



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ (II) ซิงค์ (II) ไพโรฟอสเฟต

(Cu(II)Zn (II)P₂O₇) สำหรับการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์

Preparation of Copper(II) Zinc(II) Pyrophosphate for Dimethyl ether synthesis

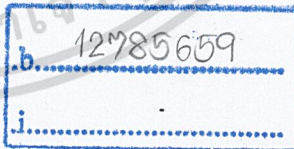
นางสุวิทนา ทองคำ

นางสาวสุดใจ แก้วหนู

สาขา.....

เลขทะเบียน 142893

ชั้นเดือนปี - 6 ส.ค. 2559



ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก เงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ (II) ซิงค์ (II) ไพโรฟอสเฟต
(Cu(II)Zn (II)P₂O₇) สำหรับการสังเคราะห์ไคเมทิลอีเทอร์

แหล่งเงินทุนสนับสนุนด้วยเงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี 5 เดือน ปี ตั้งแต่ ค.ศ. 55 ถึง มี.ค. 57

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

.....หัวหน้าโครงการ : นางสาวทิวา ทองคำ สังกัด ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

.....ผู้ร่วมโครงการวิจัย : นางสาวสุจิตา แก้วหนู สังกัด ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ ซิงค์ไพโรฟอสเฟต (CuZnP₂O₇) โดยวิธีการเผาสถานะของแข็ง (Solid State Combustion) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้สามารถใช้สำหรับการสังเคราะห์ไคเมทิลอีเทอร์ สารตั้งต้นสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ ซิงค์ไพโรฟอสเฟต ได้แก่ คอปเปอร์คาร์บอเนต (CuCO₃·Cu(OH)₂) ซิงค์คาร์บอเนตซิงค์ไฮดรอกไซด์ ((ZnCO₃)₂·(Zn(OH)₂)₃) และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต ((NH₄)₂HPO₄) ผ่านการบดผสมรวมกัน จากนั้นนำไปตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของสาร (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสติฐาน (X-Ray Diffraction, XRD) และการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์จาก TGA พบว่าอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์คอปเปอร์ซิงค์ไพโรฟอสเฟต (CuZnP₂O₇) คือ อุณหภูมิตั้งแต่ 650 องศาเซลเซียสขึ้นไป จากผล FTIR จะพบรูปแบบการสั่นของหน่วยย่อยที่เป็นไพโรฟอสเฟตแอนไอออน (P₂O₇⁴⁻) กราฟ XRD ของคอปเปอร์ซิงค์ไพโรฟอสเฟต (CuZnP₂O₇) ในสัดส่วนโมล Cu:Zn ที่ 1:0 และ 0:1 ตรงกับข้อมูลมาตรฐาน PDF#792075 และ PDF#731648 ตามลำดับ ในขณะที่สัดส่วนโมล Cu:Zn ที่ 0.8:0.2 , 0.6:0.4 , 0.5:0.5 , 0.4:0.6 , 0.2:0.8 ตรงกับข้อมูลมาตรฐาน PDF#820973 และตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM พบว่าเกรนมีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดไม่แน่นอน และมีการซ้อนทับกันเป็นผลึกขนาดใหญ่

คำสำคัญ : คอปเปอร์ซิงค์ไพโรฟอสเฟต การเผาสถานะของแข็ง ตัวเร่งปฏิกิริยา ไคเมทิลอีเทอร์

Research Title: Preparation of Copper(II) Zinc(II) Pyrophosphate for Dimethyl ether synthesis

Researcher: Mrs. Suwattana Thongkam

Co-researcher : Miss Sudjai Keawnoo

Faculty: Science **Department:** Scientific Instrument Centre

ABSTRACT

This research aimed to study preparation and characterization of Copper-Zinc Pyrophosphate (CuZnP_2O_7) catalyst by solid combustion method. The obtained catalysts can use for dimethyl ether synthesis. The substrates are Cupric carbonate ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$), Zinc carbonate zinc hydrate ($(\text{ZnCO}_3)_2 \cdot (\text{Zn(OH)}_2)_3$) and diammonium hydrogen orthophosphate ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) and all chemicals were physical mixed well. Then substrates were taken to characterize their thermal behavior by Thermogravimetric Analysis (TGA), a vibration of catalysts molecules by using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), crystallite size by X-Ray Diffraction (XRD) and finally determined catalysts topology by using Scanning Electron Microscope (SEM). The results from the TGA found an optimize calcinations temperature for Copper-Zinc Pyrophosphate (CuZnP_2O_7) is more than 650°C . The results of FTIR showed the vibration of pyrophosphate anion ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$). From the XRD pattern of Copper-Zinc Pyrophosphate (CuZnP_2O_7) in mole ratio of Cu:Zn at 1:0 and 0:1 mole were matched with a standard pattern, PDF#792075 and PDF#731648 respectively, while the mole ratio of Cu:Zn at 0.8:0.2, 0.6:0.4, 0.5:0.5, 0.4:0.6, 0.2:0.8 mole were matched with a standard pattern PDF#820973. Finally the results of SEM showed that the grain-like size with uncertainly rectangular crystal and some crystals were agglomerated.

Keywords: Copper-Zinc Pyrophosphate Solid state combustion Catalyst Dimethyl ether

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้คงไม่อาจสำเร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้การช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัย ให้คำปรึกษาในการวิเคราะห์ผล และกำลังใจที่ดี

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากทุนสนับสนุนด้วยเงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556.

นางสุวิทนา ทองคำ
นางสาวสุคใจ แก้วหนู



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความรู้เกี่ยวกับพลังงาน.....	3
2.1.1 ความหมายของพลังงาน.....	3
2.1.2 ประเภทของแหล่งพลังงาน.....	3
2.1.3 แนวโน้มพลังงานของโลก - ไทย.....	5
2.1.4 ถ่านหิน (Coal).....	7
2.1.5 ก๊าซธรรมชาติ.....	8
2.1.6 พลังงานชีวมวล.....	9
2.2 ความรู้เกี่ยวกับไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethyl Ether).....	11
2.2.1 เทคโนโลยีการผลิต แหล่งผลิต และราคาดีเอ็มอี.....	15
2.2.2 การใช้งานไดเมทิลอีเทอร์เป็นเชื้อเพลิง.....	17
2.2.3 ประโยชน์ของการใช้ไดเมทิลอีเทอร์เป็นเชื้อเพลิง.....	18
2.3 โลหะฟอสเฟต.....	18
2.3.1 โลหะไพโรฟอสเฟต.....	19
2.3.2 การเผาในสถานะของแข็ง (Solid state combustion).....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ (Characterization).....	21
2.4.1 Thermogravimetric Analysis (TGA).....	21
2.4.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	22
2.4.3 X - ray Diffraction (XRD).....	24
2.4.4 Scanning Electron Microscope (SEM).....	25
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	31
3.1 สารเคมี.....	31
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	31
3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ซิงค์ไพโรฟอสเฟต.....	32
3.3.1 การวิเคราะห์หาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมโลหะฟอสเฟต.....	32
3.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ซิงค์ไพโรฟอสเฟตในสัดส่วนโมลต่างๆ.....	32
3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ (Characterization).....	35
3.4.1 Thermogravimetric Analysis (TGA).....	35
3.4.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	35
3.4.3 X - ray Diffraction (XRD).....	35
3.4.4 Scanning Electron Microscope (SEM).....	36
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	37
4.1 ผลการสังเคราะห์ (Synthesis results).....	37
4.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิคต่างๆ.....	38
4.2.1 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อน TGA.....	39
4.2.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสันของสาร FT-IR.....	42
4.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอณูพื้นฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ XRD.....	49
4.2.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค SEM.....	57
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	61
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	61
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	61
เอกสารอ้างอิง	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

ภาคผนวก	หน้า
ประวัตินักวิจัย	65
	75



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่พบในแหล่งต่างๆของประเทศไทย.....	8
2.2 ผลการทดสอบปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะฟอสเฟต ที่อุณหภูมิ 325°C.....	16
2.3 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติไคเมทิลอีเทอร์กับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ.....	18
2.4 แสดงการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่างๆของแต่ละหมู่ฟังก์ชัน.....	23
3.1 สัดส่วนโมลของคอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟต $Cu_xZn_{1-x}P_2O_7$	34
3.2 น้ำหนักของสารที่ต้องชั่งในแต่ละสัดส่วน โมลของ Cu : Zn.....	35
4.1 การสังเคราะห์คอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟต.....	38
4.2 ตารางแสดงปริมาณและร้อยละผลผลิต (% yield) ของคอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟตที่ได้จากการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการเผาในสถานะของแข็ง.....	38
4.3 การคำนวณค่า lattice parameter และขนาดผลึกของ $CuZnP_2O_7$ ในแต่ละสัดส่วนโมล.....	56
ก แสดงผลการคำนวณน้ำหนักของสารตั้งต้น.....	67
ข ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณน้ำหนักทางทฤษฎี.....	68
ค ผลการคำนวณน้ำหนักทางทฤษฎี.....	68
ง ผลการคำนวณร้อยละผลผลิต.....	69
จ XRD-pattern มาตรฐาน ของ $\alpha-Cu_2P_2O_7$	72
ฉ XRD-pattern มาตรฐาน ของ $\beta-Zn_2P_2O_7$	73
ช XRD-pattern มาตรฐาน ของ $ZnCuP_2O_7$	74

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แผนภาพแหล่งพลังงานที่นำมาใช้ประโยชน์.....	4
2.2 การคาดการณ์ความต้องการพลังงานโลก ตามประเภทเชื้อเพลิง.....	5
2.3 การใช้พลังงานในอดีตและแนวโน้มความต้องการในอนาคต.....	6
2.4 สัดส่วนการใช้พลังงานของประเทศไทย พ.ศ. 2554.....	7
2.5 วัฏจักรชีวิตของเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ยั่งยืนจากชีวมวล.....	11
2.6 แผนภาพการสังเคราะห์แก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการต่างๆ.....	13
2.7 การเปรียบเทียบการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ และ Gasifier.....	14
2.8 กระบวนการผลิตไดเมทิลอีเทอร์แบบทางอ้อม (Indirect DME Synthesis) หรือกระบวนการกำจัดน้ำของเมทานอล (Methanol Dehydration).....	15
2.9 กระบวนการผลิตไดเมทิลอีเทอร์แบบทางตรง (Direct DME Synthesis).....	16
2.10 โครงสร้างของไพโรฟอสเฟตแอนไฮไดรต์.....	19
2.11 โครงสร้างของซิงค์ไพโรฟอสเฟต.....	19
2.12 Michelson interferometer ใน FTIR Spectrometer.....	24
2.13 องค์ประกอบภายในเครื่อง X - ray Diffraction.....	24
2.14 Bragg's Law.....	25
2.15 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	26
3.1 แผนภาพการวิเคราะห์หาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมโลหะฟอสเฟต.....	33
3.2 แผนภาพแสดงวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	34
4.1 กราฟแสดงการสลายตัวทางความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารที่เตรียมจาก $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ กับ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	39
4.2 กราฟแสดงการสลายตัวทางความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารที่เตรียมจาก $(\text{ZnCO}_3)_2 \cdot (\text{Zn}(\text{OH})_2)_3$ กับ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	41
4.3 แสดงสเปกตรัม FT-IR ของ $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ในสัดส่วน โมลของ Cu:Zn ที่ 1:0 โมล.....	43
4.4 แสดงสเปกตรัม FTIR ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.8:0.2 โมล.....	44
4.5 แสดงสเปกตรัม FTIR ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.6:0.4 โมล.....	45
4.6 แสดงสเปกตรัม FTIR ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.5:0.5 โมล.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.7 แสดงสเปกตรัม FTIR ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.4:0.6 โมล.....	47
4.8 แสดงสเปกตรัม FTIR ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.2:0.8 โมล.....	48
4.9 แสดงสเปกตรัม FTIR ของสาร $\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0:1 โมล.....	49
4.10 แสดง XRD pattern ของสาร $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 1:0 โมล.....	50
4.11 แสดง XRD pattern ของสาร $\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0:1 โมล.....	50
4.12 แสดง XRD pattern ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.8:0.2 โมล.....	51
4.13 แสดง XRD pattern ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.6:0.4 โมล.....	52
4.14 แสดง XRD pattern ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.5:0.5 โมล.....	52
4.15 แสดง XRD pattern ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.4:0.6 โมล.....	53
4.16 แสดง XRD pattern ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.2:0.8 โมล.....	54
4.17 แสดงการเปรียบเทียบ XRD pattern ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลต่างๆ.....	55
4.18 ภาพถ่าย SEM ของ $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 1:0 โมล.....	57
4.19 ภาพถ่าย SEM ของ CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.8:0.2 โมล.....	57
4.20 ภาพถ่าย SEM ของ CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.6:0.4 โมล.....	58
4.21 ภาพถ่าย SEM ของ CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.5:0.5 โมล.....	58
4.22 ภาพถ่าย SEM ของ CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.4:0.6 โมล.....	59
4.23 ภาพถ่าย SEM ของ CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.2:0.8 โมล.....	59
4.24 ภาพถ่าย SEM ของ $\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0:1 โมล.....	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันการเพิ่มจำนวนของประชากรโลกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้มีการขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรม การขนส่ง และการอุปโภคบริโภคเพิ่มมากขึ้น จึงก่อให้เกิดปัญหาทางด้านการใช้พลังงานซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซธรรมชาติ ส่งผลให้ราคาน้ำมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงมีอยู่อย่างจำกัดและคาดว่าจะหมดไปในอนาคต จึงจำเป็นต้องหาพลังงานทดแทนเพื่อนำมาทดแทนพลังงานที่กำลังจะหมดไป โดยพลังงานทดแทนนั้นจะต้องหาได้ง่ายและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ซึ่งมีการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลาย ในปัจจุบันพบว่าพลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นพลังงานทดแทน คือ ไฮโดรเจน มีเทน เมทานอล เอทานอล เชื้อเพลิงชีวมวล และหนึ่งในนั้นคือ ไดมethylอีเทอร์ โดยมีงานวิจัยพบว่า ไดมethylอีเทอร์มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) และสามารถทำให้เป็นของเหลวได้ง่าย เมื่อเกิดการเผาไหม้จะไม่ก่อให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ สารชนิดเปอร์ออกไซด์ และฝุ่นละออง (aerosol) ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศและไม่มีปัญหาด้านความเป็นพิษในการเก็บรักษาและการขนส่งจึงได้รับการยอมรับให้เป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง นอกจากนี้ไดเมทิลอีเทอร์ยังมีประโยชน์อีกมากมาย เช่น เป็นสารมัธยันตร์ (Intermediate) ในการผลิตโอเลฟินเบา เมทิลอะซีเตท ไดมethylซัลเฟต เป็นต้น ด้วยเหตุผลดังกล่าว ไดมethylอีเทอร์จึงเป็นเชื้อเพลิงที่น่าสนใจในการพัฒนาการผลิตเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือก

การผลิตไดเมทิลอีเทอร์สามารถผลิตได้ 2 กระบวนการคือ กระบวนการสังเคราะห์โดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์และกระบวนการขจัดน้ำของเมทานอล ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์โดยตรงจะเปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์เป็นเมทานอล จากนั้นจึงเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นไดเมทิลอีเทอร์ด้วยปฏิกิริยาการขจัดน้ำในลำดับต่อมา ซึ่งเมทานอลนั้นสามารถหาได้ง่ายในประเทศไทยและยังเป็นสารที่มีอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าแก๊สสังเคราะห์ ทั้งนี้ยังพบว่าปฏิกิริยาการขจัดน้ำจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันในอุตสาหกรรมนั้น ส่วนใหญ่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแบบกรดการค่า ตัวอย่างเช่น HZSM-5 ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยากรดการค่านั้น ไม่สามารถควบคุมผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากว่าความเป็นกรดที่สูงของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นโอเลฟินและปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นไดเมทิลอีเทอร์น้อยลง นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยายังเสื่อมสภาพได้ง่าย เนื่องจากเมื่อทำปฏิกิริยานานขึ้นจะทำให้เกิดโค้กบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้อายุการใช้งานลดลง แต่เมื่อไม่นานมานี้มีงานวิจัยหลายฉบับพบว่าโลหะฟอสเฟตมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการขจัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำของเมทานอล และมีสมบัติความเป็นกรดที่ต่ำกว่าซีโอไลต์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในอุตสาหกรรมอีก ทั้งโลหะฟอสเฟตเป็นสารเคมีที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ยทางการเกษตรที่มีความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างช้าๆ จึงสามารถนำสารโลหะฟอสเฟตมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการเตรียมสารโลหะฟอสเฟต ชนิดคอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟตโดยวิธีการเผาสถานะของแข็ง ในอัตราส่วนของคอปเปอร์ต่อซิงค์ ต่างๆกัน และตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารที่สังเคราะห์ขึ้น โดยคอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟตที่เตรียมได้นั้น คาดว่าสามารถนำไปใช้เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนการขจัดน้ำของเมทานอลเพื่อเปลี่ยนเป็นไดเมทิลอีเทอร์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟต
- 1.2.2 ศึกษาลักษณะและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาการเตรียมและแสดงเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟต โดยมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรดังต่อไปนี้

- 1.3.1 สารตั้งต้น ได้แก่ คอปเปอร์คาร์บอเนตและซิงค์คาร์บอเนตซิงค์ไฮดรอกไซด์
- 1.3.2 แหล่งที่มาของฟอสเฟต ได้แก่ ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนอโทฟอสเฟต
- 1.3.3 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟตโดยปรับสัดส่วนโมลของ
Cu : Zn ดังนี้ 1 : 0, 0.8 : 0.2, 0.6 : 0.4, 0.5 : 0.5, 0.4 : 0.6, 0.2 : 0.8, 0 : 1

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้วิธีการเตรียมคอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟตที่ได้จากวิธีการเผาสถานะของแข็ง (Solid state combustion method)
- 1.4.2 ได้ลักษณะองค์ประกอบและคุณสมบัติของคอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟตตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อนำไปพัฒนาในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เกี่ยวกับพลังงาน [1]

พลังงานมีความสำคัญต่อสรรพสิ่งในโลก เป็นรากฐานสำคัญที่ทำให้สิ่งมีชีวิตเจริญเติบโต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโลกปัจจุบันมนุษย์สามารถนำพลังงานต่างๆมาใช้ประโยชน์ก่อให้เกิดสิ่งอำนวยความสะดวกเพื่อความอยู่ของมนุษย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1.1 ความหมายของพลังงาน

พลังงาน หมายถึง ความสามารถซึ่งมีอยู่ในตัวของสิ่งให้อาจให้แรงงานได้

พลังงาน หมายถึง ประสิทธิภาพในการทำงานได้ หรือความสามารถที่จะทำงานได้

พลังงาน หมายถึง ความสามารถในการทำงานซึ่งมีอยู่ในตัวของสิ่งให้อาจให้งานได้ โดยการทำให้วัตถุหรือธาตุเกิดการเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนรูปแบบไปได้ การที่วัตถุเคลื่อนที่ จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ก็เพราะมีแรงหรือพลังงานเข้าไปกระทำ

พลังงาน หมายถึง สิ่งที่ทำให้สิ่งต่างๆเคลื่อนที่ได้ สิ่งใดก็ตามที่เคลื่อนไหว เติบโต หรือ ทำงานในทางใดทางหนึ่งย่อมมีพลังงาน

2.1.2 ประเภทของแหล่งพลังงาน

พลังงานสามารถจำแนกประเภทตามลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

2.1.2.1 จำแนกตามแหล่งที่ได้มา แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. แหล่งพลังงานปฐมภูมิ (Primary energy resources) หมายถึง แหล่งพลังงานต้นกำเนิดเป็นแหล่งพลังงานที่เกิดขึ้นหรือมีอยู่ตามธรรมชาติ สามารถนำมาใช้โดยตรง ได้แก่ น้ำ แสงแดด ลม เชื้อเพลิงตามธรรมชาติ เช่น น้ำมันดิบ ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ พลังงาน เป็นต้น

2. แหล่งพลังงานทุติยภูมิ (Secondary energy resources) หมายถึง แหล่งพลังงานแปรรูป ซึ่งเป็นพลังงานที่ได้ มาโดยการนำพลังงานต้นกำเนิดมาแปรรูปให้อยู่ในรูปที่ใช้ประโยชน์ในลักษณะต่างๆได้ เช่น พลังงานไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ปิโตรเลียมเหลว ถ่านไม้ เป็นต้น

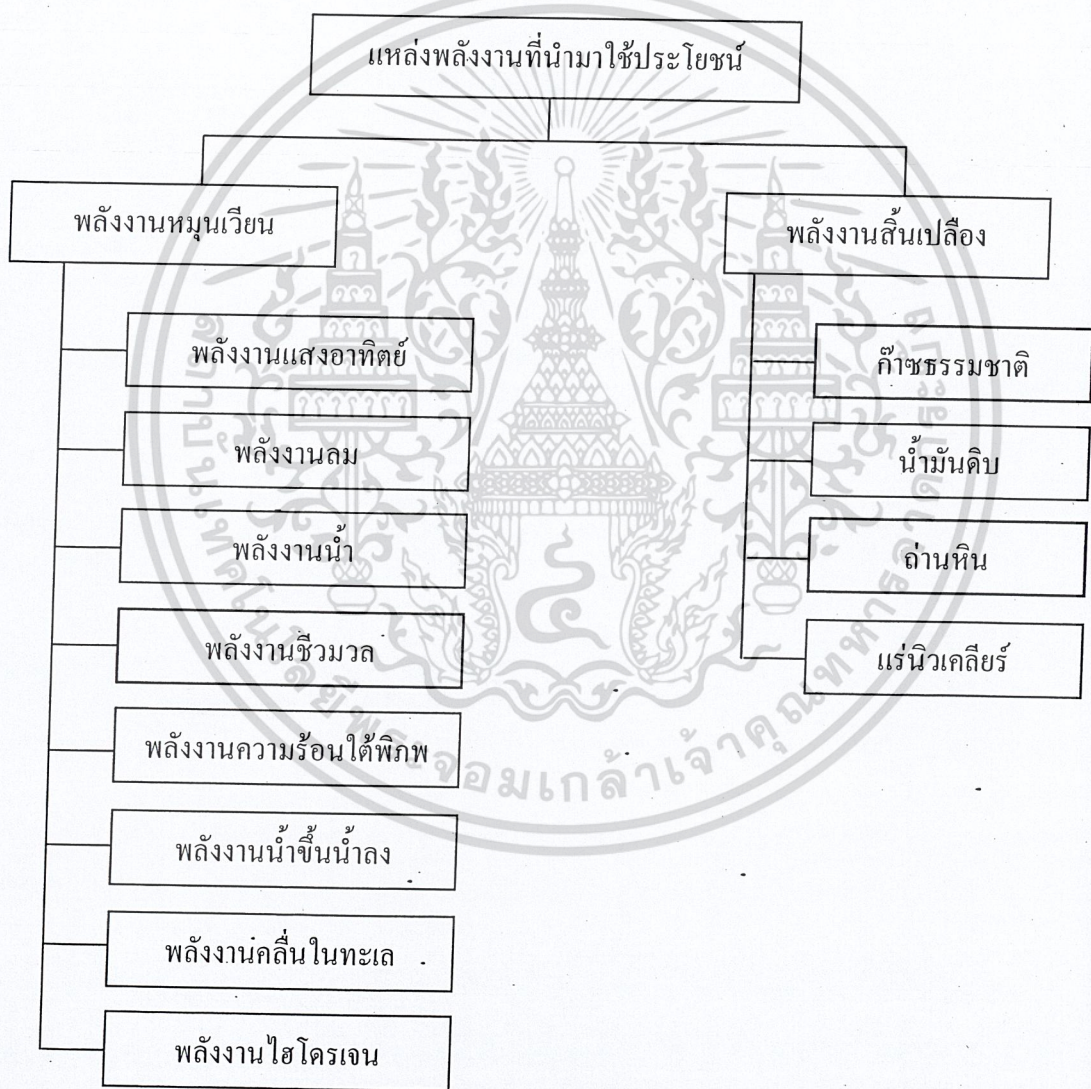
2.1.2.2 จำแนกตามแหล่งที่นำมาใช้ประโยชน์ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. แหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy resources) หมายถึง แหล่งพลังงานที่ได้จากธรรมชาติที่นำไปใช้ได้ไม่มีวันหมด ซึ่งสามารถสร้างทดแทนได้ ในเวลาสั้นๆโดยธรรมชาติหลังจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการใช้ไป จึงมีหลายชื่อที่ใช้เรียก เช่น พลังงานทดแทน พลังงานใช้ไม่หมด พลังงานสะอาดและพลังงานสีเขียว เนื่องจากไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมนั่นเอง ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังน้ำ เป็นต้น

2. แหล่งพลังงานสิ้นเปลือง (Non-renewable energy resources) หมายถึง แหล่งพลังงานที่ไม่สามารถสร้างขึ้นมาใหม่หรือหามาทดแทนได้ตามตามความต้องการมีแต่จะน้อยลงไปหรือหมดสิ้นไป ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันดิบ ถ่านหิน และพลังงานนิวเคลียร์



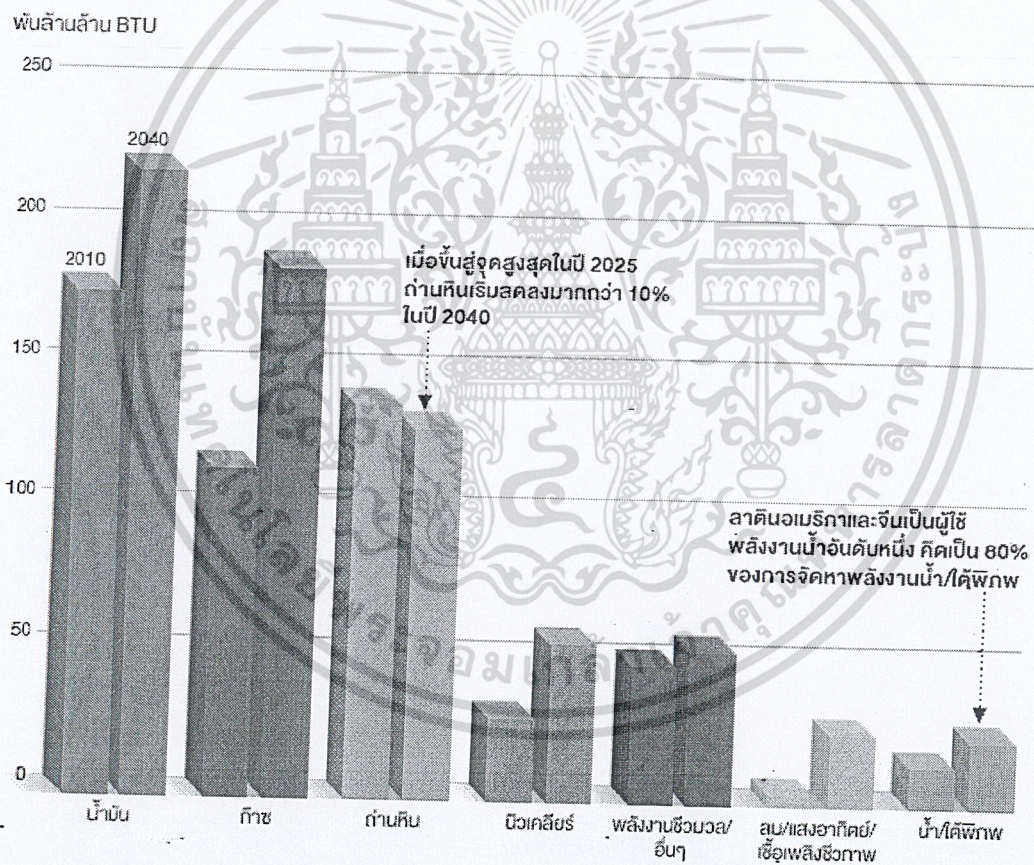
รูปที่ 2.1 แผนภาพแหล่งพลังงานที่นำมาใช้ประโยชน์ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 แนวโน้มพลังงานของโลก - ไทย

