

การดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์
ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COPPER ION ADSORPTION OF HYDROXYAPATITE POWDERS SYNTHESIZED BY
PRECIPITATION AND HYDROTHERMAL METHODS

Mr. Thonnisorn Choochaisangrat



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล
โดย	นายธรรณิศร ชูชัยแสงรัตน์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดุจฤทัย พงษ์เก่า คະซีมา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร. ธีรนุช ควรเชิดชู

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. นิตานาถ ไตรผล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดุจฤทัย พงษ์เก่า คະซีมา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร. ธีรนุช ควรเชิดชู)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรนภา สุจริตรกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพัทธา จินาวัดน์)

ธรณิศร ชูชัยแสงรัตน์ : การดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล (COPPER ION ADSORPTION OF HYDROXYAPATITE POWDERS SYNTHESIZED BY PRECIPITATION AND HYDROTHERMAL METHODS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ดุจฤทัย พงษ์เก๋าคะชีมา, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ. ดร. ฌีรนุช ควรวัดชู, 76 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล พบว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนมีสัณฐานวิทยาคล้ายทรงกลมที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร และผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลมีสัณฐานวิทยาคล้ายเข็มที่มีการโตของผลึกในแนวแกนซีซึ่งทั้งผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ ก็มีเฟสองค์ประกอบของไฮดรอกซีอะพาไทต์และมีระดับความเป็นผลึกที่ต่ำกว่าสารตั้งต้นผงเถ้ากระดูกวัวอย่างมาก แต่เมื่อเทียบระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ พบว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลมีระดับความเป็นผลึกสูงกว่าเนื่องจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลใช้อุณหภูมิสูง จึงส่งผลให้พื้นที่ผิวมีค่าน้อยกว่าและค่าอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสมีค่าสูงกว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน เมื่อนำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ มาทำการศึกษาการดูดซับคอปเปอร์ไอออนพบว่าเวลาอิ่มตัวของ การดูดซับเท่ากับ 4 ชั่วโมง และความเข้มข้นของคอปเปอร์ไอออนที่ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ ดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 0.5 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร การเพิ่มปริมาณผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้นมากกว่าการเพิ่มผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล และการดูดซับไม่ทำให้โครงสร้างผลึกหรือหมู่ฟังก์ชันของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงจึงไม่มีการแพร่ของคอปเปอร์ภายในโครงสร้างและไอโซเทอร์มการดูดซับที่เหมาะสมต่อการดูดซับคอปเปอร์ไอออนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ คือไอโซเทอร์มรูปแบบฟรอนตลิชที่แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้หลายชั้น แต่ไม่สามารถดูดซับได้ดีที่ระดับความเข้มข้นคอปเปอร์ไอออนสูงกว่า 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร

ภาควิชา	วัสดุศาสตร์	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2558	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5671981223 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS: HYDROXYAPATITE / PRECIPITATION / HYDROTHERMAL / COPPER ION ADSORPTION

THONNISORN CHOOCHAIANGRAT: COPPER ION ADSORPTION OF HYDROXYAPATITE POWDERS SYNTHESIZED BY PRECIPITATION AND HYDROTHERMAL METHODS. ADVISOR: ASST. PROF. DUJREUTAI PONGKAO KASHIMA, D.Eng., CO-ADVISOR: NEERANUT KUANCHERTCHOO, Ph.D., 76 pp.

