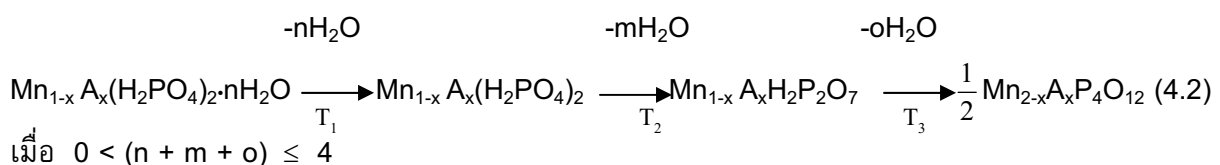
#### 4.1 ผลการสังเคราะห์ (Synthesis results)

จากการเตรียมสารสำหรับงานวิจัยนี้ ได้พยายามเตรียมสารในกลุ่ม ทวิโลหะไดไฮโดรเจน ฟอสเฟต ไฮเดรต(Binary metal dihydrogen phosphate hydrate) ที่มีสูตรเคมีทั่วไป คือ  $M_{0.5}A_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$  โดยเตรียมขึ้นจากสารตั้งต้นกลุ่ม โลหะคาร์บอเนต ( $MCO_3$ ) และโลหะ(Metal(c)) ทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริก ในสารตัวกลางเป็นอะซิโตน ในสภาวะอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของปฏิกิริยาเองที่เกิดขึ้นในเวลาที่รวดเร็วประมาณ 10 นาที ดังปฏิกิริยา



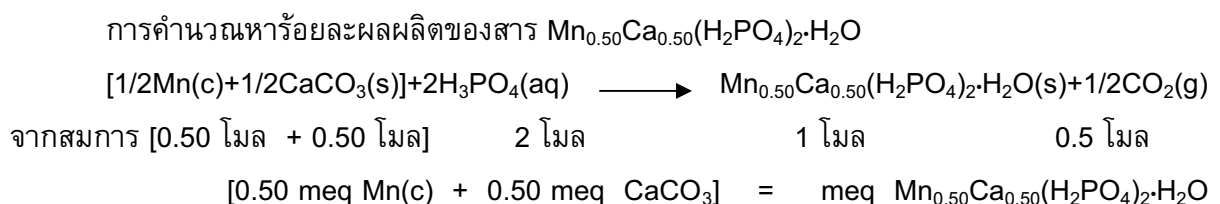
สำหรับงานวิจัยนี้ ทำการเตรียมสาร 3 ตัวคือ  $Mn_{0.5}Ca_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ ,  $Mn_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ , และ  $Fe_{0.5}Co_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  จากสารโลหะต่างๆ คือ  $Mn(c)$ ,  $CaCO_3$ ,  $Fe(c)$ ,  $CoCO_3$  สามารถคำนวณร้อยละผลผลิตได้ตามภาคผนวกที่ 2 และสรุปผลที่ได้ในตารางที่ 4.1

สำหรับสารอีกกลุ่มที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ เกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของสารในกลุ่มทวิโลหะไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ไฮเดรต (Binary metal dihydrogen phosphate hydrate) ที่สภาวะอุณหภูมิ มากกว่า  $400^\circ C$  โดยสารกลุ่มนี้มีสูตรทั่วไป คือ  $(MA)P_4O_{12}$  เรียกว่า ทวิโลหะไซโคลเตตระฟอสเฟต (Binary cyclotetraphosphates) ปฏิกิริยารวมทั่วไปของการสลายตัวทางความร้อน คือ



สำหรับงานวิจัยนี้ได้สารตั้ง 3 ตัว คือ  $Mn_{0.5}Ca_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ ,  $Mn_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ , และ  $Fe_{0.5}Co_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  ที่เป็นสารตั้งในการเตรียมสาร ทวิโลหะไซโคลเตตระฟอสเฟต (Binary cyclotetraphosphates) อีก 3 ตัว คือ  $MnCaP_4O_{12}$ ,  $MnFeP_4O_{12}$ , และ  $FeCoP_4O_{12}$  ร้อยละผลผลิตสามารถคำนวณได้ดังตัวอย่างด้านล่าง และสรุปผลที่ได้ใน ตารางที่ 4.1

**ตัวอย่างการคำนวณหาร้อยละผลผลิตที่ได้**



$$0.50 \left[ \frac{\text{g Mn(c)}}{\text{MW Mn(c)}} \right] + 0.50 \left[ \frac{\text{g CaCO}_3}{\text{MW CaCO}_3} \right] = \left[ \frac{\text{g Mn}_{0.50}\text{Ca}_{0.50}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}}{\text{MW Mn}_{0.50}\text{Ca}_{0.50}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}} \right]$$

$$\text{g Mn}_{0.88}\text{Ca}_{0.12}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \left\{ 0.50 \left[ \frac{\text{g Mn(c)}}{\text{MW Mn(c)}} \right] + 0.50 \left[ \frac{\text{g CaCO}_3}{\text{MW CaCO}_3} \right] \right\} \times$$

$$\text{MW Mn}_{0.50}\text{Ca}_{0.50}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$$

$$= \left[ 0.50 \left[ \frac{0.5494}{54.95} \right] + 0.50 \left[ \frac{1.0101}{100.04} \right] \right] \times 277.47$$

$$= 2.7887 \text{ กรัม}$$

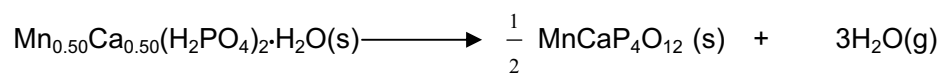
$$\% \text{ yield} = \frac{\text{g Mn}_{0.50}\text{Ca}_{0.50}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O (observed)}}{\text{g Mn}_{0.50}\text{Ca}_{0.50}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O (cal.)}} \times 100$$

$$= \frac{1.2376}{2.7887} \times 100 = 44.38 \%$$

หมายเหตุ : ส่วนสารในอีกสองชนิดก็สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกันดังแสดงผลไว้ในตารางที่ 4.1

ตัวอย่างการคำนวณหาร้อยละและผลผลิตที่ได้ แสดงดังนี้

การคำนวณหาร้อยละผลผลิตของสาร  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$



จากสมการ                      1 โมล                                              0.5 โมล                                              3 โมล

$$0.5 \text{ meq Mn}_{0.50}\text{Ca}_{0.50}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O} = \text{meq MnCaP}_4\text{O}_{12}$$

$$0.5 \times \left[ \frac{\text{g Mn}_{0.50}\text{Ca}_{0.50}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}}{\text{MW Mn}_{0.50}\text{Ca}_{0.50}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}} \right] = \left[ \frac{\text{g MnCaP}_4\text{O}_{12}}{\text{MW MnCaP}_4\text{O}_{12}} \right]$$

$$\text{g MnCaP}_4\text{O}_{12} = 1/2 \left[ \frac{\text{g Mn}_{0.50}\text{Ca}_{0.50}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}}{\text{MW Mn}_{0.50}\text{Ca}_{0.50}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}} \right] \times \text{MW MnCaP}_4\text{O}_{12}$$

$$= \frac{1}{2} \times \frac{2.1220}{277.47} \times 410.94$$

$$= 1.5714 \text{ กรัม}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ yield} &= \left[ \frac{\text{MnCaP}_4\text{O}_{12} (\text{observed})}{\text{MnCaP}_4\text{O}_{12} (\text{Cal.})} \right] \times 100 \\ &= \frac{1.5547}{3.0861} \times 100 = 50.38 \% \end{aligned}$$

**หมายเหตุ :** สำหรับอัตราส่วนอื่นๆ ก็สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกันนี้ ผลดังแสดงในตารางที่ 3.3 ส่วนสารในกลุ่ม  $\text{Mn}_{2-x}\text{Co}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  ก็สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** น้ำหนักของสารที่ได้จากการทดลองและทฤษฎี รวมทั้งร้อยละผลผลิตของสารกลุ่ม  $\text{M}_{0.5}\text{A}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{MAP}_4\text{O}_{12}$

| ชื่อสาร                                                                               | นน.สารตั้งต้น (กรัม)                                                                                                                   |                            | นน.สาร (g)<br>จากการทดลอง | นน. สาร (g)<br>จากทฤษฎี | ร้อยละ<br>ผลผลิต |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|
|                                                                                       | Mn หรือ<br>$\text{CoCO}_3$                                                                                                             | $\text{CaCO}_3$ หรือ<br>Fe |                           |                         |                  |
| $\text{Mn}_{0.50}\text{Ca}_{0.50}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  | 0.5494                                                                                                                                 | 1.0101                     | 1.2376                    | 2.7887                  | 44.38            |
| $\text{Mn}_{0.50}\text{Fe}_{0.50}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 0.5549                                                                                                                                 | 0.5589                     | 1.3873                    | 2.8693                  | 48.35            |
| $\text{Fe}_{0.50}\text{Co}_{0.50}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 1.2183                                                                                                                                 | 0.5579                     | 1.2339                    | 2.9074                  | 42.44            |
| ชื่อสาร                                                                               | นน.สารตั้งต้น (กรัม)<br>$\text{M}_{0.50}\text{A}_{0.50}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$<br>(M= Mn, Fe, A = Ca, Co) |                            | นน.สาร (g)<br>จากการทดลอง | นน. สาร (g)<br>จากทฤษฎี | ร้อยละ<br>ผลผลิต |
| $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$                                                         | 2.1220                                                                                                                                 |                            | 1.3602                    | 1.5714                  | 86.56            |
| $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$                                                         | 2.1059                                                                                                                                 |                            | 1.3225                    | 1.5746                  | 83.99            |
| $\text{FeCoP}_4\text{O}_{12}$                                                         | 2.1135                                                                                                                                 |                            | 1.3393                    | 1.5840                  | 84.55            |

จากสารที่เตรียมขึ้นได้ทั้งหมด 6 ตัว ประกอบไปด้วย  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ , และ  $\text{FeCoP}_4\text{O}_{12}$  ได้ถูกนำมาตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเทคนิคที่เหมาะสมต่าง ๆ คือ การวิเคราะห์ปริมาณโลหะ ด้วยเครื่อง Atomic adsorption spectrophotometer ตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัส ด้วยการวิเคราะห์เทียบสี ด้วยเครื่อง UV spectrophotometer วิเคราะห์ปริมาณน้ำในโครงสร้างผลึก ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เชิงความร้อน อาศัยเส้นกราฟจาก TG วิธีการคำนวณ(ภาคผนวกที่ 2)และผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.2** ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสารกลุ่ม  $\text{M}_{0.5}\text{A}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{MAP}_4\text{O}_{12}$  ที่วิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคต่าง ๆ

| ชื่อสาร                                                                               | องค์ประกอบทางเคมี |       |             |       |       |       |                   |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------------------|-------|
|                                                                                       | % Mn หรือ Co      |       | %Ca หรือ Fe |       | %P    |       | %H <sub>2</sub> O |       |
|                                                                                       | Obs.              | Theo. | Obs.        | Theo. | Obs.  | Theo. | Obs.              | Theo. |
| $\text{Mn}_{0.50}\text{Ca}_{0.50}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  | 9.58              | 9.90  | 7.13        | 7.21  | 21.87 | 22.34 | 20.02             | 19.46 |
| $\text{Mn}_{0.50}\text{Fe}_{0.50}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 9.62              | 9.63  | 9.77        | 9.78  | 22.58 | 21.72 | 23.58             | 25.23 |
| $\text{Co}_{0.50}\text{Fe}_{0.50}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 10.20             | 10.25 | 9.62        | 9.72  | 21.55 | 21.57 | 26.62             | 25.05 |
| $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$                                                         | 12.33             | 13.37 | 9.68        | 9.73  | 27.98 | 30.17 |                   |       |
| $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$                                                         | 12.62             | 12.87 | 12.31       | 13.09 | 29.30 | 29.05 |                   |       |
| $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$                                                         | 13.58             | 13.68 | 12.92       | 12.96 | 28.75 | 28.78 |                   |       |

หมายเหตุ Obs. จากการทดลอง; Theo. จากทฤษฎี

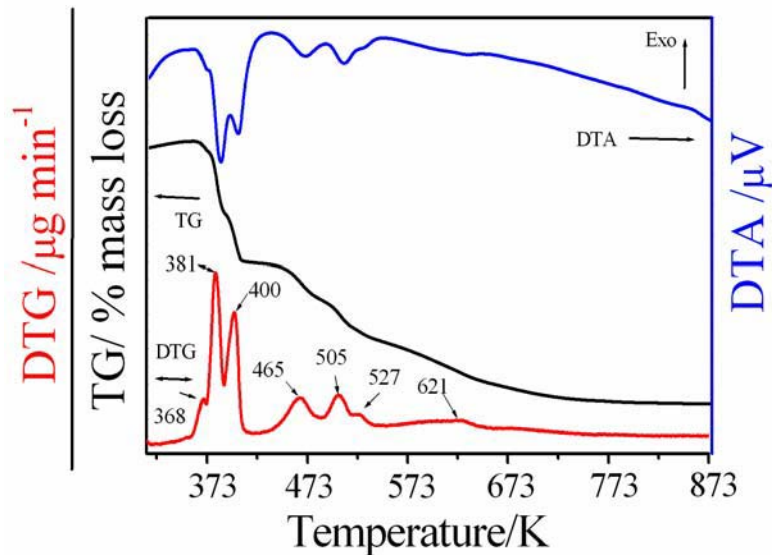
จากตารางที่ 4.2 สามารถระบุได้ว่าสารทั้ง 6 ตัวที่เตรียมได้ มีสูตรทางเคมี คือ  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ , และ  $\text{FeCoP}_4\text{O}_{12}$  และได้นำไปตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคอื่น ๆ ดังรายละเอียดที่จะได้กล่าวต่อไปนี้

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

ลำดับการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารทั้ง 6 ตัว คือ การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ตรวจสอบโครงสร้างสารด้วยเทคนิค XRD ตรวจสอบรูปแบบการสั่นของโมเลกุลหรือไอออนองค์ประกอบภายในโครงสร้าง ด้วยเทคนิค FTIR และสุดท้ายตรวจสอบสัณฐานวิทยา เพื่อขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค SEM

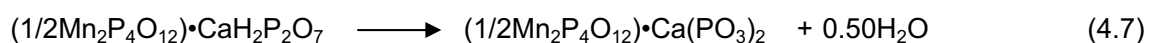
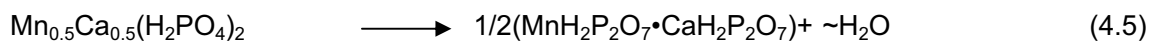
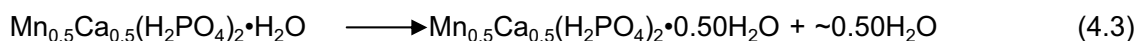
#### 4.2.1 ผลการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของสาร

เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของสารไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ไฮเดรต คือ  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  แสดงไว้ในรูปที่ 4.1-4.3



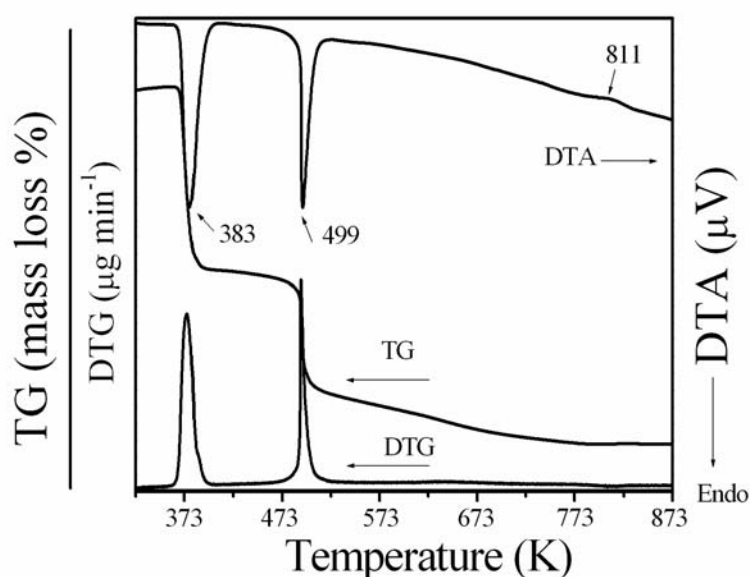
รูปที่ 4.1 เทอร์โมแกรม TG/DTG/DTA ของสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $10 \text{ K min}^{-1}$  ในแก๊ส  $\text{O}_2$

จากรูปที่ 4.1 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของ  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  สามารถสรุปกลไกการสลายตัวได้ดังกลไวย่อยต่อไปนี้



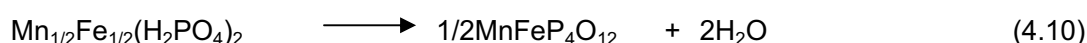
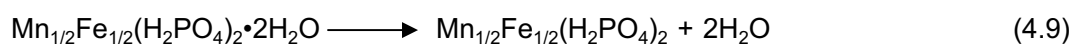
สาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  มีการสลายตัวทางความร้อน 6 กลไวย่อย ในช่วงอุณหภูมิ 323-873 K สัมพันธ์กับพีคที่แสดงชนิดกลไกการสลายตัวแบบดูดความร้อน (endothermic reaction) ที่ปรากฏบน DTA แล้วสัมพันธ์กับ DTG คือ 368, 381, 400, 465, 505, 527 และ 621 K มีอินเทอร์มีเดียตเกิดขึ้นระหว่างกลไก ประกอบไปด้วย  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 0.50\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{MnH}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot \text{CaH}_2\text{P}_2\text{O}_7$  ( $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ),  $(\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}) \cdot \text{CaH}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ,  $(\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}) \cdot \text{Ca}(\text{PO}_3)_2$  ที่อุณหภูมิสูงกว่า 673 K พบว่าสารไม่มีมวลสูญหายไป แสดงว่าอนุพันธ์ทางความร้อนที่เสถียรของการสลายตัวทางความ

ร้อน คือ  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  จากเส้นกราฟ TG ระบุมวลที่สูญหายไปทั้งหมดของทั้ง 6 กลไก คือ 20.02% (3.08 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี (21.42% (3.00 mol  $\text{H}_2\text{O}$ )) (ตารางที่ 4.2) และสรุปได้ว่าการสลายตัวทางความร้อนของสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ประกอบด้วยการสูญเสียน้ำ 1 โมเลกุล เรียกว่า “ปฏิกิริยาดีไฮเดชัน (dehydration reaction)” (กลไก 4.3-4.4) และการสูญเสียน้ำ 2 โมเลกุล จากไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแอนไฮดรอนแล้วเกิดการควบรวมโมเลกุลของฟอสเฟต เรียกว่า “deprotonated dihydrogen phosphate reaction and polycondensation reaction” (กลไก 4.5-4.8) จากอุณหภูมิสูงสุดของการสลายตัว ทำให้ทราบอุณหภูมิสำหรับการนำสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ไปเผา คือ 773 K เพื่อให้ได้สาร  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  ต่อไป



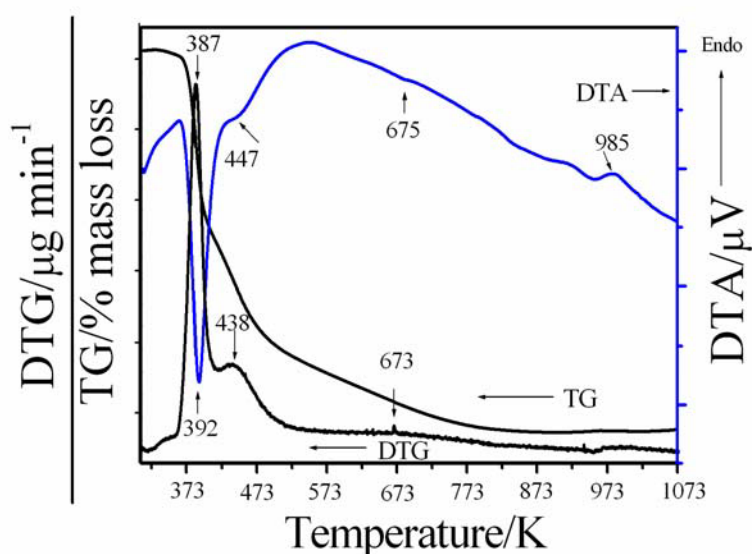
รูปที่ 4.2 เทอร์โมแกรม TG/DTG/DTA ของสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10  $\text{K min}^{-1}$  ในแก๊ส  $\text{O}_2$

จากรูปที่ 4.2 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของ  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  สามารถสรุปกลไกการสลายตัวได้ดังกลไวย่อยต่อไปนี้



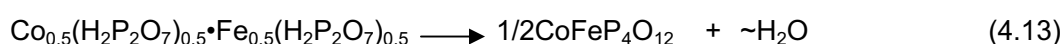
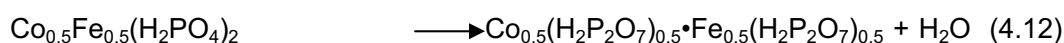
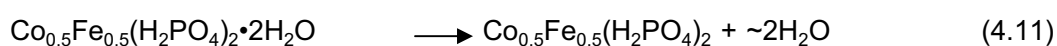
สาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  มีการสลายตัวทางความร้อน 2 กลไกละเอียด ในช่วงอุณหภูมิ 303-873 K คือ 373-423 และ 473-673 K สัมพันธ์กับพีคที่แสดงชนิดกลไกการสลายตัวแบบดูดความร้อน (endothermic reaction) ที่ปรากฏบน DTA แล้วสัมพันธ์กับ DTG คือ 383 และ 499 K มีอินเทอร์มีเดียตที่เสถียรเกิดขึ้นระหว่างกลไก คือ  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  ที่อุณหภูมิสูงกว่า 673 K พบว่าสารไม่มีมวลสูญหายไป แสดงว่าอนุพันธ์ทางความร้อนที่เสถียรของการสลายตัวทางความร้อน คือ  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  จาก

เส้นกราฟ TG ระบุมวลที่สูญหายไปของทั้ง 2 กลไก คือ 1.86 (1.89 mol H<sub>2</sub>O) และ 11.73 (1.86 mol H<sub>2</sub>O) % รวมเป็นมวลสูญหายทั้งหมด คือ 23.58% (3.74 mol H<sub>2</sub>O) ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี (25.23% (4.00 mol H<sub>2</sub>O)) (ตารางที่ 4.2) และสรุปได้ว่าการสลายตัวทางความร้อนของสาร Mn<sub>0.5</sub>Fe<sub>0.5</sub>(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>•2H<sub>2</sub>O ประกอบด้วยการสูญเสีย 2 โมเลกุล เรียกว่า “ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (dehydration reaction)” (กลไก 4.9) และการสูญเสีย 2 โมเลกุล จากไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแอนไอออนแล้วเกิดการควบรวมโมเลกุลของฟอสเฟต เรียกว่า “deprotonated dihydrogen phosphate reaction and polycondensation reaction” (กลไก 4.10) จากอุณหภูมิสูงสุดของการสลายตัว ทำให้ทราบอุณหภูมิสำหรับการนำสาร Mn<sub>0.5</sub>Fe<sub>0.5</sub>(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>•2H<sub>2</sub>O ไปเผา คือ 773 K เพื่อให้ได้สาร MnFeP<sub>4</sub>O<sub>12</sub> ต่อไป



**รูปที่ 4.3** เทอร์โมแกรม TG/DTG/DTA ของสาร Fe<sub>0.5</sub>Co<sub>0.5</sub>(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>•2H<sub>2</sub>O ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 K min<sup>-1</sup> ในแก๊ส O<sub>2</sub>

จากรูปที่ 4.3 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของ Co<sub>0.5</sub>Fe<sub>0.5</sub>(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>•2H<sub>2</sub>O สามารถสรุปกลไกการสลายตัวได้ดังกล่าวย่อยต่อไปนี้

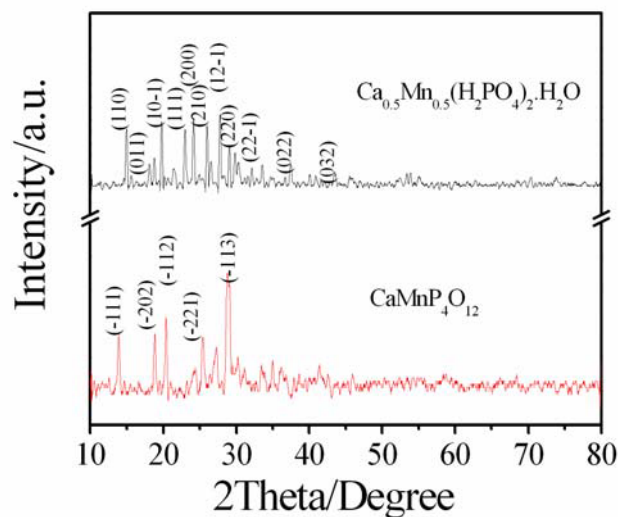


สาร Co<sub>0.5</sub>Fe<sub>0.5</sub>(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>•2H<sub>2</sub>O มีการสลายตัวทางความร้อน 3 กลไกย่อยในช่วงอุณหภูมิ 303-873 K คือ 318-414, 414-548 และ 548-873 K สอดคล้องกับมวลที่สูญหายไป คือ 11.62% (1.87 mol H<sub>2</sub>O), 9.15% (1.47 mol H<sub>2</sub>O) และ 5.85% (0.54 mol H<sub>2</sub>O) ตามลำดับ สัมพันธ์กับพีคที่แสดงชนิดกลไกการสลายตัวแบบดูดความร้อน (endothermic reaction) ที่ปรากฏบน DTA แล้วสัมพันธ์กับ DTG คือ 387, 447 และ 675 K มีอินเทอร์มีเดียตเกิดขึ้นระหว่างกลไก คือ Co<sub>0.5</sub>Fe<sub>0.5</sub>(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> และ Co<sub>0.5</sub>(H<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)<sub>0.5</sub>•Fe<sub>0.5</sub>(H<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)<sub>0.5</sub> ที่อุณหภูมิสูงกว่า 773 K พบว่าสารไม่มีมวลสูญหายไป แสดงว่า

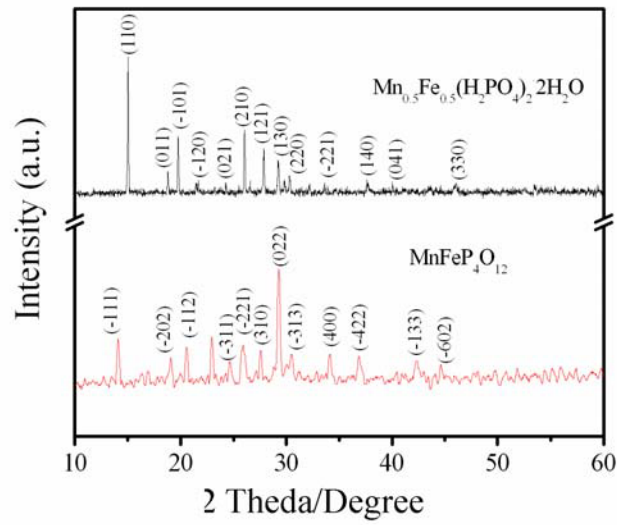
อนุพันธ์ทางความร้อนที่เสถียรของการสลายตัวทางความร้อน คือ  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  ยืนยันได้ด้วยมวลสูญหายรวมทั้งหมด คือ 23.58% (3.74 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี (25.23% (4.00 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ) (ตารางที่ 4.2) และสรุปได้ว่าการสลายตัวทางความร้อนของสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ประกอบด้วยการสูญเสียน้ำ 2 โมเลกุล เรียกว่า “ปฏิกิริยาดีไฮเดชัน (dehydration reaction)” (กลไก 4.11) และการสูญเสียน้ำ 2 โมเลกุล จากไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแอนไอออนแล้วเกิดการควบรวมโมเลกุลของฟอสเฟต เรียกว่า “deprotonated dihydrogen phosphate reaction and polycondensation reaction” (กลไก 4.12-4.13) จากอุณหภูมิสูงสุดของการสลายตัว ทำให้ทราบอุณหภูมิสำหรับการนำสาร  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ไปเผา คือ 773 K เพื่อให้ได้สาร  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  ต่อไป

#### 4.2.2 ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของสาร

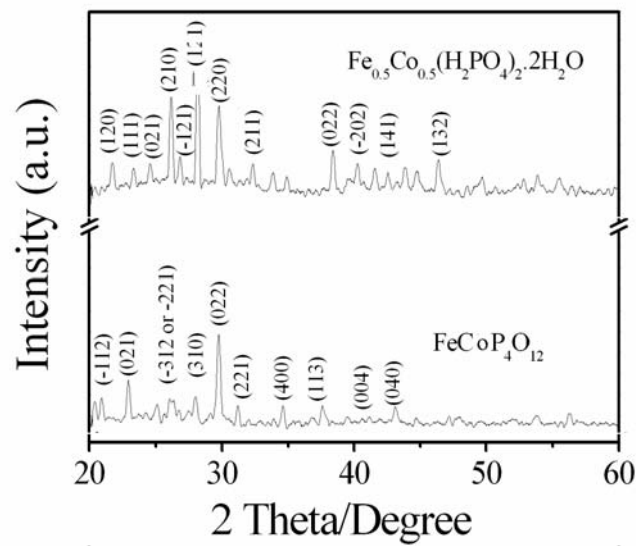
การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสี X-Ray ได้รูปแบบการสะท้อนรังสี X-Ray แสดงในรูปที่ 4.4-4.6 สำหรับสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  ตามลำดับ จากผลกราฟที่ได้นำไปคำนวณแลตติสพารามิเตอร์และขนาดผลึกได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4 จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค XRD เมื่อเทียบกับไฟล์มาตรฐาน(PDF) สรุปได้ว่า  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  มีระบบผลึกเป็น โมโนคลินิก(monoclinic phase) และ space group คือ  $\text{P2}_1/\text{n}$  ( $Z = 2$ ) และสำหรับ  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  และ  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  มีระบบผลึกเป็นโมโนคลินิก (monoclinic phase) และ space group คือ  $\text{C2/c}$  ( $Z = 4$ )



รูปที่ 4.4 รูปแบบ XRD ของสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  และอนุพันธ์ทางความร้อน  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$



รูปที่ 4.5 รูปแบบ XRD ของสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และอนุพันธ์ทางความร้อน  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$



รูปที่ 4.6 รูปแบบ XRD ของสาร  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และอนุพันธ์ทางความร้อน  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$

**ตารางที่ 4.3** ขนาดผลึกและแลตตีส์พารามิเตอร์ ที่คำนวณได้จากรูปแบบการสะท้อนรังสี X-ray สำหรับสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  พร้อมเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีมาก่อน

| สาร                                                                                 | อ้างอิง                   | a (Å)                | b(Å)     | c(Å)     | $\beta$ (°) | ขนาดผลึกเฉลี่ย (nm) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|----------|----------|-------------|---------------------|
| $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                      | PDF#350010                | 7.31                 | 10.08    | 5.37     | 94.75       | -                   |
|                                                                                     | Danvirutai et. al. (2008) | <sup>1</sup> 7.47(0) | 10.38(1) | 5.54 (6) | 95.61(0)    | 38 ± 17             |
|                                                                                     |                           | <sup>2</sup> 7.32(8) | 10.11(0) | 5.38 (9) | 94.58(6)    | 76± 14              |
|                                                                                     | Boonchom et. al. (2008)   | 7.97(0)              | 10.78(2) | 5.63(2)  | 95.72(4)    | 52± 14              |
| $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | <b>This work</b>          | 7.92(0)              | 10.62(4) | 5.79(4)  | 94.68(6)    | 27± 8               |
| $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$                       | PDF#0903047               | 6.25                 | 11.89    | 5.63     | 114.20      | -                   |
|                                                                                     | Boonchom et. al. (2008)   | 6.27(4)              | 11.32(1) | 5.94(2)  | 114.11(0)   | 64 ± 16             |
| $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | <b>This work</b>          | 7.90(0)              | 11.03(6) | 6.10(3)  | 95.04(6)    | 79± 11              |
|                                                                                     | Boonchom et. al. (2008)   | 8.09(0)              | 11.23(6) | 6.50(3)  | 95.10(6)    | 81± 14              |
| $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                      | PDF # 751444              | 7.30                 | 9.92     | 5.34     | 95.14       |                     |
|                                                                                     | Boonchom et. al. (2008)   | 7.25(1)              | 10.10(0) | 5.32(0)  | 95.71(0)    | 28± 4               |
| $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | <b>This work</b>          | 7.29(0)              | 9.90(0)  | 5.35(0)  | 95.10(0)    | 59± 13              |
|                                                                                     | Boonchom et. al. (2009)   | 7.30(0)              | 9.92(0)  | 5.35(1)  | 95.01(2)    | 77± 27              |
| $\text{Co}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                      | PDF # 390698              | 7.27                 | 9.88     | 5.33     | 94.86       |                     |
|                                                                                     | Boonchom et. al. (2009)   | 7.21(3)              | 9.91(1)  | 5.29(5)  | 94.88(6)    | 26± 2               |

<sup>1</sup> คือ สารที่เตรียมได้จากสารตั้งต้น  $\text{MnCO}_3\text{-H}_3\text{PO}_4$

<sup>2</sup> คือ สารที่เตรียมได้จากสารตั้งต้น  $\text{Mn (c) -H}_3\text{PO}_4$

**ตารางที่ 4.4** ขนาดผลึกและแลตติสพารามิเตอร์ ที่คำนวณได้จากรูปแบบการสะท้อนรังสี X-ray สำหรับสาร  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  และ  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  พร้อมเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีมาก่อน

| สาร                                  | อ้างอิง                   | a (Å)                 | b(Å)           | c(Å)            | $\beta$ (°)      | ขนาดผลึกเฉลี่ย (nm) |
|--------------------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------|-----------------|------------------|---------------------|
| $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ | PDF# 380314               | 11.88                 | 8.59           | 10.14           | 119.21           | -                   |
|                                      | Danvirutai et. al. (2008) | <sup>1</sup> 11.85(0) | 8.63(8)        | 10.01(1)        | 118.86(5)        | 25 ± 4              |
|                                      |                           | <sup>2</sup> 11.93(5) | 8.88(7)        | 10.08(0)        | 118.93(0)        | 34± 12              |
|                                      | Boonchom et. al. (2008)   | 11.78(4)              | 8.91(3)        | 10.06<br>(0)    | 119.95(3)        | 29± 9               |
| $\text{MnCaP}_2\text{O}_{12}$        | <b><i>This work</i></b>   | <b>12.27(9)</b>       | <b>8.87(2)</b> | <b>10.49(8)</b> | <b>120.00(2)</b> | <b>30 ± 9</b>       |
| $\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$           | PDF#500584                | 9.56                  | 9.50           | 10.37           | 93.47            | -                   |
|                                      | Boonchom et. al. (2008)   | 9.45(0)               | 9.54(0)        | 10.59(0)        | 93.62(0)         | 38 ±16              |
| $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$        | <b><i>This work</i></b>   | <b>12.06(8)</b>       | <b>8.48(2)</b> | <b>10.12(4)</b> | <b>119.12(5)</b> | <b>62 ± 13</b>      |
|                                      | Boonchom et. al. (2009)   | 12.02(8)              | 8.42(2)        | 10.10(4)        | 119.11(5)        | 69 ± 21             |
|                                      | Boonchom et. al. (2010)   | 12.02(0)              | 8.23(0)        | 10.57(0)        | 118.89(2)        | 30 ±9               |
| $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ | PDF #782285               | 11.94                 | 8.37           | 9.93            | 118.74           | -                   |
|                                      | Boonchom et. al. (2008)   | 12.80(0)              | 8.80(4)        | 10.56(0)        | 118.67(4)        | 29± 6               |
| $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$        | <b><i>This work</i></b>   | <b>11.62(1)</b>       | <b>8.30(0)</b> | <b>9.65(2)</b>  | <b>119.17(4)</b> | <b>62 ± 15</b>      |
|                                      | Boonchom et. al. (2009)   | 11.77(3)              | 8.56(0)        | 9.63(1)         | 119.09(0)        | 73 ± 18             |
|                                      | Boonchom et. al. (2009)   | 11.69(3)              | 8.41(5)        | 9.77(2)         | 118.13(2)        | 65 ± 24             |
|                                      | Boonchom et. al. (2010)   | 11.89(0)              | 8.33(0)        | 10.15(0)        | 119.09(0)        | 49 ± 20             |
| $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ | PDF#842208                | 11.8                  | 8.297          | 9.923           | 118.72           |                     |
|                                      | Boonchom et. al. (2009)   | 11.83(8)              | 8.22(6)        | 9.94(0)         | 118.51(1)        | 40 ± 10             |

<sup>1</sup> คือ สารที่เตรียมได้จากสารตั้งต้น  $\text{MnCO}_3\text{-H}_3\text{PO}_4$

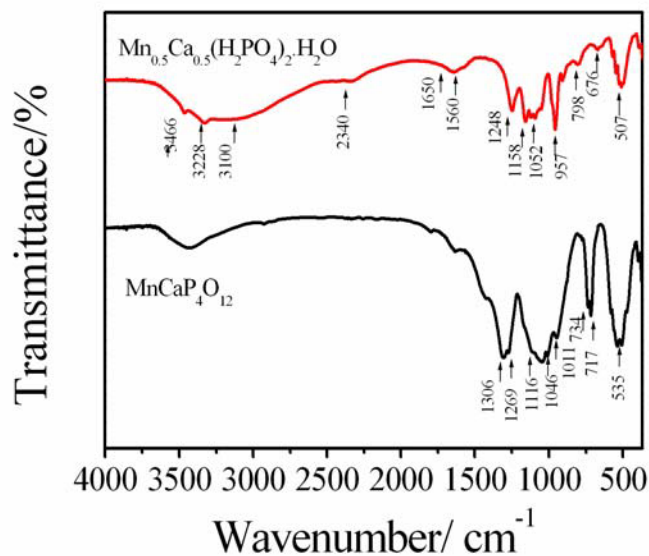
<sup>2</sup> คือ สารที่เตรียมได้จากสารตั้งต้น  $\text{Mn (c) -H}_3\text{PO}_4$

#### 4.2.3 ผลการตรวจเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของสาร

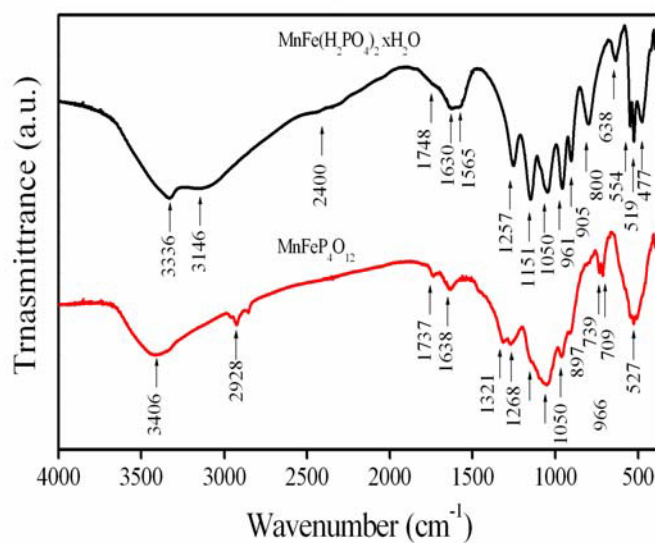
ผลการบันทึกสเปกตรัม FTIR แสดงในรูปที่ 4.7-4.9 สำหรับสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\cdot\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$   $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$   $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  ตามลำดับ แบ่งการจำแนกรูปแบบการสั่นออกเป็น 3 พื้นฐานการสั่น คือ สารกลุ่มไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ไฮเดรต ประกอบด้วยหน่วยย่อยการสั่น 2 แบบ คือ  $\text{H}_2\text{PO}_4^{-2}$  แอนไอออน และโมเลกุลน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) รูปแบบการสั่นพื้นฐานของหน่วยย่อย  $\text{H}_2\text{PO}_4^{-2}$  แอนไอออนจะแสดงเอกลักษณ์การสั่นที่ตำแหน่ง 300-500, 700-900, 1160-900, 840-930, 1000-1200, 2300-2400, 2800-3120, และ

3200-3500  $\text{cm}^{-1}$  แจกชนิดแถบการสั่นคือ  $\delta(\text{PO}_3)$ ,  $\gamma(\text{POH})$ ,  $\delta(\text{POH})$ ,  $\nu(\text{PO}_2(\text{OH}))$ ,  $\nu(\text{PO}_3)$ , B band ( $\nu_{\text{OH}} \text{HPO}_4^{2-}$ ), A band ( $\nu_{\text{OH}} \text{HPO}_4^{2-}$ ) และ  $\nu_{\text{OH}}$  ( $\nu_1$  and  $\nu_3 \text{H}_2\text{O}$ ), ตามลำดับ ในขณะที่รูปแบบการสั่นของโมเลกุลน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) จะแสดงเอกลักษณ์การสั่น 3 รูปแบบ คือ การสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตร( $\nu_1$ ), การสั่นแบบยืดหดแบบอสมมาตร( $\nu_3$ ) และการสั่นแบบโค้งงอ( $\nu_2$ ) โดยจะพบแถบการสั่นในช่วง 3100-3146, 3200-3400 และ 1590-1700  $\text{cm}^{-1}$  สำหรับแถบการสั่นและการจำแนกระบุฟีดของสารกลุ่มนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 4.5

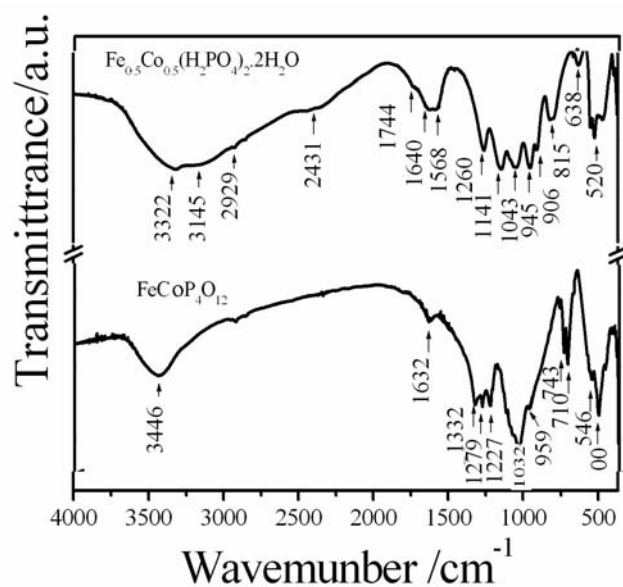
สำหรับรูปแบบการสั่นของสารไซโคลเตตระฟอสเฟต ที่มีหน่วยย่อยโครงสร้าง เป็น  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  แอนไอออน จะประกอบไปด้วยรูปแบบการสั่น P-O stretching ที่ปรากฏในช่วง 1150-960  $\text{cm}^{-1}$  แถบการสั่นปรากฏในช่วง 1350-1220, 1150-1100, 1080-950, and 780-400  $\text{cm}^{-1}$  จำแนกเป็นรูปแบบการสั่นของ  $\nu_{\text{as}}\text{OPO}^-$ ,  $\nu_{\text{s}}\text{OPO}^-$ ,  $\nu_{\text{as}}\text{POP}$ , and  $\nu_{\text{s}}\text{POP}$  ตามลำดับ การปรากฏฟีดคู่ที่ประมาณ 720 (ca. 734 and 717  $\text{cm}^{-1}$ ) and 1280 (ca. 1306 and 1269  $\text{cm}^{-1}$ )  $\text{cm}^{-1}$  เป็นเอกลักษณ์การสั่นของ  $\nu_{\text{s}}\text{POP}$  ที่ใช้ระบุเป็นโครงสร้างแบบวงของแอนไอออน ไซโคลเตตระฟอสเฟต  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  สำหรับโลหะชนิดต่างๆ แถบการสั่นและการจำแนกรูปแบบการสั่นของสารกลุ่มนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.7 สเปกตรัม FTIR ของสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  และอนุพันธ์ทางความร้อน  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$



รูปที่ 4.8 สเปกตรัม FTIR ของสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และอนุพันธ์ทางความร้อน  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$



รูปที่ 4.9 สเปกตรัม FTIR ของสาร  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และอนุพันธ์ทางความร้อน  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$

**ตารางที่ 4.5** แถบการสั่นและการจำแนกรูปแบบการสั่นของสาร  $M_{0.5}A_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$  เมื่อ M และ A = Ca, Mn, Fe และ Co; n= 1 หรือ 2

| แถบการสั่น( $cm^{-1}$ ) ของ $M_{0.5}A_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$ |                      |                   | Possible assignment                      |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------|------------------------------------------|
| M =Mn , A=Ca,<br>n=1                                                | M =Mn , A=Fe,<br>n=2 | M =Fe , A=Co, n=2 |                                          |
| 3346 w sp                                                           | 3330 w sp            | 3322 sp           | $\nu_3 (H_2O)$                           |
| 3228 w sp                                                           | 3105 w br            | 3145 v w          | $\nu_1 (H_2O)$                           |
| 3100 sh                                                             |                      |                   | $\nu_1 (H_2O)$                           |
|                                                                     |                      | 2929 v sh         | A band                                   |
| 2340 v w                                                            | 2400 v br            | 2431 sp           | B band                                   |
|                                                                     | 1758 sh              | 1744 sh           | C band                                   |
| 1650 sp                                                             | 1640 w               | 1640 sp           | $\nu_2 (H_2O)$ or C band                 |
| 1560 w                                                              | 1593 w               | 1568 w            | $\nu_2 (H_2O)$                           |
| 1248 sp                                                             | 1252 sp              | 1260 sp           | $\delta_{OH} (P-OH)$                     |
| 1158 sp                                                             | 1150 sp              | 1141 sp           | $\nu_{as} (P-O)$                         |
|                                                                     | 1050 sp              | 1043 sp           | $\nu_{as} (P-O)$                         |
| 1050 w                                                              | 1028 sp              |                   | $\nu_s (P-O)$                            |
| 957 w                                                               | 970 sp               | 945 sp            | $\nu_s (P-O)$                            |
|                                                                     |                      | 906 w             | $\nu_s (P-O_h)$                          |
| 906 w                                                               | 801 sp               | 815 sp            | $\nu(P-O_h)$ and/or $\gamma_{OH} (P-OH)$ |
| 787 w                                                               |                      |                   | $\gamma_{OH} (P-OH)$                     |
| 676 v w                                                             | 636 sp               | 638 w             | $\gamma_L (H_2O)$                        |
| 548 v w                                                             | 540 w                | 549 v w           | $\delta_{as} (OPO)$                      |
| 507 w                                                               | 520 w                | 520 w             | $\delta_{as} (OPO)$                      |
|                                                                     | 496 w                | 478 w             | $\delta_s (OPO)$                         |
|                                                                     | 415 w                |                   | $\delta_s (OPO)$                         |
|                                                                     | 361 w                | 398 v w           | M-O (M= Mn or Fe)                        |

Remarks: s, strong; sh, shoulder; w, weak; vw, very weak; str., stretching; br., broad; sp., sharp.

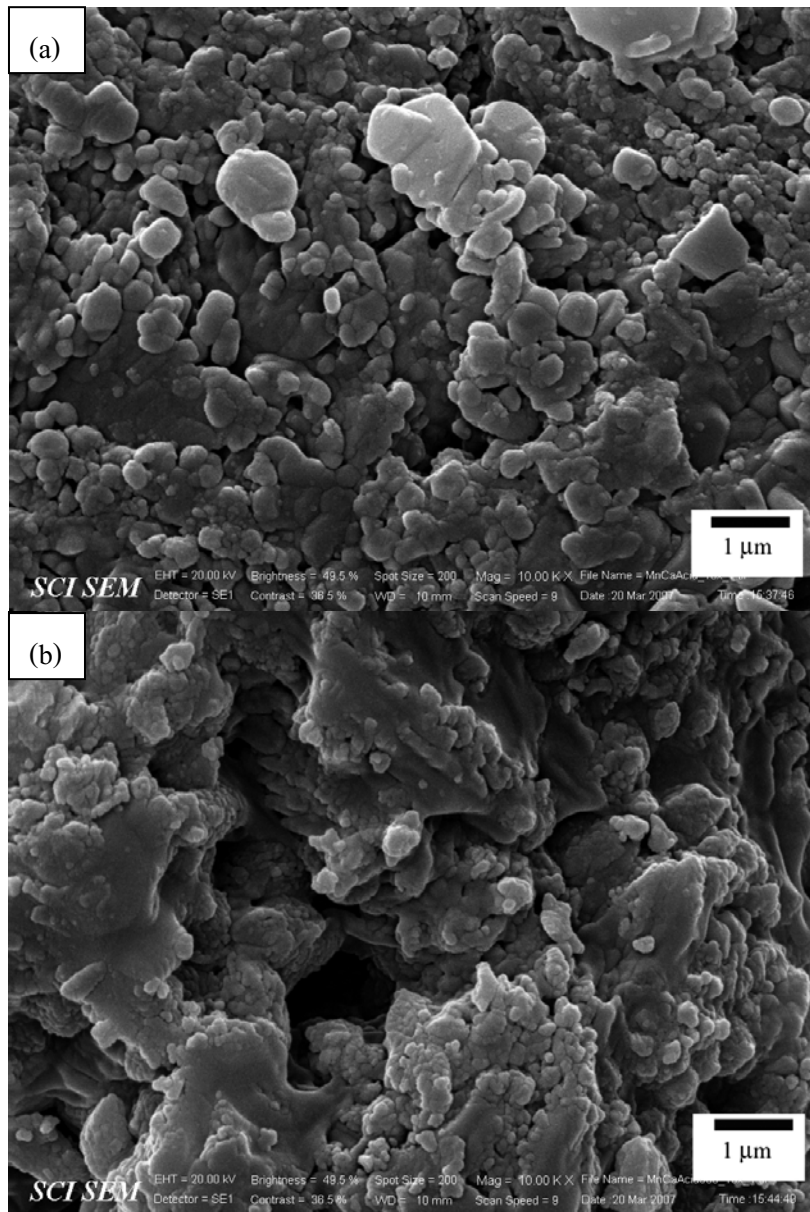
**ตารางที่ 4.6** แถบการสั่นและการจำแนกรูปแบบการสั่นของสาร  $\text{MAP}_4\text{O}_{12}$  เมื่อ  $M$  และ  $A = \text{Ca}, \text{Mn}, \text{Fe}$  และ  $\text{Co}$

| แถบการสั่น( $\text{cm}^{-1}$ ) ของ $\text{MAP}_4\text{O}_{12}$ |                                |                                | Possible assignment                           |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|
| $M = \text{Mn}, A = \text{Ca}$                                 | $M = \text{Mn}, A = \text{Fe}$ | $M = \text{Fe}, A = \text{Co}$ |                                               |
| 1306 sp                                                        | 1319 sh                        | 1325 sp                        | $\nu_{\text{as}}(\text{PO}_2^{2-})$           |
| 1269 sp                                                        | 1227 sp                        | 1282 sp                        | $\nu_{\text{as}}(\text{PO}_2^{2-})$           |
|                                                                |                                | 1227 sp                        | $\nu_{\text{as}}(\text{PO}_2^{2-})$           |
| 1116 br                                                        |                                | 1120 v w                       | $\nu_{\text{s}}(\text{PO}_2^{2-})$            |
|                                                                | 1081 sp                        |                                | $\nu_{\text{s}}(\text{PO}_2^{2-})$            |
| 1046 sh                                                        | 1040 w                         | 1040 sp                        | $\nu_{\text{s}}(\text{PO}_2^{2-})$            |
| 1011 w sp                                                      |                                |                                | $\nu_{\text{s}}(\text{P-O-P})$                |
|                                                                | 963 sp                         | 965 v sh                       | $\nu_{\text{s}}(\text{P-O-P})$                |
|                                                                |                                | 766 v w                        | $\nu_{\text{s}}(\text{P-O-P})$                |
| 734 w sp                                                       | 736 w sp                       | 739 sp                         | $\nu_{\text{s}}(\text{P-O-P})$                |
| 717 w sp                                                       | 710 w                          | 711 sp                         | $\delta(\text{PO}_2^{2-})$                    |
|                                                                | 604 w                          |                                | $\delta(\text{PO}_2^{2-})$                    |
| 570 w sp                                                       | 566 w                          | 558 sp                         | $\delta(\text{PO}_2^{2-})$                    |
| 535 w sp                                                       | 533 w                          |                                | $\delta(\text{PO}_2^{2-})$                    |
|                                                                | 501 w                          | 503 v sp                       | $\delta(\text{PO}_2^{2-})$                    |
| 480 w sp                                                       |                                |                                | $\delta(\text{P-O-P})$ or $\nu_{\text{Mn-O}}$ |
|                                                                |                                | 457 sh                         | $\Delta(\text{P-O-P})$                        |
|                                                                | 421 v w                        |                                | Lattice vibration                             |
|                                                                | 410 v w                        |                                | Lattice vibration                             |

Remarks: s, strong; sh, shoulder; w, weak; vw, very weak; str., stretching; br., broad; sp., sharp.