แนวโน้มพลังงานโลก รายงานการคาดการณ์อนาคตพลังงานโลกในระยะยาวของเอ็กซอนโมบิล ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2012 ถึง 2040 คาดการณ์ว่า การเติบโตของจำนวนประชากรและเศรษฐกิจเป็นปัจจัยสำคัญที่ขับเคลื่อนความต้องการพลังงานให้สูงขึ้น แต่โลกจะใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นและก้าวสู่การใช้เชื้อเพลิงคาร์บอนต่ำ ดังแผนภูมิที่ 2.1 แสดงให้เห็นการคาดการณ์ความต้องการพลังงานโลก ตามประเภทเชื้อเพลิง [2]

รูปที่ 2.2 การคาดการณ์ความต้องการพลังงานโลก ตามประเภทเชื้อเพลิง [2]



แม้จะมีความก้าวหน้าในการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ แต่การเพิ่มขึ้นของประชากรและการขยายตัวทางเศรษฐกิจจะส่งผลให้ความต้องการพลังงานโดยรวมของโลกพุ่งสูงขึ้น ความต้องการพลังงานในทุกรูปแบบจะเพิ่มขึ้นในอัตราเฉลี่ยต่อปีร้อยละ 0.9 นับแต่ปี ค.ศ. 2010 จนถึงปี ค.ศ. 2040 น้ำมันจะยังคงเป็นแหล่งพลังงานอันดับหนึ่งของโลก ก๊าซธรรมชาติจะเป็นแหล่งพลังงานหลักที่เติบโตเร็วที่สุดในทาง

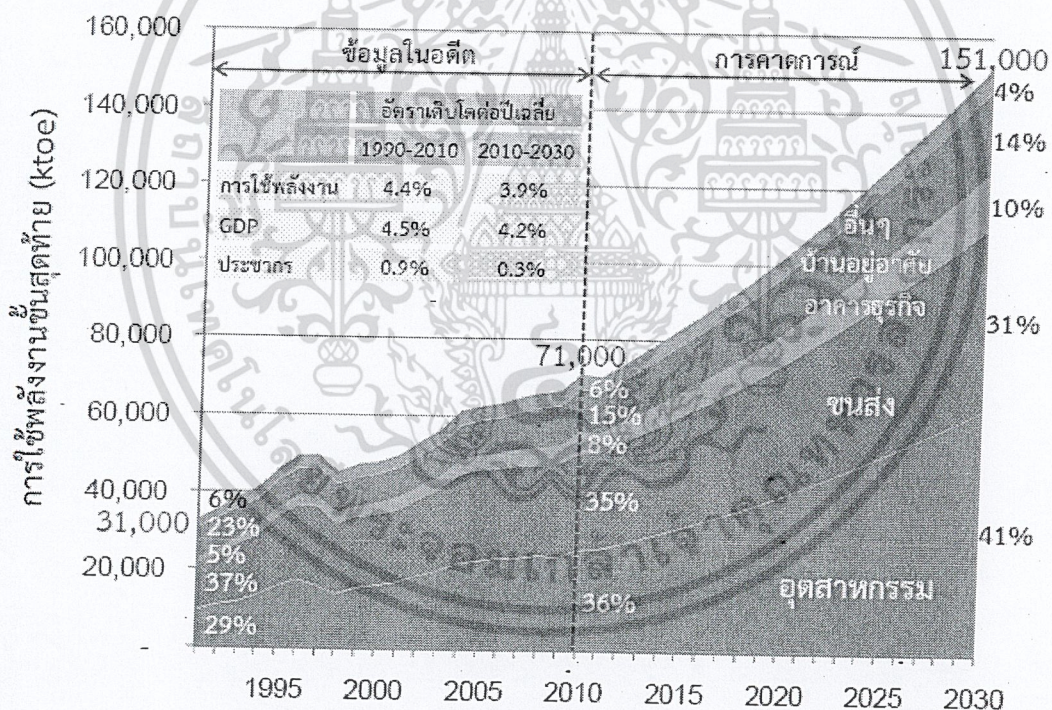
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

กลับกัน ความต้องการถ่านหินจะสูงสุดในปี ค.ศ. 2025 และจะเริ่มลดลง อันมีผลมาจากการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานที่มีส่วนผสมของคาร์บอนต่ำ [2]

ประเทศไทยได้มีการวางแผนด้านพลังงาน คือ แผนอนุรักษ์พลังงาน (พ.ศ. 2554 - 2573) เพื่อเป็นการประหยัดหรือการลดการใช้พลังงานที่ไม่จำเป็นและการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า

ในระยะเวลา 20 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2533-2553) การใช้พลังงานของประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเฉลี่ยร้อยละ 4.4 ต่อปี จนปัจจุบันมีการใช้พลังงานเป็น 2.3 เท่าของปี พ.ศ. 2533 ซึ่งเป็นการเติบโตที่ควบคู่กับอัตราการขยายตัวทางเศรษฐกิจซึ่งมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 4.5 ต่อปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมการผลิตและอาคารธุรกิจ [3]

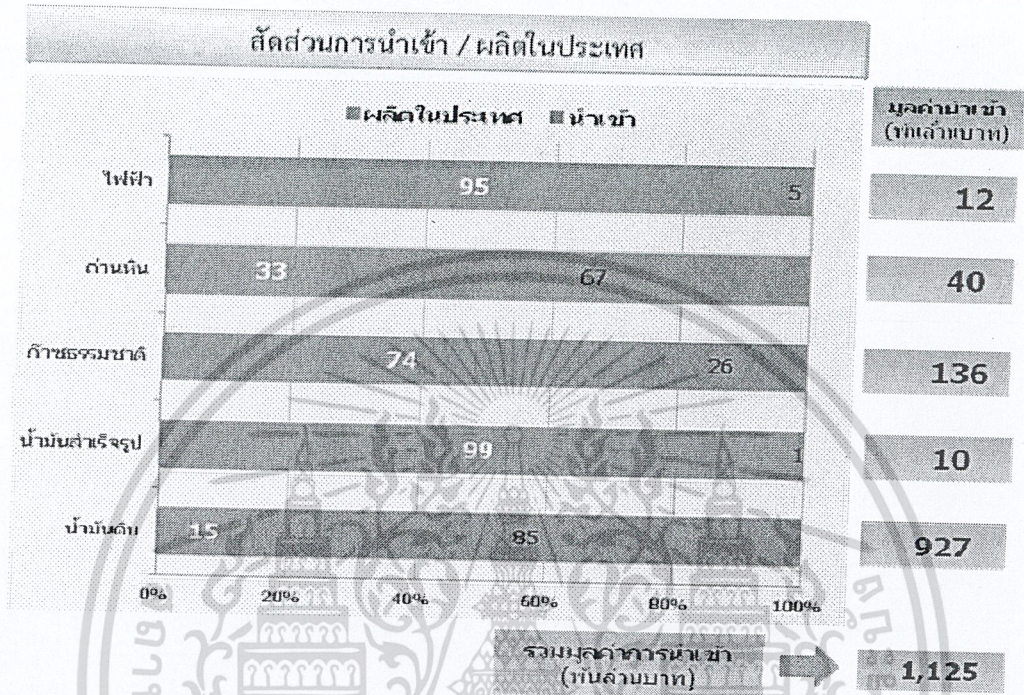
รูปที่ 2.3 การใช้พลังงานในอดีตและแนวโน้มความต้องการในอนาคต [3]



ประเทศไทยต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศเป็นหลัก จากข้อมูล ในปี พ.ศ. 2554 ที่ผ่านมาพบว่า กว่าร้อยละ 60 ของความต้องการพลังงานเชิงพาณิชย์ขึ้นต้น มาจากการนำเข้า โดยมีส่วนการนำเข้าน้ำมันสูงถึงร้อยละ 80 ของปริมาณการใช้น้ำมันทั้งหมดภายในประเทศ และยังมีแนวโน้มจะสูงขึ้นอีกเพราะไม่สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตปิโตรเลียม ในประเทศได้ทันกับความต้องการใช้งาน [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.4 สัดส่วนการใช้พลังงานของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2554 [4]



การพัฒนาพลังงานทดแทน จะช่วยลดการพึ่งพาและการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงและพลังงานชนิดอื่นได้ ประเทศไทยนั้นถือได้ว่าเป็นประเทศเกษตรกรรมซึ่งผลผลิตทางการเกษตรนั้นสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงาน ทั้งชีวมวล ก๊าซชีวภาพ รวมไปถึง ไบโอดีเซลและเอทานอล อีกทั้งภายหลังจากแปรรูปจากอุตสาหกรรมอาหาร วัสดุเหลือทิ้งยังสามารถก่อให้เกิดเป็นพลังงานจากขยะได้อีกด้วย นอกจากนี้ประเทศไทยยังมีศักยภาพด้านพลังงานธรรมชาติ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ $18.2 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ และบางแห่งของประเทศมีศักยภาพพลังงานลมดี จึงทำให้ประเทศไทยมีศักยภาพด้านพลังงานทดแทนอยู่ในระดับดีมาก และมีโอกาสที่จะส่งเสริมพลังงานทดแทนให้กลายเป็นพลังงานที่มีส่วนสร้างความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศไทยได้ในอนาคต

2.1.4 ถ่านหิน (Coal) [1]

ถ่านหิน (Coal) เป็นแหล่งเชื้อเพลิงธรรมชาติชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยสารคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และมากกว่าร้อยละ 70 โดยปริมาตร มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีดำ ถ่านหินแบ่งออกตามค่าความร้อนที่ได้และร้อยละของจำนวนคาร์บอนเป็น 4 ประเภท คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีที่สุด ให้ค่าความร้อนมากกว่า 25,600 กิโลจูลต่อกิโลกรัม โดยมีค่าคาร์บอนคงที่มากกว่าร้อยละ 86
2. บิทูมินัส (Bituminous) เป็นถ่านหินที่ให้ค่าความร้อนมากกว่า 25,600 กิโลจูลต่อกิโลกรัม เช่นเดียวกับแอนทราไซต์ แต่มีค่าคาร์บอนคงที่ต่ำกว่าร้อยละ 86
3. ซับบิทูมินัส (Sub bituminous) เป็นถ่านหินที่ให้ค่าความร้อนระหว่าง 19,300 ถึง 25,600 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้แล้วต้องไม่จับตัวเป็นก้อน
4. ลิกไนต์ (Lignite) เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำที่สุด ให้ค่าความร้อนระหว่าง 7,000 ถึง 19,300 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

2.1.5 ก๊าซธรรมชาติ [1]

ก๊าซธรรมชาติ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่งประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอน ที่เกิดจากการทับถมของซากพืชซากสัตว์ประเภทจุลินทรีย์ที่มีอายุหลายร้อยล้านปี ซึ่งสามารถแยกส่วนประกอบได้เป็น มีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทน เพนเทน เกิดจากการสะสมและทับถมของซากสิ่งมีชีวิตตามชั้นหิน ดิน และในทะเล เป็นเวลาหลายร้อยปีแล้วแปรสภาพเป็นก๊าซและน้ำมัน เนื่องจากความร้อนและความกดดันของโลกที่สะสมอยู่ในชั้นดินหรือเป็นก๊าซ ที่ติดมากับน้ำมันดิบจากหลุมน้ำมันดิบ

องค์ประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนในก๊าซธรรมชาติขึ้นอยู่กับแหล่งที่ผลิต ได้แก่มีเทน อีเทน โพรเพน และบิวเทน โดยมีก๊าซมีเทนเป็นส่วนผสมที่มีปริมาณมากที่สุด

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่พบในแหล่งต่างๆของประเทศไทย [5]

ส่วนประกอบ	ตะวันออก	ตะวันตก	ชนอม	น้ำพอง	สิริกิติ์
CH ₄	74.1-77.5 %	72.4 %	62.6-69.6 %	95.5 %	84.7-85.4 %
C ₂ H ₂	5.4-6.0 %	3.5 %	8.3-9.0 %	0.6 %	11.2-11.4 %
C ₃	1.5-2.4 %	1.06 %	0.72-5.1 %	0.07 %	1.34-1.81 %
C ₄	0.59-0.9 %	0.47 %	0.02-0.38 %	0.06 %	0.24-0.48 %
C ₅	0.1-0.15 %	0.1 %	0.05-0.19 %	-	0.07-0.14 %
C ₆	0.02-0.04 %	0.7 %	0.01-0.3 %	0.02 %	0.03-0.065 %
N ₂	2.0-2.2 %	16 %	0.7-0.76 %	1.8 %	0.5-0.6 %
CO ₂	12.7-14.4 %	6.2-6.4 %	20.3-21.9 %	2 %	1 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัชนีวอบบี (MJ/m ³)	41.9-44.0	38.9-39.3 %	34.6-42.14 %	48.70 %	52.9-53.1
กำมะถัน (PPM)	<16	10-19 %	<16	<500	-
มีเทน	75-82	86 %	64-81	106 %	75-78
A/F5	11.6-12.0	11.1 %	10.3 %	15.8 %	15.8 %

ในประเทศไทยมีแหล่งก๊าซธรรมชาติที่ใหญ่ที่สุดอยู่ที่อ่าวไทย เมื่อทำการขุดเจาะก๊าซธรรมชาติได้แล้ว จะส่งก๊าซไปตามท่อก๊าซที่ฝังอยู่ในทะเล เพื่อเข้าสู่โรงแยกก๊าซและทำการแยกก๊าซธรรมชาติออกตามประโยชน์การใช้งาน ดังนี้

1. ก๊าซมีเทน ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้แทนน้ำมันเตาและใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปุ๋ยเคมีและเมทานอล
2. ก๊าซฮีเทน ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทิลีน
3. ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) และโพรเพน ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มในครัวเรือน และในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า ซีเมนต์ ไฟฟ้า และใช้ในรถยนต์
4. ก๊าซธรรมชาติเหลว (Natural Gasoline) ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันเบนซินจากก๊าซธรรมชาติ
5. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้ในการทำน้ำแข็งแห้ง น้ำอัดลม เป็นต้น

2.1.6 พลังงานชีวมวล [6]

ชีวมวลเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ มวลชีวภาพหรือชีวมวลสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร ได้แก่

1. แกลบ ได้จากการสีข้าวเปลือก
2. ชานอ้อย ได้จากการผลิตน้ำตาลทราย
3. กากปาล์ม ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด
4. กากมันสำปะหลัง ได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง
5. ชังข้าวโพด ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดดอก
6. กาบและกะลามะพร้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำพลังงานชีวมวลไปใช้ประโยชน์

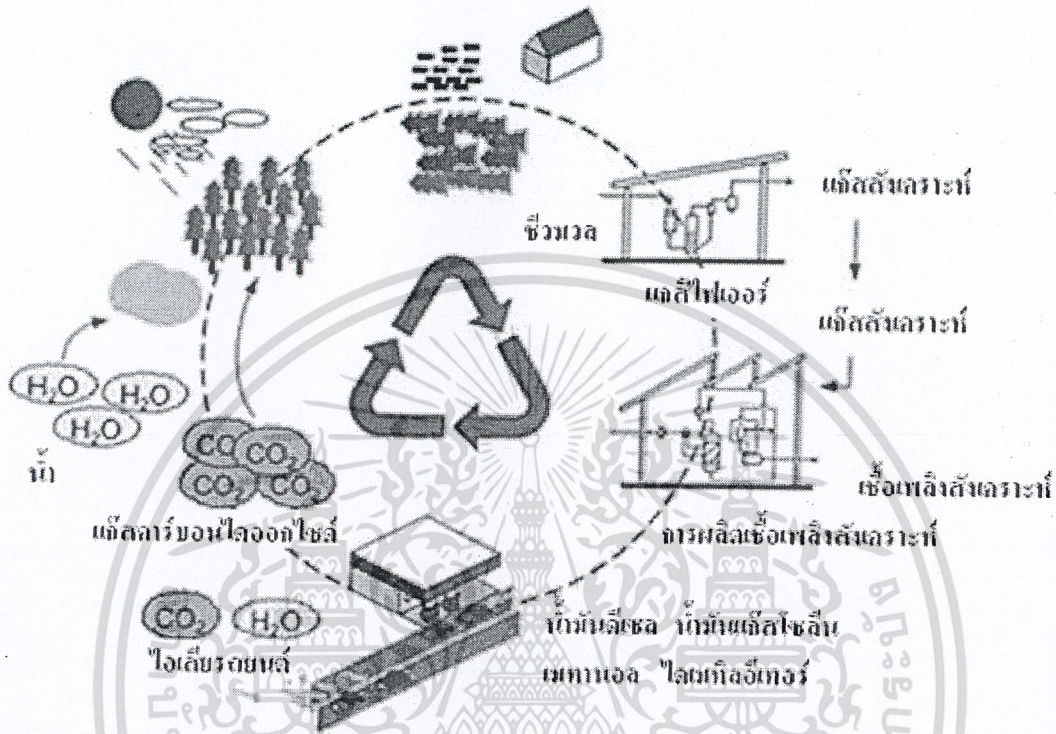
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากชีวมวลด้วยเทคโนโลยีต่าง ๆ นั้นมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ได้แก่

1. เอทานอล (C_2H_5OH) เป็นของเหลวไม่มีสี มีจุดเดือดอยู่ที่ 78 องศาเซลเซียสในที่นี่หมายถึง เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) ซึ่งผลิตได้จากอ้อย ข้าวโพดและไม้ เอทานอลช่วยปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องยนต์ ปล่อยก๊าซพิษน้อยกว่าน้ำมันเบนซิน แต่ต้นทุนการผลิตเอทานอลสูงกว่าปิโตรเลียม เอทานอลสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้เลยหรือสามารถนำไปใช้ร่วมกับน้ำมันเบนซิน
2. เมทานอล (CH_3OH) เป็นของเหลวไม่มีสี มีจุดเดือดอยู่ที่ 65 องศาเซลเซียส เรียกอีกอย่างว่า วูดแอลกอฮอล์ (wood alcohol) หรือเมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl alcohol) สามารถผลิตได้จากชีวมวลที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ถ่านหิน และแก๊สธรรมชาติ แต่เมทานอล ไม่สามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ เนื่องจากวัตถุดิบมีราคาสูงและความไม่คุ้มทุน
3. เชื้อเพลิงไฮโดรเจน (Hydrogen fuel) เป็นเชื้อเพลิงสะอาด ผลิตได้จากก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน หรือการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (electrolysis of water) ซึ่งเชื้อเพลิงที่ได้จากก๊าซธรรมชาติมีราคาถูกที่สุด เชื้อเพลิงไฮโดรเจนสามารถใช้กับเครื่องยนต์เบนซินปกติ แต่จะให้ประสิทธิภาพที่ดีมากขึ้นเมื่อใช้กับเครื่องยนต์ที่ผ่านการดัดแปลงแล้ว เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะถูกเก็บในรูปของก๊าซภายใต้ความดันสูง ไฮโดรเจนเหลวหรือไฮไดรด์โลหะ (metal hydride)
4. ไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethyl ether) เป็นเชื้อเพลิงที่น่าสนใจ เนื่องจากมีความเหมาะสมกับความต้องการที่หลากหลาย เช่น การนำไปใช้หุงต้มอาหาร การให้ความร้อนการนำไปผลิตเชื้อเพลิงสำหรับการขนส่ง และการนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า
5. ไบโอดีเซล (Biodiesel) มีสมบัติคล้ายดีเซลปกติ โดยสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ปกติได้ ซึ่งไบโอดีเซลสามารถผลิตได้จากพืชในตระกูลถั่วเหลือง ถั่วเหลือง ปาล์ม ดอกทานตะวัน น้ำมันจากสาหร่าย นอกจากนี้ ไบโอดีเซลยังสามารถผลิตได้จากน้ำมันประเภทต่างๆข้างต้นที่ผ่านการใช้งานมาแล้วได้อีกด้วย
6. ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สามารถผลิตได้จากการหมักโดยไม่ใช้ออกซิเจนของอินทรีย์วัตถุ มีระบบการผลิตที่ง่ายไม่สลับซับซ้อน สามารถผลิตได้ทั้งในระบบเล็กและใหญ่ ไบโอก๊าซนำไปใช้ประโยชน์ได้ในการให้ความร้อนและใช้ในเครื่องยนต์ สามารถผลิตจากวัตถุดิบหลายชนิด เช่น มูลสัตว์และกากอุตสาหกรรม

ในขณะที่เกิดวิกฤติการณ์ราคาน้ำมันสูงขึ้นเนื่องด้วยเหตุปัจจัยต่างๆดังนั้นการเลือกใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานชีวมวล ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้ไม่หมด มีแหล่งพลังงานอยู่ภายในประเทศ และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย การใช้ชีวมวลจึงนับเป็นทางเลือกหนึ่งของประเทศที่มีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มขึ้น

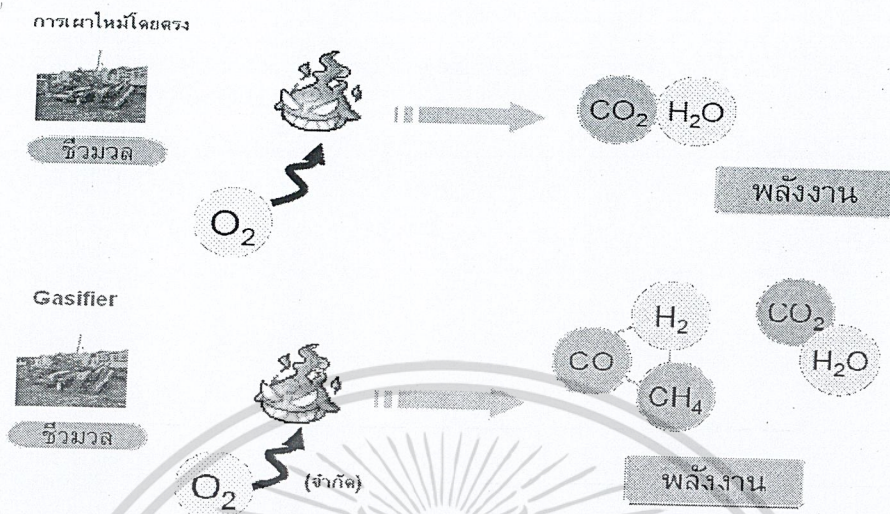


รูปที่ 2.5 วงจรชีวิตของเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ยั่งยืนจากชีวมวล [9]

2.2 ความรู้เกี่ยวกับไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethyl Ether)

ไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethyl Ether: DME) หรือที่เรียกชื่อย่อว่า ดีเอ็มอี มีสูตรทางเคมี คือ C_2H_6O เป็นสารออกซิเจนเนตประเภทอีเทอร์ ซึ่งมีสถานะเป็นก๊าซที่ไม่มีสีที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ทั้งนี้คุณสมบัติของดีเอ็มอีจะคล้ายคลึงกับก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) กล่าวคือ มีจุดเดือด ณ ความดันบรรยากาศที่ -25 องศาเซลเซียส จึงสามารถทำให้อยู่ในรูปของของเหลวได้ง่าย

การผลิตไดเมทิลอีเทอร์สามารถผลิตได้ 2 กระบวนการคือ กระบวนการสังเคราะห์จากแก๊สสังเคราะห์ และกระบวนการขจัดน้ำของเมทานอล ซึ่งแก๊สสังเคราะห์และเมทานอลสามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการต่อไปนี้

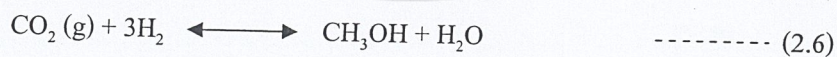
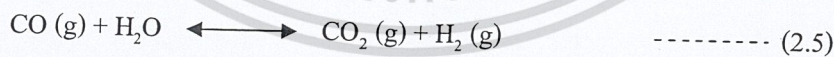


รูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ และ Gasifier [8]

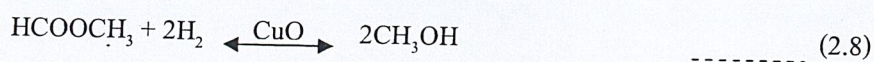
การสังเคราะห์เมทานอลจากแก๊สสังเคราะห์ [9]

เมทานอล มีสูตร โครงสร้างทางเคมีคือ CH_3OH มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง เป็นสารเคมีพื้นฐานที่สำคัญในอุตสาหกรรมเคมีต่างๆ มีเปลวไฟสีฟ้าเมื่อเกิดการเผาไหม้ โดยเกิดการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่มีเขม่า สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ทั้งการใช้ทางตรงและทางอ้อม สำหรับการใช้อย่างตรงนั้น คือ การใช้เป็นเชื้อเพลิงในตะเกียง หรือในเครื่องยนต์ดีเซล แต่ไม่ค่อยเป็นที่นิยม เนื่องจากมีพิษต่อร่างกายซึ่งทำให้ตาบอดและเสียชีวิตได้

เมทานอลสามารถผลิตได้จากกระบวนการเคมีความร้อน โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ซึ่งรู้จักกันดีในชื่อ แก๊สสังเคราะห์ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม ($CO:H_2 = 1:2$) ดังแสดงในสมการที่ 2.5 และ 2.6

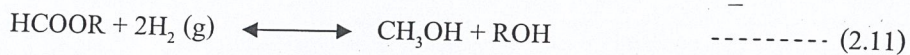
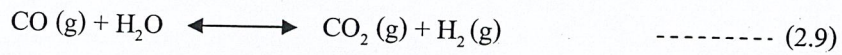


การผลิตเมทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาอัลคอกไซด์ (RONa) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ของทองแดง ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

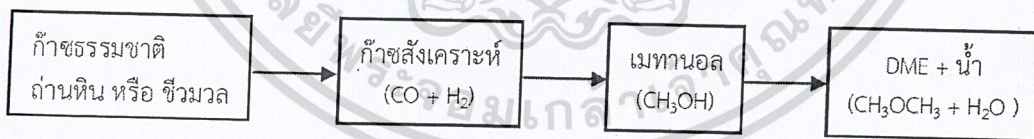
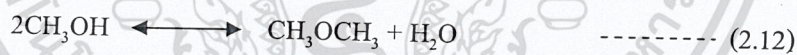
นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนากระบวนการสังเคราะห์การผลิตเมทานอลด้วยกระบวนการที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (ใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา) ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (ตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ของทองแดง) ดังสมการที่ 2.9, 2.10 และ 2.11



2.2.1 เทคโนโลยีการผลิต แหล่งผลิต และราคาดีเอ็มอี [10]

2.2.1.1 เทคโนโลยีการผลิต วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตดีเอ็มอี ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน หรือ ชีวมวล โดยกระบวนการผลิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

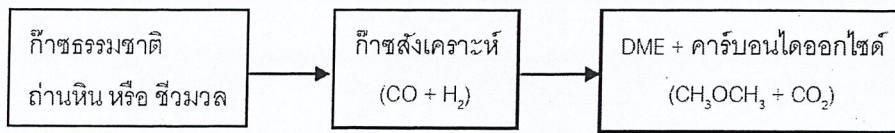
1. การผลิตแบบทางอ้อม โดยผ่านกระบวนการกำจัดน้ำ (Dehydration) ของเมทานอล การผลิตวิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้กันโดยทั่วไป โดยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และ ก๊าซไฮโดรเจน (ก๊าซสังเคราะห์) ที่ได้จากกระบวนการก๊าซซิฟิเคชันของถ่านหินหรือชีวมวล หรือจากกระบวนการรีฟอร์มมิงของก๊าซธรรมชาติ จะถูกนำมาทำปฏิกิริยากันเพื่อผลิตเมทานอล จากนั้น เมทานอลจะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นเกิดเป็น ดีเอ็มอี และ น้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด เช่น แกมมาออกซิโดลูมินา หรือ ซีโอไลต์ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ อย่างไรก็ตามมีต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตสูง เนื่องจากเมทานอลมีราคาสูง ดังสมการที่ 2.12



รูปที่ 2.8 กระบวนการผลิตดีเอ็มอีแบบทางอ้อม (Indirect DME Synthesis) หรือกระบวนการกำจัดน้ำของเมทานอล (Methanol Dehydration) [10]