This research studied on the effect of copper ion adsorption on hydroxyapatite powders which were synthesized by precipitation and hydrothermal methods. In the former method, the morphology of the hydroxyapatite powder composed of sphere-like shape particles, finer than 1 μm , while those of the latter formed the latter was needle-like shape crystals, elongated in C-axis. Phase analysis of both methods illustrated that hydroxyapatite had a lower degree of crystallinity than bovine bone ash. However, hydroxyapatite powder synthesized by hydrothermal method had a higher degree of crystallinity than that from the precipitation method due to high synthesized temperature. Hydroxyapatite powder synthesized by hydrothermal method therefore had lower surface area, but higher Ca/P ratio than that from the precipitation method. The equilibrium time for copper ion adsorption on hydroxyapatite powder synthesized from both methods was 4 hours. Higher amount of hydroxyapatite powder synthesized by precipitation enhanced the efficiency of the adsorption more than that from the hydrothermal method. Interestingly, copper ion did not diffuse into the crystal structure of hydroxyapatite. The study also indicated that the suitable adsorption of copper ion on hydroxyapatite powder obtained from both methods followed Freundlich isotherm. Adsorption mechanisms of hydroxyapatite powders synthesized by precipitation and hydrothermal methods occurred in multiple layers. Nevertheless, it could not adsorb effectively at high concentration of copper ion solution.

Department: Materials Science

Student's Signature

Field of Study: Ceramic Technology

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาและความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุจฤทัย พงษ์เก่า คະซิม่า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.ณิรนุช ควรเชิดชู อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์ผู้ซึ่งกรุณาให้การอบรมสั่งสอน และคอยให้คำปรึกษาต่าง ๆ เกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัย การใช้ชีวิตด้านต่าง ๆ คอยแนะนำหนทางในการดำเนินชีวิต ช่วยเหลือด้านเงินทุนการศึกษา และช่วยเหลือในการตรวจทานการเขียนวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน สำหรับการตรวจทานและแก้ไขข้อผิดพลาดบางประการในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณวิโรพงษ์ ครพนม คุณบงกช พุดแก้ว คุณสุพจน์ พุทธวงศ์ คุณโสภิต พุ่มพวง และ อาจารย์ดวงกมล เสงี่ยมดี สำหรับความช่วยเหลือในด้านการศึกษาวิเคราะห์เทคนิคทางวิทยาศาสตร์ต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ ทูนิทวิทย์บัณฑิต เงินค่าตอบแทนจากโครงการจ้างผู้ช่วยนักวิจัยของ อาจารย์ ดร.ณิรนุช ควรเชิดชู อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง เงินค่าตอบแทนจากโครงการผู้ช่วยสอนของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประจำปีการศึกษา 2557 แหล่งเงินทุนวิจัยจากโครงการวิจัยและพัฒนาระบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงผสมซีเมนต์เคลือบบนตัวรองรับฯ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และแหล่งเงินทุนวิจัยจากภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่ให้ทุนการศึกษาและทุนวิจัยตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบพระคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ ที่คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษาในด้านต่าง ๆ

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวผู้ช่วยส่งเสริมทุกท่าน ที่ให้ความรักความเอาใจใส่ อบรมสั่งสอนเลี้ยงดู และให้กำลังใจจนมาถึงวันนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการดำเนินงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการดำเนินงานวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการดำเนินงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite, HA, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$)	3
2.2 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์	6
2.2.1 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอน (precipitation method).....	7
2.2.2 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal method).....	8
2.3 การดูดซับ (adsorption)	11
2.3.1 การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption).....	12
2.3.2 การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption).....	13
2.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherms).....	14
2.4.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm).....	14
2.4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm)	16

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Reviews)	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	22
3.1 การสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอนและวิธีการไฮโดรเทอร์มัล	22
3.1.1 การเตรียมวัตถุดิบผงเถ้ากระดูกวัวเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์	22
3.1.2 การสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอน	22
3.1.3 การสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล	24
3.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์จาก สองวิธีการที่ต่างกัน.....	26
1) การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)	26
2) การวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD)	26
3) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared, FTIR).....	26
4) การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคบีอีที (Brunauer Emmett Teller, BET).....	27
5) การวิเคราะห์ธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสเชิงปริมาณด้วยเทคนิค อิเล็กตรอนโพรบ ไมโครอานาลิซิส (electron probe micro analyzer, EPMA)	27
3.2 การศึกษาการดูดซับคอปเปอร์ไอออนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี ต่างกัน	27
3.2.1 การหาเวลาอิ่มตัวของ การดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน	27
3.2.2 การศึกษาการดูดซับคอปเปอร์ไอออนระดับความเข้มข้นต่าง ๆ บนผงไฮดรอกซีอะ พาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน	30