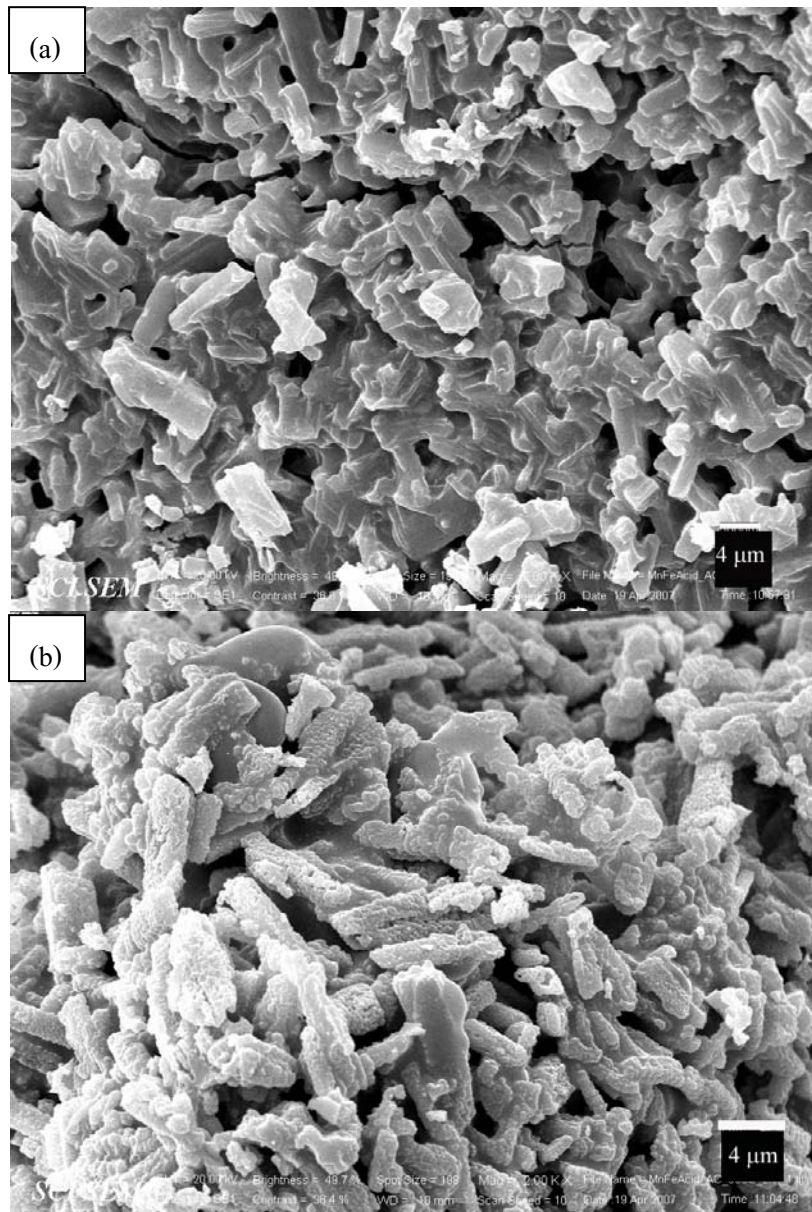
#### 4.2.4 ผลการตรวจลักษณะสัณฐานวิทยาของสาร

การตรวจสอบพฤติกรรมทางสัณฐานวิทยาของสารที่เตรียมขึ้นได้และอนุพันธ์ทางความร้อนของสารทั้งหมดแสดงดังภาพในรูปที่ 4.10-4.12 สำหรับสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  ตามลำดับ



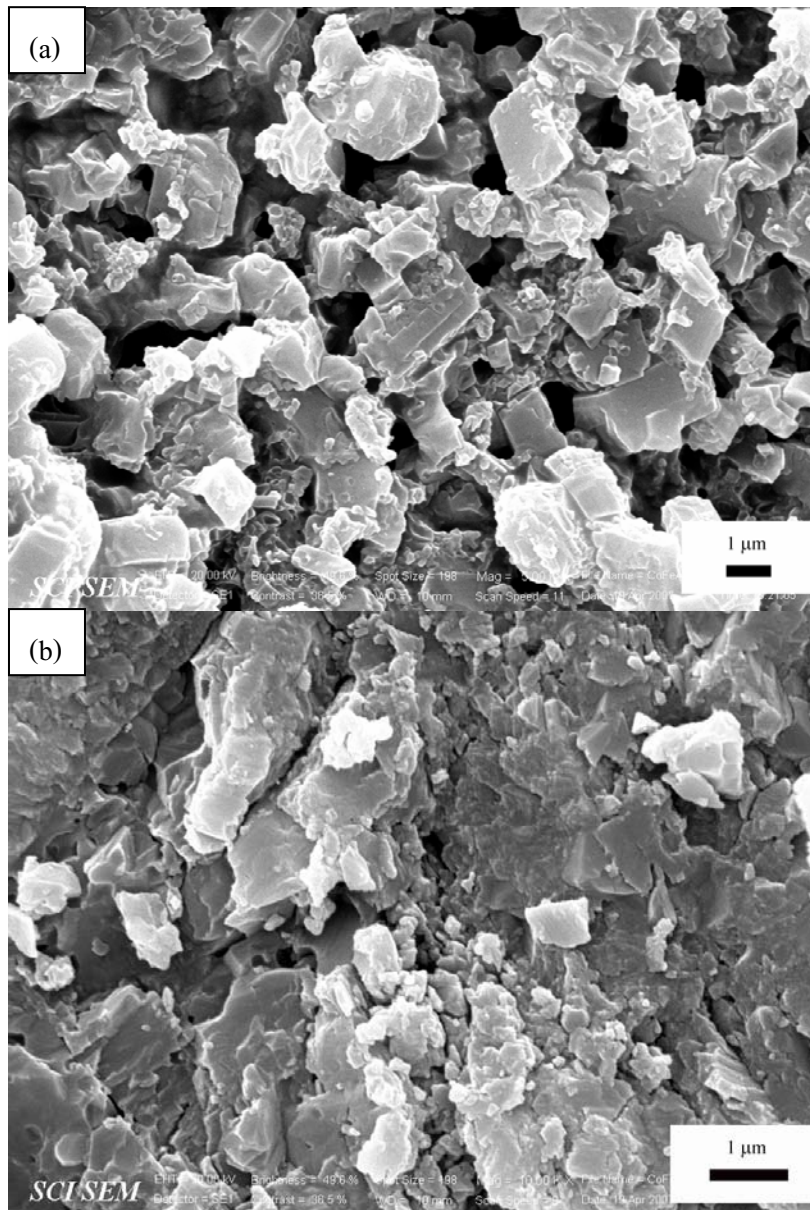
**รูปที่ 4.10** สัณฐานวิทยา SEM ของสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (a) และอนุพันธ์ทางความร้อน  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  (b)

รูปร่างสัณฐานวิทยาของ  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  แสดงลักษณะขรุขระจำนวนเล็กและใหญ่จำนวนมากบนพื้นผิว แสดงถึงความเป็นของแข็งอสัณฐาน สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ XRD ในขณะที่รูปร่างสัณฐานวิทยาของ  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  มีการจับกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคนาขนาดเล็กและใหญ่ของอนุภาคที่ลักษณะคล้ายทรงกลมจำนวนมาก



**รูปที่ 4.11** สัณฐานวิทยา SEM ของสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (a) และอนุพันธ์ทางความร้อน  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  (b)

รูปร่างสัณฐานวิทยาของ  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  แสดงในรูปที่ 4.11 ขนาดรูปร่างอนุภาคแตกต่างเนื่องจากการสลายตัวทางความร้อน รูปร่างสัณฐานวิทยาของ  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  มีลักษณะไม่เป็นร่างที่แน่นอน ที่แสดงการจับกันรวมตัวของอนุภาคเป็นก้อนหนาแน่น ในขณะที่รูปร่างสัณฐานวิทยาของ  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  ก็แสดงรูปร่างสัณฐานที่ไม่มีรูปแบบแน่นอนที่จับรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่

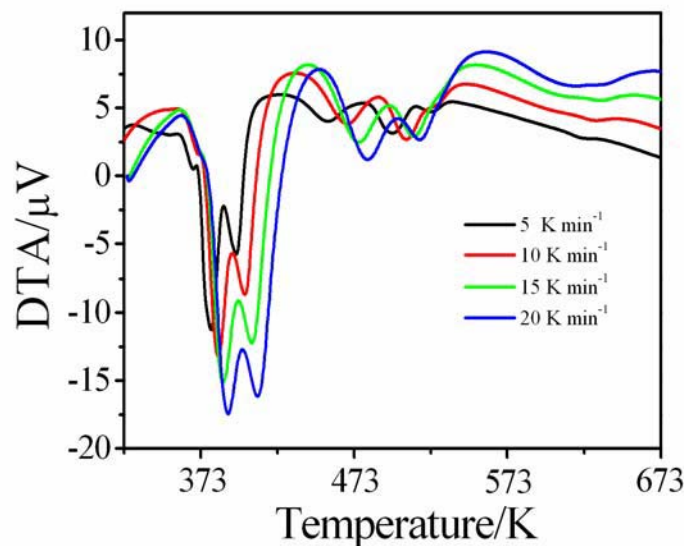


**รูปที่ 4.12** สัณฐานวิทยา SEM ของสาร  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (a) และอนุพันธ์ทางความร้อน  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ (b)

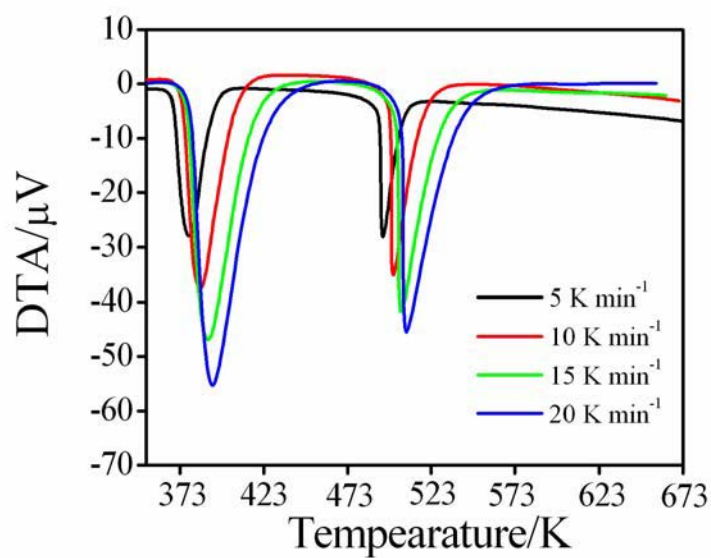
รูปร่างสัณฐานวิทยาของ  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  แสดงในรูปที่ 4.12 ขนาดรูปร่างอนุภาคแตกต่างเนื่องจากการสลายตัวทางความร้อน รูปร่างสัณฐานวิทยาของ  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  มีลักษณะไม่เป็นร่างที่แน่นอนและขรุขระพร้อมมีรูพรุนบนพื้นผิว ที่แสดงการจับกันรวมตัวของอนุภาคเป็นก้อนหนาแน่น ในขณะที่รูปร่างสัณฐานวิทยาของ  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  ก็แสดงรูปร่างสัณฐานที่ไม่มีรูปแบบแน่นอนที่จับรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่และมีผิวขรุขระ

### 4.3 ผลการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์แบบนอนไอโซเทอร์มอล

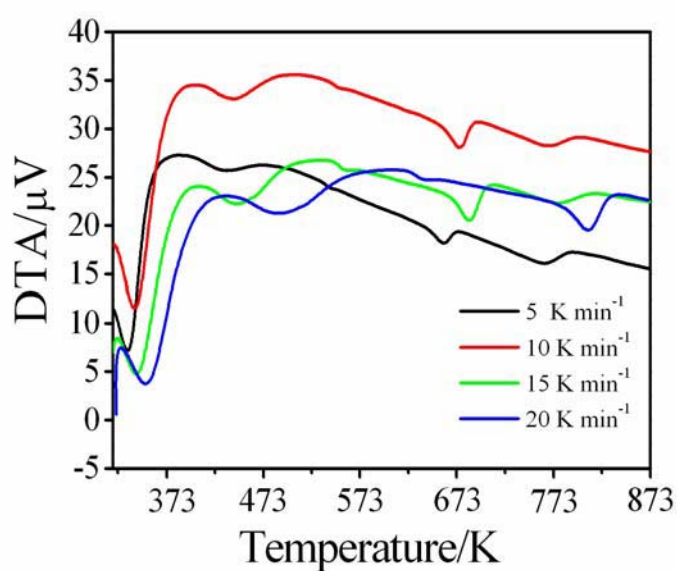
การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการสลายตัวทางความร้อนของสารไฮเดรต ( $M_{0.5}A_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นอนุพันธ์ทางความร้อน คือ สารโลหะไฮโคเลเตตระฟอสเฟต ( $MAP_4O_{12}$ ) ทำการวิเคราะห์ด้วยสมการ Kissinger (สมการ 2.37) โดยอาศัยเทคนิค DTA ที่ทำการทดลอง 4 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ คือ 5, 10, 15 และ 20  $K\ min^{-1}$  เทอร์โมแกรมของการสลายตัวทางความร้อนของสารไฮเดรตทั้งสาม คือ  $Mn_{0.5}Ca_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ ,  $Mn_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  และ  $Co_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  แสดงไว้ในรูปที่ 4.13-4.15 ตามลำดับ และเทอร์โมแกรมจะได้ข้อมูลอุณหภูมิพีคที่เกิดการสลายตัวในแต่ละกลไกที่สอดคล้องกับแต่ละอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ เมื่อนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\beta\ T^{-2})$  กับ  $1000/T$  ตามสมการ Kissinger (สมการ 2.37) จะได้กราฟดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.16-4.17 สำหรับ  $Mn_{0.5}Ca_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ ,  $Mn_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  และ  $Co_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ของกราฟแต่ละเส้นสามารถคำนวณหาพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การชน ( $A$ ) ของการสลายในแต่ละกลไกของสารแต่ละชนิดได้จากความชันและจุดตัดแกน Y โดยค่าที่ได้ แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 ในส่วนของอันดับของการสลายตัว (n) พิจารณาจากสมการของ Ozawa ตามสมการที่ 2.49-2.50 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความยาวที่จุดกึ่งกลางของพีคที่อุณหภูมิสูงสุด ( $\Delta T$ ) กับ อุณหภูมิของพีคสูงสุดแต่ละกลไก ( $T_p$ ) บนเส้นกราฟ DTA ผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 เช่นเดียวกัน



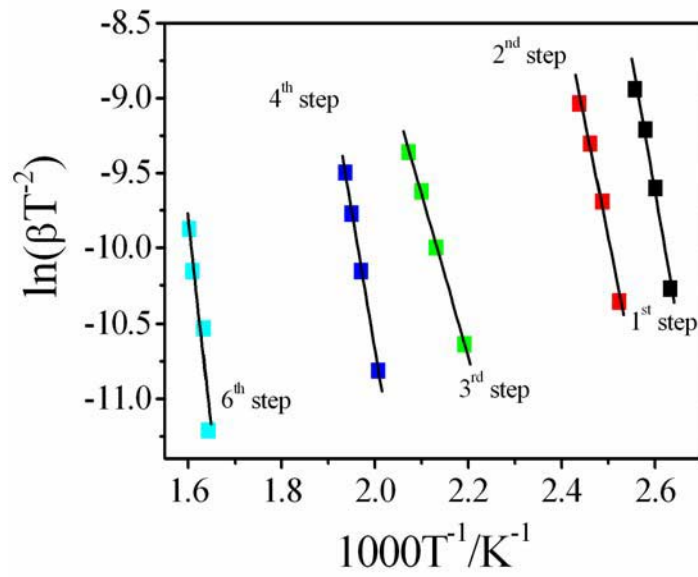
รูปที่ 4.13 เทอร์โมแกรม DTA ของสาร  $Mn_{0.5}Ca_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$  ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5, 10, 15, และ 20  $K\ min^{-1}$  ในแก๊ส  $O_2$



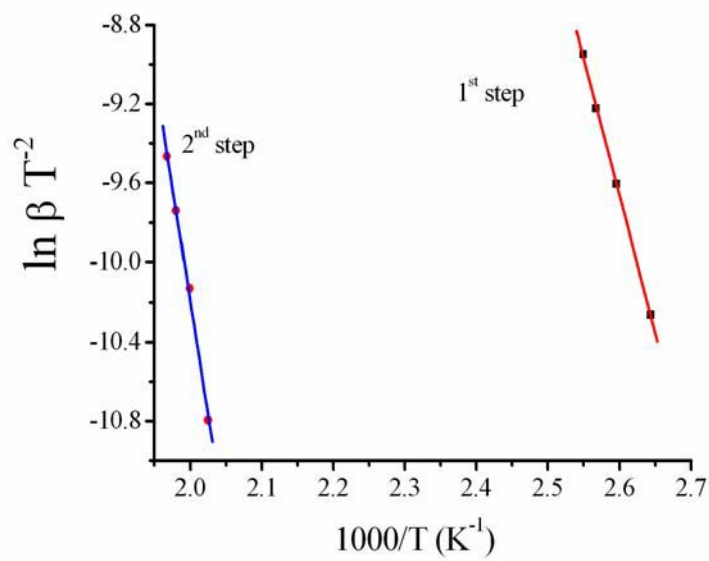
รูปที่ 4.14 เทอร์โมแกรม DTA ของสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5, 10, 15, และ  $20 \text{ K min}^{-1}$  ในแก๊ส  $\text{O}_2$



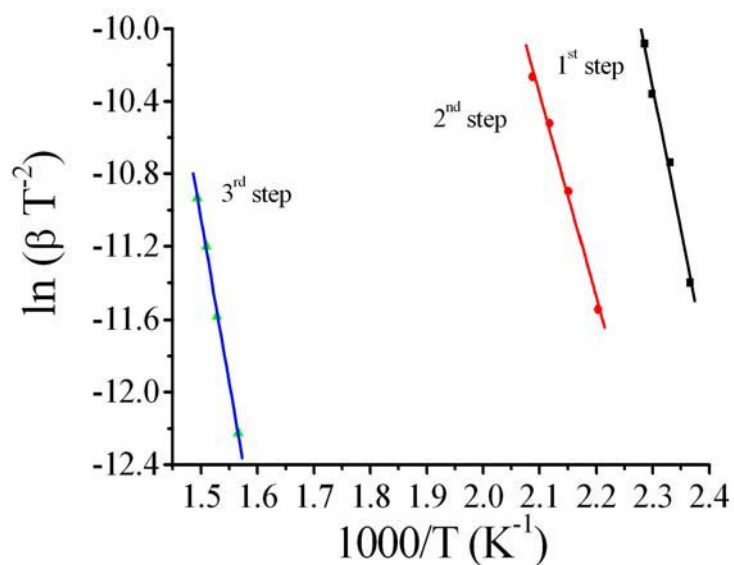
รูปที่ 4.15 เทอร์โมแกรม DTA ของสาร  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5, 10, 15, และ  $20 \text{ K min}^{-1}$  ในแก๊ส  $\text{O}_2$



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ตามสมการ Kissinger ของการสลายตัวทางความร้อนของสาร  $Mn_{0.5}Ca_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ตามสมการ Kissinger ของการสลายตัวทางความร้อนของ  $Mn_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ตามสมการ Kissinger ของการสลายตัวทางความร้อนของ  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

ตารางที่ 4.7 ตัวแปรจลนพลศาสตร์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การชน(A) พลังงานกระตุ้น( $E_a$ ) และอันดับของการสลายตัว(n) พิจารณาจากสมการของ Kissinger และ Ozawa

| สาร                                                                                 | ขั้นตอน | $A/\text{s}^{-1}$     | $E_a/\text{kJmol}^{-1}$ | n    | $R^2$  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------------------|-------------------------|------|--------|
| $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  | 1       | $1.41 \times 10^{20}$ | 147.8                   | 0.09 | 0.9929 |
|                                                                                     | 2       | $6.55 \times 10^{16}$ | 129.70                  | 0.26 | 0.9942 |
|                                                                                     | 3       | $4.48 \times 10^9$    | 89.41                   | 0.72 | 0.9996 |
|                                                                                     | 4       | $4.04 \times 10^{15}$ | 152.94                  | 0.41 | 0.9995 |
|                                                                                     | 5       | -                     | -                       | -    | -      |
|                                                                                     | 6       | $1.01 \times 10^{20}$ | 236.97                  | 0.14 | 0.9567 |
| $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 1       | $3.88 \times 10^{15}$ | 115.19                  | 2.56 | 0.9995 |
|                                                                                     | 2       | $1.13 \times 10^{20}$ | 192.54                  | 2.06 | 0.9971 |
| $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 1       | $3.15 \times 10^{15}$ | 131.38                  | 0.39 | 0.9967 |
|                                                                                     | 2       | $5.36 \times 10^9$    | 92.82                   | 0.21 | 0.9986 |
|                                                                                     | 3       | $1.47 \times 10^{11}$ | 149.50                  | 0.63 | 0.9936 |

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์เทอร์โมไดนามิกส์ของการสลายตัวทางความร้อน

การคำนวณตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์สามารถคำนวณด้วยสมการเทอร์โมไดนามิกส์ทั่วไป ดังสมการที่ 2.54-2.56 และผลที่ได้จากการคำนวณแสดงสรุปไว้ในตารางที่ 4.8 ค่าตัวแปรที่ได้แสดงให้เห็นว่ากลไกการสลายตัวแต่ละขั้นตอนของสารไฮเดรตทั้งสามชนิด มีพลังงานที่เกี่ยวข้องที่ระบุความแตกต่างของสารแต่ละชนิดได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.8 พังก์ชันเทอร์โมไดนามิกส์ คือ พลังงานอิสระกิบส์ ( $\Delta G^*$ ) พลังงานเอนทาลปี ( $\Delta H^*$ ) และเอนโทรปี ( $\Delta S^*$ ) ของการสลายตัวของสารประกอบไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรต

| สาร                                                                                                   | ขั้นตอน | $\Delta G^* /$<br>kJ mol <sup>-1</sup> | $\Delta H^* /$<br>kJ mol <sup>-1</sup> | $\Delta S^* /$<br>J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Mn <sub>0.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> (H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> •H <sub>2</sub> O  | 1       | 94.38                                  | 144.65                                 | 130.34                                                |
|                                                                                                       | 2       | 99.64                                  | 126.35                                 | 66.18                                                 |
|                                                                                                       | 3       | 119.53                                 | 85.50                                  | -72.26                                                |
|                                                                                                       | 4       | 127.80                                 | 148.71                                 | 41.10                                                 |
|                                                                                                       | 5       | -                                      | -                                      | -                                                     |
|                                                                                                       | 6       | 155.59                                 | 231.85                                 | 123.73                                                |
| Mn <sub>0.5</sub> Fe <sub>0.5</sub> (H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> •2H <sub>2</sub> O | 1       | 712.34                                 | 1119.78                                | 105.46                                                |
|                                                                                                       | 2       | 931.60                                 | 1883.50                                | 188.69                                                |
| Co <sub>0.5</sub> Fe <sub>0.5</sub> (H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> •2H <sub>2</sub> O | 1       | 59.85                                  | 127.79                                 | 157.90                                                |
|                                                                                                       | 2       | 121.98                                 | 89.93                                  | -70.71                                                |
|                                                                                                       | 3       | 174.22                                 | 144.05                                 | -45.98                                                |

#### 4.5 ผลการคำนวณพลังงานสลายพันธะด้วยเทคนิคทางความร้อน

จากการวิเคราะห์เชิงความร้อนสามารถใช้ข้อมูลสูงสุดของการสลายตัวแต่ละกลไก จากเส้นเทอร์โมแกรม DTG หรือ DTA มาคำนวณหาพลังงานการสลายพันธะในแต่ละกลไก โดยใช้สมการ 2.64 แล้วนำพลังงานการสลายพันธะที่คำนวณได้นั้น ไปเปรียบเทียบกับพันธะที่หายไปของสารที่เปลี่ยนจาก M<sub>0.5</sub>A<sub>0.5</sub>(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>•nH<sub>2</sub>O ไปเป็น MAP<sub>4</sub>O<sub>12</sub> จากเทคนิค FTIR ทำให้สามารถระบุการหลุดออกของโมเลกุลต่าง ๆ ในกลไกย่อย ที่จะใช้ระบุกลไกการสลายตัวทางความร้อนของสารที่ศึกษานี้ โดยปกติ สาร M<sub>0.5</sub>A<sub>0.5</sub>(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>•nH<sub>2</sub>O จะสลายไปเป็น MAP<sub>4</sub>O<sub>12</sub> โดยกลไกของปฏิกิริยา dehydration และ deprotonated hydrogenphosphate สอดคล้องกับพลังงานพันธะที่คำนวณได้ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4.9

**ตารางที่ 4.9** อุณหภูมิสูงสุดของการสลายตัวแต่ละกลไก จำนวนควอนตัม พลังงานพันธะการสั่นจากการคำนวณ และการจำแนกแถบการสั่น สำหรับสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

| สาร                                                                                 | ขั้นตอน | $T_{\text{ap}}/\text{K}$ | $\omega_{\text{cal}}$ | q  | $q\omega_{\text{cal}}/\text{cm}^{-1}$ | Band assignment                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------------|-----------------------|----|---------------------------------------|--------------------------------------|
| $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  | 1       | 385.56                   | 268.07                | 6  | 1608                                  | $\text{V}_2(\text{H}_2\text{O})$     |
|                                                                                     |         |                          |                       | 12 | 3217                                  | $\text{V}_1(\text{H}_2\text{O})$     |
|                                                                                     |         |                          |                       | 13 | 3485                                  | $\text{V}_3(\text{H}_2\text{O})$     |
|                                                                                     | 2       | 403.43                   | 280.49                | 6  | 1683                                  | $\text{V}_2(\text{H}_2\text{O})$     |
|                                                                                     |         |                          |                       | 11 | 3085                                  | $\text{V}_1(\text{H}_2\text{O})$     |
|                                                                                     |         |                          |                       | 12 | 3366                                  | $\text{V}_3(\text{H}_2\text{O})$     |
|                                                                                     | 3       | 470.81                   | 327.32                | 2  | 655                                   | $\text{V}_{\text{as}}(\text{PO}_2)$  |
|                                                                                     |         |                          |                       | 3  | 982                                   | $\text{V}_{\text{s}}(\text{PO}_2)$   |
|                                                                                     |         |                          |                       | 7  | 2291                                  | B Band ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) |
|                                                                                     |         |                          |                       | 8  | 2946                                  | A Band ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) |
|                                                                                     | 4       | 508.44                   | 353.47                | 3  | 1060                                  | $\text{V}_2(\text{H}_2\text{O})$     |
|                                                                                     |         |                          |                       | 7  | 2474                                  | B Band ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) |
|                                                                                     |         |                          |                       | 8  | 2828                                  | A Band ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) |
|                                                                                     | 5       | 616.17                   | 428.34                | 1  | 428                                   | $\text{V}_4(\text{PO}_4^{3-})$       |
|                                                                                     |         |                          |                       | 2  | 857                                   | $\gamma_{\text{OH}}(\text{P-OH})$    |
|                                                                                     |         |                          |                       | 3  | 1285                                  | $\delta_{\text{OH}}(\text{P-OH})$    |
|                                                                                     |         |                          |                       | 7  | 2998                                  | A Band ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) |
|                                                                                     |         |                          |                       | 8  | 3427                                  | $\text{V}_3(\text{H}_2\text{O})$     |
| $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 1       | 386                      | 268                   | 2  | 537                                   | $\text{V}_4(\text{PO}_4^{3-})$       |
|                                                                                     |         |                          |                       | 4  | 1074                                  | $\text{V}_{\text{as}}(\text{PO}_2)$  |
|                                                                                     |         |                          |                       | 6  | 1611                                  | $\text{V}_2(\text{H}_2\text{O})$     |
|                                                                                     |         |                          |                       | 9  | 2416                                  | B Band ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) |
|                                                                                     |         |                          |                       | 11 | 2953                                  | A Band ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) |
|                                                                                     |         |                          |                       | 12 | 3222                                  | $\text{V}_1(\text{H}_2\text{O})$     |
|                                                                                     |         |                          |                       | 13 | 3490                                  | $\text{V}_3(\text{H}_2\text{O})$     |

ตารางที่ 4.9(ต่อ) อุณหภูมิสูงสุดของการสลายตัวแต่ละกลไก จำนวนควอนตัม พลังงานพันธะการสั่นจากการคำนวณ และการจำแนกแถบการสั่น สำหรับสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

| สาร                                                                                 | ขั้นตอน | $T_{\text{ap}}/\text{K}$ | $\omega_{\text{cal}}$ | q  | $q\omega_{\text{cal}}/\text{cm}^{-1}$ | Band Assignment                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------------|-----------------------|----|---------------------------------------|--------------------------------------|
| $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 2       | 504                      | 350                   | 2  | 701                                   | $\nu(\text{P-O}_h)$                  |
|                                                                                     |         |                          |                       | 3  | 1051                                  | $\nu_s(\text{PO}_2)$                 |
|                                                                                     |         |                          |                       | 5  | 1753                                  | C Band ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) |
|                                                                                     |         |                          |                       | 7  | 2454                                  | B Band ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) |
|                                                                                     |         |                          |                       | 9  | 3155                                  | A Band ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) |
| $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 1       | 377                      | 262                   | 6  | 1570                                  | $\nu_2(\text{H}_2\text{O})$          |
|                                                                                     |         |                          |                       | 12 | 3140                                  | $\nu_1(\text{H}_2\text{O})$          |
|                                                                                     |         |                          |                       | 13 | 3402                                  | $\nu_3(\text{H}_2\text{O})$          |
|                                                                                     | 2       | 430                      | 299                   | 2  | 599                                   | $\nu(\text{P-O}_h)$                  |
|                                                                                     |         |                          |                       | 8  | 2396                                  | B Band ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) |
|                                                                                     |         |                          |                       | 10 | 2995                                  | A Band ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) |
|                                                                                     | 3       | 656                      | 456                   | 1  | 456                                   | $\nu(\text{P-O}_h)$                  |
|                                                                                     |         |                          |                       | 2  | 912                                   | $\nu(\text{P-O}_h)$                  |
|                                                                                     |         |                          |                       | 5  | 2280                                  | $\nu(\text{P-O}_h)$                  |
|                                                                                     |         |                          |                       | 7  | 3192                                  | A Band ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) |

## บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง (Conclusion)

### 5.1 สรุปผลการสังเคราะห์ (Synthesis results)

จากการสังเคราะห์ไฮดรตสามชนิดคือ  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ด้วยสารตั้งต้นระบบโลหะคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{CoCO}_3$ ) และโลหะ (Mn และ Fe) กับกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 50-70% โดยมีสารตัวกลางเป็น อะซิโตน และไม่มีตัวกลาง พบว่าเป็นเทคนิคที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว และไม่ก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊ส คือ  $\text{CO}_2$  และ  $\text{H}_2$  ในขั้นตอนการเตรียม ที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจะเกิดไม่รุนแรง จึงไม่เป็นอันตรายขณะเตรียม เหตุเพราะตัวกลางอะซิโตนลดความร้อนของปฏิกิริยาและป้องกันปลดปล่อยแก๊สออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งน่าจะเหมาะที่จะนำเทคนิคนี้ไปใช้เตรียมสารข้างต้น ในระดับอุตสาหกรรมในอนาคต แล้วเมื่อได้สารที่เตรียมขึ้นได้นี้ ได้ศึกษาการสลายตัวทางความร้อน พบว่าสารทั้งหมดสลายตัวที่อุณหภูมิสูงสุด 773 K กลายเป็นโลหะไฮดรอกไซด์หรือฟอสเฟตคือ  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  และ  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  จากได้นำสารที่เตรียมขึ้นได้ทั้งหมด 6 ชนิดไปทำการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบอะตอมชนิดต่างๆ เพื่อระบุสูตรโมเลกุลของสารทั้งหมด ซึ่งก็คือ สูตรโมเลกุลที่ได้กล่าวอ้างไว้แล้ว สำหรับร้อยละผลผลิตที่ได้จากการเตรียมสารแบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่ม  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  มีร้อยละการผลิตอยู่ประมาณ 40-50 ส่วนสารกลุ่ม  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  และ  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  มีร้อยละการผลิตประมาณ 80-90

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

ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารหกชนิดที่เตรียมขึ้นได้เรียงลำดับการวิเคราะห์ คือ เริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์เชิงความร้อน TGA จากนั้นนำสารไปตรวจสอบเอกลักษณ์ทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แล้วตรวจสอบรูปแบบการสั่นภายในโมเลกุล และสุดท้ายตรวจสอบรูปร่างสัณฐานวิทยา ผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.2.1 สรุปผลการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของสาร

สารสามชนิด คือ  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  แม้จะมีสูตรคล้ายๆ กัน แต่พฤติกรรมทางความร้อนและกลไกการสลายตัวทางความร้อนแตกต่างกันอย่างชัดเจน คือสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  มีการสลายตัวทางความร้อน 6 กลไกย่อย ที่ประกอบไปด้วยการสูญเสียโมเลกุลน้ำในโครงผลึก 1 โมเลกุล ที่เกิดขึ้นในสองกลไกแรก และการสูญเสีย 2 โมเลกุล เนื่องจากการสลายตัวของไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ปรากฏในสี่กลไกย่อยหลัง และอุณหภูมิสูงสุดของการสลายตัวอยู่ประมาณ 700 K จึงกลายเป็นสาร  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  ส่วนสาร

$\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  สลายตัวไปเป็น  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  ด้วยกลไกย่อย 2 ขั้นตอน โดยกลไกแรกสูญเสีย 2 โมเลกุล และกลไกที่สองสูญเสีย 2 โมเลกุล เนื่องจากการสลายพันธะของไดไฮโดรเจนฟอสเฟต อุณหภูมิสูงสุดของการสลายตัว ปรากฏที่ 700 K สำหรับสารตัวสุดท้าย  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  สลายตัวไปเป็น  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  ที่อุณหภูมิสูงสุด 773 K โดยผ่านกลไกย่อยสามกลไก ประกอบด้วย การสูญเสีย 2 โมเลกุล ที่เกิดขึ้นในกลไกแรกและการสูญเสีย 2 โมเลกุล ที่เกิดขึ้นในกลไกที่สองและสาม เนื่องจากการสูญเสียไดไฮโดรเจนฟอสเฟต จากผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนของสารกลุ่มนี้ ทั้งสามชนิด ทำให้อธิบายการสลายตัวทางความร้อนว่า เกิดขึ้น 2 ขั้นตอน คือ การสูญเสียภายในโครงผลึก ที่เรียกว่า “ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (dehydration reaction)” และการสูญเสียเนื่องจากการสลายตัวของไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแอนไอออนแล้วเกิดการควบรวมโมเลกุลของฟอสเฟต เรียกว่า “deprotonated dihydrogen phosphate reaction and polycondensation reaction”

### 5.2.2 สรุปผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของสาร

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ทำให้ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีของสารทั้งหมด 6 ชนิด ซึ่งนำมาวิเคราะห์โครงสร้าง โดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานของสารโลหะเดี่ยวคือ  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  เมื่อ  $\text{M} = \text{Ca}, \text{Mn}, \text{Fe}$  และ  $\text{Co}$  โดยพบว่าสารที่เตรียมได้ คือ  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  และ  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เหมือนกับสารโลหะเดี่ยว แต่มีความเข้มของพีคที่แตกต่างกัน ทำให้ระบุโครงสร้างของสารที่เตรียมขึ้นได้ทั้งหมด มีโครงสร้างและระบบผลึกเหมือนกับสารโลหะเดี่ยว ที่เรียกว่า “Isostructural compounds” เมื่อเทียบข้อมูลมาตรฐาน PDF จึงระบุระบบผลึกของสารทั้งหมด คือระบบผลึกแบบ โมโนคลินิก(monoclinic) ที่มี space group เป็น  $\text{P2}_1/\text{n}$  ( $Z = 2$ ) สำหรับ  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ในขณะที่  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  และ  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  มีระบบผลึกเป็นโมโนคลินิก (monoclinic phase) ที่มี space group เป็น  $\text{C2/c}$  ( $Z = 4$ ) และยังได้คำนวณหาค่าตัวแปรทางหน่วยเซลล์ (lattice parameters;  $a, b, c, \beta$ ) ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับสารโลหะเดี่ยวอย่างมาก ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นอธิบายได้ด้วยรัศมีอะตอมของโลหะที่แตกต่างกันที่เข้าไปบรรจุภายในโครงสร้างผลึกนั่นเอง

### 5.2.3 สรุปผลการตรวจเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของสาร

สารประกอบที่เตรียมขึ้นได้ 6 ชนิด 2 กลุ่ม คือ  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และอีกกลุ่มคือ  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  และ  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  เอกลักษณ์การสั่นของสารประกอบไปด้วยหน่วยย่อย คือ  $\text{H}_2\text{PO}_4^{-2}$  แอนไอออน และโมเลกุลน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) เอกลักษณ์ที่บ่งบอกชัดเจนของหน่วยย่อย  $\text{H}_2\text{PO}_4^{-2}$  แอนไอออน คือ การมีรูปแบบการสั่นที่ตำแหน่ง 2900-2800, 2400-2300, 1270-1230 และ 900-800  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นชนิดแถบการสั่นของชนิดแถบการสั่นคือ A band ( $\text{V}_{\text{OH}} \text{HPO}_4^{-2}$ ), B band ( $\text{V}_{\text{OH}} \text{HPO}_4^{-2}$ ), การสั่นแบบผิดรูปของ  $\gamma(\text{POH})$  และ  $\delta(\text{POH})$  ตามลำดับ และต้องมีรูปแบบการสั่นของโมเลกุลน้ำที่ประกอบด้วย 3 รูปแบบ คือ การสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตร( $\text{V}_1$ ), การสั่นแบบยืดหดแบบอสมมาตร( $\text{V}_3$ ) และการสั่นแบบโค้งงอ( $\text{V}_2$ ) โดยจะพบแถบการสั่นในช่วง 3100-3146, 3200-3400 และ 1590-1700  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ และสำหรับสารกลุ่มที่

สองคือ  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  และ  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  จะมีเอกลักษณ์การสั่นของหน่วยย่อยของ  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  แอนไอออน โดยตรงตำแหน่งที่  $1300\text{-}1100\text{ cm}^{-1}$  จะปรากฏพีคการสั่นแยกออกมาว่าสองพีค หรือเกิดเป็นพีคที่กว้างความเข้มสูง ซึ่งเป็นรูปแบบการสั่นของ  $\text{V}_{\text{as}}\text{OPO}^-$  ต่อมาจะมีพีคความเข้มสูงๆ ที่ราว  $1100\text{-}950\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีคของ  $\text{V}_s\text{OPO}^-$  ส่วนพีคตำแหน่งที่สาม จะเป็นลักษณะเด่นของสารกลุ่มนี้ คือ เกิดพีคคู่ที่ตำแหน่ง  $730\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีคการสั่น  $\text{V}_s\text{POP}$  ทำให้โครงสร้างของแอนไอออน  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  มีลักษณะเป็นวงไม่ใช่เส้นตรง สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ทางโครงสร้างด้วยเทคนิค XRD

#### 5.2.4 สรุปผลการตรวจลักษณะสัณฐานวิทยาของสาร

สำหรับผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าสารที่เตรียมได้ทั้งหมดมีขนาดอนุภาคใหญ่ และมีการจับกันเป็นกลุ่มก้อน มีพื้นผิวขรุขระ ไม่มีรูปแบบสัณฐานที่แน่นอน โดยสาเหตุน่าจะเนื่องมาจากเทคนิคการเตรียมที่ใช้เวลารวดเร็ว ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มีความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาคและมีการกระจายอนุภาคที่ไม่ดีนัก

### 5.3 สรุปผลการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์แบบนอนไอโซเทอร์มอล

ผลการคำนวณตัวแปรจลนพลศาสตร์ค่าสัมประสิทธิ์การชน (A) พลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) และอันดับของการสลายตัว (n) ที่พิจารณาได้จากสมการของ Kissinger และ Ozawa นั้น สามารถนำมาจำแนกชนิดกลไกการสลายตัวทางความร้อนของสาร ชนิดคือ  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  เริ่มต้นจากค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ของการสลายตัวแต่ละกลไกทำให้ระบุได้ว่าพลังงานที่ใช้เพื่อสลายโมเลกุลหรือไอออนภายในโครงสร้างของสารทั้งชนิดแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ พลังงานการสูญเสียโมเลกุลน้ำในโครงผลึก ที่มีค่าอยู่ระหว่าง  $60\text{-}150\text{ kJ mol}^{-1}$  และ พลังงานการสูญเสียโมเลกุลน้ำเนื่องจากการสลายพันธะในไอออนไดไฮโดรเจนฟอสเฟต มีค่ามากกว่า  $150\text{ kJ mol}^{-1}$  ขึ้นไป สำหรับปฏิกิริยาการสลายตัวของน้ำที่มีมากกว่าหนึ่งกลไกแล้วมีพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ไม่เท่ากัน หรือมีค่าสูง หรือต่ำ ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันของโมเลกุลของน้ำภายในโครงสร้างสารนั้น หากมีค่าสูงกว่าแสดงว่ามีแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงทำให้เกิดการสลายตัวได้ยากกว่า ค่าต่ำ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การชน (A) บ่งบอกถึงปฏิกิริยาของแข็ง โดยพิจารณาเลขชี้กำลังที่มีค่าเท่ากับ 6 หรือ 7 จะส่งผลกระทบต่อพื้นผิวของของแข็งนั้น หากตัวแปรที่มีค่าต่ำ แสดงว่าปฏิกิริยาการสลายตัวไม่ขึ้นอยู่กับพื้นผิว เกิดปฏิกิริยา “tight complex” หากตัวแปรที่มีค่าสูง แสดงว่าปฏิกิริยาการสลายตัวไม่ขึ้นอยู่กับพื้นผิว เกิดปฏิกิริยา “loose complex” สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การชน (A) ของแต่ละกลไกการสลายตัวทางความร้อนของสารทั้งสามชนิด กลไกใดมีค่าเลขชี้กำลังมากกว่า 10 บ่งบอกลักษณะของปฏิกิริยาแบบ เกิดปฏิกิริยา “loose complex” หากมีค่าต่ำกว่า 10 บ่งบอกปฏิกิริยาแบบ “tight complex” ตัวแปรสุดท้ายคืออันดับของปฏิกิริยา n หรือตัวแปร Avrami ที่สะท้อนการเปลี่ยนแปลงปริมาตรผลึก เนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างผลึกหรือลักษณะการยึดเหนี่ยวภายในโครงสร้างสามมิติ ถ้ามีค่าต่ำ บ่งบอกถึงการขยายขนาดนิวเคลียสจำนวนมาก ต่อด้วยการเติบโตอย่างจำกัด เกิดเป็นองค์ประกอบสัณฐานอย่างเข้มงวด แต่หากมีค่าสูง แสดงถึงกรณีอัตราการเพิ่มนิวคลีเอชัน ต่อด้วยการเติบโตของนิวเคลียสและเกิดนิวคลีเอชันแบบสุ่ม สำหรับค่าที่คำนวณได้แต่ละกลไกของสาร

$\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  มีค่าต่ำ นั้นแสดงว่าอันดับของกลไกการสลายตัวแต่ละกลไกของสารดังกล่าว มีลักษณะของการขยายขนาดนิวเคลียสจำนวนมาก ต่อด้วยการเติบโตอย่างจำกัด เกิดเป็นองค์ประกอบออสัญฐานอย่างเข้มงวด แต่สำหรับค่าอันดับปฏิกิริยาการสลายตัวของสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  มีค่ามาก นั้นแสดงว่าปฏิกิริยาแสดงลักษณะอัตราการเพิ่มนิวเคลียส ต่อด้วยการเติบโตของนิวเคลียสและเกิดนิวเคลียสแบบสุ่ม โดยงานวิจัยนี้ได้เปลี่ยนแปลงสมการสำหรับการคำนวณหาอันดับปฏิกิริยาการสลายเพื่อฟังก์ชัน  $g(\alpha)$  หรือ  $f(\alpha)$  เนื่องจากพฤติกรรมของการสลายตัวทางความร้อนของสาร 2 ตัว คือ  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  มีกลไกการสลายที่มีความซับซ้อนมากที่จะนำมาพิจารณา พร้อมกันนั้นสมการที่จะใช้คำนวณหาฟังก์ชันดังกล่าว นั้น มีความไม่เหมาะสม เนื่องจากมีขีดจำกัดที่จะประยุกต์ใช้กับสารที่มีปฏิกิริยาที่ซับซ้อน ณ ปัจจุบัน ตามงานวิจัยของ Vlase และคณะ (2008) และ Vlaev และคณะ (2008, 2009)

#### 5.4 สรุปผลการวิเคราะห์เทอร์โมไดนามิกส์ของการสลายตัวทางความร้อน

ผลการคำนวณฟังก์ชันเทอร์โมไดนามิกส์ พลังงานอิสระกิบส์ ( $\Delta G^*$ ) พลังงานเอนทาลปี ( $\Delta H^*$ ) และเอนโทรปี ( $\Delta S^*$ ) ของการสลายตัวของสารประกอบไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรต 3 ชนิด คือ  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  พบว่าได้ค่าพลังงานอิสระกิบส์ ( $\Delta G^*$ ) มีค่ามากกว่าศูนย์ ทุกกลไกของการสลายตัวสำหรับสารแต่ละชนิด แสดงว่ากลไกที่เกิดขึ้นสำหรับสารทั้งสามจะเกิดขึ้นเองไม่ได้ หากไม่ได้รับพลังงานจากภายนอก ซึ่งก็คือ พลังงานความร้อน สำหรับค่ามาก หรือค่าน้อย ซึ่งให้เห็นถึงการเกิดได้ยากหรือง่ายของแต่ละกลไก ซึ่งก็สัมพันธ์กับชนิดกลไกของการสลายตัว สอดคล้องกับการสลายพันธะในแต่ละกลไกนั่นเอง ต่อมาค่าพลังงานเอนทาลปี ( $\Delta H^*$ ) ของแต่ละกลไกที่คำนวณได้ ค่าบวก แสดงถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เป็นแบบดูดความร้อน (endothermic) ค่าลบ บ่งบอกชนิดปฏิกิริยาเป็น คายความร้อน (exothermic) แล้วจากกลไกการสลายตัวของสารทั้งสามชนิด ได้ค่าที่เป็นบวกทั้งหมด นั้นหมายความว่า ปฏิกิริยาการสลายตัวในแต่ละกลไกเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งสอดคล้องเป็นอย่างดีกับค่าที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค DTA ตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ ตัวสุดท้าย คือ เอนโทรปี ( $\Delta S^*$ ) หากมีค่าเป็นบวกแสดงว่า สารเชิงซ้อนก่อกัมมันต์ในขณะการสลายตัวทางความร้อนมีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบสูง เกิดจากที่โมเลกุลหรือไอออนภายในโครงสร้างมีดีกรีอิสระการหมุนและสั่นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้ เกิดเร็ว “fast stage” ในทางตรงกันข้ามหากมีค่าติดลบ แสดงถึงการที่สารเชิงซ้อนก่อกัมมันต์ที่เกิดขึ้นมีความเป็นระเบียบ และมีดีกรีอิสระการหมุนและการสั่นน้อยกว่าสารที่ไม่ใช่สารเชิงซ้อนก่อกัมมันต์ ซึ่งก็คือ สารเริ่มต้น หรือสารผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ เกิดช้า “slow stage” แล้วจากข้อมูลที่ได้จากความคำนวณ มีกลไกบางกลไกที่มีค่าติดลบ นั้นแสดงว่ากลไกนั้นเกิดช้า หรือเกิดขึ้นได้ยาก ส่วนใหญ่แล้วกลไกจะมีค่าบวก แสดงว่ากลไกการสลายตัวทางความร้อนเกิดขึ้นได้รวดเร็วขึ้นเอง

## 5.5 สรุปผลการการคำนวณพลังงานสลายพันธะด้วยเทคนิคทางความร้อน

จากการคำนวณพลังงานการสลายพันธะจากพลังงานความร้อนที่ทำให้โมเลกุลหรือไอออนที่เป็นองค์ประกอบย่อยภายในโครงสร้างของสาร  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$   $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  นำไปสู่การจำแนกชนิดกลไกการสลายตัว ด้วยการพิจารณาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองจาก FTIR และเอกสารอ้างอิงรูปแบบการสั่น ได้ผลสอดคล้องกันเป็นอย่างดีในการระบุกลไกจากการทดลองการสลายตัวทางความร้อนจากข้อมูลการวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเทคนิค TGA ผลที่ได้รับสรุปชัดเจนว่า กลไกการสลายตัวของสารทั้งสามชนิด ประกอบด้วย 2 ปฏิกริยา คือ ปฏิกริยาการสูญเสียภายในโครงผลึก (dehydration reaction) และ ปฏิกริยาการสูญเสียจากการดีโพรโทเนตเตด ไฮโดรเจนฟอสเฟต (deprotonated hydrogen phosphate reaction)

สำหรับสารตัวแรกคือ  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  มีกลไกการสลายทางตัวทางความร้อนเกิด 6 กลไกย่อย การคำนวณพลังงานการสลายพันธะระบุชนิดของกลไกได้เรียงตามลำดับคือ การสูญเสีย 1 โมเลกุลภายในโครงผลึก สำหรับ 2 กลไกแรกและอีก 4 กลไกเกี่ยวข้องกับการสลายพันธะไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเกิดการสูญเสียอีก 2 โมเลกุล สารตัวที่สอง  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ข้อมูลทาง TGA บ่งชี้ว่ามีกลไกการสลายตัว 2 กลไกย่อย แล้วเมื่อคำนวณพลังงานการสลายพันธะ ทำให้ระบุได้อย่างชัดเจนว่า กลไกแรกเกิดการสลายพันธะของโมเลกุลของน้ำ 2 โมเลกุล และกลไกที่สองเกิดการสลายพันธะของไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเกิดการสูญเสียอีก 2 โมเลกุล สำหรับสารตัวที่สาม  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  มีกลไกการสลายตัวทางความร้อนปรากฏ 3 กลไก จากข้อมูล TGA เมื่อคำนวณระบุพลังงานการสลายพันธะและจำแนกพลังงานระบุชนิดการสลายตัวทางความร้อนทำให้ระบุได้ว่า กลไกแรกและกลไกที่สาม เกี่ยวข้องกับการสลายพันธะของโมเลกุลของน้ำ 2 โมเลกุล ที่อยู่ในตำแหน่งภายในโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน และกลไกที่สองกับกลไกที่ 4 เกี่ยวข้องกับการสลายพันธะไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเกิดการสูญเสียอีก 2 โมเลกุล และจากการนำเสนอสมมุติฐานเพื่อการคำนวณหาพลังงานการสลายพันธะภายในโมเลกุลของสารที่เป็นของแข็งที่สัมพันธ์กับการวิเคราะห์เชิงร้อน พบว่าผลที่ได้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้เป็นอย่างดีเมื่อเทียบกับข้อมูลการจากการทดลองด้วยเทคนิค FTIR และข้อมูลอ้างอิงจากหนังสือรูปแบบการสั่นภายในสารประกอบ จึงมีความเป็นไปได้ ที่จะนำสมการที่ผู้วิจัยนี้ ได้นำเสนอไปใช้งานกับสารในกลุ่มของแข็งอื่น เพื่อการวิเคราะห์และจำแนกกลไกการสลายตัวและความเสถียรเชิงความร้อน ของสารชนิดอื่นที่มีความสำคัญต่อไป

## 5.6 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยได้ทำการเตรียมสารขึ้น 2 กลุ่มๆ ละ 3 ตัว ได้แก่  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  และสารอนุพันธ์ทางความร้อน  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  และ  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  โดยสำหรับสารกลุ่มไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ไฮเดรตนั้น ได้เตรียมจากสารตั้งต้นกลุ่มโลหะคาร์บอเนต โดยหากทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริกโดยตรง ปฏิกิริยาจะมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และถ้าหากเตรียมจากสารโลหะ เช่น Mn และ Fe จะทำให้ปฏิกิริยา มีการปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) ปฏิกิริยาการเตรียมเป็นแบบปฏิกิริยาคายความร้อนที่ค่อนข้างรุนแรง

ซึ่งต้องมีความระมัดระวังในการเตรียมอย่างยิ่ง เพราะปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นภายในระยะเวลาเร็วมาก โดยงานวิจัยได้เตรียมสารด้วยวิธีนี้ 2 ชนิด คือ  $Mn_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  (Boonchom และคณะ; 2009) และ  $Co_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  (Boonchom และคณะ; 2010) และงานวิจัยนี้ได้คิดค้นกระบวนการเตรียมที่สะดวก รวดเร็วและไม่ก่อให้เกิดอันตราย พร้อมเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้น จึงได้ประยุกต์ใช้ตัวกลางที่ป้องกันการปลดปล่อยแก๊ส และลดปฏิกิริยาการคายความร้อนลง นั่นก็คือ อะซิโตน ซึ่งนับได้ว่าการใช้อะซิโตนเป็นตัวกลางสำหรับการเตรียมนั้น ยังมีผลดี อีกด้าน คือ ทำให้ขนาดอนุภาคมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ และมีสมบัติอื่น ๆ อาทิ เช่น เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติทางแสง และสมบัติความเป็นแม่เหล็กแตกต่างจากเทคนิคการเตรียมโดยไม่ใช้ตัวกลาง โดยสารที่เตรียมขึ้นได้สำหรับงานวิจัยนี้ จึงได้รายงานผลการวิจัย เฉพาะสารที่ถูกเตรียมขึ้นได้โดยเทคนิคที่ประหยัด รวดเร็วและเป็นมิตร นี้ เพียง 3 ตัว ได้แก่  $Mn_{0.5}Ca_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ ,  $Mn_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  และ  $Co_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  แล้วได้ใช้สารเหล่านี้เป็นสารตั้งต้นสำหรับใช้เตรียมสารกลุ่มไฮโคเลเตตระฟอสเฟต ได้ อีก 3 ตัว คือ  $MnCaP_4O_{12}$ ,  $MnFeP_4O_{12}$  และ  $CoFeP_4O_{12}$  โดยเผาสารตั้งต้นที่  $500^\circ C$  ซึ่งนับว่าเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่างานวิจัยอื่นในการเตรียมสารกลุ่มนี้ ซึ่งมักจะถูกเตรียมขึ้นที่สภาวะอุณหภูมิมากกว่า จุดหลอมเหลว ของสารโลหะเตียว ( $M_2P_4O_{12}$ ) คือ  $> 900^\circ C$  และจากการศึกษาการเตรียมสารกลุ่มนี้ งานวิจัยนี้ ยังค้นพบการเตรียมสารทวิโลหะไฮโคเลเตตระฟอสเฟต ( $M''M'P_4O_{12}$ ) คือการเตรียม  $MnFeP_4O_{12}$  (Boonchom & Naratip; 2010) และ  $CoFeP_4O_{12}$  (Boonchom และ คณะ; 2009, 2010) ด้วยวิธีการเผาแบบขั้นตอนเดียว ซึ่งต่างจากงานวิจัยที่มีมาก่อนนี้ที่ต้องเตรียมด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบสองขั้นตอนที่ต้องใช้เวลาค่อนข้างนาน เป็นการสิ้นเปลือง โดยจากงานวิจัยในระยะเวลา 2 ปี งานวิจัยนี้ได้รับความสำเร็จทั้งด้านการศึกษาเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการค้นคว้าหากระบวนการเตรียมสาร 2 กลุ่มดังกล่าว และยังได้รับข้อมูลทางศาสตร์จลนพลศาสตร์ เทอร์โมไดนามิกส์และการคำนวณการสลายพันธะด้วยตัวแปรอุณหภูมิของการสลายตัว ซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อมูลสำคัญในระดับการศึกษา และผลงานที่เป็นตัวชี้วัดจำนวน คือผลงานตีพิมพ์ในระดับนานาชาติ 10 เรื่อง จากสิ่งที่ได้ศึกษาวิจัยผ่านมานี้ จะเห็นว่าเป็นส่วนงานวิจัยที่น้อยนิด เมื่อเทียบกับจำนวนสารในกลุ่มนี้ที่ควรจะศึกษา ซึ่งมีเป็นจำนวนมาก หากพิจารณาตามสูตร คือ  $M''_{0.5}M'_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$  และ  $M''M'P_4O_{12}$  เมื่อ  $M''$  และ  $M'$  เป็นโลหะ Ca, Mg, Ba, Mn, Fe, Co, Cu, Ni, Zn, Cd ดังนั้นงานวิจัยนี้ควรได้มีการศึกษาและทำวิจัยเพิ่มเติมต่อไป เพื่อการค้นพบกระบวนการเตรียม และเพื่อให้ได้สารจำนวนมากขึ้น จะมีประโยชน์ยิ่ง ต่อภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม ที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน เพราะสารกลุ่มเหล่านี้ ถูกใช้ได้จริงในต่างประเทศโดยมิได้รับการยืนยันที่ชัดเจน โดยการจดสิทธิบัตร (Trojan และคณะ; 1990)



# 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

Banjong Boonchom<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup> King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chumphon Campus, 17/1 M. 6 Pha Thiew District, Chumphon, 86160, Thailand

<sup>b</sup> Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 23 November 2008

Received in revised form 25 March 2009

Accepted 26 March 2009

Available online 5 April 2009

### Keywords:

Calcium dihydrogenphosphate monohydrate

Aqueous and acetone

Rapid precipitation

Parallelogram-like particles

## ABSTRACT

Calcium dihydrogenphosphate monohydrate ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) was prepared by a rapid and simple precipitation method using  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{H}_3\text{PO}_4$  in aqueous and acetone media at ambient temperature. The thermal transformation of the synthesized  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  at  $500^\circ\text{C}$  was obtained to be  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  occurred through the dehydration and the phosphate condensation reactions, as revealed by thermoanalytical techniques (TG/DTG/DTA). The synthesized  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and its decomposition product  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  were characterized by X-ray powder diffraction (XRD), Fourier transfer infrared (FTIR) spectroscopy and scanning electron microscope (SEM). Thermal behavior and the morphology of the synthesized  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  in aqueous and acetone media are compared with those of other works. The SEM micrograph of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  show parallelogram-like microparticles containing small and large grain sizes. The aqueous and acetone media are proposed to play an important role in the synthetic process of calcium phosphates in exhibiting different physical properties, which are important for specific applications.

© 2009 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

Calcium phosphate compounds have been investigated extensively during the past 50 years. They are primarily used as bone substitutes in the biomedical industry due to their biocompatibility, low density, chemical stability, high wear resistance, and their compositional similarity with the mineral phase of bone [1–10]. They are composed of ions commonly found in physiological environment, which make them highly biocompatible. They exist in different forms and phases depending on temperature, partial pressure of water and the presence of impurities [7,8]. Different forms and phases are used in different applications depending upon whether a resorbable or bioactive material is desired [10]. For example, HAP,  $\beta$ -TCP,  $\alpha$ -TCP, biphasic calcium phosphate (BCP) [9], monocalcium phosphate monohydrate (MCPM) and unsintered apatite (AP) are different forms of commercially available calcium phosphates currently used in the biomedical industry. In addition, they exhibit considerably improved biological affinity and activity compared to other bioceramics such as alumina, zirconia, coralline, ALCAP (aluminum calcium phosphate ceramics), ZCAP (zinc calcium phosphate oxide ceramics), ZSCAP (zinc sulphate calcium phosphate ceramics) and FECAP (ferric calcium

phosphate oxide ceramics). Therefore, they are the materials of choice in both dentistry and medicine nowadays [4–6]. In another application, calcium phosphates are valuable phosphorus (P) and micronutrient (Ca) fertilizer due to their solubility in soil [11]. When calcined, they yield other forms such as calcium pyrophosphate and calcium polyphosphate, which are used as pigments, catalysts and fertilizers [11]. For instance, an important production step of phosphate fertilizers, such as calcium polyphosphates ( $\text{CaP}_2\text{O}_6$  or  $\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$ ), is the acid thermal treatment of the phosphate raw materials accompanied by condensation of the intermediate acidic salts, mainly  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . So far, calcium phosphates, such as  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$ , were synthesized by several methods: precipitation method [12], hydrothermal reaction [13], template method [14], sol–gel method [15], microemulsion synthesis [16], micelle synthesis [17], mechanochemical synthesis [18], combustion method [19] and microwave irradiation [20]. Conventional precipitation method has some drawbacks in precisely controlling the stoichiometry, crystallinity, larger particle size and morphology of products, which were improved via introducing surfactants as templates [14], ultrasound irradiation [20] and microwave irradiation [21], microemulsion [14] and micelle [16] as the reaction vessels. Most recently, the preparation of some transition metal phosphates by different synthesis conditions and medium agents had been reported, which give rise to final metal phosphates with cost-effective method [22–24]. The preparation methods need to obtain well-defined chemical microstructure

\* Tel.: +66 7750 6422x4546; fax: +66 7750 6410.

E-mail address: [kbbanjon@kmitl.ac.th](mailto:kbbanjon@kmitl.ac.th).

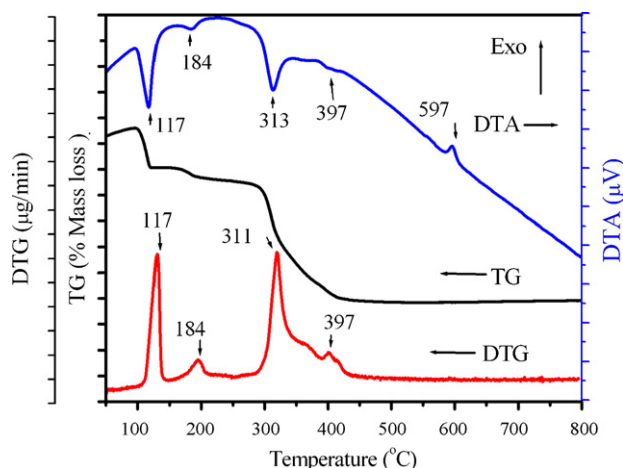


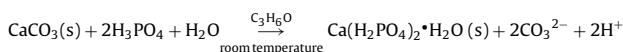
Fig. 1. TG/DTG/DTA curves of the synthesized  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  in aqueous acetone media at a heating rate of  $10^\circ\text{C min}^{-1}$  in static air.

depends mainly on the conditions of synthesis [22]. These are obtained when the materials were synthesized using a solution-based method. The main advantage is the molecular level mixing which facilitates the formation of polycrystalline homogeneous particles with improved properties.

Herein, the present paper reports the synthesis of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  by a simple precipitation from calcium carbonate and phosphoric acid in aqueous and acetone media at ambient temperature with the short time consumption (15 min). The presence of acetone reduced hot reaction and prevented the evolved  $\text{CO}_2$  (g) in the precipitation process. This method is a simple, rapid and cost-effective route for the preparation of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , which exhibits the significant difference of physical properties with previous works [2,4,9]. The resulting sample, its dehydration procedure and product were characterized by TG/DTA/DTG, XRD, SEM, and FTIR.

## 2. Experimental

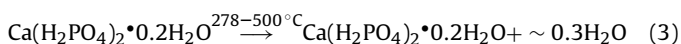
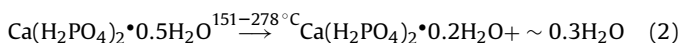
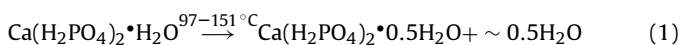
The  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  compound was prepared by precipitation methods using  $\text{CaCO}_3$  (99.99%, Merck) and phosphoric acid (86.4%, w/w  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , Merck) as starting materials. In a typical procedure, 10 mL of acetone (99.9% Carlo Erba) was added to 1.0080 g of calcium carbonate and this mixed solution was referred to as suspension A. Next, 81.02 mL of (86.4%, w/w  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) was diluted in 18.98 mL of de-ionized water and this solution was referred to as solution B. Then, 5 mL of the solution B was added to the suspension A and the resulting mixture was mechanically stirred at ambient temperature about 15 min. Finally, the white precipitation of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  was obtained, filtered by suction pump, washed with acetone until free from phosphate ion and dried in air. Its final decomposition product seemed to occur at temperatures above  $500^\circ\text{C}$  (Fig. 1). The dried white precipitation then was calcined in a box furnace at  $500^\circ\text{C}$  for 3 h in air. The final product was obtained as a white pink solid.



Calcium content was determined by atomic absorption spectrophotometer (Analyst 100, PerkinElmer). Thermal property of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  was investigated on a TG-DTA Pyris Diamond PerkinElmer Instruments. About 8–10 mg of sample was heated over the temperature range from  $30$  to  $800^\circ\text{C}$  with the heating rate of  $10^\circ\text{C min}^{-1}$  and the  $\text{O}_2$  flow rate of  $100\text{ mL min}^{-1}$ . The thermogram of sample was recorded in open alumina pan using  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  as the reference material. The structure and crystalline size of the prepared sample and its decomposition product were identified by X-ray powder diffraction using a D8 Advanced powder diffractometer (Bruker AXS, Karlsruhe, Germany) with  $\text{Cu K}\alpha$  radiation ( $\lambda = 0.1546\text{ nm}$ ). The Scherrer method was used to evaluate the crystalline size (i.e.  $D = K\lambda/\beta\cos\theta$ , where  $\lambda$  is the wavelength of X-ray radiation,  $K$  is a constant taken as 0.89,  $\theta$  is the diffraction angle and  $\beta$  is the full width at half maximum (FWHM)) [25–27]. The morphology of the selected resulting samples was examined with Scanning Electron Microscope (SEM) using LEO SEM VP1450 after gold coating. The room temperature FTIR spectra were recorded in the range of  $4000\text{--}370\text{ cm}^{-1}$  with 8 scans on a PerkinElmer Spectrum GX FT-IR/FT-Raman spectrometer with the resolution of  $4\text{ cm}^{-1}$  using KBr pellets (KBr, spectroscopy grade, Merck).

## 3. Results and discussion

The TG/DTG/DTA curves of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  are shown in Fig. 1. The TG curve shows the mass loss between  $30$  and  $800^\circ\text{C}$ , which are related to the elimination of water molecules in crystallization water and an intermolecular phosphate condensation. The eliminations of water were observed in three areas:  $97\text{--}151$ ,  $151\text{--}278$  and  $278\text{--}500^\circ\text{C}$ . The weight losses in three stages are 3.80, 2.10 and 15.42%, which correspond to 0.53, 0.29 and 2.15 mol of water for  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , respectively. The DTA curve shows four endothermic and one exothermic effects over the temperature region at  $117$ ,  $184$ ,  $383$ ,  $397$  and  $597^\circ\text{C}$  whereas the DTG curve shows four peaks at  $117$ ,  $184$ ,  $383$  and  $397^\circ\text{C}$ . The thermal decomposition of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  in the range of  $97\text{--}500^\circ\text{C}$  is a complex process, which involves the dehydration of the coordinated water molecules (1 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ) and an intramolecular deprotonated phosphate groups or phosphate condensation (2 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ) as shown in equations (1)–(4).



A large number of intermediate compounds, such as  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ( $n = 0.2$  and  $0.5$ ), acid polyphosphate  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , acid condensed phosphate  $\text{CaH}_2\text{P}_2\text{O}_7$  and mixtures of intermediate have been registered. Further, a small exothermic effect at  $597^\circ\text{C}$  without appreciable weight loss is observed in the DTA curve, which can be ascribed to a transition phase from  $\gamma\text{-CaP}_2\text{O}_6$  to  $\beta\text{-CaP}_2\text{O}_6$  form for the precipitate derived from acetone solution. This result may be not in agreement with literature [4], which reported higher temperature ( $>700^\circ\text{C}$ ) of this transition phase.  $\gamma$ -Calcium polyphosphate  $\gamma\text{-CaP}_2\text{O}_6$  was found to be the products of the thermal decomposition in the range of  $500\text{--}597^\circ\text{C}$  as revealed by the TG curve. Total mass loss is (21.32%,  $2.98\text{H}_2\text{O}$ ) for  $\text{CaCO}_3(\text{s})\text{--H}_3\text{PO}_4$  in aqueous and acetone media, which is closely to the theoretical value (21.48%,  $3.00\text{H}_2\text{O}$ ). In order to gain the complete dehydrated  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  in aqueous and acetone media, the synthesized  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  was heated in the furnace at  $500^\circ\text{C}$  for 3 h and its dehydration product,  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  (white pink) was obtained and was further investigated by XRD and FTIR results. The thermal behavior of synthesized  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  in aqueous and acetone media is significantly different from the dehydration reaction of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  reported in literatures [4,28]. This result indicates that the medium reagents for precipitation have the effects on the thermal transformation of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ .

The XRD patterns of the synthesized  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and its dehydration product,  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  are shown in Fig. 2. All detectable peaks of the obtained  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  samples are indexed as  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\gamma\text{-CaP}_2\text{O}_6$  structures, which are identified using the standard data of PDF # 0903047 and PDF # 500584, respectively. These results indicated that the two crystal structures are in monoclinic system with space group  $P2_1/n$  ( $Z=2$ ) for  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $Cc$  ( $Z=4$ ) for  $\text{CaP}_2\text{O}_6$ . The average crystallite size of  $63 \pm 16\text{ nm}$  for  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  sample was calculated from X-ray line broadening of the reflections of (020), (001), ( $-111$ ), (120) and (040), using Scherrer equation (i.e.  $D = 0.89\lambda/\beta\cos\theta$ , where  $\lambda$  is the wavelength of X-ray radiation,  $D$  is a constant taken as 0.89,  $\theta$  is the diffraction angle and  $\beta$  is the full width at half maximum (FWHM)) [25,26]. Similarly, the average crystallite size of  $38 \pm 16\text{ nm}$  for calcined sample ( $\text{CaP}_2\text{O}_6$ ) was calculated from X-ray line broadening of the reflections of (022), ( $-131$ ), (312), (313) and ( $-241$ ). The lattice parameters

**Table 1**Average crystallite sizes and lattice parameters of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  calculated from XRD data.

| Lattice parameters         | $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ |              |                      | $\text{CaP}_2\text{O}_6$ |             |                      |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------|----------------------|--------------------------|-------------|----------------------|
|                            | This work                                                     | PDF #0903047 | DIF. (this work-PDF) | This work                | PDF #500584 | DIF. (this work-PDF) |
| $a$ (Å)                    | 6.27(4)                                                       | 6.25         | +0.02                | 9.45(0)                  | 9.56(4)     | −0.11                |
| $b$ (Å)                    | 11.32(1)                                                      | 11.89        | −0.57                | 9.54(0)                  | 9.50(1)     | +0.04                |
| $c$ (Å)                    | 5.94(2)                                                       | 5.63         | +0.31                | 10.59(0)                 | 10.37(1)    | +0.22                |
| $\beta$ (°)                | 114.11(0)                                                     | 114.20       | −0.09                | 93.62(0)                 | 93.47(0)    | +0.15                |
| Average particle size (nm) | $63.71 \pm 16$                                                | –            | –                    | $38.34 \pm 16$           | –           | –                    |

calculated from the XRD spectra are  $a = 6.27(4)$  Å,  $b = 11.32(1)$  Å,  $c = 5.94(2)$  Å for  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $a = 9.45(0)$  Å,  $b = 9.54(0)$  Å,  $c = 10.59(0)$  Å for  $\text{CaP}_2\text{O}_6$ . The lattice parameters of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  are close to those of the standard data PDF # 0903047 and PDF # 500584, respectively. The crystallite sizes and lattice parameters are also tabulated in Table 1.