2. กระบวนการผลิตดีเอ็มอีแบบทางตรง การผลิตดีเอ็มอีวิธีนี้เป็นเทคโนโลยี ที่คิดค้นขึ้นใหม่ ซึ่งมีข้อดีกว่าวิธีการทางอ้อม คือ ไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนของการสังเคราะห์เมทานอลทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ โดยในกระบวนการผลิตนี้ ก๊าซสังเคราะห์สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็นดีเอ็มอีได้โดยตรง โดยผ่านกระบวนการความร้อนเคมี ในเครื่องปฏิกรณ์สารแขวนลอย บนตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ของทองแดง สังกะสี และอลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียสและความดัน 30 บรรยากาศ ดังสมการที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 กระบวนการผลิตไดเมทิลอีเทอร์แบบทางตรง(Direct DME Synthesis) [10]

ในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด ส่วนใหญ่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแบบกรดการค้ำ ตัวอย่างเช่น HZSM-5 ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยากรดการค้ำนั้นไม่สามารถควบคุมผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากว่าความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาสูง ปฏิกิริยาจะเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นโอเลฟินและปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นไดเมทิลอีเทอร์น้อยลง ไม่นานมานี้มีงานวิจัยพบว่า โลหะฟอสเฟตมีความสามารถเร่งปฏิกิริยาการขจัดน้ำของเมทานอลได้และมีความเป็นกรดไม่สูงมากนักจึงส่งผลให้มีผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสูง

ตารางที่ 2.2 ผลการทดสอบปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะฟอสเฟต ที่อุณหภูมิ 325°C [25]

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเป็นกรด ($\mu\text{mol/g catalyst}$)	ค่าร้อยละการ แปลงผันเมทานอล	ค่าร้อยละการเลือก เกิดไดเมทิลอีเทอร์
Co-PO ₄	90	0.59	91.97
Zn-PO ₄	115	0.72	91.81
Fe-PO ₄	175	2.37	94.16
Al-PO ₄	180	13.89	90.54
Cr-PO ₄	200	87.49	88.64
Si-Al-PO ₄	450	88.85	85.69

2.2.1.2 แหล่งผลิตดีเอ็มอี

ปัจจุบันประเทศที่เป็นผู้ผลิตดีเอ็มอีรายใหญ่ ได้แก่ จีน ญี่ปุ่น เกาหลี และบราซิล นอกจากนี้ อีกหลายประเทศก็กำลังอยู่ระหว่างการสร้างโรงงานผลิตดีเอ็มอี อาทิ อียิปต์ อินโดนีเซีย อินเดีย และอิหร่าน

2.2.1.3 ราคาดีเอ็มอี

การกำหนดราคาของดีเอ็มอีที่ผลิตจากเมทานอลจะขึ้นกับราคาของเมทานอลและก๊าซปิโตรเลียมเหลว (ก๊าซ LPG) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าความร้อนของดีเอ็มอีจะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 62 ของค่าความร้อนของก๊าซ LPG ดังนั้น ราคาขายดีเอ็มอีจึงอยู่ที่ประมาณร้อยละ 75 ถึง 90 ของราคา LPG

2.2.2 การใช้งานไดเมทิลอีเทอร์เป็นเชื้อเพลิง

การใช้งานดีเอ็มอีเพื่อเป็นเชื้อเพลิง แบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ

2.2.2.1 ใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อน

ซึ่งเป็นรูปแบบของการใช้งานส่วนใหญ่ โดยเฉพาะในประเทศจีน ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า ดีเอ็มอีมีคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ที่คล้ายคลึงกับก๊าซ LPG ดังนั้น จึงสามารถนำมาผสมกับก๊าซ LPG เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหุงต้มในครัวเรือนได้ โดยอัตราส่วนผสมของดีเอ็มอีที่สามารถใช้ได้โดยไม่ต้องมีการปรับแต่งเตาเผาและอุปกรณ์โครงสร้างพื้นฐานที่ใช้ในการบรรจุน้ำมันหรือเก็บรักษา คือประมาณร้อยละ 20 โดยปริมาตร

2.2.2.2 ใช้เป็นเชื้อเพลิงในภาคการขนส่ง

ปัจจุบันได้มีการริเริ่มนำดีเอ็มอีมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในภาคการขนส่ง โดยการใช้งานสามารถใช้งานได้กับ

1. เครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากดีเอ็มอีมีค่าซีเทนสูง ดังนั้น จึงสามารถนำดีเอ็มอี มาผสมกับน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลได้ โดยต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์เล็กน้อย (ระบบฉีดเชื้อเพลิง) สำหรับอัตราส่วนผสมของดีเอ็มอีสูงสุด ที่จะไม่ทำให้เชื้อเพลิงผสมที่ได้มีความหนืดต่ำจนเกินไป อยู่ที่ประมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก
2. เครื่องยนต์เบนซิน เครื่องยนต์เบนซินสามารถนำมาดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซ LPG ผสมกับดีเอ็มอีเป็นเชื้อเพลิงได้ โดยอัตราส่วนผสมสูงสุดของดีเอ็มอี คือ ประมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ ข้อจำกัดในการใช้ดีเอ็มอีเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เบนซิน คือ การที่ดีเอ็มอีมีค่าออกเทนต่ำ ดังนั้น หากผสมดีเอ็มอีในอัตราส่วนที่สูงเกินไปก็จะทำให้เครื่องยนต์น็อกได้
3. เครื่องยนต์ที่ใช้ดีเอ็มอีเป็นเชื้อเพลิง ปัจจุบันบริษัทผู้ผลิตรถยนต์หลายรายได้มีการคิดค้นพัฒนารถบรรทุกขนาดใหญ่ที่ใช้ดีเอ็มอีเป็นเชื้อเพลิง ตัวอย่างเช่น นิสสัน ฮีโน่ อีซูซุ มิตซูบิชิ ในประเทศญี่ปุ่น และวอลโว่ ในประเทศสวีเดน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติโคเมทิลอีเทอร์กับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ [11]

คุณสมบัติ	DME	โพรเพน	มีเทน	เมทา ทานอล	น้ำมัน ดีเซล
สูตรโมเลกุล	CH ₃ OCH ₃	C ₃ H ₈	CH ₄	CH ₃ OH	-
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	-25.1	-42	-161.5	64.8	180-370
ความหนาแน่นในสถานะ ของเหลว ที่ 20 องศาเซลเซียส	0.67	0.49	-	0.79	0.84
ความถ่วงจำเพาะ(ในสถานะก๊าซ เมื่อเทียบอากาศ)	1.59	1.52	0.55	-	-
ความดันไอ(atm)ที่ 25 องศา เซลเซียส	6.1	9.3	-	-	-
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	350	504	632	470	250
ค่าเลขซีเทน	55-60	5	-	5	40-55
ค่าความร้อนสุทธิ (10 ⁶ J/Nm ³)	59.44	91.25	36	-	-
ค่าความร้อนสุทธิ (J/Kg)	28.9	46.46	50.23	21.10	41.86
ค่าพลังงานความร้อน (Kcal/Kg)	6,900	11,100	12,000	4,800	10,000

2.2.3 ประโยชน์ของการใช้โคเมทิลอีเทอร์เป็นเชื้อเพลิง

1. เพิ่มแหล่งพลังงานทางเลือก และสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานให้กับประเทศ
2. ดีเอ็มอีที่ผลิตจากชีวมวลซึ่งสามารถหาได้จากภายในประเทศ จะช่วยลดการพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซ LPG
3. ดีเอ็มอีเป็นเชื้อเพลิงที่เผาไหม้สะอาด จึงช่วยลดมลพิษที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศได้

2.3 โลหะฟอสเฟต

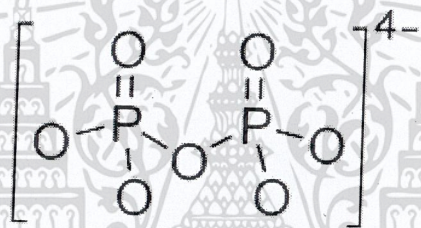
โลหะฟอสเฟต เป็นสารที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย เช่น เป็นสีเคลือบเซรามิกส์ ตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคลือบผิว โลหะป้องกันการกัดกร่อน และเป็นปุ๋ยที่มีความสามารถในการปลดปล่อยธาตุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาหารอย่างซ้ำๆ สารโลหะฟอสเฟตมีแหล่งที่มาสำคัญ 2 แหล่ง คือ เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและเกิดขึ้นจากการสังเคราะห์ โลหะฟอสเฟตมีหน่วยย่อยหลายชนิด ที่มักพบบ่อย คือ Orthophosphate (PO_4^{3-}) , Hydrogenphosphate (HPO_4^{2-}) , Dihydrogenphosphate (H_2PO_4^-) , Pyrophosphate ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) และ Cyclotetraphosphate ($\text{P}_2\text{O}_{12}^{4-}$) โลหะฟอสเฟตได้รับความสนใจอย่างมากทางด้านสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยี โดยในงานวิจัยนี้ได้ให้ความสนใจที่โลหะไพโรฟอสเฟต

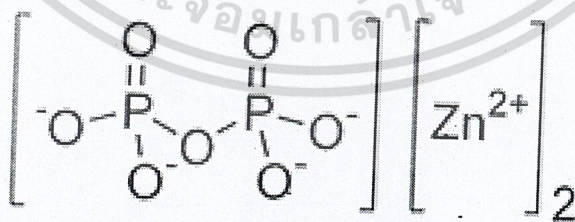
2.3.1 โลหะไพโรฟอสเฟต

ไพโรฟอสเฟต เตรียมโดยการให้ความร้อนหมู่ฟอสเฟต โดยทั่วไปแล้วไพโรฟอสเฟตมีความสามารถในการละลายน้อยที่สุด และยังเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ดีสำหรับโลหะไอออน เช่น แคลเซียม และโลหะทรานซิชันอื่นๆ ซึ่งได้มีการนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี [12]



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของไพโรฟอสเฟตแอนไอออน [12]

โลหะไพโรฟอสเฟตที่พบบ่อยมักอยู่ในรูปไพโรฟอสเฟตที่มีโลหะชนิดเดียว (single metal pyrophosphate) เช่น $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$, $\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ เป็นต้น แต่ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาไพโรฟอสเฟตที่มีโลหะสองชนิด (Binary metal (II) pyrophosphates)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของซิงค์ไพโรฟอสเฟต [13]

ไพโรฟอสเฟตที่มีโลหะสองชนิด (Binary metal (II) pyrophosphates) ประกอบด้วยสารละลายของแข็ง (solid solution) โดยที่สารละลายของแข็ง (solid solution) หมายถึง ของแข็ง ซึ่งมีอะตอม

หรือไอออนในโครงสร้างที่สามารถถูกแทนที่ได้ด้วยอะตอมหรือไอออน (ionic substitution) ชนิดอื่น โดยการแทนที่ดังกล่าว อาจเป็นการแทนที่ทั้งหมดหรือบางส่วนก็ได้

ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดการแทนที่ของไอออนในโครงสร้าง ได้แก่

1. จำนวนประจุของไอออนไม่ควรต่างกันเกิน ± 1 เช่น Mg^{2+} / Fe^{2+} หรือ Al^{3+} / Si^{4+} ซึ่งในกรณีที่จำนวนประจุไม่เท่ากัน การแทนที่จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อไอออนมาแทนที่เพิ่มเติม (ในตำแหน่งอื่นๆ ในโครงสร้างผลึก) เพื่อให้ประจุเกิดความสมดุล

2. ขนาดของไอออนไม่ควรต่างกันเกินร้อยละ 15 จึงจะแทนที่ได้ทั้งหมด แต่ถ้าขนาดต่างกันอยู่ในช่วงร้อยละ 15-30 อาจแทนที่ได้บางส่วน ถ้าเกินร้อยละ 30 มักไม่ค่อยพบว่ามี การแทนที่กันได้

3. ที่อุณหภูมิสูงพันธะระหว่างไอออนจะมีการสั่นมากกว่าปกติ จึงทำให้โครงสร้างขยายตัวและรองรับไอออนที่จะมาแทนที่ได้ดีกว่า

ไพโรฟอสเฟตที่มีโลหะสองชนิด (Binary metal (II) pyrophosphates) มีคุณสมบัติที่โดดเด่นคือ มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง มีความทนต่อแรงดึงสูง ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับไพโรฟอสเฟตที่มีโลหะชนิดเดียว องค์ประกอบที่มีโลหะสองชนิด (binary metal) คือ $M_{1-x}A_xP_2O_7$ โดยที่ M หรือ A คือ Mg, Mn, Co, Cu, Ni, Fe

โดยทั่วไปมักนิยมสังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอนร่วม ทำได้โดยการเติมสารละลายที่เป็นเกลือของโลหะ 2 ชนิด ลงไปในสารละลายกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) หรือสารละลายแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($(NH_4)_2HPO_4$) นำมาทวนผสมที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส เกิดการตกตะกอนออกมาในรูปของโลหะไฮโดรเจนฟอสเฟต แล้วปรับค่าความเป็นกรดด้วยสารละลายแอมโมเนียม จนกระทั่งเป็นกลาง ($pH = 7$) สารจะอยู่ในรูปเจล ทำการกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI water) อบให้แห้งแล้วนำไปเผาเพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของโลหะฟอสเฟต [14]

แต่ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะฟอสเฟตชนิดคอปเปอร์ซิงค์ไพโรฟอสเฟต โดยวิธีการเผาในสถานะของแข็ง (solid state combustion)

2.3.2 การเผาในสถานะของแข็ง (Solid state combustion) [15]

กระบวนการเผาเป็นกระบวนการที่สำคัญของเซรามิกส์ขั้นสูง เทคนิคในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาและวัสดุนาโน ในกระบวนการเผามีปฏิกิริยารีดอกซ์ (reduction-oxidation) ซึ่งเป็นกระบวนการคายความร้อน

การเผาในสถานะของแข็ง (Solid state combustion) สารตั้งต้น ตัวกลาง และผลผลิตสุดท้าย ทั้งหมดจะอยู่ในสถานะของแข็ง การเผาในสถานะของแข็ง (Solid state combustion) ของสารตั้งต้นที่เป็นของแข็ง สามารถเกิดขึ้นได้ในสองวิธี คือ

1. แพร่กระจายตัวที่อุณหภูมิสูง (self-propagating high temperature synthesis : SHS)
2. การเผาไหม้โดยให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอ (volume combustion synthesis : VCS)

ทั้งสองกรณีนี้ สารตั้งต้นจะถูกบังคับให้เป็นเม็ดรูปทรงกระบอก สำหรับวิธีการแพร่กระจายตัวที่อุณหภูมิสูง เป็นปฏิกิริยาที่มีการคายความร้อนสูง (ΔH 40 kcal/mol) และอัตราการเกิดความร้อนจะต้องมากกว่าความร้อนที่เหือดหายไป ไม่งั้นนั้นจะไม่สามารถเกิดการแพร่กระจายตัวได้ ลักษณะเด่นของการแพร่กระจายตัวที่อุณหภูมิสูง คือ การให้คลื่นความร้อน ที่ใช้ในการเผาไหม้เฉพาะที่ (2000-4000 เคลวิน) วิธีการเผาไหม้โดยให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอ เม็ดสารจะถูกให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นพร้อมกันทั่วทั้งปริมาตรของเม็ดสาร (pellet) สำหรับวิธีการนี้เหมาะสำหรับการเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนไม่มากนัก จำเป็นต้องทำให้เม็ดสาร (pellet) ร้อนก่อน

การเผาในสถานะของแข็ง (Solid state combustion) ใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างกว้างขวาง เช่น ไอรอนโครเมียมออกไซด์ (ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสของเชื้อเพลิงดีเซล) สารประกอบเชิงซ้อนคอปเรทใช้ในการสังเคราะห์เอทีเอ็น

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟต โดยวิธีการเผาในสถานะของแข็ง (Solid state combustion method)

2.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ (Characterization)

โครงการงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาลักษณะเฉพาะของคอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟต (CuZnP_2O_7) ที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้เทคนิคต่างๆดังต่อไปนี้

2.4.1 Thermogravimetric Analysis (TGA) [16]

TGA เป็นเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน สามารถวิเคราะห์หาจุดหลอมเหลวการสูญเสียน้ำหนัก หาสารเจือปนในตัวอย่างรวมไปถึงการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนเป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุขึ้นกับอุณหภูมิและเวลา ผลการวิเคราะห์จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติทางความร้อน เสถียรภาพทางความร้อน เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และลักษณะการผ่านกระบวนการทางความร้อนของวัสดุ โดยการศึกษาน้ำหนักที่หายไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ ความร้อนที่วัสดุดูดหรือคายเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลา และการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลา และสามารถอ่านค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้นได้จากกราฟ

หลักการและวิธีการวิเคราะห์

ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็กซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไว ต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายใน อาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น อากาศ หรือ ออกซิเจน โดยน้ำหนักของ ตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการ ระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

2.4.2 Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy [17]

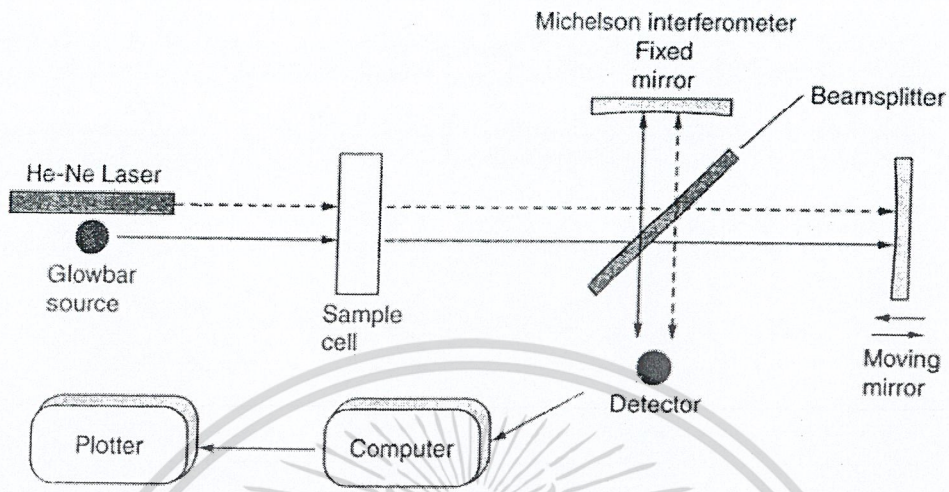
Fourier Transform Infrared Spectroscopy มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของ สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และพันธะเคมีในโมเลกุล รวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบ ที่มีอยู่ใน โมเลกุลของสารผสมที่ไม่ทราบชนิดเทคนิคนี้มีความไว ใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่นๆ ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ อะตอมทุกตัวในโมเลกุลจะมีการสั่นอยู่ตลอดเวลา เมื่อความถี่ ของการสั่นมีค่าเท่ากับความถี่ของรังสีอินฟราเรดที่ฉายมายังโมเลกุล โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีจำนวนแถบการ ดูดกลืนทั้งหมดที่สังเกตได้จะมีค่าไม่เท่ากับการสั่นมูลฐานของโมเลกุลทั้งหมดโดยจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะ จะมีบางแถบพลังงานที่ไม่มีการตอบสนองต่อพลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรด

ตารางที่ 2.4 แสดงการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่างๆของแต่ละหมู่ฟังก์ชัน [18]

Structural unit	Frequency, cm^{-1}	Structural unit	Frequency, cm^{-1}
Stretching vibrations			
Single bonds		Double bonds	
—O—H (alcohols)	3200–3600	$\text{C}=\text{C}$	1620–1680
—O—H (carboxylic acids)	2500–3600	$\text{C}=\text{O}$	
N—H	3350–3500	Aldehydes and ketones	1710–1750
$sp^3 \text{C—H}$	3310–3320	Carboxylic acids	1700–1725
$sp^2 \text{C—H}$	3000–3100	Acid anhydrides	1800–1850 and 1740–1790
$sp \text{C—H}$	2850–2950	Acyl halides	1770–1815
$sp^2 \text{C—O}$	1200	Esters	1730–1750
$sp^3 \text{C—O}$	1025–1200	Amides	1680–1700
		Triple bonds	
		$\text{C}\equiv\text{C}$	2100–2200
		$\text{C}\equiv\text{N}$	2240–2280
Bending vibrations of diagnostic value			
Alkenes:		Substituted derivatives of benzene:	
$\text{RCH}=\text{CH}_2$	910, 990	Monosubstituted	730–770 and 690–710
$\text{R}_2\text{C}=\text{CH}_2$	890	Ortho-disubstituted	735–770
<i>cis</i> - $\text{RCH}=\text{CHR}'$	665–730	Meta-disubstituted	750–810 and 680–730
<i>trans</i> - $\text{RCH}=\text{CHR}'$	960–980	Para-disubstituted	790–840
$\text{R}_2\text{C}=\text{CHR}'$	790–840		

หลักการและวิธีการวิเคราะห์

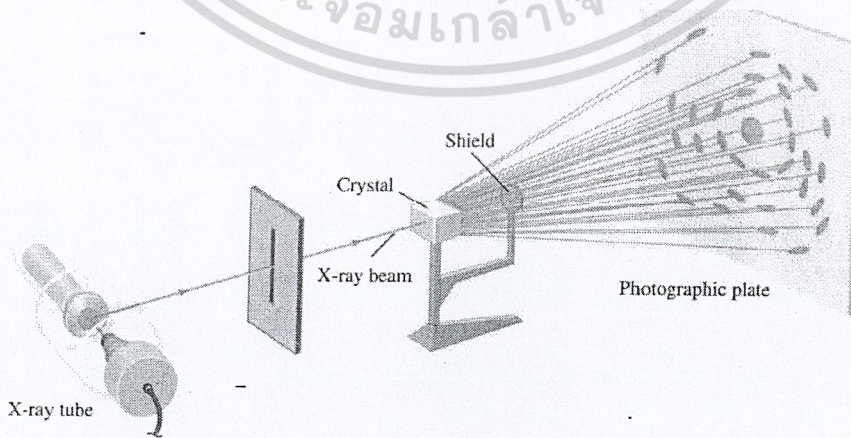
รังสีอินฟราเรดจากแหล่งกำเนิดจะถูกฉายไปยัง Interferometer ซึ่งประกอบด้วยกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ กระจกที่ตรึงอยู่กับที่โดยทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตัวแยกแสงซึ่งเป็นอุปกรณ์กึ่งสะท้อนแสง ที่ตัวแยกแสง ลำรังสีครึ่งหนึ่งจะทะลุผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ และอีกครึ่งหนึ่ง จะสะท้อนไปยังกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ หลังจากนั้นลำรังสีก็จะสะท้อนจากกระจกกลับมาวมกันที่ตัวแยกแสงเกิดการแทรกสอดขึ้น หลังจากนั้นลำรังสีก็จะผ่านไปยังสารตัวอย่าง โมเลกุลจะดูดกลืนรังสี IR ทำให้เกิดการยืดหดของพันธะ แล้วทำการตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจวัด [19]



รูปที่ 2.12 Michelson interferometer ใน FTIR Spectrometer [19]

2.4.3 X - ray Diffraction (XRD) [20]

XRD เป็นเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ หรือ X-ray Diffraction (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับ โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้ทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆมีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell ความเครียดของตัวอย่าง และค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย



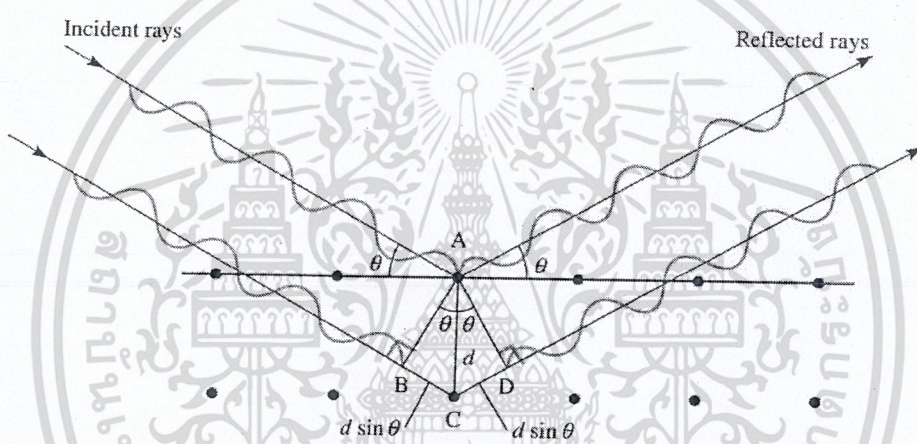
รูปที่ 2.13 องค์ประกอบภายในเครื่อง X - ray Diffraction [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการและวิธีการวิเคราะห์

วัสดุที่เป็นผลึกคือวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้าง อย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งค่าระยะห่าง d จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผลึก เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบ ระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบเซต้า รังสีเอ็กซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อน θ เท่ากับมุมตกกระทบ เรียกว่า “Bragg Law” ดังสมการที่ 2.14 [22]

$$2d \sin \theta = n \lambda \quad \text{-----} \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.14 Bragg's Law [21]

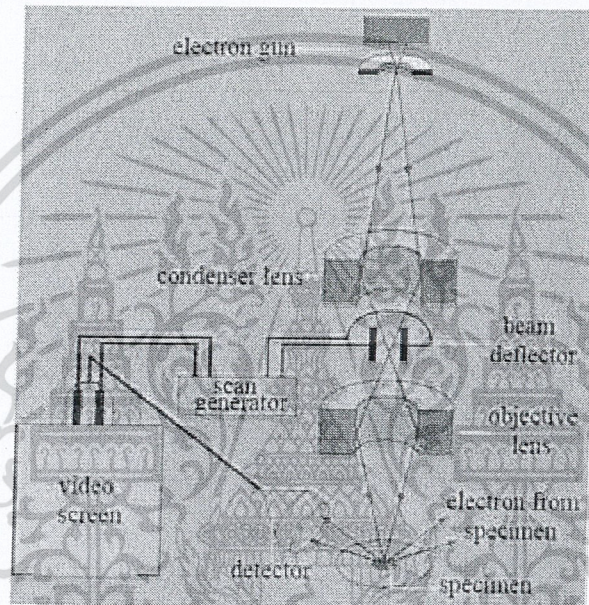
2.4.4 Scanning Electron Microscope (SEM) [23]

Scanning Electron Microscope (SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น ซึ่ง SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การสร้างภาพของเครื่อง SEM ทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของ ตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จะเป็นภาพลักษณะเป็น 3 มิติ

หลักการทำงานของเครื่อง SEM คอลัมน์ (column) ภายในเครื่องจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน (primary electron) เพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษาและเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยา (interaction) ได้สัญญาณแบบต่างๆ เช่น สัญญาณจากอิเล็กตรอนในชิ้นงานที่หลุดออกมา (secondary electron) อิเล็กตรอนที่กระดอนกลับ (backscattered electron) หรือ X-ray สัญญาณแต่ละชนิดจะถูกจับโดย detector และแปลผลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และแปลเป็นภาพในที่สุด



รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) [23]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การสังเคราะห์โคเมทิลอิเทอร์โดยตรงจากแก๊สสังเคราะห์ได้รับความสนใจและถูกวิจัยอย่างมากในช่วง 20 กว่าปีที่ผ่านมา โดยมีการพัฒนาและศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องจนค้นพบตัวเร่งปฏิกิริยาผสม ได้แก่ ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และ $\text{Cu/Zn/Al}_2\text{O}_3$ เพื่อนำมาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล แต่เนื่องจากกระบวนการนี้มีน้ำเป็นองค์ประกอบมาก ซึ่งน้ำมีผลทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงทำให้เกิดงานวิจัยต่อเนื่องโดยมีความพยายามที่จะนำตัวเร่งปฏิกิริยา solid – acid มาใช้ในการลดผลกระทบจากน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

