

การผลิตกรดฟอสฟอริกจากหินฟอสเฟต  
PHOSPHORIC ACID PRODUCTION FROM ROCK PHOSPHATE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560

# การผลิตกรดฟอสฟอริกจากหินฟอสเฟต

## PHOSPHORIC ACID PRODUCTION FROM ROCK PHOSPHATE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# PHOSPHORIC ACID PRODUCTION FROM ROCK PHOSPHATE



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การผลิตกรดฟอสฟอริกจากหินฟอสเฟต  
โดย นางสาววรรณกร ศิริชัยสิทธิ์ รหัสนักศึกษา 57011107  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา  
ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การผลิตกรดฟอสฟอริกจากหินฟอสเฟต
โดย	นางสาววรรณกร ศิริชัยสิทธิ์
รหัสประจำตัว	57011107
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ถูกจัดทำขึ้นโดยมีจุดประสงค์ศึกษาการผลิตกรดฟอสฟอริกจากกระบวนการผลิตแบบเปียกโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวละลายหินฟอสเฟต ตามด้วยนำกรดฟอสฟอริกที่ผลิตได้ผ่านกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายเพื่อให้ได้กรดฟอสฟอริกที่มีความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น ทำการศึกษาสี่ตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการได้แก่ ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 1 3 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลที่ใช้ทำปฏิกิริยาของกรดไฮโดรคลอริกและหินฟอสเฟต 1:1 1:2 1:2.2 และ 1:2.5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างวัฏภาคน้ำและวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ขั้นตอนการสกัด 1:1 1:2 1:3 1:4 และ 1:5 และอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างวัฏภาคน้ำและวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ของขั้นตอนการสกัดขั้นตอนการนำกลับ 1:1 และ 0.5:1 ในขั้นตอนการละลายหินฟอสเฟตด้วยกรดไฮโดรคลอริกใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ณ อุณหภูมิห้อง สามารถตรวจวัดปริมาณฟอสเฟตโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตกรดฟอสฟอริกคือ ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลที่ใช้ทำปฏิกิริยาของกรดไฮโดรคลอริกและหินฟอสเฟต 1:2 อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างวัฏภาคน้ำและวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ของขั้นตอนการสกัดและการนำกลับคือ 1:1 และ 1:1 ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** กรดฟอสฟอริก, หินฟอสเฟต, กรดไฮโดรคลอริก, ออกทานอล

Report Title            Phosphoric Acid Production from Rock Phosphate  
By                         Miss Wannakorn Sirichaisit  
Student ID.             57011107  
Degree                  Bachelor of Engineering  
Program                 Chemical Engineering  
Academic Year         2017  
Advisor                 Assoc. Prof. Dr. Prakob Kitchaiya

### ABSTRACT

This research studied the production of phosphoric acid (PA) from wet process produced by a reaction between rock phosphate (RP) and hydrochloric acid (HCl) following by using solvent extraction technique for phosphoric acid purification. The four factors studied were a. effects of hydrochloric acid concentration at 1, 3, 5, 10 and 15 %wt, b. liquid-solid ratio by mole at 1:1, 1:2, 1:2.2 and 1:2.5, c. extraction aqueous-organic (A/O) phase ratio at 1:1 1:2 1:3 1:4 and 1:5 by w/w and d. stripping aqueous-organic (A/O) phase ratio 1:1 and 0.5:1 by w/w. In acidulation step, the reaction time was 90 min at room temperature. Phosphorus was measured by using a spectrophotometer. The optimal condition for the phosphoric acid production was 1% HCl, 1:2 liquid-solid ratio, aqueous-organic phase ratio in extraction and stripping 1:1 and 1:1 by weight, respectively.

**Keywords:** Phosphoric acid, Rock phosphate, Hydrochloric acid, Octanol

# กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายท่าน

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. ประกอบ กิจไชยา อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำแนะนำ ให้ความรู้ และแนวคิดในการแก้ปัญหาอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินโครงการวิจัยให้ลุล่วง ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของปริญญาบัตรตลอดการทำโครงการวิจัย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ประจำประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้ทำโครงการวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท พานาโซนิค ออโต้โมทีฟ ซิสเต็มส์ เอเชีย แปซิฟิก จำกัด แผนก AQAC สำหรับความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่เปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษา เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ทำให้สามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ทำโครงการวิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใดในปริญญาบัตรฉบับนี้ ผู้ทำโครงการวิจัยขอน้อมรับ และขออภัยไว้ ณ ที่นี้

วรรณกร ศิริชัยสิทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษาของงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้น.....	3
2.1.1 หินฟอสเฟต.....	3
2.1.1.1 ความสามารถในการละลาย.....	4
2.1.2 กรดฟอสฟอริก.....	5
2.1.2.1 กระบวนการแบบแห้ง.....	6
2.1.2.2 กระบวนการแบบเปียก.....	6
2.1.3 การทำให้กรดฟอสฟอริกบริสุทธิ์ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	7
2.1.4 การทำให้กรดฟอสฟอริกบริสุทธิ์โดยใช้เยื่อแผ่นเหลว.....	9
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง.....	12
3.1 การละลายหินฟอสเฟต.....	12
3.2 การสกัดกรดฟอสฟอริกด้วยตัวทำละลาย.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 การนำกลับกรดฟอสฟอริกออกจากตัวทำละลายออกทานอล.....	15
3.4 การวิเคราะห์หองค์ประกอบในหินฟอสเฟต โดยใช้เทคนิคเอกซเรย์ (XRF).....	16
3.5 การวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัส โดยวิธีวานาโดมolibเดต.....	16
3.6 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นกรดฟอสฟอริกด้วยเทคนิคการไทเทรต.....	18
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	19
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหินฟอสเฟต.....	19
4.2 ผลการวิเคราะห์การละลายหินฟอสเฟต.....	19
4.3 ผลการวิเคราะห์การทำให้กรดฟอสฟอริกบริสุทธิ์.....	20
4.3.1 การหาสมมูลของเหลวของระบบน้ำ กรดฟอสฟอริก และออกทานอล.....	21
4.3.2 การสกัดกรดฟอสฟอริกด้วยตัวทำละลาย.....	22
4.3.3 การนำกลับกรดฟอสฟอริกจากตัวทำละลาย.....	23
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	24
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	24
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	24
เอกสารอ้างอิง.....	25
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง.....	28
ภาคผนวก ข การคำนวณที่เกี่ยวข้องในการทดลอง.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ/หรืออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของกรดฟอสฟอริก.....	5
ตารางที่ 2.2 การนำกรดฟอสฟอริกไปใช้ประโยชน์.....	6
ตารางที่ 3.1 ปริมาณการใช้หินฟอสเฟต.....	13
ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบในหินฟอสเฟต.....	19
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลสมดุลการละลายของระบบน้ำ กรดฟอสฟอริก และออกทานอล.....	21
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลองค์ประกอบหินฟอสเฟตวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF .....	28
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลผลการทดลองขั้นตอนการละลายหินฟอสเฟต.....	29
ตารางที่ ก.3 ข้อมูลผลการทดลองขั้นตอนการสกัดกรดฟอสฟอริกโดยตัวทำละลายออกทานอล.....	30
ตารางที่ ก.4 ข้อมูลผลการทดลองขั้นตอนการนำกลับกรดฟอสฟอริกโดยน้ำ.....	30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และขี้ง้ออ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 หินฟอสเฟต.....	3
รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงความสามารถในการละลายของแคลเซียมฟอสเฟตซึ่งเป็นฟังก์ชันของ log [Ca] vs. pH (a) log [P] vs. pH (b) และ log [Ca] vs. log [P] (c).....	4
รูปที่ 2.3 แผนภาพวิภูภาคของของเหลวสามชนิดที่ผสมกันได้บางส่วน 1 คู่.....	8
รูปที่ 2.4 แผนผังทิศทางการถ่ายเทไอออนโลหะและไฮโดรเนียมไอออนของการถ่ายเทแบบสวนทาง.....	9
รูปที่ 3.1 (ก) การละลายหินฟอสเฟต (ข) ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการกรอง.....	14
รูปที่ 3.2 การสกัดกรดฟอสฟอริกด้วยตัวทำละลายอินทรีย์.....	15
รูปที่ 4.1 ค่าร้อยละการละลายของหินฟอสเฟตที่ความเข้มข้นและอัตราส่วนต่างๆ.....	19
รูปที่ 4.2 กราฟวิภูภาคของระบบน้ำ กรดฟอสฟอริก และออกทานอล.....	21
รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นกรดฟอสฟอริกและฟอสฟอรัสที่เหลือนอยู่ในชั้นน้ำหลังจากการสกัด.....	22
รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นกรดฟอสฟอริกและฟอสฟอรัสที่อยู่ในชั้นน้ำหลังจากการนำกลับ.....	23
รูปที่ ก.1 ข้อมูลองค์ประกอบหินฟอสเฟตจากเครื่องวิเคราะห์ XRF.....	28
รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสและค่าการดูดกลืนแสง.....	31
รูปที่ ข.2 ระดับสีของสารละลายฟอสฟอรัสมาตรฐาน.....	31