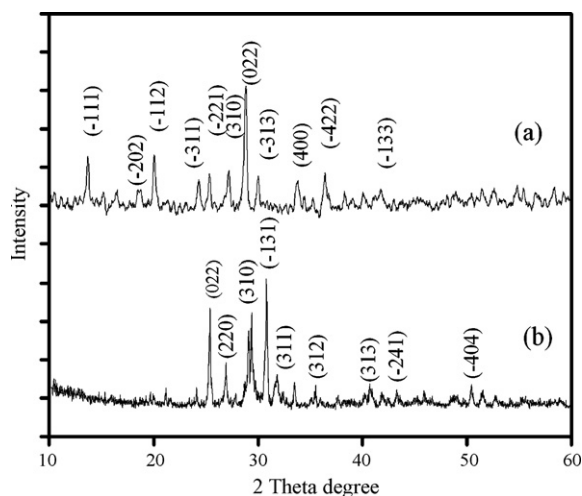
The FT-IR spectra of the obtained  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  samples are shown in Fig. 3 and found to be very similar to those observed by Chapman [29], which are assigned relating to the fundamental vibrating units,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{PO}_3^-$  ion ( $\text{P}_2\text{O}_6$  or  $(\text{PO}_3)_2$ ), respectively. The highest site symmetry of  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ion is  $\text{C}_{2v}$ , in the crystallographic unit cell ( $P2_1/n$ ,  $Z = 2$ ) [29], however, the four  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ions are located on the set of non-equivalent site symmetry of  $\text{C}_1$ . A pair of  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ions is related to each other by a center of symmetry. The four fundamental modes of the free phosphate ion undergo factor group splitting [29]. The O–H stretching of the  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ion gives rise to a complex feature (the A, B, C trio) of which only the two former components are clearly visible, the third component (C) possibly contributing to the breadth of the bands in the water bending region ( $1850$ – $1495$   $\text{cm}^{-1}$ ) and/or the multiple bands in this region [29]. Two bands centered at  $2953$  and  $2337$   $\text{cm}^{-1}$  in FTIR spectra are referred to as bands A and B, respectively. The third component (band C) is observed around  $1600$   $\text{cm}^{-1}$ . The intense band at about  $1241$   $\text{cm}^{-1}$  is due to the in plane P–O–H bending ( $A_2$ ), while the out of plane bending ( $A_1$ ) vibration is observed at about  $887$   $\text{cm}^{-1}$ . Vibrational spectra of present hydrate were assigned by factor group analysis and derived from the same mode in the free  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ion [29]. A strong band at about  $1113$   $\text{cm}^{-1}$  in FTIR spectra is assigned to  $\text{PO}_2$  asymmetric stretching ( $B_1$ ). The FTIR frequency of the  $\text{P}(\text{OH})_2$  asymmetric stretching ( $B_2$ ) shows the strong band at about  $958$   $\text{cm}^{-1}$ . The weak band at about  $866$   $\text{cm}^{-1}$  is assigned to  $\text{P}(\text{OH})_2$  symmetric stretching modes ( $A_1$ ). The medium band at about  $569$   $\text{cm}^{-1}$  is corresponding to  $\text{PO}_2$  bending modes ( $B_1$ ). A strong band appeared at about  $506$   $\text{cm}^{-1}$  is attributed to  $\text{PO}_2$  rock-

ing mode ( $B_1$  or  $A_2$  vibrations), respectively. In addition, a weak band in FTIR spectra is observed at around  $392$   $\text{cm}^{-1}$  according to  $\text{P}(\text{OH})_2$  bending mode ( $A_1$ ).

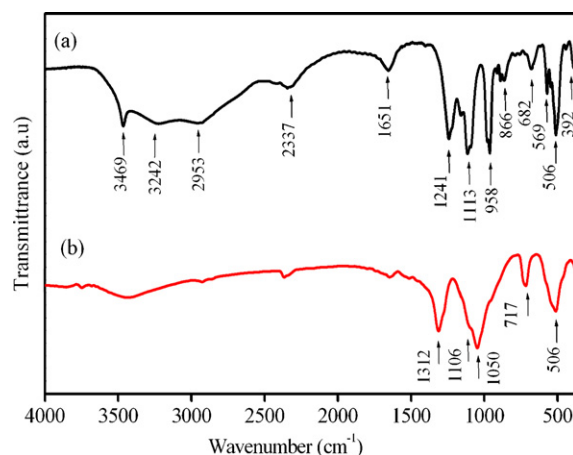
Unlike the  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ion, two water molecules occupy general position in the crystal [28,29]. The band of water vibrations are illustrated in Fig. 3 as a broad band ( $1651$   $\text{cm}^{-1}$ ) contributes both to the band C and to the water bending region [30]. A weak band occurs in the FTIR spectra at approximately  $682$   $\text{cm}^{-1}$  is assigned to rocking mode involving water molecules. The  $\nu_{\text{OH}}$  stretching modes of  $\text{HOH}$  in  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  appear at  $3242$   $\text{cm}^{-1}$  ( $\nu_1$ ) and  $3469$   $\text{cm}^{-1}$  ( $\nu_3$ ). The bands associated with the  $\nu_{\text{OH}}$  stretching frequencies in  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ion are observed at about  $2953$  (band A) and  $2337$  (band B)  $\text{cm}^{-1}$  [31].

The FTIR bands of the  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  (Fig. 3b) are characterized based on the fundamental vibrating units namely  $\text{PO}_3^-$  anion. The P–O stretching modes of the  $[\text{PO}_3]^-$  anion are known to appear in the  $1350$ – $1000$   $\text{cm}^{-1}$  region [29]. The symmetric  $\text{PO}_2$  stretching vibrations ( $\nu_{\text{sym}}\text{PO}_2$ ) for the  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  sample are observed in the range of  $1106$ – $1050$   $\text{cm}^{-1}$ , while the asymmetric stretching vibrations ( $\nu_{\text{asym}}\text{PO}_2$ ) are located at  $1312$   $\text{cm}^{-1}$ . The asymmetric ( $\nu_{\text{asym}}\text{POP}$ ) and symmetric stretch ( $\nu_{\text{sym}}\text{POP}$ ) bridge vibrations for this sample are observed at  $717$  and  $506$   $\text{cm}^{-1}$ , respectively. The  $\text{PO}_3$  deformation, rocking modes, the POP deformations, the torsional and external modes are found in the  $400$ – $230$   $\text{cm}^{-1}$  region.

The SEM micrographs of the obtained  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  samples are shown in Fig. 4. The particle shape and size are changed throughout the whole decomposition product. The SEM micrograph of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (Fig. 4a) illustrates many small and some large parallelogram-like crystals, having sizes of about  $0.25$ – $2.0$   $\mu\text{m}$  in length and  $0.3$ – $0.8$   $\mu\text{m}$  in width for small parallelogram-like crystals and about  $0.5$ – $5.0$   $\mu\text{m}$  in length and  $1.0$ – $2.0$   $\mu\text{m}$  in width for large parallelogram-like crystals, respectively. The SEM micrograph of the  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  shows re-texturing and coalescence in aggregates of irregularly shaped crystals of different sizes ( $0.40$ – $1$   $\mu\text{m}$ ) (Fig. 4b). The morphology of the pre-



**Fig. 2.** XRD patterns of the synthesized  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (a) and its decomposition product  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  (b).



**Fig. 3.** FTIR spectra of the synthesized  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (a) and its decomposition product  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  (b).

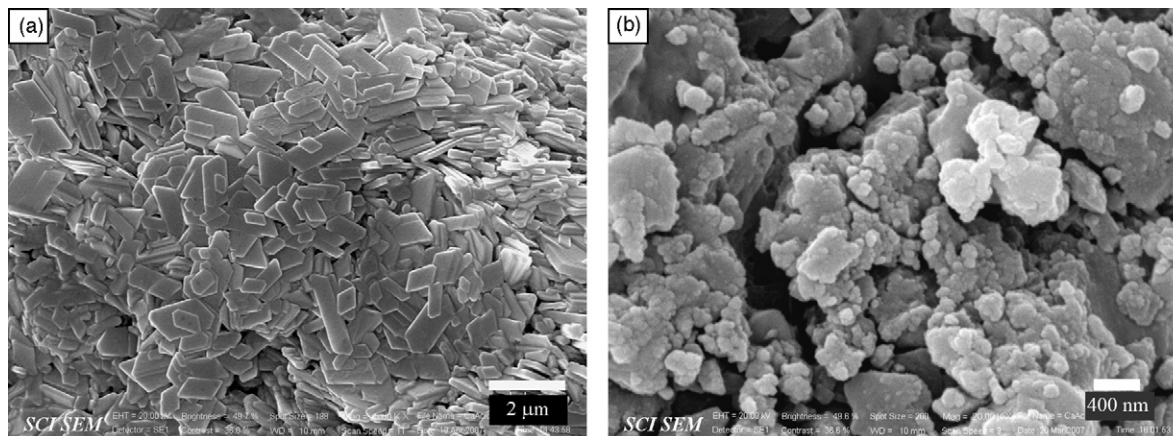


Fig. 4. SEM micrographs of the synthesized  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (a) and its decomposition product  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  (b).

pared  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and its decomposition  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  particles may indicate further nucleation/growth of the microcrystals inside the powder. The morphologies of prepared  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , and  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  particles obtained from this work are smaller and different from non-uniform shapes of those in previous reports [1,4]. These results indicate that the media reagents for precipitation have the strong effect on the morphology of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CaP}_2\text{O}_6$ . The results of SEM experiments indicate that the grain sizes of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  are not consistent with the crystallite sizes in the XRD analysis because the exact particle nucleation and growth mechanisms are caused. The results are also in agreement with that reported the media effect on preparation methods in the literatures [1,4,24].

#### 4. Conclusion

The  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  samples were successfully synthesized by a rapid and simple spontaneous precipitation from  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{H}_3\text{PO}_4$  in aqueous and acetone media at ambient temperature with short time consuming (15 min). The presence of acetone prevented the evolving  $\text{CO}_2$  gas and reduced strongly hot reaction between  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{H}_3\text{PO}_4$  and this route is referred to as soft solution preparation. Thermal behavior and morphology of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  are different from those of other works indicating that the media agents are caused. The morphology of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  shows parallelogram-like crystals, as revealed by SEM data. This work presents the simple, cost-effective, rapid time consumption and environmental friendly synthetic method for the precipitation of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . The different media agents for precipitation affect some physical and chemical properties of interesting materials, which may be the alternative methods for its potential applications such as catalytic, ceramic and the biomedical materials, etc.

#### Acknowledgements

The author would like to thank the Chemistry Department, Khon Kaen University for facilities. This work is financially supported by the Thailand Research Fund (TRF) and the Commission on Higher

Education (CHE): Research Grant for New Scholar (MRG5280073) and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research (KMIL Research), Ministry of Education, Thailand.

#### References

- [1] S.J. Kalita, A. Bhardwaj, H.A. Bhatt, *Mater. Sci. Eng. C* 27 (2007) 441.
- [2] L.L. Hench, *J. Am. Ceram. Soc.* 81 (7) (1998) 1705.
- [3] P. Ducheyne, Q. Qiu, *Biomaterials* 20 (1999) 2287.
- [4] C.-K. Hsu, *Mater. Chem. Phys.* 80 (2003) 409.
- [5] C.A. Tas, F. Korkusuz, M. Tumucun, N. Akkas, *J. Mater. Sci.* 8 (1997) 91.
- [6] R. Rao, H.N. Roopa, T.S. Kannan, *J. Mater. Sci.* 8 (1997) 511.
- [7] K. De Groot, C.P.A.T. Klein, J.G.C. Wolke, J.M.A. Blietck-Hogervorst, *Chemistry of Calcium Phosphate Bioceramics*, CRC Handbook of Bioactive Ceramics, Calcium Phosphate and Hydroxylapatite Ceramics, vol. II, CRC Press, Boca Raton, FL, 1990.
- [8] L.L. Hench, *J. Am. Ceram. Soc.* 81 (7) (1998) 1705.
- [9] L.H. Wong, B. Tio, X. Miao, *Mater. Sci. Eng. C* 20 (2002) 111.
- [10] W.G. Billotte, in: J.B. Park, J.D. Bronzino (Eds.), *Ceramic Materials in "Biomaterials: Principles and Applications"*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2002.
- [11] M. Trojan, D. Brandova, M. Kuchler, *Proc. State Conf. on Industrial Fertilizers*, Ustinad Labem, 1985, DT CSVTs, p. 111.
- [12] R. Kumar, K.H. Prakash, P. Cheang, K.A. Khor, *Langmuir* 20 (2004) 5196.
- [13] R. Gonzalez-McQuire, J.Y. Chan-Ching, E. Vignaud, A. Lebugle, S. Mann, *J. Mater. Chem.* 14 (2004) 2277.
- [14] Y. Jia, T. Wiliana, Z.C. Yun, C.T. Kam, M. Jan, S. Bernard, *J. Mater. Chem.* 13 (2003) 3053.
- [15] L. Dean-Mo, Y. Quanzu, T. Tom, J.T. Wenjea, *Biomaterials* 23 (2002) 1679.
- [16] S. Bose, S.K. Saha, *Chem. Mater.* 15 (2000) 4464.
- [17] S. Sadasivan, D. Khushalani, S. Mann, *Chem. Mater.* 17 (2005) 2765.
- [18] L.S. Wojciech, S. Pavel, B. Kullaiah, E.R. Richard, S.T. Kevor, F.J. Victor, *Biomaterials* 23 (2002) 699.
- [19] Y.C. Han, S.P. Li, X.Y. Wang, X.M. Chen, *Mater. Res. Bull.* 39 (2004) 25.
- [20] W. Kim, F. Saito, *Ultrason. Sonochem.* 8 (2001) 85.
- [21] J.B. Liu, K.W. Li, H. Wang, M.K. Zhu, H. Yan, *Chem. Phys. Lett.* 396 (2004) 429.
- [22] Y. Han, S. Li, X. Wang, L. Jia, J. He, *Mater. Res. Bull.* 42 (2007) 1169.
- [23] S. Scaccia, M. Carewska, A. Di Bartolomeo, P.P. Prossini, *Thermochim. Acta* 397 (2003) 135.
- [24] A. Manthiram, J. Kim, *Chem. Mater.* 10 (1998) 2895.
- [25] B.D. Cullity, *Elements of X-ray Diffraction*, second ed., Addison-Wesley Publishing, 1977.
- [26] G.K. Williamson, W.H. Hall, *Acta Metall.* (1953) 22.
- [27] M. Zakeri, R. Yazdani-Rad, M.H. Enayati, M.R. Rahimpour, *J. Alloys Compd.* 403 (2005) 258.
- [28] A. Ioişescu, G. Vlase, T. Vlase, N. Doca, J. Therm. Anal. Calorim. 88 (2007) 1572.
- [29] A.C. Chapman, *Spectrochim. Acta* 24A (1968) 1678.
- [30] B.J.M. Rajkumar, V. Ramakrishnan, *Spectrochim. Acta* 57A (2001) 247.
- [31] D.E.C. Corbridge, E.J. Lowe, *J. Chem. Soc.* (1954) 493.



# A simple route to synthesize new binary cobalt iron cyclotetraphosphate $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ using aqueous and acetone media

Banjong Boonchom<sup>a,b,\*</sup>, Montree Thongkam<sup>c</sup>, Samart Kongtaweelert<sup>c</sup>, Naratip Vittayakorn<sup>b,d</sup>

<sup>a</sup> King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chumphon Campus, 17/1 M. 6 Pha Thiew District, Chumphon 86160, Thailand

<sup>b</sup> Advanced Materials Science Research Unit, Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

<sup>c</sup> Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

<sup>d</sup> College of KMITL Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 30 May 2009

Received in revised form 6 July 2009

Accepted 7 July 2009

Available online 15 July 2009

### Keywords:

$\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$

New binary cobalt iron cyclotetraphosphate

Solid state synthesis

Water–acetone media

## ABSTRACT

A new binary cobalt iron cyclotetraphosphate,  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  was synthesized through solid phase reaction using cobalt carbonate, iron metal and phosphoric acid in the presence of water–acetone media with further calcinations at the temperature of 500 °C. The particle size obtained from X-ray line broadening is  $65 \pm 24$  nm for the  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . FTIR spectrum of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  is assigned based on the  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  ion in the structure. The SEM micrograph of the synthesized  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  shows non-uniform microparticle, which is important for specific application. Room temperature magnetization result shows superparamagnetic behavior of the  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  powder, having no hysteresis loop in the range of  $\pm 10,000$  Oe with the specific magnetization value of 14.243 emu/g. The XRD and FTIR results of the synthesized  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  appear to be very similar to that of  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $\text{M} = \text{Co}$  and  $\text{Fe}$ ), which indicates the monoclinic phase with space group  $\text{C}2/c$ .

© 2009 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

The cyclotetraphosphates of some bivalent metals are relatively stable compounds, both thermally and chemically [1–3]. They exhibit properties of colour, anticorrosion ability and luminescence, which allow their application as special inorganic pigments [4,5]. Additionally, these compounds are valuable phosphorus (P) and micronutrient (Ca, Mg, Fe, Mn, Co, Ni) fertilizers due to their solubility in soils. The new cyclotetraphosphates of some binary divalent metals have been prepared in our laboratory and examined for many potential applications [1–3]. This work is of interest because it appears economically advantageous to substitute a portion of the divalent metal with a less costly divalent element that could also improve, in many cases, potential pigments, selective catalysts, phosphors, materials for corrosion-resistant coatings and biocompatible and biodegradable in tissue [1–3]. Such a suitable element, from our experiences, is iron, which alone does give both a cyclotetraphosphate and polyphosphate [1–5]. In addition, the binary cobalt iron cyclotetraphosphate has not been described in the literature. Consequently, it is pertinent to synthesize binary cyclotetraphosphate and its solid solution. By varying the compo-

sition of the solid solution (within its homogeneity range), one can change its useful properties. So far, other binary cyclotetraphosphates ( $\text{M}_{2-x}\text{A}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$ ; M and A=Mg, Ca, Mn, Co, Ni, Zn, or Cu;  $x=0-2$ ) have been synthesized by the mixture of corresponding metal cyclotetraphosphates, and then were melted together on platinum dishes in an electric furnace at high temperature ( $>700$  °C) and long time consumption ( $>5$  h) [5–8].

In this work, we report for the first time the synthesis of a new binary cobalt iron cyclotetraphosphate,  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  by solid state route from cobalt carbonate, iron metal and phosphoric acid in water–acetone medium. The presence of acetone reduced hot reaction and prevented the evolved  $\text{H}_2(\text{g})$  and  $\text{CO}_2(\text{g})$  in the precipitation process. This method is a simple, rapid, cost-effective and environmental friendly route for synthesis of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . The synthesized sample was characterized by X-ray powder diffraction (XRD), Fourier transform infrared (FTIR), scanning electron microscope (SEM) and a vibrating sample magnetometer (VSM) techniques.

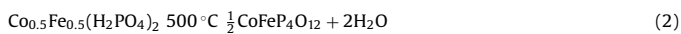
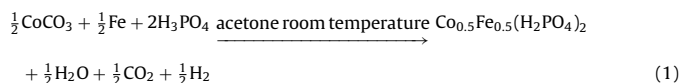
## 2. Experimental

In this study,  $\text{CoCO}_3$  (99.99%, Merck), Fe (c; complexometric) (99.99%, Fluka),  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (86.4%, w/w, Merck) and acetone (99.99%, Merck) were used as starting materials. The synthetic method of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  involves a two-step process (1–2). Beginning procedure (1), 10 mL of acetone was added to 1.1893 g of  $\text{CoCO}_3$  and 0.5584 g of Fe(c) (a mole ratio corresponding to the nominal composition of Fe:Co ratio of 1.0:1.0) and this suspension referred to as suspension A. Then 5 mL of 70%  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (86.4%, w/w  $\text{H}_3\text{PO}_4$  dissolved in DI water) was added to suspension A. The resulting suspension was continuously stirred at ambient temperature (10 min) and

\* Corresponding author at: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chumphon Campus, 17/1 M. 6 Pha Thiew District, Chumphon 86160, Thailand. Tel.: +66 7750 6422x4565; fax: +66 7750 6410.

E-mail addresses: [kbbanjon@kmitl.ac.th](mailto:kbbanjon@kmitl.ac.th), [kbbanjon@gmail.com](mailto:kbbanjon@gmail.com) (B. Boonchom).

the precipitate was obtained. The prepared solid was filtered by suction pump, washed with acetone and dried in air. Final step (2), the prepared solid was heated in the furnace at 500 °C for 3 h and its final product,  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  was obtained and further investigated. The obtained compound ( $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ ) is significantly different from that prepared from  $\text{CoCO}_3\text{--Fe(c)--H}_3\text{PO}_4$  ( $\text{CoFeP}_2\text{O}_7$ ) with water–methanol system in our previous work [9].



The cobalt and iron contents of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  were determined by dissolving in 0.0126 M hydrochloric acid using atomic absorption spectrophotometry (AAS, PerkinElmer, Analyst100). The phosphorus content was determined by colorimetric analysis of the molybdophosphate complex. The room temperature FTIR spectrum was recorded in the range of 4000–370  $\text{cm}^{-1}$  with 8 scans on a Perkin-Elmer Spectrum GX FTIR/FT-Raman spectrometer with the resolution of 4  $\text{cm}^{-1}$  using KBr pellets (KBr, spectroscopy grade, Merck). The structure and crystallite size of the synthesized sample were studied by an X-ray powder diffraction using a X-ray diffractometer (Phillips PW3040, The Netherlands) with Cu K $\alpha$  radiation ( $\lambda = 0.15406 \text{ nm}$ ). The Scherrer method was used to evaluate the crystallite size [10]. The morphology of the prepared sample was examined with scanning electron microscope using LEO SEM VP1450 after gold coating. The magnetic property of the  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  was examined at room temperature (20 °C) using a vibrating sample magnetometer (VSM 7403, Lake Shore, USA).

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Chemical analysis

The chemical analysis of the synthesized  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  gives 15.83 wt%  $\text{Co}_{\text{total}}$ , 14.92 wt%  $\text{Fe}_{\text{total}}$  and 33.20 wt%  $\text{P}_{\text{total}}$ , suggesting the molar ratio  $\text{Co}_{\text{total}}:\text{Fe}_{\text{total}}:\text{P}_{\text{total}} = 1.00:0.99:3.99$ . This indicates that the general formula would be  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ .

#### 3.2. FTIR spectroscopy

The FTIR spectrum of the calcined product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  is shown in Fig. 1, which is very similar to those exhibited in  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (M = Mn, Co, Fe) [1–3]. The vibrational modes of  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  ion observed in the frequency range of 370–1400  $\text{cm}^{-1}$  are assigned according to the literature [4]. The anion contains the  $\text{PO}_2^{2-}$  radical and the P–O–P bridge, which are interpreted the FTIR spectra from viewpoint of the vibrations of these two groups. As the P–O bond strength in the P–O–P bridge is weaker than in the  $\text{PO}_2^{2-}$  radical, the stretching frequencies of the P–O–P bridge are expected to be lower than those in the  $\text{PO}_2^{2-}$  radical. The asymmetric and symmetric stretching frequencies of the  $\text{PO}_2^{2-}$  radical are generally observed in the areas 1350–1220 and 1150–1100  $\text{cm}^{-1}$ , respectively.

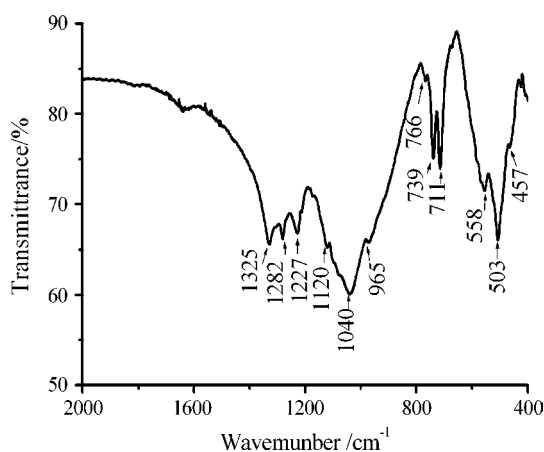


Fig. 1. FTIR spectrum of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ .

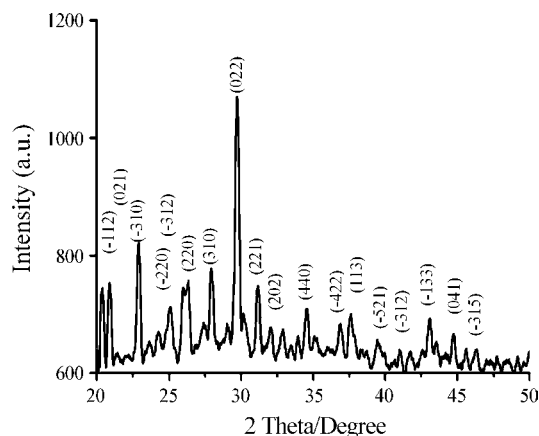


Fig. 2. XRD pattern of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ .

The P–O–P bridge has its asymmetric and symmetric stretching frequencies around 1000–900 and 900–700  $\text{cm}^{-1}$ , respectively. The bending modes are expected in the area 600–400  $\text{cm}^{-1}$  ( $\text{PO}_2^{2-}$  radical) and 400–370  $\text{cm}^{-1}$  (P–O–P bridge). The metal–O stretching usually appears in the bending mode region as the bending modes of the P–O–P bridge and absorption bands associated with these vibrations are usually very weak. The observation of a strong  $\nu_s\text{POP}$  band is known to be the most striking feature of cyclotetraphosphate spectra, along with the presence of the  $\nu_{as}\text{OPO}^-$  band. From X-ray diffraction data [11], it was shown that the crystal structure is monoclinic (space group  $\text{C2/c}$ ) with a cyclic structure of the  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  anion. This has been confirmed by the FTIR measurements. On the basis of above results, the FTIR spectrum of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  is similar to those obtained from other binary  $\text{M}_{1-x}\text{A}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  (M and A = Mg, Ca, Mn, Fe, Co;  $x = 0\text{--}1$ ) and individual  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  [1–4], which confirm their isostructural properties.

#### 3.3. X-ray powder diffraction

The XRD pattern of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  is similar to those obtained from the individual  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (when M = Co and Fe) in our previous works [1–3], but the intensities are slightly different (Fig. 2). In the systems of binary cobalt iron solid solutions (or cobalt iron cyclotetraphosphate), the electric charges of cations are equivalent, and the radii of cations are close to each other, so the spectrum peaks are quite similar. On the basis of above analysis, we can draw a conclusion that the synthesized  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  is solid solution and not a mixture of the individual ones. These results indicate that the binary  $\text{M}_{1-x}\text{A}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  and the single metal  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (M = Mg, Mn, Co, Ni, Fe, Zn) types are isostructural. All the detectable peaks can be distinctly indexed as a pure monoclinic phase with space group  $\text{C2/c}$  ( $Z = 4$ ) for  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ , which note to be similar to those of the standard XRD data (PDF no. 842208 for  $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  and PDF no. 782285 for  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ). The average crystallite size and lattice parameter of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  were calculated from XRD patterns and also tabulated in Table 1. Additionally, the lattice parameters of the  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  are comparable to those of the standard data ( $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (PDF no. 842208) and  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (PDF no. 782285)) and the prepared single metal compounds in our previous works [1,2]. However, the crystallite size for the studied binary compound in this work is larger than those from the single metal compounds ( $40 \pm 10 \text{ nm}$  for  $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  and  $29 \pm 6 \text{ nm}$  for  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ) in our previous works [1–3].

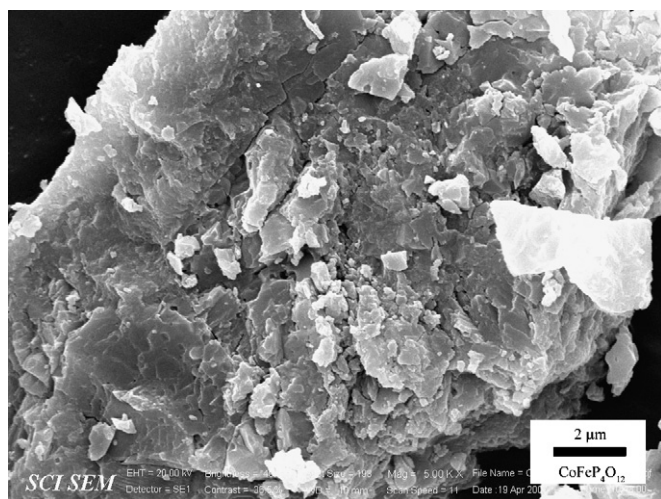
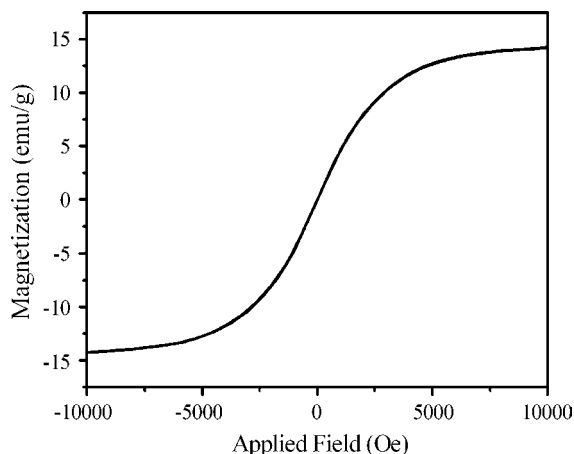
#### 3.4. Scanning electron microscopy

The SEM micrograph of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  is shown in Fig. 3. The particle shape and size are changed throughout the whole decomposition

**Table 1**Average particle size and lattice parameters of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  calculated from XRD data.

| Compounds                            | Systems        | <i>a</i> (Å) | <i>b</i> (Å) | <i>c</i> (Å) | $\beta$ (°) | Average crystallite size (nm) |
|--------------------------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------------------------|
| $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ | PDF no. 842208 | 11.8         | 8.28         | 9.92         | 118.72      | –                             |
|                                      | Ref. [2]       | 11.83(8)     | 8.22(6)      | 9.94(0)      | 118.51(1)   | 40 ± 10                       |
| $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$        | This work      | 11.69(3)     | 8.41(5)      | 9.77(2)      | 118.13(2)   | 65 ± 24                       |
| $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ | PDF no. 782285 | 11.94        | 8.37         | 9.93         | 118.74      | –                             |
|                                      | Ref. [1]       | 12.80(0)     | 8.80(4)      | 10.56(0)     | 118.67(4)   | 29 ± 6                        |

product. The morphology of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  shows a high agglomerate of non-uniform particles, which is not similar to those of  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $\text{M} = \text{Co}$  or  $\text{Fe}$ ) (Fig. 4b) in our previous works [1–3]. The highly agglomerate of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  powder is possibly caused by the process of dissolution and a rapid co-precipitation as well as the decomposition process, subsequently. The different morphologies between of the single metal compounds ( $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{M} = \text{Co}$  or  $\text{Fe}$ ) and the binary  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  indicate the presence of Co ions in substitution position of Fe ions, which confirm the formation of new binary cobalt iron cyclotetraphosphate  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . The result of SEM experiment indicates that the grain sizes of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  are not consistent with the crystallite sizes in the XRD analysis because the exact particle nucleation and growth mechanisms are caused.

**Fig. 3.** SEM micrograph of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ .**Fig. 4.** The specific magnetization of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  as a function of field, measured at 20 °C.

### 3.5. VSM magnetometer

The specific magnetization curve of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  powder obtained from room temperature VSM measurement is shown in Fig. 4. This curve is typical superparamagnetic behavior without any hysteresis in the field range of  $\pm 10,000$  Oe. Specific saturated magnetization ( $M_s$ ) value of 14.243 emu/g was observed for the  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  powder. The result is lower than the saturated magnetization for  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles (in a range of 30–50 emu/g) [12,13]. It is seen that magnetization of the  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  is lower than that of  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (85.01 emu/g) but markedly distinct from the diamagnetic properties of  $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  [2,3]. This result indicates that the presence of Co ions in substitution position of Fe ions has the strong effect on the magnetic behavior of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . To our knowledge, it is worth nothing that superparamagnetic property of the  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  sample is reported for the first time in this study.

## 4. Conclusions

A single monoclinic phase of a new binary  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  was successfully synthesized by solid state route from cobalt carbonate, iron metal and phosphoric acid in the presence of water–acetone media. FTIR, XRD, SEM and VSM results suggested the formation of a new binary  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . The morphology of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  shows a high agglomerate of non-uniform particles. The synthesized powder is polycrystalline, having crystallite size of  $65 \pm 24$  nm for  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ , as estimated by XRD. The synthesized  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  is superparamagnetic behavior, having no hysteresis loop in the range of  $-10,000 \text{ Oe} < H < 10,000 \text{ Oe}$  with the specific magnetization of 14.243 emu/g at 10 kOe. This work presents the simple, cost-effective, rapid time consumption and environmental friendly synthetic method for the precipitation of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . The new binary  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  powder may be useful for potential applications as super phosphate and micronutrient fertilizers, inorganic ceramic pigments and corrosion-proof compositions.

## Acknowledgements

This work is financially supported by the Thailand Research Fund (TRF), the Commission on Higher Education (CHE): Research Grant for New Scholar and the National Nanotechnology Center (NAN-OTEC) NSTDA, Ministry of Science and Technology, Thailand.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data associated with this article can be found, in the online version, at doi:10.1016/j.jallcom.2009.07.036.

## References

- [1] B. Boonchom, C. Danvirutai, S. Youngme, S. Maensiri, Ind. Eng. Chem. Res. 47 (2008) 7642.
- [2] B. Boonchom, C. Danvirutai, J. Chem. Eng. Data 54 (2009) 1225, and reference therein.
- [3] B. Boonchom, S. Youngme, C. Danvirutai, Solid State Sci. 10 (2008) 129.
- [4] V. Koleva, H. Effenberger, J. Solid State Chem. 180 (2007) 956, and reference therein.

- [5] O.A. Lukyanchenko, V.V. Samuskevich, *Thermochim. Acta* 327 (1999) 181, and reference therein.
- [6] M. Trojan, D. Brandová, Z. Šolc, *Thermochim. Acta* 110 (1987) 343, and reference therein.
- [7] M. Trojan, D. Brandová, Z. Šolc, *Thermochim. Acta* 85 (1985) 99, and reference therein.
- [8] B. Boonchom, S. Maensiri, S. Youngme, C. Danvirutai, *Solid State Sci.* 11 (2009) 485, and reference therein.
- [9] B. Boonchom, N. Phuvongphu, *Mater. Lett.* 63 (2009) 1709.
- [10] B.D. Cullity, *Elements of X-ray Diffraction*, 2nd ed., Addison–Wesley Publishing, 1977.
- [11] W. Gunsser, D. Fruehauf, K. Rohwer, A. Zimmermann, A. Wiedenmann, J. *Solid State Chem.* 82 (1989) 43.
- [12] E.H. Soumhi, I. Saadoune, A. Driss, J. *Solid State Chem.* 156 (2001) 364.
- [13] A.K. Gupta, M. Gupta, *Biomaterials* 26 (2005) 3995.



# 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

Banjong Boonchom<sup>a,b,\*</sup>, Montree Thongkam<sup>c</sup>, Samart Kongtaweelert<sup>c</sup>, Naratip Vittayakorn<sup>b,d</sup>

<sup>a</sup> King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chumphon Campus, 17/1M, 6 Pha Thiew District, Chumphon 86160, Thailand

<sup>b</sup> Advanced Materials Science Research Unit, Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

<sup>c</sup> Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

<sup>d</sup> College of KMITL Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 7 July 2009

Received in revised form 19 July 2009

Accepted 4 August 2009

Available online 12 August 2009

### Keywords:

A. Inorganic compounds

Ceramics

B. Chemical synthesis

C. Infrared spectroscopy

Thermogravimetric analysis (TGA)

D. Magnetic properties

## ABSTRACT

A new binary  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  was synthesized by a simple, rapid and cost-effective method using  $\text{CoCO}_3$ – $\text{Fe}(\text{c})$ – $\text{H}_3\text{PO}_4$  system at ambient temperature. Thermal treatment of the obtained  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  at 600 °C yielded as a binary cobalt iron cyclotetraphosphate  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . The FTIR and XRD results of the synthesized  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and its final decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  indicate the monoclinic phases with space group  $P2_1/n$  and  $C2/c$ , respectively. The particle morphologies of both binary metal compounds appear the flower-like microparticle shapes. Room temperature magnetization results show novel superparamagnetic behaviors of the  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and its final decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ , having no hysteresis loops in the range of  $\pm 10,000$  Oe with the specific magnetization values of 0.045 and 12.502 emu/g at 10 kOe, respectively. The dominant physical properties of the obtained binary metal compounds ( $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ ) are compared with the single compounds ( $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ; where  $\text{M} = \text{Co, Fe}$ ), indicating the presence of Co ions in substitution position of Fe ions.

© 2009 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

In recent years, a large number of inorganic natural or synthesized phosphates have the incremented use in order to supply the demands of industrial, commercial, scientific and health sectors due to valuable physical–chemical properties and reactivity [1–4]. The metal phosphate compounds are divided by block unit as  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$  and  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  units, which have found widespread applications in catalysts and adsorbents, ion-exchange materials, solid electrolytes for batteries, in linear and non-linear optical components, chelating agents, tooth powder and doughs, artificial teeth and bones, corrosion-resistant coating, sewage purifying agents, glass-ceramics, refractories, fire extinguishers, cements, soap powders, biomaterials and implantates, forages for animals, superionic conductors, piezo- and ferroelectrics, gas and moisture sensors, magnets, phosphors, detergents and high-quality fertilizers [5–11]. Synthesis of these materials by solid state reaction

at ambient temperature and the morphology and architecture at microscale and nanoscale levels is a significant challenge, which attracts increased attention because of their conveniences and their strong influence on material properties.

Metal dihydrogenphosphate ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) group, one of the important metal phosphates, has found widespread applications according to above mentioned. Additionally, this metal dihydrogenphosphate group is transformed to metal cyclotetraphosphate ( $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$ ) group by dehydration and polycondensation reactions at high temperature, which is advance material, such as ceramic pigment, catalyst and fertilizer [12–17]. Both metal dihydrogenphosphate and metal cyclotetraphosphate groups have received a great deal of attention due to simple, nontoxic and cheap synthetic routes and their friendly environment [5–11]. Consequently, in the last few years many works have been a successful attempt in the synthesis of metal (II) dihydrogenphosphate hydrates  $\text{M}_{1-x}\text{A}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{M}$  and  $\text{A} = \text{Mg, Ca, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, or Cu}$ ;  $x = 0-1$ ;  $n = 1-4$ ) [12–17] and metal (II) cyclotetraphosphates  $\text{M}_{2-y}\text{A}_y\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $y = 0-2$ ) [15–17]. However, it is pertinent to synthesize binary metal dihydrogenphosphates, binary metal cyclotetraphosphates and their solid solutions. By varying the composition of the solid solution (within its homogeneity range), one can change its useful properties. So far, binary metal dihydrogen phosphates were synthesized from

\* Corresponding author at: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chumphon Campus, 17/1M, 6 Pha Thiew District, Chumphon 86160, Thailand. Tel.: +66 7750 6422x4565; fax: +66 7750 6410.

E-mail address: [kbbanjong@kmitl.ac.th](mailto:kbbanjong@kmitl.ac.th) (B. Boonchom).

corresponding metal(II) carbonates (or metal oxides) and phosphoric acid at low temperature (40–80 °C) with long time periods (>48 h) [15–17]. While binary metal cyclotetraphosphate was synthesized by mix of corresponding metal cyclotetraphosphates, then melting them together on platinum dishes in an electric furnace at high temperature (>900 °C) with long time consumption (>5 h). However, binary metal cobalt iron dihydrogenphosphate and its decomposed product has not been reported in the literature.

The purpose of this work is to prepare new binary  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  by solid state reaction at ambient temperature with short time consumption (<15 min). Thermal transformation product of the synthesized sample is binary cobalt iron cyclotetraphosphate  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . The synthesized powders of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and its thermal transformation  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  with flower-like microparticles and novel superparamagnetic properties were characterized by thermogravimetry–differential thermal analysis (TG–DTG–DTA), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform IR (FTIR), and vibrating sample magnetometer (VSM) techniques for the first time.

## 2. Experimental

### 2.1. Preparation

All chemicals (analytical grade or chemically pure grade) were purchased from Fluka and Merck. Following procedure, 4 mL of 70%  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (86.4% (w/w)  $\text{H}_3\text{PO}_4$  dissolved in DI water) was added to 1.1893 g of  $\text{CoCO}_3$  and 0.5593 g of  $\text{Fe}(\text{c})$  (a mole ratio corresponding to the nominal composition of Fe:Co ratio of 1.0:1.0), the resulting suspension was continuously stirred at ambient temperature until  $\text{CO}_2(\text{g})$  was completely evolved and the precipitates were obtained. For this procedure, the increasing temperature of the precipitates from exothermic process was cooled to room temperature. The nearly dry sample was obtained and then 10 mL of acetone was added to allow highly crystalline product to be developed. The prepared solid was filtered by suction pump, washed with acetone and dried in air.

### 2.2. Characterization

Thermal property of the studied compound was investigated on a TG–DTG–DTA Pyris Diamond Perkin Elmer Instruments. The experiment was performed in dynamic air at heating rate of  $10^\circ\text{C min}^{-1}$  over the temperature range from 30 to 600 °C and the flow rate of  $100\text{ mL min}^{-1}$ . Its final decomposition product seemed to occur at temperatures above 500 °C (Fig. 1). In order to gain its final thermal transformation product, the obtained  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  was heated in the furnace at 600 °C for 3 h and the thermal transformation products was further investigated. The cobalt and iron contents were determined by dissolving in 0.0126 M hydrochloric acid using atomic absorption spectrophotometry (AAS, Perkin Elmer, Analyst100). The phosphorus content was determined by colorimetric analysis of the molybdophosphate complex. The water content was determined by TG data. The structure and crystallite size of the synthesized  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and the thermal transformation products were studied by X-ray powder diffraction using a X-ray diffractometer (Phillips PW3040, The Netherlands) with Cu K $\alpha$  radiation ( $\lambda = 0.15406\text{ nm}$ ). The Scherrer method was used to evaluate the crystallite size [18]. The morphologies were examined with scanning electron microscope (SEM) using LEO SEM VP1450 after gold coating. The room temperature FTIR spectra were recorded in the range of 4000–370  $\text{cm}^{-1}$  with 8 scans on a Perkin-Elmer Spectrum GX FTIR/FT-Raman spectrometer with the resolution of  $4\text{ cm}^{-1}$  using KBr pellets (KBr, spectroscopy grade, Merck). The magnetic properties were

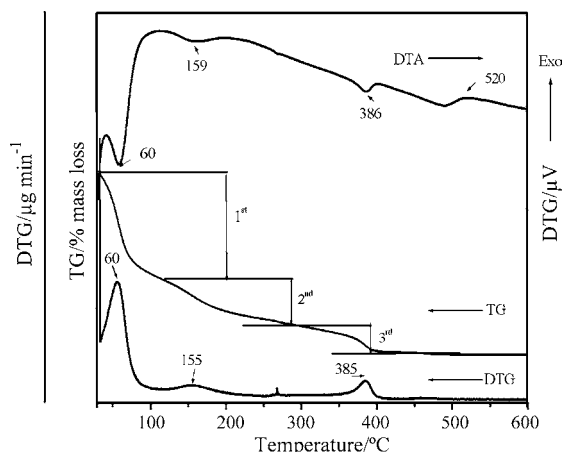


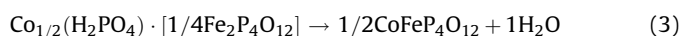
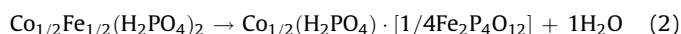
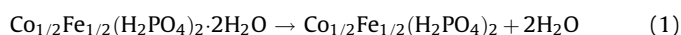
Fig. 1. TG–DTG–DTA curves of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

examined at room temperature (20 °C) using a vibrating sample magnetometer (VSM 7403, Lake Shore, USA).

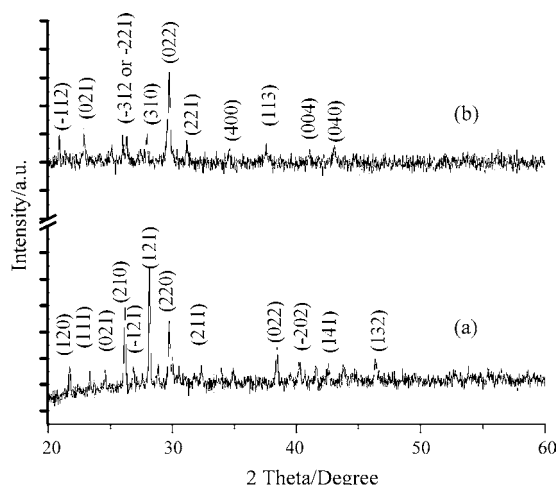
## 3. Results and discussion

### 3.1. Thermal analysis

The TG/DTG/DTA curves of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  are shown in Fig. 1. The TG curve shows the mass loss between 30 and 600 °C, which is related to the elimination of water molecules in crystallization water and an intermolecular phosphate condensation. The eliminations of water were observed in three areas: 45–130, 130–300 and 300–450 °C. The mass losses in three stages are 12.80, 7.42 and 5.61%, which correspond to 2.04, 1.18 and 0.89 mol of water for  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , respectively. The DTA curve shows three endothermic effects over the temperature region at 60, 159 and 386 °C whereas the DTG curve shows three peaks at 60, 155, and 385 °C. Further, a small exothermic effect at 520 °C without appreciable mass loss is observed in the DTA curve, which can be ascribed to a transition phase from of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . The thermal decomposition of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  in the range of 30–600 °C involves the dehydration of the coordination water molecules (2 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ) and an intramolecular dehydration of the protonated dihydrogenphosphate groups (2 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ) as shown in Eqs. (1)–(3):



The intermediate compounds, such as acid polyphosphate  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  and  $\text{Co}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4) \cdot [1/4\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}]$  and mixture of both intermediates have been registered.  $\text{Co}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4) \cdot [1/4\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}]$  is observed in Eq. (2) due to  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  is formed at lower temperature than  $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ , which related to thermal transformation of single dihydrogenphosphate dihydrate in our previous works [19,20]. The intermediates were similarly observed with single metal dihydrogen phosphate [9,10,12–15]. The binary cobalt iron cyclotetraphosphate,  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  is found to be the final product of the thermal decomposition at  $T > 500^\circ\text{C}$ . The total mass loss is 25.83% (4.12 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ), which is in agreement with those reported for other binary dihydrogenphosphate dihydrate in the literature ( $1 < \text{mole of water} < 4$ ) [9,10,12–15]. The thermal stability, mechanism and phase transition temperature of the studied compound in this work are significantly different from



**Fig. 2.** XRD patterns of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (a) and its decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  (b).

those of the decomposition reactions of individual metal compounds ( $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  [19] and  $\text{Co}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  [20]). These results indicate that the incorporation of Fe and Co metals in the skeleton has the effects of thermal behaviors, which support the formations of new binary dihydrogen phosphate  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and binary metal cyclotetraphosphate  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ .

### 3.2. X-ray powder diffraction

The XRD patterns of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and its decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  are similar to those obtained from the individual  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (when  $\text{M} = \text{Co}$  and  $\text{Fe}$ ) but the intensities are slightly different (Fig. 2). The spectrum peaks for the systems of binary cobalt iron solid solution and single metal dihydrogen phosphate (or metal cyclotetraphosphate) are quite similar due to the electronic charges and the radii of cations are equivalent and close to each other, respectively [13–17]. According to the XRD analysis, we can draw a conclusion that the synthesized  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and its decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  are solid solutions and not a mixture of the individual ones. In addition, the result confirmed that new binary metal ( $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ ) are isostructural to type series of the single metal ( $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ; where  $\text{M}$  or  $\text{A} = \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe}, \text{Zn}$ ). All the reflections can be distinctly indexed as a pure monoclinic phase with space group  $P2_1/n$  ( $Z = 2$ ) for  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $C2/c$  ( $Z = 4$ ) for the decomposed products  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ , which noted to be similar to those of standard data of  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (PDF no 390698 for  $\text{Co}$  and PDF no 751444

for  $\text{Fe}$ ) and  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (PDF no 842208 for  $\text{Co}$  and PDF no 782285 for  $\text{Fe}$ ), respectively. The average crystallite sizes and lattice parameters of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and the decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  were calculated from XRD patterns and also tabulated in Table 1. The lattice parameters of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and the decomposed products  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  are comparable to those of the standard data of individual ones. The average crystallite sizes of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and the decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  were found to be  $77 \pm 27$  and  $73 \pm 18$  nm, respectively. However, the crystallite sizes for the obtained compounds in this work are larger than those from the single metal compounds (Table 1) in our previous works [13,14,18,19].

### 3.3. FTIR spectroscopy

The FTIR spectra of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and the decomposed products  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  are shown in Fig. 3 and they are very similar to those of  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $\text{M} = \text{Co}$  or  $\text{Fe}$ ), which confirmed their isostructural. Vibrational bands are identified in relation to the crystal structure in terms of the fundamental vibrating units namely  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  and  $\text{H}_2\text{O}$  for  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  ion for  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ , which are assigned according to the literature [9,10,12–15,21,22].

The FTIR spectrum of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Fig. 3a) is very similar to those observed by Koleva et al. [10] and Boonchom et al. [19,20]. The highest site symmetry of  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ion is  $C_{2v}$ , in the crystallographic unit cell ( $P2_1/n$ ,  $Z = 2$ ) [10], but the four  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ions are located on the set of non-equivalent site symmetry of  $C_1$ . A pair of  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ions is related to each other by a center of symmetry. The four fundamental modes of the free phosphate ion undergo factor group splitting [22]. It is known that the existence of short  $\text{OH} \cdots \text{O}$  hydrogen bonds in a variety of strongly hydrogen-bonded solids is manifested by the appearance of the characteristic ABC structure of the  $\nu(\text{OH})$  vibrational bands [9,10]. The problem of the origin of the ABC trio is discussed in many studies on acidic salts, but an explanation of this behaviour of strongly hydrogen-bonded systems is still to be found [9,10]. One of the most popular interpretations of the ABC trio suggests a strong Fermi resonance between the  $\nu(\text{OH})$  stretching fundamentals and the overtones [ $2\delta(\text{OH})$  and  $2\gamma(\text{OH})$ ] or combinations involving the  $\delta(\text{OH})$  and  $\gamma(\text{OH})$  vibrations. Usually, the ABC bands are very broad and consist of many ill-resolved components. Two bands centered at 3138 and 2427  $\text{cm}^{-1}$  in the FTIR spectra are referred to as bands A and B, respectively. The third component (band C) is observed around 1749–1639  $\text{cm}^{-1}$ . The intense band at about 1260  $\text{cm}^{-1}$  is due to the in plane P–O–H bending ( $A_2$ ), while the out of plane bending ( $A_1$ ) vibration is observed at about 816  $\text{cm}^{-1}$ . Vibrational spectra of present hydrate are assigned by factor group analysis and derived from the same mode as in free  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ion. A strong band at about

**Table 1**

Average crystallite sizes and lattice parameters of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and its decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  calculated from XRD data.

| Compound                                                                            | Method                     | <i>a</i> (Å) | <i>b</i> (Å) | <i>c</i> (Å) | $\beta$ (°) | Average particle sizes (nm) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-----------------------------|
| $\text{Co}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                      | PDF no 390698<br>Ref. [20] | 7.27         | 9.88         | 5.33         | 94.86       | $26 \pm 2$                  |
|                                                                                     |                            | 7.21(3)      | 9.91(1)      | 5.29(5)      | 94.88(6)    |                             |
| $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | This work                  | 7.30(0)      | 9.92(0)      | 5.35(1)      | 95.01(2)    | $77 \pm 27$                 |
| $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                      | PDF no 751444<br>Ref. [19] | 7.30         | 9.92         | 5.34         | 95.14       | –                           |
|                                                                                     |                            | 7.25(1)      | 10.10(0)     | 5.32(0)      | 95.71(0)    |                             |
| $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$                                                | PDF no 842208<br>Ref. [20] | 11.8         | 8.297        | 9.923        | 118.72      | $40 \pm 10$                 |
|                                                                                     |                            | 11.83(8)     | 8.22(6)      | 9.94(0)      | 118.51(1)   |                             |
| $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ (calcined 600 °C)                                     | This work                  | 11.77(3)     | 8.56(0)      | 9.63(1)      | 119.09(0)   | $73 \pm 18$                 |
| $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$                                                | PDF no 782285<br>Ref. [19] | 11.94        | 8.37         | 9.93         | 118.74      | –                           |
|                                                                                     |                            | 12.80(0)     | 8.80(4)      | 10.56(0)     | 118.67(4)   |                             |

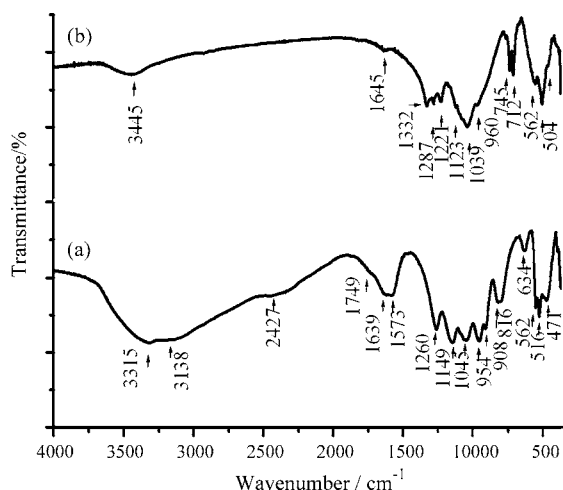


Fig. 3. FTIR spectra of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (a) and its decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  (b).

1149  $\text{cm}^{-1}$  in FTIR spectra is assigned to  $\text{PO}_2$  asymmetric stretching ( $B_1$ ), while the other one at about 1045  $\text{cm}^{-1}$  corresponds to  $\text{PO}_2$  symmetric stretching modes ( $A_1$ ). The FTIR frequency of the  $\text{P}(\text{OH})_2$  asymmetric stretching ( $B_2$ ) shows the strong band at about 954  $\text{cm}^{-1}$ . The weak band at about 908  $\text{cm}^{-1}$  is assigned to  $\text{P}(\text{OH})_2$  symmetric stretching modes ( $A_1$ ). The medium band at about 562  $\text{cm}^{-1}$  is corresponding to  $\text{PO}_2$  bending modes ( $B_1$ ). Two strong bands appeared at about 516 and 471  $\text{cm}^{-1}$  are attributed to  $\text{PO}_2$  rocking modes as  $B_1$  and  $A_2$  vibrations, respectively. The bands of water vibrations are illustrated in Fig. 3a as a doublet bands (1639 and 1573  $\text{cm}^{-1}$ ) contribute both to the band C and to the water bending band. A weak band occurs in the FTIR spectra at approximately 634  $\text{cm}^{-1}$  is assigned to rocking mode involving water librations. The  $\nu_{\text{OH}}$  stretching modes of HOH in  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  appear at 3138  $\text{cm}^{-1}$  ( $\nu_1$  or A band) and 3315  $\text{cm}^{-1}$  ( $\nu_3$ ). The bands associated with the  $\nu_{\text{OH}}$  stretching frequencies in  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ions are observed at about 2850 and 2427  $\text{cm}^{-1}$ .

The FTIR spectrum of the decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  (Fig. 3b) is very similar to those obtained from the individual  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $M = \text{Co}$  and  $\text{Fe}$ ) [13,14,18,19]. The band assignment is identified in terms of the fundamental vibrating modes of  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  ion in the frequency range of 370–1400  $\text{cm}^{-1}$ , which are assigned according to the literature [13,14,18,19]. The anion contains the  $\text{PO}_2^{2-}$  radical and the P–O–P bridge, where are interpreted the FTIR spectra from viewpoint of the vibrations of these two groups. As the P–O bond strength in the P–O–P bridge is weaker than in the  $\text{PO}_2^{2-}$  radical, the stretching frequencies of the P–O–P bridge are expected to be lower than those in the  $\text{PO}_2^{2-}$  radical. The asymmetric and symmetric stretching frequencies of the  $\text{PO}_2^{2-}$  radical are generally observed in the areas 1325–1227 and 1151–1100  $\text{cm}^{-1}$ , respectively. The P–O–P bridge has its asymmetric and symmetric stretching frequencies around 1000–900 and 900–700  $\text{cm}^{-1}$ , respectively. The bending modes are expected in the area: 600–400  $\text{cm}^{-1}$  ( $\text{PO}_2^{2-}$  radical) and 400–370  $\text{cm}^{-1}$  (P–O–P bridge). The metal–O stretching usually appears in the bending mode region as the bending modes of the P–O–P bridge and absorption bands associated with these vibrations are usually very weak. The observation of a strong  $\nu_{\text{sPOP}}$  band is known to be the most striking feature of cyclotetraphosphate spectra, along with the presence of the  $\nu_{\text{asOPO}}^-$  band. From X-ray diffraction data [10], it was shown that the crystal structure is monoclinic (space group  $C2/c$ ) with a cyclic structure of the  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  anion. This has been confirmed by the FTIR measurements.

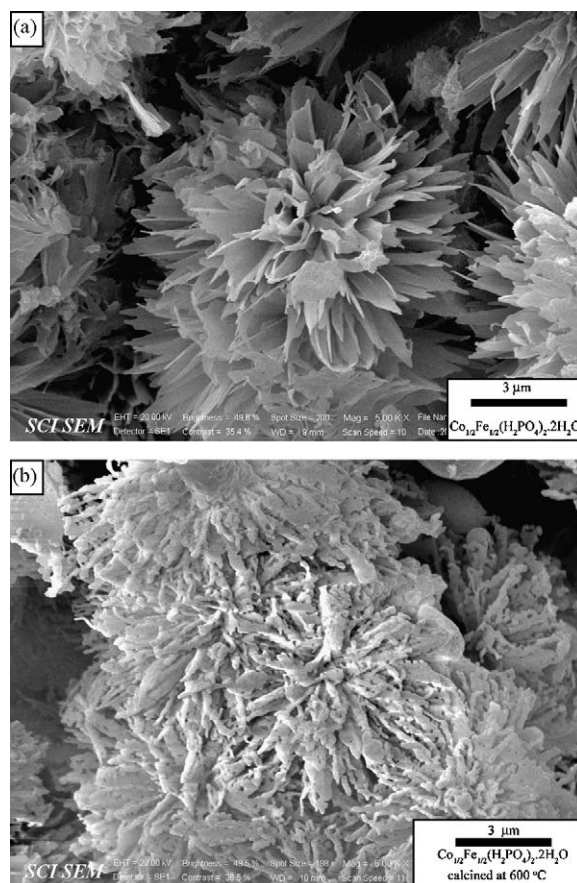


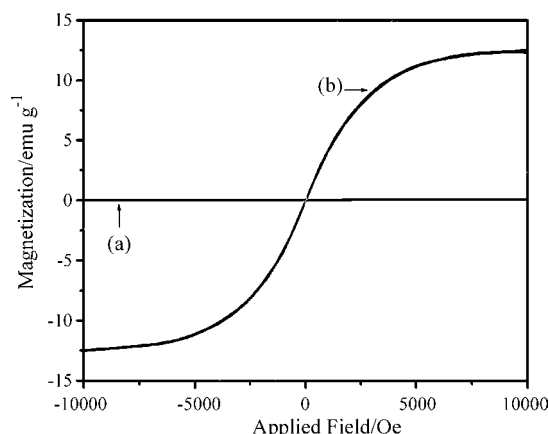
Fig. 4. SEM micrographs of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (a) and its decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  (b).

### 3.4. Scanning electron microscopy

The SEM micrographs of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and the decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  are shown in Fig. 4. The particle shape and size are changed throughout the whole decomposition product. The SEM micrographs of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and the decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  show flower-like architectures, having sizes of 15–20  $\mu\text{m}$ . The morphology of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Fig. 4a) shows petal-bud-like microparticles, which exhibit the different features from  $\text{Co}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  in the our previous reports [13,14,18,19]. The morphology of the decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  (Fig. 4b) shows filament-like structures and porosity on the filament surface, which are significant different grain from single metal cyclotetraphosphate ( $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ;  $M = \text{Mn}$  or  $\text{Fe}$ ) in our previous reports [13,14,18,19]. The different morphologies between the single metal compounds ( $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ,  $M = \text{Co}$  or  $\text{Fe}$ ) and the binary metal compounds confirm the formation of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ , which support the presence of Co ions in substitution position of Fe ions.

### 3.5. VSM magnetometer

The specific magnetization curves of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and the decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  obtained from room temperature VSM measurements are shown in Fig. 5. All samples demonstrate typical superparamagnetic behavior with negligible coercivity and remanence, in accordance with the theory that superparamagnetic behavior is often observed at room temperature. The specific magnetization curves are typical superparamagnetic



**Fig. 5.** The specific magnetizations of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (a) and its decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  (b) as a function of field, measured at 293 K.

behavior without any hysteresis in the field range of  $\pm 10,000$  Oe. Specific saturated magnetization ( $M_s$ ) values of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and the decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  are found to be 0.045 and 12.502 emu/g, respectively. It is worth nothing that these saturated magnetizations were compared with other magnetic materials ( $M_s$  of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  is 10–50 emu/g) [23–25]. It is seen that magnetizations of the  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  are lower than those of  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (96.28 emu/g) and  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (85.01 emu/g) [20] but markedly distinct from the diamagnetic properties of  $\text{Co}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  [19]. To our knowledge, it is worth nothing that superparamagnetic properties of the  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  samples are reported for the first time in this study.