3.2.3 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคอปเปอร์ในสารละลายคอปเปอร์ที่ผ่านการดูดซับด้วย ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน	32
1) การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคอปเปอร์ในสารละลายที่ผ่านการดูดซับด้วย ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกันด้วยเทคนิคอินดัก ทีฟคัปเปิลพลาสมาแมสสเปกโตรเมตรี (inductively coupled plasma – mass spectrometry, ICP-MS).....	32
3.2.4 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี ต่างกันที่ผ่านการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลาย	32
1) การวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD)	32
2) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared, FTIR).....	32
3) การวิเคราะห์การปนเปื้อนของคอปเปอร์ไอออนบนพื้นผิวของผงไฮดรอก ซีอะพาไทต์ ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกันด้วยเทคนิคแผนภาพอิเล็กทรอนิกส์ รูปไมโครอานาลิซิส (electron probe micro analyzer - mapping, EPMA-Mapping)	33
3.2.5 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายความเข้มข้นต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน 0.5 กรัม	33
1) รูปแบบแลงเมียร์ (Langmuir model)	33
2) รูปแบบฟรุนดลิช (Freundlich model).....	34
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย และการอภิปรายผล	35
4.1 ผลของการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วย วิธีการตกตะกอน (HA precipitate) และไฮโดรเทอร์มัล (HA hydrothermal).....	35
4.1.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและโครงสร้างจุลภาคของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ เทียบกับสารตั้งต้นผงเถ้ากระดูกวัว	35
1) ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน.....	35

2)	ผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล.....	35
4.1.2	เฟสองค์ประกอบของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ เทียบกับ สารตั้งต้นผงเอ็กกระดูกวัว.....	37
4.1.3	หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล.....	38
4.1.4	พื้นที่ผิวจำเพาะของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ.....	40
4.1.5	ปริมาณธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการ ต่าง ๆ.....	41
4.2	ผลการศึกษาการดูดซับคอปเปอร์ไอออนของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล	42
4.2.1	ผลการศึกษาเวลาอิ่มตัวของการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ.....	42
4.2.2	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคอปเปอร์บนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ผ่านการดูดซับในสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ .	43
4.2.3	ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลที่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลาย	50
1)	เฟสองค์ประกอบของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออน.....	50
2)	หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออน.....	52
3)	การปนเปื้อนของคอปเปอร์ไอออนบนพื้นผิวของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน	55
4.2.4	ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ.....	56
1)	ผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน.....	57

2) ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล.....	59
3) การศึกษาค่าคงที่ต่าง ๆ ในไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบแลงเมียร์และ ฟรุนดลิช.....	60
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย และข้อเสนอแนะ	63
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	63
5.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต	65
รายการอ้างอิง	67
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก.....	74
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	76



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติที่ได้ของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ.....	6
ตารางที่ 4.1 สูตรอัตราส่วนที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล	37
ตารางที่ 4.2 สูตรพื้นที่ผิวจำเพาะต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน และไฮโดรเทอร์มัล	41
ตารางที่ 4.3 สูตรปริมาณธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล.....	42
ตารางที่ 4.4 สูตรค่าคงที่ต่าง ๆ และค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจของไอโซเทอร์มการดูดซับคอปเปอร์ไอออนรูปแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล	61