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

กรดฟอสฟอริกเป็นกรดที่สำคัญในหลายอุตสาหกรรม นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมปุ๋ย ผงซักฟอก สบู่ น้ำอัดลม เป็นต้น หรือใช้เป็นสารเคมีตัวกลาง กรดฟอสฟอริกมีสูตรโมเลกุล  $H_3PO_4$  เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ละลายได้ทั้งในน้ำและแอลกอฮอล์ เซิงพาณิชย์กรดฟอสฟอริกผลิตมาจากหินฟอสเฟต หินฟอสเฟตคือสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต ซึ่งพบมากในประเทศโมร็อกโก จีน และสหรัฐอเมริกา ส่วนในประเทศไทยพบมากตามแอ่งหินปูน ถ้าบริเวณเทือกเขาหินปูนทั่วไปทั้งภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคใต้ของประเทศ ปัจจุบันพบว่าประเทศไทยได้มีการทำเหมืองหินฟอสเฟตอยู่ที่จังหวัด กาญจนบุรี และเพชรบุรี หินฟอสเฟตมีคุณสมบัติละลายน้ำได้น้อย และจะละลายได้ดีในสถานะที่เป็นกรด โดยส่วนมากจะนำมาใช้เป็นปุ๋ยโดยตรง หรือทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อเป็นปุ๋ยฟอสเฟตที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ง่ายขึ้น กรดฟอสฟอริกสามารถผลิตได้ด้วยสองวิธีคือ กระบวนการทางความร้อน และกระบวนการแบบเปียก การผลิตด้วยกระบวนการทางความร้อนมีข้อจำกัดด้านการสิ้นเปลืองพลังงาน ดังนั้นกระบวนการผลิตกรดฟอสฟอริกแบบเปียกจึงเป็นกระบวนการที่เหมาะสม และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ กระบวนการผลิตกรดฟอสฟอริกแบบเปียกนี้เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างหินฟอสเฟต กับกรดซัลฟิวริก หรือกรดไฮโดรคลอริก แต่กระบวนการแบบเปียกนี้กรดฟอสฟอริกที่ได้จะไม่บริสุทธิ์เนื่องมาจากการมีสิ่งเจือปนอยู่ในหินฟอสเฟต มีเทคนิคทางเคมีหลายวิธีที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์ เช่น การตกตะกอน การทำให้เป็นผลึก การแลกเปลี่ยนไอออน และการสกัดด้วยตัวทำละลาย เป็นต้น วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากทำให้กรดฟอสฟอริกบริสุทธิ์ และคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จากข้อมูลของหน่วยข้อสนเทศวัตถุอันตรายและความปลอดภัย ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ.2552 ประเทศไทยได้มีการนำเข้ากรดฟอสฟอริก ซึ่งเป็นเคมีภัณฑ์อันตรายที่เป็นสารควบคุม ประเภทเคมีภัณฑ์อันตราย ในปริมาณ 2,126.6 ตัน คิดเป็นมูลค่ามากกว่า 70 ล้านบาท และมีปริมาณการนำเข้ามากเป็นลำดับที่ 17 [1] จากข้อมูลดังกล่าวเห็นได้ว่าประเทศไทยมีการนำเข้ากรดฟอสฟอริกเป็นจำนวนมาก จึงเป็นที่มาในการทำงานวิจัยชิ้นนี้เพื่อที่จะผลิตกรดฟอสฟอริกจากการนำหินฟอสเฟตซึ่งมีราคาถูก เพราะหินฟอสเฟตเป็นผลพลอยได้จากการทำเหมืองแร่มาทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริก โดยจะศึกษาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ทำปฏิกิริยา

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการผลิตกรดฟอสฟอริกจากหินฟอสเฟต
2. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตกรดฟอสฟอริก

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษากระบวนการผลิตกรดฟอสฟอริกแบบเปียก
2. ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการทดลองได้แก่ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 1 – 15 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับหินฟอสเฟตในการทำปฏิกิริยา 1:1 1:2 1:2.2 และ 1:2.5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างวัฏภาคน้ำและวัฏภาคอินทรีย์ในขั้นตอนการสกัด 1:1 1:2 1:3 1:4 และ 1:5 และอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างวัฏภาคน้ำและวัฏภาคอินทรีย์ในขั้นตอนการนำกลับ 1:1 และ 0.5:1

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษาของงานวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาวิธีการทดลองและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง
3. ออกแบบการทดลอง
4. ทำการทดลอง
5. วิเคราะห์ผลการทดลอง
6. สรุปผลการทดลอง

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วิธีการผลิตกรดฟอสฟอริกที่ไม่อันตราย และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
2. สามารถผลิตกรดฟอสฟอริกที่สามารถใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีเบื้องต้น

#### 2.1.1 หินฟอสเฟต [2]

หินฟอสเฟต คือสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต มีแร่สำคัญหลายชนิดเช่น แร่อะพาไทต์ แคลไซต์ โดโลไมต์ ไพไรต์ เคลซิโนต์ และฟลูออไรต์ เป็นต้น ซึ่งแร่ที่สำคัญที่สุดคือแร่อะพาไทต์ มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ  $Ca_{10}(PO_4)_6X_2$  ในที่นี้ X สามารถเป็นฟลูออไรต์ คลอไรต์ หรือไฮดรอกไซด์ ฟลูออไรต์ ไอออนเป็นตัวที่เล็กที่สุดในสามตัว ดังนั้นฟลูออรัอะพาไทต์ถูกเชื่อว่าเป็นตัวที่เสถียรที่สุด และจำเป็นต่อการผลิตกรดฟอสฟอริก แร่อื่น ๆ มักกำจัดออกไปก่อนเริ่มกระบวนการผลิตกรดฟอสฟอริก

ในประเทศไทยมีการแบ่งชนิดของแร่ฟอสเฟตตามแหล่งกำเนิดได้ 3 ประเภท ได้แก่ แหล่งแร่ฟอสเฟตแบบกัวโน เป็นแหล่งแร่ที่เกิดจากการสะสมมูลนก มูลค้างคาวในบริเวณเขาหินปูน แหล่งแร่ฟอสเฟตแบบอะลูมิเนียมฟอสเฟต เป็นแหล่งแร่ฟอสเฟตที่เกิดในชั้นหินทราย แหล่งแร่แบบหินชั้น พบแร่ฟอสเฟตเกิดเป็นชั้นบางๆ มีความหนา 0.2 – 1.5 เซนติเมตร แทรกในหินดินดานสีดำ หินเชิร์ต และหินดินเหนียวที่มีสารอินทรีย์ปน หินฟอสเฟตส่วนมากใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปุ๋ย อุตสาหกรรมอาหารสัตว์ อุตสาหกรรมเหล็กกล้า ยาฆ่าแมลง วัสดุไฟฟ้า เป็นต้น ในประเทศไทยพบแร่ฟอสเฟตทั้ง 3 ชนิด แหล่งแร่ฟอสเฟตแบบกัวโนพบที่เขาคลองวาฬ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ อำเภอแม่ทา จังหวัดลำพูน อำเภอเกาะคา จังหวัดลำปาง เป็นต้น แหล่งแร่ฟอสเฟตแบบอะลูมิเนียมฟอสเฟตพบที่อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด และแหล่งแร่ฟอสเฟตแบบหินชั้นพบที่อำเภอฝาง และอำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ [3,4] ลักษณะหินฟอสเฟตแสดงดังรูปที่ 2.1

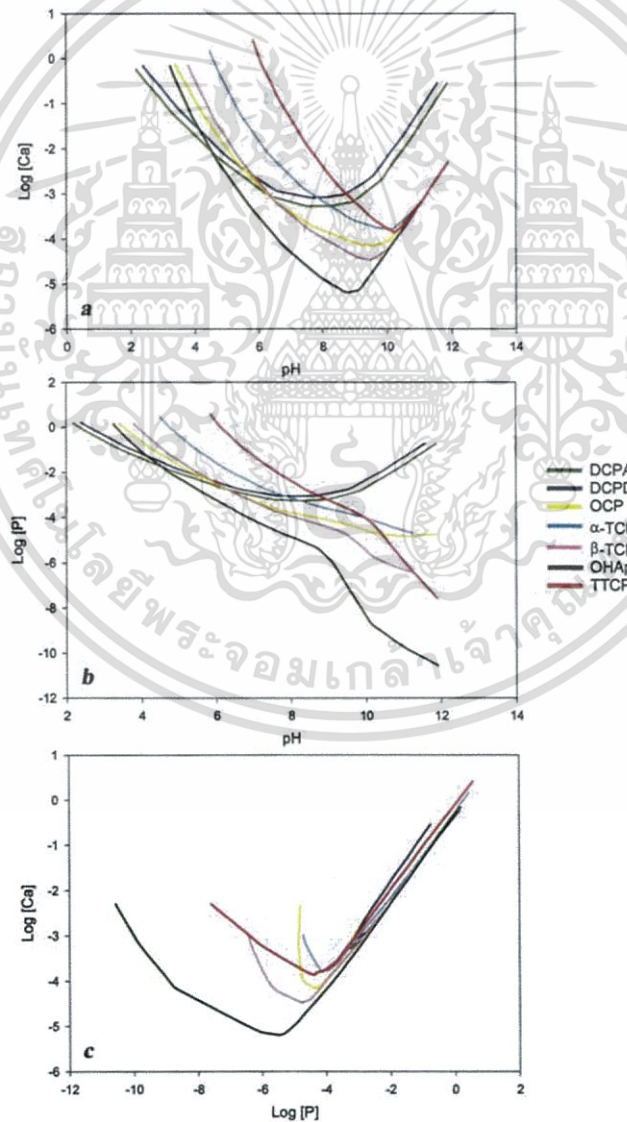


รูปที่ 2.1 หินฟอสเฟต [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1.1 ความสามารถในการละลาย [6]

การละลายเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของแคลเซียมฟอสเฟต สามารถบอกทิศทางของการเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับแคลเซียมฟอสเฟตเช่น การละลาย การตกตะกอน ไฮโดรไลซิส และการเปลี่ยนเฟส ความสามารถในการละลายของแคลเซียมฟอสเฟตมีบทบาทสำคัญในกระบวนการทางชีววิทยาที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึมใหม่ของเนื้อเยื่อแข็ง ความสามารถในการละลายโดยทั่วไปจะอธิบายเป็นจำนวนของแข็งที่สามารถละลายได้ในหนึ่งหน่วยปริมาตรสารละลาย ปริมาณการละลายขึ้นอยู่กับ pH และความเข้มข้นของกรดหรือเบส เมื่อพิจารณาความสามารถในการละลายของไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ที่ควบคุมอุณหภูมิ และความดัน ความสามารถในการละลายจะแสดงค่าอยู่ในรูป  $K_{sp}$  หรือค่าคงที่การละลายที่อุณหภูมิหนึ่ง ที่ pH น้อยกว่า 7 ของรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตสามารถละลายได้มากขึ้นเมื่อ pH ลดลง



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงความสามารถในการละลายของแคลเซียมฟอสเฟตซึ่งเป็นฟังก์ชันของ log

[Ca] vs. pH (a) log [P] vs. pH (b) และ log [Ca] vs. log [P] (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพิจารณาความสามารถในการละลายของสารละลายของแข็ง เมื่อแร่อะพาไทต์มีทั้งฟลูออไรด์ และไฮดรอกไซด์ ที่อยู่ในรูป  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_{1-y}\text{F}_y$  เมื่อ  $0 \leq y \leq 1$  นั้นซับซ้อนเนื่องมาจากสมดุลของของแข็งและของเหลวที่เปลี่ยนแปลงประกอบของแข็งอาจเกิดผลึกที่พื้นผิวทำให้การละลายช้าลง สามารถสรุปได้ว่าการที่ฟลูออไรด์ไอออนปรากฏขึ้นในผลึกแร่อะพาไทต์นั้นจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