#### 4. Conclusion

Flower-like microparticle  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  was successfully synthesized by solid state method from  $\text{CoCO}_3\text{--Fe--H}_3\text{PO}_4$  system at ambient temperature with short time consumption (15 min).  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  decomposes in three steps which correspond to the loss of water of crystallization in the first step, subsequently to a continuous intermolecular polycondensation and elimination of water of constituent in anion (the second and the third steps). The thermal behaviors, flower-like morphologies, particle sizes and superparamagnetic properties of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and the thermal transformation products  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  in this work are different from single metal compounds

in our previous reports. This work presents the simple, cost-effective and short time consuming method for the preparation of new binary metal  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  compounds, which may be used in many important applications such as catalytic, superionic conductors, piezo- and ferroelectrics, magnets, electrochemical, bioceramic and environmental processes.

#### Acknowledgements

The authors would like to thank the Chemistry Department, Khon Kaen University for facilities. This work is financially supported by the Thailand Research Fund (TRF) and the Commission on Higher Education (CHE): Research Grant for New Scholar and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research (KMIL Research), Ministry of Education, Thailand.

#### References

- [1] A. Durif, *Solid State Sci.* 7 (2005) 760.
- [2] H. Onoda, K.-I. Okumoto, I. Tanaka, *Mater. Chem. Phys.* 107 (2008) 339.
- [3] S.-L. Yang, H. Zhang, Z. Xie, D. Zhao, W.-L. Zhang, W.-D. Cheng, *J. Solid State Chem.* 182 (2009) 855.
- [4] T. Dammak, N. Fourati, Y. Abid, A. Mlayah, C. Minot, *J. Mol. Struct.* 852 (2008) 83.
- [5] T. Kitsugi, T. Yamamuro, T. Nakamura, M. Oka, *Biomaterials* 16 (1995) 1101.
- [6] B. Jian-Jiang, K. Dong-Wan, H. Kug Sun, *J. Eur. Ceram. Soc.* 23 (2003) 2589.
- [7] I.-C. Marcu, I. Sandulescu, Y. Yves Schuurman, J.-M.M. Millet, *Appl. Catal. A* 334 (2008) 207.
- [8] M. Kaplanová, M. Trojan, D. Brandová, J. Navrátil, *J. Lumin.* 29 (1984) 199.
- [9] B. Boonchom, S. Maesiri, S. Youngme, C. Danvirutai, *Solid State Sci.* 11 (2009) 485.
- [10] V. Koleva, H. Effenberger, *J. Solid State Chem.* 180 (2007) 956.
- [11] Y. Tang, H.F. Chappell, M.T. Dove, R.J. Reeder, Y.J. Lee, *Biomaterials* 30 (2009) 2864.
- [12] M. Trojan, P. Šulcová, *Dyes Pigments* 47 (2000) 291.
- [13] B. Boonchom, S. Maesiri, C. Danvirutai, *Mater. Chem. Phys.* 109 (2008) 404.
- [14] B. Boonchom, C. Danvirutai, *Ind. Eng. Chem. Res.* 47 (2008) 2941 (and references therein).
- [15] N.M. Antraptsseva, L.N. Shchegrov, I.G. Ponomareva, *Russ. J. Inorg. Chem.* 51 (2006) 1493.
- [16] M. Trojan, P. Šulcová, P. Mošner, *Dyes Pigments* 44 (2000) 161.
- [17] D. Brandová, M. Trojan, F. Paulik, J. Paulik, M. Arnold, *J. Therm. Anal. Calorimet.* 36 (1990) 881.
- [18] B.D. Cullity, *Elements of X-ray Diffraction*, 2nd ed., Addison-Wesley Publishing, 1977.
- [19] B. Boonchom, C. Danvirutai, *J. Chem. Eng. Data* 54 (2009) 1225.
- [20] B. Boonchom, C. Danvirutai, S. Youngme, S. Maesiri, *Ind. Eng. Chem. Res.* 47 (2008) 7642.
- [21] N.B. Colthup, L.H. Daly, S.E. Wiberley, *Introduction to Infrared and Raman Spectroscopy*, Academic Press, New York, 1964.
- [22] G. Herzberg *Molekülspektren und Molekülstruktur. I. Zweiatomige Moleküle*, Steinkopff, Dresden, 1939.
- [23] E.H. Soumhi, I. Saadoune, A. Driss, *J. Solid State Chem.* 56 (2001) 364.
- [24] J. Tang, M. Myers, K.A. Bosnick, L.E. Brus, *J. Phys. Chem. B* 107 (2003) 7501.
- [25] A.K. Gupta, M. Gupta, *Biomaterials* 26 (2005) 3995.

# Rapid synthesis, kinetics and thermodynamics of binary $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Banjong Boonchom · Chanaiporn Danvirutai

Received: 19 November 2008 / Accepted: 24 February 2009 / Published online: 28 July 2009  
© Akadémiai Kiadó, Budapest, Hungary 2009

**Abstract** The binary manganese and calcium dihydrogen phosphate monohydrate  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  was synthesized by a rapid and simple co-precipitation method using phosphoric acid, manganese metal, and calcium carbonate at ambient temperature. Thermal transformation shows complex processes and the final decomposed product was the binary manganese calcium cyclotetraphosphate  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ . The activation energies of some decomposed steps were calculated by Kissinger method. Activated complex theory has been applied to each step of the reactions and the thermodynamic functions are calculated. These values for transformation stages showed that they are non-spontaneous processes without the introduction of heat. The differences of physical and chemical properties of the synthesized compound and its decomposed product are compared with  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $\text{M} = \text{Mn}$  and  $\text{Ca}$ ), which indicate the effects of the presence of Ca ions in substitution of Mn ions and confirm the formation of solid solution.

**Keywords** Kinetics · Thermodynamics · Manganese and calcium dihydrogen phosphate · A rapid co-precipitation

## Introduction

Binary metal (II) dihydrogen phosphates have been continuously reported to be the important inorganic compounds because they have been widely applied as fertilizers, pigments for paint finishes for protection of metal, and fire retardants in paints or plastics [1–6]. Many binary metal (II) dihydrogen phosphates ( $\text{M}_{1-x}\text{A}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ; where  $\text{M}$  and  $\text{A} = \text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Cu}$ , or  $\text{Zn}$ ) were reported on the thermal analysis (TA) under quasi-isothermal and quasi-isobaric conditions to follow the mechanism of dehydration [7–12]. They are transformed to binary metal (II) cyclo-tetraphosphates ( $\text{M}_{1-x}\text{A}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  where  $0 < x < 2$ ) by decomposition and dehydration reactions at high temperatures [6, 10–13]. All compounds are a good source for macro- (P) and micronutrients (Ca, Mg, Fe, Mn, Co, and Ni) fertilizers due to their solubility in soils. Additionally,  $\text{M}_{1-x}\text{A}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  compounds have been widely applied as pigments, catalysts, and luminophore-supporting matrices [13–17]. Both  $\text{M}_{1-x}\text{A}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_{1-x}\text{A}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  compounds are isostructural with the singles of the corresponding metal dihydrogen phosphates and the corresponding metal (II) cyclo-tetraphosphates, respectively. Consequently, they have similar X-ray diffraction patterns and close unit cell parameters, which crystallize in monoclinic space group  $\text{P}2_1/\text{n}$  ( $Z = 2$ ) for the dihydrogen phosphate group and  $\text{C}2/\text{c}$  ( $Z = 4$ ) for cyclo-tetraphosphate group [18].

So far, single or binary metal dihydrogen phosphates were synthesized from corresponding metal (II) carbonate

B. Boonchom  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,  
Chumphon Campus, 17/1 M.6 Pha Thiew District,  
Chumphon 86160, Thailand

B. Boonchom (✉)  
Department of Chemistry, Faculty of Science,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,  
Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand  
e-mail: kbbanjon@kmitl.ac.th

C. Danvirutai  
Department of Chemistry, Faculty of Science,  
Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

and phosphoric acid at low temperature (313–353 K) with long time periods (2 = 60 h) [6, 18]. Brandová et al. reported the thermal transformation of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  to  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  [9, 13] but the synthetic route was not reported. In this respect, the goal of this work was to synthesize  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  by a rapid co-precipitation method at ambient temperature, which is a simple and cost effective route. Thermal transformation of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  relates to the role of the water of crystallization and influences the intermolecular interactions (affecting the internal energy and enthalpy) and the crystalline disorder (entropy) [19–22], which influences the free energy, thermodynamic activity, solubility, stability, electrochemical and catalytic activity. Therefore, kinetic ( $E$ ,  $A$ ) and thermodynamic ( $\Delta H^*$ ,  $\Delta S^*$ ,  $\Delta G^*$ ) parameters of thermal transformation steps of studied compound were calculated by isoconversional kinetics of Kissinger method and the activated complex theory, respectively. The physical meanings of kinetic and thermodynamic parameters were discussed for the first time.

## Experimental

### Synthesis and characterization

The binary manganese and calcium dihydrogen phosphate monohydrate  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  compound was prepared by solution co-precipitation method using the corresponding metal sources (Mn(c; complexometric), 99.99%, Merck and  $\text{CaCO}_3$ , 99.99%, Merck) and phosphoric acid (86.4 wt%  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , Merck) as starting materials. Following the procedure, about 0.5494 of Mn(c) and 1.0080 g of  $\text{CaCO}_3$  (a mole ratio corresponding to the nominal composition of Mn:Ca ratio of 1.0:1.0) were dissolved in 70%  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (86.4 wt%  $\text{H}_3\text{PO}_4$  dissolved in DI water) with continuous mechanical stirring at ambient temperature. The resulting solution was stirred until  $\text{CO}_2(\text{g})$  and  $\text{H}_2(\text{g})$  were completely evolved (15–30 min) and the nearly dry precipitate was obtained. Then 10 mL of acetone was added to allow highly crystalline product to be developed. The pale gray solid of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  product was filtered by suction pump, washed with acetone until free from phosphate ion and dried in air. Thermal analysis measurements (thermogravimetry, TG; differential thermogravimetry, DTG; and differential thermal analysis, DTA) were carried out by a Pyris Diamond Perkin-Elmer apparatus by increasing the temperature from 303 to 773 K with calcined  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  powder as the standard reference. The retained mass found to be occurred at temperatures above 673 K, so the prepared solid was consequently calcined in a box-furnace at 773 K for 2 h in air. The final product was obtained as white pink solid of  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ .

The manganese and calcium contents of the synthesized  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and the decomposed product  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  were determined by atomic absorption spectrophotometer (AAS, Perkin-Elmer, Analyst100). The phosphorus content was determined by colorimetric analysis of the molybdophosphate complex. The structure of the prepared product and the calcined sample were studied by X-ray powder diffraction using a D8 Advanced powder diffractometer (Bruker AXS, Karlsruhe, Germany) with Cu  $K\alpha$  radiation ( $\lambda = 0.15406 \text{ \AA}$ ). The room temperature FTIR spectra were recorded in the range of 4000–370  $\text{cm}^{-1}$  with eight scans on a Perkin-Elmer Spectrum GX FTIR/FT-Raman spectrometer with a resolution of 4  $\text{cm}^{-1}$  using KBr pellets (spectroscopy grade, Merck). The particle sizes and external morphologies of the prepared sample and its decomposed powders were characterized by scanning electron microscope (SEM) using LEO SEM VP1450 after gold coating.

### Kinetic and thermodynamic functions

To evaluate the activation energies for the thermal decomposition of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , a TG-DTG-DTA Pyris Diamond Perkin-Elmer Instrument was used. The experiments were performed in air atmosphere at heating rates of 5, 10, 15, and 20  $\text{K min}^{-1}$  over the temperature range from 303 to 873 K and the  $\text{O}_2$  flow rate of 100  $\text{mL min}^{-1}$ . The activation energies for the thermal transformation steps of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  were calculated from peaks on the DTA curves using the Kissinger equation [23]:

$$\ln \left( \frac{\beta}{T_p^2} \right) = -\frac{E_a}{RT_p} + \ln \left( \frac{AR}{E_a} \right). \quad (1)$$

Here,  $\beta$  is the DTA scan rate ( $\text{K min}^{-1}$ ),  $E_a$  is the activation energy for the phase transformation ( $\text{kJmol}^{-1}$ ),  $R$  is the gas constant ( $8.314 \text{ Jmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) and  $T_p$  is the phase transformation temperature peak in the DTA curve (K). The fact that the  $T_p$  values for various heating rates can be precisely evaluated from non-isothermal data (DTA, DTG or DSC curves) conferred to the Kissinger method to evaluate the kinetic parameters a high popularity. The plots of  $\ln (\beta/T_p^2)$  versus  $1/T_p$  should give the straight lines with the best correlation coefficients of the linear regression ( $R^2$ ), which have been proved to give the values of activation energy and pre-exponential factor by the slope and the intercept for the different thermal transformation stages of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . The advantage of Kissinger equation is that the values of  $E$  and  $A$  can be calculated on the basis of multiple thermogravimetric curves, which does not require selection of particular kinetic model (type of  $g(x)$  or  $f(x)$  functions) [24–27]. In addition, the  $E$  and  $A$

values obtained by this method are usually regarded as more reliable than those obtained by a single thermogravimetric curve.

From the activated complex theory (transition state) of Eyring [11, 12, 19–21, 26, 27], the following general equation may be written:

$$A = \left( \frac{e\chi k_B T_{Ap}}{h} \right) \exp \left( \frac{\Delta S^*}{R} \right) \quad (2)$$

where  $A$  is the pre-exponential factor  $A$  obtained from the Kissinger method;  $e = 2.7183$  is the Neper number;  $\chi$ : transition factor, which is unity for monomolecular reactions;  $k_B$ : Boltzmann constant;  $h$ : Plank constant, and  $T_{Ap}$  is the average phase transformation temperature peak in four DTA curves (K). The change of the entropy may be calculated according to the formula:

$$\Delta S^* = R \ln \left( \frac{Ah}{e\chi k_B T_{Ap}} \right) \quad (3)$$

Since

$$\Delta H^* = E^* - RT_{Ap}, \quad (4)$$

$$\Delta G^* = \Delta H^* - T_{Ap} \Delta S^* \quad (5)$$

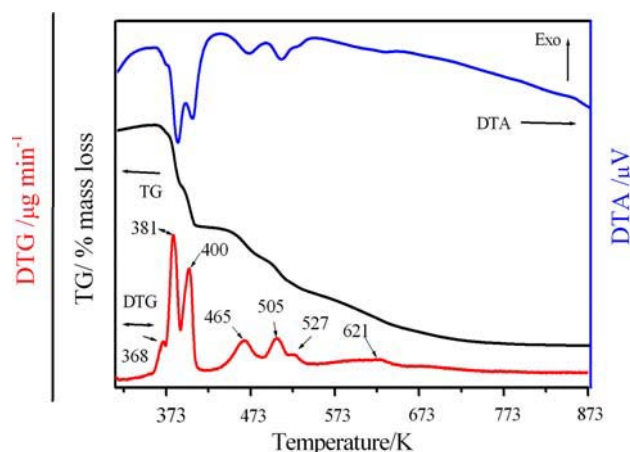
when  $E^*$  is the activation energy  $E_a$  obtained from the Kissinger method. The changes of the enthalpy  $\Delta H^*$  and Gibbs free energy  $\Delta G^*$  for the activated complex formation from the reagent can be calculated using the well-known thermodynamic equation. In this article we suggested the relation between kinetic ( $E$  and  $A$ ) and thermodynamic ( $\Delta H^*$ ,  $\Delta S^*$ , and  $\Delta G^*$ ) parameters of the thermal transformation of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  based on Kissinger method, which was attracted the interesting of thermodynamic and kinetic scientists.

## Results and discussion

### Characterization results

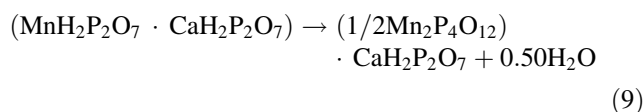
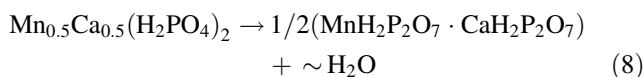
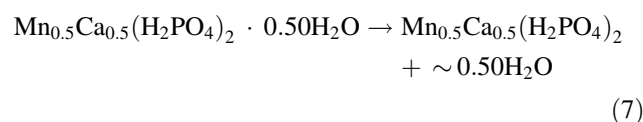
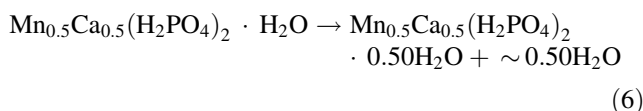
The chemical analysis results of the synthesized sample and its decomposed product found to be wt% of  $\text{Mn}_{\text{total}}$ :  $\text{Ca}_{\text{total}}$ :  $\text{P}_{\text{total}}$ ; 9.58:7.13:21.87 and 12.33:9.68:27.98, respectively. These results give rise the mole ratio of  $\text{Mn}_{\text{total}}$ :  $\text{Ca}_{\text{total}}$ :  $\text{P}_{\text{total}}$  = 1.00:1.02:4.05 for the synthesized sample and 1.00:1.08:4.02 for its decomposition product. The water content of the synthesized sample was analyzed by TG data and was about of 20.02 wt% (3.08 mol)  $\text{H}_2\text{O}$ . These results indicate that the general formula of the synthesized sample and its decomposition product would be  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ .

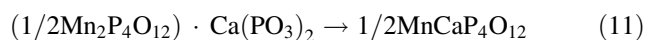
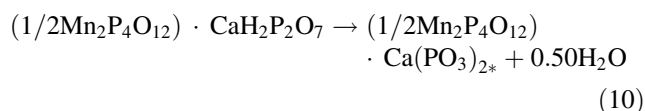
The results of simultaneous TG–DTG–DTA analyses of the prepared  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  are shown in



**Fig. 1** TG–DTA–DTG curves of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  in the heating rate of  $10 \text{ K min}^{-1}$

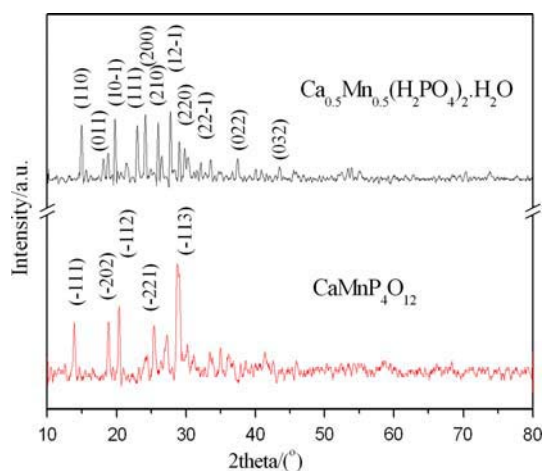
Fig. 1. The TG curve of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  shows seven stages of the mass loss in the range of 323–873 K, which appear in the respective DTG and DTA as: 368, 381, 400, 465, 505, 527, and 621 K. A shoulder peak at 368 K on DTG and DTA curves (first step) corresponds to a minor mass loss in TG trace, which related to the loss of moisture for  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . The total mass loss is 20.02% (3.08 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ), which is close to the theoretical values (21.42% (3.00 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ) for  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , 25.27% (4.00 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ) for  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and 20.81% (3.00 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ) for  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). This result is in agreement with other binary metal dihydrogen phosphate hydrates (isostructural compounds) in literatures, which reported the mole of water in the range of 1–4 [6–10]. The thermal decomposition of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  is a complex process, which involves the dehydration of the coordinated water molecules (1 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ) and an intramolecular dehydration of the protonated phosphate groups (2 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ), these processes could formally be presented as:



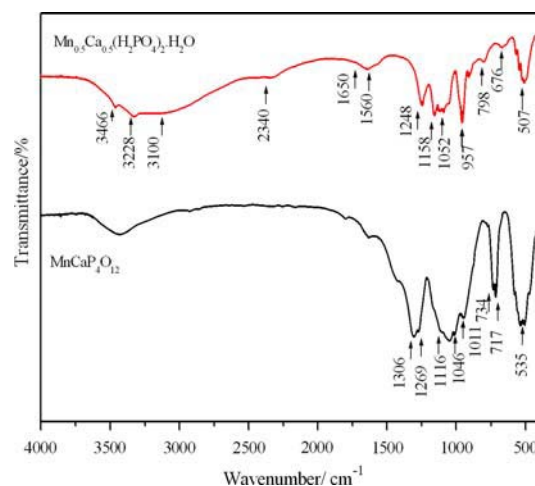


The intermediate compounds;  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 0.50\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{MnH}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot \text{CaH}_2\text{P}_2\text{O}_7$  ( $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ),  $(\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}) \cdot \text{CaH}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ,  $(\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}) \cdot \text{Ca}(\text{PO}_3)_2$  and mixing intermediates of all have been registered. The decomposed processes and the presented intermediates were similarly observed with other binary dihydrogen phosphates [8–12]. The binary manganese calcium cyclotetraphosphate,  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  is found to be the final product of the thermal decomposition at  $T > 673\text{ K}$ . The different thermal behavior between the synthesized  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and the individual  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  [6, 9, 19] or  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  [9] confirms the formation of a binary  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . Additionally, this synthesized compound shows different thermal behavior from that of the Brandová research [9], which this may be the differences of water content and preparation methods. Based on these results, we can conclude that the different thermal behavior is affected by the incorporation of Mn and Ca metals in the skeleton, which the conclusion was confirmed by XRD and FTIR data (Figs. 2, 3).

The XRD patterns of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  are similar to those of  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ , respectively (Fig. 2) [6, 19]. In the systems of binary manganese calcium solid solutions and individual metal dihydrogen phosphate (or metal cyclotetraphosphate), the electric charges of cations are equivalent, and the radii of cations are close to each other, so the spectrum peaks are quite similar [6, 18, 19]. However, the XRD peaks of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  exhibit lower intensity and broader peaks than those of  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ , which indicate poor crystallinity after



**Fig. 2** XRD patterns of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$



**Fig. 3** FTIR spectra of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$

obtaining the mixed binary products. Based on the above analysis, we can draw a conclusion that the synthesized  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and its decomposed product  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  are solid solutions that are not a mixture of single phase of Mn and Ca. XRD results confirm that a binary  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  are isostructural with the type series of  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $\text{M} = \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe}, \text{and Zn}$ ), respectively. Consequently, all reflections can be distinctly indexed based on a pure monoclinic of single phase with space group  $\text{P2}_1/\text{n}$  ( $Z = 2$ ) for  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{C2/c}$  ( $Z = 4$ ) for  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ , which note to be similar to those of the standard XRD patterns of  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (PDF#350010) and  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (PDF#380314), respectively. The average crystallite sizes and lattice parameters of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  samples were calculated from XRD line broadening and tabulated in Table 1. Their lattice parameters are comparable to those of the standard data as  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , (PDF#350010 for Mn and PDF#0903047 for Ca),  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (PDF#380314) and  $\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$  (PDF#500584), respectively.

The FTIR spectra of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  are shown in Fig. 3, which are very similar to those of  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  [19, 28]. Vibrational bands are identified in relation to the crystal structure in terms of the fundamental vibrating units namely  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  and  $\text{H}_2\text{O}$  for  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  ion for  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ , which are assigned according to the literatures [19, 24, 25, 28, 29]. Vibrational bands of  $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$  ion are observed in the regions of 300–500, 700–900, 1160–900, 840–930, 1000–1200, 2300–2400, 2800–3120, and 3200–3500  $\text{cm}^{-1}$ . These bands are assigned to the  $\delta(\text{PO}_3)$ ,  $\gamma(\text{POH})$ ,  $\delta(\text{POH})$ ,  $\nu(\text{PO}_2(\text{OH}))$ ,  $\nu(\text{PO}_3)$ , B band ( $\nu_{\text{OH}} \text{HPO}_4^{2-}$ ), A band ( $\nu_{\text{OH}} \text{HPO}_4^{2-}$ ) and  $\nu_{\text{OH}}$  ( $\nu_1$  and  $\nu_3 \text{H}_2\text{O}$ ), respectively. The observed bands in 1600–1700  $\text{cm}^{-1}$

**Table 1** Average crystallite sizes and lattice parameters of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  calculated from XRD data

| Compound                                                        | Method      | <i>a</i> (Å) | <i>b</i> (Å) | <i>c</i> (Å) | $\beta$ (°) | Average crystallite sizes (nm) |
|-----------------------------------------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------------------------|
| $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  | PDF#350010  | 7.31         | 10.08        | 5.37         | 94.75       | –                              |
| $\text{MnCa}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ | This work   | 7.92 (0)     | 10.62 (4)    | 5.79 (4)     | 94.68 (6)   | $27 \pm 8$                     |
| $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$   | PDF#0903047 | 6.25         | 11.89        | 5.63         | 114.20      | –                              |
| $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$                            | PDF#380314  | 11.88        | 8.59         | 10.14        | 119.21      | –                              |
| $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$                                   | This work   | 12.27 (9)    | 8.87 (2)     | 10.49 (8)    | 120.00 (2)  | $30 \pm 9$                     |
| $\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$                                      | PDF#500584  | 9.56         | 9.50         | 10.37        | 93.47       | –                              |

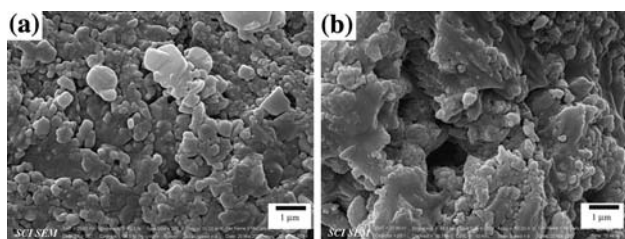
region are attributed to the water bending/C band. The P–O stretching modes of the  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  anion are known to appear in the 1150–960  $\text{cm}^{-1}$  region [19, 28]. The one of the most noteworthy features of the spectra is the presence of strong bands in the ranges of 1350–1220, 1150–1100, 1080–950, and 780–400  $\text{cm}^{-1}$ . These bands can be assigned to  $\nu_{\text{as}}\text{OPO}^-$ ,  $\nu_{\text{s}}\text{OPO}^-$ ,  $\nu_{\text{as}}\text{POP}$ , and  $\nu_{\text{s}}\text{POP}$  vibrations, respectively [19, 28]. The two doublet bands around 720 (ca. 734 and 717  $\text{cm}^{-1}$ ) and 1280 (ca. 1306 and 1269  $\text{cm}^{-1}$ )  $\text{cm}^{-1}$  are observed in the FTIR spectra of  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  and  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  and assigned to  $\nu_{\text{s}}\text{POP}$  vibrations. The observation of a strong  $\nu_{\text{s}}\text{POP}$  band is known to be the most striking feature of cyclotetraphosphate spectra, along with the presence of the  $\nu_{\text{as}}\text{OPO}^-$  band, which is different from that of polyphosphate. From X-ray diffraction data [30], it was shown that the crystal structure is monoclinic (space group C2/c) with a cyclic structure of the  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  anion, which was confirmed by the FTIR measurements.

The scanning electron micrographs of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and their final decomposition product  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  show different morphological features and high aggregates (Fig. 4). The SEM micrograph of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  shows roughness of many small and some large boundary surfaces, which indicate amorphous morphology by inferring from XRD evidence to be poorly-crystalline  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . In addition,  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  shows similarly morphological feature to that of  $\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$ , which illustrates more aggregate of small particles and large spherical particles. Based on the SEM results, the SEM micrographs of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  powders appear to be highly agglomerated

caused primarily by the process of dissolution, a rapid precipitation and decomposition process, respectively. The particles sizes of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  appear smaller than those of the individual  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ , which are well consistent with the results of XRD [19, 28].

#### Kinetic and thermodynamic results

According to Kissinger method, the basic data of *T* collected from the DTA curves of the decomposition of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  at various heating rates of 5, 10, 15, and 20  $\text{K min}^{-1}$ . Kinetics studies of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  were only analyzed five steps (1st, 2nd, 3rd, 4th, and 6th) because the 5th step were not observed in the heating rates of 15 and 20  $\text{K min}^{-1}$ . According to the Kissinger Eq. 1, the plots of  $\ln \beta/T^2$  versus  $1000/T$  can be obtained by a linear regression of least-square method. Non-isothermal DTA method is desirable to analyze the reaction mechanism and calculates the activation energy of the solid state transformations [23, 31–33]. Several non-isothermal techniques have been proposed which are quicker and less sensitive to previous and next transformations. In addition, they can provide the more accurate activation energy and crystal growth mode. From the slopes of the Kissinger plots, the activation energy values in five decomposed steps of the prepared  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  were determined as shown in Table 2. These activation energies are consistent with the former hypothesis that the intermediate nucleate and crystallize as metastable phase with adequate growth kinetics before the stable phase  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ . The last and third steps exhibit higher and lower activation energies in comparison with the other ones, respectively. The reason may be relevant to the strengths of binding of water molecules in the crystal lattice. Hence, different dehydration temperatures and kinetic parameters are expected. The activation energy for the release of crystal water lie in the range of 50–130  $\text{kJ mol}^{-1}$ , while the value for coordinately bounded one are higher than this range [20–22]. The energy of activation found in the range of 89–236  $\text{kJ mol}^{-1}$  for the five decomposition reactions



**Fig. 4** SEM micrographs of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (a) and  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$  (b)

**Table 2** Values of  $\Delta S^*$ ,  $\Delta H^*$  and  $\Delta G^*$  for five decomposition steps of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 

| Parameter                                           | 1st step                | 2nd step                | 3rd step               | 4th step                | 6th step                |
|-----------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $R^2$                                               | 0.9929                  | 0.9942                  | 0.9996                 | 0.9995                  | 0.9567                  |
| $E_a$ (kJmol <sup>-1</sup> )                        | 147.85 ± 13             | 129.70 ± 10             | 89.41 ± 2              | 152.94 ± 4              | 236.97 ± 51             |
| $A$ (s <sup>-1</sup> )                              | 1.41 × 10 <sup>20</sup> | 6.55 × 10 <sup>16</sup> | 4.48 × 10 <sup>9</sup> | 4.04 × 10 <sup>15</sup> | 1.01 × 10 <sup>20</sup> |
| $\Delta S^*$ (J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) | 130.34                  | 66.18                   | -72.26                 | 41.10                   | 123.73                  |
| $\Delta H^*$ (kJmol <sup>-1</sup> )                 | 144.65                  | 126.35                  | 85.50                  | 148.71                  | 231.85                  |
| $\Delta G^*$ (kJmol <sup>-1</sup> )                 | 94.38                   | 99.64                   | 119.53                 | 127.80                  | 155.59                  |

Fifth step was not observed in the heating rates of 15 and 20 K min<sup>-1</sup>

suggest that the water molecules are coordinately linked water as well as crystal one. The five mass loss steps correspond to the loss of water of coordinated-water in the first two steps, subsequently to a continuous intermolecular polycondensation and the elimination of water of constituent in anion in the last three steps [19, 22].

The pre-exponential factor ( $A$ ) can be estimated from the intercept of the plots of Eq. 1 (Table 2). All calculations were performed using a programs complied by ourselves. The pre-exponential factor ( $A$ ) values in Arrhenius equation for solid phase reactions are expected to be in a wide range (six or seven orders of magnitude), even after the effect of surface area is taken into account [24, 25]. The low factors will often indicate a surface reaction, but if the reactions are not dependent on surface area, the low factor may indicate a “tight” complex. The high factors will usually indicate a “loose” complex. Even higher factors (after correction for surface area) can be obtained for complexes having free translation on the surface. Since in many cases the concentrations in solids are not controllable, it would have been convenient if the magnitude of the pre-exponential factor can provide the information for the reaction molecularity. Such a bulk decomposition, any molecule is as likely as to react with any others; and no preference is shown toward corners, edges, surface, defects or sites of previous decomposition. On the basis of these reasons, the thermal decomposition reaction of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  may be interpreted as “loose complexes” for 1st, 2nd, 4th and 6th step and “tight complexes” for 3rd step, which correspond to the proposed reaction in (Eqs. 1–4 and 6).

As can be seen from Table 2, the entropy of activation ( $\Delta S^*$ ) values for all steps are positive values. It means that the corresponding activated complexes had lower degrees of arrangement than the initial state. Since the decomposition of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  proceeds as five consecutive reactions, the formation of the 2nd, 3rd, 4th, and 6th activated complex passed in situ. In the terms of the activated complex theory (transition theory), [11, 12, 19–21, 26, 27, 29] a positive value of  $\Delta S^*$  indicates a malleable activated

complex that leads to a large number of degrees of freedom of rotation and vibration. A result may be interpreted as a “fast” stage. On the other hand, a negative value of  $\Delta S^*$  indicates a highly ordered activated complex and the degrees of freedom of rotation as well as of vibration are less than they are in the non activated complex. These results may indicate a “slow” stage [19–21]. In respect of these results, 1st, 2nd, 4th and 6th decomposed steps of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  may be interpreted as “fast” stages whereas 3rd decomposed step may be interpreted as “slow” stage. The positive values of the enthalpy  $\Delta H^*$  are in good agreement with five endothermic effects in DTA data. The positive values of  $\Delta H^*$  and  $\Delta G^*$  for all stages show that they are connected with the introduction of heat and are non-spontaneous processes.

## Conclusions

$\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  was successfully synthesized by a rapid and simple precipitation using phosphoric acid, manganese metal, and calcium carbonate at ambient temperature. The different chemical and physical properties of binary compounds ( $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$ ) and the individual ones ( $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{M} = \text{Mn}$  and  $\text{Ca}$ ) and  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  or  $\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$ ) were revealed by FTIR, XRD, and SEM techniques. Kinetic analysis from non-isothermal DTA applying KAS method results exhibits the activation energies ( $E$ ) in five decomposition steps, which correspond to the loss of water of crystallization (the first two steps), subsequently to a continuous intermolecular polycondensation and elimination of water of constituent in anion (the last three steps). On the basis of correctly established values of the apparent activation energy, pre-exponential factor and the changes of entropy, enthalpy and Gibbs free energy, certain conclusions can be made concerning the mechanisms and characteristics of the processes. Thus, various scientific and practical problems involving the participation of solid phases can be solved.

**Acknowledgements** The authors would like to thank the Chemistry Department, Khon Kaen University for facilities. This work is financially supported by the Thailand Research Fund (TRF) and the Commission on Higher Education (CHE): Research Grant for New Scholar (MRG52\_Banjong Boonchom) and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research (KMUTL Research), Ministry of Science and Technology, Thailand.

## References

- Jouini A, Gâcon JC, Ferid M, Trabelsi-Ayadi ML. Luminescence and scintillation properties of praseodymium poly and diphosphates. *Opt Mater*. 2003;24:175–80.
- Kitsugi T, Yamamuro T, Nakamura T, Oka M. Transmission electron microscopy observations at the interface of bone and four types of calcium phosphate ceramics with different calcium/phosphorus molar ratios. *Biomaterials*. 1995;16:1101–7.
- Jian-Jiang B, Dong-Wan K, Kug Sun H. Microwave dielectric properties of  $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ . *J Eur Ceram Soc*. 2003;23:2589–92.
- Kaplanová M, Trojan M, Brandová D, Navrátil J. On the luminescence on manganese(II) phosphates. *J Lumin*. 1984;29:199–204.
- Wang C-M, Liao H-C, Tsai W-T. Effect of heat treatment on the microstructure and electrochemical behavior of manganese phosphate coating. *Mater Chem Phys*. 2007;102:207–13.
- Antraptseva NM, Shchegrov LN, Ponomareva IG. Thermolysis features of manganese(II) and zinc dihydrogenphosphate solid solution. *Russ J Inorg Chem*. 2006;51:1493–7.
- Trojan M, Brandová D, Paulik F, Arnold M. Mechanism of the thermal dehydration of  $\text{Co}_{1/2}\text{Ca}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . *J Therm Anal Calorim*. 1990;36:929–38.
- Trojan M, Brandová D. Mechanism of dehydration of  $\text{Zn}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . *Thermochim Acta*. 1990;159:1–12.
- Brandová D, Trojan M, Paulik F, Paulik J, Arnold M. Study of the thermal dehydration of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Ca}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . *J Therm Anal Calorim*. 1990;36:881–9.
- Trojan M, Brandová D. Study of thermal dehydration of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . *Thermochim Acta*. 1990;161:11–21.
- Brandová D, Trojan M. Mechanism of dehydration of  $\text{Zn}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . *Thermochim Acta*. 1990;157:1–9.
- Trojan M, Brandová D, Šolc Z. Study of the thermal preparation and stability of tetrametaphosphates of bivalent metals. *Thermochim Acta*. 1987;110:343–8.
- Trojan M. Double tetrametaphosphates  $\text{Mn}_{2-x}\text{Ca}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  as special pigments. *Dye Pigment*. 1990;12:35–47.
- Trojan M. Binary cyclotetraphosphates  $\text{Zn}_{2-x}\text{Ca}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  as new special pigments. *Dye Pigment*. 1990;13:1–10.
- Trojan M, Šulcová P, Mošner P. The synthesis of binary zinc(II)–nickel(II)cyclo-tetraphosphates as new special pigments. *Dye Pigment*. 2000;44:161–4.
- Trojan M, Brandová D. A study of the thermal preparation of  $\text{c-Cd}_{4/3}\text{Ca}_{2/3}\text{P}_4\text{O}_{12}$ . *Thermochim Acta*. 1990;160:349–59.
- Trojan M, Šulcová P. Binary Cu(II)–Mn(II) cyclo-tetraphosphates. *Dye Pigment*. 2000;47:291–4.
- Viter VN, Nagorny PG. Synthesis of continuous substitutional solid solutions  $\text{M}_{1-x}\text{Ni}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  with  $\text{M} = \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Co}$ , or  $\text{Zn}$ . *Russ J Inorg Chem*. 2007;52:14–20.
- Boonchom B, Maensiri S, Danvirutai C. Soft solution synthesis, non-isothermal decomposition kinetics and characterization of manganese dihydrogen phosphate dihydrate  $(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and its thermal transformation products. *Mater Chem Phys*. 2008;109: 404–10.
- Boonchom B, Youngme S, Danvirutai C. A rapid co-precipitation and non-isothermal decomposition kinetics of new binary  $\text{Mn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . *Solid State Sci*. 2008;10:129–36.
- Gabal MA. Kinetics of the thermal decomposition of  $\text{CuC}_2\text{O}_4 \cdot \text{ZnC}_2\text{O}_4$  mixture in air. *Thermochim Acta*. 2003;402:199–208.
- Gao X, Dollimore D. The thermal decomposition of oxalates. Part 26: a kinetic study of the thermal decomposition of manganese (II) oxalate dihydrate. *Thermochim Acta*. 1993;215:47–63.
- Kissinger HE. Reaction kinetics in differential thermal analysis. *Anal Chem*. 1957;29:1702–6.
- Singh BK, Sharma RK, Garg BS. Kinetics and molecular modeling of biologically active glutathione complexes with lead(II) ions. *J Therm Anal Calorim*. 2006;84:593–600.
- Vlaev L, Nedelchev N, Gyurova K, Zagorcheva M. A comparative study of non-isothermal kinetics of decomposition of calcium oxalate monohydrate. *J Anal Appl Pyrolysis*. 2008;81:253–62.
- Vlase T, Jurca G, Doca N. Non-isothermal kinetics by decomposition of some catalyst precursors. *Thermochim Acta*. 2001; 379:65–9.
- Vlase T, Vlase G, Doca M, Doca N. Specificity of decomposition of solids in non-isothermal conditions. *J Therm Anal Calorim*. 2003;72:597–604.
- Soumhi EH, Saadouni I, Driss A. A new organic-cation cyclotetraphosphate  $\text{C}_{10}\text{H}_{28}\text{N}_4\text{P}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ : crystal structure, thermal analysis, and vibrational spectra. *J Solid State Chem*. 2001;156: 364–9.
- Koleva V, Effenberger H. Crystal chemistry of  $\text{M}[\text{PO}_2(\text{OH})_2]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  compounds ( $\text{M} = \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}, \text{Cd}$ ): structural investigation of the Ni, Zn and Cd salts. *J Solid State Chem*. 2007;180:956–67.
- Bagieu-Beucher M, Gondrand M, Perroux M. Etude à haute pression des tétramétaphosphates du type  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $\text{M} = \text{Ni}, \text{Mg}, \text{Cu}, \text{Co}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cd}$ ). Données cristallographiques sur tous les composés  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ . *J Solid State Chem*. 1967;19:353–7.
- Hong J, Guo G, Zhang Z. Kinetics and mechanism of non-isothermal dehydration of nickel acetate tetrahydrate in air. *J Anal Appl Pyrolysis*. 2006;77:111–5.
- Ioîtescu A, Vlase G, Vlase T, Doca N. Thermal behaviour of some industrial and food dyes. *J Therm Anal Calorim*. 2007;88: 121–5.
- Gabal MA, El-Bellihi AA, Ata-Allah SS. Effect of calcination temperature on Co(II) oxalate dihydrate–iron(II) oxalate dihydrate mixture DTA–TG, XRD, Mössbauer, FT-IR and SEM studies (Part II). *Mater Chem Phys*. 2003;81:84–92.



# Floral-like microarchitectures of cobalt iron cyclotetraphosphate obtained by solid state synthesis

Banjong Boonchom<sup>a,b,\*</sup>, Naratip Vittayakorn<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup> King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chumphon Campus, 17/1 M. 6 Pha Thiew District, Chumphon, 86160, Thailand

<sup>b</sup> Advanced Materials Science Research Unit, Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

<sup>c</sup> College of KMITL Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 5 August 2009

Received in revised form 7 October 2009

Accepted 13 October 2009

Available online 20 October 2009

### Keywords:

Floral-like microparticle CoFeP<sub>4</sub>O<sub>12</sub>

Superparamagnetic behavior

Solid state synthesis

Inorganic ceramic pigment

## ABSTRACT

Floral-like microparticle of a binary cobalt iron cyclotetraphosphate CoFeP<sub>4</sub>O<sub>12</sub> was synthesized through solid phase reaction using cobalt carbonate, iron metal and phosphoric acid with further calcinations at the temperature of 500 °C. The XRD and FTIR results indicate that the prepared CoFeP<sub>4</sub>O<sub>12</sub> has a pure monoclinic phase without the presence of any phase impurities. The floral-like microparticle and superparamagnetic behavior of the synthesized CoFeP<sub>4</sub>O<sub>12</sub> are important properties for specific applications, which were revealed by SEM and VSM techniques, respectively. The dominant features of the synthesized CoFeP<sub>4</sub>O<sub>12</sub> in this work are compared with M<sub>2</sub>P<sub>4</sub>O<sub>12</sub> (M = Co and Fe) and CoFeP<sub>4</sub>O<sub>12</sub> reported in our previous works.

© 2009 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

In recent years, synthesis of the morphology and architecture of inorganic phosphates at micro-/nanoscale levels is a significant challenge, which attracts increased attention because of their strong influence on the chemical and physical properties of materials [1–3]. Morphology influences not only the intrinsic chemical, optical, and catalytic properties of micro-/nanoscale metal phosphates, but also their relevant applications in electronic, biocompatible and biodegradable in tissue [2,4]. As one of the members of phosphate material family, transition metal cyclotetraphosphate micro-/nanoparticles can be used in potential pigments, selective catalysts, phosphors, materials for corrosion-resistant coatings and biocompatible and biodegradable in tissue [5–8]. Several divalent including 3d metals, namely, Mn, Co, Fe, Zn, Cu, and Ni, are known to form the single metal cyclotetraphosphate M<sub>2</sub>P<sub>4</sub>O<sub>12</sub>, where M(II) stands for a divalent metal. The binary metal cyclotetraphosphates M<sub>2-x</sub>A<sub>x</sub>P<sub>4</sub>O<sub>12</sub> (M and A = Mg, Ca, Mn, Co, Ni, Zn, or Cu; x = 0–2), isostructural with the single metal cyclotetraphosphates M<sub>2</sub>P<sub>4</sub>O<sub>12</sub>, were prepared by Trojan et al. [5–8] and Boonchom et al. [9–11]. All these compounds have similar X-ray diffraction patterns and close unit cell parameters, which crystallize in monoclinic space group C2/c (Z = 4) [12]. Various methods have been employed to synthesize binary metal cyclotetraphosphates, including two-step thermal method [5–8], hydrothermal synthesis [5] and the decompo-

sition of binary metal (II) dihydrogenphosphates (M<sub>1-y</sub>A<sub>y</sub>(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O; where M and A = Ca, Mg, Mn, Fe, Co, Ni, Cu or Zn; y = 0–1; n = 1–4) [9–11]. This work is of interest because it appears economically advantageous to replace partially the divalent metal cations by some cheaper divalent element which could also improve special properties as above mentioned [1–4]. However, it is relevant to synthesize binary cyclotetraphosphate and its solid solution because changing the metal ratio influences its useful properties. Consequently, it is a major challenge to synthesize binary metal cyclotetraphosphate micro-/nanoparticles with its intrinsic shape-dependent properties and resulting application. Recently, cobalt iron pyrophosphate CoFeP<sub>2</sub>O<sub>7</sub> and cobalt iron cyclotetraphosphate CoFeP<sub>4</sub>O<sub>12</sub> were prepared by mixing of CoCO<sub>3</sub>, Fe and H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> in water–methanol and in water–acetone, respectively [13,14]. The difference of media (solvents) in the precipitation process leads to the obtaining different phosphates, as revealed by XRD and FTIR data. Due to its solubility in water and its ability to associate with metal ions in media, solvent has been used as a binder cum gel for shaping materials (bulk, porous, micro- or nanoparticles) and a matrix for entrapment of ions to generate a gelled precursor which resulted in obtaining different material or same material with different size and morphology after heat treatment. The results obtained are also in agreement with other phosphate group reported in literature [15,16]. In this work, we report for the first time one step thermal synthesis of floral-like microarchitectures of binary cobalt iron cyclotetraphosphate CoFeP<sub>4</sub>O<sub>12</sub> by solid state reaction from cobalt carbonate, iron metal and phosphoric acid without organic media agent (or solvent). The different preparation routes of the CoFeP<sub>2</sub>O<sub>7</sub> between this work and our previous report [14] affect the differences of some physical and chemical properties such as morphology, particle size

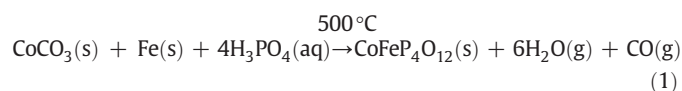
\* Corresponding author. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chumphon Campus, 17/1 M. 6 Pha Thiew District, Chumphon, 86160, Thailand. Tel.: +66 7750 6422x4565; fax: +66 7750 6410.

E-mail addresses: [kbbanjon@gmail.com](mailto:kbbanjon@gmail.com), [kbbanjon@kmitl.ac.th](mailto:kbbanjon@kmitl.ac.th) (B. Boonchom).

and magnetic behavior. The synthesized sample was characterized by X-ray powder diffraction (XRD), Fourier transform infrared (FTIR), scanning electron microscope (SEM) and vibrating sample magnetometer (VSM) techniques.

## 2. Experimental

All the reagents used in this study were of A.R. grade. A binary cobalt iron cyclotetraphosphate  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  was prepared at laboratory temperature. In typical procedure,  $\text{CoCO}_3$  and Fe (complexometric) were mixed together with mole ratio of 1.0:1.0 and then was ground for 10 min. Subsequently, 5 mL of 70 %  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (86.4 % w/w  $\text{H}_3\text{PO}_4$  dissolved in DI water) was added slowly to the mixed solid with mechanically stirring at ambient temperature (10 min). Then, the mixed solution was evaporated by heating in the furnace at 500 °C for 2 h. The obtained gray pink precursor was crushed into powder and was washed repeatedly by DI water until no  $\text{PO}_4^{3-}$  was detected. Finally, the powder was washed again for several times with methanol and dried at room temperature. The reaction equation can be expressed as:



The cobalt and iron contents of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  were determined by dissolving in 0.0126 M hydrochloric acid using atomic absorption spectrophotometry (AAS, Perkin Elmer, Analyst100). The phosphorus content was determined by colorimetric analysis of the molybdophosphate complex. X-ray powder diffraction (XRD) was carried out by a Phillips PW3040 X-ray diffractometer (The Netherlands) utilizing  $\text{Cu K}\alpha$  radiation ( $\lambda = 0.15406$  nm) at 40 kV/200 mA. The Scherrer method was used to evaluate the crystallite size [17]. The room-temperature FTIR spectrum in the range of 4000–370  $\text{cm}^{-1}$  was recorded by a Perkin Elmer Spectrum GX FTIR/FT-Raman spectrometer with 8 scans and the resolution of 4  $\text{cm}^{-1}$  using KBr pellets. The morphology was examined with SEM picture by LEO SEM VP1450 scanning electron microscope. The magnetic property was examined at room temperature (20 °C) using a vibrating sample magnetometer (VSM 7403, Lake Shore, USA).

## 3. Results and discussion

### 3.1. Chemical analysis

The chemical analysis data showed that the cobalt, iron and phosphorus mass percentage were 13.58%, 12.92% and 28.75%, respectively. In other words, the molar ratio of  $\text{Co}_{\text{total}}:\text{Fe}_{\text{total}}:\text{P}_{\text{total}}$  in the synthetic product is equal to 1.00:1.00:4.03, which indicates that the general formula would be  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ .

### 3.2. X-ray powder diffraction

XRD was used to characterize the phase the crystallographic structure of the product (Fig. 1). The XRD pattern of as prepared floral-like  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  is similar to that of non-uniform particle  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  reported by our previous work [14] but the intensities are slightly different. The lower and higher intensities of XRD peaks indicate the differences of crystallization or amorphous phase as well as particle sizes of these materials. In the hypothesis of isostructural, the spectrum peaks for the systems of binary cobalt iron cyclotetraphosphate (solid solution) and single metal cyclotetraphosphate ( $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{M} = \text{Co}$  and  $\text{Fe}$ ) are quite similar because of the equivalent electronic charges and the close radii of cations. Consequently, all the diffraction peaks in the figure are found to be in agreement with monoclinic  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (PDF no. 842208 for  $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  and PDF no. 782285 for  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ), space group  $\text{C2/c}$  ( $Z = 4$ ). No characteristic peaks of other impurities ( $\text{CoCO}_3$  or  $\text{Fe}$ ) were observed,

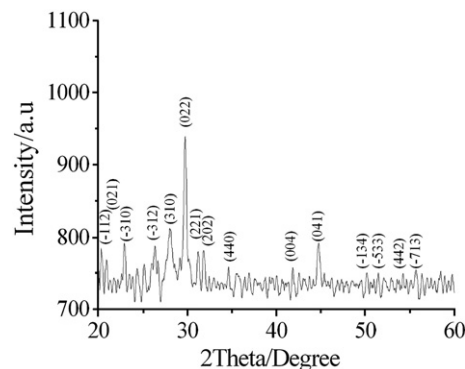


Fig. 1. XRD pattern of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ .

and all the reflections could be indexed to the pure monoclinic phase of binary cobalt iron cyclotetraphosphate  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . From XRD analysis (Fig. 1), it can conclude that the as prepared floral-like  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  is solid solution, not a mixture of the individual phases and isostructural with the single metal  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $\text{M} = \text{Co}$  and  $\text{Fe}$ ). According to the Scherrer formula:  $D = K\lambda/(\beta \cos \theta)$ , where  $D$  is particle diameter,  $K = 0.89$  (the Scherrer constant),  $\lambda = 0.15406$  (wavelength of the X-ray used),  $\beta$  is the width of line at the half-maximum intensity and  $\theta$  is the corresponding angle. The average crystallite size of product is estimated from the strongest three diffraction peaks below  $40^\circ$  for  $2\theta$  and found to be  $49 \pm 20$  nm. This crystallite size of the prepared  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  in this work is smaller than that obtained from our previous work ( $65 \pm 24$  nm) [14] but it is larger than those for the single metal compounds ( $40 \pm 10$  nm for  $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  and  $29 \pm 6$  nm for  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ) in our previous studies [9–11]. The lattice parameters calculated from the XRD spectra are  $a = 11.89(0)$ ,  $b = 8.33(0)$ ,  $c = 10.15(0)$  Å and  $\beta = 119.09(0)^\circ$ , which are close to those of the standard data file (from PDF no. 842208 for  $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  and PDF no. 782285 for  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ) and the literature [9–11,14].

### 3.3. FTIR spectroscopy

The  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  structure is characterized by a three-dimensional framework with  $\text{MO}_6$  ( $\text{M} = \text{Co}$  or  $\text{Fe}$ ) polyhedral linked with  $\text{P}_4\text{O}_{12}$  rings by  $\text{M}-\text{O}-\text{P}$ . The basic structure unit is the centrosymmetric cyclotetraphosphate ring  $\text{P}_4\text{O}_{12}$  and therefore vibrational modes can consider it as made up of the  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  anion. The vibrational modes of  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  ion observed in the frequency range of 370–1400  $\text{cm}^{-1}$  are assigned according to the literature (Fig. 2) [18–20]. The many peaks split in these regions indicate the different strength of the bond between cations ( $\text{M} = \text{Co}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$ ) and anion ( $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$ ), which confirm the inserting different cations in the skeletal as well as the formation of binary cobalt iron cyclotetraphosphate. The anion contains the  $\text{PO}_2^-$  radical and the  $\text{P}-\text{O}-\text{P}$  bridge which differ in their bond strength. As the  $\text{P}-\text{O}$  bond strength in the  $\text{PO}_2^-$  radical is stronger than in the  $\text{P}-\text{O}-\text{P}$  bridge, the

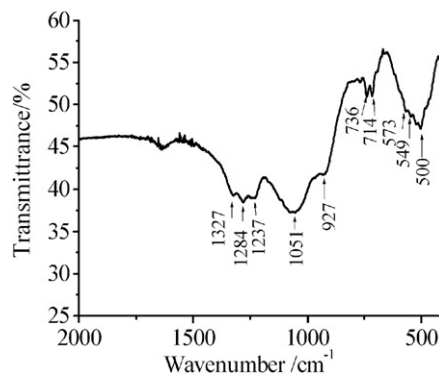


Fig. 2. FTIR spectrum of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ .

stretching frequencies of the  $\text{PO}_2^{2-}$  radical are expected to be higher than those in the P–O–P bridge. The P–O bonds in the  $\text{PO}_2^{2-}$  radical show its asymmetric and symmetric stretching frequencies around 1327–1237 and 1150–1000  $\text{cm}^{-1}$ , respectively. The asymmetric and symmetric stretching frequencies of the P–O–P bridge are observed in the regions of 1000–900 and 800–700  $\text{cm}^{-1}$ , respectively. The symmetric P–O–P bridge stretching modes occur at 736 and 714  $\text{cm}^{-1}$ . These observed bands are known to be the most striking feature of cyclotetraphosphate spectra, along with the presence of the  $\nu_{\text{as}}\text{OPO}^-$  band. From X-ray diffraction data [12], it was shown that the crystal structure is monoclinic (space group C2/c) with a cyclic structure of the  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  anion. This has been confirmed by the FTIR measurements. The bending modes are expected in the area 600–400  $\text{cm}^{-1}$  ( $\text{PO}_2^{2-}$  radical) and 400–370  $\text{cm}^{-1}$  (P–O–P bridge). The metal–O stretching usually appears in the bending mode region as the bending modes of the P–O–P bridge and absorption bands associated with these vibrations are usually very weak. The weak FTIR band at 400  $\text{cm}^{-1}$  is probably due to metal–O stretching mode.

### 3.4. Scanning electron microscopy

SEM micrograph of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  sample is shown in Fig. 3. It can be seen that the sample is composed of floral-like structures. There is soft agglomeration phenomenon among the particles of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ , which is attributed that the strong absorption of each other exists among particles with the layered structure compound. The floral-like morphology consists of similar petal-like flakes growing radially from the centre as can be observed under a higher magnification (inset). The different morphologies between the single metal compounds ( $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{M} = \text{Co}$  or  $\text{Fe}$ ) and the binary  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  indicate the presence of Co ions in substitution position of Fe ions, which confirms the formation of binary cobalt iron cyclotetraphosphate  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . The result of SEM experiment indicates that the grain sizes of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  are not consistent with the crystallite sizes in the XRD analysis indicating the influence of media agents on particle nucleation and growth mechanisms. In addition, the floral-like morphology of the prepared  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  in this work is different from the non-uniform particles of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  reported in our previous work [14]. These results indicate that the medium reagents for precipitation have the strong effect on the morphology of binary metal cyclotetraphosphate and are also in agreement with other reported other phosphate groups [12–15].

### 3.5. VSM magnetometer

The room-temperature magnetization curves of the floral-like microparticle  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  displays typical superparamagnetic behavior (Fig. 4). This curve is typical superparamagnetic behavior without any

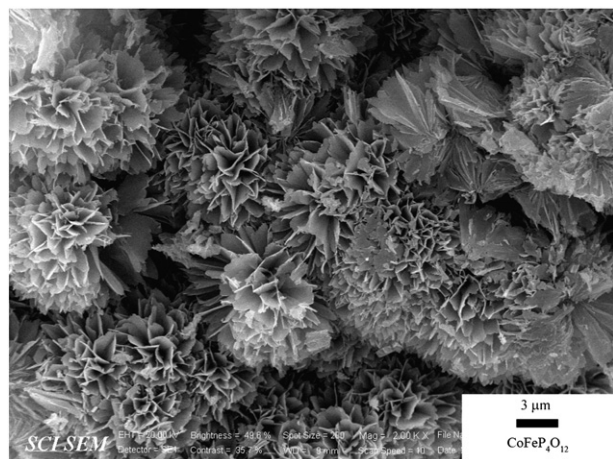


Fig. 3. SEM micrograph of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ .

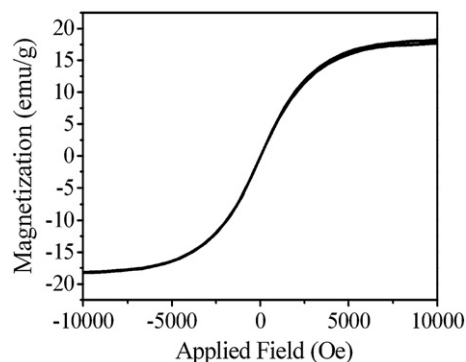


Fig. 4. The specific magnetization of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  as a function of field, measured at 20 °C.

hysteresis in the field range of  $\pm 10,000$  Oe. Specific saturated magnetization ( $M_s$ ) value of the floral-like microparticle  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  (18.202 emu/g) in this work is higher than that of non-uniform microparticle  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  (14.243 emu/g) reported in our previous work [14] because of their small size. The result is lower than the saturated magnetization for  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles (in a range of 30–50 emu/g) [21,22]. It is seen that magnetization of the prepared  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  is lower than that of  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (85.01 emu/g) but markedly distinct from the diamagnetic properties of  $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  [9,10]. This result indicates that the presence of Co ions in substitution position of Fe ions has the strong effect on the magnetic behavior of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . This study demonstrates that the floral-like microparticle  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  is truly superparamagnetic, which is a unique feature of magnetic materials. This material may be used in modern technologies including magnetic resonance imaging contrast agents, data lifetime in high density information storage, ferrofluid technology, and magnetocaloric refrigeration [21–25].

## 4. Conclusions

Floral-like microparticle  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  was successfully synthesized by solid state route from cobalt carbonate, iron metal and phosphoric acid at 500 °C. The floral-like morphology and higher magnetization value of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  in this work are different from those obtained from other works indicating that this may be caused by the media agents. The morphology of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  shows floral-like crystals, as revealed by SEM data. The synthesized powder is polycrystalline, having crystallite size of  $49 \pm 20$  nm for  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ , as estimated by XRD. The synthesized  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  is superparamagnetic, having no hysteresis loop in the range of  $-10,000 \text{ Oe} < H < 10,000 \text{ Oe}$  with the specific magnetization of 18.202 emu/g at 10 kOe. The results obtained are necessary for elaboration of technology to produce the cyclotetraphosphate of transition metals, which may be useful for potentially applications as catalytic, ceramic and the biomedical materials etc.

## Acknowledgements

This work is financially supported by the Thailand Research Fund (TRF), the Commission on Higher Education (CHE): Research Grant for New Scholar and the National Nanotechnology Center (NANOTEC) NSTDA, Ministry of Science and Technology, Thailand.

## References

- [1] H.N. Lim, A. Kassim, N.M. Huang, P.S. Khiewc, W.S. Chiu, Three-dimensional flower-like brushite crystals prepared from high internal phase emulsion for drug delivery application, *Colloids Surf., A* 345 (2009) 211–218.
- [2] F.-H. Lin, C.-J. Liao, K.-S. Chen, J.-S. Sun, C.-P. Lin, Petal-like apatite formed on the surface of tricalcium phosphate ceramic after soaking in distilled water, *Biomaterials* 22 (2001) 2981–2992.
- [3] L. Hong, Q. Li, H. Lin, Y. Li, Synthesis of flower-like silver nanoarchitectures at room temperature, *Mater. Res. Bull.* 44 (2009) 1201–1204.