F. Yaripour และคณะ (2005) [24] ได้ทำการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอล โดยใช้ อะลูมิเนียมฟอสเฟตและซิลิกาไทเทนา (silica-titania) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา งานวิจัยนี้ได้ศึกษา solid-acid ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากำจัดน้ำของเมทานอลเพื่อเปลี่ยนไปเป็นไดเมทิลอีเทอร์ โดยสังเคราะห์ ตัวเร่งปฏิกิริยา solid-acid ด้วยวิธีตกตะกอนร่วมที่มีส่วนประกอบเป็นซิลิกา ไททาเนียและแกมมาอะลูมินา ที่ถูกปรับปรุงด้วย ฟอสฟอรัส อัตราส่วนโดยโมลของอะลูมิเนียมต่อฟอสฟอรัส ที่ 1, 2 และ 3 ทำการทดลองโดยการใส่เครื่อง ปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกตรวจสอบ คุณสมบัติด้วย BET , XRD , FT-IR , NH₃-TPD และเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ผลที่ได้คือ เมื่อนำเมทานอลไปทำปฏิกิริยากำจัดน้ำโดยผ่านบริเวณที่มีความเป็นกรด (acid sites) ของ solid-acid เพื่อผลิตไดเมทิลอีเทอร์ บริเวณที่มีความเป็นกรดอนและปานกลางมีส่วนเกี่ยวข้องในการผลิตไดเมทิลอีเทอร์โดยมีก๊าซ มีเทนเป็นผลพลอยได้ ไททาเนียซิลิกามีพื้นที่ผิวที่ต่ำมากจึงส่งผลให้มีความว่องไวในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์ต่ำ และแกมมาอะลูมินาที่ถูกปรับปรุงด้วยฟอสฟอรัส มีความว่องไวในการผลิตไดเมทิลอีเทอร์สูงกว่า แกมมาอะลูมินาที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยฟอสฟอรัส เนื่องจากพื้นที่ผิวจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่าง อะลูมิเนียมกับฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนโดยโมลของ Al/P เท่ากับ 2 จะทำให้มีค่าการเปลี่ยน (conversion) จากเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์สูงสุด

D. Manit และคณะ (2007) [25] ได้ทำการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลบน ตัวเร่งปฏิกิริยา โลหะฟอสเฟต โดยศึกษาการเร่งปฏิกิริยาการขจัดน้ำของเมทานอลเพื่อให้ได้ ไดเมทิลอีเทอร์บน ตัวเร่งปฏิกิริยา โลหะฟอสเฟต (อะลูมิเนียมฟอสเฟต , โคบอลต์ฟอสเฟต , โครเมียมฟอสเฟต , เฟอร์รัส (III) ฟอสเฟต และซิงค์ฟอสเฟต) ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีตกตะกอนร่วม โดยในการทดลองได้ทำการศึกษาผลของ อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยา และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนเมทานอลและค่าร้อยละการ เลือกเกิดของไดเมทิลอีเทอร์ ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิระหว่าง 200 ถึง 325 องศาเซลเซียส จากการเร่งปฏิกิริยาด้วยโลหะฟอสเฟตพบว่า ได้ไดเมทิลอีเทอร์เป็นผลิตภัณฑ์หลักและฟอร์มัลดีไฮด์เป็น ผลิตภัณฑ์รอง ตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมิเนียมฟอสเฟตและตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกาอะลูมินาฟอสเฟต ให้ค่าร้อยละ การเปลี่ยนเมทานอลสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะฟอสเฟตชนิดอื่นๆ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ให้สูงขึ้น ปฏิกิริยาเริ่มจะเข้าสู่สมดุลที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ส่วนค่าร้อยละการเลือกเกิดไดเมทิลอีเทอร์ ของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะฟอสเฟตทุกชนิด ให้ค่าที่สูงและไม่แตกต่างกันมากนัก และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำ ปฏิกิริยาสูงขึ้นนั้น ไม่มีผลต่อค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะฟอสเฟตทั้งหกชนิด

S.Qing และคณะ (2007) [26] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการกำจัดน้ำออกจากเมทานอลเพื่อเปลี่ยนไปเป็นไดเมทิลอีเทอร์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Nb_2O_5 และ $NbOPO_4$ โดย Nb_2O_5 ถูกเตรียมโดยการเผากรดไนโอบิกที่อุณหภูมิ 623 เคลวิน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยมีอากาศไหลผ่านตลอดเวลา ส่วน $NbOPO_4$ ถูกเตรียมโดยวิธีตกตะกอน $NbCl_5$ และกรดฟอสฟอริกเป็นสารตั้งต้น เผาที่อุณหภูมิ 625 เคลวิน ในบรรยากาศ N_2 นาน 12 ชั่วโมง แล้วเผาในอากาศอุณหภูมิ 723 เคลวิน เป็นเวลา 40 ชั่วโมง ผลที่ได้จากการทดลองพบว่า $NbOPO_4$ มีความเป็นกรดมากกว่า Nb_2O_5 เนื่องจาก $NbOPO_4$ มีพื้นที่ผิวมาก ทำให้ตำแหน่งที่เป็นกรด (acid sites) บนพื้นผิวของ $NbOPO_4$ มีมากตามไปด้วย $NbOPO_4$ เกิดปฏิกิริยากับโมเลกุล (แอมโมเนีย เมทานอล น้ำ และ ไดเมทิลอีเทอร์) ที่แข็งแรงกว่า Nb_2O_5 ถึงแม้ว่าการกำจัดน้ำออกจากเมทานอลด้วย Nb_2O_5 และ $NbOPO_4$ จะให้ผลไม่ดีเท่า H-ZSM-5 แต่ Nb_2O_5 และ $NbOPO_4$ มีความเฉพาะเจาะจง 100 เปอร์เซ็นต์และมีความเสถียรในการผลิตไดเมทิลอีเทอร์ โดยไม่ก่อให้เกิดโค้ก

L. Yun-Jo และคณะ (2009) [27] ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ที่ปรับปรุงด้วยฟอสฟอรัสโดยวิธีการทางความร้อนเพื่อใช้ในการเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์ งานวิจัยได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของ ZSM-5 โดยการปรับปรุง ZSM-5 ฟอสฟอรัส และตรวจสอบโดยการดูดซับ-คายซับไนโตรเจน (N_2 adsorption-desorption) NH_3 -TPD เทคนิค MAS-NMR โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง ZSM-5 กับ ZSM-5 ที่ถูกปรับปรุงด้วยฟอสฟอรัส ผลที่ได้คือ การเพิ่มขึ้นของปริมาณฟอสฟอรัสจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงและมีขนาดรูพรุนเล็ก มีความเป็นกรดสูงกว่า ZSM-5 ปกติ มีการเปลี่ยน (conversion) เมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์สูงขึ้นด้วย

B. Banjong และ V. Naratip (2010) [28] ได้ทำการสังเคราะห์และศึกษาคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของคอปเปอร์ไอรอนไพโรฟอสเฟต ($CuFeP_2O_7$) หมู่ไพโรฟอสเฟตของคอปเปอร์ไอรอนไพโรฟอสเฟต ($CuFeP_2O_7$) สังเคราะห์ได้โดยการผสมของทองแดงคาร์บอเนต ($CuCO_3$) กับโลหะเหล็ก (Fe) ในอัตราส่วน 1:1 และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยมีปฏิกิริยาดังสมการ 2.15



จากผลการวิเคราะห์ รูปแบบ XRD ของคอปเปอร์ไอรอนไพโรฟอสเฟต ($CuFeP_2O_7$) ซึ่งเป็นไพโรฟอสเฟตที่มีโลหะสองชนิด มีลักษณะคล้ายคลึงกับไพโรฟอสเฟตที่มีโลหะเพียงชนิดเดียว ($M_2P_2O_7$ เมื่อ M คือ Cu Co Mn และ Fe) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ไพโรฟอสเฟตที่มีโลหะสองชนิด ($M_{2-x}A_xP_2O_7$ เมื่อ M หรือ A คือ Mg, Mn, Co, Cu, Ni, Fe, Zn ; $0 < x < 2$) และไพโรฟอสเฟตที่มีโลหะชนิดเดียว จะมีโครงสร้างผลึกแบบเดียวกัน (isostructural) และผลจาก FTIR สเปกตรัมของคอปเปอร์ไอรอนไพโรฟอสเฟต ($CuFeP_2O_7$) จะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความคล้ายคลึงมากกับไพโรฟอสเฟตที่มีโลหะชนิดเดียว โดยตรวจพบช่วงการสั่นของ $P_2O_7^{4-}$ ที่ 370–1400 cm^{-1} ช่วงความถี่ที่สมมาตรและไม่สมมาตรของ PO_3 ตรวจพบที่ 1097 และ 1067 cm^{-1} โหมดการค้ำของ PO_3 คาดว่าอยู่ในช่วง 592–518 cm^{-1} ซึ่งการยึดหดของโลหะ-ออกซิเจน (metal-O) จะปรากฏอยู่ในช่วงโหมดการค้ำของ PO_3 เช่นกันที่แถบการดูดกลืนที่ 955 และ 739 cm^{-1} เป็นแถบของหมู่ไพโรฟอสเฟต P-O-P ซึ่งผลของ FTIR มีความสอดคล้องกับผล XRD แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก (monoclinic) กับกลุ่มฟอสเฟตของ $[P_2O_7]^{4-}$ ไอออน

P. Joongjai (2011) [29] การผลิตไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลเพื่อเป็นพลังงานทางเลือกงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการผลิตไดเมทิลอีเทอร์จากปฏิกิริยาการคายน้ำของเมทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทอะลูมินาที่สังเคราะห์ขึ้นสองชนิด คือ แกมมาอะลูมินาที่สังเคราะห์โดยวิธีโซลโวลเทอร์มอล และอะลูมิเนียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอน โดยเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาแกมมาอะลูมินาเชิงพาณิชย์ อุณหภูมิที่ทำการปฏิกิริยา คือ 150 ถึง 300 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และความเร็วเชิงสเปซของแก๊ส 5,300 ต่อชั่วโมง พบว่าความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาเรียงลำดับได้ดังนี้ อะลูมิเนียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอน มากกว่า แกมมาอะลูมินาที่สังเคราะห์โดยวิธีโซลโวลเทอร์มอล มากกว่า แกมมาอะลูมินาเชิงพาณิชย์ โดยได้ค่าของไดเมทิลอีเทอร์เท่ากับ 85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมิเนียมฟอสเฟต ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นกับปริมาณของตำแหน่งที่มีความเป็นกรดและพื้นที่ผิวเป็นหลัก เนื่องจากอะลูมิเนียมฟอสเฟตให้ความว่องไวสูงที่อุณหภูมิต่ำกว่า จึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ โดยไม่พบการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

B. Banjong และ V. Naratip (2012) [30] การศึกษาค้นคว้าขนาดไมโครที่มีรูพรุนหลายหน้าของ $Cu_{0.5}Zn_{0.5}HPO_4 \cdot H_2O$ และ โครงสร้างที่มีรูพรุนของ $CuZnP_2O_7$ โดย $Cu_{0.5}Zn_{0.5}HPO_4 \cdot H_2O$ สังเคราะห์โดยใช้คอปเปอร์คาร์บอเนต ซิงค์ออกไซด์ และกรดฟอสฟอริก เป็นสารตั้งต้น เมื่อนำไปวิเคราะห์ TG/DTG พบว่าเส้นกราฟ TG/DTG ของ $Cu_{0.5}Zn_{0.5}HPO_4 \cdot H_2O$ แสดงถึงการสูญเสียน้ำหนัก 2 ชั้นในช่วง 50 ถึง 550 องศาเซลเซียส การสูญเสียน้ำหนักในช่วง 50 ถึง 150 นั้น เป็นการสูญเสียน้ำหนักของน้ำ การสูญเสียน้ำหนักในชั้นที่ 2 เกิดจากปฏิกิริยาการกำจัดโปรตอน (deprotonation) ของไฮโดรเจนในหมู่ฟอสเฟต โดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จะมีอุณหภูมิการสลายตัวมากกว่า 400 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้เป็นคอปเปอร์ซิงค์ไพโรฟอสเฟต จากการวิเคราะห์รูปแบบ XRD ของ $Cu_{0.5}Zn_{0.5}HPO_4 \cdot H_2O$ และ $CuZnP_2O_7$ สรุปได้ว่าการสังเคราะห์ $Cu_{0.5}Zn_{0.5}HPO_4 \cdot H_2O$ และ $CuZnP_2O_7$ นั้น มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบโมโนคลินิก ซึ่ง $Cu_{0.5}Zn_{0.5}HPO_4 \cdot H_2O$ และ $CuZnP_2O_7$ มีแถบการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดของ HPO_4 , H_2O และ P_2O_7 มีการสั่นในช่วงความถี่ดังนี้ 300-500, 700-900, 1067-1287, 840-984, 1000-1200, 2300-2438, 2800-3120 และ 3200-3500 cm^{-1} จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ขนาดรูพรุนพบว่า $\text{Cu}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{HPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ มีลักษณะแตกต่างจากโลหะฟอสเฟตชนิดอื่นๆ มีชั้นของอนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน ในขณะที่ CuZnP_2O_7 แสดงโครงสร้างรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ ที่อาจเกิดจากการคายน้ำและการกำจัดโปรตอนของไฮโดรเจนฟอสเฟต รูปร่างลักษณะของ $\text{Cu}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{HPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ และ CuZnP_2O_7 ในงานวิจัยนี้แตกต่างจากสารประกอบฟอสเฟตชนิดอื่น โครงสร้างรูพรุนอาจมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน ซึ่งอาจนำมาใช้เป็น ซีรามิกส์ เคลือบ หรือ ตัวเร่งปฏิกิริยาได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. คอปเปอร์คาร์บอเนต ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$) บริษัท LOBA Chemie เกรด (Basic) Extra Pure
2. ซิงค์คาร์บอเนตซิงค์ไฮดรอกไซด์ ($(\text{ZnCO}_3)_2 \cdot (\text{Zn}(\text{OH})_2)_3$) บริษัท LOBA Chemie เกรด AR
3. ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) บริษัท Fisher Chemical เกรด General Purpose grade

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ชามระเหย
2. โกร่งบดสาร
3. ซ้อนตักสาร
4. ปีกเกอร์
5. โถดูดความชื้น (Desiccator)
6. เครื่องอัดสาร
7. เตาเผา (Furnace)
8. Thermogravimetric Analysis (TGA), TG 209 F3 Tarsus บริษัท Netzsch-Geratebau ประเทศบาวาเรีย
9. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), Nicolet 6700 บริษัท Thermo Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. X-ray Diffraction (XRD), D8 Advance Bruker AXS บริษัท Gmbh ประเทศเยอรมนี
11. Scanning Electron Microscopy (SEM), 1455 VP บริษัท LEO ประเทศอังกฤษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

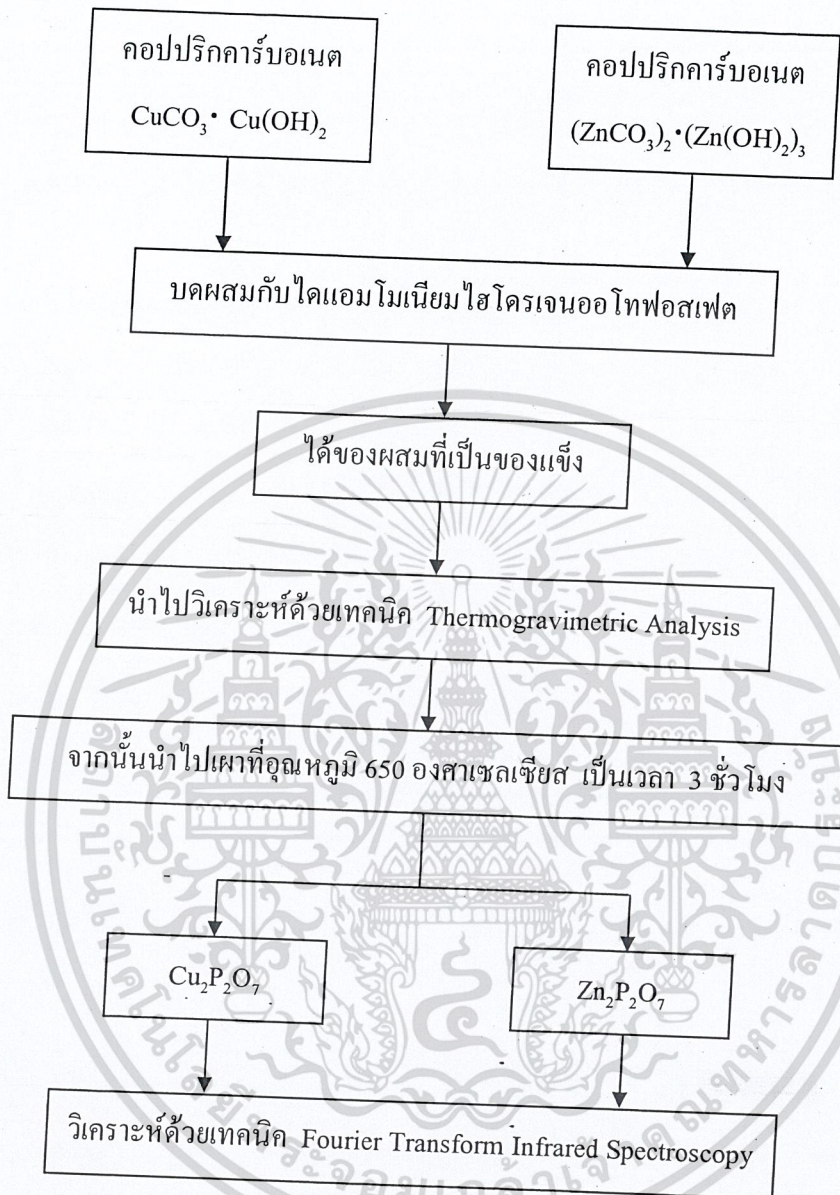
3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟต

3.3.1 การวิเคราะห์หาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมโลหะฟอสเฟต

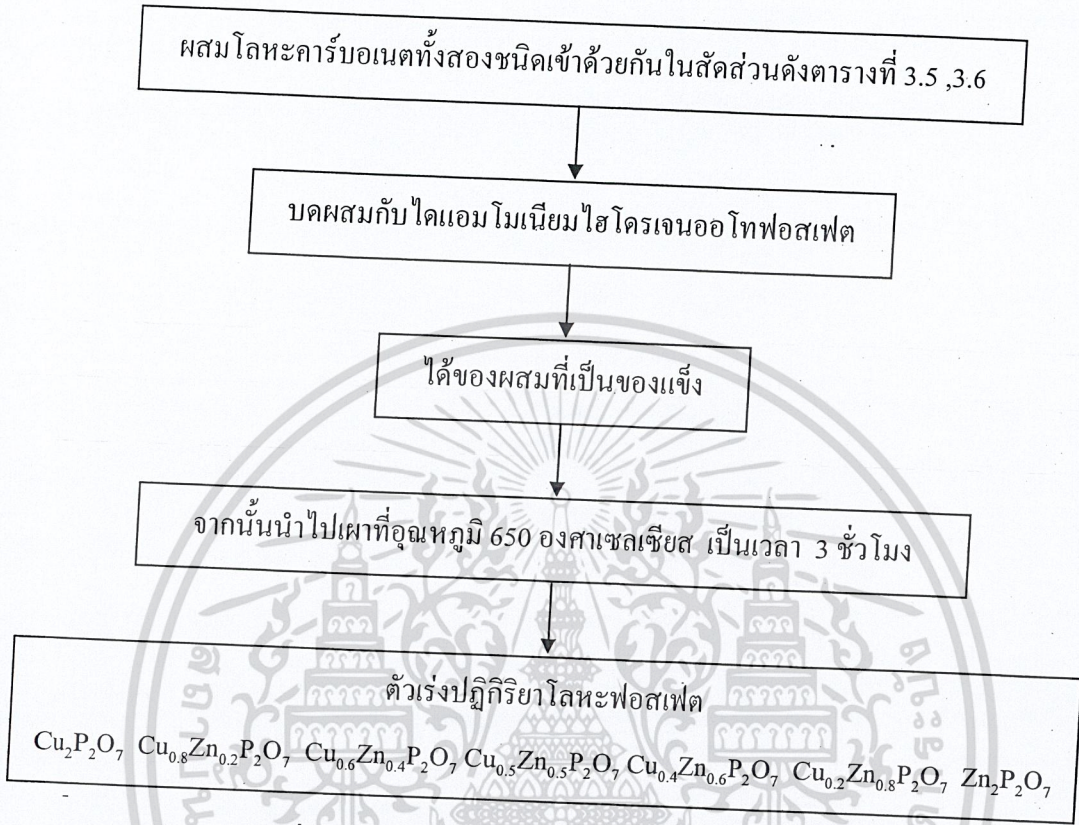
1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะฟอสเฟตเตรียมโดยใช้โลหะคาร์บอนเนต (Cu,Zn) เป็นแหล่งของโลหะ
2. ใช้ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนอโทฟอสเฟต $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ เป็นแหล่งของฟอสเฟต
3. บดสารโลหะคาร์บอนเนตและแหล่งฟอสเฟตให้กระจายตัวเข้าด้วยกัน
4. นำของผสมที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนเฟสเป็นโลหะฟอสเฟต
5. จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส (ได้จากข้อ 4) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
6. นำโลหะฟอสเฟตไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การวิเคราะห์หาอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมโลหะฟอสเฟต ดังแสดงในรูปที่ 3.13

3.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟตในสัดส่วนโมลต่างๆ

1. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟตโดยใช้โลหะคาร์บอนเนต (Cu, Zn) เป็นแหล่งของโลหะ ในสัดส่วน โมลของ Cu : Zn ดังแสดงในตารางที่ 3.5
2. ชั่งสารตามน้ำหนักที่คำนวณได้ในแต่ละสัดส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.6
3. ใช้ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนอโทฟอสเฟต $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ เป็นแหล่งของฟอสเฟต
4. บดสารโลหะคาร์บอนเนตและแหล่งฟอสเฟตให้กระจายตัวเข้าด้วยกัน
5. เเผาของแข็งผสมที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
6. ได้โลหะฟอสเฟตที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจากการเตรียมจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะฟอสเฟตทั้งหมด 6 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 3.14
7. จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์



รูปที่ 3.1 แผนภาพการวิเคราะห์หาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียม โลหะฟอสเฟต



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนโมลของคอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟต $Cu_xZn_{1-x}P_2O_7$

สูตรทางเคมี	mol Cu	mol Zn
$Cu_2P_2O_7$	1 mol	0 mol
$Cu_{0.8}Zn_{0.2}P_2O_7$	0.8 mol	0.2 mol
$Cu_{0.6}Zn_{0.4}P_2O_7$	0.6 mol	0.4 mol
$Cu_{0.5}Zn_{0.5}P_2O_7$	0.5 mol	0.5 mol
$Cu_{0.4}Zn_{0.6}P_2O_7$	0.4 mol	0.6 mol
$Cu_{0.2}Zn_{0.8}P_2O_7$	0.2 mol	0.8 mol
$Zn_2P_2O_7$	0 mol	1 mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 น้ำหนักของสารที่ต้องชั่งในแต่ละสัดส่วนโมลของ Cu : Zn

สาร	1 : 0	0.8 : 0.2	0.6 : 0.4	0.5 : 0.5	0.4 : 0.6	0.2 : 0.8	0 : 1
$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	11.06g	8.85 g	6.64 g	5.53 g	4.42 g	2.21 g	-
$(\text{ZnCO}_3)_2 \cdot (\text{Zn}(\text{OH})_2)_3$	-	2.20 g	4.39 g	5.49 g	6.59 g	8.78 g	10.98g
$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	13.21g	13.21g	13.21g	13.21g	13.21g	13.21g	13.21g

3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ (Characterization)

3.4.1 Thermogravimetric Analysis (TGA)

เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน สามารถวิเคราะห์หาจุดหลอมเหลว การสูญเสียน้ำหนัก หาสารเจือปนในตัวอย่าง รวมไปถึงการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง Phase ของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน การวิเคราะห์ข้อมูล จากกราฟที่ได้ ทำให้ทราบเกี่ยวกับความเสถียรต่ออุณหภูมิของสารตัวอย่าง

3.4.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุล รวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด สามารถวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน และหาสารที่มาปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่างว่ามีอะไรบ้าง โดยอาศัย การดูดกลืน IR ที่แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น 4000-1500 ต่อเซนติเมตร เทคนิค FTIR นี้มีความไว ใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อยกว่า เทคนิคอื่นๆ

3.4.3 X-ray Diffraction (XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffraction (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง

นอกจากนี้ ยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆที่อยู่ในตัวอย่าง คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละหน่วยเซลล์ ความเครียดของตัวอย่าง และค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย

3.4.4 Scanning Electron Microscopy (SEM)

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น ซึ่ง SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การสร้างภาพของเครื่อง SEM ทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจซึ่งภาพที่ได้จะเป็นภาพลักษณะเป็น 3 มิติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

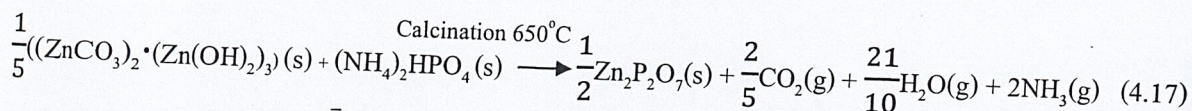
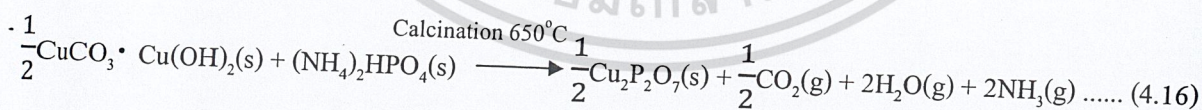
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟต (CuZnP_2O_7) เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์โดยใช้เทคนิคการเผาของแข็ง (Solid state combustion method) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว ในบทนี้ได้นำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการสังเคราะห์คอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟต รวมถึงผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ ได้แก่ วิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของสาร (Thermogravimetric Analysis, TGA) จากนั้นนำมาตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดด้วยการตรวจสอบการสั่นของโมเลกุลหรือไอออน (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR), เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) และวิเคราะห์ทางด้านสัณฐานวิทยาด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยมีรายละเอียดตามลำดับดังต่อไปนี้

4.1 ผลการสังเคราะห์ (Synthesis results)

สำหรับโครงการวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์คอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟตโดยวิธีการเผาของแข็ง (Solid state combustion method) ซึ่งใช้สารเคมีดังตารางที่ 4.1 โดยใช้โคแอมโมเนียมไฮโดรเจนอโทฟอสเฟตเป็นแหล่งฟอสเฟต และสามารถนำมาสังเคราะห์คอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟตได้โดยผ่านกระบวนการเผา ดังปฏิกิริยา

สมการการเกิดปฏิกิริยา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 การสังเคราะห์คอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟต

สารตั้งต้น	แหล่งฟอสเฟต
$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$
$(\text{ZnCO}_3)_2 \cdot (\text{Zn(OH)}_2)_3$	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงปริมาณและร้อยละผลผลิต (% yield) ของคอปเปอร์ซิงค์ไฟโรฟอสเฟตที่ได้จากการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการเผาในสถานะของแข็ง

ผลิตภัณฑ์	น้ำหนักสาร (กรัม)			ร้อยละผลผลิต %
	ก่อนเผา	หลังเผา	ทางทฤษฎี	
$\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$	24.08	13.98	15.05	92.88
$\text{Cu}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{P}_2\text{O}_7$	23.96	14.14	15.09	93.71
$\text{Cu}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{P}_2\text{O}_7$	24.03	14.32	15.12	94.68
$\text{Cu}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{P}_2\text{O}_7$	24.01	14.37	15.14	94.90
$\text{Cu}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{P}_2\text{O}_7$	23.96	14.47	15.16	95.44
$\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{P}_2\text{O}_7$	23.96	14.55	15.20	95.74
$\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$	23.98	14.49	15.23	95.12

จากตารางที่ 4.2 พบว่า $\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{P}_2\text{O}_7$ ได้ร้อยละผลผลิตมากที่สุด คือ ร้อยละ 95.74 และ $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ได้ร้อยละผลผลิตน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 92.88