### 2.1.2 กรดฟอสฟอริก [7]

กรดฟอสฟอริกเป็นกรดที่สำคัญในหลายอุตสาหกรรม มีคุณสมบัติตามตารางที่ 2.1 นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมมีปริมาณการใช้เป็นสัดส่วนร้อยละตามตารางที่ 2.2 กระบวนการการผลิตมีด้วยกันสองวิธีคือ กระบวนการแบบแห้ง และกระบวนการแบบเปียก

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของกรดฟอสฟอริก

คุณสมบัติ	
สูตรเคมี	$\text{H}_3\text{PO}_4$
มวลต่อหนึ่งโมล	98.00 g/mol
ลักษณะทางกายภาพ	ของแข็งสีขาว หรือของเหลว (ที่อุณหภูมิมากกว่า 42 องศาเซลเซียส)
ความหนาแน่น	1.885 g/mL (ของเหลว) 1.685 g/mL (สารละลาย 85%) 2.030 g/mL (ผลึกที่ 25 องศาเซลเซียส)
จุดหลอมเหลว	42.35 °C (anhydrous) 29.32 °C (hemihydrate)
จุดเดือด	158 °C
ความสามารถละลายได้ในน้ำ	5.48 g/mL
pKa	2.148, 7.198, 12.375
ความหนืด	2.4–9.4 cP (85% aq. soln.) 147 cP (100 %)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 การนำกรดฟอสฟอริกไปใช้ประโยชน์ [1]

อุตสาหกรรม	ร้อยละการใช้
ปุ๋ย	90.00
ผงซักฟอก	4.50
อาหารสัตว์	3.30
อาหารและเครื่องดื่ม	0.70
การปรับปรุงพื้นผิว	0.60
การปรับปรุงน้ำ	0.25
ทันตกรรม ยาสีฟัน	0.22
การดับเพลิง	0.11
อื่นๆ	0.30
รวม	100

#### 2.1.2.1 กระบวนการแบบแห้ง

ในกระบวนการแบบแห้งแร่ฟอสเฟตจะลดลงโดยการเติมซิลิกอนไดออกไซด์ และคาร์บอน เพื่อให้ได้ฟอสฟอรัส และเศษแร่ โดยทำปฏิกิริยาในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1500 องศาเซลเซียส ได้ดังสมการ (2.1)



การผลิตกรดฟอสฟอริกแบบแห้งนี้จะทำให้กรดฟอสฟอริกที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากสิ่งปนเปื้อนต่างๆยังเหลืออยู่ในเศษแร่ ถึงแม้ว่าความร้อนจากการเผาไหม้ และคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการใหม่ได้ แต่วิธีนี้ก็ยังคงแพงไปสำหรับการใช้ในอุตสาหกรรมปุ๋ย เพราะต้องใช้พลังงานความร้อนมาก

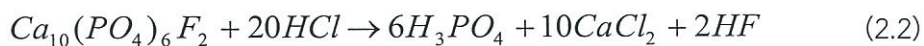
#### 2.1.2.2 กระบวนการแบบเปียก

กรดฟอสฟอริกสามารถผลิตได้จากแร่ฟอสเฟตโดยการทำปฏิกิริยากับกรดแก่เช่น กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟูริก เป็นต้น กรดซัลฟูริกนิยมใช้มากที่สุดเพราะว่าเมื่อทำปฏิกิริยาแล้วผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นสามารถอยู่ในรูปตะกอน และแยกกรดฟอสฟอริกออกมาได้ง่ายโดยการกรอง ส่วนกรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริกเมื่อทำปฏิกิริยาแล้วนั้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในเชิงการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นนำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องใช้เทคนิคในการแยกเช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย การแลกเปลี่ยนไอออน หรือการทำให้เป็นผลึก เป็นต้น เพื่อแยกกรดฟอสฟอริก

การผลิตกรดฟอสฟอริกจากการทำปฏิกิริยาของหินฟอสเฟตและกรดไฮโดรคลอริกเป็นไปตามสมการ (2.2)

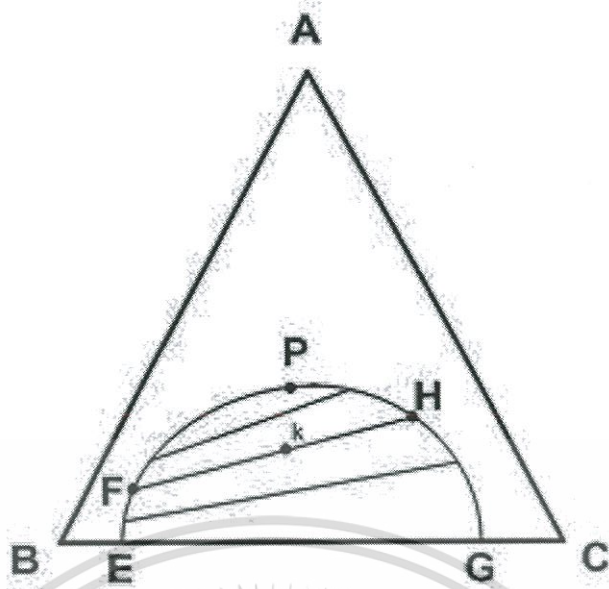


กรดฟอสฟอริกสามารถแยกออกโดยเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายเช่นแอลกอฮอล์ ข้อดีของวิธีนี้ก็คือลดการปนเปื้อนในกรดฟอสฟอริก เพราะว่าสิ่งปนเปื้อนนั้นละลายได้ไม่ดีในตัวทำละลาย ข้อเสียคือกรดไฮโดรคลอริกนั้นจะทำให้เกิดการกัดกร่อน

### 2.1.3 วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย [8,9]

ระบบที่ประกอบด้วย 3 ส่วนประกอบ หรือระบบเทอร์นารี อาจแบ่งออกได้หลายประเภท แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงประเภทเดียวคือ ชนิดที่ประกอบด้วยของเหลวที่ผสมกันได้บางส่วนเพียง 1 คู่ เช่น ระบบที่ประกอบด้วยของเหลว A B และ C โดยของเหลว B กับ C ผสมกันได้เพียงบางส่วน แต่ของเหลว A ละลายหรือผสมกับ B และ C ได้อย่างสมบูรณ์

สำหรับแผนภาพของระบบเทอร์นารี มักเป็นแผนภาพสามเหลี่ยมด้านเท่า ซึ่งเสนอโดย สโตคส์ และรูซบูม วิธีนี้อาศัยหลักการที่ว่าเศษส่วนโมลของระบบเกิดจากเส้นที่ลากจากจุดภายในสามเหลี่ยมให้ขนานกับด้านทั้งสามของรูปสามเหลี่ยมจะมีค่าเท่ากับความยาวของด้านด้านหนึ่งของสามเหลี่ยมด้านเท่าเสมอ นั่นคือเงื่อนไข  $X_A + X_B + X_C = 1$  จะสอดคล้องโดยอัตโนมัติเพื่อที่จะเข้าใจถึงแผนภาพของระบบเทอร์นารีโดยวิธีแผนภาพสามเหลี่ยมด้านเท่าพิจารณาระบบเทอร์นารีที่ประกอบด้วยของเหลว A B และ C ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพวิถีภาคของของเหลวสามชนิดที่ผสมกันได้บางส่วน 1 คู่

ในระบบที่ประกอบด้วยของเหลวที่ผสมกันได้บางส่วน 1 คู่ ที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ถ้าผสม B และ C เข้าด้วยกันในอัตราส่วนหนึ่ง จะได้สารละลายที่แยกออกเป็น 2 ชั้น หรือได้ระบบที่ประกอบด้วย 2 วิถีภาค วิถีภาคแรกประกอบด้วยสารละลายอิ่มตัวของ B ใน C และอีกวิถีภาคประกอบด้วยสารละลายอิ่มตัวของ C ใน B เนื่องจาก A สามารถผสมกับ B และ C ได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อเติม A ลงไปกระจายตัวอยู่ทั่วไปในทั้ง 2 วิถีภาค และจะช่วยให้ B และ C ผสมกันได้มากยิ่งขึ้น

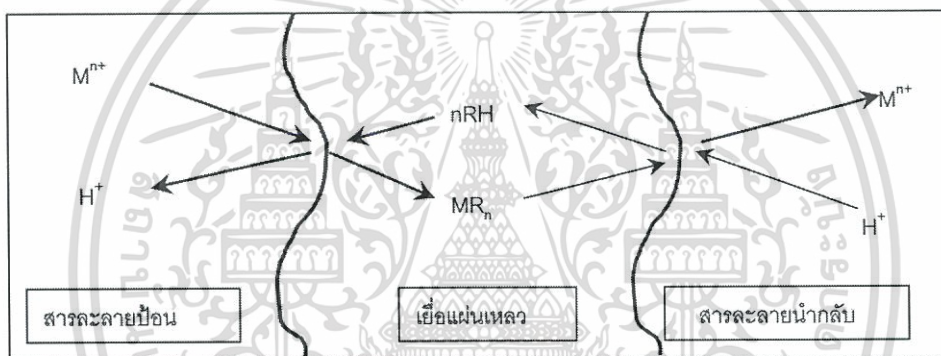
ถ้าเติมของเหลว A ซึ่งละลายได้ทั้งใน B และ C ลงในสารละลายที่มี 2 วิถีภาค โดย A จะกระจายตัวอยู่ในทั้ง 2 วิถีภาค เกิดเป็นสารละลายเทอร์นารี เนื่องจาก A ละลายใน B และ C ได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นไทไลน์ FkH จึงไม่ขนานกับ BC การคำนวณอัตราส่วนระหว่างมวลวิถีภาคทั้งสองหาได้จากกฎสี่เหลี่ยม ดังสมการที่ (2.3)

$$\frac{\text{Weight of Phase 1}}{\text{Weight of Phase 2}} = \frac{Hk}{Fk} \quad (2.3)$$

เมื่อเติม A ลงไปอีกสารละลายจะผสมกันได้มากขึ้น เส้นไทไลน์จะสั้นลงเรื่อยๆ จนกระทั่งสารละลายเทอร์นารีทั้งสองมีองค์ประกอบเหมือนกันหรือผสมกันได้อย่างสมบูรณ์ที่จุด P ระบบจะเหลือเพียง 1 วิถีภาค เรียกจุด P ว่าจุดวิกฤตไอโซเทอร์มัล เหนือจุด P หรือนอกส่วนโค้งจะมีสารละลายเทอร์นารีเพียง 1 วิถีภาคเท่านั้น