- [4] M.T. Averbuch-Pouchot, A. Durif, Topics in Phosphate Chemistry, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 1996.
- [5] M. Trojan, P. Šulcová, Binary Cu(II)–Mn(II) cyclo-tetraphosphates, *Dyes Pigm.* 47 (2000) 291–294.
- [6] M. Trojan, P. Šulcová, P. Mošner, The synthesis of binary zinc(II)–nickel(II)cyclo-tetraphosphates as new special pigments, *Dyes Pigm.* 44 (2000) 161–164.
- [7] M. Trojan, Binary cyclotetraphosphates  $Zn_{2-x}Ca_xP_4O_{12}$  as new special pigments, *Dyes Pigm.* 13 (2000) 1–10.
- [8] M. Trojan, D. Brandová, A study of the thermal preparation of  $c-Cd_{4/3}Ca_{2/3}P_4O_{12}$ , *Thermochim. Acta* 160 (1990) 349–359.
- [9] B. Boonchom, S. Maensiri, S. Youngme, C. Danvirutai, A simple synthesis and room temperature magnetic properties of new binary  $Mn_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot xH_2O$  obtained from a rapid co-precipitation at ambient temperature, *Solid State Sci.* 11 (2009) 485–490.
- [10] B. Boonchom, C. Danvirutai, Synthesis of  $MnNiP_2O_7$  and nonisothermal decomposition kinetics of a new binary  $Mn_{0.5}Ni_{0.5}HPO_4 \cdot H_2O$  precursor obtained from a rapid coprecipitation at ambient temperature, *Ind. Eng. Chem. Res.* 47 (2008) 5976–5981.
- [11] B. Boonchom, C. Danvirutai, S. Youngme, 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 Sci.* 10 (2008) 129–136.
- [12] M. Bagieu-Beucher, M. Gondrand, M. Perroux, High-pressure study of tetrametaphosphates of the  $M_2P_4O_{12}$  type ( $M = Ni, Mg, Cu, Co, Fe, Mn, Cd$ ). Crystallographic data on all  $M_2P_4O_{12}$  compounds, *J. Solid State Chem.* 19 (1976) 353–357.
- [13] B. Boonchom, N. Phuvongpha, Synthesis of new binary cobalt iron pyrophosphate  $CoFeP_2O_7$ , *Mater. Lett.* 63 (2009) 1709–1711.
- [14] B. Boonchom, M. Thongkam, S. Kongtaweelert, N. Vittayakorn, A simple route to synthesize new binary cobalt iron cycloetraphosphate  $CoFeP_4O_{12}$  using aqueous and acetone media, *J. Alloys Compd.* 486 (2009) 689–692.
- [15] S. Scaccia, M. Carewska, A. Di Bartolomeo, P.P. Prosini, Thermoanalytical investigation of nanocrystalline iron (II) phosphate obtained by spontaneous precipitation from aqueous solutions, *Thermochim. Acta* 397 (2003) 135–141.
- [16] S. Scaccia, M. Carewska, P.P. Prosini, Thermoanalytical study of iron(III) phosphate obtained by homogeneous precipitation from different media, *Thermochim. Acta* 413 (2004) 81–86.
- [17] B.D. Cullity, Elements of X-ray Diffraction, 2nd ed Addison-Wesley Publishing, 1977.
- [18] V. Ramakrishnan, G. Aruldas, Vibrational spectra of Cu(II) and Co(II) tetrametaphosphates, *Infrared Phys.* 25 (1985) 665–670.
- [19] E.J. Baran, R.C. Mercader, A. Massaferrro, E. Kremer, Vibrational and  $^{57}Fe$ -Mössbauer spectra of some mixed cation diphosphates of the type  $M^{II}Fe^{III}(P_2O_7)_2$ , *Spectrochim. Acta.* 60 (2004) 1001–1005.
- [20] E.H. Soumhi, I. Saadoun, A. Driss, A new organic-cation cyclotetraphosphate  $C_{10}H_{28}N_4P_4O_{12} \cdot 4H_2O$ : crystal structure, thermal analysis, and vibrational spectra, *J. Solid State Chem.* 156 (2001) 364–369.
- [21] A.K. Gupta, M. Gupta, Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications, *Biomaterials* 26 (2005) 3995–4021.
- [22] C. Yang, J. Xing, Y. Guan, J. Liu, H. Liu, Synthesis and characterization of superparamagnetic iron nanocomposites by hydrazine reduction, *J. Alloys Compd.* 385 (2004) 283–287.
- [23] S. Gyergyek, M. Huskić, D. Makovec, M. Drogenik, Superparamagnetic nanocomposites of iron oxide in a polymethyl methacrylate matrix synthesized by in situ polymerization, *Colloids Surf. A* 317 (2008) 49–55.
- [24] H. Cao, J. He, L. Deng, X. Gao, Fabrication of cyclodextrin-functionalized superparamagnetic  $Fe_3O_4$ /amino-silane core-shell nanoparticles via layer-by-layer method, *Appl. Surf. Sci.* 255 (2009) 7974–7980.
- [25] X. Li, G. Wang, Low-temperature synthesis and growth of superparamagnetic  $Zn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$  nanosized particles, *J. Magn. Magn. Mater.* 321 (2009) 1276–1279.

# Kinetics and Thermodynamics of the Formation of $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$

Banjong Boonchom<sup>\*,†,‡</sup> and Montree Thongkam<sup>‡</sup>

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chumphon Campus, 17/1 M.6 Pha Thiew District, Chumphon, 86160, Thailand, and Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

The kinetics and thermodynamics of dehydration and intermolecular polycondensation reactions of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  were studied under nonisothermal heating by thermogravimetry (TG). On the basis of three calculation procedures and 24 kinetic mechanism functions, kinetic triplets ( $E$ ,  $A$ , kinetic model) using the Arrhenius equation were calculated for both processes. The comparison of the results obtained with these calculation procedures show a strong dependence on the selection of the mechanism function for the process. The thermodynamic functions ( $\Delta H^*$ ,  $C_p$ ,  $\Delta G^*$ , and  $\Delta S^*$ ) of both reactions are calculated from differential scanning calorimetry (DSC) experiments. Kinetic and thermodynamic results indicate that the polycondensation step has a lower rate and is a stronger reaction than the dehydration step and corresponds to the breaking of the strong hydrogen-bonded P–OH group, in connection with the polycondensation reaction, which confirms that the decomposition product (manganese iron cyclotetraphosphate,  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ ) was obtained.

## Introduction

The cyclotetraphosphates of some bivalent metals are relatively stable compounds, both thermally and chemically.<sup>1–5</sup> This phosphate group exhibits properties of color anticorrosion ability and luminescence which allow their application as special inorganic pigments.<sup>6–9</sup> Additionally, they are a good source for macro- (P) and micronutrient (Ca, Mg, Fe, Mn, Co, Ni) fertilizers due to their solubility in soils. They are formed by the calcination of dihydrogenphosphates of bivalent metals or by the calcination of a mixture containing phosphorus and bivalent metal components in the corresponding ratio.<sup>9–12</sup> A number of papers have dealt with the use of thermal analysis (TA) under quasi-isothermal, quasi-isobaric conditions to follow the dehydration reactions of some binary metal dihydrogenphosphate hydrates.<sup>13–15</sup> So far, however, no report has appeared on the application of kinetic and thermodynamic methods to the investigation of the important condensation products, cyclotetraphosphates. The presence of water molecules of binary dihydrogenphosphate hydrates influences the intermolecular interactions (affecting the internal energy and enthalpy) as well as the crystalline disorder (entropy) and, hence, influences the free energy, thermodynamic activity, solubility, stability, and electrochemical and catalytic activity.<sup>16–20</sup> Studies on the thermodynamics, mechanisms, and kinetics of solid-state reactions are a challenging and difficult task with complexity resulting from a great variety of factors with diverse effects such as reconstruction of solid state crystal lattices, formation and growth of new crystallization nuclei, diffusion of gaseous reagents or reaction products, materials heat conductance, and static or dynamic character of the environment, physical state of the reagents—dispersity, layer thickness, specific area and porosity, type, amount, and distribution of the active centers

on solid state surface, etc.<sup>19–22</sup> The results obtained from such studies can be directly applied in materials science for the preparation of various metals and alloys, cements, ceramics, glasses, enamels, glazes, polymers, and composite materials.<sup>21–25</sup>

The aim of the present paper is to study the kinetic and thermodynamic parameters of the formation of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  from the decomposition of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and was followed using differential thermal analysis—thermogravimetry (TG/DTG/DTA), differential scanning calorimetry (DSC), X-ray powder diffraction (XRD), and Fourier transform-infrared (FT-IR) spectroscopy. This work seeks to characterize the thermal decomposition processes of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , in relation to its thermodynamic ( $\Delta H^*$ ,  $C_p$ ,  $\Delta S^*$ ,  $\Delta G^*$ ) and kinetic ( $E$ ,  $A$ , mechanism and model) properties, which are discussed for the first time.

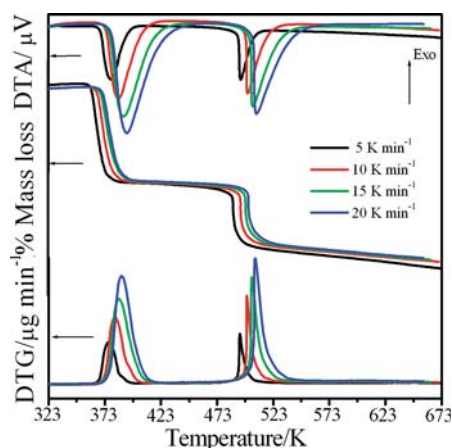
## Experimental Section

The starting binary dihydrogenphosphate hydrate  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (white–gray powder) was prepared in our laboratory from the Fe(c)–Mn(c)– $\text{H}_3\text{PO}_4$  system in a water–acetone medium at ambient temperature.<sup>25</sup> The qualities of the starting reagent and decomposition product were confirmed by atomic absorption spectroscopy (AAS, Perkin-Elmer, Analyst100), FTIR spectrophotometry (a Perkin-Elmer Spectrum GX FT-IR/FT-Raman spectrometer), X-ray diffraction analysis (a D8 Advanced powder diffractometer, Bruker AXS, Karlsruhe, Germany), and scanning electron microscopy.<sup>25</sup> Thermal analysis measurements (thermogravimetry, TG; differential thermogravimetry, DTG; and differential thermal analysis, DTA) were carried out by a Pyris Diamond Perkin-Elmer apparatus by increasing the temperature from (323 to 673) K with calcined  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  powder as the standard reference. The experiments were performed in static air, at heating rates of (5, 10, 15, and 20)  $\text{K} \cdot \text{min}^{-1}$ . The sample mass was between (6.0 and 10.0) mg and placed into an alumina crucible without pressing. Differential scanning calorimetry was carried out for samples [(5 to 10) mg] in aluminum crucibles, over the temperature

\* Corresponding author. Tel.: +66-7750-6422ext 4565. Fax: +66-7750-6410. E-mail address: kbbanjon@kmitl.ac.th.

<sup>†</sup> King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chumphon Campus.

<sup>‡</sup> Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

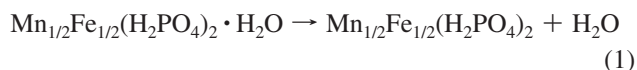


**Figure 1.** TG–DTG–DTA curves of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  at different heating rates of (5, 10, 15, and 20)  $\text{K} \cdot \text{min}^{-1}$  in dynamic dry air.

range of (303 to 823) K using differential scanning calorimetry (DSC) (Perkin-Elmer Pyris One). The heating rate employed was  $10 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$ .

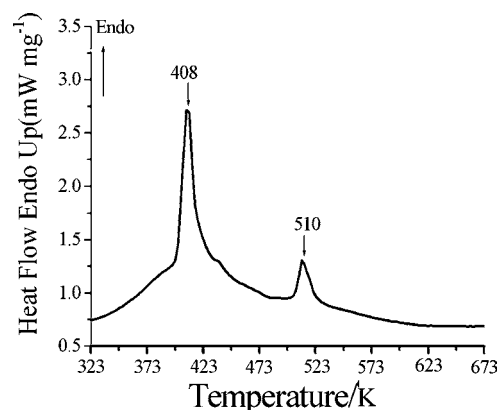
## Results and Discussion

**Sample Characterization.** Figure 1 shows the TG–DTG–DTA curves of the thermal decomposition of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  at four heating rates. TG curves of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  show two clearly distinguishable mass loss stages in the range of (323 to 673) K. The two peaks in the DTG and DTA curves closely correspond to the mass loss observed on the TG trace. All TG–DTG–DTA curves are approximately the same shape, which indicates that the mass loss is independent of the heating rate. However, two decomposition stages were shifted toward higher temperatures when the heating rates increase. The eliminations of water are observed in two areas: (373 to 423) K and (473 to 673) K. The average corresponding observed mass losses of the four TG curves are (9.76 and 9.63) % by mass, which correspond to (1.50 and 1.48) mol of water, respectively. The total mass loss is 19.39 % (2.98 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ), which is in agreement with those reported for other binary dihydrogenphosphate dihydrates in the literature ( $1 < \text{mole of water} < 4$ ).<sup>11–14,25–27</sup> The retained mass is about 80.64 % for all heating rates, compatible with the value expected for the formation of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ , which was verified by XRD measurement. The decomposition reactions of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  are complex processes, which involve the dehydration of the coordinated water molecules (1 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ) and an intramolecular dehydration of the protonated phosphate groups (2 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ) as shown in eqs 1 and 2



An intermediate compound (acid polyphosphate,  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ) has been registered. The decomposed processes and the presented intermediates were similarly observed with other binary dihydrogen phosphates.<sup>11–14,25</sup> Manganese iron cyclotetraphosphate  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  was found to be the product of thermal decomposition at  $T > 550 \text{ K}$ . To gain the complete decomposed  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , a sample of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  was heated in a furnace at 573 K for 2 h.

The DSC curve of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (Figure 2) shows two endothermic peaks at (409 and 511) K (onset peak at (400, 506) K) which are due to the dehydration and the polyconden-



**Figure 2.** DSC curve of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  at the heating rates of  $10 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$  in  $\text{N}_2$  atmosphere.

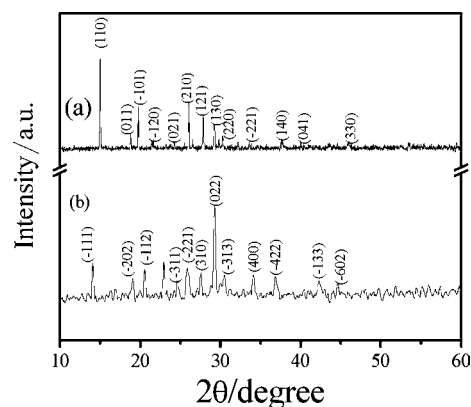
**Table 1.** Values of Thermodynamic Parameters for Two Decomposition Steps of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  Calculated from DSC Data

| parameter                                                       | dehydration | polycondensation |
|-----------------------------------------------------------------|-------------|------------------|
| $T_1(\text{onset})/\text{K}$                                    | 399.89      | 505.79           |
| $T_p/\text{K}$                                                  | 409.44      | 511.57           |
| $T_2(\text{end})/\text{K}$                                      | 415.99      | 518.32           |
| $\Delta S^*/\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ | 74.42       | 11.85            |
| $C_p/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$      | 1885.01     | 484.20           |
| $\Delta H^*/\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$                     | 30348.72    | 6066.98          |
| $\Delta G^*/\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$                     | −121.04     | 4.35             |

sation reactions of this compound, respectively. The DSC peaks are in good agreement with DTG and DTA peaks as shown in Figure 1. According to the DSC curve, the heat of the dehydration and the polycondensation reactions can be calculated and are summarized in Table 1.

The XRD patterns of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and its dehydration product ( $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ ) are shown in Figure 3. In the systems of binary manganese iron solid solutions and individual metal dihydrogenphosphate (or metal cyclotetraphosphate), the electric charges of cations are equivalent, and the radii of cations are close to each other, so the spectrum peaks are quite similar.<sup>11–14,25–27</sup> Therefore, all detectable peaks are indexed as the  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  compounds with structure in standard data as PDF#350010 and PDF#380314, respectively. These results indicated that the two crystal structures are in the monoclinic system with space group  $P2_1/n$  ( $Z = 2$ ) for  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and  $C2/c$  ( $Z = 4$ ) for  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ .<sup>25</sup>

FT-IR spectra of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and its dehydration product ( $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ ) are shown in Figure 4. Vibrational bands



**Figure 3.** XRD patterns of (a)  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and (b)  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ .

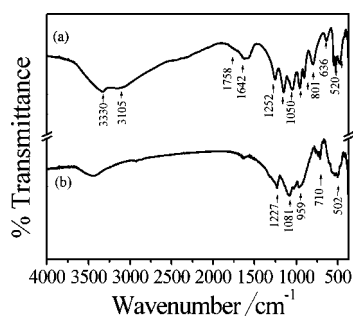


Figure 4. FT-IR spectra of (a)  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and (b)  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ .

are identified in relation to the crystal structure in terms of the fundamental vibrating units, namely,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  and  $\text{H}_2\text{O}$ , for  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  and the  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  ion for  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ , which are assigned according to the literature.<sup>25–28</sup> Vibrational bands of the  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ion are observed in the regions of (300 to 500, 700 to 900, 1160 to 900, 840 to 930, 1000 to 1200, and 2400 to 3300)  $\text{cm}^{-1}$ . These bands are assigned to the  $\delta(\text{O}_2\text{PO}_2)$ ,  $\gamma(\text{POH})$ ,  $\delta(\text{POH})$ ,  $\nu(\text{PO}_2(\text{H}_2))$ ,  $\nu(\text{PO}_2)$ , and  $\nu(\text{OH})$  vibrations, respectively. The observed bands in the (1600 to 1700)  $\text{cm}^{-1}$  and (3000 to 3500)  $\text{cm}^{-1}$  regions are attributed to the water bending/C band and stretching vibrations/A band, respectively. Vibrational bands of the  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  ion are observed in the ranges of (350 to 1220, 1150 to 1100, 1080 to 950, and 780 to 400)  $\text{cm}^{-1}$ . These bands can be assigned to the  $\nu_{\text{as}}(\text{OPO}^-)$ ,  $\nu_{\text{s}}(\text{OPO}^-)$ ,  $\nu_{\text{as}}(\text{POP})$ , and  $\nu_{\text{s}}(\text{POP})$  vibrations, respectively. The observation of a strong  $\nu_{\text{s}}(\text{POP})$  band is known to be the most striking feature of the cyclotetraphosphate spectra, along with the presence of the  $\nu_{\text{as}}(\text{OPO}^-)$  band. From X-ray diffraction data,<sup>27</sup> it was shown that the crystal structure is monoclinic (space group  $\text{C}2/c$ ) with a cyclic structure of the  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  anion, which was confirmed by the FTIR measurements.

**Thermodynamics Parameters.** Thermodynamic parameters, i.e., enthalpy change ( $\Delta H^*/\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ), heat capacity ( $C_p/\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ), entropy change ( $\Delta S^*/\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ), and Gibbs energy change ( $\Delta G^*/\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ), were calculated from the DSC experiment. The enthalpy change was calculated directly from the amount of heat change involved in each step per unit mass of the test sample.  $\Delta H^*$  thus determined was implemented to calculate the specific heat capacity ( $C_p$ ) using the following equation<sup>29–31</sup>

$$C_p = \frac{\Delta H}{\Delta T} \quad (3)$$

where  $\Delta T = T_2 - T_1$ ;  $T_1$  is the temperature at which the DSC peak begins to depart the baseline; and  $T_2$  is the temperature at which the peak lands.<sup>29,30</sup> Subsequently, the changes of entropy ( $\Delta S^*$ ) and Gibbs energy ( $\Delta G^*$ ) were calculated using the following equations<sup>29–31</sup>

$$\Delta S^* = 2.303 C_p \log \frac{T_2}{T_1} \quad (4)$$

$$\Delta G^* = \Delta H^* - T_p \Delta S^* \quad (5)$$

On the basis of the DSC data, the values of  $\Delta H^*$ ,  $\Delta S^*$ ,  $C_p$ , and  $\Delta G^*$  for the activated complex formation from the reagent can be calculated according to eqs 3, 4, and 5 and are presented in Table 1.

The formation of the activated complex of the reagent reflects in a specific way the change of the entropy ( $\Delta S^*$ ). As can be seen from Table 1, the entropy of activation ( $\Delta S^*$ ) values for the first and second steps are positive. A positive entropy value indicates that the transition state is highly disordered compared

with the initial state. It means that the corresponding activated complexes have a lower degree of arrangement than the initial state. Since the decomposition of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  proceeds as two consecutive reactions, the formation of the second activated complex passed in situ. In terms of the theory of activated complexes (transition theory),<sup>31–35</sup> a positive value of  $\Delta S^*$  indicates a malleable activated complex that leads to a large number of degrees of freedom of rotation and vibration. The result may be interpreted as a “fast” stage. On the other hand, a negative value of  $\Delta S^*$  indicates a highly ordered activated complex, and the degrees of freedom of rotation as well as of vibration are less than they are in the nonactivated complex. This result may indicate a “slow” stage.<sup>33–35</sup> Therefore, the first and second steps of the thermal decomposition of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  may be interpreted as “fast” stages. On the other hand, the  $\Delta S^*$  value observed for the polycondensation step was lower than that of the dehydration step, which is due to the necessity of more significant rearrangement in the  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  structure because the strength of the bond between cation and anion is predominantly ionic. According to our interpretation, in these cases the bonds would be strong (large values of  $E$ ), and more rearrangement would be necessary (large absolute values of  $\Delta S^*$ ) to break them for the formation of the activated complex of the reagent. For the enthalpy  $\Delta H^*$ , positive values are in good agreement with two endothermic effects in the DTA and DSC data. The negative and positive values of  $\Delta G^*$  indicate spontaneous and nonspontaneous processes for the dehydration and polycondensation stages, respectively. The  $\Delta G^*$  values indicate that the second step needs a higher-energy pathway than the first step. That means that the rate of the second step is lower than that of the first step of the dehydration and indicates that the second decomposition step occurs with more difficulty than the first decomposition step according to the breaking of the strong hydrogen-bonded P–OH group in this structure.

**Kinetic Parameters.** Kinetic analysis of heterogeneous solid-state reactions always starts with the general formula for the reaction:<sup>16–24</sup>  $\text{A (solid)} \rightarrow \text{B (solid)} + \text{C (gas)}$ . The kinetics of such reactions is described by various equations taking into account the special features of their mechanisms. The reaction can be expressed through the temperatures corresponding to fixed values of the extent of conversion ( $\alpha = (m_i - m_t)/(m_i - m_f)$ ), where  $m_i$ ,  $m_t$ , and  $m_f$  are the initial, current, and final sample mass, at moment time  $t$ ) from experiments at different heating rates ( $\beta$ ).

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \quad (6)$$

The temperature dependence of the rate constant  $k$  for the process is described by the Arrhenius equation

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (7)$$

where  $A$  is the pre-exponential factor ( $\text{s}^{-1}$ );  $E$  is the apparent activation energy ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ );  $T$  is the absolute temperature (K); and  $R$  is the gas constant ( $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ). Substitution of eq 7 in eq 6 gives

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)f(\alpha) \quad (8)$$

When the temperature increases at a constant rate

$$\frac{dT}{dt} = \beta = \text{const} \quad (9)$$

Therefore

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (10)$$

The conversion function  $f(\alpha)$  for a solid-state reaction depends on the reaction mechanism. The solutions on the left-hand side integral depend on the explicit expression of the function  $f(\alpha)$  and are denoted as  $g(\alpha)$ . The formal expressions of the functions  $g(\alpha)$  depend on the conversion mechanism and its mathematical model. The latter usually represents the limiting stage of the reaction—the chemical reactions; random nucleation and nuclei growth; phase boundary reaction or diffusion. Algebraic expressions of functions of the most common reaction mechanisms operating in solid-state reactions are presented in the literature.<sup>17–20</sup>

Several authors<sup>16–24</sup> have suggested different ways to solve the right-hand side integral. The integral methods of the Coats–Redfern (CR),<sup>36</sup> the Madhysudanan–Krishnan–Ninan (MKN),<sup>37</sup> and the Tang et al. (TL)<sup>38</sup> have been predominantly and successfully used for studying the kinetics of dehydration and decomposition of different solid substances.<sup>16–24</sup> For the present study, calculation procedures were based on the CR, MKN, and TL equations. Data from the TG curves in the decomposition range  $0.1 < \alpha < 0.9$  were used to determine the kinetic parameters of the process in all used calculation procedures.

The Coats and Redfern (CR) equation<sup>36</sup>

$$\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{\beta E_\alpha}\right)\left(1 - \frac{2RT}{E_\alpha}\right) - \left(\frac{E_\alpha}{RT}\right) \cong \ln\left(\frac{AR}{\beta E_\alpha}\right) - \left(\frac{E_\alpha}{RT}\right) \quad (11)$$

The Madhysudanan–Krishnan–Ninan (MKN) equation<sup>37</sup>

$$\ln \frac{g(\alpha)}{T^{1.921503}} = \left[ \ln \frac{AE}{\beta R} + 3.772050 - 1.921503 \ln E \right] - 0.120394 \frac{E}{T} \quad (12)$$

Tang et al. (TL) equation<sup>38</sup>

$$\ln \frac{g(\alpha)}{T^{1.894661}} = \left[ \ln \frac{AE}{\beta R} + 3.63504095 - 1.894661 \ln E \right] - 1.00145033 \frac{E}{RT} \quad (13)$$

These equations were used to estimate the most correct mechanism, i.e.,  $g(\alpha)$  and  $f(\alpha)$  functions. The activation energy, pre-exponential factor, and the correlation coefficient can be calculated from the CR (eq 11), MKN (eq 12), and TL (eq 13) equations combined with 24 conversion functions (Table 2).<sup>16–20</sup> Equations 10 to 12 imply that there are differences in the calculated values of the activation energy and pre-exponential factor  $A$  in the Arrhenius equation, even with the same  $g(\alpha)$  function. The value of the coefficient of determination in the linear regression  $R^2$  for eqs 11 to 13 was used as a criterion for

**Table 2. Algebraic Expressions of Functions  $g(\alpha)$  and  $f(\alpha)$  and Their Corresponding Mechanism<sup>16–20</sup>**

| no.                                                                  | symbol          | name of the function                   | $f(\alpha)$                                         | $g(\alpha)$                              | rate-determination mechanism                                                        |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Chemical Process of Mechanism Noninvoking Equations               |                 |                                        |                                                     |                                          |                                                                                     |
| 1                                                                    | $F_{1/3}$       | one-third order                        | $(3/2)(1 - \alpha)^{2/3}$                           | $[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]$               | chemical reaction                                                                   |
| 2                                                                    | $F_{3/4}$       | three-quarters order                   | $4(1 - \alpha)^{3/4}$                               | $[1 - (1 - \alpha)^{1/4}]$               | chemical reaction                                                                   |
| 3                                                                    | $F_{3/2}$       | one and a half order                   | $2(1 - \alpha)^{3/2}$                               | $[1 - (1 - \alpha)^{-1/2} - 1]$          | chemical reaction                                                                   |
| 4                                                                    | $F_2$           | second order                           | $(1 - \alpha)^2$                                    | $(1 - \alpha)^{-1} - 1$                  | chemical reaction                                                                   |
| 5                                                                    | $F_n$           | $n$ th-order kinetics ( $n \pm 1$ )    | $(1 - \alpha)^n$                                    | $[1 - (1 - \alpha)^{1-n}]/(1 - n)$       | chemical reaction                                                                   |
| 2. Acceleratory Equations                                            |                 |                                        |                                                     |                                          |                                                                                     |
| 6                                                                    | $P_{3/2}$       | Mampel power law                       | $(2/3)\alpha^{-1/2}$                                | $\alpha^{3/2}$                           | nucleation                                                                          |
| 7                                                                    | $P_{1/2}$       | Mampel power law                       | $2\alpha^{1/2}$                                     | $\alpha^{1/2}$                           | nucleation                                                                          |
| 8                                                                    | $P_{1/3}$       | Mampel power law                       | $3\alpha^{2/3}$                                     | $\alpha^{1/3}$                           | nucleation                                                                          |
| 9                                                                    | $P_{1/4}$       | Mampel power law                       | $4\alpha^{3/4}$                                     | $\alpha^{1/4}$                           | nucleation                                                                          |
| 3. Sigmoid Rate Equations or Random Nucleation and Subsequent Growth |                 |                                        |                                                     |                                          |                                                                                     |
| 10                                                                   | $A_1, F_1$      | Avrami–Erofeev equation                | $(1 - \alpha)$                                      | $-\ln(1 - \alpha)$                       | assumed random nucleation and its subsequent growth, $n = 1$                        |
| 11                                                                   | $A_{3/2}$       | Avrami–Erofeev equation                | $(3/2)(1 - \alpha)[- \ln(1 - \alpha)]^{1/3}$        | $[- \ln(1 - \alpha)]^{2/3}$              | assumed random nucleation and its subsequent growth, $n = 1.5$                      |
| 12                                                                   | $A_2$           | Avrami–Erofeev equation                | $2(1 - \alpha)[- \ln(1 - \alpha)]^{1/2}$            | $[- \ln(1 - \alpha)]^{1/2}$              | assumed random nucleation and its subsequent growth, $n = 2$                        |
| 13                                                                   | $A_3$           | Avrami–Erofeev equation                | $3(1 - \alpha)[- \ln(1 - \alpha)]^{2/3}$            | $[- \ln(1 - \alpha)]^{1/3}$              | assumed random nucleation and its subsequent growth, $n = 3$                        |
| 14                                                                   | $A_4$           | Avrami–Erofeev equation                | $4(1 - \alpha)[- \ln(1 - \alpha)]^{3/4}$            | $[- \ln(1 - \alpha)]^{1/4}$              | assumed random nucleation and its subsequent growth, $n = 4$                        |
| 4. Deceleratory Rate Equations                                       |                 |                                        |                                                     |                                          |                                                                                     |
| 4.1 Phase Boundary Reaction                                          |                 |                                        |                                                     |                                          |                                                                                     |
| 15                                                                   | $R_1, F_0, P_1$ | Power law                              | $(1 - \alpha)^0$                                    | $\alpha$                                 | one-dimensional advance of the reaction interface, power law or zero-order kinetics |
| 16                                                                   | $R_2, F_{1/2}$  | Power law                              | $2(1 - \alpha)^{1/2}$                               | $[1 - (1 - \alpha)^{1/2}]$               | contracting area (cylindrical symmetry) or one-half-order                           |
| 17                                                                   | $R_3, F_{2/3}$  | Power law                              | $3(1 - \alpha)^{2/3}$                               | $[1 - \ln(1 - \alpha)]^{1/3}$            | Contracting volume (spherical symmetry) or two-thirds order                         |
| 4.2 Based on the Diffusion                                           |                 |                                        |                                                     |                                          |                                                                                     |
| 18                                                                   | $D_1$           | Parabola law ( $\alpha = kt^{1/2}$ )   | $1/2\alpha$                                         | $\alpha^2$                               | One-dimension diffusion                                                             |
| 19                                                                   | $D_2$           | Valensi equation                       | $[- \ln(1 - \alpha)]^{-1}$                          | $\alpha + (1 - \alpha)\ln(1 - \alpha)$   | Two-dimension diffusion                                                             |
| 20                                                                   | $D_3$           | Jander equation                        | $(3/2)(1 - \alpha)^{2/3}/[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]$  | $[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]^2$             | Three-dimension diffusion                                                           |
| 21                                                                   | $D_4$           | Ginstling–Brounstein equation          | $(3/2)(1 - \alpha)^{-1/3} - 1]^{-1}$                | $[1 - (2/3)\alpha - (1 - \alpha)^{2/3}]$ | Three-dimension diffusion                                                           |
| 22                                                                   | $D_5$           | Zhuravlev–Lesokhin–Tempelman equation  | $(3/2)(1 - \alpha)^{4/3}/[1 - (1 - \alpha)^{-1/3}]$ | $[(1 - \alpha)^{-1/3} - 1]^2$            | Three-dimension diffusion                                                           |
| 23                                                                   | $D_6$           | Komatsu–Uemura or anti-Jander equation | $(3/2)(1 + \alpha)^{2/3}/[(1 + \alpha)^{1/3} - 1]$  | $[(1 + \alpha)^{1/3} - 1]^2$             | Three-dimension diffusion                                                           |
| 24                                                                   | $D_7$           | Anti-Ginstling–Brounstein equation     | $(3/2)/[(1 + \alpha)^{-1/3} - 1]$                   | $[1 + (2/3)\alpha - (1 + \alpha)^{2/3}]$ | Three-dimension diffusion                                                           |

**Table 3.** Values of Kinetic Parameters for Two Decomposition Steps of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  Calculated from TG Data using Different Methods

| parameter                                                                                         | calculation procedure |                      |                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
|                                                                                                   | CR                    | MKN                  | TL                   |
| Dehydration of $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ |                       |                      |                      |
| kinetic model                                                                                     | $F_{3/2}$             | $F_{3/2}$            | $F_{3/2}$            |
| $R^2$                                                                                             | 0.99652               | 0.99653              | 0.99654              |
| $E/\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$                                                               | 136.48                | 136.73               | 136.75               |
| $A/\text{min}^{-1}$                                                                               | $1.87 \cdot 10^{21}$  | $2.01 \cdot 10^{21}$ | $2.02 \cdot 10^{21}$ |
| Deprotonated Hydrogen Phosphate of $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$      |                       |                      |                      |
| kinetic model                                                                                     | $D_5$                 | $D_5$                | $D_5$                |
| $R^2$                                                                                             | 0.97495               | 0.97502              | 0.97505              |
| $E/\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$                                                               | 244.45                | 244.55               | 244.55               |
| $A/\text{min}^{-1}$                                                                               | $2.26 \cdot 10^{31}$  | $4.00 \cdot 10^{31}$ | $2.34 \cdot 10^{31}$ |

the estimation of the three calculating procedures aiming to find the most suitable one. For the calculations of the kinetic parameters, a computer program was developed for all the data manipulations.

At the constant condition of other parameters, the TG curves for dehydration and decomposition of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  in dynamic dry air at various heating rates [(5, 10, 15, and 20)  $\text{K} \cdot \text{min}^{-1}$ ] are shown in Figure 1. According to the CR, MKN, and TL methods, the basic data of  $\alpha$  and  $T$  collected from Figure 1 are illustrated in Table 3. These data were processed according to the three calculation procedures and the kinetic equations shown in Table 2, aiming to obtain a maximum value of the coefficient of determination  $R^2$  (Table 3). As can be seen from Table 3, the possible conversion function of the dehydration reaction is  $F_{3/2}$  (three-halves kinetic order), which has a higher coefficient of determination than the other functions. Thus, it can be stated that the mechanism function with integral  $g(\alpha) = 2[(1 - \alpha)^{1/2} - 1]$  and differential form  $f(\alpha) = (1 - \alpha)^{3/2}$  belongs to the mechanism of chemical decomposition reaction (mechanism noninvoking equation). Concerning the second step of decomposition, the better coefficient of determination was obtained with mechanism function  $D_5$  (Zhuravlev, Lesokin, Tempelman equation), which corresponds to three-dimensional diffusion with integral  $g(\alpha) = [(1 - \alpha)^{-1/3} - 1]^2$  and differential form  $f(\alpha) = (3/2)(1 - \alpha)^{4/3}((1 - \alpha)^{-1/3} - 1)^{-1}$ . The values of the correlation coefficient and kinetic triplets ( $E$ ,  $A$ , kinetic model) obtained with the three equations were quite close which did give enough grounds to select the most suitable kinetic function model. These were considered enough to conclude that the kinetic triplet parameters of nonisothermal decomposition of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  can be reliably calculated with the correctly chosen  $g(\alpha)$  function. However, the kinetic triplet parameters of the two decomposition processes are different. The dehydration reaction of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , however, is characterized by significantly lower values of  $E_a$  and  $A$  compared to the polycondensation reaction relative to the formation of an intermediary higher molecular mass compound. Similar tendency is observed in the kinetics of dehydration and decomposition of  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .<sup>39</sup> When solid-state reactions of the same type occur, it was found that large values of  $A$  correspond to large values of  $E$ . The large  $E$  values are usually connected with the higher strength of the chemical bond (bonds) which is to be broken. The significantly lower values of  $E$  and  $A$  observed for thermal dehydration of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  compared to those of thermal decomposition of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  showed that the bond strength between  $\text{H}_2\text{O}$  molecules, cations, and anions was lower than that between cations ( $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ) and anions ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ion). This was confirmed from the higher temperature of the decomposition stage (Figure 1), which indicates that the presence of very strong hydrogen bonds of

$\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  is higher than that of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . The result is consistent with the TG/DTG/DTA (the true scheme 1 and 2) and DSC results, which explains the elimination of water molecules in crystallohydrate for the first step and the elimination of water molecules from dihydrogenphosphate ion for the second step. The big difference between the values of the pre-exponential factor  $A$  for the processes of dehydration and decomposition of the studied compound is interesting. The values of the pre-exponential factor  $A$  in the Arrhenius equation for solid phase reactions are expected to be quite wide ranged (6 or 7 orders of magnitude), even after the correction of the surface area effect.<sup>40,41</sup> The empirical first-order pre-exponential factors may vary from ( $10^5$  to  $10^{18}$ )  $\text{s}^{-1}$ . The low factors will often indicate a surface reaction, but if the reactions are not dependent on the surface area, the low factor may indicate a “tight” complex. The high factors will usually indicate a “loose” complex. Even higher factors (after correction of the surface area) can be obtained if the complexes have free transition on the surface. Since the concentrations in solids are not controllable in many cases, it would be convenient if the magnitude of the pre-exponential gives an indication of the reaction molecularity. This appears to be true only for nonsurface-controlled actions having low ( $<10^9 \text{ s}^{-1}$ ) pre-exponential factors. On the basis of these reasons, the first and second steps of the thermal decomposition of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  may be interpreted as loose complexes. This may most likely occur on a surface where the complex extends itself from the surface and perhaps rotates parallel to the surface. For this unimolecular case, the complex is expected to expand in size and hence interact more intensely with its neighbors. On the basis of the results, the thermal analysis and kinetic and thermodynamic results are consistent and indicate the breaking bonds of water molecules and a true P—OH, in connection with the polycondensation reaction,<sup>11–14,39</sup> which confirm that the decomposition product, manganese iron cyclotetraphosphate  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ , was obtained.

## Conclusions

On the basis of the studies carried out, the thermal decomposition of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  was found to occur in two processes: the dehydration and the deprotonated dihydrogenphosphate reactions. The dehydration reaction of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  involves the elimination of water molecules of crystallohydrate, while the deprotonated dihydrogenphosphate reaction of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  involves the breaking bond of a true P—OH and polycondensation reaction of phosphate groups. The parameters characterizing the kinetics and thermodynamics of two thermal transformation reactions of the studied compound were different because the nature of chemical units (cation, anion, and water molecules) exerts significant effects on electron density and, hence, on the strength of its bond to structure. On

the basis of correctly established values of the apparent activation energy, pre-exponential factor, and the changes of entropy, enthalpy, and Gibbs energy, certain conclusions can be made concerning the mechanisms and characteristics of the processes. The results can be applied to the production of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ , which plays a large role in industrial applications.

### Acknowledgment

The authors would like to thank the Chemistry Department, Khon Kaen University for facilities.

### Literature Cited

- Trojan, M.; Šulcová, P.; Sýkorová, L. Thermal Analysis of Ba(II)-Sr(II) Cyclo-Tetraphosphates(V). *J. Therm. Anal. Calorim.* **2002**, *68*, 75.
- Trojan, M.; Šulcová, P. The Thermal Analysis of Binary Zn(II)-Sr(II) Cyclo-tetraphosphates. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2000**, *60*, 215.
- Trojan, M.; Šulcová, P.; Mošner, P. The synthesis of binary zinc(II)-nickel(II) cyclo-tetraphosphates as new special pigments. *Dyes Pigm.* **2000**, *44*, 161.
- Trojan, M.; Palme, J. New colour compounds binary cyclo-tetraphosphates  $\text{Mn}_{2-x}\text{Co}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  and  $\text{Zn}_{2-x}\text{Co}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$ . *Dyes Pigm.* **1993**, *22*, 173.
- Brandová, D.; Trojan, M.; Arnold, M.; Paulik, F. Thermal study of decomposition of  $\text{Cu}_{1/2}\text{Mg}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 0.5 \text{H}_2\text{O}$ . *J. Therm. Anal. Calorim.* **1990**, *36*, 677.
- Trojan, M.; Šulcová, P. Binary Cu(II)-Mn(II) cyclo-tetraphosphates. *Dyes Pigm.* **2000**, *47*, 291.
- Trojan, M.; Beneš, L. Binary cyclo-tetraphosphates  $\text{Mg}_{2-x}\text{Zn}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  and  $\text{Mg}_{2-x}\text{Ca}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$ . *Mater. Res. Bull.* **2000**, *26*, 693.
- Trojan, M.; Brandová, D. A study of the thermal preparation of  $\text{c-Cd}_{4/3}\text{Ca}_{2/3}\text{P}_4\text{O}_{12}$ . *Thermochim. Acta* **1990**, *160*, 349.
- Gunsser, W.; Fruehauf, D.; Rohwer, K.; Zimmermann, A.; Wiedenmann, A. Synthesis and magnetic properties of transition metal cyclotetraphosphates  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $\text{M} = \text{Mn, Co, Ni, Cu}$ ). *J. Solid State Chem.* **1989**, *82*, 43.
- Samuskevich, V. V.; Lukyanchenko, O. A.; Samuskevich, L. N. Disproportionation of  $\text{Zn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  Crystals (Topochemical Particularities). *Ind. Eng. Chem. Res.* **1997**, *36*, 4791.
- Boonchom, B.; Youngme, S.; Danvirutai, C. A rapid co-precipitation and non-isothermal decomposition kinetics of new binary  $\text{Mn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . *Solid State Sci.* **2008**, *10*, 129. and Reference therein.
- Boonchom, B.; Danvirutai, C. Rapid Coprecipitation and Non-Isothermal Decomposition Kinetics of New Binary  $\text{Mn}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$ . *Ind. Eng. Chem. Res.* **2008**, *47*, 2941.
- Brandová, D.; Trojan, M.; Paulik, F.; Paulik, J.; Arnold, M. Study of the thermal dehydration of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Ca}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . *J. Therm. Anal. Calorim.* **1990**, *36*, 881.
- Trojan, M.; Brandová, D. Study of thermal dehydration of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . *Thermochim. Acta* **1990**, *161*, 11.
- Trojan, M.; Palme, J.; Mazan, P. Binary cobalt(II)-copper(II) cyclo-tetraphosphates as new colour compounds. *Thermochim. Acta* **1990**, *224*, 177.
- Vlaev, L.; Nedelchev, N.; Gyurova, K.; Zagorcheva, M. A comparative study of non-isothermal kinetics of decomposition of calcium oxalate monohydrate. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* **2008**, *81*, 253.
- Vlase, T.; Vlase, G.; Birta, N.; Docă, N. Comparative results of kinetic data obtained with different methods for complex decomposition steps. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2007**, *88*, 631.
- Vlase, G.; Vlase, T.; Tudose, R.; Costișor, O.; Docă, N. Kinetic of decomposition of some complexes under non-isothermal conditions. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2007**, *88*, 637.
- Vlaev, L. T.; Georgieva, V. G.; Genieva, S. D. Products and kinetics of non-isothermal decomposition of vanadium(IV) oxide compounds. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2007**, *88*, 805.
- Vlaev, L. T.; Georgieva, V. G.; Gospodinov, G. G. Kinetics of isothermal decomposition of  $\text{ZnSeO}_3$  and  $\text{CdSeO}_3$ . *J. Therm. Anal. Calorim.* **2005**, *79*, 163.
- Vlaev, L. T.; Tavlieva, M. P. Structural and thermal studies on the solid products in the system  $\text{MnSeO}_3\text{-SeO}_2\text{-H}_2\text{O}$ . *J. Therm. Anal. Calorim.* **2007**, *90*, 385.
- Chunxiu, G.; Yufang, S.; Donghua, C. Comparative method to evaluate reliable kinetic triplets of thermal decomposition reactions. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2004**, *76*, 203.
- Boonchom, B.; Youngme, S.; Srithanratana, T.; Danvirutai, C. Synthesis of  $\text{AlPO}_4$  and kinetics of thermal decomposition of  $\text{AlPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O-H4}$  precursor. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2008**, *91*, 551.
- Boonchom, B.; Danvirutai, C. Synthesis of  $\text{MnNiP}_2\text{O}_7$  and 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**, *46*, 9071.
- Boonchom, B.; Maensiri, S.; Youngme, S.; Danvirutai, C. A simple synthesis and room temperature magnetic properties of new binary  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  obtained from a rapid co-precipitation at ambient temperature. *Solid State Sci.* **2009**, *11*, 485.
- Koleva, V.; Mehandjiev, D.; </initials>. Characterization of  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{M} = \text{Mn, Co, Ni}$ ) and their in situ thermal decomposition by magnetic measurements. *Mater. Res. Bull.* **2006**, *41*, 469.
- Koleva, V.; Effenberger, H. Crystal chemistry of  $\text{M}[\text{PO}_2(\text{OH})_2]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  compounds ( $\text{M} = \text{Mg, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Cd}$ ): Structural investigation of the Ni, Zn and Cd salts. *J. Solid State Chem.* **2007**, *180*, 966, and references therein.
- Ramakrishnan, V.; Aruldas, G.; Bigotto, A. Vibrational spectra of Cu(II) and Co(II) tetrametaphosphates. *Infrared Phys.* **1985**, *25*, 665.
- Halawy, S. A.; Fouad, N. E.; Mohamed, M. A.; Zaki, M. I. Kinetic and Thermodynamic Parameters of the Decomposition of Chromium Chromate in Different Gas Atmospheres. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2005**, *82*, 671.
- Abu-Eittah, R. H.; ZaKi, N. G.; Mohamed, M. M. A.; Kamel, L. T. Kinetics and thermodynamic parameters of the thermal decomposition of bis(imipraminium)tetrachlorocuprate, bis(imipraminium)tetrachloromercurate and imipraminium reineckate. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* **2006**, *77*, 1.
- Ma, H. X.; Song, J. R.; Zhao, F. Q.; Hu, R. Z.; Xiao, H. M. Nonisothermal Decomposition Kinetics and Computational studies on the Properties of 2,4,6,8-Tetranitro-2,4,6,8-tetraazabicyclo[3,3,1]nonan-3,7-dione (TNPDU). *J. Phys. Chem. A* **2007**, *111*, 8642.
- Head, C.; Smith, A. C. K. *Applied Physical Chemistry*; McMillan Press: London, 1982; p 473.
- Šesták, J. *J. Thermodynamical properties of solids*; Academia: Prague, 1984.
- Young, D. *Decomposition of solids*; Pergamon Press: Oxford, 1966.
- Turmanova, S. Ch.; Genieva, S. D.; Dimitrova, A. S.; Vlaev, L. T. Non-isothermal degradation kinetics of filled with rise husk ash polypropylene composites. *Express Polym. Lett.* **2008**, *2*, 133.
- Coats, W.; Redfern, J. P. Kinetic Parameters from Thermogravimetric Data. *Nature (London)* **1964**, *201*, 68.
- Madhusudan, P. M.; Krisnan, K.; Ninan, K. N. New equations for kinetic analysis of non-isothermal reactions. *Thermochim. Acta* **1993**, *221*, 13.
- Tang, W.; Liu, Y.; Zang, H.; Wang, C. New approximate formula for Arrhenius temperature integral. *Thermochim. Acta* **2003**, *408*, 39.
- Boonchom, B. Kinetics and Thermodynamic Properties of the Thermal Decomposition of Manganese Dihydrogenphosphate Dihydrate. *J. Chem. Eng. Data* **2008**, *53*, 1533.
- Cordes, H. M. Preexponential factors for solid-state thermal decomposition. *J. Phys. Chem.* **1968**, *72*, 2185.
- Criado, J. M.; Pérez-Maqueda, L. A.; Sánchez-Jiménez, P. E. Dependence of the preexponential factor on temperature. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2005**, *82*, 671.

Received for review March 28, 2009. Accepted September 3, 2009. This work is financially supported by the Thailand Research Fund (TRF) and the Commission on Higher Education (CHE): Research Grant for New Scholar and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research (KMIL Research), Ministry of Education, Thailand.

JE900310M

# One-step thermal synthesis of binary manganese iron cyclotetraphosphate $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$

Banjong Boonchom · Naratip Vittayakorn

Received: 3 August 2009 / Accepted: 30 November 2009 / Published online: 11 December 2009  
© Springer Science+Business Media, LLC 2009

**Abstract** The manganese iron cyclotetraphosphate ( $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ ) was synthesized through one-step thermal synthesis at 700 °C using the mixing of manganese and iron metals and phosphoric acid in the presence of water–acetone media. Both FTIR and XRD results indicate the cyclotetraphosphate ( $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$ ) structure and a pure monoclinic phase with space group  $C2/c$  ( $Z = 4$ ). The morphology and crystallite size for the  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  obtained from SEM data and X-ray line broadening show non-uniform particles and  $30 \pm 9$  nm, respectively. The magnetic study of the synthesized  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  shows superparamagnetic behavior, which is important for specific application. Some physical properties of the synthesized  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  powder presented for the first time are comparable with those from individual  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $M = \text{Mn}$  and  $\text{Fe}$ ) and a binary metal compound as  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ .

## Introduction

The metal(II) phosphates have considerable industrial interesting properties such as ceramics, catalysts, fluorescent materials, dielectrics, metal surface treatment agents, detergents, food additives, fuel cell materials, pigment, etc. [1–4]. Metal cyclotetraphosphates  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  and binary

metal cyclotetraphosphates  $\text{M}_{2-x}\text{A}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $M$  and  $A = \text{Mg}, \text{Ca}, \text{Mn}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}, \text{or Cu}$ ;  $0 < x < 2$ ), are isostructural, were examined for potential applications as special inorganic pigments [5, 6]. All these compounds have similar X-ray diffraction patterns and close unit cell parameters, which crystallize in monoclinic space group  $C2/c$  ( $Z = 4$ ) [7]. They were first described by Trojan et al. [6, 8, 9] and prepared by mixing starting materials, followed by calcination, crushing, and adjusting their color [9–11]. Many methods have been employed to synthesize single or binary metal cyclotetraphosphate, including two-step thermal method [6, 8, 9], hydrothermal synthesis [5], and the condensation of binary metal(II) dihydrogenphosphate hydrates ( $\text{M}_{1-y}\text{A}_y(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  where  $0 < y < 1$ ;  $1 < n < 4$ ) [12, 13]. In our previous work, the  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  prepared by the calcinations of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  at 500 °C uses several processes [12]. These previously reported methods were long time consuming (>5 h) with high temperature (800–1000 °C) and were the evolved toxic gases ( $\text{NO}_2$  and  $\text{CO}_2$ ). These works are of interest because it appears economically advantageous and environmentally friendly to substitute a portion of the divalent metal with a less costly divalent element, which influences many properties, for example, the color of pigments, thermally and chemically stable compounds [6, 8], anti-corrosion ability, and luminescence [8, 9, 14, 15]. However, it is relevant to synthesize binary cyclotetraphosphate and its solid solution because changing the metal ratio influences its useful properties.

Herein, we report for the first time the synthesis of a binary manganese iron cyclotetraphosphate,  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  by one-step thermal synthesis using solid state route of manganese and iron metals and phosphoric acid in water–acetone medium. This method is a simple, rapid, cost-effective, and environmental friendly route for synthesis of

B. Boonchom (✉)  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,  
Chumphon Campus, 17/1 M. 6 Pha Thiew District, Chumphon  
86160, Thailand  
e-mail: kbbanjong@kmitl.ac.th

B. Boonchom · N. Vittayakorn  
Advanced Materials Science Research Unit, Department  
of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute  
of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

$\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ , exhibiting the differences of some physical and chemical properties from those in our previously report [12, 16, 17]. The synthesized sample was characterized by X-ray powder diffraction (XRD), Fourier transform infrared (FTIR), scanning electron microscope (SEM), and a vibrating sample magnetometer (VSM) techniques.

## Experimental

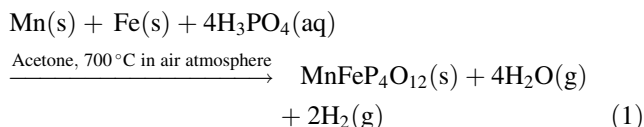
### Reagent and apparatus

The starting reagents are Mn, Fe,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , and acetone. All chemicals were of p.a. quality (Merck). As metal sources we use crystalline Mn and Fe metals since they display: (i) a moderate stability at storage (with respect to bond oxidation to Fe(II) and Mn(II) and dehydration, which ensures an exact stoichiometry in the final product; (ii) appearance of reducing gaseous products ( $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ , or  $\text{CO}_2$ ) during the calcination process. The manganese and iron contents of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  were determined by dissolving in 0.0126 M hydrochloric acid using atomic absorption spectrophotometry (AAS, Perkin Elmer, Analyst100). The phosphorus content was determined by colorimetric analysis. The room temperature FTIR spectrum was recorded in the range of  $4000\text{--}370\text{ cm}^{-1}$  with 8 scans on a Perkin-Elmer Spectrum GX FT-IR/FT-Raman spectrometer with the resolution of  $4\text{ cm}^{-1}$  using KBr pellets (KBr, spectroscopy grade, Merck). The structure and crystallite size of the product were studied by X-ray powder diffraction using a X-ray diffractometer (Phillips PW3040, The Netherlands) with Cu  $K\alpha$  radiation ( $\lambda = 0.15406\text{ nm}$ ). The Scherrer method was used to evaluate the crystallite size [18]. The morphology of the product was examined with scanning electron microscope using LEO SEM VP1450 after gold coating. The magnetic study of the product was examined at room temperature ( $20\text{ }^\circ\text{C}$ ) using a vibrating sample magnetometer (VSM 7403, Lake Shore, USA).

### Preparation of manganese iron cyclotetraphosphate $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$

Typical procedure, 0.5494 g of Mn (c), 0.5584 g of Fe (c), and 10 mL acetone were put in a beaker with mechanical stirring. The mixture was added by 5 mL of 70%  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (86.4% w/w  $\text{H}_3\text{PO}_4$  dissolved in DI water) with continuous stirring at ambient temperature (10 min). The reactant mixture was transferred to a crucible, which was heated in the furnace at  $700\text{ }^\circ\text{C}$  for 2 h in an air atmosphere. The obtained pale gray powder was crushed and washed repeatedly with water until no  $\text{PO}_4^{3-}$  was detected in filtrate. Then, the powder was washed again for several times

with methanol and dried at room temperature. The reaction equation can be expressed as:



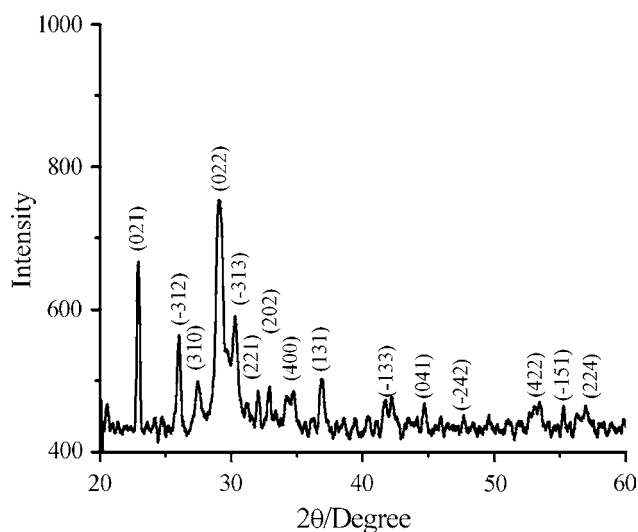
## Results and discussion

### Chemical analysis of $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$

The chemical compositions of the synthesized  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  were analyzed according to the discussed methods. The data showed that manganese, iron, and phosphorus mass percentages were 14.55, 14.30, and 31.92 wt%, respectively. In other words, mole ratio of Mn:Fe:P in the synthetic product is equal to 1.03:1.00:4.02. This indicates that the general formula would be  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ .

### XRD analysis of $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$

Figure 1 shows the XRD pattern of the product  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  obtained at  $700\text{ }^\circ\text{C}$ . The higher intensities of XRD peaks observed indicate crystallization as well as particle sizes of the product. On the basis of isostructural, XRD patterns of the individual  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (when  $\text{M} = \text{Mn}$  and  $\text{Fe}$ ) and the binary  $\text{M}_{1-x}\text{A}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  are quite similar due to the electric charges of cations are equivalent, and the radii of cations are close to each other. Consequently, we can draw a conclusion that the synthesized  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  is solid solution and not a mixture of the individual ones. All the detectable peaks in the figure are found to be in agreement with monoclinic phase, space group  $C2/c$  ( $Z = 4$ ) from PDF card 380314 for  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  and PDF card 782285 for



**Fig. 1** XRD pattern of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$

**Table 1** Average particle size and lattice parameters of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  calculated from XRD data

| Compounds                            | Systems       | $a$ (Å)   | $b$ (Å)  | $c$ (Å)   | $\beta$ (°) | Average crystallite size (nm) |
|--------------------------------------|---------------|-----------|----------|-----------|-------------|-------------------------------|
| $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ | PDF no 380314 | 11.88     | 8.588    | 10.137    | 119.21      | –                             |
|                                      | Ref. [16]     | 11.784(0) | 8.913(4) | 10.055(6) | 119.95(3)   | $29 \pm 9$                    |
| $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$        | This work     | 12.02(0)  | 8.23(0)  | 10.57(0)  | 118.89(2)   | $30 \pm 9$                    |
|                                      | Ref. [12]     | 12.02(8)  | 8.42(2)  | 10.10(4)  | 119.11(5)   | $69 \pm 21$                   |
| $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ | PDF no.782285 | 11.94     | 8.37     | 9.93      | 118.74      | –                             |
|                                      | Ref. [17]     | 12.80(0)  | 8.80(4)  | 10.56(0)  | 118.67(4)   | $29 \pm 6$                    |

$\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  and the XRD pattern of the prepared sample is in agreement with that of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ , obtained by the thermal transformation of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  at 500 °C. According to the Scherrer formula:  $D = 0.89\lambda / \beta \cos\theta$ , where  $D$  is crystallite diameter,  $\lambda = 0.15406$  nm (the wavelength of X-ray radiation),  $\theta$  is the diffraction angle, and  $\beta$  is the full width at half maximum (FWHM) [18]. The crystallite size of the product are estimated from the strong peaks below  $40^\circ$  from  $2\theta$ . The resulting crystallite size of the product is  $30 \pm 9$  nm. The lattice parameters determined from the XRD spectra are very close to the standard data file (from PDF no. 380314 for  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  and PDF no. 782285 for  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ) and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  reported in the literature (Table 1) [12, 16, 17].

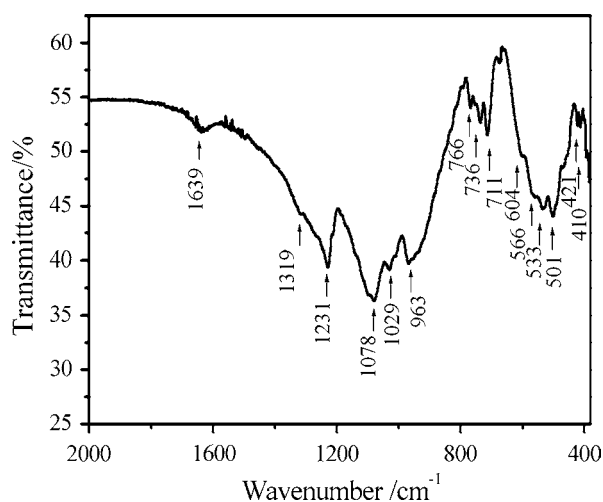
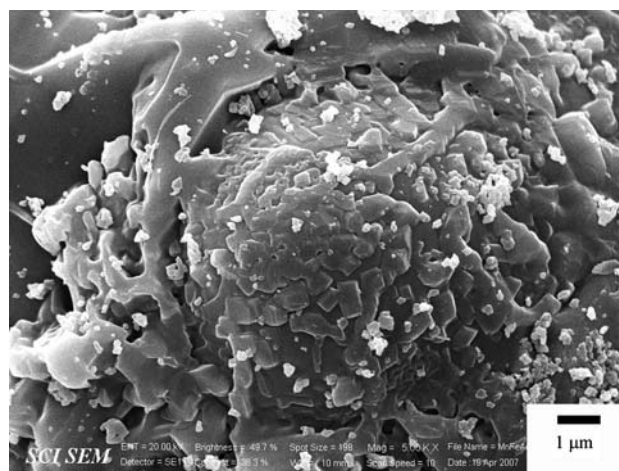
#### FT-IR spectroscopic analysis of $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$

The FTIR spectrum of the product  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  is seen in Fig. 2. The crystal structure is a three-dimensional framework of  $\text{MO}_6$  ( $M = \text{Mn}$  or  $\text{Fe}$ ) polyhedral linked with  $\text{P}_4\text{O}_{12}$  rings by  $\text{M}-\text{O}-\text{P}$ . The vibrational modes of  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  ion observed in the frequency range of  $370\text{--}1400\text{ cm}^{-1}$  are

assigned according to the literature [16, 17, 19]. The strong band at  $1226\text{ cm}^{-1}$  is due to the asymmetric stretching frequency of the  $\text{PO}_2^{2-}$  radical, while the bands at  $1100\text{--}100\text{ cm}^{-1}$  to the symmetric stretching frequencies of the  $\text{PO}_2^{2-}$  radical. The bending modes are expected in the area  $600\text{--}400\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{PO}_2^{2-}$  radical) and  $400\text{--}370\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{P}-\text{O}-\text{P}$  bridge). The metal–O stretching usually appears in the bending mode region as the bending modes of the  $\text{P}-\text{O}-\text{P}$  bridge and absorption bands associated with these vibrations are usually very weak. One strong band at  $970\text{ cm}^{-1}$  is assigned to the asymmetric of the  $\text{P}-\text{O}-\text{P}$  bridge. Three bands between  $800$  and  $700\text{ cm}^{-1}$  are due to symmetric stretching frequencies of the  $\text{P}-\text{O}-\text{P}$  bridge. The observation of a strong  $\nu_s\text{POP}$  band is known to be the most striking feature of cyclotetraphosphate spectra, along with the presence of the  $\nu_{\text{as}}\text{OPO}^-$  band, which indicate the cyclic structure of the  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  anion. This FTIR result is consistent with X-ray diffraction data [5].

#### SEM analysis of $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$

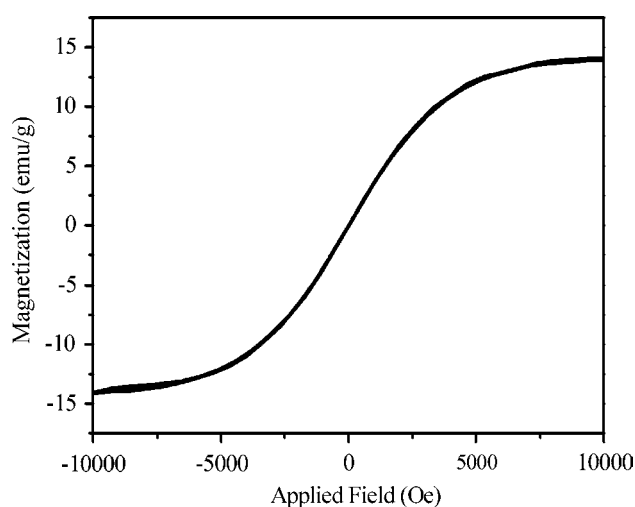
Figure 3 shows the SEM micrograph of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  product. The whole thermal transformation phase changed

**Fig. 2** FTIR spectrum of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ **Fig. 3** SEM micrograph of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$

particle shape and size of the product composed of a high agglomerate of non-uniform particles, which is not similar to those of  $M_2P_4O_{12}$  ( $M = \text{Mn}$  or  $\text{Fe}$ ) (Fig. 3) and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  obtained by thermal condensation of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  in our previous studies [12, 16, 17]. The highly agglomerate of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  powder is possibly caused by the process of the decomposition process in acetone medium. There is strong agglomeration phenomenon among the particles of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ , which is attributed that the each other absorption exists among particles with the layered structure compound. The SEM result indicates that the grain sizes of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  are not consistent with the crystallite sizes in the XRD analysis because the exact particle nucleation and growth mechanisms are caused.