4.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิคต่างๆ

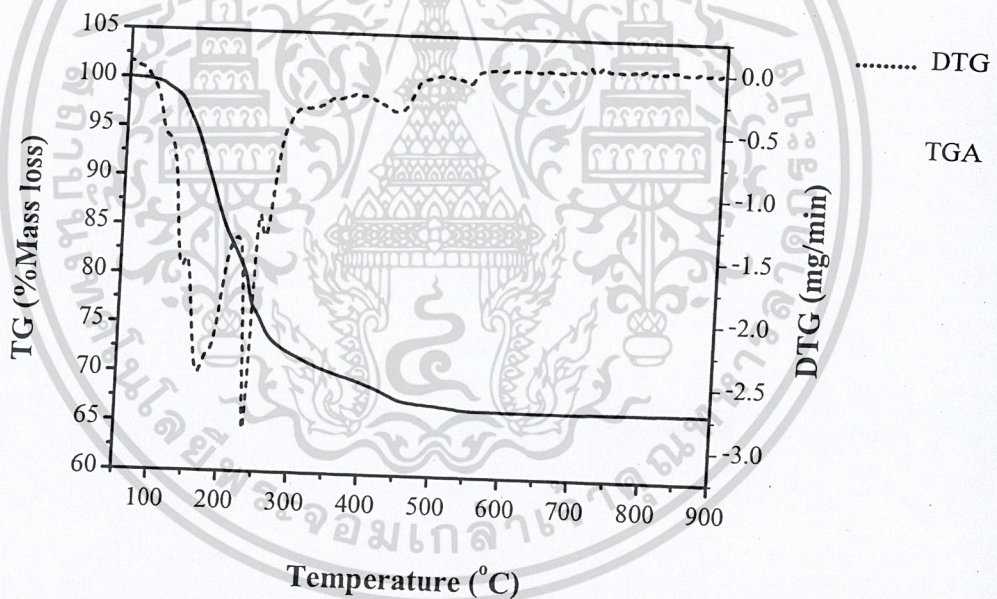
การทดสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) ตรวจสอบรูปแบบการสั่นของโมเลกุลหรือไอออนที่เป็นองค์ประกอบภายในโครงสร้างด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างของสาร โดยใช้เทคนิค X-ray

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Diffraction (XRD) และตรวจสอบสัณฐานวิทยาเป็นเทคนิคสุดท้าย โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

4.2.1 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อน TGA

การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) จะทำให้ทราบความเสถียรภาพทางความร้อนและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสาร โดยทำการทดสอบ TGA ระหว่าง $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$ กับ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ และระหว่าง $(\text{ZnCO}_3)_2 \cdot (\text{Zn(OH)}_2)_3$ กับ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ โดยข้อมูลการศึกษาดังกล่าวจะนำมาใช้ในการกำหนดช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม ในการเผาสารเพื่อให้เกิดการสลายตัวเป็นโลหะไฟโรฟอสเฟต จากผลการทดลองจะพบว่า

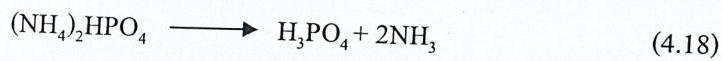


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการสลายตัวทางความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสาร ที่เตรียมจาก $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$ กับ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$

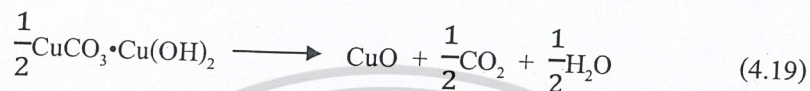
จากกราฟ TG ในรูปที่ 4.1 ได้ทำการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของสารผสมระหว่าง $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$ และ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ไปเป็น $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 900 องศาเซลเซียส จากกราฟสารผสมจะมีการสลายตัวทั้งหมด 4 ช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงที่ 1 มีการสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 195 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของ NH_3 คิดเป็นร้อยละ 14 ของน้ำหนักของสารทั้งหมด ดังแสดงในสมการที่ (4.18) [33]



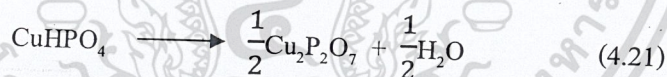
ช่วงที่ 2 มีการสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 195 ถึง 250 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของ CO_2 และ H_2O คิดเป็นร้อยละ 12.78 ของน้ำหนักของสารทั้งหมด ดังสมการที่ (4.19) [34]

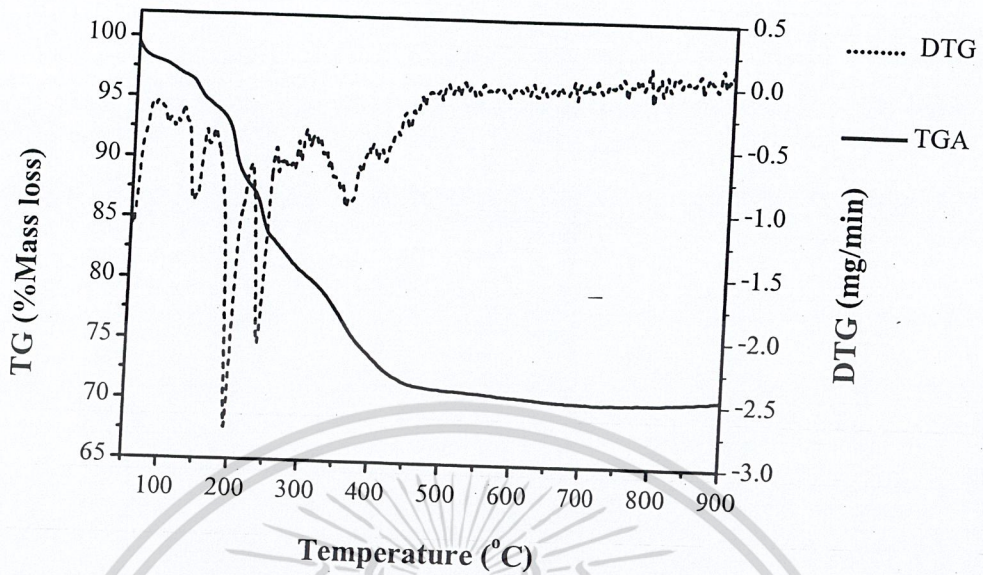


ช่วงที่ 3 มีการสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง 374 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของ H_2O ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอสฟอริกกับคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากสมการที่ (4.18) และ (4.19) ตามลำดับ โดยการสูญเสียน้ำหนัก คิดเป็นร้อยละ 7.42 ของน้ำหนักของสารทั้งหมด ดังสมการที่ (4.20) [32]



ช่วงที่ 4 มีการสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 374 ถึง 900 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของ H_2O คิดเป็นร้อยละ 3.71 และเกิดเป็นสารคอปเปอร์ไพโรฟอสเฟต ซึ่งมีน้ำหนัก คิดเป็นร้อยละ 62.06 ของน้ำหนักของสารทั้งหมด ดังสมการที่ (4.21) [31]

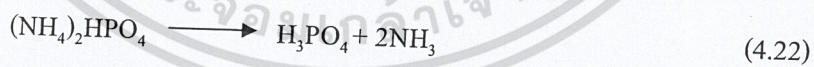




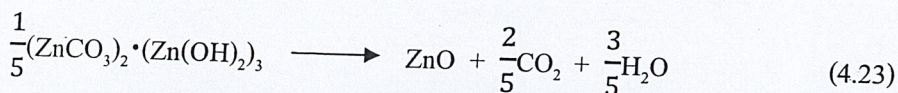
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการสลายตัวทางความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารที่เตรียมจาก $(\text{ZnCO}_3)_2 \cdot (\text{Zn}(\text{OH})_2)_3$ กับ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$

จากกราฟ TG ในรูปที่ 4.2 ได้ทำการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของสารผสมระหว่าง $(\text{ZnCO}_3)_2 \cdot (\text{Zn}(\text{OH})_2)_3$ และ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ไปเป็น $\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 900 องศาเซลเซียส จากกราฟสารผสมจะมีการสลายตัวทั้งหมด 4 ช่วง

ช่วงที่ 1 มีการสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 200 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของ NH_3 คิดเป็นร้อยละ 14.06 ของน้ำหนักของสารทั้งหมด ดังแสดงในสมการที่ (4.22) [33]

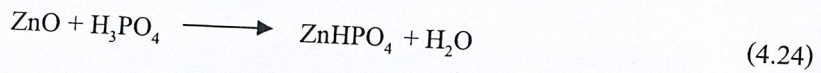


ช่วงที่ 2 มีการสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของ CO_2 และ H_2O คิดเป็นร้อยละ 11.75 ของน้ำหนักของสารทั้งหมด ดังสมการที่ (4.23) [34]

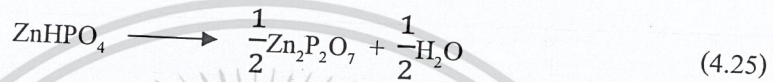


ช่วงที่ 3 มีการสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 386 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของ H_2O ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอสฟอริกกับคอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากสมการ

ที่ (4.22) และ (4.23) ตามลำดับ โดยการสูญเสียน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 7.44 ของน้ำหนักของสารทั้งหมด ดังสมการที่ (4.24) [32]

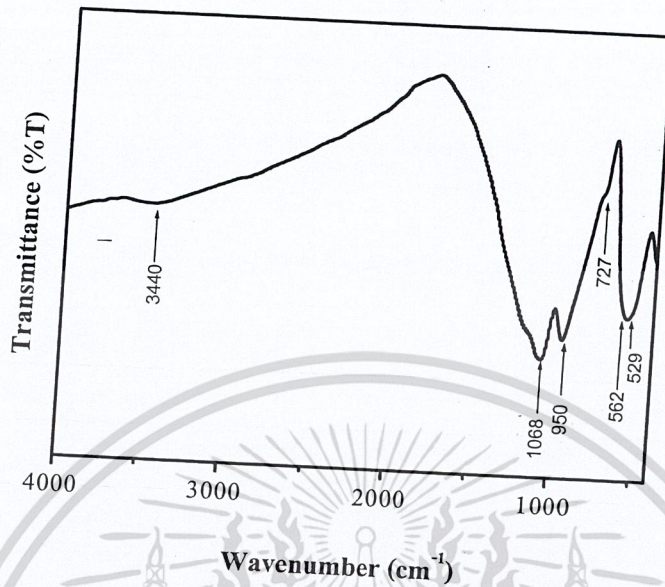


ช่วงที่ 4 มีการสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 386 ถึง 900 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของ H_2O คิดเป็นร้อยละ 3.72 และเกิดเป็นสารคอปเปอร์ไพโรฟอสเฟต ซึ่งมีน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 63.00 ของน้ำหนักของสารทั้งหมด ดังสมการที่ (4.25) [31]



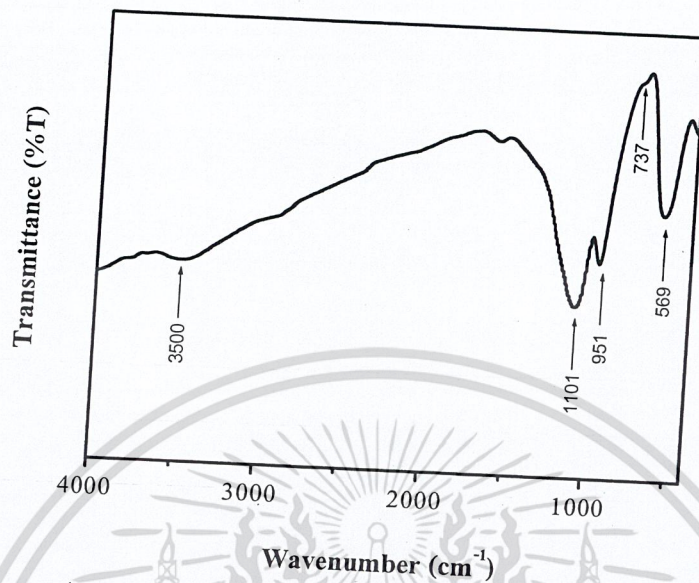
4.2.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของสาร FT-IR

ผลของค่าสเปกตรัม FTIR ของการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 1:0, 0.8:0.2, 0.6:0.4, 0.5:0.5, 0.4:0.6 0.2:0.8 และ 0:1 โมล ตามลำดับ สำหรับรูปแบบการสั่นของคอปเปอร์ซิงค์ไพโรฟอสเฟตที่มีหน่วยย่อยของหมู่ไพโรฟอสเฟต $[\text{P}_2\text{O}_7]^{4-}$ จะแสดงเอกลักษณ์การสั่นคือ การยืดหดแบบไม่สมมาตร (Asymmetric stretching) ของ PO_3 และ POP, การยืดหดแบบสมมาตร (Symmetric stretching) ของ POP และการสั่นแบบโค้งงอ (Bending) ของ PO_3 นอกจากนี้ รูปแบบการสั่นที่ปรากฏในช่วง $3300\text{-}3500 \text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของน้ำที่เกิดจากความชื้นในเม็ด KBr จากผลการทดลองจะพบว่า



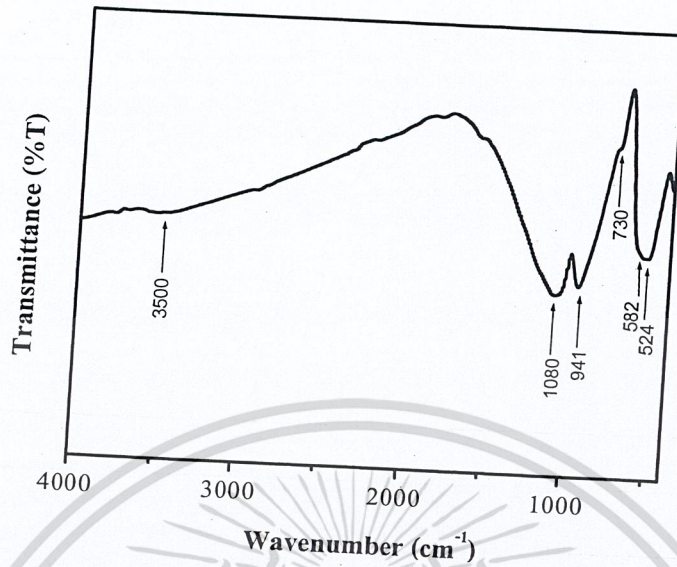
รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัม FT-IR ของ $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 1:0 โมล

จากรูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการสั่นของ $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 1:0 โมล ที่มีหน่วยย่อยของโครงสร้างเป็นไฟโรฟอสเฟตแอนไอออน ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) แถบการสั่นจะพบที่เลขคลื่น 1068 และ 950 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการสั่นแบบยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของพันธะ PO_3 และการยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของพันธะ POP ตามลำดับ การสั่นของสะพานพันธะการยืดหดแบบสมมาตร (symmetric stretching) ของ POP พบที่เลขคลื่น 727 cm^{-1} การสั่นแบบโค้งงอ (Bending) ของ PO_3 จะพบที่เลขคลื่น 562 และ 529 cm^{-1}



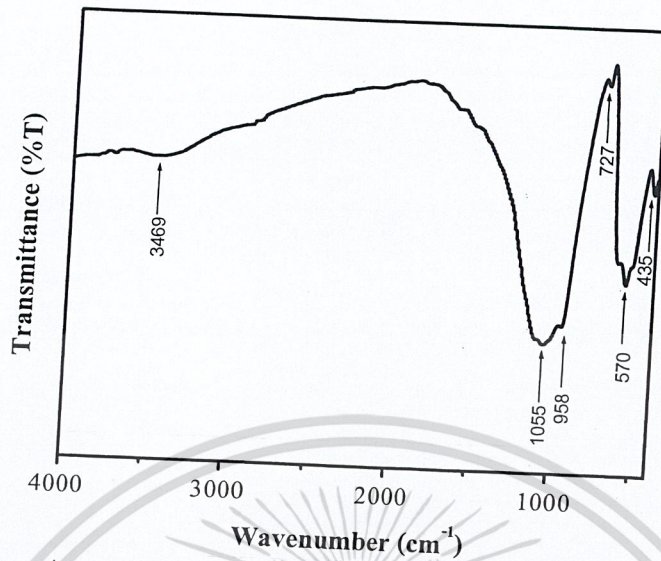
รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัม FTIR ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.8:0.2 โมล

จากรูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบการสั่นของ CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.8:0.2 โมล ที่มีหน่วยย่อยของโครงสร้างเป็นไฟโรฟอสเฟตแอนไอออน ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) แถบการสั่นพบที่เลขคลื่น 1101 และ 951 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการสั่นแบบยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของพันธะ PO_3 และการยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของพันธะ POP ตามลำดับ การสั่นของสะพานพันธะการยืดหดแบบสมมาตร (symmetric stretching) ของ POP จะพบที่เลขคลื่น 737 cm^{-1} การสั่นแบบโค้งงอ (Bending) ของ PO_3 จะพบที่เลขคลื่น 569 cm^{-1}



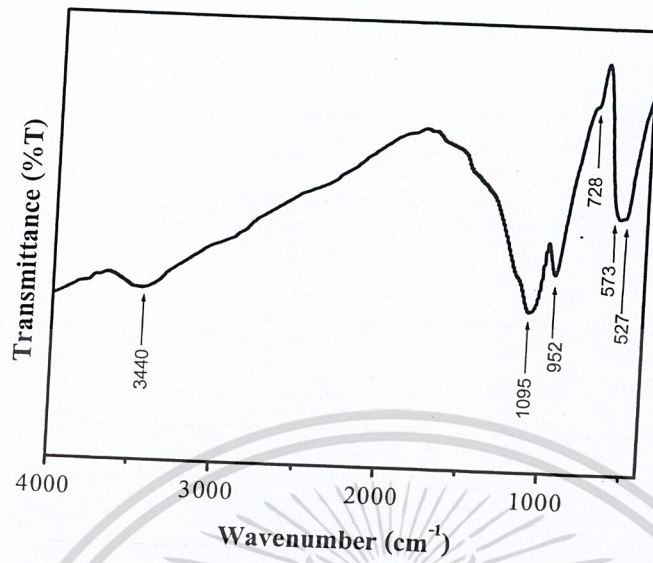
รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัม FTIR ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.6:0.4 โมล

จากรูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบการสั่นของ CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.6:0.4 โมล ที่มีหน่วยย่อยของโครงสร้างเป็นไพโรฟอสเฟตแอนไอออน ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) แถบการสั่น จะพบที่เลขคลื่น 1080 และ 941 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการสั่นแบบยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของพันธะ PO_3 และการยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของพันธะ POP ตามลำดับ การสั่นของสะพานพันธะการยืดหดแบบสมมาตร (symmetric stretching) ของ POP จะพบที่เลขคลื่น 730 cm^{-1} การสั่นแบบโค้งงอ (Bending) ของ PO_3 พบที่เลขคลื่น 582 และ 524 cm^{-1}



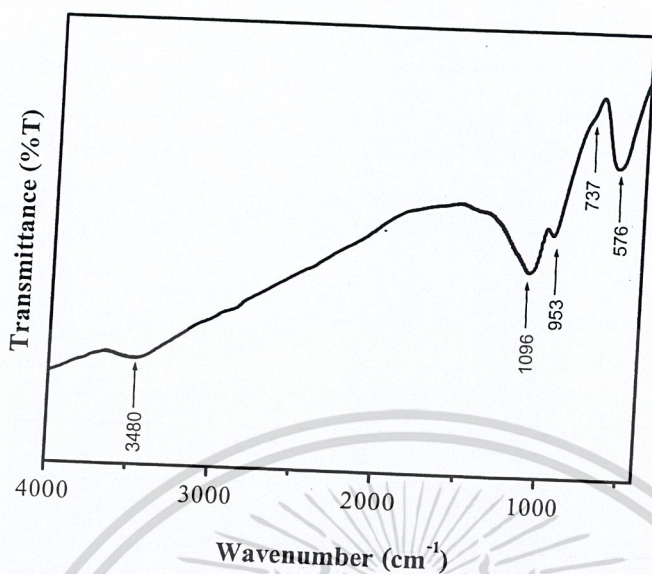
รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัม FTIR ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.5:0.5 โมล

จากรูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบการสั่นของ CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.5:0.5 โมล ที่มีหน่วยย่อยของโครงสร้างเป็นไพโรฟอสเฟตแอนไอออน ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) แถบการสั่น พบที่เลขคลื่น 1055 และ 958 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการสั่นแบบยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของพันธะ PO_3 และการยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของพันธะ POP ตามลำดับ การสั่นของสะพานพันธะการยืดหดแบบสมมาตร (symmetric stretching) ของ POP จะพบที่เลขคลื่น 727 cm^{-1} การสั่นแบบโค้งงอ (Bending) ของ PO_3 จะพบที่เลขคลื่น 570 และการสั่นแบบโคลง (Rocking) จะพบที่เลขคลื่น 435 cm^{-1}



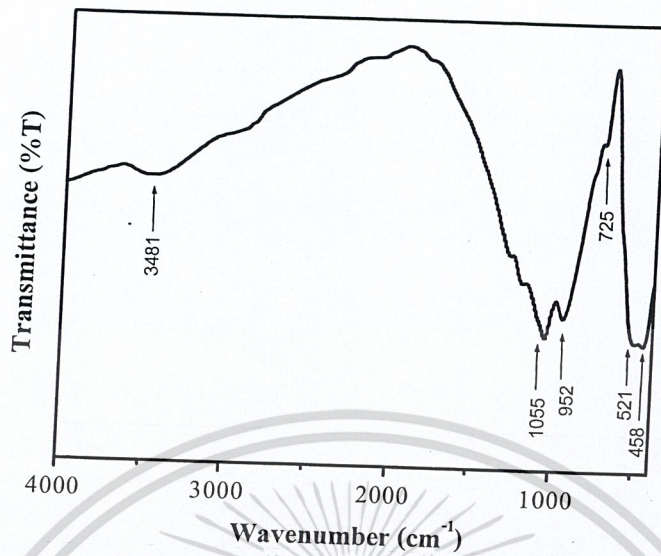
รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัม FTIR ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วน โมลของ Cu:Zn ที่ 0.4:0.6 โมล

จากรูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบการสั่นของ CuZnP_2O_7 ในสัดส่วน โมลของ Cu:Zn ที่ 0.4:0.6 โมล ที่มีหน่วยย่อยของโครงสร้างเป็นไพโรฟอสเฟตแอนไอออน ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) แถบการสั่น พบที่เลขคลื่น 1095 และ 952 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการสั่นแบบยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของพันธะ PO_3 และการยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของพันธะ POP ตามลำดับ การสั่นของสะพานพันธะการยืดหดแบบสมมาตร (symmetric stretching) ของ POP พบที่เลขคลื่น 729 cm^{-1} การสั่นแบบโค้งงอ (Bending) ของ PO_3 พบที่เลขคลื่น 573 และ 527 cm^{-1}



รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัม FTIR ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วน โมลของ Cu:Zn ที่ 0.2:0.8 โมล

จากรูปที่ 4.8 แสดงรูปแบบการสั่นของ CuZnP_2O_7 ในสัดส่วน โมลของ Cu:Zn ที่ 0.2:0.8 โมล ที่มีหน่วยย่อยของโครงสร้างเป็นไพโรฟอสเฟตแอนไอออน ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) แถบการสั่น พบที่เลขคลื่น 1096 และ 953 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการสั่นแบบยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของพันธะ PO_3 และการยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของพันธะ POP ตามลำดับ การสั่นของสะพานพันธะการยืดหดแบบสมมาตร (symmetric stretching) ของ POP จะพบที่เลขคลื่น 737 cm^{-1} การสั่นแบบโค้งงอ (Bending) ของ PO_3 พบที่เลขคลื่น 576 cm^{-1}

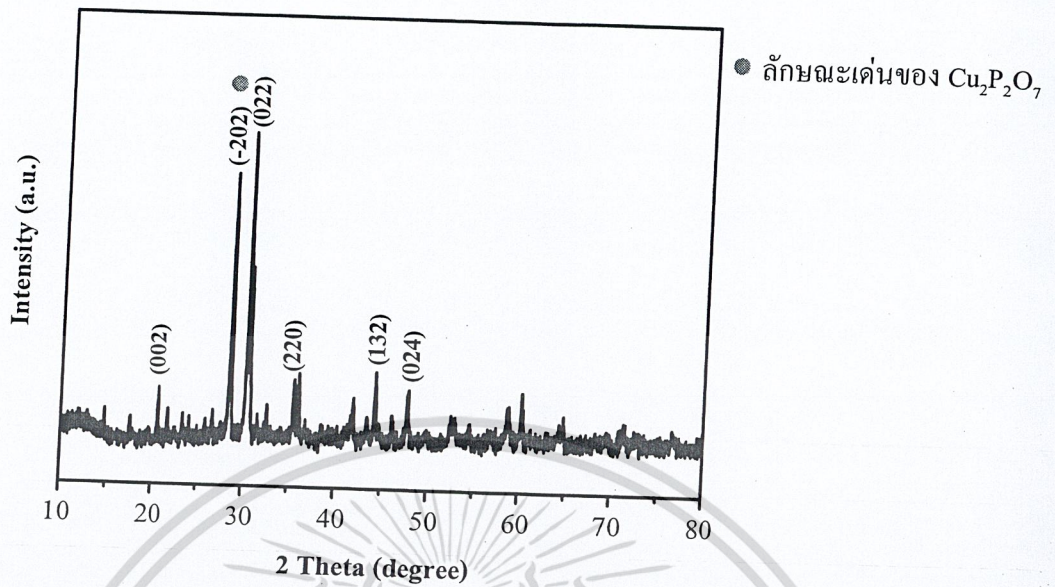


รูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัม FTIR ของสาร $Zn_2P_2O_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0:1 โมล

จากรูปที่ 4.9 แสดงรูปแบบการสั่นของ $Zn_2P_2O_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0:1 โมลที่มีหน่วยย่อยของโครงสร้างเป็นไพโรฟอสเฟตแอนไอออน ($P_2O_7^{4-}$) แถบการสั่นจะพบที่เลขคลื่น 1055 และ 952 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการสั่นแบบยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของพันธะ PO_3 และการยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของพันธะ POP ตามลำดับ การสั่นของสะพานพันธะการยืดหดแบบสมมาตร (symmetric stretching) ของ POP จะพบที่เลขคลื่น 725 cm^{-1} การสั่นแบบโค้งงอ (Bending) ของ PO_3 พบที่เลขคลื่น 521 และ 458 cm^{-1}

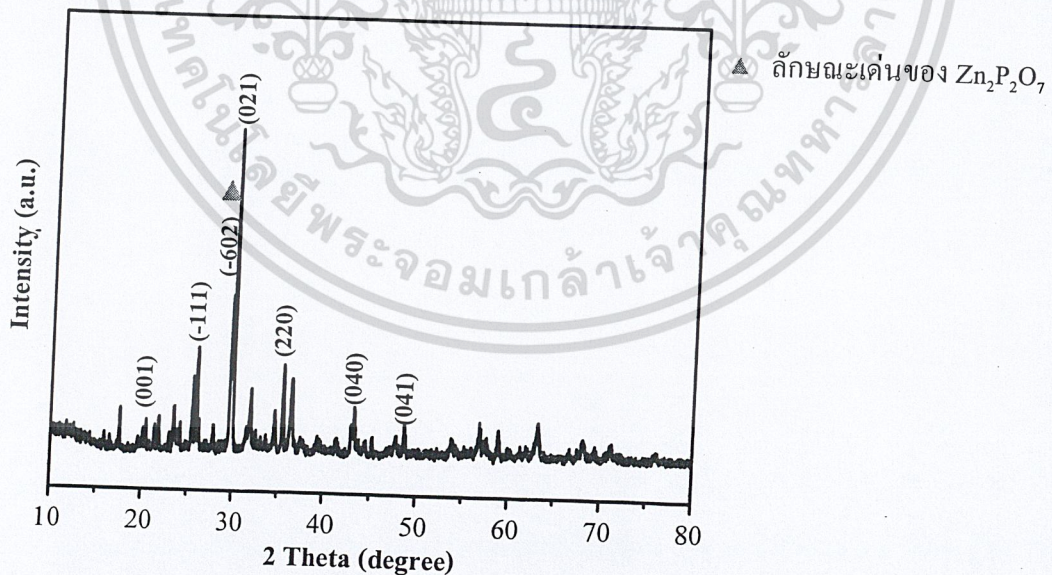
4.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอณูฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ XRD