### 2.1.4 การใช้เยื่อแผ่นเหลว [10]

การใช้เยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วย 3 ภูมิภาคคือ ภูมิภาคสารละลายป้อนซึ่งเป็นภูมิภาคที่มีองค์ประกอบไอออนที่ต้องการแยกออกละลายอยู่ ภูมิภาคสารละลายอินทรีย์ และภูมิภาคสารละลายนำกลับ โดยภูมิภาคสารละลายอินทรีย์ถูกกำหนดให้อยู่ตรงกลางระหว่างอีกสองภูมิภาค ทำให้เกิดการถ่ายเทมวล และเกิดปฏิกิริยาขึ้นต่อเนื่องโดยเป็นการรวมขั้นตอนการสกัด และขั้นตอนการนำกลับไว้ในขั้นตอนเดียว กลไกการแยกเกิดขึ้นโดยไอออนที่ต้องการแยกจะทำปฏิกิริยากับกับสารละลายอินทรีย์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นจะเกิดการถ่ายเทมวล และแพร่ซึมผ่านภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว และเกิดปฏิกิริยากับภูมิภาคสารละลายนำกลับ เพื่อให้เกิดกระบวนการแยกจึงต้องมีชั้นของเยื่อแผ่นเหลวกันไม่ให้ภูมิภาคสารละลายป้อนผสมกับภูมิภาคสารละลายนำกลับ



รูปที่ 2.4 แผนผังทิศทางการถ่ายเทไอออนโลหะและไฮโดรเนียมไอออนของการถ่ายเทแบบสวนทาง

เยื่อแผ่นเหลวแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พุงด้วยตัวรองรับจะมีอิสระในการเคลื่อนที่ได้ทุกทิศทาง หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “เยื่อแผ่นเหลวแบบเคลื่อนที่ได้” เช่น เยื่อแผ่นเหลวในหอสกัด เยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววน และเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน เป็นต้น

2. เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ เหมาะสมสำหรับการศึกษากลไกการถ่ายเทมวล แต่มีการถ่ายเทมวลต่ำเพราะมีพื้นที่การถ่ายเทน้อย

ข้อดีของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวคือเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการคัดเลือกสกัดสารที่ต้องการสูง ใช้พลังงานต่ำ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่ำ แม้ว่าสารสกัดและตัวทำละลายอินทรีย์จะมีราคาสูง แต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายในอุตสาหกรรมเพราะข้อจำกัดเรื่องเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

H.F. Aly และคณะ (2013) [11] ได้ศึกษาจลนศาสตร์การละลายของหินฟอสเฟตโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเจือจาง งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของความเร็วในการกวน ขนาดอนุภาคหินฟอสเฟต ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก อัตราส่วนระหว่างของกรดไฮโดรคลอริกและหินฟอสเฟต และอุณหภูมิ ที่ส่งผลต่อจลนศาสตร์การละลายของหินฟอสเฟต พบว่าความเร็วในการกวนนั้นไม่ส่งผลต่อการละลายของหินฟอสเฟต อัตราการละลายของหินฟอสเฟตเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก อัตราส่วนระหว่างของกรดไฮโดรคลอริกและหินฟอสเฟต และอุณหภูมิ และอัตราการละลายหินฟอสเฟตจะลดลงเมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคหินฟอสเฟต

Adel Sharif Hamadi และคณะ (2012) [12] ได้นำแร่หินที่ขายตามท้องตลาดมาทำการทดลอง โดยปัจจัยที่ศึกษาคืออุณหภูมิของการละลาย ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก และเวลาที่ใช้ในการผสม โดยการทดลองนี้ใช้อัตราส่วนของของแข็งและของเหลวคือ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 125-140 ไมโครเมตร ความเข้มข้นที่ศึกษาคือร้อยละ 20 30 และ 40 โดยมวล อุณหภูมิในการละลายถูกควบคุมให้คงที่ที่ 30 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการผสมคือ 10-90 นาที จากการลองพบว่าสภาวะที่ใช้ในการทดลองที่เหมาะสมที่สุดคือ ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 40 โดยมวล เวลาในการทำปฏิกิริยาคือ 90 นาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

Muhammad Ashraf Khan และคณะ (2013) [13] ต้องการผลิตปุ๋ยฟอสเฟตคุณภาพสูง โดยต้องการกรดฟอสฟอริกที่คุณภาพดี เพราะว่กรดฟอสฟอริกเป็นวัตถุดิบที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมนี้ ผลิตกรดฟอสฟอริกโดยใช้หินฟอสเฟตทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริก ตามด้วยการแยกกรดฟอสฟอริกด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายโดยใช้เอมีลแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลาย ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากการนำหินฟอสเฟตมาละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 31 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 52 องศาเซลเซียส ต่อมานำผลิตภัณฑ์ที่ได้ผสมกับเอมีลแอลกอฮอล์ปรับอัตราส่วนในช่วง 1:1 ถึง 1:3.5 เติมอะเซตัลดีไฮด์ลงไปเล็กน้อยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด เฟสของเหลวที่เหลือจากการสกัดเป็นเฟสที่มีสิ่งเจือปนมากถูกนำกลับไปทำตัวทำละลายใหม่เพื่อลดการสูญเสียกรดฟอสฟอริก ต่อจากนั้นนำเฟสที่สกัดมาเติมน้ำเกิดการแลกเปลี่ยนกรดฟอสฟอริกอย่างรวดเร็ว ขั้นตอนสุดท้ายคือการทำให้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นขึ้น

Ali Akl Magda และคณะ (2013) [14] ต้องการผลิตกรดฟอสฟอริกที่มีคุณภาพสูง จากกรดฟอสฟอริกที่ขายอยู่ในท้องตลาดโดยใช้เทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยใช้ตัวทำละลายที่แตกต่างกันคือ บิวทานอล เฮกซานอล ออกทานอล และไตรบิวทิลฟอสเฟตผสมกับบิวทานอล อัตราส่วนของเฟสอินทรีย์และเฟสน้ำ อุณหภูมิ และเวลาในการผสม ผลการทดลองพบว่าตัวทำละลายที่ให้ผลที่ดีที่สุดคือออกทานอล ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนของเฟสอินทรีย์และเฟสน้ำเท่ากับ 1:5 เวลาที่ใช้ในการผสมคือ 10 นาที และผลที่ได้คือสามารถแยกกรดฟอสฟอริกที่อยู่ในรูป  $P_2O_5$  ออกมาได้ 87.07%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนหลัก คือ การละลายหินฟอสเฟต การสกัดกรดฟอสฟอริกด้วยตัวทำละลาย การแยกกรดฟอสฟอริกออกจากตัวทำละลาย และการวิเคราะห์ความเข้มข้นฟอสฟอรัสและความเข้มข้นกรดฟอสฟอริก

#### 3.1 การละลายหินฟอสเฟต

##### 3.1.1 สารเคมี

1. หินฟอสเฟต
2. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก
3. น้ำกลั่น

##### 3.1.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เครื่องกวนสารละลาย และแท่งแม่เหล็ก
3. เครื่องชั่ง
4. ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
5. ปิเปตขนาด 1 5 25 มิลลิลิตร
6. กระจกตวงขนาด 25 มิลลิลิตร
7. กรวยกรองแก้ว
8. กระดาษกรอง
9. กระจกนาฬิกา
10. ตู้อบ

##### 3.1.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. ชั่งหินฟอสเฟตหนัก 1.6432 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ใส่ในกระจกนาฬิกา และนำเข้าตู้อบเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยนำสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 2.70 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้สารละลายปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3. นำหินฟอสเฟตที่อบแล้ว ผสมกับกรดไฮโดรคลอริกปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ กวนสารผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนเป็นเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิห้อง

4. กรองสารที่ได้ด้วยกระดาษกรองขนาด 1 เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร ล้างกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่น และเก็บสารที่อยู่บนกระดาษกรอง

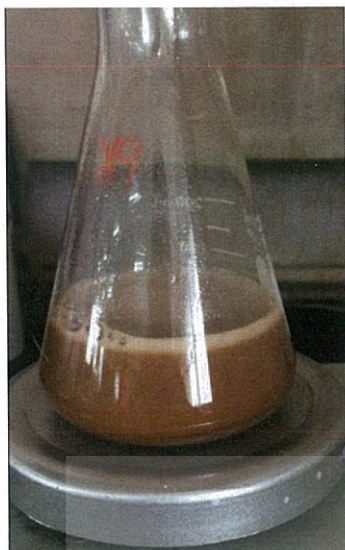
5. นำกระดาษกรองไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และชั่งน้ำหนักเพื่อหาร้อยละการละลายของหินฟอสเฟต

6. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก และเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลในการทำปฏิกิริยา

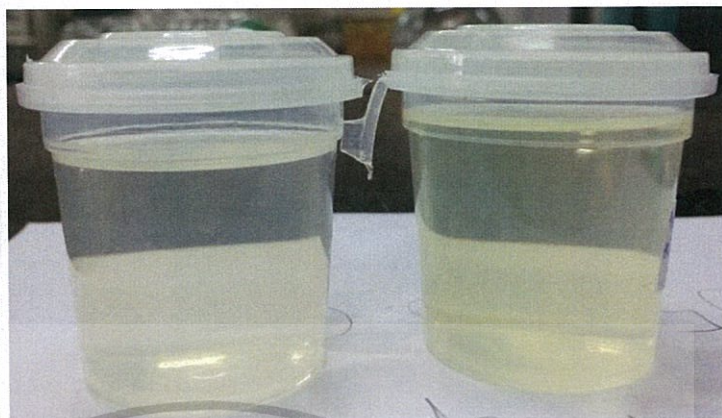
ตารางที่ 3.1 ปริมาณการใช้หินฟอสเฟต

ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก (%wt)	อัตราส่วนโดยโมลการทำปฏิกิริยา	น้ำหนักหินฟอสเฟต (กรัม)
1	1:1	1.6432
	1:2	3.2864
	1:2.2	3.6150
	1:2.5	4.1079
3	1:1	4.9295
	1:2	9.8591
5	1:1	8.2159
	1:2	16.4318
10	1:1	16.4318
	1:2	32.8636
15	1:1	24.6477
	1:2	49.2953

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 (ก) การละลายหินฟอสเฟตและ (ข) ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการกรอง

### 3.2 การสกัดกรดฟอสฟอริกด้วยตัวทำละลาย

#### 3.2.1 สารเคมี

1. สารตัวอย่างที่ได้จากการทดลองข้อ 3.1
2. ออกทานอล

#### 3.2.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. กระจบอกลง
2. กรวยแยกสาร

#### 3.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. นำสารตัวอย่างที่ได้จากการทดลองข้อ 3.1 จำนวน 20 กรัม มาผสมกับออกทานอล 20 กรัม ซึ่งอัตราส่วนโดยน้ำหนักสารละลายต่อสารอินทรีย์คือ 1:1 กวนสารผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนเป็นเวลา 15 นาที
2. สารผสมที่ได้จะเกิดการแยกชั้นระหว่างชั้นน้ำ และชั้นออกทานอล ทำการแยกชั้นโดยกรวยแยก
3. ชั่งน้ำหนักชั้นน้ำ และชั้นสารอินทรีย์
4. ทำการทดลองซ้ำโดยการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยน้ำหนักเป็น 1:2 1:3 1:4 และ 1:5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การสกัดกรดฟอสฟอริกด้วยตัวทำละลายอินทรีย์

### 3.3 การนำกลับกรดฟอสฟอริกออกจากตัวทำละลายออกทานอล

#### 3.3.1 สารเคมี

1. ออกทานอลที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2
2. น้ำกลั่น

#### 3.2.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. กระจกบดวาง
2. กรวยแยกสาร

#### 3.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. นำออกทานอลที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2 ผสมกับน้ำกลั่น อัตราส่วนระหว่างสารตัวอย่างและน้ำกลั่นคือ 1:1 กวนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนเป็นเวลา 15 นาที
2. สารผสมที่ได้จะเกิดการแยกชั้นระหว่างชั้นออกทานอล และชั้นน้ำ ทำการแยกชั้นโดยกรวยแยก
3. ชั่งน้ำหนักชั้นน้ำ และชั้นสารอินทรีย์
4. ทำการทดลองซ้ำโดยการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยน้ำหนักเป็น 0.5:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบในหินฟอสเฟต โดยใช้เทคนิคเอกซเรย์ (XRF)

#### 3.4.1 สารเคมี

1. หินฟอสเฟต

#### 3.4.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่อง XRF
2. ตู้อบ
3. กระจกนาฬิกา

#### 3.4.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. เตรียมตัวอย่างหินฟอสเฟตปริมาณ 2 กรัม อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที
2. นำตัวอย่างหินฟอสเฟตเข้าวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF

### 3.5 การวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัส โดยวิธีวานาโดมolibเดต

#### 3.5.1 สารเคมี

1. กรดฟอสฟอริกจากขั้นตอนที่ 3.3
2. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก
3. แอมโมเนียมโมลิบเดต
4. แอมโมเนียมวานาเดต
5. น้ำกลั่น

#### 3.5.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
2. เครื่องให้ความร้อน (Hotplate)
3. ปีกเกอร์ขนาด 250 และ 500 มิลลิลิตร
4. ขวดวัดปริมาตร 10 50 และ 100 มิลลิลิตร
5. กระจกบอกตวงขนาด 25 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.3 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.5.3.1 การเตรียมวานาโตโมลิบเดตรีเอเจนต์

1. ละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 25 กรัม ในน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร
2. ละลายแอมโมเนียมวานาเดต 1.25 กรัม โดยการต้มให้เดือดในน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร ทำให้เย็นแล้วเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 330 มิลลิลิตร ทิ้งให้สารละลายเย็นจนเท่าอุณหภูมิห้อง
3. เทสารละลายข้อ 1 ลงในสารละลายข้อ 2 เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

#### 3.5.3.2 การวิเคราะห์

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตโดยละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.2195 กรัม เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร โดย 1 มิลลิลิตรของสารละลายจะมี 50 ไมโครกรัมฟอสเฟต
2. ตรวจสอบ pH ของสารละลาย หาก pH อยู่ในช่วง 4 – 10 ไม่จำเป็นต้องทำการปรับ หาก pH ต่ำกว่า 4 ให้นำตัวอย่างมา 2.5 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3. นำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบหาปริมาณฟอสเฟตมา 35 มิลลิลิตร มาใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมนานาโตโมลิบเดตรีเอเจนต์ 10 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร
4. วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร
5. ปิเปิดสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตจำนวน 0 2 5 10 30 และ 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร จะได้อนุกรมของฟอสเฟตที่มีความเข้มข้น 0 2 5 10 30 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำตามขั้นตอนข้อ 2 – 4 เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน

### 3.6 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นกรดฟอสฟอริกด้วยเทคนิคการไทเทรต

#### 3.6.1 สารเคมี

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์
2. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน
3. สารละลายเมทิลออเรนจ์
4. น้ำกลั่น

#### 3.6.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร พร้อมขาตั้งและที่จับ
2. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. ปิเปตขนาด 5 มิลลิลิตร

#### 3.6.3 ขั้นตอนการทดลอง

##### 3.6.3.1 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.05 โมลาร์

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 กรัม ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน

##### 2.6.3.2 การหาความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง

1. ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่
2. วัด pH ของสารละลาย หาก pH ต่ำกว่า 3 ให้หยดสารละลายเมทิลออเรนจ์ 2 – 3 หยด
3. นำไปไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.05 โมลาร์ เขย่าให้เข้ากันจนสารละลายเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเหลือง บันทึกปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้
4. หยดฟีนอล์ฟทาลีน 2 – 3 หยด ในขวดรูปชมพู่เดิม
5. นำไปไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.05 โมลาร์ เขย่าให้เข้ากันจนสารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีชมพู บันทึกปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ พร้อมทั้งคำนวณหาความเข้มข้นกรด

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหินฟอสเฟต

การวิเคราะห์องค์ประกอบของหินฟอสเฟตด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) ทั้งหมด 9 ตัวอย่าง พบว่าค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบหินฟอสเฟตมีค่าแสดงในตารางที่ 4.1

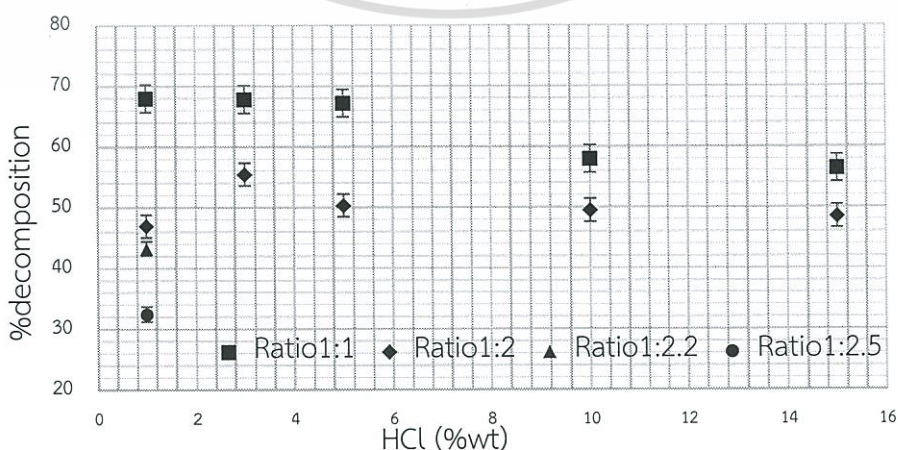
ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบในหินฟอสเฟต

ธาตุองค์ประกอบ	Ca	P	Fe	Mn	K	Si	อื่นๆ
ค่าเฉลี่ย (%)	34.227	4.525	2.013	0.610	0.374	57.507	0.743
S.D. (%)	1.104	1.357	0.099	0.035	0.058	2.410	0.070

จากตารางที่ 4.1 พบว่าหินฟอสเฟตมีธาตุองค์ประกอบมากที่สุดคือ ซิลิกอน รองลงมาคือ แคลเซียม ฟอสฟอรัส ตามลำดับ

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์การละลายหินฟอสเฟต

ในการทดลองตั้งสมมติฐานให้สารตั้งต้น และผลิตภัณฑ์มีองค์ประกอบเป็นฟลูออไรด์อะพาไทต์ กรดไฮโดรคลอริก กรดฟอสฟอริก แคลเซียมคลอไรด์ และกรดไฮโดรฟลูออริก ปฏิบัติตามสมการที่ 2.2 ตัวแปรที่ศึกษาในขั้นตอนนี้คือ ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 1 3 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับหินฟอสเฟต 1:1 1:2 1:2.2 และ 1:2.5 ค่าที่นำมาวิเคราะห์คือค่าการละลายตัวของหินฟอสเฟตซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของน้ำหนักหินฟอสเฟตที่ละลายตัวและน้ำหนักหินฟอสเฟตเริ่มต้น



รูปที่ 4.1 ค่าร้อยละการละลายของหินฟอสเฟตที่ความเข้มข้นและอัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกที่เปลี่ยนไปแปลง โดยกำหนดให้อัตราส่วนการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและหินฟอสเฟตคงที่ ที่อัตราส่วน 1:1 โดยโมล การสลายตัวของหินฟอสเฟตมากที่สุดอยู่ที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และการสลายตัวของหินฟอสเฟตน้อยที่สุดเมื่อใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 2.2733 ที่อัตราส่วน 1:2 โดยโมล การสลายตัวของหินฟอสเฟตมากที่สุดอยู่ที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และการสลายตัวของหินฟอสเฟตน้อยที่สุดเมื่อใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.8872 แนวโน้มของการสลายตัวของหินฟอสเฟตของทั้งสองอัตราส่วนนั้นมีความคล้ายคลึงกัน คือในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการสลายตัวของหินฟอสเฟตมีค่าสูงกว่า ช่วงความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 15 โดยน้ำหนัก เนื่องจากช่วงความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกต่ำสามารถเติมกรดไฮโดรคลอริกเพื่อทำปฏิกิริยาภายในครั้งเดียวได้ เพราะปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่รุนแรง แต่ที่ช่วงความเข้มข้นสูงไม่สามารถเติมกรดไฮโดรคลอริกภายในครั้งเดียวเพื่อทำปฏิกิริยาได้ เนื่องจากความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกที่สูงขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยารุนแรง มีฟองแก๊สเกิดขึ้นและดันสารภายในขวดรูปชมพู่ออกมา ดังนั้นจึงต้องเติมกรดไฮโดรคลอริกทีละน้อย เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดฟองแก๊ส ป้องกันการสูญเสียหินฟอสเฟตซึ่งเป็นสารตั้งต้น ดังนั้นความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกที่เหมาะสมที่นำมาใช้ในการทำปฏิกิริยา คือความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

พิจารณาอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับหินฟอสเฟตที่เปลี่ยนแปลง เมื่อใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่ออัตราส่วนหินฟอสเฟตเพิ่มขึ้นแต่ปริมาณกรดไฮโดรคลอริกยังคงเท่าเดิม ส่งผลให้ค่าการสลายตัวของหินฟอสเฟตลดลง เนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวกำหนดปฏิกิริยา และจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหินฟอสเฟตในหัวข้อ 4.1 พบว่าองค์ประกอบที่มีมากที่สุดคือธาตุซิลิกอน โดยปกติจะอยู่รูปซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) หรือทราย มีคุณสมบัติคือไม่ละลายในน้ำ และไม่ละลายในสารละลายกรดทุกชนิด ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก [15] เนื่องจากในการทดลองได้ตั้งสมมติฐานให้หินฟอสเฟตมีสูตรโมเลกุลคือ  $\text{Ca}_2(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$  จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งสามารถละลายซิลิกอนได้ ทำให้ค่าการสลายตัวของหินฟอสเฟตที่อัตราส่วนการทำปฏิกิริยาต่างๆ มีค่าสูงกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับหินฟอสเฟตที่ 1:2 เนื่องจากต้องการให้หินฟอสเฟตทำปฏิกิริยาพอดีกับกรดไฮโดรคลอริก

### 4.3 ผลการวิเคราะห์การทำให้กรดฟอสฟอริกบริสุทธิ์

การทดลองขั้นตอนนี้ใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลายในการทำให้กรดฟอสฟอริกบริสุทธิ์ โดยการใช้ออกทานอลเป็นตัวสกัด และใช้น้ำเป็นตัวนำกรดฟอสฟอริกกลับ ค่าที่นำมาวิเคราะห์คือปริมาณกรดและปริมาณฟอสฟอรัสที่อยู่ในสารละลายในวัฏภาคน้ำ ซึ่งค่าทั้งสองหาได้จากวิธีการไทเทรต และวานาโดมolibีเดต ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

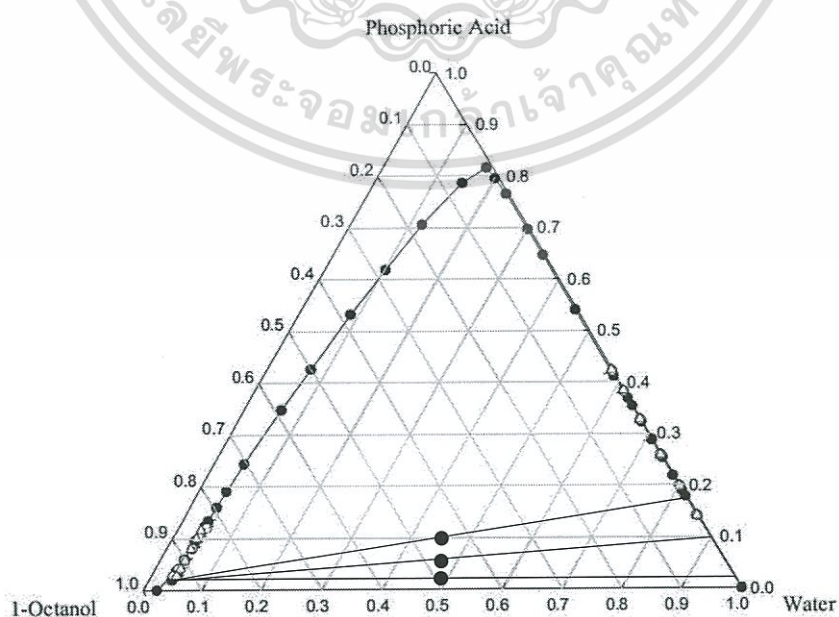
#### 4.3.1 การหาสมดุลของเหลวของระบบน้ำ กรดฟอสฟอริก และออกทานอล

การหาสมดุลของเหลวของระบบน้ำ กรดฟอสฟอริก และออกทานอล เป็นการหาค่าสมดุลการละลายของกรดฟอสฟอริกในชั้นออกทานอลและชั้นน้ำ โดยคำนวณจากอัตราส่วนของน้ำหนักกรดฟอสเฟตในชั้นออกทานอลกับน้ำหนักกรดฟอสฟอริกในชั้นน้ำ

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลสมดุลการละลายของระบบน้ำ กรดฟอสฟอริก และออกทานอล

สัดส่วนองค์ประกอบโดยน้ำหนัก			น้ำหนักชั้น(กรัม)		น้ำหนักกรดฟอสฟอริกในชั้นออกทานอล (กรัม)	น้ำหนักกรดฟอสฟอริกในชั้นน้ำ (กรัม)	ค่าสมดุลการละลาย
ออกทานอล	น้ำ	กรดฟอสฟอริก	ออกทานอล	น้ำ			
0.4500	0.4500	0.1000	46.5674	51.8915	5.6923	2.8077	2.2592
0.4750	0.4750	0.0500	24.4160	24.6724	2.8241	1.4259	2.0014
0.4900	0.4900	0.0200	25.3154	23.2673	1.1267	0.5733	1.8063

ข้อมูลจากตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาค่าสมดุลการละลายพบว่าค่ามากกว่า 1 แสดงให้เห็นว่ากรดฟอสฟอริกนั้นละลายในออกทานอลได้ดีกว่าน้ำ ดังนั้นการที่นำออกทานอลมาสกัดกรดฟอสฟอริกออกจากสารละลายตัวอย่างนั้นมีความเหมาะสม และเมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.2 ไปพล็อตค่าในกราฟสามภาค จะได้ดังรูปที่ 4.2

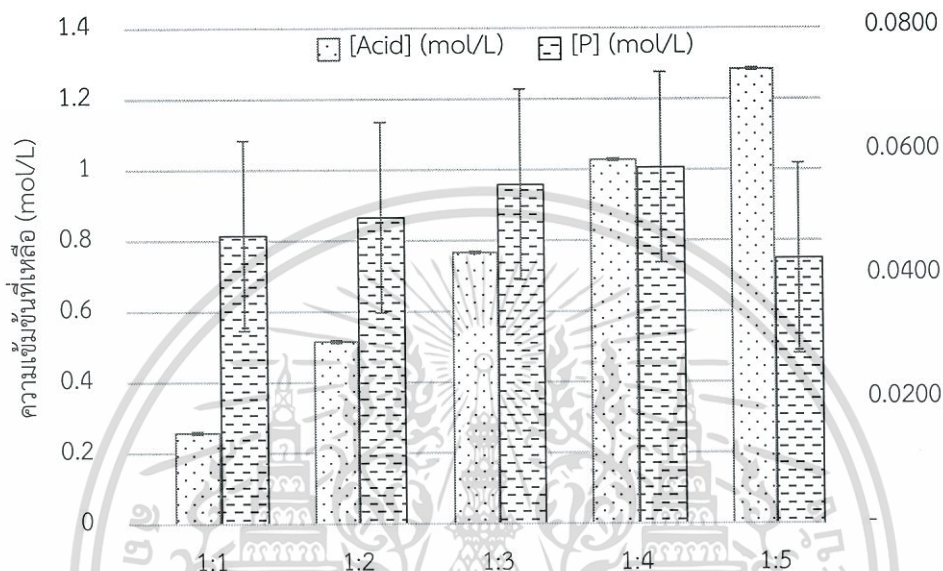


รูปที่ 4.2 กราฟสามภาคของระบบน้ำ กรดฟอสฟอริก และออกทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 การสกัดกรดฟอสฟอริกด้วยตัวทำละลาย

การสกัดกรดฟอสฟอริกด้วยตัวทำละลายออกทานอลในขั้นตอนนี้ตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างตัวอย่างสารละลายซึ่งอยู่ในวิภาคน้ำกับตัวทำละลายออกทานอลซึ่งอยู่ในวิภาคสารละลายอินทรีย์ 1:1 1:2 1:3 1:4 และ 1:5 กำหนดให้น้ำหนักของตัวอย่างสารละลายเท่ากับ 20 กรัม โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

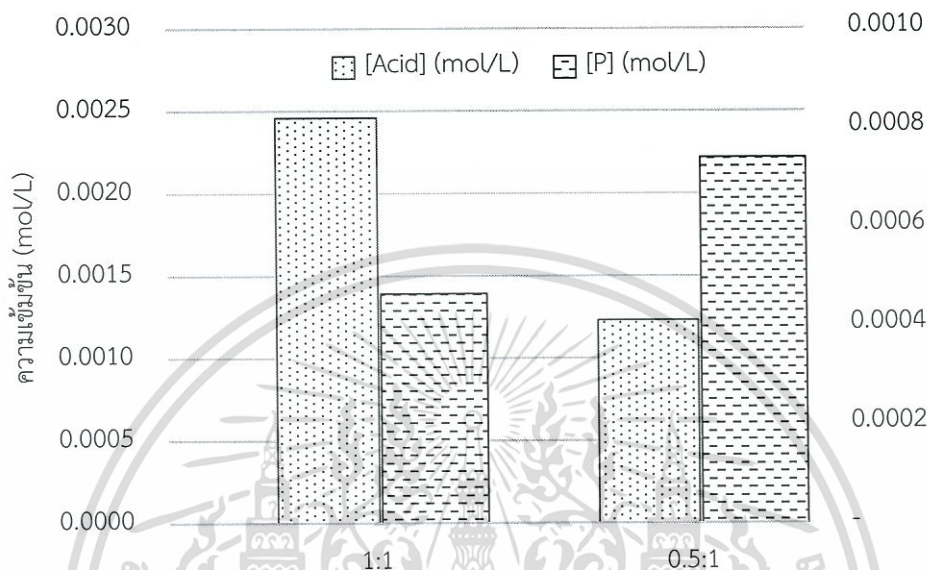


รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นกรดฟอสฟอริกและฟอสฟอรัสที่เหลือนอยู่ในชั้นน้ำหลังจากการสกัด

จากรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณาความเข้มข้นกรดฟอสฟอริกที่เหลือนอยู่ในชั้นน้ำ พบว่าที่อัตราส่วน 1:1 โดยที่ทำการทดลอง 2 ครั้ง ปริมาณกรดที่เหลือนอยู่ในชั้นน้ำมีค่าความเข้มข้นน้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับความเป็นจริงคือต้องการสกัดกรดฟอสฟอริกออกจากสารละลาย ดังนั้นปริมาณกรดที่เหลือนอยู่ในสารละลายควรเหลือน้อย และเมื่อพิจารณาปริมาณฟอสฟอรัสที่เหลือนอยู่ในชั้นน้ำ พบว่าที่อัตราส่วน 1:5 ปริมาณฟอสฟอรัสเหลือน้อยที่สุดใน และเมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสนั้นสามารถผิดพลาดได้มากกว่า ดังนั้นจึงเลือกสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดจากความเข้มข้นกรดฟอสฟอริกด้วยตัวทำละลายออกทานอลคือที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:1