#### VSM magnetometer

Magnetization curve (M–H loop) for  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  powder obtained from room temperature VSM measurement is illustrated in Fig. 4. Magnetization did not reach saturation, even at maximum applied magnetic field in range of  $\pm 10,000$  Oe, and no hysteresis was found, which indicated that the studied product is superparamagnetic [20]. Specific saturated magnetization ( $M_s$ ) value (14.09 emu/g) for the studied  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  powder [12] is close to that of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  (14.24 emu/g) [15]. But the superparamagnetic property for the studied compound is significantly different from the ferromagnetic properties for  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (85.01 emu/g) [17] and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  (13.14 emu/g) [12] (obtained from thermal condensation of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  at  $500^\circ\text{C}$ ) and the diamagnetic property for  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  [16]. Compared with the  $M_s$  of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  bulk (92 emu/g) and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles (in a range of 30–50 emu/g), the  $M_s$  of



**Fig. 4** The specific magnetization of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  as a function of field, measured at  $20^\circ\text{C}$

$\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  was lower, which might be attributed the nature of samples; crystal structure, shape, and particle size [21]. If  $\text{Mn(II)}$  is inserted to  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ , the magnetism would decrease significantly, since the effective metal radius of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  was different from its core radius of  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ . This result indicates that the different magnetic property of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  is caused by the presence of Mn ions in substitution position of Fe ions in the skeleton. This study demonstrates that the synthesized  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  is truly superparamagnetic, which is a unique feature of magnetic materials. This material may be used in modern technologies including magnetic resonance imaging contrast agents, data lifetime in high density information storage, ferrofluid technology, and magnetocaloric refrigeration [19–21].

#### Conclusions

This research has successfully achieved a simple one-step thermal synthesis of a monoclinic binary  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  in the presence of water–acetone media. FTIR, XRD, SEM, and VSM results suggested the formation of a binary manganese iron cyclotetraphosphate  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ . The FTIR and XRD data confirmed the most feature of cyclic polyphosphate anion, which indicated the dominant cyclotetraphosphate of  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  anion. The morphology and crystallite size of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  show a high agglomerate of non-uniform particles and polycrystalline having crystallite size of  $30 \pm 9$  nm, as estimated by SEM and XRD, respectively. The magnetic analysis of the synthesized  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  shows superparamagnetic property, having no hysteresis loop in the range of  $-10,000 \text{ Oe} < H < 10,000 \text{ Oe}$  with the specific magnetization of 14.09 emu/g at 10 kOe. This research displays that the simple, cost-effective, rapid time consumption, and environmental friendly method is necessary for elaboration of technology and academic scientist to produce the cyclotetraphosphate of transition metals, which may be useful for potentially applications as super phosphate and micronutrient fertilizers, inorganic ceramic pigment, catalyst, fuel cell material and corrosion-proof compositions.

**Acknowledgements** This work is financially supported by the Thailand Research Fund (TRF), the Commission on Higher Education (CHE): Research Grant for New Scholar and the National Nanotechnology Center (NANOTEC) NSTDA, Ministry of Science and Technology, Thailand.

#### References

1. Hu X, Yan S, Ma L, Wan G, Hu J (2009) Powder Technol 192:27
2. Amri M, Zouari N, Mhiri T, Daoud A, Gravereau P (2006) J Mol Struct 782:16
3. Trojan M, Šulcová P (2000) Dyes Pigments 47:291

4. Boonchom B, Danvirutai C (2008) *Ind Eng Chem Res* 47:5976
5. Gunsser W, Fruehauf D, Rohwer K, Zimmermann A, Wiedenmann A (1989) *J Solid State Chem* 82:43
6. Trojan M, Brandová D (1985) *Thermochim Acta* 88:415
7. Durif A (2005) *Solid State Sci* 7:760
8. Trojan M, Šulcová P (2000) *Thermochim Acta* 343:135
9. Trojan M, Šulcová P (2000) *J Therm Anal Calorim* 60:215
10. Arbi K, Ben Hassen-Chehimi D, Trabelsi-Ayadi M, Silvestre JP (2000) *Mater Res Bull* 35:1533
11. Naili H, Ettis H, Mhiri T (2006) *J Alloys Compd* 424:400
12. Boonchom B, Maensiri S, Youngme S, Danvirutai C (2009) *Solid State Sci* 11:485
13. Trojan M, Brandová D (1990) *Thermochim Acta* 161:11
14. Averbuch-Pouchat MT, Durif A (1996) *Topics in phosphate Chemistry*. World Scientific, Singapore
15. Boonchom B, Thongkam M, Kongtaweelert S, Vittayakorn N (2009) *J Alloys Compd* 486:689
16. Boonchom B, Maensiri S, Youngme S, Danvirutai C (2008) *Mater Chem Phys* 109:404
17. Boonchom B, Maensiri S, Youngme S, Danvirutai C (2008) *Ind Eng Chem Res* 47:7642
18. Cullity BD (1977) *Elements of X-ray diffraction*, 2nd edn. Addison-Wesley Publishing, Massachusetts
19. Ramakrishnan V, Aruldas G (1985) *Infrared Phys* 25:665
20. Ma H, Qi X-r, Maitani Y, Nagai T (2007) *Int J Pharm* 333:177
21. Gupta AK, Gupta M (2005) *Biomaterials* 26:3995



# 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 $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$

Banjong Boonchom<sup>a,b,\*</sup>, Chanaiporn Danvirutai<sup>c</sup>, Naratip Vittayakorn<sup>b,d,e</sup>

<sup>a</sup> King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chumphon Campus, 17/1 M.6 Pha Thiew District, Chumphon 86160, Thailand

<sup>b</sup> Advanced Materials Science Research Unit, Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

<sup>c</sup> Department of Chemistry, Faculty of Science, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

<sup>d</sup> Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

<sup>e</sup> College of KMITL Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 25 July 2009

Received in revised form

5 July 2010

Accepted 21 October 2010

Available online 29 October 2010

### Keywords:

$\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

$\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$

Superparamagnetic behavior

Solid state method

Non-uniform particles

## ABSTRACT

This paper reports the synthesis of binary  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  by a simple, rapid and cost-effective method using  $\text{CoCO}_3\text{--Fe(c)--H}_3\text{PO}_4$  system in water–acetone media at ambient temperature. Thermal transformation of the synthesized powder was investigated by TG/DTG/DTA and DSC techniques, which indicate that its final decomposed product was a binary cobalt iron cyclotetraphosphate  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . The FTIR and XRD results of the synthesized  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and the decomposed  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  indicate the pure monoclinic phases with space group  $\text{P2}_1/\text{n}$  and  $\text{C2/c}$ , respectively. The morphologies of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  powders appear non-uniform particle shapes and high agglomerates, which are different from the cases of the single compounds  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (where  $\text{M} = \text{Co, Fe}$ ). The magnetic properties of the studied compounds are superparamagnetic behaviors, which are important for specific applications. The physical properties of the studied powders are comparable with those reported in our previous study, affected by medium and condition of preparation method.

© 2010 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

## 1. Introduction

Binary metal phosphates with the general formula  $\text{M}'_x\text{M}''_{1-x}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{M}'$  or  $\text{M}'' = \text{Mg, Ca, Ba, Mn, Co, Ni, Fe, Zn}$ ;  $x = 0\text{--}1$ ;  $n = 1\text{--}4$ ) have the incremented use in order to supply the demands of high modern technology [1–3]. This phosphate group is transformed to the corresponding binary metal(II) cyclotetraphosphate group  $\text{M}'_y\text{M}''_{2-y}\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $y = 0\text{--}2$ ) in the reactions of dehydration and deprotonation of dihydrogenphosphate groups at higher temperatures [4–6]. Both  $\text{M}'_x\text{M}''_{1-x}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}'_y\text{M}''_{2-y}\text{P}_4\text{O}_{12}$  compounds are isostructural with the single metal dihydrogenphosphate ( $\text{M}'(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) and single metal(II) cyclotetraphosphate ( $\text{M}'_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ) groups, respectively [8–10]. Consequently, they have similar X-ray diffraction patterns and close unit cell parameters, which crystallize in monoclinic space group  $\text{P2}_1/\text{n}$  ( $Z = 2$ ) for the dihydrogenphosphate group and  $\text{C2/c}$  ( $Z = 4$ ) for cyclotetraphosphate group. Both binary metal phosphate groups can be used in a wide range of applications: catalysts and adsorbents,

ion-exchange materials, solid electrolytes for batteries, in linear and non-linear optical components, chelating agents, tooth powder and doughs, artificial teeth and bones, corrosion-resistant coating, sewage purifying agents, glass-ceramics, refractories, fire extinguishers, cements, soap powder, biomaterials and implantates, forages for animals, superionic conductors, piezo- and ferroelectrics, gas and moisture sensors, magnets, phosphors, detergents and high-quality fertilizers [1,4,5,11,12]. Therefore, the design, synthesis and characterization of the field of these phosphates have been very active during the twentieth century. However, the development of the chemistry of these phosphates was very slow, spreading along almost a century. So far, there were reports on the synthesis, the thermal analysis (TA) under quasi-isothermal and quasi-isobaric conditions of binary metal(II) dihydrogenphosphate hydrates  $\text{M}'_x\text{M}''_{1-x}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{M}'$  or  $\text{M}'' = \text{Mg, Ca, Ba, Mn, Co, Ni, Fe, Zn}$ ;  $x = 0\text{--}1$ ;  $n = 1\text{--}4$ ) [1,4,5,8–12]. Recently, Viter and Nagorny [13], Antraptseva et al. [4] and Koleva and Mehandjiev [12,14] reported the synthesis at low temperature (40–80 °C) with long time consumption (2–90 days) of  $\text{M}_{1-x}\text{Ni}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{M} = \text{Mg, Mn, Co, Zn}$ ),  $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{M} = \text{Co, Ni, Mn, Fe}$ ), respectively. Most recently, our research group reported the rapid synthesis (10–20 min) of  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_{1-x}\text{A}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{M}$  and  $\text{A} = \text{Ca, Mn, Fe, Cu, Co}$ ) at ambient

\* Corresponding author. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chumphon Campus, 17/1 M.6 Pha Thiew District, Chumphon 86160, Thailand. Tel.: +66 7750 6422x4565; fax: +66 7750 6410.

E-mail address: [kbbanjon@kmitl.ac.th](mailto:kbbanjon@kmitl.ac.th) (B. Boonchom).

temperature [1,2,15,16]. However, it is obstacle to synthesize binary metal dihydrogenphosphates, binary metal cyclotetraphosphates and their solid solutions, which vary the composition of metal cations for obtaining homogeneity ranges and modified useful properties.

In this work, binary  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  was prepared by solid state method at ambient temperature with short time consumption (<10 min), which is a simple and cost-effective route. Thermal transformation of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  was investigated by thermogravimetry/differential thermal gravimetry/differential thermal analysis (TG/DTG/DTA) and differential scanning calorimetry (DSC) techniques and its final decomposed product is  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . Furthermore, the synthesized  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and its decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  were characterized by X-ray powder diffraction (XRD), Fourier transform infrared (FTIR), scanning electron microscope (SEM) and vibrating sample magnetometer (VSM) techniques.

## 2. Experimental

Phosphoric acid ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ , Fluka, 86.4% w/w), cobalt carbonate ( $\text{CoCO}_3$ , Merck, AR grade), iron metal (Fe, Merck, AR; c; complexometric) and acetone ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OCH}_3\text{CH}_2$ , Merck, AR grade) were used as precursors for phosphorous, Co(II), Fe(II) and media agent, respectively. Typically process, 2.00 mL of distilled water was added to 8.00 mL  $\text{H}_3\text{PO}_4$  and then  $\text{H}_3\text{PO}_4$  solution was added to 2.40 g of  $\text{CoCO}_3$  and 1.12 g of Fe(c) (a mole ratio corresponding to the nominal composition of Fe:Co ratio of 1.0:1.0) in the presence of 15 mL acetone. This resulting suspension was continuously stirred at ambient temperature for 10 min and the prepared solid was aged for drying at room temperature. The presence of acetone reduced strong exothermic reaction and prevented the evolved  $\text{H}_2(\text{g})$  and  $\text{CO}_2(\text{g})$  in the precipitation process and developed the highly crystalline product. This method is a simple, rapid, cost-effective and environmental friendly route for synthesis of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . The prepared solid was recovered by filtration (suction pump), washed with acetone, and dried in air.

Thermogravimetric analysis (TGA) and differential thermal analysis (DTA) was carried out in a flow of air ( $100 \text{ mL min}^{-1}$ ) with a heating rate of  $10^\circ\text{C min}^{-1}$  over the temperature range from 30 to  $800^\circ\text{C}$  using a TG–DTG–DTA Pyris Diamond Perkin Elmer Instruments. Its final decomposed product seemed to occur at temperatures above  $600^\circ\text{C}$ , so the prepared solid was calcined at  $700^\circ\text{C}$  for 3 h. Differential scanning calorimetry was carried out for a sample (5–10 mg) in an aluminum crucible, over the temperature range of 303–823 K using differential scanning calorimetry (DSC), Perkin Elmer Pyris One. The heating rate employed was  $10 \text{ K min}^{-1}$ . The cobalt and iron contents of the prepared solid and its final decomposed product were determined by dissolving in 0.0126 M hydrochloric acid using atomic absorption spectrophotometry (AAS, Perkin Elmer, Analyst100). The phosphorus content was determined by colorimetric analysis of the molybdophosphate complex. The structure and crystallite size of the synthesized sample and its decomposed product were studied by X-ray powder diffraction using an X-ray diffractometer (Phillips PW3040, The Netherlands) with Cu K $\alpha$  radiation ( $\lambda = 0.15406 \text{ nm}$ ). The Scherrer method was used to evaluate the crystallite size [17]. The photographs of scanning electron microscope (SEM) were obtained by LEO SEM VP1450 after gold coating. The room temperature FTIR spectra were recorded in the range of  $4000\text{--}370 \text{ cm}^{-1}$  with 8 scans on a Perkin–Elmer Spectrum GX FT-IR/FT-Raman spectrometer with the resolution of  $4 \text{ cm}^{-1}$  using KBr pellets (KBr, spectroscopy grade, Merck). The magnetic properties of the prepared solid and its decomposed product were examined at room temperature ( $20^\circ\text{C}$ ) using a vibrating sample magnetometer (VSM 7403, Lake Shore, USA).

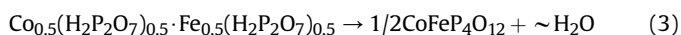
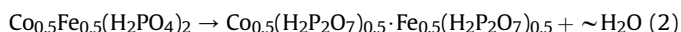
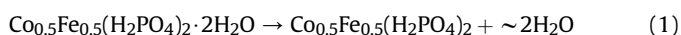
## 3. Results and discussion

### 3.1. Chemical analysis

According to chemical analysis data, the  $\text{P}/(\text{Co} + \text{Fe}) = 2.13$  and  $\text{H}_2\text{O}/\text{P} = 1.92$  molar ratios in the synthesized phosphate differed very little from those calculated for binary metal dihydrogenphosphate with the general formula  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Similarly, the  $\text{P}/(\text{Co} + \text{Fe}) = 2.01$  molar ratio in the decomposed product practically corresponds to the  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  stoichiometry, where Co(II) and Fe(II) stand for divalent cations.

### 3.2. Thermal analysis

Fig. 1 shows the TG/DTG/DTA curves of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . The TG trace shows three mass loss stages in the range of  $30\text{--}600^\circ\text{C}$ . In the first stage between  $45$  and  $140^\circ\text{C}$ , the mass loss of 11.62% corresponds to the elimination of 1.87 mol water ( $\text{H}_2\text{O}$ ) of crystallization. The mass losses of 9.15% for the second stage ( $140\text{--}275^\circ\text{C}$ ) and 5.85% for the third stage ( $275\text{--}600^\circ\text{C}$ ) relate to the eliminations of 1.47 and 0.54 mol water of the deprotonated dihydrogenphosphate groups, respectively. Three endothermic effects in the DTA curve show over the temperature region at 119, 174 and  $402^\circ\text{C}$ , which relate to three peaks in DTG curve at 114, 165, and  $400^\circ\text{C}$  and closely correspond to the observed mass loss on the TG trace. Further, a small exothermic effect at  $712^\circ\text{C}$  without appreciable mass loss is observed in the DTA curve, which can be ascribed to a transition phase form of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . The thermal transformation of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  involves the dehydration of the coordination water molecule (2 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ) and an intramolecular dehydration of the protonated dihydrogenphosphate groups (2 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ) as shown in Eqs. (1) and (3).



An unstable intermediate compounds, such as acid polyphosphate  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  and  $\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7)_{0.5} \cdot \text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7)_{0.5}$  and mixtures of intermediate of both have been registered and

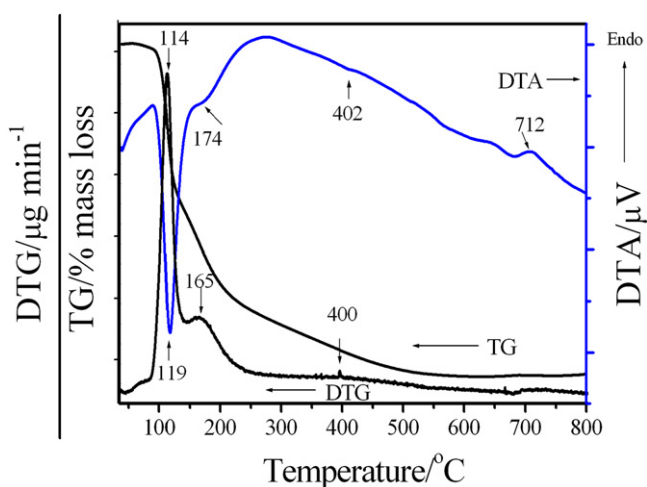


Fig. 1. TG/DTG/DTA curves of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  at the heating rate of  $10^\circ\text{C min}^{-1}$  in air atmosphere.

were similarly observed with the single hydrogen phosphates and other binary metal dihydrogenphosphates [2–8]. The binary cobalt iron cyclotetraphosphate,  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  is found to be the final product of the thermal decomposition at  $T > 600^\circ\text{C}$ . The total mass loss is 26.62% (3.88 mol  $\text{H}_2\text{O}$ ), which is in agreement with those reported for other binary dihydrogenphosphate dihydrate in the literature ( $1 < \text{mole of water} < 4$ ) [4,12–16]. The thermal stability, mechanism and phase transition temperature of the studied compound in this work are significantly different from those from the single metal compounds ( $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  [18] and  $\text{Co}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  [19]). The different thermal behaviors were considered to be due to the different locations of the incorporation of Fe and Co metals in the skeleton and water constitution, which affect to the strengths of water molecule bonds in the studied compound.

The DSC curve of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Fig. 2) shows four endothermic peaks at 121, 167, 215 and  $402^\circ\text{C}$  (onset peak at 98, 162, 204 and  $389^\circ\text{C}$ ) which relate to the dehydration reactions for the first two peaks and the polycondensation reactions for the last two peaks, respectively. Three endothermic peaks at 121, 167 and  $402^\circ\text{C}$  in the DSC curve are in good agreement with DTG and DTA curves as shown in Fig. 1. According to DSC experiment, the heat of dehydration reactions and the polycondensation reactions of this compound can be estimated and were found to be 154.80, 7.80, 20.98 and  $34.04 \text{ J g}^{-1}$ , respectively.

### 3.3. X-ray powder diffraction

Fig. 3 shows the XRD patterns of the  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sample and its final decomposed product, which are very similar to those obtained from the single metal compounds of M ( $\text{H}_2\text{PO}_4$ ) $_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (when  $\text{M} = \text{Co}$  and  $\text{Fe}$ ), respectively. Compared with the published XRD data of the individual metal compounds ( $\text{Co}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (PDF no 390698),  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (PDF no 751444),  $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (PDF no 842208) and  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (PDF no 782285)), both studied samples can be assigned to the  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  products. According to hypothesis of isostructural, the systems of binary cobalt iron solid solutions and individual metal dihydrogenphosphate (or cobalt iron cyclotetraphosphate) show quite similarity of the XRD peaks because the electronic charges of cations are equivalent and the radii of cations are close to each other. Consequently, we can draw a conclusion that the synthesized  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and its

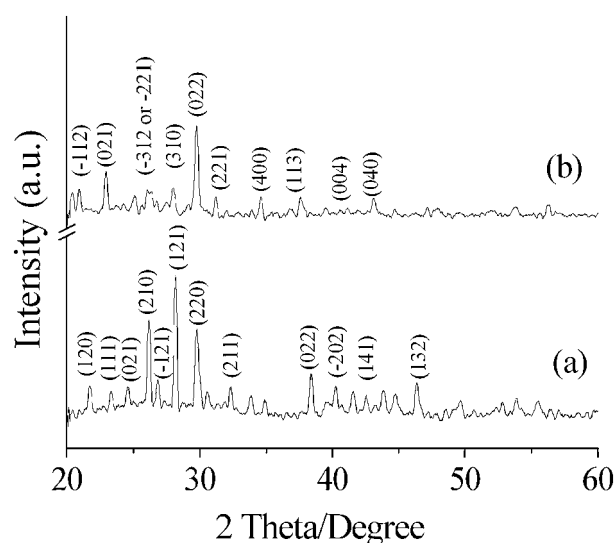


Fig. 3. XRD patterns of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (a) and its decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  (b).

final decomposed product are solid solutions and not a mixture of the individual ones. On the basis of XRD results, all the reflections can be distinctly indexed as pure monoclinic phases with space group  $\text{P}2_1/\text{n}$  ( $Z = 2$ ) for  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{C}2/\text{c}$  ( $Z = 4$ ) for  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . The average crystallite sizes and lattice parameters of both samples were calculated from the XRD patterns and were summarized in Table 1. The lattice parameters and crystallite sizes of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  are comparable to those of the single metal compounds reported in the standard data and our previous works [18,19]. As can be seen from Table 1, the crystallite sizes for both binary compounds in this work are larger than those from the single metal compounds in our previous reports [18,19].

### 3.4. FTIR spectroscopy

The FTIR spectra of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and its final decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  are shown in Fig. 4. On the basis of isostructural, the FTIR spectra peaks of the binary metal and single metal of dihydrogenphosphate (or cyclotetraphosphate) are quite similar. Consequently, vibrational bands are identified in relation to the crystal structure in terms of the fundamental vibrating units namely  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  and  $\text{H}_2\text{O}$  for  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  ion for  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ , which are assigned according to the literature [4,12–16]. The FTIR spectrum of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Fig. 4a) is very similar to those observed by Koleva and Mehandjiev [12] and Boonchom et al. [18,19]. The highest site symmetry of  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ion is  $\text{C}_{2v}$ , in the crystallographic unit cell ( $\text{P}2_1/\text{n}$ ,  $Z = 2$ ), but the four  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ions are located on the set of non-equivalent site symmetry of  $\text{C}_1$ . A pair of  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ions is related to each other by a center of symmetry. It is known that the existence of short  $\text{OH} \cdots \text{O}$  hydrogen bonds in a variety of strongly hydrogen-bonded solids is manifested by the appearance of the characteristic ABC structure of the  $\nu(\text{OH})$  vibrational. Usually, the ABC bands are very broad and consist of many ill-resolved components. The strongest band (A) is located in the  $3100\text{--}2700 \text{ cm}^{-1}$  region, the B band appears about  $2600\text{--}2400 \text{ cm}^{-1}$  and the C band around  $1700\text{--}1600 \text{ cm}^{-1}$ . The problem of the origin of the ABC trio is discussed in many studies on acidic salts, but an explanation of this behavior of strongly hydrogen-bonded systems is still to be found. One of the most popular interpretations of the ABC trio suggests a strong Fermi resonance between the  $\nu(\text{OH})$  stretching fundamentals and the overtones [ $2\delta(\text{OH})$  and  $2\gamma(\text{OH})$ ] or combinations involving the  $\delta(\text{OH})$  and  $\gamma(\text{OH})$  vibrations. The IR

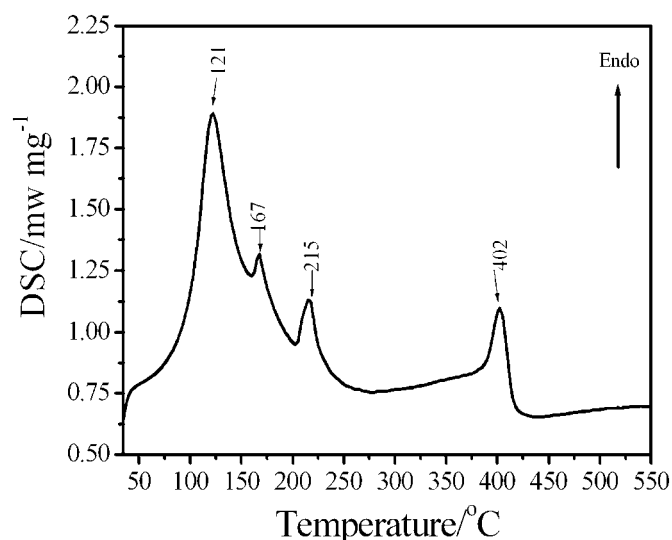


Fig. 2. DSC curve of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  at the heating rate of  $10^\circ\text{C min}^{-1}$  in  $\text{N}_2$  atmosphere.

**Table 1**Average crystallite sizes and lattice parameters of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and its decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  calculated from XRD data.

| Compound                                                                            | Method        | $a/\text{\AA}$ | $b/\text{\AA}$ | $c/\text{\AA}$ | $\beta/^\circ$ | Average crystallite sizes/nm |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------|
| $\text{Co}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                      | PDF no 390698 | 7.27           | 9.88           | 5.33           | 94.86          | $26 \pm 2$                   |
|                                                                                     | Ref. [19]     | 7.21(3)        | 9.91(1)        | 5.29(5)        | 94.88(6)       |                              |
| $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | This work     | 7.29(0)        | 9.90(0)        | 5.35(0)        | 95.10(0)       | $59 \pm 13$                  |
| $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                      | PDF no 751444 | 7.30           | 9.92           | 5.34           | 95.14          | —                            |
|                                                                                     | Ref. [18]     | 7.25(1)        | 10.10(0)       | 5.32(0)        | 95.71(0)       |                              |
| $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$                                                | PDF no 842208 | 11.8           | 8.297          | 9.923          | 118.72         | $40 \pm 10$                  |
|                                                                                     | Ref. [19]     | 11.83(8)       | 8.22(6)        | 9.94(0)        | 118.51(1)      |                              |
| $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$                                                       | This work     | 11.62(1)       | 8.30(0)        | 9.65(2)        | 119.17(4)      | $62 \pm 15$                  |
| $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$                                                | PDF no 782285 | 11.94          | 8.37           | 9.93           | 118.74         | —                            |
|                                                                                     | Ref. [18]     | 12.80(0)       | 8.80(4)        | 10.56(0)       | 118.67(4)      |                              |

spectrum of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  in the region of the OH stretching modes is characterized by the appearance of a complex broad band between 3600 and  $1600\text{ cm}^{-1}$ . Two bands centered at 3145 and  $2431\text{ cm}^{-1}$  in the FTIR spectra are referred to as bands A and B, respectively. The third component (band C) is observed around  $1744\text{--}1640\text{ cm}^{-1}$ . The intense band at about  $1260\text{ cm}^{-1}$  is due to the in plane P–O–H bending ( $A_2$ ), while the out of plane bending ( $A_1$ ) vibration is observed at about  $815\text{ cm}^{-1}$ . A strong band at about  $1141\text{ cm}^{-1}$  is assigned to  $\text{PO}_2$  asymmetric stretching ( $B_1$ ), while the other one at about  $1043\text{ cm}^{-1}$  corresponds to  $\text{PO}_2$  symmetric stretching modes ( $A_1$ ). The FTIR frequency of the  $\text{P}(\text{OH})_2$  asymmetric stretching ( $B_2$ ) shows the strong band at about  $945\text{ cm}^{-1}$ . The weak band at about  $906\text{ cm}^{-1}$  is assigned to  $\text{P}(\text{OH})_2$  symmetric stretching modes ( $A_1$ ). The medium band at about  $560\text{ cm}^{-1}$  is corresponding to  $\text{PO}_2$  bending modes ( $B_1$ ). Two strong bands appeared at about 520 and  $470\text{ cm}^{-1}$  are attributed to  $\text{PO}_2$  rocking modes as  $B_1$  and  $A_2$  vibrations, respectively. The bands of water vibrations are illustrated in Fig. 4a as doublet bands (1640 and  $1568\text{ cm}^{-1}$ ) contribute both to the band C and to the water bending band. A weak band occurs in the FTIR spectra at approximately  $638\text{ cm}^{-1}$  is assigned to rocking mode involving water librations. The  $\nu_{\text{OH}}$  stretching modes of HOH in  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  appear at  $3145\text{ cm}^{-1}$  ( $\nu_1$  or A band) and  $3322\text{ cm}^{-1}$  ( $\nu_3$ ). The bands associated with the  $\nu_{\text{OH}}$  stretching frequencies in  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ions are observed at about 2929 and  $2431\text{ cm}^{-1}$ .

The FTIR spectrum of  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  is shown in Fig. 4b, which are very similar to those obtained from the individual  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $\text{M} = \text{Co}$

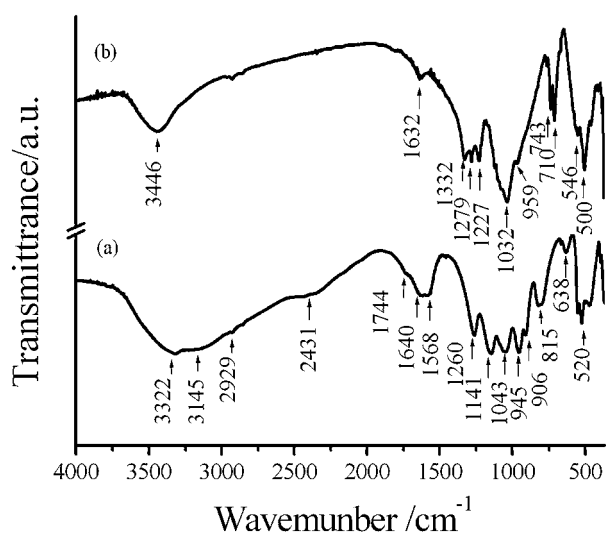
and Fe) [18,19]. The vibrational modes of  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  ion observed in the frequency range of  $370\text{--}1400\text{ cm}^{-1}$  are assigned according to the literature [20,21]. One of the most noteworthy features of the spectra is the presence of strong bands in the ranges of 1332–1227, 1150–1100, 1080–959, 780–700 and  $600\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ . These bands can be assigned to  $\nu_{\text{as}}\text{OPO}^-$ ,  $\nu_{\text{s}}\text{OPO}^-$ ,  $\nu_{\text{as}}\text{POP}$ ,  $\nu_{\text{s}}\text{POP}$  and metal–O vibrations, respectively. The observation of a strong  $\nu_{\text{s}}\text{POP}$  band is known to be the most striking feature of cyclotetraphosphate spectra, along with the presence of the  $\nu_{\text{as}}\text{OPO}^-$  band. From X-ray diffraction data [20,21], it was shown that the crystal structure is monoclinic (space group C2/c) with a cyclic structure of the  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  anion. This has been confirmed by the FTIR measurements.

### 3.5. Scanning electron microscopy

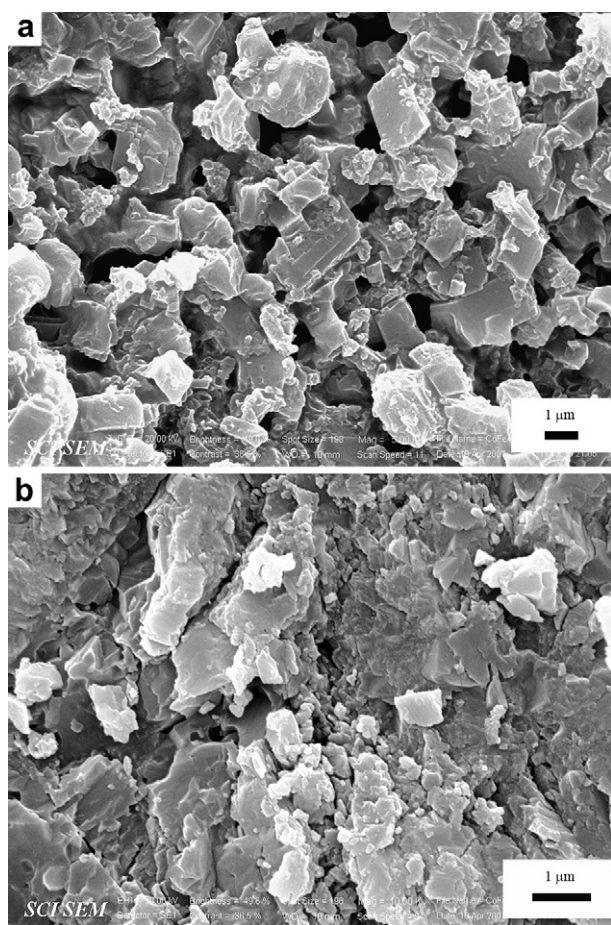
The SEM micrographs of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  are shown in Fig. 5. The particle shape and size are changed throughout the whole decomposition product. The SEM micrographs of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  show non-uniform particles and high agglomerates, which are different from those of the single metal compounds  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $\text{M} = \text{Co}$  or Fe) [18,19]. Additionally, the particle sizes and surface morphologies of both compounds in this work are significantly different from those of these binary compounds ( $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CoFeP}_{14}\text{O}_{12}$ ) reported by our previous work [22,23]. The different morphologies of the single metal compounds ( $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{M} = \text{Co}$  or Fe) and these binary compounds indicate the presence of Co ions in substitution position of Fe ions and the different conditions of preparation method, respectively.

### 3.6. VSM magnetometer

Fig. 6 shows the specific magnetization curves of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  obtained from VSM measurements measured at  $20^\circ\text{C}$ . Both samples demonstrate typical superparamagnetic behavior without any hysteresis in the field range of  $\pm 10,000\text{ Oe}$ , which is in agreement with the theory of superparamagnetic behavior, is often observed at room temperature. Specific saturated magnetization ( $M_s$ ) values of 25.61 and  $11.89\text{ emu/g}$  are observed for the  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ , respectively. The superparamagnetic behaviors of the studied compounds are different from the ferromagnetic properties of Fe ( $\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  and the diamagnetic properties of Co ( $\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ . In addition, it is seen that magnetizations of the  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  are lower than those of  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $96.28\text{ emu/g}$ ) and  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $85.01\text{ emu/g}$ ) [18]. The  $M_s$  of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  in this work is higher than that of  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $0.045\text{ emu/g}$ ) prepared from other method and reported by Boonchom et al. [23]. But the  $M_s$  of

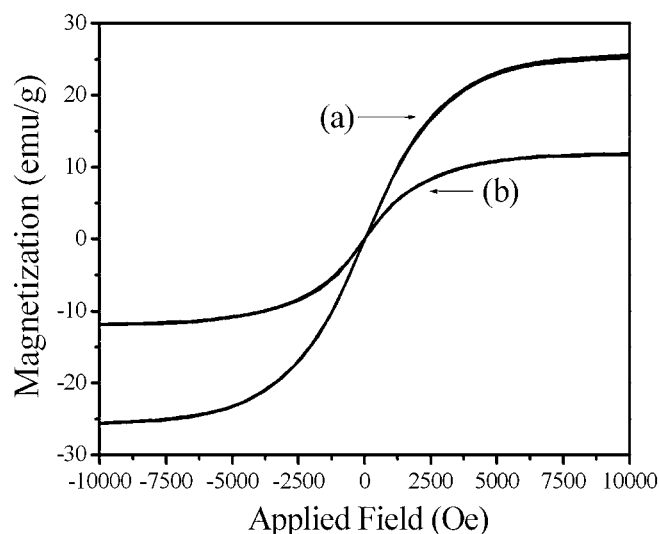


**Fig. 4.** FTIR spectra of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (a) and its decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  (b).



**Fig. 5.** SEM micrographs of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (a) and its decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  (b).

$\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  in this work is smaller than that of the calcined  $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (12.502 emu/g) precursor at 700 °C and the obtained  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  (14.243 emu/g) in our previous study [22,23]. These results confirmed that the differences in magnetic properties



**Fig. 6.** The specific magnetizations of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (a) and its decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  (b) as a function of field, measured at 293 K.

for the synthesized  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  depend on the medium and condition for preparations.

#### 4. Conclusion

$\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  was successfully synthesized by a simple solid state method using  $\text{CoCO}_3\text{--Fe--H}_3\text{PO}_4$  system at ambient temperature with short time consuming (10 min). Thermal transformation of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  was investigated by TG/DTG/DTA and DSC techniques, which indicate the dehydration and the deprotonated dihydrogenphosphate reactions and its final decomposed product is  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . The structures, morphologies and magnetic properties of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and its decomposed product  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  were investigated. The XRD patterns and FTIR spectra suggest the formation of pure monoclinic phases of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ . Both samples are superparamagnetic at room temperature, having no hysteresis loop in the range of  $-10,000 \text{ Oe} < H < +10,000 \text{ Oe}$ . This work presents the simple, cost-effective and short time consuming method for the alternative preparation of  $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  compounds, which may be used in many important applications such as catalytic, superionic conductors, piezo- and ferroelectrics, magnets, ceramic and electrochemical performance.

#### Acknowledgements

This work is financially supported by the Thailand Research Fund (TRF) and the Commission on Higher Education (CHE) and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research (KMITL Research), Ministry of Education, Thailand.

#### Appendix. Supplementary data

Supplementary data associated with this article can be found in the online version, at [doi:10.1016/j.solidstatesciences.2010.10.012](https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2010.10.012).

#### References

- [1] M. Trojan, P. Šulcová, Dyes Pigments 47 (2000) 291.
- [2] B. Boonchom, S. Maesiri, S. Youngme, C. Danvirutai, Solid State Sci. 11 (2009) 485.
- [3] B. Boonchom, C. Danvirutai, Ind. Eng. Chem. Res. 47 (2008) 2941 and references therein.
- [4] N.M. Antraptseva, L.N. Shchegrov, I.G. Ponomareva, Russ. J. Inorg. Chem. 51 (2006) 1493.
- [5] M. Trojan, P. Šulcová, P. Mošner, Dyes Pigments 44 (2000) 161.
- [6] M. Trojan, D. Brandová, J. Therm. Anal. Calorim. 30 (1985) 159.
- [7] M. Trojan, Dyes Pigments 12 (1990) 35.
- [8] M. Trojan, Dyes Pigments 13 (1990) 1.
- [9] M. Trojan, Thermochim. Acta 159 (1990) 13.
- [10] M. Trojan, Thermochim. Acta 160 (1990) 361.
- [11] M. Trojan, D. Brandová, Thermochim. Acta 160 (1990) 349.
- [12] V. Koleva, D. Mehandjiev, Mater. Res. Bull. 413 (2006) 469.
- [13] V.N. Viter, P.G. Nagornyi, Russ. J. Inorg. Chem. 52 (2007) 14.
- [14] V. Koleva, H. Effenberger, J. Solid State Chem. 180 (2007) 956.
- [15] B. Boonchom, S. Youngme, C. Danvirutai, Solid State Sci. 10 (2008) 129.
- [16] B. Boonchom, J. Danvirutai, J. Therm. Anal. Calorim. 97 (2009) 717.
- [17] B.D. Cullity, Elements of X-ray Diffraction, second ed. Addison-Wesley Publishing, 1977.
- [18] B. Boonchom, C. Danvirutai, S. Youngme, S. Maesiri, Ind. Eng. Chem. Res. 47 (2008) 7642.
- [19] B. Boonchom, C. Danvirutai, J. Chem. Eng. Data 54 (2009) 1225.
- [20] W. Gunsser, D. Fruehauf, K. Rohwer, A. Zimmermann, A. Wiedenmann, J. Solid State Chem. 82 (1989) 43.
- [21] M. Bagieu-Beucher, M. Gondrand, M. Perroux, J. Solid State Chem. 19 (1976) 353.
- [22] B. Boonchom, M. Thongkam, S. Kongtaweelert, N. Vittayakorn, J. Alloys Compd. 486 (2009) 689.
- [23] B. Boonchom, M. Thongkam, S. Kongtaweelert, N. Vittayakorn, Mater. Res. Bull. 44 (2009) 2206.

# Soft Synthesis Route and Characterization of Superparamagnetic $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and Its Decomposed Product

Banjong Boonchom<sup>\*,†,‡</sup> and Naratip Vittayakorn<sup>‡,§,||</sup>

<sup>†</sup>King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chumphon Campus, 17/1 M. 6 Pha Thiew District, Chumphon, 86160, Thailand

Electroceramic Research Laboratory, <sup>‡</sup>College of KMITL Nanotechnology, and Advanced Materials Science Research Unit,

<sup>§</sup>Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

<sup>||</sup>ThEP Center, CHE, 328 Si Ayutthaya Road, Bangkok 10400, Thailand

**ABSTRACT:** The superparamagnetic  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  was synthesized by a soft synthesis method using a  $\text{Mn}(\text{c})\text{--Fe}(\text{c})\text{--H}_3\text{PO}_4$  system in water–acetone medium at ambient temperature. The synthesized  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  decomposed through the dehydration and the phosphate condensation reactions at high temperature and yielded binary manganese iron cyclotetraphosphate  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ . The XRD and FTIR results of the synthesized  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and the decomposed  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  indicate the pure monoclinic phase with space group  $P2_1/n$  and  $C2/c$ , respectively. The thermal behaviors and superparamagnetic properties of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  in this work differed from the single compounds  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ , where  $\text{M} = \text{Mn}, \text{Fe}$  and the binary compounds  $(\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O})$  reported in previous works. The kinetic and thermodynamic functions for thermal decomposition of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  were studied and confirmed as reaction mechanisms. Vibrational frequencies of breaking bonds in two thermal transformation stages were estimated and assigned by comparison with the observed FTIR spectra.

## 1. INTRODUCTION

Binary metal(II) dihydrogenphosphate hydrates  $\text{M}_{1-x}\text{A}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{M}$  and  $\text{A} = \text{Mg}, \text{Ca}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}$ , or  $\text{Cu}$ ;  $x = 0\text{--}1$ ;  $n = 1\text{--}4$ ) have been investigated for over 30 years and have been widely applied as potential pigments, selective catalysts, phosphors, and materials for corrosion-resistant coatings, and they are biocompatible and biodegradable in tissue.<sup>1–9</sup> This phosphate hydrate group is transformed to binary metal(II) cyclotetraphosphate group  $\text{M}_{2-y}\text{A}_y\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $y = 0\text{--}2$ ) via the reactions of dehydration and deprotonation of dihydrogenphosphate groups as well as polycondensation at high temperatures.<sup>10–16</sup> Both phosphate groups are good sources for macro- and micronutrients ( $\text{P}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cu}$ ) required by plants.<sup>3–13</sup> Consequently, these phosphate materials have been become a hot research topic in materials science in recent years.

Some binary metal  $\text{M}_{1-x}\text{A}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  were prepared for the first time by Trojan et al. using corresponding metal carbonates and phosphoric acid at low temperature (313–353 K) with long time periods (2–60 h),<sup>1–16</sup> and releasing toxic gas ( $\text{CO}_2$ ). Recently,  $\text{M}_{1-x}\text{Ni}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{M} = \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Zn}$ , and  $\text{Cd}$ ) were prepared by corresponding metal carbonates and phosphoric acid at 293 K for 2–90 days.<sup>9</sup> More recently,  $\text{Mn}_{1-x}\text{A}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{A} = \text{Ca}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}$ , and  $\text{Cu}$ ) were prepared by metal sources ( $\text{Mn}$  (c; complexometric) or  $\text{MnCO}_3$  and  $\text{A}(\text{II}) = \text{CaCO}_3, \text{Fe}, \text{CoCO}_3, \text{NiCO}_3$ , or  $\text{CuCO}_3$ ) and phosphoric acid  $\text{H}_3\text{PO}_4$  at ambient temperature for 20 s. These procedures were strong exothermic reactions and evolved gases ( $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2$ ).<sup>17–21</sup> However, a limited dose of  $\text{M}_{1-x}\text{A}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  could be synthesized without toxic gases.

Synthesis of transition phosphates by a soft solid state reaction in media agents (ethanol, acetone, and water, etc.) at ambient temperature has received a great deal of attention due to their conveniences, cost-effectiveness, and that they are environmentally benign.<sup>22–24</sup> Because of its solubility in water and its ability to associate with metal ions in media, solvent has been used as a binder cum gel for shaping materials (bulk, porous, micro- or nanoparticles) and as a matrix for entrapment of ions to generate a gelled precursor, which resulted in obtaining different material or the same material with different size and morphology. The presence of media agent (solvent) reduces strong exothermic reaction and protects the evolved gases, which will be necessary for elaboration of technology to produce transition metal phosphates. The use of solvent simplifies the process and would provide another alternative process for the environmental and economical synthesis of transition phosphate with different particle size and morphology.

Herein, this work reports the fabrication of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  through a soft solid state reaction from metals of manganese and iron with phosphoric acid in water–acetone medium at ambient temperature with short time consumption (<30 min). The synthesized  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  decomposed to binary manganese iron cyclotetraphosphate  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  at 773 K. Consequently, kinetic ( $E_a$ ,  $A$ ) and thermodynamic ( $\Delta H^*$ ,  $\Delta S^*$ ,  $\Delta G^*$ ) functions of thermal transformation of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  playing an important role in

**Received:** July 4, 2010

**Accepted:** December 26, 2010

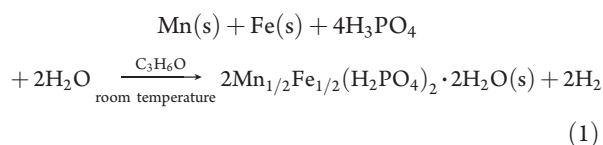
**Revised:** December 1, 2010

**Published:** January 19, 2011

theoretical study, application development, and industrial production have also been reported for the first time. The synthesized sample and its decomposed product were characterized by X-ray powder diffraction (XRD), Fourier transform infrared (FTIR), scanning electron microscope (SEM), and vibrating sample magnetometer (VSM) techniques. The  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  may be useful for fertilizers, (Mn- and Fe-micronutrients and P-macronutrients), ceramic pigments, magnetic materials, etc., in the future.

## 2. EXPERIMENTAL SECTION

**2.1. Synthesis and Characterization.** The starting reagents are Mn (c; complexometric) (99.99%, Merck), Fe (c; complexometric) (99.99%, Fluka), and phosphoric acid (86.4% w/w  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , Merck). Following this procedure, 1.0988 g of Mn(c) and 1.1186 g of Fe(c) (a mole ratio corresponding to the nominal composition of Mn:Fe ratio of 1:1) were crushed into fine mixed powders using a mortar and pestle. Subsequently, 10 mL of acetone was rapidly added to the fine mixed powders, and then 10 mL of 50%  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (86.4% w/w  $\text{H}_3\text{PO}_4$  dissolved in DI water) was added slowly to the resulting suspension with continuous stirring at ambient temperature until the cooled crystalline product was developed (30 min). The prepared solid was filtered by a suction pump, washed with acetone, and dried in air.



The water content was investigated by the TG curve in Figure 1, which reveals that its final decomposed product,  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ , seemed to occur at temperatures above 673 K. The dried white gray precipitation then was calcined in a box furnace at 773 K for 3 h in air atmosphere. The manganese and iron contents of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  were determined by dissolving in 0.0126 M hydrochloric acid using atomic absorption spectrophotometer (AAS, Perkin-Elmer, Analyst100). The phosphorus content was determined by colorimetric analysis of the molybdophosphate complex. The structure and crystallite size of the synthesized sample and its decomposed product were studied by X-ray powder diffraction using an X-ray diffractometer (Phillips PW3040, The Netherlands) with Cu K $\alpha$  radiation ( $\lambda = 0.15406$  nm). The Scherrer method was used to evaluate the crystallite size.<sup>25</sup> The morphologies of the prepared samples were examined with a scanning electron microscope (SEM) using LEO SEM VP1450 after gold coating. The room temperature FTIR spectra were recorded in the range of 4000–370  $\text{cm}^{-1}$  with eight scans on a Perkin-Elmer Spectrum GX FT-IR/FT-Raman spectrometer with the resolution of 4  $\text{cm}^{-1}$  using KBr pellets (KBr, spectroscopy grade, Merck). The magnetic properties of the  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  were examined at room temperature (293 K) using a vibrating sample magnetometer (VSM 7403, Lake Shore, U.S.).

**2.2. Kinetic and Thermodynamic Studies.** To evaluate the activation energies for the thermal decomposition of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , a TG-DTA Pyris Diamond Perkin-Elmer Instrument was used. The experiments were performed in dynamic dry air, at heating rates of 5, 10, 15, and 20  $\text{K min}^{-1}$  over the temperature range from 303 to 673 K and the  $\text{O}_2$  flow rate of 100  $\text{mL min}^{-1}$ . The sample mass of about 6.0–10.0 mg

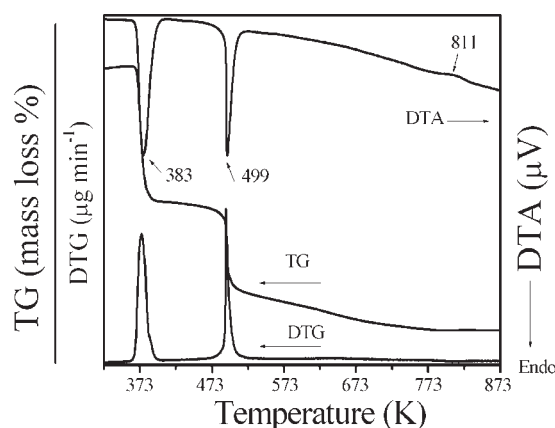


Figure 1. TG-DTG-DTA curves of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

was filled into an aluminum crucible without pressing. The thermogram of sample was recorded in an open aluminum crucible using  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  as the reference material. Decomposition of crystal hydrates is a solid-state process of the type<sup>26–32</sup>  $\text{A(solid)} \rightarrow \text{B(solid)} + \text{C(gas)}$ . The kinetics of such reactions is described by various equations taking into account the special features of their mechanisms. The activation energies for the thermal transformation steps of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  were calculated from two peaks on the DTA curves using the Kissinger equation:<sup>33</sup>

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right) = -\frac{E_a}{RT_p} + \ln\left(\frac{AR}{E_a}\right) \quad (2)$$

Here,  $\beta$  is the DTA heating rate ( $\text{K min}^{-1}$ ),  $E_a$  is the activation energy for the phase transformation ( $\text{kJ mol}^{-1}$ ),  $R$  is the gas constant ( $8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), and  $T_p$  is the phase transformation temperature peak in the DTA curve (K). The fact that the  $T_p$  values for various heating rates can be precisely evaluated from nonisothermal data (DTA, DTG, or DSC curves) conferred to the Kissinger method to evaluate the kinetic parameters a high popularity. The plots of  $\ln(\beta/T_p^2)$  versus  $1/T_p$  should give the straight lines with the best correlation coefficients of the linear regression ( $R^2$ ), which have been proved to give the values of activation energy and pre-exponential factor by the slope and the intercept for the different thermal transformation stages of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . The advantage of Kissinger equation is that the values of  $E_a$  and  $A$  can be calculated on the basis of multiple thermogravimetric curves and do not require selection of particular kinetic model (type of  $g(\alpha)$  or  $f(\alpha)$  functions).<sup>26–31</sup> In addition, the  $E_a$  and  $A$  values obtained by this method are usually regarded as more reliable than those obtained by a single thermogravimetric curve.

The thermal decomposition mechanism could be determined from the shape factor ( $n$ ) of the endothermic peak represented by the following equation:<sup>34</sup>

$$n = \frac{2.5}{\Delta T} \cdot \frac{T_p^2}{E_a/R} \quad (3)$$

where  $n$  is the Avrami constant, and  $\Delta T$  is the full width at half-maximum of the endothermic peak;  $T_p$  is the average temperature at different DTA curves; and  $E_a$  is the activation energy of the Kissinger method.

From the activated complex theory (transition state) of Eyring,<sup>35–37</sup> the following general equation may be written:

$$A = \left( \frac{e\chi k_B T_{ap}}{h} \right) \exp\left( \frac{\Delta S^*}{R} \right) \quad (4)$$

$$\Delta S^* = R \ln \left( \frac{Ah}{e\chi k_B T_{ap}} \right) \quad (5)$$

Because

$$\Delta H^* = E_a - RT_{ap} \quad (6)$$

$$\Delta G^* = \Delta H^* - T_{ap} \Delta S^* \quad (7)$$

where  $A$  and  $E_a$  are the pre-exponential factor and the activation energy, respectively, obtained from the Kissinger method;  $e = 2.7183$  is the Neper number;  $\chi$  is the transition factor, which is unity for monomolecular reactions;  $k_B$  is the Boltzmann constant;  $h$  is the Planck constant; and  $T_{ap}$  is the average phase transformation temperature peak in DTA curves (K). The changes of the enthalpy  $\Delta H^*$  and Gibbs free energy  $\Delta G^*$  for the activated complex formation from the reagent can be calculated using the well-known thermodynamic equation. In this Article, we suggest the relation between kinetic ( $E_a$  and  $A$ ) and thermodynamic ( $\Delta H^*$ ,  $\Delta S^*$ ,  $\Delta G^*$ ) parameters of the thermal transformation of  $Mn_{1/2}Fe_{1/2}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  based on the Kissinger method and attract the interest of thermodynamic and kinetic scientists.

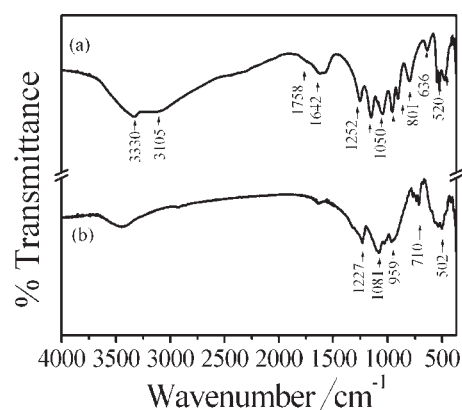
The specificity of the thermal decomposition was characterized by identification of the bonds to be selectively activated due to energy absorption at vibrational level.<sup>28</sup> These bonds were assigned by comparing the calculated wavenumbers with the observed wavenumbers in the IR spectra. These breaking bonds are assimilated with a Morse oscillator<sup>28,37,38</sup> coupled nonlinear<sup>37,38</sup> with the harmonic oscillators of the thermic field. Following a theoretical treatment developed by Vlase et al.,<sup>28</sup> the relationship between the average phase transformation temperature peak in four DTA curves ( $T_{ap}$ , K) and the wavenumber of the activated bond is given as follows:

$$\omega = \frac{k_b}{hc} T_{ap} = 0.695 T_{ap} \quad (8)$$

where  $c$  is the light velocity. Because the breaking bond has an unharmonic behavior, the specific activation is possible also due to more than one quanta, or by a higher harmonic:  $\omega_{sp} = q\omega_{calc}$ ,  $q \in N = 1, 2, 3, \dots$ , where  $\omega_{sp}$  is the assigned spectroscopic number for the bond supposed to break, which relates to the evolved gas in the thermal decomposition step. In this Article, we suggested the maximum peak temperature  $T_{ap}$  in the DTA curve for the calculated wavenumbers ( $\omega_{sp}$ ) according to eq 8. Therefore, the use of  $T_p$  (DTA) will be an alternative method for the calculated wave numbers for identification in each thermal transition step of interesting materials.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

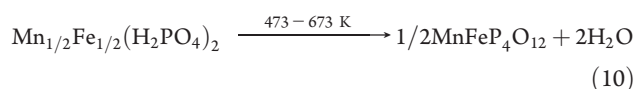
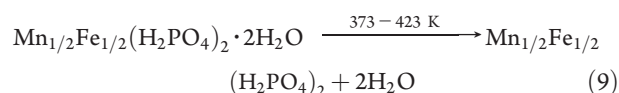
**3.1. Synthesis and Characterization.** According to the chemical analysis data, the  $P/(Mn + Fe) = 2.01$  and  $H_2O/P = 1.82$  molar ratios in the synthesized phosphate differed very little from those calculated for binary metal dihydrogenphosphate



**Figure 2.** FTIR spectra of  $Mn_{1/2}Fe_{1/2}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  (a) and  $MnFeP_4O_{12}$  (b).

with the general formula  $Mn_{1/2}Fe_{1/2}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ . Similarly, the  $P/(Mn + Fe) = 1.98$  molar ratio in the decomposed product practically corresponds to the  $MnFeP_4O_{12}$  stoichiometry, where  $Mn(II)$  and  $Fe(II)$  stand for divalent cations.

Figure 1 shows the TG-DTG-DTA curves of  $Mn_{1/2}Fe_{1/2}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ . The TG curve of  $Mn_{1/2}Fe_{1/2}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  relating to the elimination of water molecules shows two well-defined mass loss stages in the range of 303–873 K. These two steps in the TG curve observed in the ranges of 373–423 and 473–673 K appear in the respective DTG and DTA as two endothermic peaks (383 and 499 K). The corresponding observed mass losses of 11.86 (1.89 mol of  $H_2O$ ) and 11.73 (1.86 mol of  $H_2O$ ) % by mass are assigned to the dehydration of coordination water molecules (eq 9) and an intramolecular dehydration of the protonated dihydrogenphosphate groups (eq 10), respectively. The total mass loss of 23.58% (3.74 mol  $H_2O$ ) is in agreement with those reported for other binary dihydrogenphosphate dihydrate in the literature ( $1 < \text{mole of water} < 4$ ).<sup>1–9</sup> The thermal decomposition process of  $Mn_{1/2}Fe_{1/2}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  could be formally presented as:

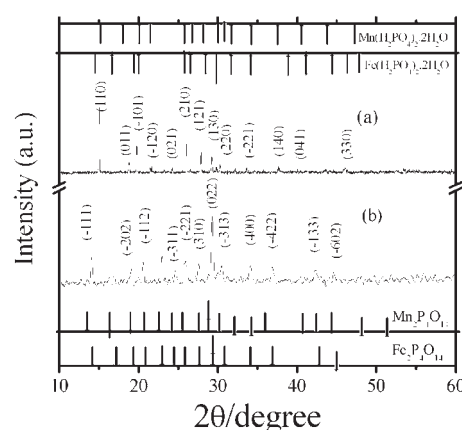


A stable intermediate compound, acid polyphosphate  $Mn_{1/2}Fe_{1/2}(H_2PO_4)_2$ , has been registered. This intermediate is similarly observed with other binary dihydrogen phosphates, as it is isostructural.<sup>1–9</sup> The plateau formed between 673 and 873 K on the TG curve indicated the formation of binary manganese iron cyclotetraphosphate,  $MnFeP_4O_{12}$ , as the final decomposed product. The thermal stability, mechanism, and phase transition temperature of the synthesized  $Mn_{1/2}Fe_{1/2}(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$  in water–acetone medium of this work are significantly different from those of  $Mn(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ ,<sup>40</sup>  $Fe(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ ,<sup>41</sup> and  $Mn_{0.5}Fe_{0.5}(H_2PO_4)_2 \cdot xH_2O$ <sup>18</sup> synthesized without media agents. The obtained results are similar to those of the  $Mn(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ <sup>22</sup> synthesized by water–acetone medium reported in our previous works. On the basis of thermal results, we can conclude that the different thermal behaviors are caused by the

different interaction and position of Mn and Fe metals in the skeleton, the medium reagents, and reaction condition for precipitation.

The FT-IR spectra of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Figure 2a) and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  (Figure 2b) are very similar to those of  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $\text{M} = \text{Mn}$  or  $\text{Fe}$ ), respectively.<sup>1,2,18,22,40,41</sup> The band position are shifted to the values between those of individual  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $\text{M} = \text{Mn}$  or  $\text{Fe}$ ), and sharp or weak bands are observed, indicating the inserting of different metal cations (Mn and Fe) in the skeleton. Consequently, vibrational bands are identified in relation to the crystal structure in terms of the fundamental vibrating units,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  and  $\text{H}_2\text{O}$  for  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  ion for  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ , and are assigned according to the literature.<sup>1,2,18,42</sup> It is known that the existence of short  $\text{OH} \cdots \text{O}$  hydrogen bonds in a variety of strongly hydrogen-bonded solids is manifested by the appearance of the characteristic ABC structure of the  $\nu(\text{OH})$  vibration. Usually, the ABC bands are very broad and consist of many ill-resolved components. The strongest band (A) is located in the  $3100\text{--}2700\text{ cm}^{-1}$  region, the B band appears at about  $2600\text{--}2400\text{ cm}^{-1}$ , and the C band is around  $1700\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ . The problem of the origin of the ABC trio is discussed in many studies on acidic salts, but an explanation of this behavior of strongly hydrogen-bonded systems is still to be found. One of the most popular interpretations of the ABC trio suggests a strong Fermi resonance between the  $\nu(\text{OH})$  stretching fundamentals and the overtones  $[2\delta(\text{OH})$  and  $2\gamma(\text{OH})]$  or combinations involving the  $\delta(\text{OH})$  and  $\gamma(\text{OH})$  vibrations.<sup>1,2,18,22</sup> The second type of characteristic vibrations is associated with the phosphate groups. The stretching P–O and bending OPO vibrations of the phosphate groups appear in the ranges of  $920\text{--}990\text{ cm}^{-1}$  ( $\nu_1$ ),  $990\text{--}1160\text{ cm}^{-1}$  ( $\nu_3$ ),  $460\text{--}375\text{ cm}^{-1}$  ( $\nu_2$ ), and  $460\text{--}650\text{ cm}^{-1}$  ( $\nu_4$ ). In addition to the internal  $\text{PO}_4$  vibrations, other vibrations involving OH motions are the characteristic of the protonated phosphate ions ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ), both out-of-plane  $\delta(\text{OH})$  and in-plane  $\gamma(\text{OH})$  bending P–O–H vibrations, which appear at  $1252$  and  $801\text{ cm}^{-1}$ , respectively. The third spectra feature in the FTIR spectrum (Figure 2a) of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  is the water molecule vibrations. The  $\nu_{\text{OH}}$  stretching modes of HOH appear at  $3105\text{ cm}^{-1}$  ( $\nu_1$  or band A) and  $3330\text{ cm}^{-1}$  ( $\nu_3$ ). The doublet bands ( $1642$  and  $1570\text{ cm}^{-1}$ ) contribute both to the band C and to the water bending band.<sup>2</sup> A weak band around  $639\text{ cm}^{-1}$  could be tentatively assigned to the rocking mode involving water librations.