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction technique) เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ภายในเนื้อวัสดุ โดยนำผลการทดลองใน สัดส่วนโมลต่างๆ ที่สังเคราะห์ได้มาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ X-ray diffraction มาตรฐาน ซึ่งตรงกับข้อมูลมาตรฐาน PDF#792075 , PDF#820973 และ PDF#731648 จากผลการทดลองจะพบว่า



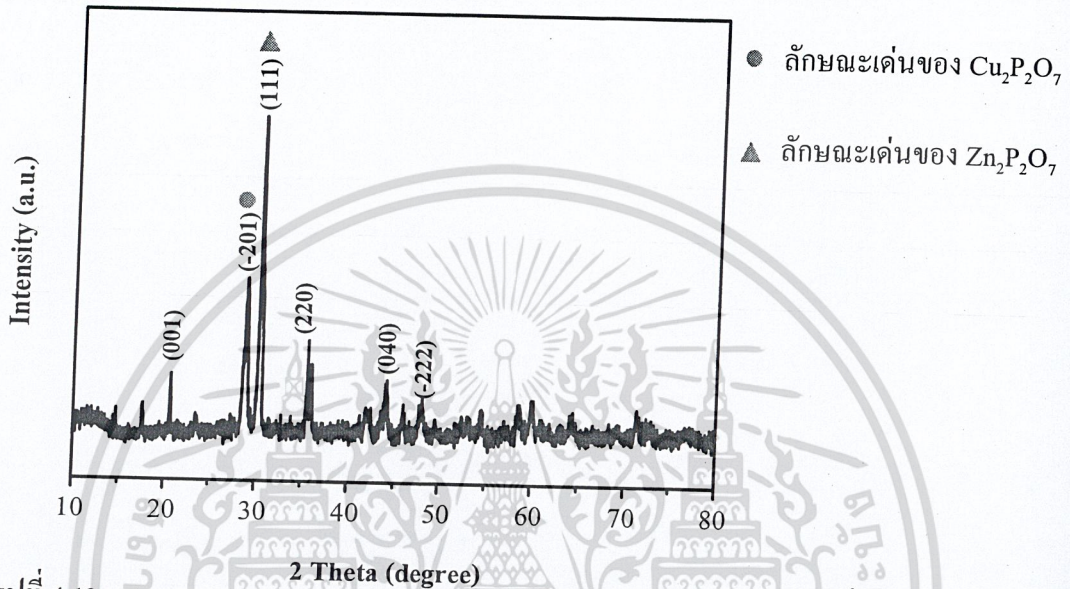
รูปที่ 4.10 แสดง XRD pattern ของสาร $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 1:0 โมล

จากรูปแบบ XRD ของสาร $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 1:0 โมล ดังแสดง ในรูปที่ 4.10 โดยจะพบพีคหลัก (2θ) คือ 20.66(002), 28.42(-202) (ลักษณะเด่นของ $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$), 30.28(022), 35.54(220), 44.17(132) และ 47.76(024) ซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลมาตรฐาน PDF#792075 ($\alpha\text{-Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$) และจากข้อมูลโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก



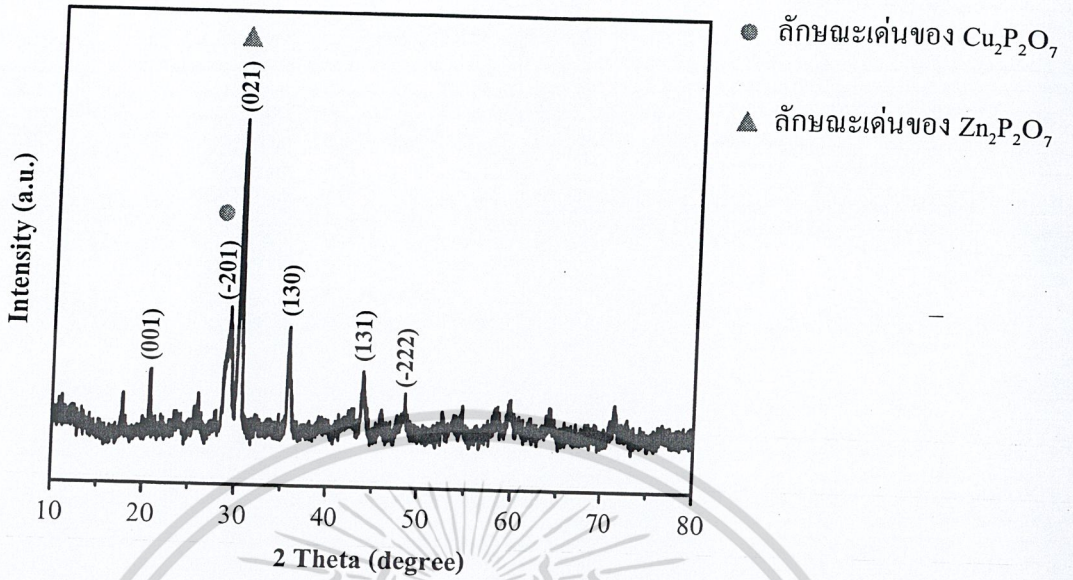
รูปที่ 4.11 แสดง XRD pattern ของสาร $\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0:1 โมล

จากรูปแบบ XRD ของสาร $Zn_2P_2O_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0:1 โมล ดังแสดง ในรูปที่ 4.11 โดยจะพบพีคหลัก (2θ) คือ 20.39(001), 25.48(-111), 29.57(-602) (ลักษณะเด่นของ $Zn_2P_2O_7$), 29.84(021), 35.46(220), 43.71(040) และ 48.64(041) ซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลมาตรฐาน PDF#731648 (β - $Zn_2P_2O_7$) และจากข้อมูลโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก



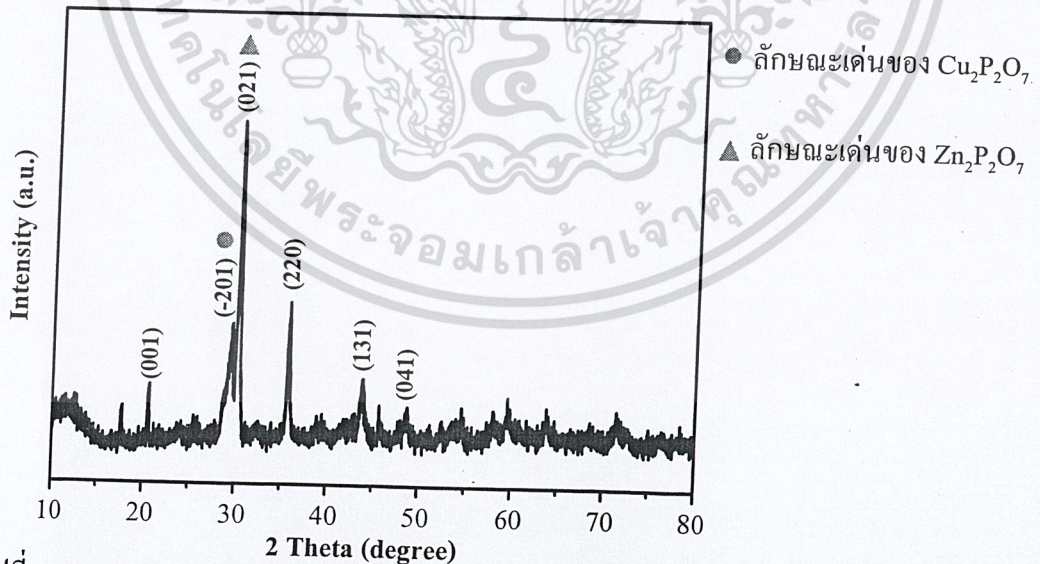
รูปที่ 4.12 แสดง XRD pattern ของสาร $CuZnP_2O_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.8:0.2 โมล

จากรูปแบบ XRD ของสาร $CuZnP_2O_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.8:0.2 โมล ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยจะพบพีคหลัก (2θ) คือ 20.62(001), 28.80(-201) (ลักษณะเด่นของ $Cu_2P_2O_7$), 30.19(111) (ลักษณะเด่นของ $Zn_2P_2O_7$), 35.55(220), 44.05(040) และ 48.11(041) ซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลมาตรฐาน PDF#820973 ($CuZnP_2O_7$) และจากข้อมูลโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก



รูปที่ 4.13 แสดง XRD pattern ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.6:0.4 โมล

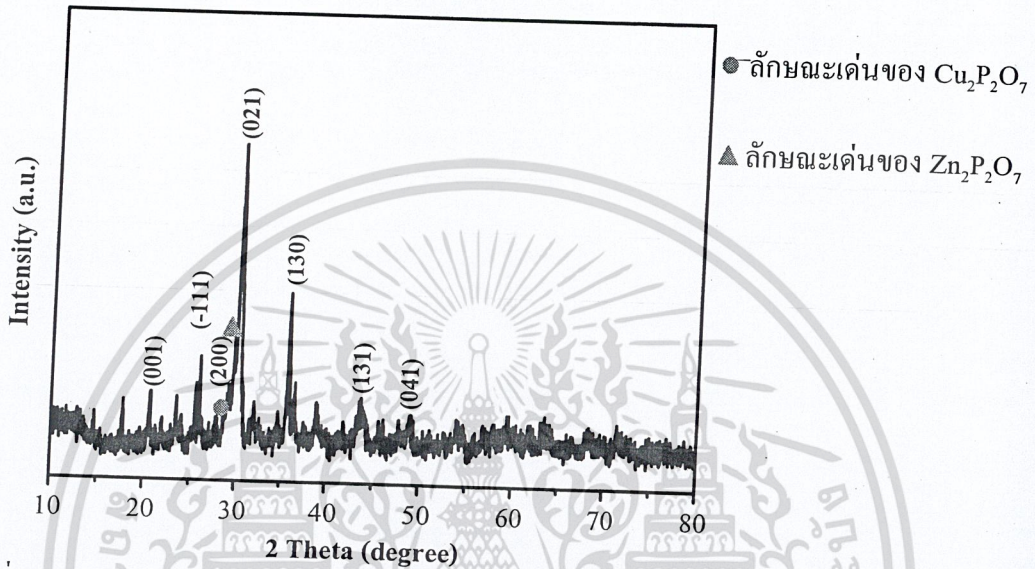
จากรูปแบบ XRD ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.6:0.4 โมล ดังแสดงในรูปที่ 4.13 โดยจะพบพีคหลัก (2θ) คือ 20.58(001), 25.88(200), 28.68(-201) (ลักษณะเด่นของ $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$), 29.24(-201) (ลักษณะเด่นของ $\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$), 30.05(021), 35.61(130), 43.7(131) และ 48.48 (-222) ซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลมาตรฐาน PDF#820973(CuZnP_2O_7) และจากข้อมูลโครงสร้างผลึกเป็นแบบ โมโนคลินิก



รูปที่ 4.14 แสดง XRD pattern ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.5:0.5 โมล

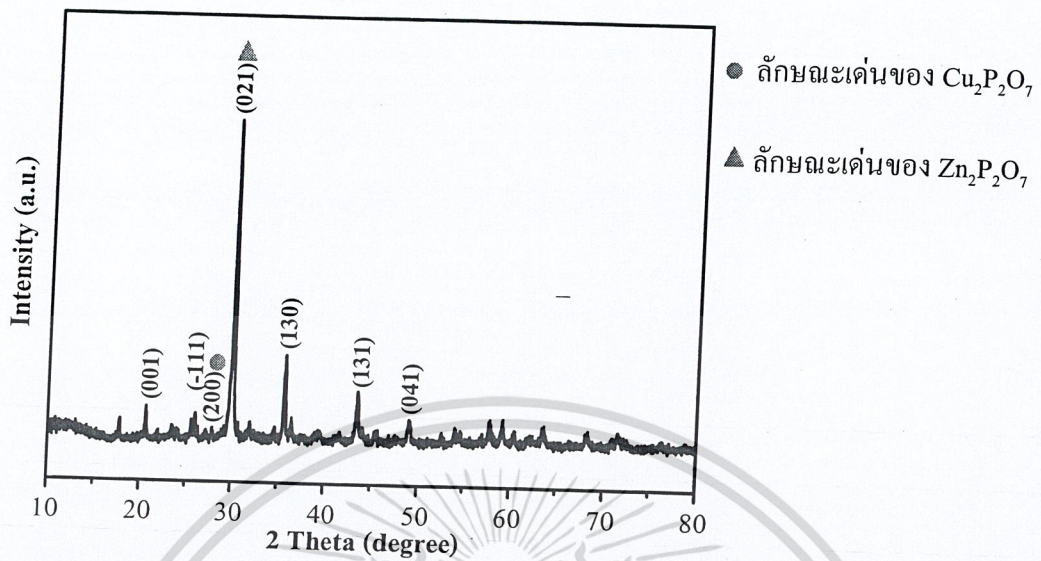
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแบบ XRD ของ $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.5:0.5 โมล ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยจะพบพีคหลัก (2θ) คือ 20.60(001), 28.69(-201) (ลักษณะเด่นของ Cu), 29.50(-201) (ลักษณะเด่นของ Zn), 30.05(021), 35.60(220), 43.80(131) และ 48.65(041) ซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลมาตรฐาน PDF#820973 (CuZnP_2O_7) และจากข้อมูลโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก



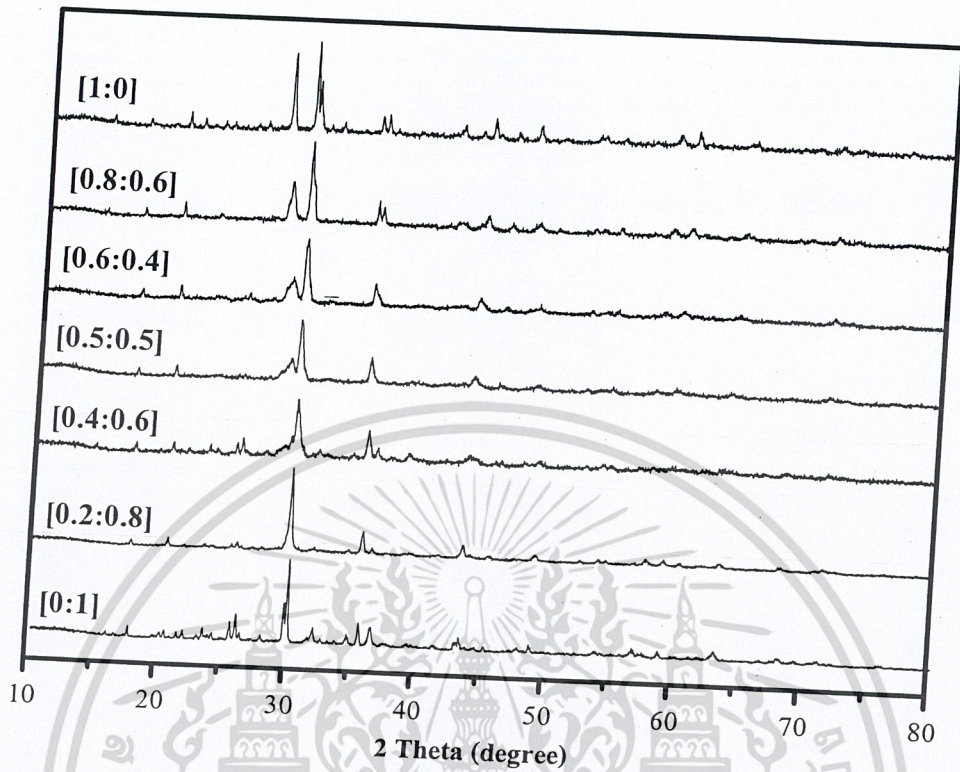
รูปที่ 4.15 แสดง XRD pattern ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.4:0.6 โมล

จากรูปแบบ XRD ของสาร $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.4:0.6 โมล ดังแสดงในรูปที่ 4.15 โดยจะพบพีคหลัก (2θ) คือ 20.60(001), 25.92(-111), 27.89(200) (ลักษณะเด่นของ $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$), 29.65(021) (ลักษณะเด่นของ $\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$), 30.05(021), 35.60(130), 43.62 (131) และ 48.80(041) ซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลมาตรฐาน PDF#820973 (CuZnP_2O_7) และจากข้อมูลโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก



รูปที่ 4.16 แสดง XRD pattern ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.2:0.8 โมล

จากรูปแบบ XRD ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.2:0.8 โมล ดังแสดงในรูปที่ 4.16 โดยจะพบพีคหลัก (2θ) คือ 20.58(001), 25.96(-111), 27.85(200) (ลักษณะเด่นของ $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$), 30.00(021) (ลักษณะเด่นของ $\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$), 35.71(130), 43.52 (131) และ 49.02(041) ซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลมาตรฐาน PDF#820973 (CuZnP_2O_7) และจากข้อมูลโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก



รูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบ XRD pattern ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วน โมลต่างๆ

จากการเปรียบเทียบ XRD pattern ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วน โมลต่างๆ ดังแสดง ในรูปที่ 4.17 พบว่า จะเห็นลักษณะเด่นพีคของ $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ อย่างชัดเจนในอัตราส่วน Cu:Zn ที่ 1:0 โมล และมีแนวโน้มชัดเจนน้อยลงเมื่อมีสัดส่วน โมลของ $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ลดลง ในทางกลับกัน จะเห็นลักษณะเด่นพีคของ $\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ มีแนวโน้มชัดเจนเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีสัดส่วน โมลของ $\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ เพิ่มขึ้น และจะเห็นลักษณะเด่นพีคของ $\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ อย่างชัดเจนในสัดส่วน โมลของ Cu:Zn ที่ 0:1 โมล

เมื่อนำผลที่ได้มาคำนวณค่าแลตทิซพารามิเตอร์และคำนวณหาค่า crystallite size ของสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วน โมลต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งพบว่าค่าแลตทิซพารามิเตอร์ ที่คำนวณ ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานจาก PDF#792075, PDF#820973 และ PDF#731648 นอกจากนี้ยังพบว่า $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ มีขนาดผลึกใหญ่ที่สุดได้ค่าประมาณ 72.73 nm รองลงมาก็คือ $\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ได้ค่าขนาดผลึกประมาณ 70.41 nm และสาร CuZnP_2O_7 ในสัดส่วน โมลของ Cu:Zn ที่ 0.5:0.5 โมล มีขนาดผลึกเล็กที่สุดได้ค่าขนาดผลึกประมาณ 42.73 nm

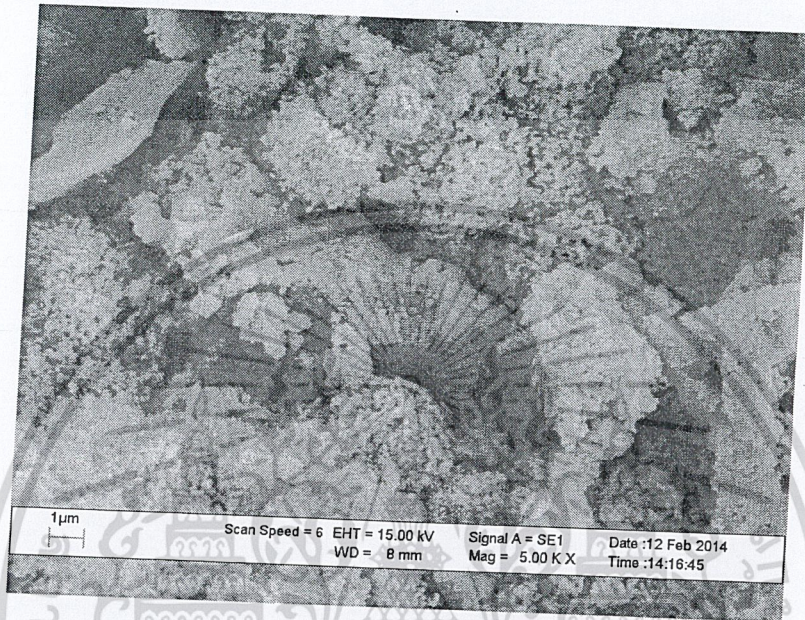
ตารางที่ 4.3 การคำนวณค่า lattice parameter และขนาดผลึกของ CuZnP_2O_7 ในแต่ละสัดส่วนโมล

Compounds	Systems	a (cm)	b (cm)	c (cm)	β (deg.)	Average Crystallite size (nm)
$\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$	PDF#792075	6.895	8.113	9.164	109.62	-
	This work	6.884	8.129	9.230	109.893	72.73 ± 22.17
	DIF This work- PDF	-0.011	0.016	0.066	0.27365	
$\text{Cu}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{P}_2\text{O}_7$	PDF	6.741	8.190	4.542	107.72	-
	This work	6.748	8.199	4.565	108.501	61.76 ± 28.20
	DIF This work- PDF	0.007	0.009	0.023	0.78136	
$\text{Cu}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{P}_2\text{O}_7$	PDF	6.741	8.190	4.542	107.72	-
	This work	6.736	8.206	4.531	107.679	48.29 ± 32.05
	DIF This work- PDF	-0.005	0.016	-0.011	-0.04071	
$\text{Cu}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{P}_2\text{O}_7$	PDF	6.741	8.190	4.542	107.72	-
	This work	6.754	8.180	4.558	107.539	42.73 ± 18.44
	DIF This work- PDF	0.013	-0.01	0.016	-0.18089	
$\text{Cu}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{P}_2\text{O}_7$	PDF	6.741	8.190	4.542	107.72	-
	This work	6.743	8.260	4.579	105.66	48.90 ± 18.24
	DIF This work- PDF	0.002	0.07	0.037	-2.05219	
$\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{P}_2\text{O}_7$	PDF	6.741	8.190	4.542	107.72	-
	This work	6.714	8.179	4.434	106.793	63.27 ± 25.44
	DIF This work- PDF	-0.027	-0.011	-0.108	-0.927	
$\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$	PDF	6.610	8.290	4.510	105.40	-
	This work	6.596	8.366	4.445	103.830	70.41 ± 25.60
	DIF This work- PDF	-0.014	0.076	-0.065	-1.570	

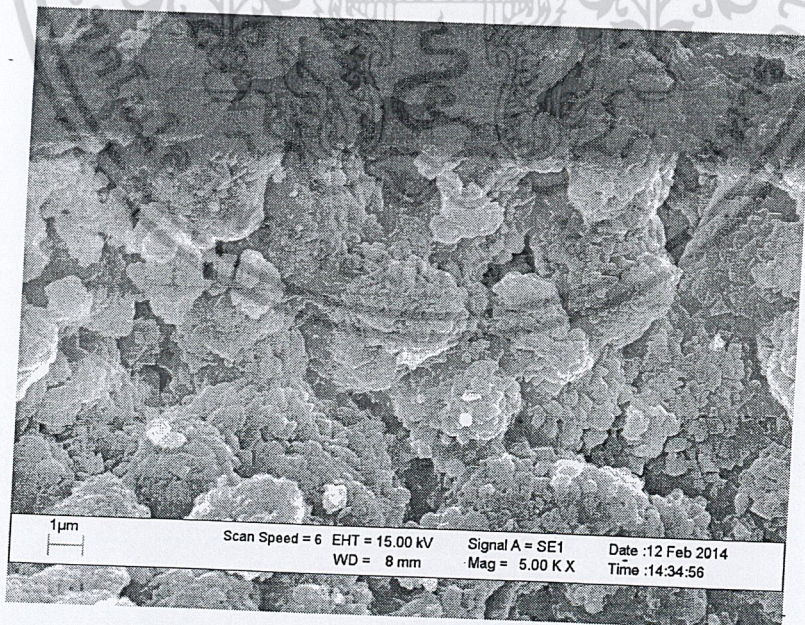
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค SEM

นำสารที่เตรียมได้มาทำการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.18 – 4.24

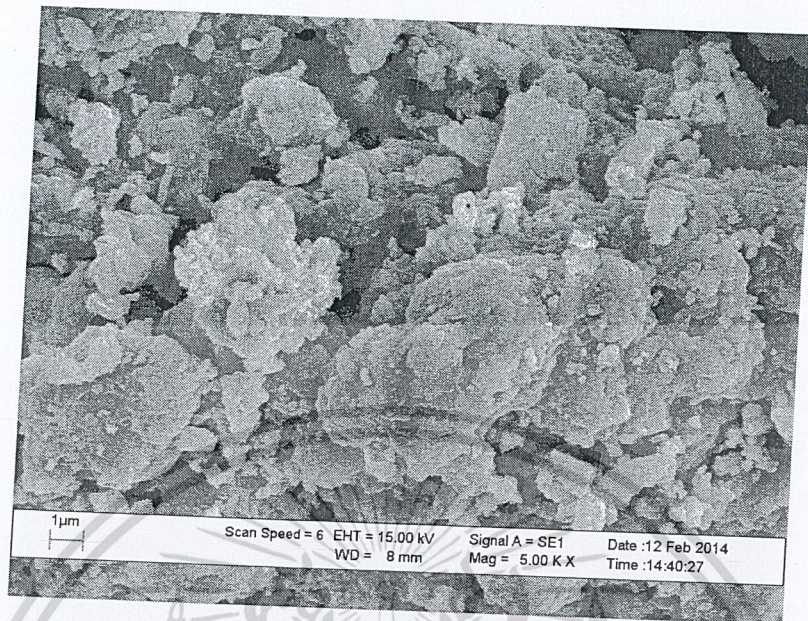


รูปที่ 4.18 ภาพถ่าย SEM ของ $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 1:0 โมล

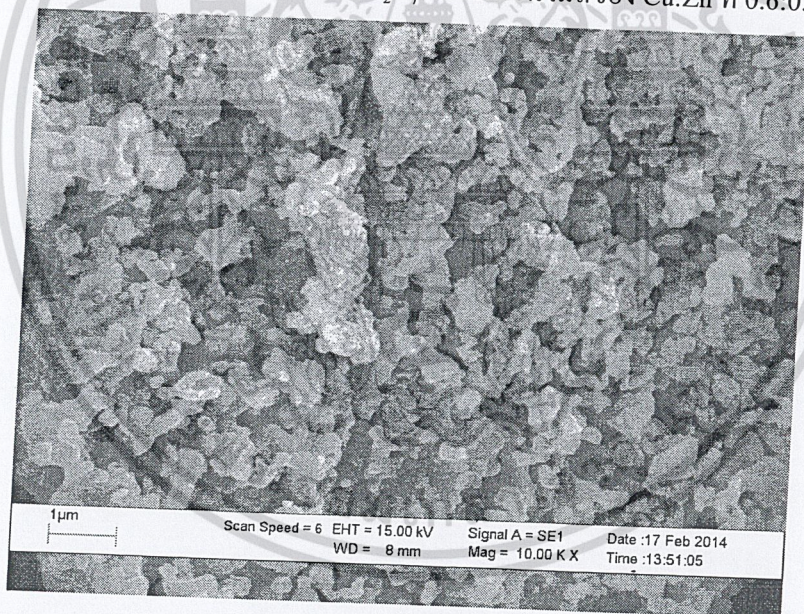


รูปที่ 4.19 ภาพถ่าย SEM ของ CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.8:0.2 โมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

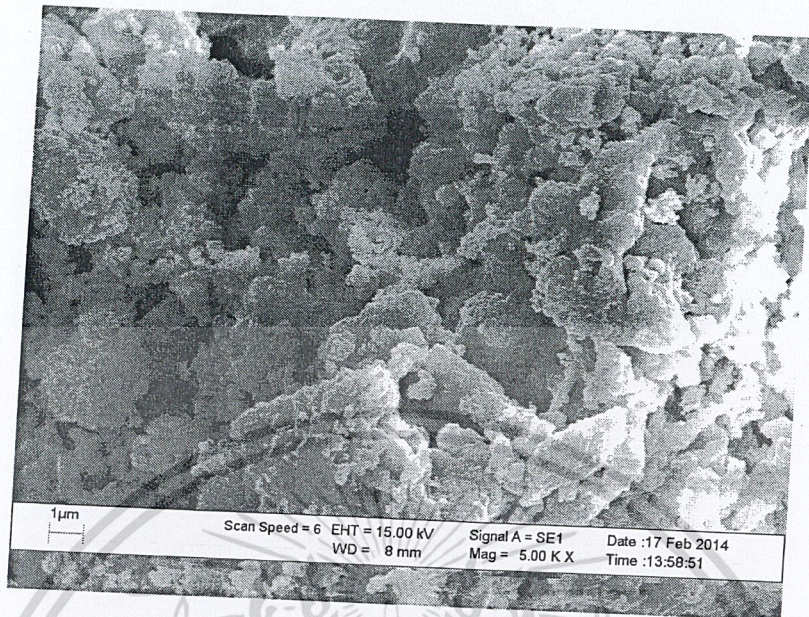


รูปที่ 4.20 ภาพถ่าย SEM ของ CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.6:0.4 โมล