#### 4.3.3 การนำกลับกรดฟอสฟอริกจากตัวทำละลาย

การนำกลับกรดฟอสฟอริกจากตัวทำละลายออกทานอลในชั้นตอนนี้ศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างน้ำกับตัวทำละลายออกทานอลที่ได้มาจากหัวข้อ 4.3.2 อัตราส่วนที่ศึกษาคือ 1:1 และ 0.5:1



รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นกรดฟอสฟอริกและฟอสฟอรัสที่อยู่ในชั้นน้ำหลังจากการนำกลับ

จากรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณาปริมาณกรดฟอสฟอริกที่อยู่ในชั้นน้ำพบว่าที่อัตราส่วน 1:1 มีค่าความเข้มข้นกรดมากกว่า และเมื่อพิจารณาปริมาณฟอสฟอรัสที่อยู่ในชั้นน้ำพบว่าที่อัตราส่วน 0.5:1 มีปริมาณฟอสฟอรัสที่มากกว่า เนื่องจากค่าที่พิจารณาทั้งสองค่าไม่สอดคล้องกัน จึงเลือกค่าปริมาณกรดที่อยู่ในชั้นน้ำมาพิจารณา เพราะจากการวิเคราะห์ข้อ 4.3.2 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นฟอสฟอรัสนั้นสามารถผิดพลาดได้มากกว่า และการวัดฟอสฟอรัสมีขั้นตอนที่ซับซ้อน ต้องมีการปรับปริมาตรผลิตภัณฑ์กรดฟอสฟอริก ทำให้อาจเกิดความผิดพลาดได้มากกว่า ดังนั้นสถานะที่เหมาะสมต่อการนำกลับกรดฟอสฟอริกจากตัวทำละลายออกทานอลคือที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:1

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองเรื่องการผลิตกรดฟอสฟอริกจากหินฟอสเฟตด้วยกระบวนการแบบเปียก โดยการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกรดฟอสฟอริกด้วยกัน 4 ปัจจัยคือ ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก อัตราส่วนโดยโมลของกรดฟอสฟอริกและหินฟอสเฟต อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัฏภาคน้ำและวัฏภาคน้ำละลายอินทรีย์ในขั้นตอนการสกัด และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัฏภาคน้ำและวัฏภาคน้ำละลายอินทรีย์ในขั้นตอนการนำกลับ สามารถสรุปได้ว่าการผลิตกรดฟอสฟอริกด้วยวิธีการผลิตแบบเปียกเป็นวิธีที่ง่ายไม่ซับซ้อน ในขั้นตอนการละลายหินฟอสเฟตทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิห้อง การใช้กรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเป็นความเข้มข้นที่ไม่เป็นอันตรายสำหรับการทดลองนี้ และเมื่อเพิ่มปริมาณหินฟอสเฟตแต่ปริมาณกรดไฮโดรคลอริกยังคงเท่าเดิมในการทำปฏิกิริยาพบว่าร้อยละของการสลายตัวของหินฟอสเฟตลดลง จึงเลือกอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับหินฟอสเฟตที่ 1:2 เนื่องจากต้องการให้หินฟอสเฟตทำปฏิกิริยาพอดีกับกรดไฮโดรคลอริก และเมื่อนำกรดฟอสฟอริกที่ได้ไปสกัดด้วยตัวทำละลายออกทานอลและนำกลับกรดฟอสฟอริกด้วยน้ำ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัฏภาคน้ำและวัฏภาคน้ำละลายอินทรีย์คือ 1:1 และ 1:1 ตามลำดับ ซึ่งจะได้ความเข้มข้นกรดฟอสฟอริกเฉลี่ยเท่ากับ 1.85 มิลลิโมลต่อลิตร

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลิตภัณฑ์กรดฟอสฟอริกที่ได้มามีความเข้มข้นต่ำเนื่องจาก สารตั้งต้นคือหินฟอสเฟตที่ใช้ในการทดลองนั้นมีสิ่งเจือปนอยู่จำนวนมากคือธาตุซิลิกาที่มีจำนวนมากกว่า 50% ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกที่เลือกใช้ต่ำ จึงทำให้มีน้ำอยู่ในระบบมากส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนแรกมีความเข้มข้นต่ำและส่งผลไปจนถึงผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย สารที่นำมาใช้สกัดคือออกทานอลซึ่งกรดฟอสฟอริกมีความชอบละลายอยู่ในออกทานอลมากกว่าน้ำ จึงทำให้การจะนำกรดฟอสฟอริกกลับออกมานั้นต้องใช้น้ำปริมาณมากส่งผลให้ความเข้มข้นกรดฟอสฟอริกสุดท้ายต่ำ ดังนั้นแนวทางการปรับปรุงคือเปลี่ยนแหล่งซื้อหินฟอสเฟต ใช้กรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นมากขึ้น นำผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายระเหยน้ำออกเพื่อให้ได้กรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นมากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] หน่วยข้อเสนอเทคโนโลยีอันตรายและความปลอดภัย ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม และของเสียอันตราย สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2553. รายงานสรุปสถิติการนำเข้าเคมีภัณฑ์อันตรายปี พ.ศ.2548-2552. 1. กรุงเทพฯ : บริษัท จรัล สนิทวงศ์การพิมพ์ จำกัด
- [2] Sierd van der Sluis. 1987. "A CLEAN TECHNOLOGY PHOSPHORIC ACID PROCESS", Netherlands.
- [3] ตริทิพย์ ศุภสุนทรกุล. 2555. "แร่ฟอสเฟต". จุลสารกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. 10(1) : 2.
- [4] Author. "การใช้หินฟอสเฟตในการเพาะปลูก". [online]. Available : <http://www.thaikasetsart.com/การใช้หินฟอสเฟตในการเพ/>. 2017.
- [5] Nutrition Matters. "Rock Phosphate". [online]. Available : <http://www.nutri-tech.com.au/products/dry-mineral-fertilisers/nts-soft-rock>.
- [6] L.C. Chow. 2001. "Solubility of calcium Phosphate". Monogr Oral Sci. 18 : 94-111.
- [7] Wikipedia, the free encyclopedia. "Phosphoric acid". [online]. Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/Phosphoric\\_acid](https://en.wikipedia.org/wiki/Phosphoric_acid). 2017.
- [8] คณะอาจารย์สาขาเคมีเชิงฟิสิกส์. 2558. ปฏิบัติการเคมีเชิงฟิสิกส์ 1. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ :
- [9] ธวัชชัย ศรีวิบูลย์. "การสกัดด้วยตัวทำละลาย". [online]. Available : <http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM334/CM334-2.pdf>. 2017.
- [10] อูรา ปานเจริญ. 2551. กราฟทำนายผลการสกัดไอออนโลหะผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง". พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [11] H.F. Aly, M.M. Ali, M.H. Taha. 2013. "Dissolution Kinetics of Western Deseret Phosphate Rocks, Abu Tartur with Hydrochloric Acid". Arab Journal of Nuclear Science and Applications. 46(5) : 1-16.
- [12] Adel Sharif Hamadi, Shurooq Talib Remedhan, Haider Abd Ali. 2012. "Phosphate Rock Treatment with Hydrochloric Acid for Increasing P2O5 Content". Eng. &Tech. Journal. 30(1) : 67-76.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] M. ASHRAF KHAN, M. ARIF, IMTIAZ-UD-DIN, KHALID M. KHAN, NIDA AMBREEN. 2013. "Phosphoric Acid Manufacturing Through Hydrochloric Acid Route by Solvent Extraction". J. Chem.Soc. Pak. 35(1) : 144-146.
- [14] Ali Akl Magda, M. Youssef Abdul Fatah, M. Ali Mohsen, Ibraheim Amin Mostafa. 2010. "Liquid-liquid extraction technique for purification of Egyptian WET process phosphoric acid". Chemical Engineering. 54(2) : 57-62.
- [15] Wikipedia, the free encyclopedia. "Silicon dioxide". [online]. Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/Phosphoric\\_acid](https://en.wikipedia.org/wiki/Phosphoric_acid). 2017.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลองค์ประกอบหินฟอสเฟตวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF

ลำดับ	Ca	P	Fe	Mn	K	Si	อื่นๆ
1	34.686	3.702	2.007	0.586	0.226	57.880	0.913
2	36.272	6.561	2.187	0.658	0.413	53.138	0.771
3	33.958	3.550	2.001	0.640	0.390	58.733	0.728
4	34.920	6.237	2.149	0.632	0.389	54.926	0.747
5	34.160	4.106	2.053	0.634	0.407	57.919	0.721
6	33.213	3.115	1.901	0.561	0.389	60.131	0.690
7	33.981	6.021	1.931	0.564	0.381	56.393	0.729
8	34.531	4.112	1.956	0.619	0.414	57.658	0.710
9	32.326	3.321	1.936	0.597	0.360	60.784	0.676
เฉลี่ย	34.227	4.525	2.013	0.610	0.374	57.507	0.743
S.D.	1.104	1.357	0.099	0.035	0.058	2.410	0.070

Analyte	Result	(Std. Dev.)	Proc.-Calc.	Line	Intensity
Cd	ND ppm	( 1.7)	Quant.-EC	CdKa	0.0005
Pb	ND ppm	( 2.2)	Quant.-EC	PbLb1	0.0008
Cr	137.5 ppm	( 12.5)	Quant.-EC	CrKa	0.0138
Hg	ND ppm	( 3.5)	Quant.-FP	HgLa	0.0000
Br	22.8 ppm	( 1.3)	Quant.-FP	BrKa	0.0244
Sb	ND ppm	( 17.7)	Quant.-FP	SbKa	0.0000
Rh	0.0 cps/uA	(-----)	Correct		
Ca	34.686 %	( 0.063)	Quant.-FP	CaKa	178.2557
P	3.702 %	( 0.041)	Quant.-FP	P Ka	1.4310
Fe	2.007 %	( 0.007)	Quant.-FP	FeKa	51.4096
Mn	0.586 %	( 0.004)	Quant.-FP	MnKa	10.7794
K	0.392 %	( 0.006)	Quant.-FP	K Ka	1.2406
Zn	0.226 %	( 0.001)	Quant.-FP	ZnKa	12.6630
Ti	0.204 %	( 0.004)	Quant.-FP	TiKa	1.3465
Cu	0.142 %	( 0.001)	Quant.-FP	CuKa	6.7037
Sr	0.138 %	( 0.001)	Quant.-FP	SrKa	18.0306
V	0.012 %	( 0.002)	Quant.-FP	V Ka	0.1114
Si	57.888 %	(-----)	Balance		