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 ผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์โครงสร้างแบบหกเหลี่ยม (hexagonal).....	3
รูปที่ 2.2 ระดับความเป็นผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์	5
รูปที่ 2.3 ระดับความเป็นผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน	8
รูปที่ 2.4 สันฐานวิทยาคลายลักษณะกลมของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ ด้วยวิธีการ ตกตะกอน	8
รูปที่ 2.5 2 กระบวนการเปลี่ยนรูปร่างของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ ด้วยวิธีการ ไฮโดรเทอร์มัล	10
รูปที่ 2.6 ผลของ pH ต่อสันฐานวิทยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยไฮโดรเทอร์มัล	10
รูปที่ 2.7 สันฐานวิทยาคลายลักษณะแท่งของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยไฮโดรเทอร์มัล ..	11
รูปที่ 2.8 ลักษณะของกระบวนการดูดซับของตัวถูกดูด (adsorbate) บนตัวดูดซับ (adsorbent) ...	12
รูปที่ 2.9 การดูดซับที่ผิวหน้าเพียงชั้นเดียว (monolayer adsorption)	12
รูปที่ 2.10 กราฟระหว่างอุณหภูมิ (T) และปริมาณการดูดซับ ($\frac{x}{m}$) ของการดูดซับทางเคมี	13
รูปที่ 2.11 การดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption).....	13
รูปที่ 2.12 กราฟระหว่างอุณหภูมิ (T) และปริมาณการดูดซับ ($\frac{x}{m}$) ของการดูดซับทางกายภาพ.....	14
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างกราฟแสดงไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์	16
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างกราฟแสดงไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิช	18
รูปที่ 2.15 การหาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ จากการคำนวณระยะห่างระหว่างจุดและ เส้นตรงแนวโน้ม	18
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างแผนภาพที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ต่างกัน	19
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบผงเถ้ากระดูกวัวเพื่อนำมาใช้ในการสังเคราะห์ ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ และขั้นตอนการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอน.....	23
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล	25

รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการหาเวลาอิมิตัวของการดูดซับคอปเปอร์ไอออน บนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน.....	29
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการศึกษาการดูดซับคอปเปอร์ไอออนที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ บน ผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน	31
รูปที่ 4.1 สันฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน ที่กำลังขยายต่าง ๆ	35
รูปที่ 4.2 สันฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่มี อัตราส่วน ผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนต่อสารละลายกรดอะซีติก 1 โมลาร์ต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า	36
รูปที่ 4.3 สันฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่มี อัตราส่วน ผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนต่อสารละลายกรดอะซีติก 1 โมลาร์ต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า	37
รูปที่ 4.4 เฟสองค์ประกอบของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วย วิธีการตกตะกอนและ ไฮโดรเทอร์มัลเทียบกับสารตั้งต้นผงแก้วกระดูกวัว	38
รูปที่ 4.5 หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วย วิธีการตกตะกอนและ ไฮโดรเทอร์มัล	40
รูปที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายความเข้มข้น 1.0 มิลลิโมลต่อลิตร บนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล 0.5 กรัม เทียบกับเวลา.....	43
รูปที่ 4.7 ปริมาณธาตุคอปเปอร์บนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนที่ ผ่านการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อ พื้นที่ผิวของ ผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ 0.5 กรัมโดยเทียบกับเวลา	45
รูปที่ 4.8 ปริมาณธาตุคอปเปอร์บนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน ที่ ผ่านการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อพื้นที่ผิว ของ ผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ 1.0 กรัมโดยเทียบกับเวลา	45
รูปที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ บนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน 0.5 กรัมโดยเทียบกับเวลา.....	46