The vibrational modes of  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  ion observed in the frequency range  $370\text{--}1400\text{ cm}^{-1}$  (Figure 2b) are assigned according to the literature.<sup>2,18,42</sup> The  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  anion contains the  $\text{PO}_2^{2-}$  radical and the P–O–P bridge, which are interpreted in the FTIR spectra from the viewpoint of the vibrations of these two groups. As the P–O bond strength in the P–O–P bridge is weaker than in the  $\text{PO}_2^{2-}$  radical, the stretching frequencies of the P–O–P bridge are expected to be lower than those in the  $\text{PO}_2^{2-}$  radical. The asymmetric and symmetric stretching frequencies of the  $\text{PO}_2^{2-}$  radical are generally observed in the areas of  $1350\text{--}1220$  and  $1150\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ , respectively. The P–O–P bridge has its asymmetric and symmetric stretching frequencies around  $1000\text{--}900$  and  $900\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ , respectively. The bending modes are expected in the area of  $600\text{--}400\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{PO}_2^{2-}$  radical) and  $400\text{--}370\text{ cm}^{-1}$  (P–O–P bridge). The metal–O stretching usually appears in the bending mode region as the bending modes of the P–O–P bridge and absorption



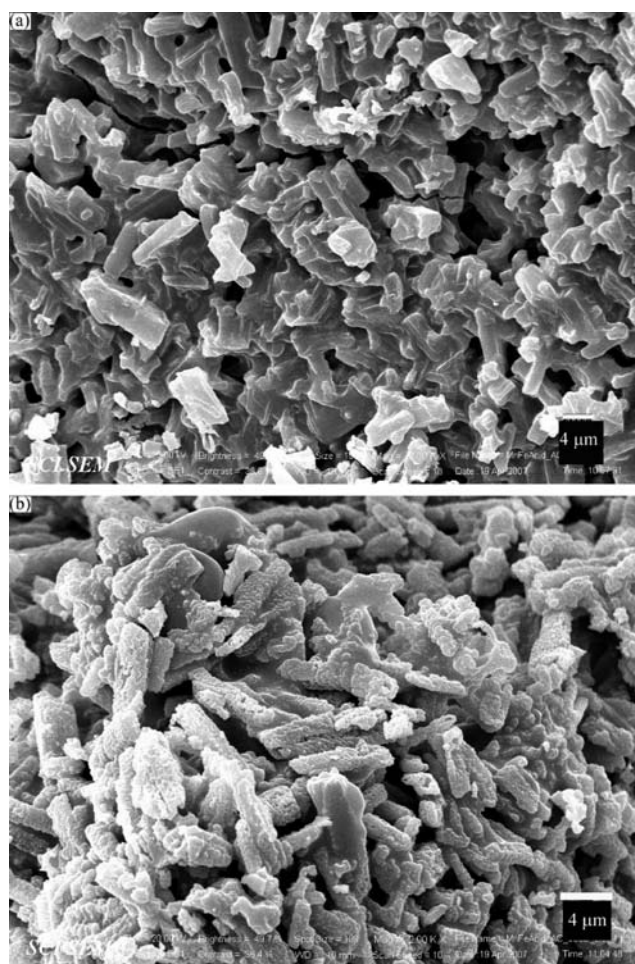
**Figure 3.** XRD patterns of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (a) and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  (b).

bands associated with these vibrations are usually very weak. The observation of a strong  $\nu_s\text{POP}$  band is known to be the most striking feature of the cyclotetraphosphate spectra, along with the presence of the  $\nu_{\text{as}}\text{OPO}^-$  band, which confirmed that the crystal structure is monoclinic (space group  $\text{C2}/c$ ) with a cyclic structure of the  $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$  anion.<sup>42</sup>

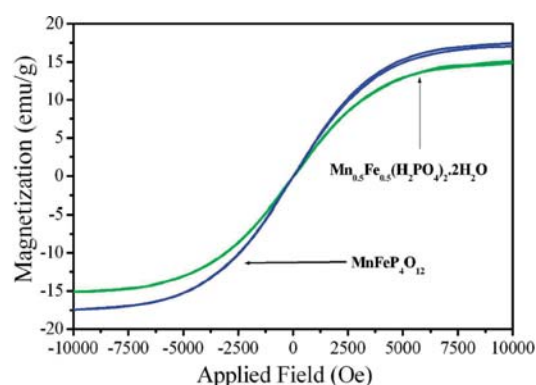
Figure 3 shows the XRD patterns of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and the decomposed product  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ , which are similar to those obtained from the individual compounds ( $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $\text{M} = \text{Mn}$  and  $\text{Fe}$ ))<sup>1,2,22,40,41</sup> and the binary compounds ( $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ ) in our previous work,<sup>18</sup> but the intensities are slightly different. The lower and higher intensities of XRD peaks indicate the differences of crystallization or amorphous phase as well as particle sizes of these materials. According to the hypothesis of isostructural, the systems of binary manganese iron solid solutions and individual metal dihydrogenphosphate (or manganese iron cyclotetraphosphate) show quite a similarity of the XRD peaks because the electronic charges of cations are equivalent and the radii of cations are close to each other. As compared to the published XRD data of the individual metal compounds ( $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (PDF# 350010),  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (PDF# 390699),  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (PDF# 380314), and  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (PDF# 760223), both studied samples can be assigned to the  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  product, which are solid solutions and not a mixture of the individual ones. Consequently, all the reflections can be distinctly indexed as a pure monoclinic phase with space group  $\text{P2}_1/n$  ( $Z = 2$ ) for  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{C2}/c$  ( $Z = 4$ ) for the decomposed  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ , which noted that these XRD patterns agreed well with those of standard data of  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $\text{M} = \text{Mn}$  or  $\text{Fe}$ ), respectively. The average crystallite sizes and lattice parameters of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and the decomposed product  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  were calculated from XRD patterns and also tabulated in Table 1. The lattice parameters of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  are larger than those of the standard data of  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (PDF# 350010) and  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (PDF# 390699). However, the lattice parameters of the decomposed  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  are found to range between those of the standard data of  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (PDF# 380314) and  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  (PDF# 760223). The average crystallite size of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  is larger than that of the calcined  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ , which resulted from two decomposition

**Table 1.** Average Crystallite Sizes and Lattice Parameters of  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , and the Calcined Product  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  Calculated from XRD Data

| compound                                                                                            | <i>a</i> (Å) | <i>b</i> (Å) | <i>c</i> (Å) | $\beta$ (deg) | average crystallite size (nm) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-------------------------------|
| PDF# 350010<br>( $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )                   | 7.32         | 10.08        | 5.37         | 94.75         |                               |
| this work<br>( $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) | 7.90(0)      | 11.03(6)     | 6.10 (3)     | 95.04 (6)     | 79 ± 11                       |
| PDF# 390699<br>( $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )                   | 7.31         | 9.94         | 5.37         | 95.24         |                               |
| PDF# 380314<br>( $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ )                                             | 11.88        | 8.59         | 10.14        | 119.21        |                               |
| this work<br>( $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ )                                                      | 12.06(8)     | 8.48(2)      | 10.12(4)     | 119.12(5)     | 62 ± 13                       |
| PDF# 760223<br>( $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ )                                             | 11.94        | 8.37         | 9.94         | 118.77        |                               |

**Figure 4.** SEM micrographs of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (a) and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  (b).

processes. The crystallite sizes of  $79 \pm 11$  nm for  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $62 \pm 13$  nm for  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  in this work are smaller than those prepared from  $\text{Mn}(\text{c})\text{--Fe}(\text{c})\text{--H}_3\text{PO}_4$  without the medium system reported by Boonchom et al. ( $81 \pm 14$  nm for  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  and  $69 \pm 21$  nm for  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ ).<sup>18</sup> However, the crystallite sizes for both binary compounds in this work are larger than those from the single

**Figure 5.** The specific magnetizations of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  as a function of field, measured at 293 K.

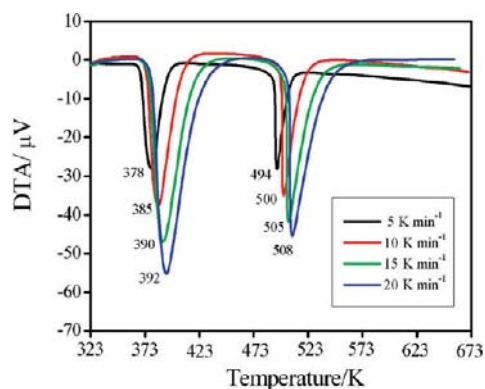
metal compounds ( $52 \pm 14$  nm for  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $28 \pm 4$  nm for  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $29 \pm 9$  nm for  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ , and  $27 \pm 6$  nm for  $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ) in our previous studies.<sup>22,40,41</sup> These results confirmed that the differences in the crystallite sizes for the synthesized  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  depend on the medium, water, and metal compositions and the condition for precipitations.

The SEM micrographs of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  are shown in Figure 4. The particle shape and size are changed throughout the whole decomposition product. The SEM micrograph of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Figure 4a) shows nonuniform particles, which appear as high agglomerates. The morphology of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  exhibits features different from those of  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , and  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  reported in our previous works.<sup>18,40,41</sup> The morphology of  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  shows a high agglomerate of nonuniform particles, which is not similar that for  $\text{M}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ( $\text{M} = \text{Mn}$  or  $\text{Fe}$ ) (Figure 4b) in the work previously reported.<sup>18,40,41</sup> The high agglomerates of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  powders are possibly caused by the process of dissolution and a rapid coprecipitation as well as the dehydration process.

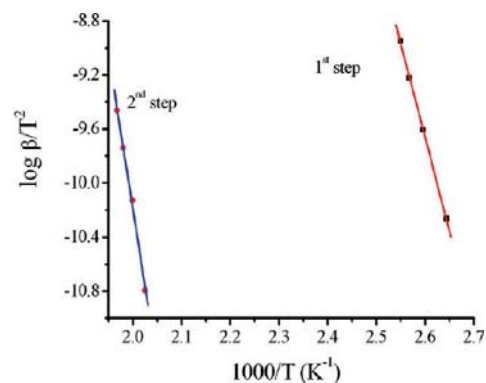
Magnetization curves ( $M\text{--}H$  loop) of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and the decomposed  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  powders obtained from room temperature VSM measurements are shown in Figure 5. Both samples demonstrate typical superparamagnetic behavior with negligible coercivity and remanence, in accordance

**Table 2.** Values of Thermodynamics, Kinetics, and Spectroscopic Data for Two Decomposition Steps of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 

| step | $\Delta G^*/\text{kJ mol}^{-1}$ | $\Delta H^*/\text{kJ mol}^{-1}$ | $\Delta S^*/\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ | $A/\text{s}^{-1}$     | $E_a/\text{kJ mol}^{-1}$ | $R^2$  | $T_{\text{ap}}/\text{K}$ | $\omega_{\text{cal}}$ | $q$ | $q\omega_{\text{cal}}/\text{cm}^{-1}$ | band assignment                      |
|------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------|--------------------------|-----------------------|-----|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 1    | 712.34                          | 1119.78                         | 105.46                                       | $3.88 \times 10^{20}$ | 115.19                   | 0.9995 | 386                      | 268                   | 2   | 537                                   | $\nu_4 (\text{PO}_4^{3-})$           |
|      |                                 |                                 |                                              |                       |                          |        |                          |                       | 3   | 805                                   | $\gamma (\text{OH})$                 |
|      |                                 |                                 |                                              |                       |                          |        |                          |                       | 4   | 1074                                  | $\nu_{\text{as}} (\text{PO}_2)$      |
|      |                                 |                                 |                                              |                       |                          |        |                          |                       | 6   | 1611                                  | $\nu_2 (\text{H}_2\text{O})$         |
|      |                                 |                                 |                                              |                       |                          |        |                          |                       | 9   | 2416                                  | B band ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) |
|      |                                 |                                 |                                              |                       |                          |        |                          |                       | 11  | 2953                                  | A band ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) |
|      |                                 |                                 |                                              |                       |                          |        |                          |                       | 12  | 3222                                  | $\nu_1 (\text{H}_2\text{O})$         |
|      |                                 |                                 |                                              |                       |                          |        |                          |                       | 13  | 2490                                  | $\nu_3 (\text{H}_2\text{O})$         |
| 2    | 931.60                          | 1883.50                         | 188.69                                       | $1.13 \times 10^{20}$ | 192.54                   | 0.9971 | 504                      | 350                   | 2   | 701                                   | $\nu (\text{P}-\text{O}_\text{h})$   |
|      |                                 |                                 |                                              |                       |                          |        |                          |                       | 3   | 1051                                  | $\nu_s (\text{PO}_2)$                |
|      |                                 |                                 |                                              |                       |                          |        |                          |                       | 5   | 1753                                  | C band ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) |
|      |                                 |                                 |                                              |                       |                          |        |                          |                       | 7   | 2454                                  | B band ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) |
|      |                                 |                                 |                                              |                       |                          |        |                          |                       | 9   | 3155                                  | A band ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) |

**Figure 6.** DTA curves of the synthesized  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  at four different heating rates (5, 10, 15, and 20  $\text{K min}^{-1}$ ).

with the theory that superparamagnetic behavior is often observed at room temperature.<sup>43–45</sup> The specific magnetization curves are typical superparamagnetic behavior without any hysteresis in the field range of  $\pm 10\,000$  Oe. From the magnetization curves, specific saturated magnetization ( $M_s$ ) values of the  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  are 15.097 and 17.459 emu/g, respectively. The superparamagnetic solid solutions formed in  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  system in this work are different from ferromagnetic for  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (96.28 emu/g) and  $\text{FeP}_4\text{O}_{12}$  (85.01 emu/g),<sup>41</sup> and  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  (25.63 emu/g) and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  (13.14 emu/g),<sup>18</sup> and diamagnetic for  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnP}_4\text{O}_{12}$ .<sup>40</sup> It found that the tendency of  $M_s$  to increase is consistent with the enhancement of crystallinity or particle sizes, and the saturation values of  $M_s$  for  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  are observed due to the obtained microstructure. These results indicate that the medium reagents for precipitation have the strong effect on the magnetic behaviors of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ . Superparamagnetic properties of the  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$  samples reported for the first time are important for specific applications because the magnetic materials may be synthesized to have the multifunctions that can be applied in magnetic resonance imaging contrast agents, data lifetime in high density information storage, ferrofluid technology,

**Figure 7.** Kissinger plots indicating the activation energies involving two transformation steps from the synthesized  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  to  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ .

lithium batteries, magnetocaloric refrigeration catalytic, and/or adsorption processes.<sup>45</sup>

**3.2. Kinetic and Thermodynamic Results.** The nonisothermal DTA method is desirable to analyze the reaction mechanism and calculate the activation energy of the solid state.<sup>26–32</sup> Several nonisothermal techniques have been proposed, which are quicker and less sensitive to previous and next transformations. The basic data of  $T$  were collected from the DTA curves of the decomposition of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  at various heating rates (5, 10, 15, and 20  $\text{K min}^{-1}$ ) (Figure 6). Figure 7 shows the Kissinger plots of two transformation steps of the prepared  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . From the slopes of the curves (Figure 7), the activation energy values in two decomposition steps of the synthesized  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  were determined as 115.19 and 192.54  $\text{kJ mol}^{-1}$ , respectively. The activation energies of two decompositions of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  are different from those of  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (105–104  $\text{kJ/mol}$  for the first step and 199–200  $\text{kJ/mol}$  for the second step) and  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (136–137  $\text{kJ/mol}$  for the first step). These activation energies are related to the vibrational frequencies and are the indication of the energy of the breaking bond of intermediate species. The reason may be relevant to the strengths of binding of water molecules in the crystal lattice. Hence, different dehydration temperatures and kinetic parameters are expected. The two mass loss steps

Table 3. Comparing Physical and Chemical Properties of the Studied Materials in the Present Work and in the Literature

| ref no.   | materials                                                                                                               | different synthesis route                                                                                                                                                                                |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| this work | $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$   | prepared by $\text{Mn}(\text{c})-\text{Fe}(\text{c})-\text{H}_3\text{PO}_4$ system in water–acetone medium at ambient temperature for 30 min, and its final decomposed product was obtained at 773 K     |
| 17        | $\text{Mn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnCoP}_4\text{O}_{12}$   | prepared by $\text{MnCO}_3-\text{CoCO}_3-\text{H}_3\text{PO}_4$ system at ambient temperature for 15 min, and its final decomposed product was obtained at 773 K                                         |
| 18        | $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$   | prepared by $\text{Mn}(\text{c})-\text{Fe}(\text{c})-\text{H}_3\text{PO}_4$ system at ambient temperature for 30 min, and its final decomposed product was obtained at 773 K                             |
| 19        | $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$   | prepared by $\text{Fe}(\text{c})-\text{CoCO}_3-\text{H}_3\text{PO}_4$ system at ambient temperature for 15 min, and its final decomposed product was obtained at 773 K                                   |
| 20        | $\text{Mn}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnCuP}_4\text{O}_{12}$ | prepared by $\text{Mn}(\text{c})-\text{CuO}-\text{H}_3\text{PO}_4$ system at ambient temperature for 15 min, and its final decomposed product was obtained at 673 K                                      |
| 21        | $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$    | prepared by $\text{Mn}(\text{c})-\text{CaCO}_3-\text{H}_3\text{PO}_4$ system at ambient temperature for 30 min, and its final decomposed product was obtained at 673 K                                   |
| 22        | $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$                 | prepared by $\text{Mn}(\text{c})-\text{H}_3\text{PO}_4$ system in water–acetone medium at ambient temperature for 15 min, and its final decomposed product was obtained at 773 K                         |
| 40        | $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$                 | prepared by $\text{Mn}(\text{c})-\text{H}_3\text{PO}_4$ and $\text{MnCO}_3-\text{H}_3\text{PO}_4$ systems at ambient temperature for 15 min, and its final decomposed product was obtained at 673 K      |
| 41        | $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$                 | prepared by $\text{Fe}(\text{c})-\text{H}_3\text{PO}_4$ system at 313 K for 30 min, and its final decomposed product was obtained at 773 K                                                               |
| ref no.   | materials                                                                                                               | different thermal behavior                                                                                                                                                                               |
| this work | $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$   | well-defined two thermal transformation steps in the range of 353–873 K                                                                                                                                  |
| 17        | $\text{Mn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnCoP}_4\text{O}_{12}$   | four thermal transformation steps in the range of 273–873 K                                                                                                                                              |
| 18        | $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$   | three thermal transformation steps in the range of 273–773 K                                                                                                                                             |
| 19        | $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$   | three thermal transformation steps in the range of 273–873 K                                                                                                                                             |
| 20        | $\text{Mn}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnCuP}_4\text{O}_{12}$ | well-defined two thermal transformation steps in the range of 353–673 K                                                                                                                                  |
| 21        | $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$    | six thermal transformation steps in the range of 353–873 K                                                                                                                                               |
| 22        | $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$                 | well-defined two thermal transformation steps in the range of 353–1073 K                                                                                                                                 |
| 40        | $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$                 | more than three thermal transformation steps in the range of 353–773 K                                                                                                                                   |
| 41        | $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$                 | three thermal transformation steps in the range of 353–773 K                                                                                                                                             |
| ref no.   | materials                                                                                                               | different morphologies                                                                                                                                                                                   |
| this work | $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$   | high agglomerates of nonuniform particles for both samples                                                                                                                                               |
| 17        | $\text{Mn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnCoP}_4\text{O}_{12}$   | rod-like shape and nonuniform particles                                                                                                                                                                  |
| 18        | $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$   | rod-like tetrahedral shape and small spherical particles with high agglomerates                                                                                                                          |
| 19        | $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$   | flower like shape for both samples                                                                                                                                                                       |
| 20        | $\text{Mn}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnCuP}_4\text{O}_{12}$ | many small and some large rod like and spherical shapes                                                                                                                                                  |
| 21        | $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$    | roughness of many small and some large boundary surfaces and small and large spherical shapes                                                                                                            |
| 22        | $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$                 | small rod like shape and retexturing and coalescence in aggregates of irregularly shape                                                                                                                  |
| 40        | $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$                 | large nonuniform polyhedral shape and retexturing and coalescence in aggregates of irregularly shape                                                                                                     |
| 41        | $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Fe}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$                 | coalescence in aggregates of irregularly shapes for both samples                                                                                                                                         |
| ref no.   | materials                                                                                                               | different magnetic properties                                                                                                                                                                            |
| this work | $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$   | superparamagnetic properties ( $M_s = 15.097$ emu/g for $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $M_s = 17.459$ emu/g for $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ ) |
| 17        | $\text{Mn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnCoP}_4\text{O}_{12}$   | not reported                                                                                                                                                                                             |
| 18        | $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$   | ferromagnetic properties ( $M_s = 25.63$ emu/g for $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ and $M_s = 13.14$ emu/g for $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ )       |
| 19        | $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$   | superparamagnetic properties ( $M_s = 0.045$ emu/g for $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $M_s = 12.502$ emu/g for $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ )  |
| 20        | $\text{Mn}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnCuP}_4\text{O}_{12}$ | not reported                                                                                                                                                                                             |
| 21        | $\text{Mn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and $\text{MnCaP}_4\text{O}_{12}$    | not reported                                                                                                                                                                                             |
| 22        | $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$                 | not reported                                                                                                                                                                                             |

Table 3. Continued

| ref no.   | materials                                                                                                                                      | different magnetic properties                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 40        | Mn(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O and Mn <sub>2</sub> P <sub>4</sub> O <sub>12</sub>                         | not reported                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 41        | Fe(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O and Fe <sub>2</sub> P <sub>4</sub> O <sub>12</sub>                         | ferromagnetic properties ( $M_s = 96.28$ emu/g for Fe(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·xH <sub>2</sub> O and $M_s = 37.78$ emu/g for Fe <sub>2</sub> P <sub>4</sub> O <sub>12</sub> )                                                                      |
| ref no.   | materials                                                                                                                                      | different nonisothermal decomposition kinetic data ( $E_a$ , $A$ , $n$ )                                                                                                                                                                                                 |
| this work | 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 MnFeP <sub>4</sub> O <sub>12</sub>   | 115.19 kJ mol <sup>-1</sup> , $3.88 \times 10^{15}$ s <sup>-1</sup> , 2.56 for first step and 192.54 kJ mol <sup>-1</sup> , $1.13 \times 10^{20}$ s <sup>-1</sup> , 2.06 for second step                                                                                 |
| 17        | Mn <sub>0.5</sub> Co <sub>0.5</sub> (H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O and MnCoP <sub>4</sub> O <sub>12</sub>   | $E_a$ values for four steps as 100.55, 88.90, 90.58, 308.58 kJ mol <sup>-1</sup> , respectively                                                                                                                                                                          |
| 18        | Mn <sub>0.5</sub> Fe <sub>0.5</sub> (H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O and MnFeP <sub>4</sub> O <sub>12</sub>   | not reported                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 19        | Co <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 CoFeP <sub>4</sub> O <sub>12</sub>   | not reported                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 20        | Mn <sub>0.5</sub> Cu <sub>0.5</sub> (H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·1.5H <sub>2</sub> O and MnCuP <sub>4</sub> O <sub>12</sub> | $E_a$ and $n$ values for two steps as 99.75, 202.84 kJ mol <sup>-1</sup> and 1.34, 1.93, respectively                                                                                                                                                                    |
| 21        | Mn <sub>0.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> (H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O and MnCaP <sub>4</sub> O <sub>12</sub>    | $E_a$ values for five steps as 147.85, 129.70, 89.41, 152.94, 236.97 kJ mol <sup>-1</sup> , respectively, $A$ values for five steps as $1.41 \times 10^{20}$ , $6.55 \times 10^{16}$ , $4.48 \times 10^9$ , $4.04 \times 10^{15}$ , $1.01 \times 10^{20}$ , respectively |
| 22        | Mn(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O and Mn <sub>2</sub> P <sub>4</sub> O <sub>12</sub>                         | $E_a$ values for two steps as 86.45, 187.92 kJ mol <sup>-1</sup> , respectively                                                                                                                                                                                          |
| 40        | Mn(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O and Mn <sub>2</sub> P <sub>4</sub> O <sub>12</sub>                         | not reported                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 41        | Fe(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O and Fe <sub>2</sub> P <sub>4</sub> O <sub>12</sub>                         | $E_a$ value as 136.85 kJ mol <sup>-1</sup>                                                                                                                                                                                                                               |
| ref no.   | materials                                                                                                                                      | different thermodynamic data ( $\Delta H^*$ , kJ mol <sup>-1</sup> ; $\Delta G^*$ , kJ mol <sup>-1</sup> ; and $\Delta S^*$ , J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )                                                                                                      |
| this work | 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 MnFeP <sub>4</sub> O <sub>12</sub>   | 1119.78, 712, 105.46 for first step and 1883.50, 931.60, 188.69 for second step                                                                                                                                                                                          |
| 17        | Mn <sub>0.5</sub> Co <sub>0.5</sub> (H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O and MnCoP <sub>4</sub> O <sub>12</sub>   | not reported                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 18        | Mn <sub>0.5</sub> Fe <sub>0.5</sub> (H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O and MnFeP <sub>4</sub> O <sub>12</sub>   | not reported                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 19        | Co <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 CoFeP <sub>4</sub> O <sub>12</sub>   | not reported                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 20        | Mn <sub>0.5</sub> Cu <sub>0.5</sub> (H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·1.5H <sub>2</sub> O and MnCuP <sub>4</sub> O <sub>12</sub> | not reported                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 21        | Mn <sub>0.5</sub> Ca <sub>0.5</sub> (H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O and MnCaP <sub>4</sub> O <sub>12</sub>    | 144.65, 94.38, 130.34 for first step, 126.35, 99.64, 66.18 for second step, 85.50, 119.53–72.26 for third step, 148.71, 127.80, 41.10 for fourth step, and 231.85, 155.59, 123.73 for sixth                                                                              |
| 22        | Mn(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O and Mn <sub>2</sub> P <sub>4</sub> O <sub>12</sub>                         | not reported                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 40        | Mn(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O and Mn <sub>2</sub> P <sub>4</sub> O <sub>12</sub>                         | not reported                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 41        | Fe(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O and Fe <sub>2</sub> P <sub>4</sub> O <sub>12</sub>                         | not reported                                                                                                                                                                                                                                                             |

correspond to the loss of water of coordinated water in the first steps, subsequently to a continuous intermolecular polycondensation and the elimination of water of constituent in anion in the second step.<sup>26–28</sup> The second step exhibits higher activation energy in comparison with the first step, and this is understandable because this step relates to true P–OH bond breaking, in connection with the polycondensation reaction.<sup>1,2,18,40,41</sup> These activation energies are consistent with the former hypothesis that the intermediate nucleates and crystallizes as metastable phase with adequate growth kinetics before the stable phase MnFeP<sub>4</sub>O<sub>12</sub>. This result is consistent with TG-DTG-DTA data as shown in eqs 9 and 10.

The pre-exponential factor ( $A$ ) can be estimated from the intercept of the plots of eq 2 (Table 2). All calculations were performed using a program compiled by ourselves. The pre-exponential factor ( $A$ ) values in the Arrhenius equation for solid-phase reactions are expected to be in a wide range (6 or 7 orders of magnitude), even after the effect of surface area is taken into account.<sup>26–29</sup> The low factors will often indicate a surface reaction, but if the reactions are not dependent on surface area, the low factor may indicate a “tight” complex. The high factors will usually indicate a “loose” complex. Even higher factors (after correction for surface area) can be obtained for complexes having free translation on the surface. Because in many cases the concentrations in solids are not controllable, it would have been convenient if the magnitude of the pre-exponential factor could provide the information for the reaction molecularity. With such bulk decomposition, any molecule is as likely to react with any

others, and no preference is shown toward corners, edges, surface, defects, or sites of previous decomposition. On the basis of these reasons, the thermal decomposition reaction of 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 may be interpreted as “loose complexes” for the first and second steps, which correspond to the proposed mechanism in eqs 9 and 10.

The value of the Avrami exponent provides information regarding the morphology of the growing crystal.<sup>17,20–22,32,34</sup> The value of  $n$  reflects the mechanism dominating crystallization. Here, smaller  $n$  values indicate that the crystallization is dominated by a surface crystallization or that the crystallization dimension is low. On the other hand, larger  $n$  values are expected only in case of increasing nucleation rates. For 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, the  $n$  values are 2.56 for the first and 2.06 for the second decomposition steps, which are random nucleation and growth of nuclei for both decomposition steps.

As can be seen from Table 2, the entropy of activation ( $\Delta S^*$ ) values for all steps are positive values. It means that the corresponding activated complexes had lower degrees of arrangement than the initial state. Because the decomposition of 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 proceeds as two consecutive reactions, the formation of the second activated complex passed in situ. In terms of the activated complex theory (transition theory),<sup>35–37</sup> a positive value of  $\Delta S^*$  indicates a malleable activated complex that leads to a large number of degrees of freedom of rotation and vibration. A result may be interpreted as a “fast” stage. On the other hand, a negative value of  $\Delta S^*$  indicates a highly ordered

activated complex, and the degrees of freedom of rotation as well as of vibration are less than they are in the nonactivated complex. These results may indicate a "slow" stage.<sup>26–30</sup> With respect to these results, the first and second decomposed steps of  $\text{Mn}_{1/2}\text{-Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  may be interpreted as "fast" stages. The positive values of the enthalpy  $\Delta H^*$  are in good agreement with two endothermic effects in the DTA results. The positive values of  $\Delta H^*$  and  $\Delta G^*$  for two stages show that they are connected with the introduction of heat and are nonspontaneous processes. The results of the kinetic and thermodynamic parameters of the second steps are higher than those of the first step, which correspond to that the second step needs a higher energy pathway and a lower rate reaction than the first step.

To corroborate the calculated data with the spectroscopic ones, we drew up the FT-IR spectra of the studied compound (Figure 2). Table 2 shows the comparison of the  $\omega_{\text{calc}}$  values with the  $\omega_{\text{sp}}$  values determined from this compound, together with the assignments of the corresponding vibrational modes in the literature.<sup>1,2</sup> These wavenumbers are close to the vibrational modes of water of crystallization and dihydrogen phosphate group ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) reported in the literature.<sup>20–22</sup> The results confirm that the loss of the water of crystallization and deprotonated dihydrogen phosphate group in the first step is followed by a continuous intermolecular polycondensation for the second step.<sup>20–22</sup> The studied compound exhibited a very good agreement between the calculated wavenumbers from average  $T_p$  (DTA) and the observed wavenumbers from IR spectra for the bonds that were suggested to be broken.

#### 4. CONCLUSION

The superparamagnetic  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  was prepared by a soft solution solid-state reaction from the  $\text{Mn(c)}\text{--Fe(c)}\text{--H}_3\text{PO}_4$  system in water–acetone medium at ambient temperature with short time consumption (30 min).  $\text{Mn}_{1/2}\text{-Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  decomposes in two steps, which correspond to the loss of water of crystallization in the first step, subsequently to a continuous intermolecular polycondensation and elimination of water of constituent in anion (the second step). Thermal kinetic study results indicate the activation energies, which relate to the vibrational frequencies of the breaking bond of thermal transformation of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}\text{-(H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . The thermal behaviors, morphologies, particle sizes, superparamagnetic properties, kinetic and thermodynamic data of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , and its thermal transformation product ( $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ ) in this work are different from those of single metal and binary metal compounds in our previous reports (Table 3). The study results obtained are necessary for elaboration of technology to produce the dihydrogenphosphate and cyclotetraphosphate of transition metals, which may be useful for potential applications as catalytic, ceramic, and biomedical materials, etc.

#### AUTHOR INFORMATION

##### Corresponding Author

\*Tel.: +66-7750-6422 ext 4565. Fax: +66-7750-6411. E-mail: kbbanjon@gmail.com, kbbanjon@kmitl.ac.th.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work is financially supported by the Thailand Research Fund (TRF) and the Commission on Higher Education (CHE): Research Grant for New Scholar and King Mongkut's Institute of

Technology Ladkrabang Research (KMITL Research), Ministry of Education, Thailand.

#### REFERENCES

- (1) Koleva, V.; Mehandjiev, D. Characterization of  $\text{M}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{M} = \text{Mn}, \text{Co}, \text{Ni}$ ) and their in situ thermal decomposition by magnetic measurements. *Mater. Res. Bull.* **2006**, *41*, 469.
- (2) Koleva, V.; Effenberger, H. Crystal chemistry of  $\text{M}[\text{PO}_2(\text{OH})_2]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  compounds ( $\text{M} = \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}, \text{Cd}$ ): Structural investigation of the Ni, Zn and Cd salts. *J. Solid State Chem.* **2007**, *180*, 966 and references therein.
- (3) Antraptseva, N. M.; Shchegrov, L. N.; Ponomareva, I. G. Thermolysis features of manganese(II) and zinc dihydrogenphosphate solid solution. *Russ. J. Inorg. Chem.* **2006**, *51*, 1493.
- (4) Trojan, M.; Brandová, D.; Paulik, F.; Arnold, M. Mechanism of the thermal dehydration of  $\text{Co}_{1/2}\text{Ca}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . *J. Therm. Anal. Calorim.* **1990**, *36*, 929.
- (5) Trojan, M.; Brandová, D. Mechanism of dehydration of  $\text{Zn}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . *Thermochim. Acta* **1990**, *159*, 1.
- (6) Trojan, M.; Brandová, D. Study of thermal dehydration of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . *Thermochim. Acta* **1990**, *161*, 11.
- (7) Brandová, D.; Trojan, M.; Arnold, M.; Paulik, F. Thermal study of decomposition of  $\text{Cu}_{1/2}\text{Mg}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ . *J. Therm. Anal. Calorim.* **1990**, *36*, 677.
- (8) Brandová, D.; Trojan, M.; Paulik, F.; Paulik, J.; Arnold, M. Study of the thermal dehydration of  $\text{Mn}_{1/2}\text{Ca}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . *J. Therm. Anal. Calorim.* **1990**, *36*, 881.
- (9) Viter, V. N.; Nagornyi, P. G. Synthesis of continuous substitutional solid solutions  $\text{M}_{1-x}\text{Ni}_x(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  with  $\text{M} = \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Co}$ , or  $\text{Zn}$ . *Russ. J. Inorg. Chem.* **2007**, *52*, 14.
- (10) Trojan, M. Double tetrametaphosphates  $\text{Mn}_{2-x}\text{Ca}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  as special pigments. *Dyes Pigm.* **1990**, *12*, 35.
- (11) Trojan, M. Binary cyclotetraphosphates  $\text{Zn}_{2-x}\text{Ca}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  as new special pigments. *Dyes Pigm.* **1990**, *13*, 1.
- (12) Trojan, M.; Šulcová, P.; Mošner, P. The synthesis of binary zinc(II)-nickel(II)cyclo-tetraphosphates as new special pigments. *Dyes Pigm.* **2000**, *44*, 161.
- (13) Trojan, M.; Brandová, D. A study of the thermal preparation of  $\text{c-Cd}_{4/3}\text{Ca}_{2/3}\text{P}_4\text{O}_{12}$ . *Thermochim. Acta* **1990**, *160*, 349.
- (14) Trojan, M.; Šulcová, P. Binary Cu(II)-Mn(II) cyclo-tetraphosphates. *Dyes Pigm.* **2000**, *47*, 291.
- (15) Trojan, M.; Šulcová, P. The binary Cd(II)-Zn(II) cyclo-tetraphosphates. *Thermochim. Acta* **2000**, *343*, 135.
- (16) Trojan, M.; Šulcová, P.; Skorová, L. Thermal analysis of Ba(II)-Sr(II) cyclo-tetraphosphates(V). *J. Therm. Anal. Calorim.* **2002**, *68*, 75.
- (17) Boonchom, B.; Youngme, S.; Danvirutai, C. A rapid co-precipitation and non-isothermal decomposition kinetics of new binary  $\text{Mn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . *Solid State Sci.* **2008**, *10*, 129.
- (18) 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 Sci.* **2009**, *11*, 485.
- (19) Boonchom, B.; Thongkam, M.; Kongtaweelert, S.; Vittayakorn, N. 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*, 2206.
- (20) Boonchom, B.; Danvirutai, C. Rapid coprecipitation and non-isothermal decomposition kinetics of new binary  $\text{Mn}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$ . *Ind. Eng. Chem. Res.* **2008**, *47*, 2941.
- (21) 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*, 717.
- (22) Boonchom, B.; Danvirutai, C.; Maensiri, S. Soft solution synthesis, non-isothermal decomposition kinetics and characterization of manganese dihydrogen phosphate dihydrate  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and its thermal transformation products. *Mater. Chem. Phys.* **2008**, *109*, 404.

- (23) 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, 199.
- (24) 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, 3571.
- (25) Cullity, B. D. *Elements of X-ray Diffraction*, 2nd ed.; Addison-Wesley Publishing: Reading, MA, 1977.
- (26) Vlaev, L.; Nedelchev, N.; Gyurova, K.; Zagorcheva, M. A comparative study of non-isothermal kinetics of decomposition of calcium oxalate monohydrate. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* **2008**, 81, 253.
- (27) Vlase, T.; Vlase, G.; Birta, N.; Doca, N. Comparative results of kinetic data obtained with different methods for complex decomposition steps. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2007**, 88, 631.
- (28) Vlase, G.; Vlase, T.; Tudose, R.; Costișor, O.; Doca, N. Kinetic of decomposition of some complexes under non-isothermal conditions. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2007**, 88, 637.
- (29) Vlaev, L. T.; Georgieva, V. G.; Genieva, S. D. Products and kinetics of non-isothermal decomposition of vanadium(IV) oxide compounds. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2007**, 88, 805.
- (30) Vlaev, L. T.; Georgieva, V. G.; Gospodinov, G. G. Kinetics of isothermal decomposition of  $\text{ZnSeO}_3$  and  $\text{CdSeO}_3$ . *J. Therm. Anal. Calorim.* **2005**, 79, 163.
- (31) Vlaev, L. T.; Tavlieva, M. P. Structural and thermal studies on the solid products in the system  $\text{MnSeO}_3\text{-SeO}_2\text{-H}_2\text{O}$ . *J. Therm. Anal. Calorim.* **2007**, 90, 385.
- (32) Chunxiu, G.; Yufang, S.; Donghua, C. Comparative method to evaluate reliable kinetic triplets of thermal decomposition reactions. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2004**, 76, 203.
- (33) Kissinger, H. E. Reaction kinetics in differential thermal analysis. *J. Anal. Chem.* **1957**, 29, 1702.
- (34) Okada, K.; Kaneda, J.-I.; Kameshima, Y.; Yasumori, A.; Takei, T. Crystallization kinetics of mullite from polymeric  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  xerogels. *Mater. Lett.* **2003**, 57, 3155 and references therein.
- (35) Head, C.; Smith, A. C. K. *Applied Physical Chemistry*; McMillan Press: London, 1982; p 473.
- (36) Šesták, J. J. *Thermodynamical Properties of Solids*; Academia: Prague, 1984.
- (37) Young, D. *Decomposition of Solids*; Pergamon Press: Oxford, 1966.
- (38) Herzberg, G. *Molekülspektren und Molekülstruktur. I. Zweiatomige Moleküle*; Steinkopff: Dresden, 1939.
- (39) Colthup, N. B.; Daly, L. H.; Wiberley, S. E. *Introduction to Infrared and Raman Spectroscopy*; Academic Press: New York, 1964.
- (40) Danvirutai, C.; Boonchom, B.; Youngme, S. Nanocrystalline manganese dihydrogen phosphate dihydrate  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and its decomposition product ( $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$ ) obtained by simple precipitation route. *J. Alloys Compd.* **2008**, 457, 75.
- (41) Boonchom, B.; Danvirutai, C.; Youngme, S.; Maensiri, S. Simple synthesis, magnetic properties, and nonisothermal 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.
- (42) Ramakrishnan, V.; Aruldas, G.; Bigotto, A. Vibrational spectra of Cu(II) and Co(II) tetrametaphosphates. *Infrared Phys.* **1985**, 25, 665.
- (43) Hui-li, M.; Xian-rong, Q.; Maitani, Y.; Nagai, T. Preparation and characterization of superparamagnetic iron oxide nanoparticles stabilized by alginate. *Int. J. Pharm.* **2007**, 333, 177.
- (44) Gupta, A. K.; Gupta, M. Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications. *Biomaterials* **2005**, 26, 3995.
- (45) Chen, Y. H.; Franzreb, M.; Lin, R. H.; Chen, L. L.; Chang, C. Y.; Yu, Y. H.; Chiang, P. C. Platinum-doped  $\text{TiO}_2$ /magnetic poly(methyl methacrylate) microspheres as a novel photocatalyst. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2009**, 48, 7616–7623.



## การศึกษาจลนพลศาสตร์การสลายตัวทางความร้อน แบบนอนไอโซเทอร์มอล

## Non-isothermal Decomposition Kinetic Study

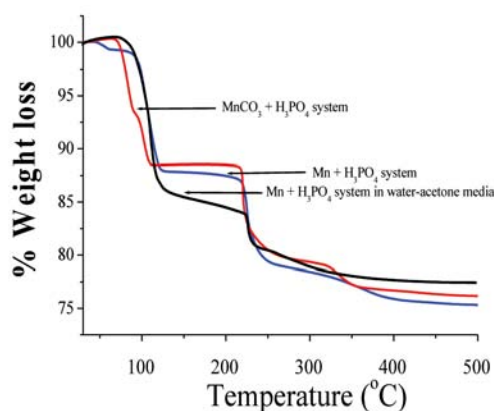
บรรจง บุญชม<sup>1</sup>

### บทนำ

การศึกษาจลนพลศาสตร์และกลไกของการสลายตัวทางความร้อนของสารเคมีในกลุ่มต่าง ๆ เช่น โลหะของมาโลเนต ออกซาเลต ฟอรัมต อะซิเตรท ซัลเฟต คาร์บอเนต ไนเตรท ซีรีเนต ฟอสเฟต และอื่น ๆ มีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง (Vlaev et al., 2008; Janković, 2008; Boonchom and Danvirutai, 2008; Boonchom, 2008) เนื่องจากสารที่กล่าวมาทั้งหมด เป็นสารตั้งต้นสำหรับการนำไปสังเคราะห์สารชนิดอื่นที่มีความสำคัญในด้านอุตสาหกรรม เช่น การนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์โลหะออกไซด์ โดยโลหะออกไซด์นี้มีประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมหลายด้าน อาทิเช่น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เซลล์ไฟฟ้า เซลล์ทางแสง สารเซรามิก สีเคลือบผิว ตัวนำและตัวเก็บประจุไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอื่น ๆ โดยก่อนนำไปใช้ต้องผ่านการเตรียมที่สภาวะอุณหภูมิสูง เพื่อให้เกิดการสลายตัวทางร้อน จนสุดท้ายได้สารในกลุ่มโลหะออกไซด์ ซึ่งสารโลหะตั้งต้นแตกต่างกันจะส่งผลให้สภาวะอุณหภูมิของการเตรียมแตกต่างกันไปด้วย ตัวอย่างเช่น สารโลหะออกซาเลต ส่วนใหญ่จะสลายตัวไปเป็นโลหะออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส สารโลหะไนเตรทจะสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส ในขณะที่โลหะคาร์บอเนตจะสลายตัวที่ต่ำกว่า 1,000 องศาเซลเซียส อีกทั้งกลไกการสลายตัวของสารแต่ละชนิดก็มีความซับซ้อนแตกต่างกัน และถึงแม้จะเป็นสารชนิดเดียวกันก็ยังแสดงพฤติกรรมทางความร้อนต่างกัน อันได้แก่ กลไกการสลายตัวและความเสถียรที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยสิ่งเหล่านี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของสารชนิดนั้น ๆ คือ ขนาดอนุภาค ปริมาณของสารและสภาวะการเตรียม โดยถ้าเตรียมในสภาวะอัตราการเพิ่มอุณหภูมิและสภาพบรรยากาศที่ใช้ในเตรียมต่างกันก็ส่งผลต่อกลไกการสลายตัวที่ต่างกันออกไป และถ้าใช้สารตั้งต้นในการเตรียมแตกต่าง สมบัติทางกายภาพ เช่น อนุภาคเล็กหรือใหญ่ ก็ส่งผลต่างกันก็ส่งผลต่อกลไกการสลายตัวทางความร้อนเช่นเดียวกัน ยกตัวอย่าง การสลายตัวทางความร้อนของ สาร  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ที่ผ่านการเตรียมโดยใช้สารตั้งต้นและตัวกลางที่ต่างกัน คือ ใช้  $\text{MnCO}_3$ ,  $\text{Mn(c)}$  และ  $\text{Mn(c)}$  ในระบบผสมน้ำและอะซิโตน (รูปที่ 1) (Boonchom, 2008)

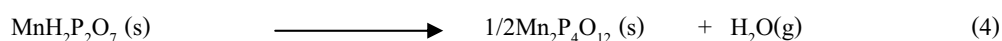
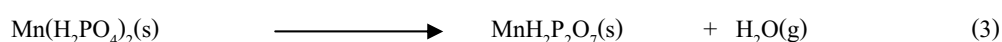
<sup>1</sup> สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร 17/1 ม. 6 ต.ขุนโค อ.ปะทิว จ.ชุมพร 86160

E-mail: kbbanjon@kmitl.ac.th, kbbanjon@gmail.com



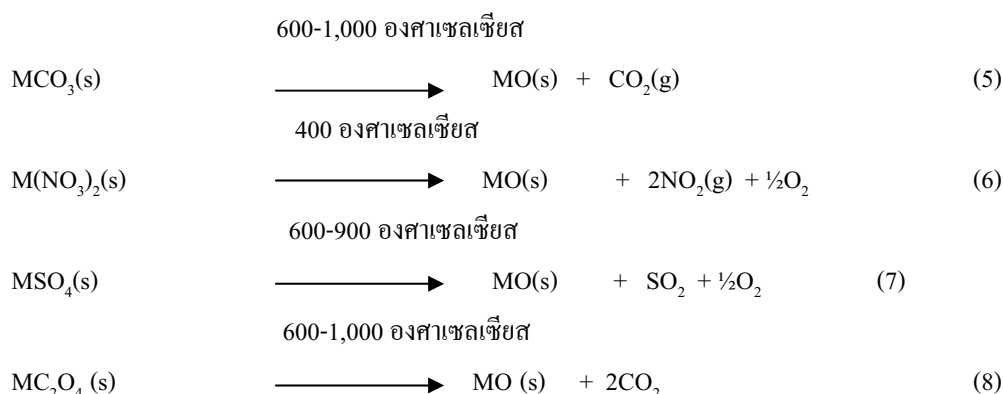
รูปที่ 1 เทอร์โมแกรมของ  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ที่ถูกเตรียมได้ในสภาวะการเตรียมที่แตกต่างกัน

ปฏิกิริยาแสดงกลไกการสลายตัวของสารตัวนี้ คือ



จากเทอร์โมแกรมรูปที่ 1 สรุปได้ว่า สาร  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{s})$  ที่เตรียมจากระบบ  $\text{MnCO}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4$  จะมีกลไกการสลายตัวสอดคล้องกับกลไกทั้ง 4 กลไกข้างบน แต่หากเตรียมจากระบบ  $\text{Mn} + \text{H}_3\text{PO}_4$  และ  $\text{Mn} + \text{H}_3\text{PO}_4$  ในตัวกลางน้ำและอะซิโตน จะมีกลไกการสลาย 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ (1) และ (2) จะเกิดร่วมกัน และในการเตรียมที่ใช้ตัวกลางจะใช้อุณหภูมิเผาต่ำกว่าเพื่อให้ได้สารผลิตภัณฑ์สุดท้าย คือ  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  โดยเหตุผลสนับสนุนก็คือการเตรียมด้วยสารตั้งต้นและสภาวะที่ต่างกันทำให้ได้สารที่มีขนาดอนุภาคต่างกันนั่นเอง (Boonchom, 2008)

หากการเตรียมด้วยสารตั้งต้นต่างกันก็จะส่งผลให้ได้สารผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีสมบัติทางภาพบางอย่างแตกต่างกัน เช่น ขนาดอนุภาค สมบัติทางแสง การนำไฟฟ้า สมบัติแม่เหล็ก เป็นต้น ดังตัวอย่างงานวิจัยของ สันติ แม้นศิริ (Maensiri et al., 2007) ด้วยหลักการนี้นำไปสู่การเลือกใช้สารตั้งต้นที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้เตรียมสารตามที่ต้องการ โดยมุ่งไปในด้านสะดวก ประหยัดและคุ้มค่า โดยจะเป็นข้อมูลที่จะนำไปเข้าสู่กระบวนการผลิตที่ไม่ก่อให้เกิดสภาวะที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม อันจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม เพราะการสลายตัวทางความร้อนของสารบางกลุ่มก่อให้เกิดแก๊สพิษอีกทั้งยังต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเตรียมที่สภาวะต่างกัน ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการลงทุนการผลิตไปด้วย เช่น ตัวอย่างปฏิกิริยาการสลายตัวของสารตัวไปนี้



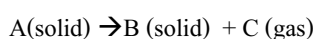
โดยที่ M = Ca, Ba, Mg, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, และ อื่น (Koga and Yamane, 2008)

โดยกลไกของการสลายตัวที่แสดงให้เห็นเป็นกลไกรวม แต่ในความเป็นจริงแล้ว สารตั้งต้นแต่ละชนิด จะมีกลไกย่อยของการสลายตัวที่มีความเฉพาะเจาะจง ตามแต่ละชนิดของสารตั้งต้นนั้น ๆ ดังนั้น เพื่อที่จะศึกษาและเข้าใจถึงพื้นฐานการเตรียมของสารที่กล่าวมาข้างต้น หรือเพื่อเข้าใจธรรมชาติของสารตั้งต้นที่นำมาใช้นั้น สิ่งหนึ่งที่เราจะต้องศึกษาก็คือ จลนพลศาสตร์ และกลไกการสลายทางความร้อนของสารตั้งต้นดังกล่าว โดยเป็นการศึกษาปฏิกิริยาต่าง ๆ ของสารในสถานะของแข็งที่มีความยากและซับซ้อน และจะเป็นประโยชน์สำคัญต่อการควบคุมปัจจัยของสารสถานะของแข็ง ได้แก่ ขนาดผลึก การเกิดและการเติบโตของนิวเคลียส การแพร่ผ่านของแก๊สในสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ เพื่อก่อให้เกิดรูพรุนและขนาดรูพรุน ความหนาของชั้นสาร การกระจายตัวของอนุภาค และการเป็นหนึ่งเดียวของวัสดุ ที่สำคัญอีกประการ คือการเข้าใจพฤติกรรมทางความร้อนของสารตั้งต้นที่จะเป็นประโยชน์ต่อการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมสารตัวอื่นที่มีประโยชน์มากกว่าได้อย่างถูกต้อง เมื่อศึกษาแล้วนั้นข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปใช้ โดยจะก่อให้เกิดความปลอดภัย การประหยัดและความคุ้มค่า ในขั้นตอนการผลิตที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้โดยตรงกับการเตรียมสารทางด้านวัสดุศาสตร์ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานด้านต่าง ๆ

#### หลักการ

จลนพลศาสตร์และกลไกของการสลายตัวทางความร้อนของสารเคมีกลุ่มต่าง ๆ นั้นได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลายในอดีตจนถึงปัจจุบัน (Vlaev et al., 2008; Janković, 2008; Boonchom and Danvirutai, 2008; Boonchom, 2008; Maensiri et al., 2007; Koga and Yamane, 2008; Li et al., 2004). โดยเทคนิคที่ใช้ศึกษา คือ หลักการวิเคราะห์เชิงความร้อน (thermal analysis; TA method) โดยเทคนิคที่สำคัญ เช่น เทอร์โมกราวิเมตรี (thermogravimetry; TG) การวิเคราะห์ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง เทอร์มอล (Differential scanning thermal analysis; DTA) และดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริเมตรี (differential scanning calorimetry; DSC) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ให้ข้อมูลการทดลองที่มีค่าทางวิทยาศาสตร์เพื่อนำไปใช้คำนวณเพื่อหาตัวแปร ทางจลนพลศาสตร์ อันเรียกว่า ตัวแปรทั้งสามเชิงจลนพลศาสตร์ (kinetic triplet parameters) อันได้แก่ พลังงานการกระตุ้นของการสลายตัว (activation

energy;  $E_a$ ) อันดับของการสลายตัว (order of reaction;  $n$ ) ฟังก์ชันการสลายตัวที่อธิบายกลไกหรือชนิดการสลายตัวด้วยตัวแปรทางคณิตศาสตร์ (kinetic function;  $g(\alpha)$  or  $f(\alpha)$ ) โดยปัจจุบันมีไม่ต่ำกว่า 35 ฟังก์ชันแล้ว (Vlaev et al. 2005, 2008) ในขณะที่สมการทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวทางความร้อนนั้น เรียกว่า จลนพลศาสตร์แบบนอนไอโซเทอร์มอล (non-isothermal kinetics) ซึ่งหมายถึง การศึกษาการจลนพลศาสตร์การสลายตัวทางความร้อนของสารในสถานะของแข็งที่เกิดขึ้นในสภาวะที่อุณหภูมิไม่คงที่ (Koga and Yamane, 2008) สมการที่ใช้ศึกษาจลนพลศาสตร์นั้น ล้วนเริ่มต้นจากสมการอาร์เรเนียสทั้งสิ้น จากปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของ



จะได้สมการ

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \quad (9)$$

เมื่อ  $\alpha = (m_i - m_f)/(m_i - m_f)$ , เมื่อ  $m_i$ ,  $m_f$  และ  $m_f$  เป็นน้ำหนักของสารที่สภาวะเริ่มต้น สภาวะเวลาใด ๆ และที่สภาวะสุดท้ายในสภาวะอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่าง ๆ (heating rates ; $\beta$ )

จากสมการอาร์เรเนียส (Koga and Yamane, 2008)

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (10)$$

เมื่อ  $A$  คือ สัมประสิทธิ์การชน (pre-exponential factor/ $s^{-1}$ )  $E$  คือ พลังงานกระตุ้น (activation energy/ $kJ\ mol^{-1}$ )  $T$  คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ (K) และ  $R$  คือค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ ( $8.314\ kJ\ mol^{-1}K^{-1}$ ) แทนสมการที่ (10) ใน สมการ (9) จะได้:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (11)$$

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มด้วยอัตราคงที่,

$$\frac{d\alpha}{dT} = \beta = const, \quad (12)$$

ดังนั้น:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (13)$$

ฟังก์ชัน  $f(\alpha)$  เป็นฟังก์ชันการสลายตัวที่อธิบายกลไกหรือชนิดการสลายตัวของสารสถานะของแข็งด้วยตัวแปรทางคณิตศาสตร์ อธิบายชนิดของปฏิกิริยาเคมี (Chemical reactions) การเติบโตของนิวไคลด์และการเกิดนิวคลีเอชันแบบสุ่ม (random nucleation and nuclei growth) ปฏิกิริยาการขยายขอบเขตวัฏภาคหรือการแพร่ (phase boundary reaction or diffusion)

โดยจากสมการที่ (13) นั้น มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้ทำการศึกษาและแก้สมการทางคณิตศาสตร์ และได้นำเสนอสมการเพื่อใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ แบบนอนไอโซเทอร์มอล โดยสมการที่มีชื่อเสียงและเป็นที่รู้จักและใช้กันจนถึงปัจจุบันอย่างแพร่หลาย มีชื่อเรียกทั่วไปว่า สมการแบบอิสระ (model-free) อาทิเช่น สมการ Ozawa, Kissinger, Friedman, Coats and Redfern, Freeman and Carrol และ Achar เป็นต้น (Vlaev et al., 2008) และยังมีสมการที่มีการพัฒนาจากสมการในอดีต แล้วเรียกชื่อผู้พัฒนาเสริมเพิ่มเติมเข้าไปในชื่อสมการ อาทิเช่น สมการ Flynn, Wall and Ozawa (FWO) และ Kissinger, Akahira and Sunose (KAS) และมีสมการที่ลักษณะคล้ายกันกับสมการของ Coats and Redfern แต่เรียกชื่ออีกแบบ คือ Madhysudaman, Krishnan and Ninan (MKN), Tang et al., และสมการ Wanjun et al. (TW) (Vlaev et al., 2008)

สมการ Ozawa (Vlaev et al., 2008)

$$\log \beta = \log \left( \frac{AE_\alpha}{Rg(\alpha)} \right) - 2.315 - 0.4567 \left( \frac{E_\alpha}{RT} \right) \quad (14)$$

สมการ KAS (Vlaev et al., 2008; Janković, 2008; Boonchom and Danvirutai, 2008; Boonchom, 2008)

$$\ln \left( \frac{\beta}{T^2} \right) = -\frac{E_a}{RT_p} + \ln \left( \frac{AR}{E_a} \right). \quad (15)$$

สมการ Coats and Redfern (Boonchom, 2008; Maensiri et al., 2007; Koga and Yamane, 2008)

$$\ln \left( \frac{g(\alpha)}{T^2} \right) = \ln \left( \frac{AR}{\beta E_\alpha} \right) \left( 1 - \frac{2RT}{E_\alpha} \right) - \left( \frac{E_\alpha}{RT} \right) \cong \ln \left( \frac{AR}{\beta E_\alpha} \right) - \left( \frac{E_\alpha}{RT} \right) \quad (16)$$

สมการ Friedman (Boonchom, 2008; Maensiri et al., 2007; Koga and Yamane, 2008)

$$\ln \left( \frac{d\alpha}{dt} \right) \equiv \ln \left( \beta \frac{d\alpha}{dT} \right) = \ln \left( Af(\alpha) \right) - \left( \frac{E_\alpha}{RT} \right) \quad (17)$$

สมการ Freeman and Carroll (Maensiri et al., 2007; Koga and Yamane, 2008)

$$\Delta \ln \left( \frac{d\alpha}{dT} \right) = n \Delta \ln(1-\alpha) - \left( \frac{E_\alpha}{RT} \right) \Delta \left( \frac{1}{T} \right) \quad (18)$$

สมการ Achar (Boonchom, 2008; Maensiri et al., 2007; Koga and Yamane, 2008; Li et al., 2004).

$$\ln\left(\frac{1}{f(\alpha)} \frac{d\alpha}{dT}\right) = \ln\left(\frac{AE_\alpha}{Rg(\alpha)}\right) - \left(\frac{E_\alpha}{RT}\right) \quad (19)$$

สมการ Flynn, Wall and Ozawa (FWO) (Vlaev et al., 2008; Janković, 2008; Boonchom and Danvirutai, 2008; Boonchom, 2008)

$$\ln \beta = \ln\left(\frac{AE_\alpha}{Rg(\alpha)}\right) - 5.3305 - 1.0516\left(\frac{E_\alpha}{RT}\right) \quad (20)$$

สมการ Kissinger, Akahira and Sunose (KAS) (Boonchom, 2008; Maensiri et al., 2007)

$$\ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right)_\alpha = \ln\left(\frac{AE}{g(\alpha)R}\right) - \left(\frac{E_\alpha}{RT}\right) \quad (21)$$

สมการ Madhysudaman, Krishnan and Ninan (Vlaev et al., 2008)

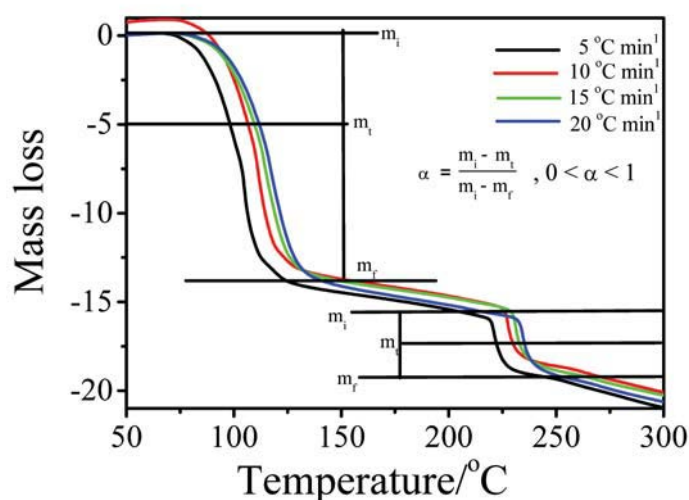
$$\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^{1.921503}}\right) = \left[ \ln\left(\frac{AE_\alpha}{\beta R}\right) + 3.772050 - 1.921503 \ln E_\alpha \right] - \left(0.120394 \frac{E_\alpha}{T}\right) \quad (22)$$

สมการ Tang et al. (Vlaev et al., 2008)

$$\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^{1.894661}}\right) = \left[ \ln\left(\frac{AE_\alpha}{\beta R}\right) + 3.63504095 - 1.894661 \ln E_\alpha \right] - \left(1.0014533 \frac{E_\alpha}{RT}\right) \quad (23)$$

สมการ Wanjun et al. (Vlaev et al., 2008)

$$\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{AE_\alpha}{\beta(1.00198882E_\alpha + 1.87391198RT)}\right) - \left(\frac{E_\alpha}{RT}\right) \quad (24)$$