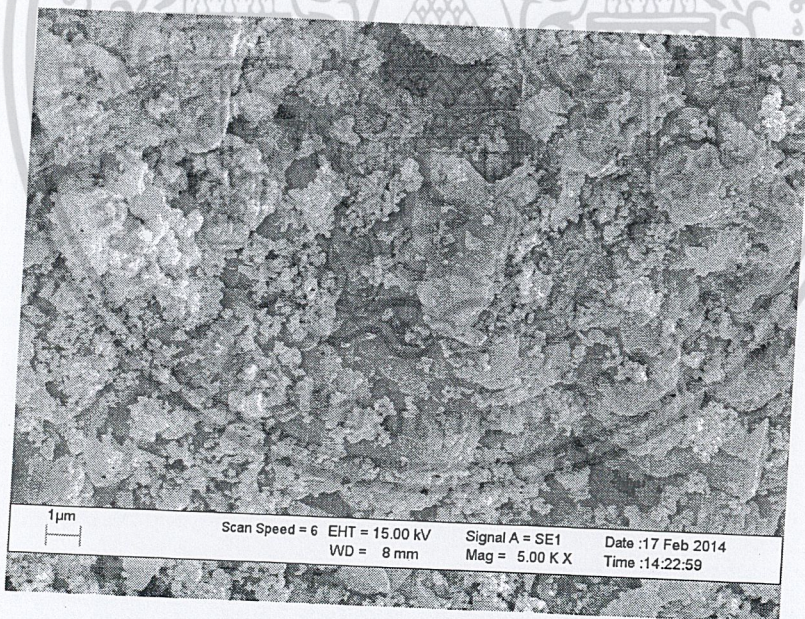


รูปที่ 4.21 ภาพถ่าย SEM ของ CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.5:0.5 โมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

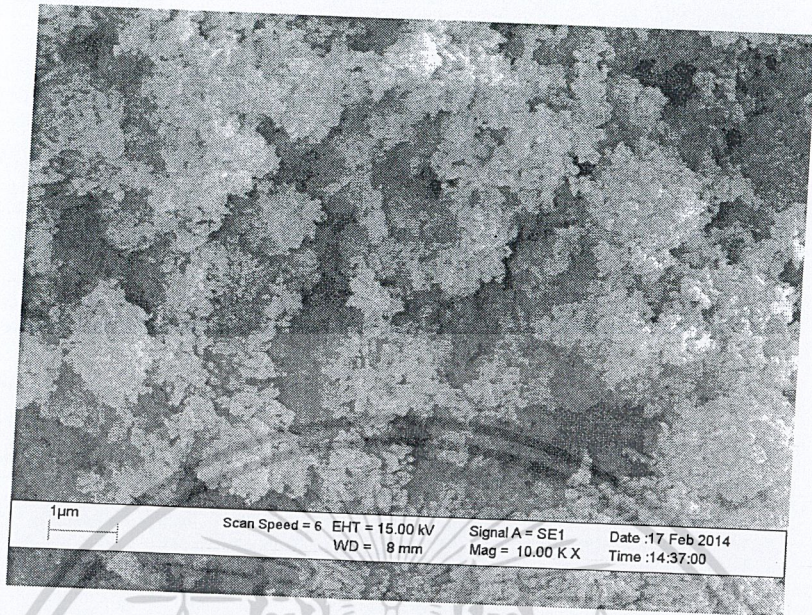


รูปที่ 4.22 ภาพถ่าย SEM ของ $\text{CuZn P}_2\text{O}_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.4:0.6 โมล



รูปที่ 4.23 ภาพถ่าย SEM ของ CuZnP_2O_7 ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.2:0.8 โมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ภาพถ่าย SEM ของ $Zn_2P_2O_7$ ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0:1 โมล

จากรูปที่ 4.18 ถึง 4.24 พบว่าเกรนมีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดไม่แน่นอน และมีการซ้อนทับกันเป็น
ผลึกขนาดใหญ่

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ไพโรฟอสเฟต (CuZnP_2O_7) ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 1:0 , 0.8:0.2 , 0.6:0.4 , 0.5:0.5 , 0.4:0.6 , 0.2:0.8 และ 0:1 โมล โดยคอปเปอร์ซิงค์ไพโรฟอสเฟตที่ได้จากการเผาของแข็งผสมที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 0.8:0.2 โมล ได้ร้อยละผลผลิตมากที่สุด คือ ร้อยละ 95.74 และ ที่ 1:0 โมล ได้ร้อยละผลผลิตน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 92.88

จากผล TGA อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเพื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ซิงค์ไพโรฟอสเฟต (CuZnP_2O_7) ในสัดส่วนโมลต่างๆ คือ 650 องศาเซลเซียส ซึ่งยืนยันได้จากผล FT-IR และ XRD โดยผลจาก FT-IR มีการตรวจพบหมู่ฟอสเฟตในเบื้องต้นในทุกสัดส่วนโมล และสามารถยืนยันผลได้อย่างชัดเจนเมื่อพิก XRD ที่ปรากฏมีลักษณะเด่นของพิกในแต่ละพิก ตรงกับข้อมูล XRD มาตรฐาน จากการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารทั้ง 3 เทคนิค จึงยืนยันได้ว่าสารที่ทำการเตรียมเป็นสาร โลหะไพโรฟอสเฟตจริงในทุกๆ สัดส่วนโมล

นอกจากนี้ XRD ยังบอกความเป็นผลึกและขนาดผลึกของสารซึ่งสอดคล้องกับผล SEM ที่ยืนยันว่าสารที่ทำการเตรียมมีความเป็นผลึกจริงและขนาดผลึกมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผล XRD

จึงสรุปได้ว่า การเตรียมสารคอปเปอร์ซิงค์ไพโรฟอสเฟตในสัดส่วนโมลของ Cu:Zn ที่ 1:0 , 0.8:0.2 , 0.6:0.4 , 0.5:0.5 , 0.4:0.6 , 0.2:0.8 และ 0:1 โมล เป็นโลหะไพโรฟอสเฟต และยังมีความเป็นผลึกอีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

นำสารคอปเปอร์ซิงค์ไพโรฟอสเฟตที่เตรียมได้มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับชั้นขจัดน้ำของเมทานอลในการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากแก๊สสังเคราะห์ เพื่อศึกษาสภาพเร่งปฏิกิริยาของคอปเปอร์ซิงค์ไพโรฟอสเฟต .

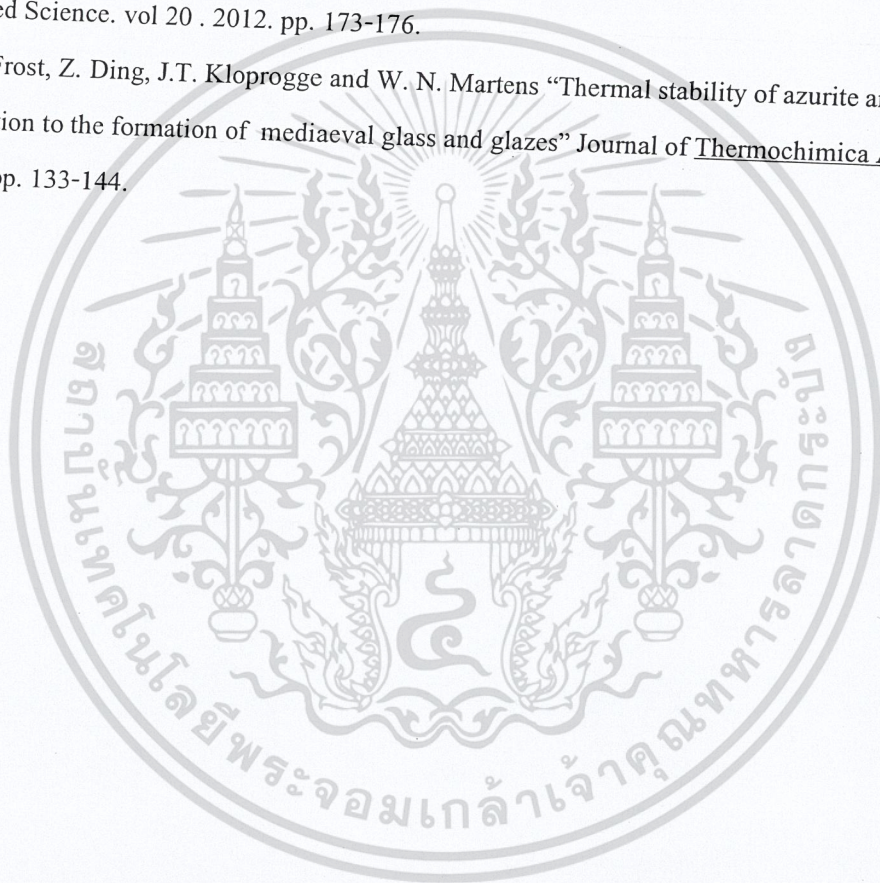
เอกสารอ้างอิง

- [1] [online]. Available : http://www.bpc.ac.th/knowledge/article/Unit_1.pdf
- [2] [online]. Available : http://www.esso.co.th/Thailand-Thai/PA/Files/2012eo_thai.pdf
- [3] [online]. Available : http://www.eppo.go.th/ccep/download/NEEP2030_FINAL.pdf
- [4] [online]. Available : <http://www.dede.go.th/dede/images/stories/aedp25.pdf>
- [5] [online]. Available : <http://thaipublica.org/2012/01/rosana-ngv-cost-ptt/>
- [6] [online]. Available : <http://www.tei.or.th/remhs/publication/Booklet-Biomassenergy.pdf>
- [7] [online]. Available : <http://www.theenergy.biz/Hydrogen1.html>
- [8] [online]. Available : http://www.dede.go.th/dede/images/stories/KM_boer/three_stage.pdf
- [9] ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ. เทคโนโลยี GTL เพื่อการผลิตเชื้อเพลิงสะอาด. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, มิถุนายน-กรกฎาคม 2552, หน้า 95-104.
- [10] [online]. Available : http://www.doeb.go.th/knowledge/data/1Dimethyl_Ether.pdf
- [11] [online]. Available : <http://thaipublica.org/2011/10/ngv-public-safety/>
- [12] [online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Pyrophosphate>
- [13] [online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_pyrophosphate
- [14] [online]. Available : <http://it.geol.science.cmu.ac.th/~ssaenton/205237/solid%20solution%20definition.pdf>
- [15] Kashinath C Patil และคณะ. Combustion synthesis. Department of Inorganic and Physical Chemistry, Indian institute of Science, Bangalore- 012, India.
- [16] [online]. Available : <https://www.mtec.or.th/laboratory/ceraparts/index.php/experience/7-2009-03-30-03-56-34/2009-03-30-04-00-02/14-2009-04-29-08-40-51>
- [17] [online]. Available : http://www.thaiscience.com/lab_vol/p29/FTIR%20เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด.html
- [18] [online]. Available : http://share.pdfonline.com/04c24f10d9c04349944694d7f1ea8513/SPECTRO_sC_2.htm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [19] [online]. Available : <http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM328-10.pdf>
- [20] [online]. Available : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/x-ray-analysis-instrument-menu/item/87-เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์-xrd.html>
- [21] [online]. Available : http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/n_thammakan/ch331-crystal_structure.pdf
- [22] [online]. Available : http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf_XRD1.htm
- [23] [online]. Available : <http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/218-scanning-eletron-microscopysem-.html>
- [24] F. Yaripour, F. Baghaei, I. Schmidt, J. Perregaard. "Synthesis of dimethyl ether from methanol over aluminium phosphate and silica-titania catalysts". *Journal of Catalysis Communications*. vol 6. 2005. pp. 542-549.
- [25] มานิตย์ ดวงเพ็ญมาตร, สุชาติณี เนรมิตตคพงษ์, อาทิตย์ เนรมิตตคพงษ์. การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะฟอสเฟต. ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2551.
- [26] Qing Sun, Yuchuan Fu, Haixia Yang, Aline Auroux, Jianyi Shen. "Dehydration of methanol to dimethyl ether over Nb₂O₅ and NbOPO₄ catalysts: Microcalorimetric and FT-IR studies". *Journal of Molecular Catalysis A : Chemical*. vol 275. 2007. pp. 183-193.
- [27] Yun-Jo Lee, Jung Mi Kim, Jong Wook Bae, Chae-Ho Shin, Ki-Won Jun. "Phosphorus induced hydrothermal stability and enhanced catalytic activity of ZSM-5 in methanol to DME conversion". *Journal of Fuel*. vol 88. 2009. pp. 1915-1921.
- [28] Banjong Boonchom, Naratip Vittayakorn. "Synthesis and ferromagnetic property of new binary copper iron pyrophosphate CuFeP₂O₇". *Journal of Materials Letters*. vol 64. 2010. pp. 275-277.
- [29] จุงใจ ปั้นประณต. การผลิตไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลเพื่อเป็นพลังงานทางเลือก. ทุนวิจัยกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [30] Banjong Boonchom, Naratip Vittayakorn. "Simple fabrication of polyhedral grain-like microparticle - Cu_{0.5}Zn_{0.5}HPO₄•H₂O and porous structure CuZnP₂O₇". *Journal of Ceramics International*. vol 38. 2012. pp. 411-415.

- [31] Hiroaki Onoda, Kenichi Okumoto. "Synthesis, Acid and Base Resistance of Various Copper Phosphate Pigments by the Substitution with Lanthanum". *Journal of Materials Sciences and Applications*. vol 2. 2011. pp. 209-214.
- [32] M. Gollinger, Z. Kowalski. "Environmental, Economic Assessment of Feed Phosphate Technology Modernization". *Journal of Environmental Studies*. vol 8. 1999. pp. 67-72.
- [33] H. Abba, H. Musa, A.A. Kogo and A.A. Salisu. "Studies on the Effects of Ammonium Phosphates on the Flammability Properties of Poly(Vinyl Alcohol) Films". *Journal of Basic and Applied Science*. vol 20 . 2012. pp. 173-176.
- [34] R. L. Frost, Z. Ding, J.T. Kloprogge and W. N. Martens "Thermal stability of azurite and malachite in relation to the formation of mediaeval glass and glazes" *Journal of Thermochemica Acta*. vol 390. 2002. pp. 133-144.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณน้ำหนักของสารตั้งต้น

มวลโมเลกุล ของ $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$ 221.20 g/mol

มวลโมเลกุล ของ $(\text{ZnCO}_3)_2 \cdot (\text{Zn(OH)}_2)_3$ 549.01 g/mol

มวลโมเลกุล ของ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 132.06 g/mol

คำนวณน้ำหนัก $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$ ที่ต้องชั่ง

$$\frac{1 \text{ mol CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2}{2 \text{ mol Cu}} = \frac{0.5 \text{ mol CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2}{1 \text{ mol Cu}}$$

$$\frac{1}{2} \text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2 = \frac{221.20 \text{ g CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2}{1 \text{ mol CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2} \times \frac{0.5 \text{ mol CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2}{1 \text{ mol Cu}}$$

$$\frac{1}{2} \text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2 = 110.55 \frac{\text{g CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2}{1 \text{ mol Cu}}$$

คำนวณน้ำหนัก $\text{ZnCO}_3 \cdot 3/2\text{Zn(OH)}_2$ ที่ต้องชั่ง

$$\frac{1 \text{ mol (ZnCO}_3)_2 \cdot (\text{Zn(OH)}_2)_3}{5 \text{ mol Zn}} = \frac{0.2 \text{ mol (ZnCO}_3)_2 \cdot (\text{Zn(OH)}_2)_3}{1 \text{ mol Zn}}$$

$$\frac{1}{5} (\text{ZnCO}_3)_2 \cdot (\text{Zn(OH)}_2)_3 = \frac{549.01 \text{ g (ZnCO}_3)_2 \cdot (\text{Zn(OH)}_2)_3}{1 \text{ mol (ZnCO}_3)_2 \cdot (\text{Zn(OH)}_2)_3} \times$$

$$\frac{0.2 \text{ mol (ZnCO}_3)_2 \cdot (\text{Zn(OH)}_2)_3}{1 \text{ mol Zn}}$$

$$\frac{1}{5} \text{ZnCO}_3 \cdot 3/2\text{Zn(OH)}_2 = 109.80 \frac{\text{g ZnCO}_3 \cdot 3/2\text{Zn(OH)}_2}{1 \text{ mol Zn}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณน้ำหนัก $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ที่ต้องชั่ง

$$\text{g } (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 = 132.06 \frac{\text{g } (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4}{1 \text{ mol}}$$

ตาราง ก แสดงผลการคำนวณน้ำหนักของสารตั้งต้น

สัดส่วนโมล		น้ำหนักของสารตั้งต้น (กรัม)		
Cu	Zn	$0.5\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	$0.2(\text{ZnCO}_3)_2 \cdot (\text{Zn}(\text{OH})_2)_3$	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$
1	0	11.06	0.00	13.21
0.8	0.2	8.85	2.20	13.21
0.6	0.4	6.64	4.39	13.21
0.5	0.5	5.53	5.49	13.21
0.4	0.6	4.42	6.59	13.21
0.2	0.8	2.21	8.78	13.21
0	1	0.00	10.98	13.21

การคำนวณน้ำหนักทางทฤษฎี

$$\text{น้ำหนักทางทฤษฎี} = \frac{\text{มวลโมเลกุลของสารผลิตภัณฑ์} \times \text{น้ำหนักสารตั้งต้น}}{\text{มวลโมเลกุลสารตั้งต้น}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณน้ำหนักทางทฤษฎี

สัดส่วนโมล		มวลโมลเกลือสารตั้งต้น		มวลโมลเกลือสารผลิตภัณฑ์	
Cu	Zn	$0.5\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	$0.2(\text{ZnCO}_3)_2 \cdot (\text{Zn}(\text{OH})_2)_3$	$0.5\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$	$0.5\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$
1	0	110.60	0.00	150.52	0.00
0.8	0.2	88.48	21.96	120.42	30.47
0.6	0.4	66.36	43.92	90.31	60.94
0.5	0.5	55.30	54.90	75.26	76.17
0.4	0.6	44.24	65.88	60.21	91.40
0.2	0.8	22.12	87.84	30.10	121.87
0	1	0.00	109.80	0.00	152.34

ตาราง ค ผลการคำนวณน้ำหนักทางทฤษฎี

สัดส่วนโมล		น้ำหนักทางทฤษฎี (กรัม)		รวมน้ำหนักทางทฤษฎี (กรัม)
Cu	Zn	$\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$	$\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$	
1	0	15.05	0.00	15.05
0.8	0.2	12.04	3.05	15.09
0.6	0.4	9.03	6.09	15.12
0.5	0.5	7.53	7.62	15.14
0.4	0.6	6.02	9.14	15.16
0.2	0.8	3.01	12.19	15.20
0	1	0.00	15.23	15.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณร้อยละผลผลิต (Percent Yield)

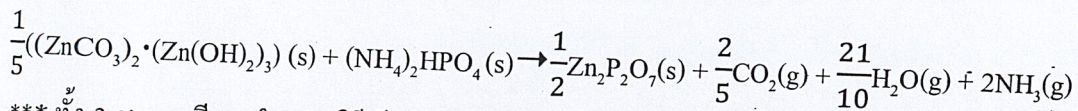
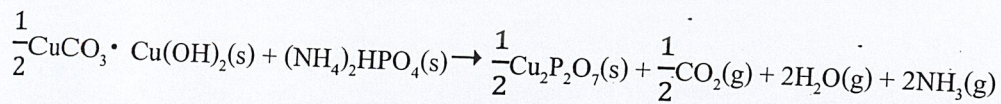
$$\text{ร้อยละผลผลิต} = \frac{\text{น้ำหนักที่ได้จริง}}{\text{น้ำหนักทางทฤษฎี}} \times 100$$

ตาราง ง ผลการคำนวณร้อยละผลผลิต

สัดส่วนโมล		น้ำหนักสาร (กรัม)			ร้อยละผลผลิต %
Cu	Zn	ก่อนเผา	หลังเผา	ทางทฤษฎี	
1	0	24.08	13.98	15.05	92.88
0.8	0.2	23.96	14.14	15.09	93.71
0.6	0.4	24.03	14.32	15.12	94.68
0.5	0.5	24.01	14.37	15.14	94.90
0.4	0.6	23.96	14.47	15.16	95.44
0.2	0.8	23.96	14.55	15.20	95.74
0	1	23.98	14.49	15.23	95.12

การคำนวณร้อยละโดยน้ำหนักของสารที่สลายตัวในระหว่างการทดสอบผล TGA

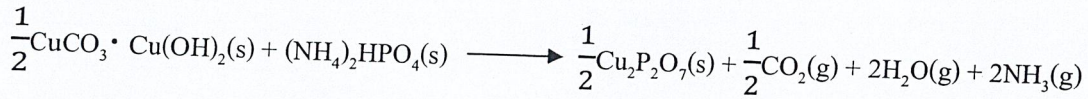
$$\% \text{ weigh loss} = \frac{\text{มวลโมเลกุลของสารผลิตภัณฑ์ที่สลายตัว}}{\text{มวลโมเลกุลของสารตั้งต้น}} \times 100$$



*** ทั้ง 2 สมการมีการคำนวณวิธีเดียวกัน จึงยกตัวอย่างการคำนวณคำนวณของสาร $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณร้อยละโดยน้ำหนักของสารคอปเปอร์ไพโรฟอสเฟต ($\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$)



110.55	132.06	150.52	22	36	34
g/mol	g/mol	g/mol	g/mol	g/mol	g/mol
รวม	242.61 g/mol	150.52 g/mol	22 g/mol	36 g/mol	34 g/mol
% weigh loss theory		62.04 %	9.07 %	14.84 %	14.01 %

จากกราฟ TGA ของสารคอปเปอร์ไพโรฟอสเฟต ($\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$) มีการสลายตัว 4 ช่วง คือ

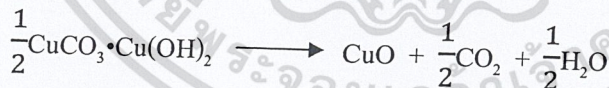
ช่วงที่ 1 :



การสลายตัวของ NH_3

$$\begin{aligned} \% \text{ weigh loss } \text{NH}_3 &= \frac{\text{มวลโมเลกุลของแอมโมเนีย}}{\text{มวลโมเลกุลของสารตั้งต้น}} \times 100 \\ &= \frac{2 \times 17 \text{ g/mol}}{242.61 \text{ g/mol}} \times 100 \\ &= 14.01 \% \end{aligned}$$

ช่วงที่ 2 :

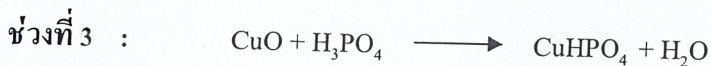


การสลายตัวของ CO_2 และ H_2O

$$\begin{aligned} \% \text{ weigh loss } \text{H}_2\text{O} &= \frac{\text{มวลโมเลกุลของน้ำ}}{\text{มวลโมเลกุลของสารตั้งต้น}} \times 100 \\ &= \frac{0.5 \times 18 \text{ g/mol}}{242.61 \text{ g/mol}} \times 100 \\ &= 3.71 \% \end{aligned}$$

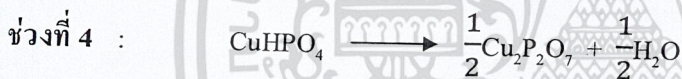
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \% \text{ weigh loss CO}_2 &= \frac{\text{มวลโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์}}{\text{มวลโมเลกุลของสารตั้งต้น}} \times 100 \\
 &= \frac{0.5 \times 44 \text{ g/mol}}{242.61 \text{ g/mol}} \times 100 \\
 &= 9.07 \%
 \end{aligned}$$



การสลายตัวของ H_2O

$$\begin{aligned}
 \% \text{ weigh loss H}_2\text{O} &= \frac{\text{มวลโมเลกุลของน้ำ}}{\text{มวลโมเลกุลของสารตั้งต้น}} \times 100 \\
 &= \frac{18 \text{ g/mol}}{242.61 \text{ g/mol}} \times 100 \\
 &= 7.42 \%
 \end{aligned}$$



การสลายตัวของ H_2O และเกิดเป็น $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$

$$\begin{aligned}
 \% \text{ weigh loss H}_2\text{O} &= \frac{\text{มวลโมเลกุลของน้ำ}}{\text{มวลโมเลกุลของสารตั้งต้น}} \times 100 \\
 &= \frac{0.5 \times 18 \text{ g/mol}}{242.61 \text{ g/mol}} \times 100 \\
 &= 3.71 \%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \% \text{ weigh Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7 &= \frac{\text{มวลโมเลกุลของคอปเปอร์ไพโรฟอสเฟต}}{\text{มวลโมเลกุลของสารตั้งต้น}} \times 100 \\
 &= \frac{0.5 \times 301.03 \text{ g/mol}}{242.61 \text{ g/mol}} \times 100 \\
 &= 62.04 \%
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ XRD-pattern มาตรฐาน ของ α -Cu₂P₂O₇