รูปที่ ก.1 ข้อมูลองค์ประกอบหินฟอสเฟตจากเครื่องวิเคราะห์ XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลผลการทดลองขั้นตอนการละลายหินฟอสเฟต

ลำดับ	ความเข้มข้น HCl (%wt)	อัตราส่วนระหว่างกรดและหินฟอสเฟตโดยโมล	น้ำหนักหินฟอสเฟต (g)		% การสลายตัว	ค่าเฉลี่ย	S.D.
			เริ่มต้น	สุดท้าย			
1	1	1:1	1.3937	0.4596	67.0202	67.9786	1.3554
2	1	1:1	1.4092	0.4377	68.9370		
3	1	1:2	2.7789	1.3636	50.9306	46.9566	5.6201
4	1	1:2	3.2831	1.8719	42.9826		
5	1	1:2.2	3.3408	1.8673	44.1053	43.2885	1.1551
6	1	1:2.2	3.3580	1.9318	42.4717		
7	1	1:2.5	4.1748	2.7839	33.3179	32.4352	1.2483
8	1	1:2.5	4.1198	2.8199	31.5525		
9	3	1:1	4.1570	1.4048	66.2054	67.8204	2.2839
10	3	1:1	4.0880	1.2495	69.4354		
11	3	1:2	9.8521	4.3059	56.2953	55.4546	1.1890
12	3	1:2	9.9321	4.5078	54.6138		
13	5	1:1	6.9062	2.2098	68.0033	67.1776	1.1676
14	5	1:1	6.9079	2.3244	66.3520		
15	5	1:2	13.8076	6.5678	52.4337	50.3289	2.9767
16	5	1:2	16.4986	8.5423	48.2241		
17	10	1:1	13.8150	6.6274	52.0274	56.4160	6.2064
18	10	1:1	13.8137	5.4143	60.8046		
19	10	1:2	32.9118	16.2690	50.5679	49.5158	1.4879
20	10	1:2	33.0024	17.0082	48.4637		
21	15	1:1	20.7118	8.6353	58.3073	57.9530	0.5010
22	15	1:1	24.5908	10.4268	57.5988		
23	15	1:2	49.5047	25.9337	47.6136	48.5035	1.2585
24	15	1:2	49.3189	24.9586	49.3934		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลผลการทดลองขั้นตอนการสกัดกรดฟอสฟอริกโดยตัวทำละลายออกทานอล

ครั้งที่	สกัดกรดฟอสฟอริกออกจากตัวอย่าง						
	อัตราส่วน A:O	นน.ชั้นน้ำ (กรัม)	นน.ชั้น octanol (กรัม)	ปริมาณ NaOH (ml)	ค.เข้มข้น กรด (mol/L)	ค่าการ ดูดกลืน แสง	ปริมาณP (mol/L)
1	1:1	18.8811	20.9360	5.6	0.06888	1.859	0.0579
2	1:2	17.6775	41.8875	5.8	0.07134	1.939	0.0604
3	1:3	16.7565	63.0000	7.4	0.09102	2.237	0.0698
4	1:4	16.0232	83.7000	8	0.0984	2.282	0.0712
5	1:5	14.6951	104.6000	4.1	0.05043	1.487	0.0462
6	1:1	18.6278	20.9088	3.1	0.03813	1.138	0.0352
7	1:2	17.2244	41.9428	5.8	0.07134	1.244	0.0386
8	1:3	17.0685	61.7171	5.2	0.06396	1.282	0.0398
9	1:4	15.4198	83.4558	6.7	0.08241	1.412	0.0438
10	1:5	15.4884	104.2000	5.85	0.071955	1.273	0.0395

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลผลการทดลองขั้นตอนการนำกลับกรดฟอสฟอริกโดยน้ำ

ครั้งที่	สกัดกรดฟอสฟอริกออกจากตัวทำละลายออกทานอล						
	อัตราส่วน A:O	นน.ชั้นน้ำ (กรัม)	นน.ชั้น octanol (กรัม)	ปริมาณ NaOH (ml)	ค.เข้มข้น กรด (mol/L)	ค่าการ ดูดกลืน แสง	ปริมาณP (mol/L)
1	1:1	20.2948	20.7308	0.2	0.00246	0.048	0.0005
2	1:1	41.7179	40.6707	0.2	0.00246	0.179	0.0005
3	1:1	62.6122	61.9612	0.1	0.00123	0.179	0.0006
4	1:1	82.7646	82.9582	0.1	0.00123	0.206	0.0006
5	1:1	103.5951	103.4391	0.2	0.00246	0.032	0.0004
6	0.5:1	11.1095	20.8053	0.1	0.00123	0.042	0.0007
7	0.5:1	19.8392	41.7895	0.05	0.000615	0.174	0.0008
8	0.5:1	29.4074	61.6878	0.1	0.00123	0.262	0.0008
9	0.5:1	39.3520	83.1792	0.1	0.00123	0.308	0.0009
10	0.5:1	48.8909	104.1131	0.1	0.00123	0.045	0.0008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

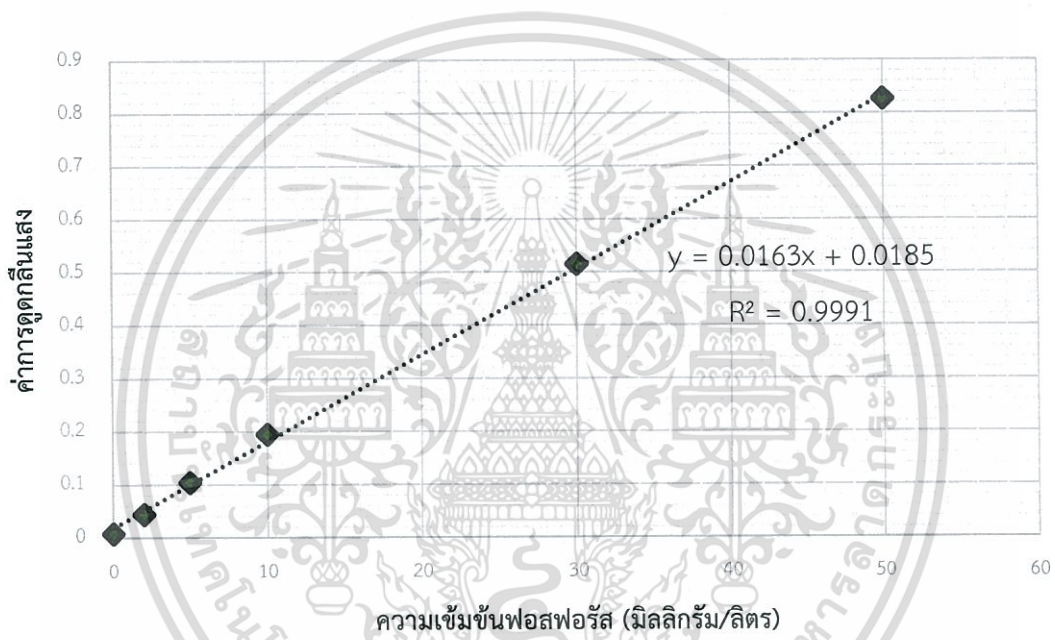
## ภาคผนวก ข

### การคำนวณที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

#### ข.1 การวิเคราะห์ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในสารละลาย

##### ข.1.1 การคำนวณความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เตรียมเป็นมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสที่มีความเข้มข้น 0 2 5 10 30 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นฟอสฟอรัส แสดงดังรูปที่ ข.1

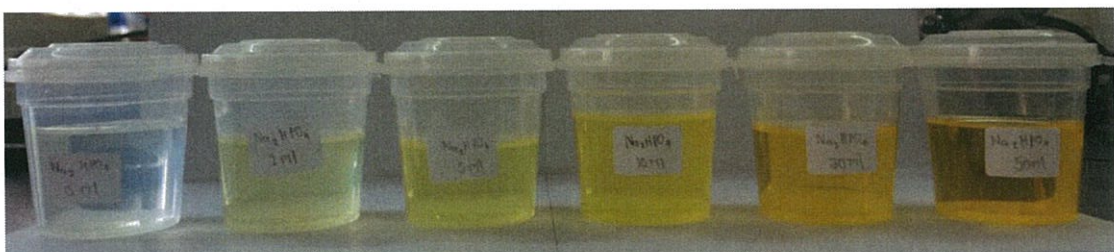


รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสและค่าการดูดกลืนแสง

สมการมาตรฐานความเข้มข้นฟอสฟอรัสคือ  $y = 0.0163x + 0.0185$

โดย  $y$  คือ ค่าการดูดกลืนแสง

$x$  คือ ค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)



รูปที่ ข.2 ระดับสีของสารละลายฟอสฟอรัสมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข.1.2 การคำนวณความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ได้จากการเทียบกับกราฟมาตรฐาน

จากการทดลองหาปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้จากขั้นตอนการสกัดด้วยตัวทำละลายออกทานอล และขั้นตอนการนำกลับตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.3 และ 3.4 หลังจากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้มาเปรียบเทียบความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ได้จากกราฟมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ ข.1 ทำให้ทราบความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ได้

### ข.1.3 การคำนวณความเข้มข้นฟอสฟอรัสนอกกลับ

การหาความเข้มข้นฟอสฟอรัสโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงมีข้อจำกัดคือช่วง pH ของสารละลายตัวอย่างต้องอยู่ในช่วง 4 – 10 ถ้าสารละลายตัวอย่างมีค่า pH ต่ำกว่า 4 จะต้องนำตัวอย่างมาเจือจางโดยนำสารละลายตัวอย่างมา 2.5 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ดังนั้นความเข้มข้นที่ได้จากการเทียบกราฟมาตรฐานยังไม่ใช่ความเข้มข้นที่แท้จริง

สมการการคำนวณความเข้มข้นฟอสฟอริกที่แท้จริง คือ

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$$

- โดย  $C_1$  คือ ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แท้จริง (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $C_2$  คือ ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ได้จากกราฟมาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $V_1$  คือ ปริมาตรสารละลายที่นำมาก่อนเจือจาง (มิลลิลิตร)  
 $V_2$  คือ ปริมาตรสารละลายใหม่ (มิลลิลิตร)