**รูปที่ 2** เทอร์โมแกรมของ  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ทำการทดลองในสภาพบรรยากาศของอากาศและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 10 15 และ 20 องศาเซลเซียส/ นาที (ที่มา: Boonchom, 2008)

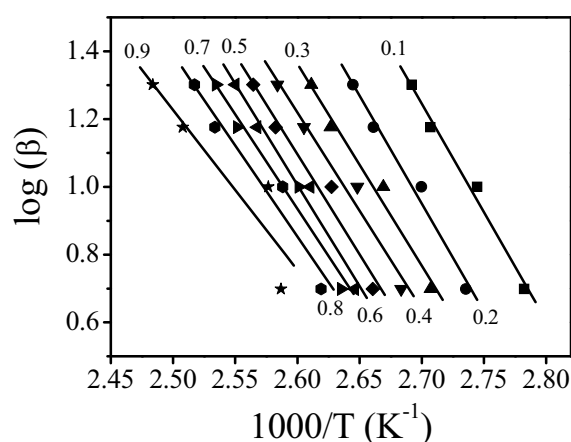
นอกเหนือจากสมการจลนพลศาสตร์ที่กล่าวมาข้างต้น ยังมีสมการที่ใช้เพื่อคำนวณทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวทางความร้อนแบบนอนไอโซเทอร์มอลอีกจำนวนมาก ทั้งที่เสนอไว้ในอดีตและเสนอขึ้นมาในเร็ว ๆ นี้ หากต้องการนำสมการมาใช้ในการศึกษาแล้วนั้น สิ่งที่ต้องพิจารณาก่อนเริ่มต้น คือ พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของสารที่สนใจศึกษา โดยพิจารณาจากผลการทดลองด้วยเทคนิค การวิเคราะห์เชิงความร้อน คือเทคนิค TG, DTG, DTA และ DSC ก่อน เพราะเส้นทางการสลายตัวจะมีความซับซ้อนหรือยากง่ายอย่างไร จะมีส่วนทำให้เลือกใช้สมการทางจลนพลศาสตร์ได้ โดยจะต้องทำการทดลองด้วยเทคนิคดังกล่าวที่สภาวะอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (heating rates) ที่แตกต่างกัน 3 ค่า โดยจะยกตัวอย่างการศึกษาทางด้านนี้ 2 กรณี คือ กลไกที่แสดงการสลายตัวทางความร้อนที่มีการสูญเสียน้ำหนักชัดเจน และกลไกซับซ้อนในการสูญเสียน้ำหนัก

จากรูปที่ 2 ปฏิกริยาการสลายตัวของ  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  จะมี 2 กลไก ดังต่อไปนี้



จากทั้งสองกลไกของการสลายตัวทางความร้อน สามารถคำนวณหาพลังงานกระตุ้นของการสลายตัวในแต่ละขั้นตอนได้ โดยสามารถใช้สมการ Ozawa; Kissinger; Friedman; Flynn, Wall and Ozawa (FWO) และสมการ Kissinger, Akahira and Sunose (KAS) (Vlaev et al., 2008; Janković, 2008; Boonchom and Danvirutai, 2008; Boonchom, 2008; Maensiri et al., 2007) ซึ่งสมการเหล่านี้ เรียกว่าสมการ “Isoconversional method” เป็นสมการ

ที่กำหนดให้ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักคงที่ (Extent of conversion;  $\alpha$ ) โดยทำให้คำนวณค่าพลังงานกระตุ้นได้ ณ สภาวะคงที่ของค่า  $\alpha$  ต่าง ๆ (มีค่าอยู่ในช่วง 0-1) ในการนำเสนอจะยกตัวอย่างการใช้สมการของ Ozawa จากสมการที่ (14) จะต้องเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log \beta$  กับ  $1000/T$  โดย  $\beta$  ทราบแล้วว่ามี 4 ค่า คือ 5 10 15 และ 20 องศาเซลเซียส/นาทิต แต่อุณหภูมิ  $T$  ต้องหาค่า  $\alpha$  ที่อยู่ในช่วง 0-1 โดยคำนวณได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 2 และปกติแล้วจะพิจารณาค่าที่ 0.1 0.2 0.3 ... 0.9 ซึ่งจะได้อุณหภูมิ  $T$  สอดคล้องตามค่า  $\alpha$  หนึ่ง ๆ ที่มีค่าเฉพาะขึ้นกับค่า  $\beta$  ใด ๆ ซึ่งก็คือ ที่  $\alpha = 0.1$  อุณหภูมิ  $T$  จะมี 4 ค่า ตามค่า  $\beta$  ที่มี 4 ค่า จากนั้นเมื่อนำไปเขียนกราฟเส้นตรงตามสมการ Ozawa ก็จะได้กราฟดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log \beta$  กับ  $1000/T$  ตามสมการของ Ozawa (ที่มา: Boonchom, 2008)

โดยความชันของกราฟสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของการสลายตัวในขั้นตอนที่หนึ่งได้จากสมการ Ozawa ซึ่งคำนวณจาก  $-0.4567E_\alpha/R$  จะได้ค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_\alpha$ ) ของการสลายตัวที่สภาวะของค่า  $\alpha$  ได้จากค่าที่คำนวณได้นั้น หาก ค่า  $E_\alpha$  มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่า  $\alpha$  ในช่วง 0.1-0.9 สามารถสรุปได้ว่ากลไกการสลายตัวเป็นแบบขั้นตอนเดียว (single mechanism) แต่หากค่า  $E_\alpha$  มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่า  $\alpha$  ในช่วง 0.1-0.9 สามารถสรุปได้ว่ากลไกการสลายตัวเป็นแบบขั้นตอนซับซ้อนหลายกลไก (multi-step mechanism) หากเกิดการสลายเป็นแบบแรกนั้น สามารถพิจารณาฟังก์ชันและอันดับของการสลายตัวทางความร้อนในขั้นตอนต่อไปได้ โดยพิจารณาจากใช้สมการของ Coats and Redfern; Freeman and Carroll; Achar; Madhysudaman, Krishnan and Ninan (MKN); Tang et al. และสมการ Wanjun et al. (Vlaev et al., 2008; Janković, 2008; Boonchom and Danvirutai, 2008; Boonchom, 2008) แต่หากเกิดการสลายตัวแบบหลังแล้ว จะไม่พิจารณาฟังก์ชันและอันดับของการสลายตัวทางความร้อนต่อไปได้ เพราะค่าที่ได้ไม่มีความหมายใด ๆ ในศาสตร์ของจลนพลศาสตร์ แต่มีความหมายเฉพาะในทางคณิตศาสตร์เพียงเท่านั้น

ในกรณีของกลไกการสลายตัวในขั้นตอนที่สองก็สามารถพิจารณาจลนพลศาสตร์ได้เช่นเดียวกันกับวิธีที่กล่าวมา และปกติแล้วต้องใช้สมการทางจลนพลศาสตร์ 2 สมการร่วมกันในการคำนวณหา ค่า  $E_\alpha$  เพราะค่าที่ได้หากมีค่าใกล้เคียงกันแล้ว จะเป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่คำนวณได้ โดยมักจะเลือกใช้สมการ

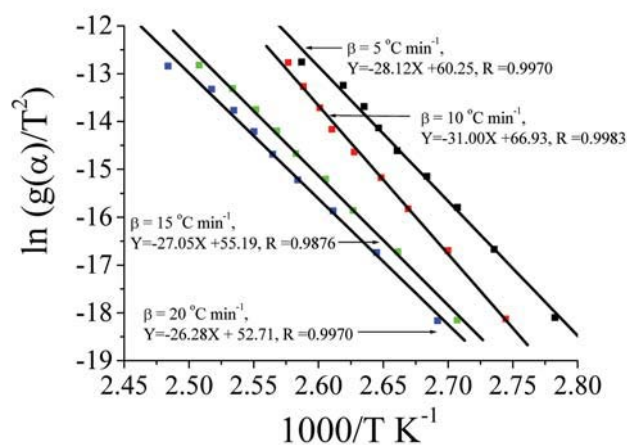
Ozawa หรือ Friedman เป็นสมการหลัก แล้วเอาสมการอื่นมารวม หรือใช้ร่วมกันทั้งคู่ เพราะสมการทั้งสองเป็นสมการที่ค่า  $E_\alpha$  มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงกับค่า  $\alpha$  ได้ง่ายซึ่งสามารถระบุกลไกของการสลายตัวทางความร้อนดังที่กล่าวไว้ข้างบน

ในกรณีที่ กลไกการสลายตัวเป็นแบบขั้นตอนเดียว (single mechanism) สามารถคำนวณหาฟังก์ชันและอันดับของการสลายตัวทางความร้อนต่อได้ โดยขอยกตัวอย่าง โดยใช้สมการของ Coats and Redfern ในขั้นตอนการสลายตัวใน ขั้นตอนที่ 1 ของ  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ซึ่งจะเป็นการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right)$  ที่คำนวณได้จาก ค่า  $\alpha$  ต่าง ๆ ที่  $\beta$  ค่าหนึ่ง ๆ กับ  $1000/T$  โดยค่า  $T$  เป็นค่าเดียวกันกับที่ใช้พิจารณาในสมการ Ozawa ในส่วนของค่าฟังก์ชัน  $g(\alpha)$  เป็นฟังก์ชันพีชคณิต ที่มีมากกว่า 35 สมการ ดังตัวอย่างในตารางที่ 1 ซึ่งการคำนวณต้องแทน  $g(\alpha)$  แต่ละฟังก์ชันลงไปใน  $\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right)$  แล้วนำไปเขียนกราฟตามสมการของ Coats and Redfern โดยที่ ฟังก์ชัน  $g(\alpha)$  ฟังก์ชันหนึ่งจะได้กราฟ ๆ หนึ่ง แต่มีจำนวนเส้นตรง 4 เส้น สอดคล้องกับอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 4 ค่า ดังนั้น จะได้จำนวนกราฟสอดคล้องกับจำนวนฟังก์ชันที่ใช้พิจารณา (ปกติจะมีโปรแกรมคำนวณทั้ง 35 ฟังก์ชัน เพียงแค่ใส่ค่า  $T$  ที่ค่า  $\alpha$  ต่าง ๆ ที่  $\beta$  ค่าหนึ่ง ๆ แล้วโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าตัวแปรที่ต้องการให้เรียบร้อย) จากนั้นจะต้องเลือกฟังก์ชันที่ให้ค่าความเป็นเส้นตรงสูงที่สุด โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของ  $E_\alpha$  ที่คำนวณได้จากความชันของกราฟเส้นตรงแต่ละเส้นตามอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 4 ค่า (5 10 15 และ 20 องศาเซลเซียส/นาท) จะต้องได้ค่าใกล้เคียงกับค่าของสมการ Ozawa และมีค่า  $r^2$  หรือ  $R$  เข้าใกล้ 1.0000 ด้วย โดยปกติแล้วจะใช้สมการเพื่อคำนวณหาฟังก์ชันของการสลายตัว สองสมการควบคู่กัน อาทิเช่น อาจใช้สมการของ Achar ร่วมกับ Coats and Redfern ซึ่งถ้าได้ผลที่สอดคล้องกันแล้วจะเป็นการยืนยันความถูกต้องซึ่งกันและกัน ทำให้ผลที่คำนวณได้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น โดยรูปที่ 4 จะแสดงความสัมพันธ์ตามสมการของ Coats and Redfern โดยใช้ฟังก์ชันที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดนั้น คือ กลไกปฏิกิริยาการแพร่แบบสองมิติ ( $D_2$ , Two-dimension diffusion)

จากเส้นกราฟในรูปที่ 4 สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการชน (Pre-exponential factor, A) จากจุดตัดแกน X คือ  $\ln\left(\frac{AR}{\beta E_\alpha}\right)$  ถึงตรงนี้ จะได้ตัวแปร triplet kinetic parameter คือ  $E_\alpha$ , A และ ฟังก์ชัน  $g(\alpha)$  ในขั้นตอนสุดท้าย คือการอธิบายความหมายทางกายภาพของตัวแปรดังกล่าว ที่ต้องใช้ความรู้ และการค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องมาอธิบาย ซึ่งปัจจุบันก็มีการพัฒนาแนวความคิดใหม่ ๆ ของนักจลนพลศาสตร์ ที่ได้ศึกษาทางด้านนี้ได้อธิบายเพิ่มเติมอย่างสม่ำเสมอ

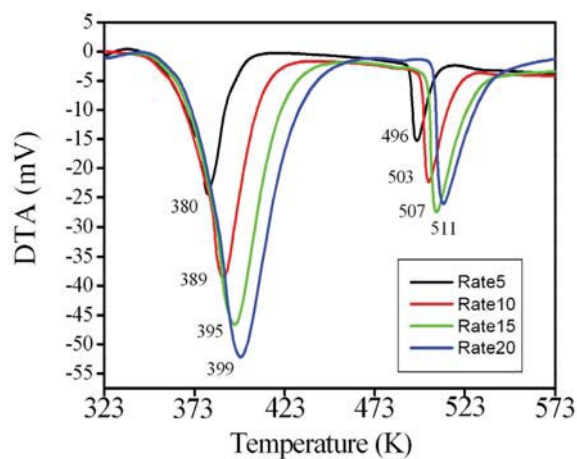
**ตารางที่ 1** ตัวอย่างฟังก์ชันของ  $f(\alpha)$  และ  $g(\alpha)$  เพื่อใช้ในการคำนวณหาฟังก์ชันการสลายตัวของสาร  
(ที่มา: Vlaev et al., 2008; Janković, 2008; Boonchom and Danvirutai, 2008; Boonchom, 2008)

| No.                                                                          | $f(\alpha)$                             | $g(\alpha)$                               | Kinetic function name                 |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>1. Acceleratory equations</b>                                             |                                         |                                           |                                       |
| $P_{3/2}$                                                                    | $\alpha^{-1/2}$                         | $(2/3) \alpha^{3/2}$                      | Power law ( $\alpha = kt^{2/3}$ )     |
| $P_2$                                                                        | $\alpha^{1/2}$                          | $2\alpha^{1/2}$                           | Power law ( $\alpha = kt^2$ )         |
| $P_3$                                                                        | $\alpha^{2/3}$                          | $3\alpha^{1/3}$                           | Power law ( $\alpha = kt^3$ )         |
| <b>2. Chemical decomposition process or mechanism non-invoking equations</b> |                                         |                                           |                                       |
| $F_{1/2}$                                                                    | $2(1-\alpha)^{1/2}$                     | $[1-(1-\alpha)^{1/2}]$                    | Reaction order ( $n=1/2$ )            |
| $F_{1/3}$                                                                    | $3(1-\alpha)^{2/3}$                     | $[1-(1-\alpha)^{1/3}]$                    | Reaction order ( $n=1/3$ )            |
| $F_n$                                                                        | $(1-\alpha)^n$                          | $2[1-(1-\alpha)^{1-n}]/(1-n)$             | n-th-order kinetics ( $n \neq 1$ )    |
| <b>3. Sigmoid rate equations or random nucleation and subsequent growth</b>  |                                         |                                           |                                       |
| $A_1, F_1$                                                                   | $(1-\alpha)$                            | $-\ln(1-\alpha)$                          | Avrami-Erofeyev ( $n=1$ )             |
| $A_{3/2}$                                                                    | $(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{1/2}$     | $(3/2)[- \ln(1-\alpha)]^{2/3}$            | Avrami-Erofeyev ( $n=1.5$ )           |
| $A_2$                                                                        | $(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{1/2}$     | $2[- \ln(1-\alpha)]^{1/2}$                | Avrami-Erofeyev ( $n=2$ )             |
| <b>4. Deceleratory rate equations</b>                                        |                                         |                                           |                                       |
| $R_1, P_1$                                                                   | $(1-\alpha)^0$                          | $\alpha$                                  | One-dimensional advance               |
| $R_2, F_{1/2}$                                                               | $(1-\alpha)^{1/2}$                      | $2[1-(1-\alpha)^{1/2}]$                   | One-half order                        |
| $R_3, F_{2/3}$                                                               | $[\ln(1-\alpha)]^{2/3}$                 | $3[1-\ln(1-\alpha)]^{2/3}$                | Two-thirds order                      |
| $D_1$                                                                        | $1/\alpha$                              | $\alpha^2/2$                              | One-dimension ( $\alpha = kt^{1/2}$ ) |
| $D_2$                                                                        | $[1/\ln(1-\alpha)]$                     | $\alpha + (1-\alpha)\ln(1-\alpha)$        | Two-dimension diffusion               |
| $D_3$                                                                        | $(1-\alpha)^{2/3}/[1-(1-\alpha)^{1/3}]$ | $(3/2)[1-\ln(1-\alpha)^{1/3}]^2$          | Two-dimension diffusion               |
| $D_4$                                                                        | $(1-\alpha)^{1/3}/[1-(1-\alpha)^{1/3}]$ | $(3/2)[1-(2/3)\alpha - (1-\alpha)^{2/3}]$ | Three-dimension diffusion             |



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ตามสมการของ Coats and Redfern โดยใช้ฟังก์ชันที่มีความเป็นไปได้มากที่สุด คือ  $D_3$  model

หากกลไกการสลายตัวมีความซับซ้อนหรือค่า  $E_\alpha$  ขึ้นกับค่า  $\alpha$  อาจพิจารณาได้เพียง  $E_\alpha$  แต่มีวิธีที่สามารถคำนวณค่า อันดับปฏิกิริยาและค่าสัมประสิทธิ์การชนของการสลายตัวได้ โดยสามารถเลือกใช้เทคนิคในการวิเคราะห์ได้โดยการใช้พล็อตของ DTG, DTA หรือ DSC โดยยกตัวอย่างการพิจารณา ด้วยเทคนิค DTA ของ  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (รูปที่ 5) ต้องทำการทดลองที่ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 4 ค่า เช่นกัน



รูปที่ 5 DSC เทอร์โมแกรมของ  $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ทำการทดลองที่ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 4 ค่า (5 10 15 และ 20 องศาเซลเซียส/นาที)

จากนั้น เลือกใช้สมการการคำนวณของ Kissinger (Boonchom and Danvirutai, 2008) โดยเขียนกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right)$  กับ  $1000/T$  ซึ่ง  $T$  ได้จากพีคในแต่ละค่า  $\beta$  โดยกราฟที่ได้จะมี 2 เส้น สอดคล้องกับ 2 กลไกของการสลายตัวทางความร้อน จากสมการ Kissinger ความชันของกราฟสามารถคำนวณหา  $E_\alpha$  ได้ ในขณะที่จุดตัดแกนสามารถนำไปคำนวณหา  $A$  ได้ ในส่วนของอันดับปฏิกิริยาการสลายตัวสามารถคำนวณโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$n = \frac{2.5}{\Delta T} \cdot \frac{T_p^2}{E_a / R} \quad (27)$$

$$-n = \frac{d \ln[-\ln(1-x)]}{d \ln(\beta)} \quad (28)$$

เมื่อ  $n$  คือค่าคงที่ของ Avrami,  $\Delta T$  คือ ความกว้างที่ความสูงกึ่งหนึ่งของพีคที่สูงที่สุดในแต่ละเทคนิค คือ DTG, DTA หรือ DSC,  $\ln(1-x)$  คือ ปริมาณพื้นที่ใต้พีคในขั้นตอนการสลายตัวทางความร้อนแต่ละกลไกภายใต้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิใด ๆ

จากค่าที่ได้ในการพิจารณากลไกการสลายตัวที่ซับซ้อนนี้ ทำให้ได้ตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ทั้ง 3 ตัวครบถ้วน ซึ่งเหลือเฉพาะการอธิบายผลของตัวแปรทั้งสาม ที่ต้องใช้ความรู้พื้นฐานและข้อมูลจากการค้นคว้ากับงานด้านนี้ที่ได้มีการศึกษามาก่อน มาช่วยอธิบาย

## สรุป

จากการศึกษาด้านจลนพลศาสตร์นั้นจะประกอบด้วยหลักการ 3 ขั้นตอน คือ เริ่มแรกต้องเลือกเทคนิค (TG, DTG, DTA หรือ DSC) ในการจะใช้ศึกษา โดยพิจารณาจากกลไกของการสลายตัว แล้วทำการทดลองที่สภาวะอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 4 ค่า ขั้นที่สอง ประมวลผลข้อมูลเพื่อหาค่า  $\alpha$  (0.1-0.9) ต่าง ๆ ที่  $\beta$  ค่าหนึ่ง ๆ เพื่อจะได้ค่า  $T$  จากนั้นค่อยนำไปเขียนกราฟตามความสัมพันธ์ในสมการทางจลนพลศาสตร์ดังอ้างไว้ข้างบน แล้วคำนวณหาตัวแปรทั้ง 3 ( $E_\alpha$ ,  $A$  และ ฟังก์ชัน  $g(\alpha)$  หรือ  $n$ ) ของจลนพลศาสตร์ ในขั้นสุดท้าย จะเป็นการแปรผลข้อมูลที่ได้ ซึ่งต้องอาศัยความเชี่ยวชาญและการศึกษาค้นคว้าข้อมูลกับงานทางด้านนี้ เพราะค่าต่าง ๆ ที่ได้จะบ่งบอกถึงพฤติกรรมของสารที่ศึกษาได้ พลังงานกระตุ้นของการสลายตัวที่เกิดจากการสลายพันธะอะไรทำให้แก๊สชนิดใดหลุดออกไป ใช้พลังงานไปเท่าใด ออกได้เร็วหรือช้า มีกลไกแบบใด โครงสร้างที่เป็นสารตั้งต้นอินเทอร์มีเดียต หรือสารผลิตภัณฑ์ ตัวไหนมีความเสถียรมากน้อยกว่ากัน อัตราการเพิ่มอุณหภูมิมิมีผลกระทบหรือไม่มีผลกระทบ สามารถควบคุมกลไกการสลายตัวได้หรือไม่ และที่สำคัญสลายไปแล้วได้อะไร และสมบัติทางกายภาพควรเป็นอย่างไรอันซึ่งสามารถทำนายได้

## เอกสารอ้างอิง

- Boonchom, B., and Danvirutai, C. (2008). Synthesis of  $\text{MnNiP}_2\text{O}_7$  by non-isothermal decomposition kinetics of a new binary  $\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{HPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  obtained from a rapid coprecipitation at ambient temperature. *Ind. Eng. Chem. Res.* 49: 2941-2947.
- Boonchom, B. (2008). Kinetics and thermodynamic properties of the thermal decomposition of manganese dihydrogenphosphate dihydrate. *J. Chem. Eng. Data.* 53:1533-1538.
- Janković, B. (2008). Kinetic analysis of the nonisothermal decomposition of potassium metabisulfite using the model-fitting and isoconversional (model-free) methods. *Chem.Eng. J.* 139: 128-135.
- Koga, N., and Yamane, Y. (2008). Thermal behaviors of amorphous calcium carbonates prepared in aqueous and ethanol media. *J. Therm. Anal. Calorim.* 94: 379-387.
- Maensiri, S., Masingboon, C., Boonchom, B. and Seraphin, S. (2007). A simple route to synthesize nickel ferrite ( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ) nanoparticles using egg white. *Scripta Materialia*, 56: 797-80.
- Li, L., Guan, C., Zhang, A., Chen D., and Qing, Z. (2004). Thermal stabilities and the thermal degradation kinetics of polyimides. *Polymer Degradation and Stability*, 84: 369-373.
- Vlaev, L., Nedelchev, N., Gyurova, K., and Zagorcheva, M.(2008). A comparative study of non-isothermal kinetics of decomposition of calcium oxalate monohydrate. *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 81:253-262.



## ไซโคลเตตระฟอสเฟตสำหรับการเคลือบเซรามิก (Cyclotetraphosphate for ceramic coating)

บรรจง บุญชม

วิทยาเขตชุมพร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 17/1 ม.6 ต.ชุมโค อ.ปะทิว จ.ชุมพร 86160

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการกล่าวถึงสารโลหะไซโคลเตตระฟอสเฟตที่ถูกเตรียมขึ้นเพื่อใช้เป็นสีอินทรีย์เคมีสำหรับเคลือบสีเซรามิก เพื่อทดแทนสีเคลือบเซรามิกในกลุ่มโลหะออกไซด์ โดยเริ่มต้นนั้นจะกล่าวถึงความสำคัญ ลักษณะทางโครงสร้าง และความเป็นมาที่น่าสนใจ จากนั้นจะกล่าวถึงสารโลหะไซโคลเตตระฟอสเฟตในงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา จะเน้นกล่าวถึงเทคนิคการเตรียมสารโลหะไซโคลเตตระฟอสเฟต และจะอธิบายเกี่ยวกับการตรวจสอบลักษณะทางโครงสร้างด้วยเทคนิคต่าง ๆ อาทิ เช่น Fourier transforms infrared spectroscopy (FTIR) และ X-ray powder diffraction (XRD) ในส่วนการระบุเจดสีด้วยเครื่อง UV-Vis Near IR spectrophotometer และสุดท้ายจะกล่าวถึงข้อดีที่น่าสนใจของสารประกอบนี้ และพร้อมเปรียบเทียบกับสารกลุ่มอื่นๆ

**คำสำคัญ:** สีเคลือบเซรามิก, ไซโคลเตตระฟอสเฟต, ทวีโลหะไซโคลเตตระฟอสเฟต

### Abstract

Metal cyclotetraphosphates were reviewed in this article, prepared for inorganic ceramic pigments and used for the replacement of ceramic pigment in the class of metal oxides. Firstly, the importance of materials, crystal structures and basic principle of metal cyclotetraphosphates were presented. Secondly, the metal cyclotetraphosphates proposed by previous researchers were reviewed, especially the synthesis method and its characterization. Their crystal structures were determined by Fourier transforms infrared spectroscopy (FTIR) and X-ray powder diffraction (XRD). The color hue was explained by UV-Vis Near IR spectrophotometer. Finally, the interesting of metal cyclotetraphosphates were discussed and compared with other materials.

**Keywords:** Ceramic pigment, Cyclotetraphosphate, Binary cyclotetraphosphate

---

Email address: [kbbanjon@kmitl.ac.th](mailto:kbbanjon@kmitl.ac.th) or [kbbanjon@gmail.com](mailto:kbbanjon@gmail.com)

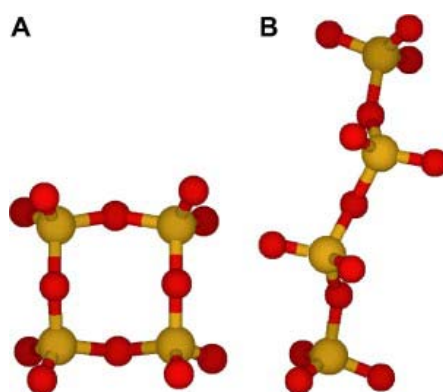
## 1. บทนำ

อุตสาหกรรมเซรามิก มีผลิตภัณฑ์มากมายหลายชนิด ผลิตภัณฑ์ที่สำคัญ ได้แก่ กระเบื้องปูพื้น บุผนัง เครื่องสุขภัณฑ์ จะผลิตเพื่อใช้ในกลุ่มวัสดุก่อสร้าง ของครัวเรือน เครื่องประดับ เครื่องใช้บนโต๊ะอาหารจะผลิตเพื่อเป็นเครื่องตกแต่งและใช้ในบ้าน (รูปที่ 1) ส่วนลูกถ้วยไฟฟ้าจะผลิตเพื่อใช้งานในกิจการสาธารณูปโภคด้านการไฟฟ้า เดิมอุตสาหกรรมเซรามิกผลิตเพื่อทดแทนการนำเข้า และได้พัฒนาเทคโนโลยีการผลิตอย่างต่อเนื่องจนสามารถผลิตเพื่อส่งออกนารายได้เข้าสู่ประเทศ ปีละหมื่นล้านบาท เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้แรงงานเป็นจำนวนมาก มีการกระจายรายได้ไปสู่ชนบท จึงนับว่าเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเซรามิก ส่วนใหญ่ได้จาก ภายในประเทศมากกว่าร้อยละ 50 ได้แก่ ดินขาว ดินดำ ทราช แก้ว หรือหินควอทซ์ หินฟันม้าหรือเฟลสปาร์ และวัตถุดิบที่ต้อง นำเข้าจากต่างประเทศ ได้แก่ สีเคลือบและเคมีภัณฑ์ ด้วยเหตุผลของการนำเข้าสีเคลือบและเคมีภัณฑ์นี้เอง ที่เป็นปัญหาที่ไทยประสบ ทำให้ได้วัตถุดิบมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ และภยันตรายนำเข้าวัตถุดิบโดยเฉพาะสี มีอัตราสูงเมื่อเทียบกับประเทศคู่แข่ง จึงส่งผลกระทบต่อส่งออก ต้องเผชิญการแข่งขันอย่างรุนแรงภายใต้ระบบการค้าที่มีความเสรีมากยิ่งขึ้น จากปัญหานี้เรื่องสีเคลือบเซรามิกที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศนั้น ปัจจุบันได้มีการศึกษาสารโลหะไซโคลเตตระฟอสเฟต เพื่อใช้ทดแทนสีเคลือบโลหะออกไซด์ และสามารถผลิตได้ง่ายภายในประเทศ มีหลากหลายเฉดสีให้เลือก ที่สำคัญด้านคุณภาพและข้อดีอาจจะมีมากกว่าสีดั้งเดิมที่ใช้อยู่ และมีเหตุผลอธิบายมากมาย อาทิเช่น เตรียมขึ้นได้ง่าย ประหยัดต้นทุน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม คุณภาพดี ทนการกัดกร่อนของกรดแก่และเบสแก่ ทนการใช้งานที่สภาพอุณหภูมิสูงกว่า 400 °C เหมาะกับการนำไปใช้งานหลาย ๆ ด้าน



รูปที่ 1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทางเซรามิก

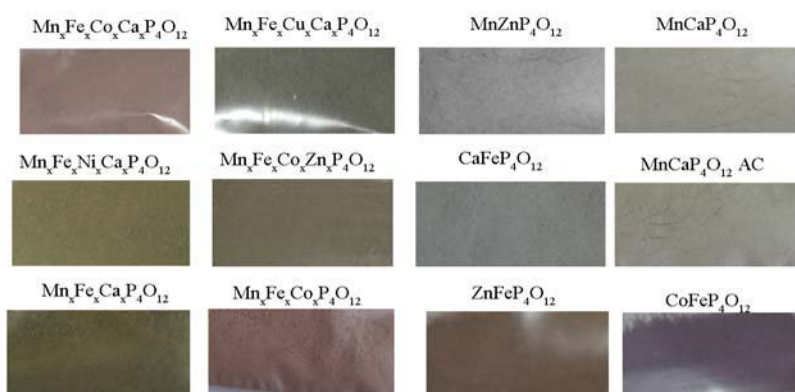
โลหะ (II) ไซโคลเตตระฟอสเฟต [1-5] มีหน่วยโครงสร้างทางเคมี คือ ประกอบด้วย โลหะในกลุ่ม ทรานส์ดิสัน (transition) หรือธาตุเรพรีเซนต์ฟ (representative) ที่มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ 2+ สร้างพันธะกับ  $P_4O_{12}^{4-}$  แอนไอออน (anion) โดยที่แอนไอออนมีโครงสร้างทางเคมี แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ด้วยกัน คือ โพลีเตตระฟอสเฟต (polytetraphosphate) และ ไซโคลเตตระฟอสเฟต (cyclotetraphosphate) โดยรูปร่างโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะโครงของสายโซ่วงแหวน (A) และสายโซ่ตรง (B) ของ  $P_4O_{12}$

โดยในลักษณะของโครงสร้างแบบวงแหวน เรียกว่า โซลิตเตตระฟอสเฟตนั้นจะนิยมเตรียมขึ้น เพื่อเป็นสียเคลือบเซรามิก ด้วยเหตุผล เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง มีความเสถียรทนต่อสภาพความร้อนที่อุณหภูมิสูงได้ดี และทนการกัดกร่อนของกรดแก่และเบสแก่ได้เป็นอย่างดี โดยไม่สูญเสียสภาพของโครงสร้าง ในอดีตที่ผ่านมา มีการศึกษาและเตรียมสารในกลุ่มนี้ขึ้นเพื่อใช้เป็นสียเคลือบตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 [6-11] เป็นต้นมา โดยกลุ่มวิจัยที่ได้ศึกษาสารในกลุ่มนี้ และได้มีการจดสิทธิบัตรสารบางชนิดไปแล้วนั้น ได้แก่ Trojan และคณะ ตัวอย่างเช่น  $Co_2P_4O_{12}$  (สีม่วง) [4, 5]  $Mn_2P_4O_{12}$  (สีชมพูอ่อน)[3, 8, 13, 14]  $Ni_2P_4O_{12}$  (สีเขียว)[1, 2, 14]  $Zn_2P_4O_{12}$  (สีขาว)[1, 2, 7, 12] และ  $Cu_2P_4O_{12}$  (สีฟ้า)[3, 6] โดยวิธีการเตรียมสารกลุ่มนี้นั้น กลุ่มวิจัยของ Trojan ได้ทำการเตรียมด้วยสารตั้งต้นที่เป็นโลหะคาร์บอเนต ( $MCO_3$ ;  $M = Ba, Ca, Cu, Mn, Co, Ni$ ) ผสมกับกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) โดยเทคนิคการสังเคราะห์ด้วยความร้อนแบบสองขั้นตอน (two-step thermal synthesis) เริ่มต้นด้วยการผสมสารที่สภาพอุณหภูมิประมาณ  $100-200\text{ }^{\circ}C$  จนสารที่ผสมกันเหลือเฉพาะของแข็งเท่านั้น แล้วค่อยนำของแข็งที่ได้ออกมาบดให้ละเอียด แล้วนำไปเผาต่อที่อุณหภูมิประมาณ  $600-800\text{ }^{\circ}C$  ผลิตภัณฑ์สุดท้ายก็จะได้สารโลหะโซลิตเตตระฟอสเฟตที่ต้องการ ในอีกวิธีการเตรียมอีกรูปแบบหนึ่ง กลุ่มวิจัยของ Trojan ได้อธิบายการเตรียมสาร โลหะเดี่ยวโซลิตเตตระฟอสเฟต โดยการนำเอาสารในกลุ่มโลหะไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรต (metal dihydrogen hydrate,  $M(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$ ) [5-8] ไปเผาที่อุณหภูมิ  $400\text{ }^{\circ}C$  สารตั้งต้นก็จะสลายตัวไปเป็นสารโลหะโซลิตเตตระฟอสเฟตได้เช่นเดียวกัน และในเวลาต่อมา กลุ่มวิจัยของ Trojan ก็ได้พยายามทำการเตรียมสารให้มีเจดสีอื่น ๆ นอกเหนือจากที่กล่าวข้างบน โดยได้ทดลองผสมโลหะเข้าไปรวมภายในสูตรของโลหะเดี่ยวโซลิตเตตระฟอสเฟต (Single metal cyclotetraphosphate,  $M_2P_4O_{12}$ ) ซึ่งจะกลายเป็นสารทวิโลหะโซลิตเตตระฟอสเฟต (Binary metal cyclotetraphosphate,  $M'_{2-x}M''_xP_4O_{12}$ ) [1-4, 12-14] โดยวิธีคิดก็เหมือนกับหลักการผสมแม่สี หากเราอยากได้สารที่มีเจดสีใด เราก็ทำการผสมโลหะสองตัวที่จะให้เจดสีที่เกิด

จากการผสมของเจดสีของโลหะเดี่ยวลงไป ตัวอย่างของสารที่ได้เตรียมมาในอดีต อาทิเช่น  $Zn_{2-x}Ni_xP_4O_{12}$  (สีเขียว จนถึงขาว) [1] เจดสีจะเปลี่ยนจากเขียวไปเป็นขาวเมื่อปริมาณ โมล ของ  $x$  เพิ่มขึ้น และยังมีสารตัวอื่นอีก คือ  $Cd_{2-x}Zn_xP_4O_{12}$  [2],  $Cu_{2-x}Mn_xP_4O_{12}$ [3],  $Co_{2-x}Ca_xP_4O_{12}$ [4],  $Zn_{2-x}Ca_xP_4O_{12}$ [9],  $Cd_{2-x}Ca_xP_4O_{12}$  [10],  $Zn_{2-x}Ni_xP_4O_{12}$  [11], และ  $Mn_{2-x}Ca_xP_4O_{12}$  [12] และโดยสารเหล่านี้ ก็จะมีเจดสีตามพฤติกรรมของการผสมสีของสารโลหะเดี่ยว โดยจะมีสีตามส่วนผสมของโลหะแต่ละชนิดในปริมาณต่างกัน โดยวิธีการเตรียมมีสองวิธี คือ การนำโลหะเดี่ยวไฮดรอกไซด์หรือฟอสเฟตมาผสมกันในสัดส่วนที่ต้องการ แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 800-900 °C ขณะที่อีกวิธีหนึ่งจะเป็นการนำสารโลหะไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ไฮเดรต ( $M(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$ ) มาผสมกันก่อนในสัดส่วนตามต้องการ แล้วค่อยนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400-500 °C สุดท้ายก็จะได้สารทวิโลหะไฮดรอกไซด์หรือฟอสเฟต ในประเทศไทยเอง กลุ่มงานวิจัยของ บรรจง บุญชม และคณะ (พ.ศ. 2550) [14-19] ก็ได้มีการศึกษาเตรียมสารในกลุ่มนี้ ตัวอย่างสารที่ศึกษาไปแล้วนั้น เช่น  $Mn_{2-x}Co_xP_4O_{12}$  (สีชมพูอ่อน) [14]  $Mn_{2-x}Cu_xP_4O_{12}$  (สีชมพูอมฟ้า) [15]  $Mn_{2-x}Fe_xP_4O_{12}$  (สีชมพูอมเหลือง) [16]  $Mn_{2-x}Ca_xP_4O_{12}$  (สีชมพูอมเทา) [17] และยังมีสารอื่นที่กำลังศึกษาอยู่ ณ ขณะนี้ [18-19] อีกจำนวนหลากหลายเจดสี ดังรูปที่ 3.



รูปที่ 3 ลักษณะเจดสีต่าง ๆ ของสารโลหะไฮดรอกไซด์หรือฟอสเฟตบางตัว

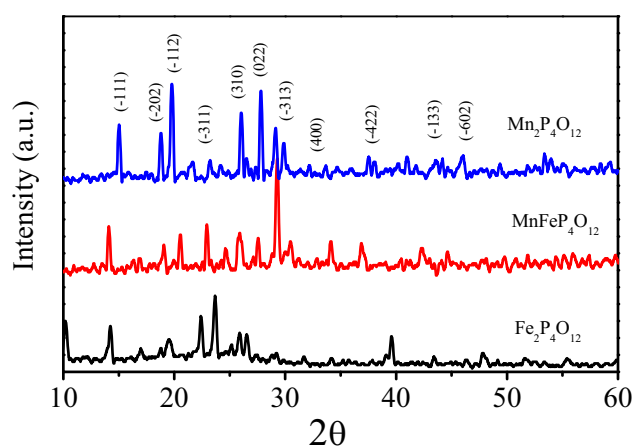
กระบวนการเตรียมสารของกลุ่มบรรจง บุญชม จะใช้วิธีการเตรียมสารทวิโลหะไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ไฮเดรต ( $M'_{1-x}M''_x(H_2PO_4)_2 \cdot nH_2O$ ) [14-19] ขึ้นมา แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 400-500 °C ก็จะได้อาร์ทวิโลหะไฮดรอกไซด์หรือฟอสเฟต ( $M'_{2-x}M''_xP_4O_{12}$ ) เช่นเดียวกับวิธีของกลุ่มวิจัยของ Trojan และยังได้มีการเตรียมสารที่มีองค์ประกอบของโลหะหลายชนิดอีกหลายตัว ดังแสดงในรูปที่ 3

เมื่อทำการเตรียมสารทวิโลหะไฮดรอกไซด์หรือฟอสเฟต ( $M'_{2-x}M''_xP_4O_{12}$ ) ที่ต้องการได้แล้ว สิ่งที่ต้องทำต่อ ก็คือจะต้องทำการตรวจสอบลักษณะต่าง ๆ ของสารที่เตรียมขึ้นได้ดังกล่าว โดยจะยกตัวอย่าง การตรวจสอบของสาร  $MnFeP_4O_{12}$  ด้วยเทคนิคดังต่อไปนี้

## 2. การตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ด้วยเครื่องมือ

### X-ray powder diffraction (XRD)

สารในกลุ่มทวิโลหะไฮโคเลเตตระฟอสเฟตนั้นจะลักษณะโครงสร้างที่คล้ายกัน (isostructural) กับสารโลหะเดี่ยวไฮโคเลเตตระฟอสเฟต ด้วยเหตุผลของการที่โลหะชนิดหนึ่งเข้าไปแทนที่ตำแหน่งของโลหะอีกชนิด ซึ่งโลหะทั้งสองจะมีเลขออกซิเดชันเท่ากัน คือ 2+ และมีขนาดรัศมีอะตอมใกล้เคียงกัน ด้วยเหตุผลนี้ XRD pattern ของสารในกลุ่มทั้งหมดนี้จึงมีลักษณะที่คล้ายกัน (รูปที่ 4) ดังนั้น จึงทำให้สามารถระบุฟีก และระนาบ hkl ได้เหมือน ๆ กัน จากข้อมูลที่ได้สามารถสรุปว่า สารโลหะทั้งทวิและเดี่ยวไฮโคเลเตตระฟอสเฟตมีระบบผลึกเป็น โมโนคลินิกมีสมมาตรผลึกแบบ  $C_{2h}^6$  ( $C2/c$ ) และมีจำนวนโมเลกุลในหนึ่งหน่วยเซลล์เท่ากับ 4 แล้วสามารถคำนวณหา แลตติสพารามิเตอร์ (lattice parameters) และคำนวณขนาดของผลึกที่เตรียมขึ้นได้ดังตารางที่ 1



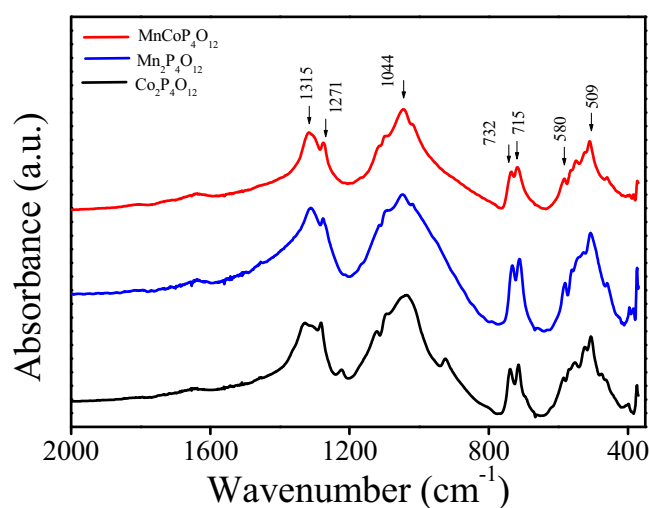
รูปที่ 4 XRD patterns of  $MnFeP_4O_{12}$  เปรียบเทียบกับสารโลหะเดี่ยว

ตารางที่ 1 ขนาดเฉลี่ยของผลึกและค่าตัวแปรแลตติสของ  $MnFeP_4O_{12}$  และ ที่คำนวณได้จากข้อมูล XRD เปรียบเทียบกับค่าจากข้อมูลมาตรฐานของสารโลหะเดี่ยว

| Compounds                       | a (Å)    | b(Å)    | c(Å)     | $\beta(^{\circ})$ | Average crystallites sizes (nm) |
|---------------------------------|----------|---------|----------|-------------------|---------------------------------|
| PDF# 380314 ( $Mn_2P_4O_{12}$ ) | 11.88    | 8.59    | 10.14    | 119.21            | -                               |
| This work ( $MnFeP_4O_{12}$ )   | 12.06(8) | 8.48(2) | 10.12(4) | 119.12(5)         | $62 \pm 13$                     |
| PDF# 760223 ( $Fe_2P_4O_{12}$ ) | 11.94    | 8.37    | 9.94     | 118.77            | -                               |

### Fourier transforms infrared spectroscopy (FTIR)

เทคนิค FTIR สามารถนำไปพิจารณาลักษณะของการสั่นของหมู่ฟังก์ชันองค์ประกอบหรือหน่วยย่อยภายในโมเลกุลของสารโลหะไซโคลเตตระฟอสเฟตได้ เพราะสารดังกล่าวนี้จะประกอบด้วย  $P_4O_{12}^{4-}$  ไอออนและ  $MO_6$  ดังนั้นการสั่นพื้นฐานของพันธะหลัก ๆ ของสารนี้ จึงมีเฉพาะการสั่นที่เกิดจาก  $P_4O_{12}^{4-}$  ไอออน เพราะในส่วนของการสั่นของ M-O ที่มาจาก  $MO_6$  (octahedral) นั้นจะอยู่ที่ความถี่ต่ำกว่า  $400\text{ cm}^{-1}$  มีความเข้มพีกค่อนข้างน้อยมาก และขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะเดี่ยว ในบางครั้งอาจเห็นการแยกออกเป็นหลายพีก เนื่องจากสิ่งแวดล้อมที่อยู่ภายในโครงสร้างที่พันธะ M-O เชื่อมต่อภายในโมเลกุลแตกต่างกัน FTIR ของสารในกลุ่มนี้ จะมีลักษณะคล้ายดังรูปที่ 5



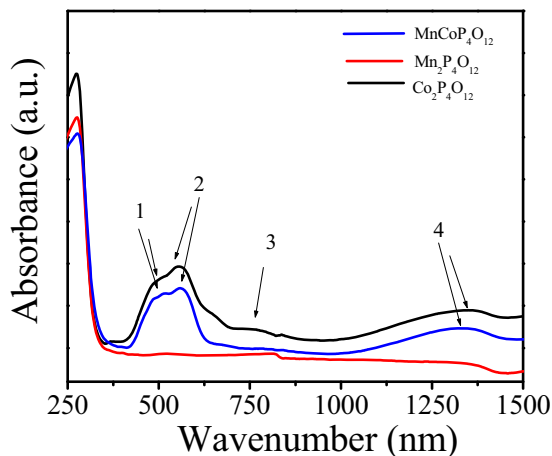
รูปที่ 5 FTIR spectra of  $MnCoP_4O_{12}$  เปรียบเทียบกับสารโลหะเดี่ยวไซโคลเตตระฟอสเฟต

การสั่นของ  $P_4O_{12}^{4-}$  ไอออนจะมีลักษณะเด่นที่หากเป็นโครงสร้างแบบวงจะมีพีกประมาณ  $732$  และ  $715\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีกของ POP bending ที่ทำให้ระบุได้ว่าไอออนนี้เป็น ไซโคลเตตระฟอสเฟต (cyclotetraphosphate) ไม่ใช่โครงสร้างแบบเส้นตรง (polytetraphosphate) และจะมีพีกที่สำคัญแบ่งออกเป็น สามช่วง คือ ประมาณ  $1315$ - $1271$  และ  $1100$ - $1000\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งถูกจำแนกเป็นรูปแบบการสั่นยืดหดของ  $PO_2^{2-}$  radical แบบสามมาตรและไม่ว่าสามมาตร ในช่วง  $600$ - $400\text{ cm}^{-1}$  ของเป็นรูปแบบการสั่นแบบโค้งงอของ  $PO_2^{2-}$  radical

### UV-Vis Near IR spectrophotometer

ลักษณะเจดสีของสารที่เตรียมขึ้นได้นั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของโลหะที่ผสมกันกัน จึงมีเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบการดูดกลืนสีในช่วง แสงสีขาวย คือ  $350$ - $700\text{ nm}$  โดยพิจารณา

จากรูป 6 จากการเปรียบเทียบเจดสีที่ได้ของสาร  $\text{MnCoP}_4\text{O}_{12}$  เปรียบเทียบกับสารโลหะเดี่ยว สารทวิโลหะจะมีสีแดงชมพูอ่อน ซึ่งต่างจากสาร  $\text{Mn}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ที่มีสีชมพูอ่อน ๆ และ  $\text{Co}_2\text{P}_4\text{O}_{12}$  ที่มีสีแดงเข้มเหมือนเม็ดมะขาม และหากมีการเปลี่ยนปริมาณโลหะ โดยสูตร  $\text{Mn}_{2-x}\text{Co}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  เมื่อ  $x = 0 < x < 2$  ก็จะได้เจดสีในช่วงของสีชมพูถึงสีแดงเข้ม ในกรณีของโลหะตัวอื่นก็เกิดพฤติกรรมที่คล้ายกันนี้



รูปที่ 6 UV-Vis Near IR spectra of  $\text{MnCoP}_4\text{O}_{12}$  เปรียบเทียบกับสารโลหะเดี่ยว

ยังมีเทคนิคอื่นอีกหลาย ๆ อย่างที่ใช้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารดังกล่าวนี้ อาทิเช่น การศึกษาสัณฐานวิทยา พื้นที่ผิว และความเสถียรทางโครงสร้างทางความร้อน โดยสามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากงานวิจัยของ Trojan และคณะ [1-14] กับงานของบรรจง บุญชม [15-21] ในส่วนสุดท้ายนี้จะอธิบายลักษณะเด่นของสารในกลุ่มไซโคลเตตระฟอสเฟต ดังนี้ คือ

### 3. ข้อดีของสาร

**ประหยัดต้นทุน** คือ แ่ง ในการเตรียมสารดังกล่าวนี้ขึ้นมา สามารถเตรียมขึ้นได้จากสารตั้งต้นที่มีราคาถูกหลาย ๆ ตัว เพื่อเปลี่ยนมาเป็นสารโลหะไซโคลเตตระฟอสเฟต โดยมีกระบวนการเตรียมด้วยวิธีที่ง่ายและเวลารวดเร็ว โดยไม่ต้องมีประสบการณ์และความชำนาญของผู้เตรียม อีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้เตรียมก็ไม่มี ความซับซ้อนในการใช้งาน ที่สำคัญหากอยากได้เจดสีใด ก็สามารถทดลองเตรียมผสมโลหะสองตัวได้อย่างง่ายดาย เหตุนี้เองที่ทำให้สามารถผลิตเจดสีตามความต้องการได้เอง ลดการนำเข้าต่างประเทศ สามารถควบคุมราคาผลิตภัณฑ์ เป็นผลดีต่อการแข่งขันด้านราคากับต่างประเทศได้

**มิตรต่อสิ่งแวดล้อม** ในแง่ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เริ่มตั้งแต่ กระบวนการสังเคราะห์สารในกลุ่มนี้มีขั้นตอนการผลิตหลายวิธีเพื่อจะให้ได้สารที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นสีเคลือบเซรามิก ทั้งขนาดอนุภาค และคงทนต่ออุณหภูมิสูง ๆ และการทนการกัด

กร่อนของความเป็นกรดและเบส ซึ่งสามารถเลือกกระบวนการสังเคราะห์และกำหนดการกระบวนการได้เอง ตัวอย่างเช่น หากเลือกสารตั้งต้นในการสังเคราะห์เป็นสารในกลุ่มโลหะไนเตรทหรือคาร์บอเนต ในขั้นตอนการสังเคราะห์ ก็จะก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซ  $\text{NO}_x$  หรือ  $\text{CO}_x$  ( $x = 1$  หรือ  $2$ ) ซึ่งเป็นแก๊สที่ก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมหากจะผลิตสารดังกล่าวในระดับอุตสาหกรรม แต่มีวิธีในการดักจับแก๊สเหล่านั้นได้ หรือสามารถเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นสารตัวอื่นได้ ซึ่งจะเป็นการกำจัดปัญหาที่จะก่อให้เกิดมลพิษได้ จากนั้นในด้านการนำไปใช้เคลือบ สารในกลุ่มนี้มีองค์ประกอบของ ฟอสฟอรัสที่เป็นธาตุอาหารหลักและโลหะ(II) ที่เป็นธาตุอาหารรองของพืช ด้วยเหตุนี้ ในระหว่างขั้นตอนการเตรียมสารเพื่อเคลือบแล้วเหลือทิ้ง และเคลือบเสร็จ ออกเป็นผลิตภัณฑ์จำหน่าย ใช้งานจนกลายเป็นของเก่า ชำรุด ต้องทิ้ง สິที่เคลือบก็สามารถจะกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อมด้วยกลไกตามธรรมชาติ เป็นปุ๋ยฟอสเฟตและจุลธาตุอาหารของพืชได้ โดยไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม

**คุณภาพดีเหมาะกับการนำไปใช้งานหลายด้าน** สารโซโคเลตตระฟอสเฟตมีสูตรเคมีทั่วไปคือ  $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$  โครงสร้างดังรูปที่ 2 โดยเป็นสารที่มีโครงสร้างที่เสถียรจึงคงทนต่อสภาพอุณหภูมิสูง ทนการกัดกร่อนของสภาพความเป็นกรดและเบสได้ดี และมีสมบัติทางแสง สอดคล้องกับองค์ประกอบโลหะแต่ละชนิด นอกจากจะถูกใช้เป็นตัวเคลือบเซรามิก ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่นหลายด้านด้วยกัน เช่น ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟต สารเรืองแสง อุปกรณ์เซลล์ทางแสง สารเคลือบผิวโลหะกันการกัดกร่อน ใช้ผลิตเซลล์แบตเตอรี่ผสมกับลิเทียมไอออน เป็นต้น

**ดีกว่าสีกกลุ่มโลหะออกไซด์และคาร์บอเนตได้** สีเซรามิก ณ ปัจจุบันนี้ ที่ใช้อยู่

ได้แก่กลุ่มโลหะออกไซด์และคาร์บอเนต อาทิเช่น  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Co}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$  และ  $\text{CuCO}_3$  เป็นต้น โดยทั่วไป การเผาเคลือบสีเหล่านี้จะใช้อุณหภูมิสูงกว่า  $1200^\circ\text{C}$  และต้องนำเข้าจากต่างประเทศเป็นหลัก ในขั้นตอนการใช้งาน จะมีกลไกทางเคมีที่ก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ออกสู่สิ่งแวดล้อม เมื่อใช้สีจำพวกโลหะคาร์บอเนต สารดังกล่าวส่งผลต่อสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน ในขณะที่โลหะออกไซด์ ในขั้นตอนการเตรียมสารเคลือบ หากเหลือจากใช้งานแล้ว จะเป็นของเหลือทิ้ง ตกค้าง ต้องเตรียมบ่อกักเก็บและกำจัดสารเหล่านี้เป็นอย่างดี เพราะโลหะหนักที่ใช้เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์เอง ดังตัวอย่างของโรงงานย้อม หรือชุบโลหะ ที่ต้องมีระบบบำบัดโลหะของเสียที่เหลือใช้ในขั้นตอนการผลิต เพื่อควบคุมมลภาวะที่เกิดขึ้น ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น จากเหตุผลที่กล่าวมา เมื่อใช้ สารโซโคเลตตระฟอสเฟต เริ่มต้นตั้งแต่กระบวนการสังเคราะห์ และได้มาซึ่งสีเคลือบที่มีความสะดวกง่าย ผลิตในประเทศ และราคาถูกกว่า ในขั้นตอนการใช้งานเคลือบก็เผาเคลือบที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $950^\circ\text{C}$  ลดอุณหภูมิและเวลาในการเผาในแต่ละครั้ง ในขณะการเตรียมสีเคลือบหากใช้ไม่หมด เหลือทิ้งสามารถใช้เป็นปุ๋ยโดยการเจือจางกับน้ำในสัดส่วนที่เหมาะสม ใช้รดหญ้า ต้นไม้ และพืชชนิดต่าง ๆ ได้ เพราะสารในกลุ่มนี้มีทั้งธาตุฟอสฟอรัสและจุลธาตุอาหารของพืช ที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซึมไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ แต่มีข้อจำกัดเพียง

ปริมาณจุลธาตุที่เป็นโลหะแต่ละชนิดต้องไม่มากเกินไปเกินความต้องการของพืช เพราะธาตุโลหะดังกล่าวมีมากเกินไปจะก่อให้เกิดพิษหากมีน้อยไปจะไม่เพียงพอทำให้พืชเจริญเติบโตช้า

#### 4. สรุปและวิจารณ์

จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ สารในกลุ่ม สารไซโคลเตตระฟอสเฟต เป็นสารที่มีการศึกษามาตั้งแต่อดีต (1980) และได้ถูกใช้ในต่างประเทศกันมาอย่างต่อเนื่อง มีการจดสิทธิบัตรสารกลุ่มนี้ไปหลายตัว ในเมืองไทยยังไม่มีมีการรายงานเป็นเอกสาร แต่อุตสาหกรรมเซรามิกได้มีการใช้งานแต่เป็นความลับทางการค้าของแต่ละบริษัทผลิต แม้แต่กลุ่มวิจัยต่างประเทศข้อมูลการสังเคราะห์สารกลุ่มนี้ที่มีเจดสีต่าง ๆ ก็แทบไม่มีการระบุ แต่กลุ่มวิจัยของ บรรจง บุญชม ได้ศึกษาและได้รายงานการสังเคราะห์สารในกลุ่มนี้ โดยอาศัยหลักการเตรียมที่ง่าย รวดเร็ว สามารถควบคุมลักษณะทางรูปร่าง สัณฐาน ขนาดอนุภาค นาโน หรือไมโครเมตร และลักษณะเจดสี ต่าง ๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3 ในอนาคตที่เตรียมได้ ผู้เขียนบทความนี้ กำลังทดสอบการใช้งานจริงสำหรับเคลือบเซรามิก หวังว่าจะได้นำสารดังกล่าวนี้ไปทดลองใช้งานในระดับภาคอุตสาหกรรม เพื่อทดแทนการนำเข้าสีเคลือบจากต่างประเทศ และงานวิจัยในอนาคตจะเป็นการสังเคราะห์สีกลุ่มอนุภาคซิลเวอร์และไทเทเนียมโลหะไซโคลเตตระฟอสเฟต เพื่อใช้กับผลิตภัณฑ์ทางเซรามิก ที่เป็นเทคโนโลยีที่เป็นความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Trojan, M., Šulcová, P., Mošner, P. “The synthesis of binary zinc(II)-nickel(II) cyclo-tetraphosphates as new special pigments”. **Dyes and Pigments**. 2000(44) 161.
- [2] Trojan, M., Šulcová, P. “The binary Cd(II)-Zn(II) cyclo-tetraphosphates.” **Thermochim. Acta**.2000 (343)135.
- [3] Trojan, M., Šulcová, P. “Binary Cu(II)—Mn(II) cyclo-tetraphosphates.” **Dyes and Pigments**. 2000(47):291-294.
- [4] Trojan, M. “Binary cyclo-tetraphosphates  $\text{Co}_{2-x}\text{Ca}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  as special pigments.” **J. Mater. Sci.** 2000 (25) 2159.
- [5] Trojan, M., Brandová, D., Paulik, F., Arnold, M. “Mechanism of the thermal dehydration of  $\text{Co}_{1/2}\text{Ca}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,” **J. Therm. Anal. Calorim.** 1990 (36):929-938.
- [6] Brandová, D., Trojan, M., Arnold, M., Paulik, F. “Thermal study of decomposition of  $\text{Cu}_{1/2}\text{Mg}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 0.5 \text{H}_2\text{O}$ .” **J. Therm. Anal. Calorim.** 1990;36: 677-684.

- [7] Trojan, M., Brandová, D. "Mechanism of dehydration of  $\text{Zn}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ." **Thermochim. Acta**, 1990 (157):1-9.
- [8] Trojan, M., Brandová, D. "Study of thermal dehydration of  $\text{Mn}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ." **Thermochim. Acta**, 1990 (157):11-21.
- [9] Trojan, M. "Binary cyclotetraphosphates  $\text{Zn}_{2-x}\text{Ca}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  as new special pigments" **Dyes and Pigments**, 2000 (13):1-10.
- [10] Trojan, M., Brandová, D. "A study of the thermal preparation of  $\text{c-Cd}_{4/3}\text{Ca}_{2/3}\text{P}_4\text{O}_{12}$ ." **Thermochim. Acta**, 1990 (160):349-359.
- [11] Trojan, M., Šulcová, P., Mošner, P. "The synthesis of binary zinc(II)—nickel(II)cyclotetraphosphates as new special pigments." **Dyes and Pigments**, 2000(44):161-164.
- [12] Trojan, M. "Double tetrametaphosphates  $\text{Mn}_{2-x}\text{Ca}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  as special pigments" **Dyes and Pigments**, 2000(12):35-47.
- [13] Trojan, M. "Binary cyclotetraphosphates  $\text{Co}_{2-x}\text{Ni}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  and  $\text{Mn}_{2-x}\text{Ni}_x\text{P}_4\text{O}_{12}$  as colour thermostable products," **Dyes and Pigments**, 1990(12):307-318.
- [14] Boonchom, B., Danvirutai, C. "A rapid co-precipitation and non-isothermal decomposition kinetics of new binary  $\text{Mn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ." **Solid State Sciences**. 2008(10)129-136.
- [15] Boonchom, B., Danvirutai, C. "Rapid Coprecipitation and Non-Isothermal Decomposition Kinetics of New Binary  $\text{Mn}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$ ." **Ind. Eng. Chem. Res.** 2008(47)2941-.
- [16] Boonchom, B., Maensiri, S., Youngme, S., Danvirutai, C. "A simple synthesis and room temperature magnetic properties of new binary  $\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  obtained from a rapid co-precipitation at ambient temperature." **Solid State Sciences**. 2009 (11): 485-490.
- [17] 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.** 98; 2009; 717-723.
- [18] Boonchom, B., Thongkam, M., Vittayakorn, N., Kongtaweelert, S. "A new binary cobalt iron cyclotetraphosphate,  $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$  synthesized by aqueous and acetone media." **J. Alloys Compd**, 486 (1-2):2009; 689-692.
- [19] 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." **Materials Res. Bull.** 44(12):2009; 2206-2210.

- [20] Boonchom, B., Vittayakorn, N. “Flora-like microarchitectures of cobalt iron cyclotetraphosphate obtained by solid state synthesis.” **Powder Technology**. 198: 2010; 25-28
- [21] Boonchom, B., Vittayakorn, N. “One-step thermal synthesis of binary manganese iron cyclotetraphosphate  $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ .” **J. Mater. Sc.** 45:2010:1459-1463