79-2075	Quality: C	α -Cu ₂ P ₂ O ₇																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
CAS Number		Copper Phosphate																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Molecular Weight: 301.04		Ref: Calculated from ICSD using POWD-12++ , (1997)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Volume[CD]: 482.86		Ref: Effenberger, H., Acta Crystallogr., Sec. C., 46, 691(1965)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Dx: 4.141	Dm:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Sys. Monoclinic																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Lattice: End-centered																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
S.G.: C2/c (15)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Cell Parameters:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
a 6.895	b 8.113		c 9.164																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
α	β 109.62																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
I/lor: 2.18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Red: CuK α 1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
λ : 1.54060																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Filter:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
d-sp:calculated																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
ICSD #: 067316																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>2θ</th> <th>Int-v</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2θ</th> <th>Int-v</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2θ</th> <th>Int-v</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>17.477</td><td>4</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>51.420</td><td>0</td><td>1</td><td>3</td><td>3</td><td>64.746</td><td>8</td><td>0</td><td>0</td><td>6</td></tr> <tr><td>17.801</td><td>4</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>52.293</td><td>12</td><td>1</td><td>3</td><td>4</td><td>65.138</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>20.562</td><td>10</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td><td>52.293</td><td>12</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td>65.634</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>6</td></tr> <tr><td>21.893</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td><td>52.691</td><td>15</td><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td>66.112</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>22.528</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>53.203</td><td>0</td><td>2</td><td>4</td><td>0</td><td>66.447</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td><td>5</td></tr> <tr><td>23.284</td><td>5</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>53.691</td><td>4</td><td>2</td><td>4</td><td>2</td><td>68.135</td><td>6</td><td>4</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>24.223</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td><td>1</td><td>54.231</td><td>13</td><td>3</td><td>3</td><td>0</td><td>68.662</td><td>1</td><td>4</td><td>2</td><td>5</td></tr> <tr><td>27.444</td><td>3</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>54.566</td><td>1</td><td>3</td><td>1</td><td>2</td><td>69.080</td><td>3</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>28.283</td><td>100*</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td><td>55.377</td><td>1</td><td>0</td><td>4</td><td>3</td><td>69.236</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td><td>6</td></tr> <tr><td>30.212</td><td>92</td><td>0</td><td>2</td><td>2</td><td>55.991</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>5</td><td>69.455</td><td>11</td><td>0</td><td>6</td><td>0</td></tr> <tr><td>30.492</td><td>51</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>56.315</td><td>1</td><td>2</td><td>4</td><td>1</td><td>69.604</td><td>6</td><td>0</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>31.445</td><td>4</td><td>1</td><td>1</td><td>3</td><td>56.643</td><td>6</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td><td>69.942</td><td>1</td><td>2</td><td>4</td><td>5</td></tr> <tr><td>34.122</td><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>57.055</td><td>4</td><td>3</td><td>1</td><td>5</td><td>70.102</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>35.379</td><td>26</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td><td>57.252</td><td>3</td><td>2</td><td>4</td><td>3</td><td>70.503</td><td>2</td><td>5</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>35.943</td><td>25</td><td>1</td><td>3</td><td>0</td><td>58.146</td><td>9</td><td>4</td><td>2</td><td>2</td><td>71.245</td><td>18</td><td>1</td><td>3</td><td>6</td></tr> <tr><td>36.050</td><td>15</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>58.268</td><td>5</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td>71.480</td><td>12</td><td>4</td><td>0</td><td>6</td></tr> <tr><td>38.789</td><td>0</td><td>1</td><td>3</td><td>1</td><td>58.502</td><td>11</td><td>4</td><td>0</td><td>4</td><td>71.480</td><td>12</td><td>3</td><td>5</td><td>2</td></tr> <tr><td>39.256</td><td>3</td><td>1</td><td>3</td><td>2</td><td>58.592</td><td>12</td><td>1</td><td>5</td><td>0</td><td>71.739</td><td>3</td><td>0</td><td>4</td><td>5</td></tr> <tr><td>39.557</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>58.741</td><td>21</td><td>2</td><td>0</td><td>4</td><td>71.739</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td></tr> <tr><td>39.924</td><td>3</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td><td>58.741</td><td>21</td><td>4</td><td>2</td><td>1</td><td>72.056</td><td>0</td><td>5</td><td>1</td><td>4</td></tr> <tr><td>40.899</td><td>5</td><td>1</td><td>1</td><td>4</td><td>59.670</td><td>2</td><td>4</td><td>2</td><td>3</td><td>72.342</td><td>4</td><td>3</td><td>1</td><td>4</td></tr> <tr><td>40.899</td><td>5</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td><td>59.981</td><td>5</td><td>3</td><td>3</td><td>4</td><td>72.342</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>1</td></tr> <tr><td>41.379</td><td>11</td><td>3</td><td>1</td><td>2</td><td>60.139</td><td>34</td><td>1</td><td>3</td><td>4</td><td>72.525</td><td>4</td><td>4</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>41.724</td><td>12</td><td>2</td><td>0</td><td>4</td><td>60.595</td><td>1</td><td>1</td><td>5</td><td>1</td><td>72.779</td><td>10</td><td>3</td><td>5</td><td>0</td></tr> <tr><td>41.826</td><td>11</td><td>0</td><td>0</td><td>4</td><td>60.932</td><td>8</td><td>1</td><td>5</td><td>2</td><td>72.779</td><td>10</td><td>1</td><td>1</td><td>6</td></tr> <tr><td>43.217</td><td>11</td><td>3</td><td>1</td><td>0</td><td>61.151</td><td>5</td><td>1</td><td>3</td><td>5</td><td>73.225</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>3</td></tr> <tr><td>44.155</td><td>29</td><td>1</td><td>3</td><td>2</td><td>61.463</td><td>4</td><td>2</td><td>4</td><td>2</td><td>73.822</td><td>2</td><td>5</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>44.491</td><td>5</td><td>3</td><td>1</td><td>3</td><td>61.463</td><td>4</td><td>4</td><td>2</td><td>0</td><td>74.037</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>5</td></tr> <tr><td>44.641</td><td>4</td><td>0</td><td>4</td><td>0</td><td>62.241</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>6</td><td>74.162</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>7</td></tr> <tr><td>45.991</td><td>12</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>62.749</td><td>6</td><td>2</td><td>4</td><td>4</td><td>74.512</td><td>0</td><td>3</td><td>3</td><td>6</td></tr> <tr><td>47.605</td><td>27</td><td>2</td><td>2</td><td>4</td><td>62.749</td><td>6</td><td>3</td><td>1</td><td>3</td><td>74.848</td><td>0</td><td>4</td><td>4</td><td>0</td></tr> <tr><td>47.697</td><td>17</td><td>0</td><td>2</td><td>4</td><td>63.233</td><td>1</td><td>4</td><td>2</td><td>4</td><td>75.786</td><td>7</td><td>4</td><td>2</td><td>6</td></tr> <tr><td>49.623</td><td>5</td><td>0</td><td>4</td><td>2</td><td>63.462</td><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td>4</td><td>76.467</td><td>5</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td></tr> <tr><td>50.048</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>4</td><td>64.181</td><td>13</td><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td>76.467</td><td>5</td><td>2</td><td>2</td><td>7</td></tr> <tr><td>51.190</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>5</td><td>64.597</td><td>12</td><td>1</td><td>5</td><td>2</td><td>76.612</td><td>12</td><td>2</td><td>6</td><td>2</td></tr> </tbody> </table>	2 θ	Int-v	h	k	l	2 θ	Int-v	h	k	l	2 θ	Int-v	h	k	l	17.477	4	1	1	0	51.420	0	1	3	3	64.746	8	0	0	6	17.801	4	1	1	1	52.293	12	1	3	4	65.138	0	1	1	3	20.562	10	0	0	2	52.293	12	3	3	1	65.634	2	2	2	6	21.893	0	0	0	2	52.691	15	3	3	2	66.112	0	0	2	1	22.528	1	1	1	1	53.203	0	2	4	0	66.447	0	0	3	5	23.284	5	1	1	2	53.691	4	2	4	2	68.135	6	4	0	2	24.223	2	0	2	1	54.231	13	3	3	0	68.662	1	4	2	5	27.444	3	2	0	0	54.566	1	3	1	2	69.080	3	3	0	2	28.283	100*	2	0	2	55.377	1	0	4	3	69.236	3	0	2	6	30.212	92	0	2	2	55.991	1	2	2	5	69.455	11	0	6	0	30.492	51	1	1	2	56.315	1	2	4	1	69.604	6	0	1	3	31.445	4	1	1	3	56.643	6	4	0	0	69.942	1	2	4	5	34.122	3	2	2	1	57.055	4	3	1	5	70.102	1	1	1	3	35.379	26	2	2	0	57.252	3	2	4	3	70.503	2	5	1	1	35.943	25	1	3	0	58.146	9	4	2	2	71.245	18	1	3	6	36.050	15	2	2	2	58.268	5	3	3	1	71.480	12	4	0	6	38.789	0	1	3	1	58.502	11	4	0	4	71.480	12	3	5	2	39.256	3	1	3	2	58.592	12	1	5	0	71.739	3	0	4	5	39.557	1	2	2	1	58.741	21	2	0	4	71.739	3	3	3	3	39.924	3	2	0	2	58.741	21	4	2	1	72.056	0	5	1	4	40.899	5	1	1	4	59.670	2	4	2	3	72.342	4	3	1	4	40.899	5	3	1	1	59.981	5	3	3	4	72.342	4	4	4	1	41.379	11	3	1	2	60.139	34	1	3	4	72.525	4	4	2	1	41.724	12	2	0	4	60.595	1	1	5	1	72.779	10	3	5	0	41.826	11	0	0	4	60.932	8	1	5	2	72.779	10	1	1	6	43.217	11	3	1	0	61.151	5	1	3	5	73.225	4	4	4	3	44.155	29	1	3	2	61.463	4	2	4	2	73.822	2	5	1	0	44.491	5	3	1	3	61.463	4	4	2	0	74.037	1	2	2	5	44.641	4	0	4	0	62.241	0	1	1	6	74.162	1	1	1	7	45.991	12	2	2	2	62.749	6	2	4	4	74.512	0	3	3	6	47.605	27	2	2	4	62.749	6	3	1	3	74.848	0	4	4	0	47.697	17	0	2	4	63.233	1	4	2	4	75.786	7	4	2	6	49.623	5	0	4	2	63.462	3	2	2	4	76.467	5	4	4	4	50.048	1	1	1	4	64.181	13	3	3	2	76.467	5	2	2	7	51.190	1	1	1	5	64.597	12	1	5	2	76.612	12	2	6	2
2 θ	Int-v	h	k	l	2 θ	Int-v	h	k	l	2 θ	Int-v	h	k	l																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
17.477	4	1	1	0	51.420	0	1	3	3	64.746	8	0	0	6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
17.801	4	1	1	1	52.293	12	1	3	4	65.138	0	1	1	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
20.562	10	0	0	2	52.293	12	3	3	1	65.634	2	2	2	6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
21.893	0	0	0	2	52.691	15	3	3	2	66.112	0	0	2	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
22.528	1	1	1	1	53.203	0	2	4	0	66.447	0	0	3	5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
23.284	5	1	1	2	53.691	4	2	4	2	68.135	6	4	0	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
24.223	2	0	2	1	54.231	13	3	3	0	68.662	1	4	2	5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
27.444	3	2	0	0	54.566	1	3	1	2	69.080	3	3	0	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
28.283	100*	2	0	2	55.377	1	0	4	3	69.236	3	0	2	6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
30.212	92	0	2	2	55.991	1	2	2	5	69.455	11	0	6	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
30.492	51	1	1	2	56.315	1	2	4	1	69.604	6	0	1	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
31.445	4	1	1	3	56.643	6	4	0	0	69.942	1	2	4	5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
34.122	3	2	2	1	57.055	4	3	1	5	70.102	1	1	1	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
35.379	26	2	2	0	57.252	3	2	4	3	70.503	2	5	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
35.943	25	1	3	0	58.146	9	4	2	2	71.245	18	1	3	6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
36.050	15	2	2	2	58.268	5	3	3	1	71.480	12	4	0	6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
38.789	0	1	3	1	58.502	11	4	0	4	71.480	12	3	5	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
39.256	3	1	3	2	58.592	12	1	5	0	71.739	3	0	4	5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
39.557	1	2	2	1	58.741	21	2	0	4	71.739	3	3	3	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
39.924	3	2	0	2	58.741	21	4	2	1	72.056	0	5	1	4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
40.899	5	1	1	4	59.670	2	4	2	3	72.342	4	3	1	4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
40.899	5	3	1	1	59.981	5	3	3	4	72.342	4	4	4	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
41.379	11	3	1	2	60.139	34	1	3	4	72.525	4	4	2	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
41.724	12	2	0	4	60.595	1	1	5	1	72.779	10	3	5	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
41.826	11	0	0	4	60.932	8	1	5	2	72.779	10	1	1	6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
43.217	11	3	1	0	61.151	5	1	3	5	73.225	4	4	4	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
44.155	29	1	3	2	61.463	4	2	4	2	73.822	2	5	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
44.491	5	3	1	3	61.463	4	4	2	0	74.037	1	2	2	5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
44.641	4	0	4	0	62.241	0	1	1	6	74.162	1	1	1	7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
45.991	12	2	2	2	62.749	6	2	4	4	74.512	0	3	3	6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
47.605	27	2	2	4	62.749	6	3	1	3	74.848	0	4	4	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
47.697	17	0	2	4	63.233	1	4	2	4	75.786	7	4	2	6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
49.623	5	0	4	2	63.462	3	2	2	4	76.467	5	4	4	4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
50.048	1	1	1	4	64.181	13	3	3	2	76.467	5	2	2	7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
51.190	1	1	1	5	64.597	12	1	5	2	76.612	12	2	6	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข XRD-pattern มาตรฐาน ของ β -Zn₂P₂O₇

73-1648	Quality: C	β -Zn ₂ P ₂ O ₇																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
CAS Number		Zinc Phosphate																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Molecular Weight: 304.70		Ref: Calculated from ICSD using POWD-12++ , (1997)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Volume[CD]: 238.26		Ref: Calvo, C., Can. J. Chem., 43, 1147 (1965)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Dx: 4.247	Dm:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Sys. Monoclinic																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Lattice: End-centered																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
S.G.: C2/m (12)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Cell Parameters:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
a 6.610 b 8.290 c 4.510																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
α	β 105.40																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
I/Icor: 2.19																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Red: CuK α 1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Lambda: 1.54060																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Filter:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
d-sp:calculated																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
ICSD #: 024153																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>2θ</th> <th>Int-v</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2θ</th> <th>Int-v</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2θ</th> <th>Int-v</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>17.539</td><td>6</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>57.245</td><td>9</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td><td>74.843</td><td>0</td><td>2</td><td>6</td><td>0</td></tr> <tr><td>20.409</td><td>11</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>57.379</td><td>10</td><td>1</td><td>5</td><td>0</td><td>75.393</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>21.420</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td><td>0</td><td>57.829</td><td>7</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td><td>75.866</td><td>4</td><td>2</td><td>6</td><td>1</td></tr> <tr><td>24.008</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>58.749</td><td>21</td><td>1</td><td>3</td><td>2</td><td>76.086</td><td>1</td><td>4</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>27.980</td><td>1</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>60.062</td><td>5</td><td>1</td><td>5</td><td>1</td><td>76.787</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>29.755</td><td>100</td><td>0</td><td>2</td><td>1</td><td>60.062</td><td>5</td><td>2</td><td>4</td><td>1</td><td>77.210</td><td>0</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td></tr> <tr><td>29.755</td><td>100</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>60.555</td><td>7</td><td>4</td><td>2</td><td>1</td><td>79.007</td><td>1</td><td>1</td><td>5</td><td>2</td></tr> <tr><td>30.022</td><td>54</td><td>2</td><td>0</td><td>1</td><td>61.838</td><td>3</td><td>0</td><td>4</td><td>2</td><td>79.219</td><td>3</td><td>4</td><td>4</td><td>2</td></tr> <tr><td>35.376</td><td>21</td><td>1</td><td>3</td><td>0</td><td>61.838</td><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>79.502</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>35.507</td><td>25</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td><td>62.161</td><td>6</td><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td>79.532</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>37.178</td><td>0</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>62.397</td><td>8</td><td>4</td><td>2</td><td>0</td><td>79.725</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>4</td></tr> <tr><td>39.209</td><td>6</td><td>1</td><td>3</td><td>1</td><td>62.397</td><td>8</td><td>4</td><td>0</td><td>2</td><td>79.963</td><td>1</td><td>3</td><td>5</td><td>1</td></tr> <tr><td>39.209</td><td>6</td><td>2</td><td>0</td><td>1</td><td>63.028</td><td>10</td><td>1</td><td>5</td><td>1</td><td>80.131</td><td>3</td><td>4</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>41.503</td><td>5</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td><td>63.213</td><td>11</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td>80.864</td><td>1</td><td>0</td><td>4</td><td>3</td></tr> <tr><td>41.589</td><td>5</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>63.466</td><td>4</td><td>2</td><td>4</td><td>2</td><td>81.187</td><td>1</td><td>2</td><td>6</td><td>1</td></tr> <tr><td>43.126</td><td>19</td><td>1</td><td>3</td><td>1</td><td>64.210</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td><td>82.688</td><td>0</td><td>0</td><td>6</td><td>2</td></tr> <tr><td>43.514</td><td>12</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td><td>66.780</td><td>0</td><td>4</td><td>2</td><td>2</td><td>82.840</td><td>1</td><td>1</td><td>7</td><td>0</td></tr> <tr><td>43.638</td><td>11</td><td>0</td><td>4</td><td>0</td><td>67.320</td><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td>3</td><td>83.452</td><td>4</td><td>5</td><td>3</td><td>0</td></tr> <tr><td>43.696</td><td>11</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td><td>67.768</td><td>9</td><td>4</td><td>0</td><td>1</td><td>83.533</td><td>4</td><td>2</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>43.967</td><td>5</td><td>3</td><td>1</td><td>0</td><td>67.768</td><td>9</td><td>0</td><td>6</td><td>0</td><td>84.182</td><td>1</td><td>4</td><td>4</td><td>1</td></tr> <tr><td>45.108</td><td>9</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>68.531</td><td>1</td><td>0</td><td>2</td><td>3</td><td>84.182</td><td>1</td><td>2</td><td>6</td><td>2</td></tr> <tr><td>47.168</td><td>4</td><td>0</td><td>2</td><td>2</td><td>68.929</td><td>1</td><td>3</td><td>1</td><td>3</td><td>84.296</td><td>1</td><td>4</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>48.628</td><td>3</td><td>0</td><td>4</td><td>1</td><td>70.519</td><td>5</td><td>1</td><td>5</td><td>2</td><td>84.812</td><td>1</td><td>5</td><td>3</td><td>2</td></tr> <tr><td>49.160</td><td>17</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>71.418</td><td>10</td><td>1</td><td>3</td><td>3</td><td>85.146</td><td>2</td><td>1</td><td>7</td><td>1</td></tr> <tr><td>52.427</td><td>4</td><td>1</td><td>3</td><td>2</td><td>71.604</td><td>5</td><td>0</td><td>6</td><td>1</td><td>85.660</td><td>3</td><td>5</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>53.875</td><td>4</td><td>2</td><td>4</td><td>1</td><td>71.894</td><td>5</td><td>3</td><td>5</td><td>1</td><td>86.517</td><td>1</td><td>2</td><td>0</td><td>4</td></tr> <tr><td>53.875</td><td>4</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td><td>71.894</td><td>5</td><td>4</td><td>2</td><td>1</td><td>87.698</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>4</td></tr> <tr><td>54.051</td><td>11</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td>72.223</td><td>5</td><td>3</td><td>5</td><td>0</td><td>87.698</td><td>2</td><td>1</td><td>7</td><td>1</td></tr> <tr><td>54.437</td><td>8</td><td>3</td><td>3</td><td>0</td><td>73.478</td><td>0</td><td>4</td><td>4</td><td>1</td><td>88.262</td><td>1</td><td>4</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>55.898</td><td>0</td><td>4</td><td>0</td><td>1</td><td>74.648</td><td>0</td><td>2</td><td>4</td><td>2</td><td>88.755</td><td>1</td><td>6</td><td>0</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	2 θ	Int-v	h	k	l	2 θ	Int-v	h	k	l	2 θ	Int-v	h	k	l	17.539	6	1	1	0	57.245	9	2	0	2	74.843	0	2	6	0	20.409	11	0	0	1	57.379	10	1	5	0	75.393	1	1	1	0	21.420	0	0	2	0	57.829	7	4	0	0	75.866	4	2	6	1	24.008	1	1	1	1	58.749	21	1	3	2	76.086	1	4	0	3	27.980	1	2	0	0	60.062	5	1	5	1	76.787	0	0	0	2	29.755	100	0	2	1	60.062	5	2	4	1	77.210	0	3	3	3	29.755	100	1	1	1	60.555	7	4	2	1	79.007	1	1	5	2	30.022	54	2	0	1	61.838	3	0	4	2	79.219	3	4	4	2	35.376	21	1	3	0	61.838	3	2	2	2	79.502	2	2	1	3	35.507	25	2	2	0	62.161	6	3	3	2	79.532	2	2	0	3	37.178	0	2	2	1	62.397	8	4	2	0	79.725	1	1	2	4	39.209	6	1	3	1	62.397	8	4	0	2	79.963	1	3	5	1	39.209	6	2	0	1	63.028	10	1	5	1	80.131	3	4	2	3	41.503	5	0	0	2	63.213	11	3	3	1	80.864	1	0	4	3	41.589	5	1	1	2	63.466	4	2	4	2	81.187	1	2	6	1	43.126	19	1	3	1	64.210	3	0	0	3	82.688	0	0	6	2	43.514	12	3	1	1	66.780	0	4	2	2	82.840	1	1	7	0	43.638	11	0	4	0	67.320	3	2	2	3	83.452	4	5	3	0	43.696	11	2	0	2	67.768	9	4	0	1	83.533	4	2	2	3	43.967	5	3	1	0	67.768	9	0	6	0	84.182	1	4	4	1	45.108	9	2	2	1	68.531	1	0	2	3	84.182	1	2	6	2	47.168	4	0	2	2	68.929	1	3	1	3	84.296	1	4	0	2	48.628	3	0	4	1	70.519	5	1	5	2	84.812	1	5	3	2	49.160	17	2	2	2	71.418	10	1	3	3	85.146	2	1	7	1	52.427	4	1	3	2	71.604	5	0	6	1	85.660	3	5	1	1	53.875	4	2	4	1	71.894	5	3	5	1	86.517	1	2	0	4	53.875	4	3	1	1	71.894	5	4	2	1	87.698	2	1	1	4	54.051	11	3	3	1	72.223	5	3	5	0	87.698	2	1	7	1	54.437	8	3	3	0	73.478	0	4	4	1	88.262	1	4	2	2	55.898	0	4	0	1	74.648	0	2	4	2	88.755	1	6	0	1
2 θ	Int-v	h	k	l	2 θ	Int-v	h	k	l	2 θ	Int-v	h	k	l																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
17.539	6	1	1	0	57.245	9	2	0	2	74.843	0	2	6	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
20.409	11	0	0	1	57.379	10	1	5	0	75.393	1	1	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
21.420	0	0	2	0	57.829	7	4	0	0	75.866	4	2	6	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
24.008	1	1	1	1	58.749	21	1	3	2	76.086	1	4	0	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
27.980	1	2	0	0	60.062	5	1	5	1	76.787	0	0	0	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
29.755	100	0	2	1	60.062	5	2	4	1	77.210	0	3	3	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
29.755	100	1	1	1	60.555	7	4	2	1	79.007	1	1	5	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
30.022	54	2	0	1	61.838	3	0	4	2	79.219	3	4	4	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
35.376	21	1	3	0	61.838	3	2	2	2	79.502	2	2	1	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
35.507	25	2	2	0	62.161	6	3	3	2	79.532	2	2	0	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
37.178	0	2	2	1	62.397	8	4	2	0	79.725	1	1	2	4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
39.209	6	1	3	1	62.397	8	4	0	2	79.963	1	3	5	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
39.209	6	2	0	1	63.028	10	1	5	1	80.131	3	4	2	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
41.503	5	0	0	2	63.213	11	3	3	1	80.864	1	0	4	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
41.589	5	1	1	2	63.466	4	2	4	2	81.187	1	2	6	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
43.126	19	1	3	1	64.210	3	0	0	3	82.688	0	0	6	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
43.514	12	3	1	1	66.780	0	4	2	2	82.840	1	1	7	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
43.638	11	0	4	0	67.320	3	2	2	3	83.452	4	5	3	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
43.696	11	2	0	2	67.768	9	4	0	1	83.533	4	2	2	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
43.967	5	3	1	0	67.768	9	0	6	0	84.182	1	4	4	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
45.108	9	2	2	1	68.531	1	0	2	3	84.182	1	2	6	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
47.168	4	0	2	2	68.929	1	3	1	3	84.296	1	4	0	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
48.628	3	0	4	1	70.519	5	1	5	2	84.812	1	5	3	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
49.160	17	2	2	2	71.418	10	1	3	3	85.146	2	1	7	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
52.427	4	1	3	2	71.604	5	0	6	1	85.660	3	5	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
53.875	4	2	4	1	71.894	5	3	5	1	86.517	1	2	0	4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
53.875	4	3	1	1	71.894	5	4	2	1	87.698	2	1	1	4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
54.051	11	3	3	1	72.223	5	3	5	0	87.698	2	1	7	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
54.437	8	3	3	0	73.478	0	4	4	1	88.262	1	4	2	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
55.898	0	4	0	1	74.648	0	2	4	2	88.755	1	6	0	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง X XRD-pattern มาตรฐาน ของ ZnCuP₂O₇

82-0973	Quality: C	Zn Cu (P2 O7)														
CAS Number		Zinc Copper Phosphate														
Molecular Weight: 302.87		Ref: Calculated from ICSD using POWD-12++ , (1997)														
Volume[CD]: 238.86		Ref: El Maadi,A et al.,J.Alloys Comps.,205, 243 (1994)														
Dx: 4.211 Dm:																
Sys. Monoclinic																
Lattice: End-centered																
S.G.: C2/m (12)																
Cell Parameters:																
a 6.741 b 8.190 c 4.542																
α	β 107.72	2 θ	Int-v	h	k	l	2 θ	Int-v	h	k	l	2 θ	Int-v	h	k	l
		17.536	7	1	1	0	58.179	16	2	0	2	75.808	1	1	3	3
		20.511	12	0	0	1	59.381	12	4	2	1	75.808	1	1	2	4
		23.633	4	1	1	1	59.576	34	1	3	2	76.317	11	1	1	5
		27.764	2	2	0	0	60.401	11	4	0	2	77.096	11	1	4	4
		29.134	2	2	0	1	60.559	13	1	5	1	77.868	11	1	4	2
		30.022	98	0	2	1	61.043	6	3	3	2	77.868	11	1	4	2
		30.217	55	1	1	1	61.946	4	2	0	3	78.399	4	4	5	2
		35.501	30	2	2	0	62.049	6	4	2	0	79.173	1	1	5	3
		35.709	28	1	3	0	62.398	1	0	4	2	79.173	1	1	3	3
		36.610	1	2	2	1	62.552	1	1	1	3	80.089	0	0	1	3
		39.232	4	1	3	1	62.839	3	2	2	2	80.596	0	0	1	3
		39.694	4	2	0	1	63.114	6	2	4	2	80.893	2	2	2	0
		41.241	4	1	1	2	63.876	17	3	3	1	80.893	2	2	3	5
		41.720	6	0	0	2	63.876	17	1	5	1	81.585	0	0	0	4
		42.449	16	3	1	1	64.569	3	0	0	3	82.383	1	1	2	6
		42.668	16	2	0	2	64.966	0	4	2	2	82.665	6	5	3	2
		43.732	36	3	1	0	66.451	3	2	2	3	83.037	6	5	3	0
		43.732	36	1	3	1	67.250	1	3	1	3	83.714	6	5	3	0
		44.199	2	0	4	0	68.156	6	4	0	1	84.013	1	1	0	6
		45.677	12	2	2	1	68.711	9	0	6	0	84.354	1	1	1	7
		47.496	5	0	2	2	70.769	3	5	1	1	84.980	4	2	2	3
		48.354	30	2	2	2	70.893	8	1	5	2	85.284	3	3	5	1
		49.192	4	0	4	1	71.372	18	1	3	3	85.496	2	2	0	4
		49.615	1	1	1	2	71.744	8	3	1	2	85.496	2	4	0	2
		51.267	0	3	1	2	71.744	8	3	5	1	86.023	4	5	1	1
		52.381	10	1	3	2	72.246	5	1	1	3	86.164	3	1	7	1
		53.392	20	3	3	1	72.464	6	4	2	1	86.763	2	1	0	1
		53.814	5	2	4	1	72.623	9	0	6	1	87.526	3	1	1	4
		54.428	16	3	1	1	72.623	9	3	5	0	88.722	1	1	6	0
		54.428	16	3	3	0	73.684	1	4	0	3	89.593	2	4	2	2
		54.542	9	4	0	1	74.383	1	5	1	2	89.593	2	2	2	4
		57.351	9	4	0	0	74.766	2	5	1	0					
		58.068	11	1	5	0	75.143	0	4	4	0					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นาง สุวัทธนา ทองคำ

ตำแหน่งปัจจุบัน นักวิจัย

หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้

ที่ทำงาน

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขต ลาดกระบัง
กรุงเทพ 10520 โทรศัพท์ 086 5335202 โทรสาร 02-329-8419

E-mail Address

ktsuwatt@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท. ม.	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2552
วศ. บ.	ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	2549

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ

Catalyst preparation, Alternative energy synthesis

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

Novel DME synthesis from syngas at low temperature using methanol as a co-catalyst, S. Teppood, P. Reubroycharoen, T. Vitidsant

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

นำเสนอบทความวิจัย เรื่อง "Preparation and characterization of copper (II) cobalt (II) hydrogen phosphate hydrate ($\text{Co}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{HPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)" ณ ประเทศญี่ปุ่น (25th ISCHE) ระหว่างวันที่ 14-15 ธันวาคม 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล.....นางสาว สุดใจ แก้วหนู

ตำแหน่งปัจจุบัน.....นักวิทยาศาสตร์

หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้

ที่ทำงาน

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเขต ลาดกระบัง

กรุงเทพ 10520 โทรศัพท์ 086-3848769 โทรสาร 02-329-8419

E-mail Address

kksudjai@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท. บ.	เคมี	ราชภัฏนครศรีธรรมราช	2544

เครื่องมือที่มีความชำนาญพิเศษ

วิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องมือ TGA

วิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องมือ FTIR

วิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องมือ GC-MS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

88851