รูปที่ 4.10	เปอร์เซ็นต์การดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ บนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน 1.0 กรัมโดยเทียบกับเวลา	46
รูปที่ 4.11	ปริมาณธาตุคอปเปอร์บนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่ผ่านการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อพื้นที่ผิวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.5 กรัมโดยเทียบกับเวลา	48
รูปที่ 4.12	ปริมาณธาตุคอปเปอร์บนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่ผ่านการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อพื้นที่ผิวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ 1.0 กรัมโดยเทียบกับเวลา	48
รูปที่ 4.13	เปอร์เซ็นต์การดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ บนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล 0.5 กรัมโดยเทียบกับเวลา	49
รูปที่ 4.14	เปอร์เซ็นต์การดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ บนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล 1.0 กรัมโดยเทียบกับเวลา	49
รูปที่ 4.15	เฟสองค์ประกอบของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออน	51
รูปที่ 4.16	เฟสองค์ประกอบของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออน.....	52
รูปที่ 4.17	หมู่ฟังก์ชันกต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออน	53
รูปที่ 4.18	หมู่ฟังก์ชันกต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออน.....	54
รูปที่ 4.19	แผนภาพการปนเปื้อนของคอปเปอร์ไอออนบนพื้นที่ผิวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอน.....	55
รูปที่ 4.20	แผนภาพการปนเปื้อนของคอปเปอร์ไอออนบนพื้นที่ผิวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัล.....	56
รูปที่ 4.21	ไอโซเทอร์มการดูดซับคอปเปอร์ไอออนรูปแบบแลงเมียร์ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน.....	58

รูปที่ 4.22 ไอโซเทอร์มการดูดซับคอปเปอร์ไอออนรูปแบบพหุนคติของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่
 สั้เคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน..... 58

รูปที่ 4.23 ไอโซเทอร์มการดูดซับคอปเปอร์ไอออนรูปแบบแล้งเมียร์ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่
 สั้เคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล..... 59

รูปที่ 4.24 ไอโซเทอร์มการดูดซับคอปเปอร์ไอออนรูปแบบพหุนคติของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่
 สั้เคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล..... 60



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการดำเนินงานวิจัย

ในปัจจุบันแหล่งน้ำตามธรรมชาติได้ตรวจพบว่ามีสารปนเปื้อนของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก เช่น ปรอท (mercury, Hg), ตะกั่ว (lead, Pb), แคดเมียม (cadmium, Cd), นิกเกิล (nickel, Ni), สังกะสี (zinc, Zn) และทองแดง (copper, Cu) เป็นต้น เมื่อมนุษย์ได้นำน้ำที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักดังกล่าวไปใช้ในการอุปโภคบริโภคโดยตรงก็ส่งผลทำให้เกิดโรคร้ายไข้เจ็บต่าง ๆ มากมาย และอีกสาเหตุหนึ่งคือการได้รับโลหะหนักโดยทางอ้อมผ่านทางห่วงโซ่อาหาร เมื่อมีพืชหรือสัตว์ได้รับการปนเปื้อนโลหะหนักจึงเกิดการสะสมมาตามห่วงโซ่อาหารจนมาสู่มนุษย์ จึงทำให้มนุษย์ที่ไม่ได้บริโภคบริโภคน้ำที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักโดยตรงได้รับโลหะหนักอีกทางหนึ่งเช่นกัน [1-5]

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ยกตัวอย่างโลหะหนักชนิดหนึ่งมาศึกษาคือ ทองแดง โดยพบว่าทองแดงเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่สามารถตรวจพบการปนเปื้อนในน้ำได้หลายแหล่ง เช่น การปนเปื้อนในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การทำเหมืองแร่ การเกษตร หรือแม้แต่ในโรงพยาบาล [1] และอีกสาเหตุหนึ่งที่สำคัญที่ทำให้พบโลหะหนักทองแดงคือ ท่อน้ำตามอาคารบ้านเรือนในอดีตที่ทำมาจากทองแดงหรือทองเหลือง เมื่อถูกใช้เป็นเวลานานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันจึงทำให้เกิดการหลุดร่อนของทองแดงหรือการใช้สารซัลเฟต (copper sulphate, $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) เป็นตัวกำจัดสาหร่ายและตะไคร่น้ำก็สามารถพบการปนเปื้อนของโลหะหนักทองแดงได้เช่นกัน [6, 7] อย่างไรก็ตามทองแดงก็มีประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์ซึ่งถ้าธาตุขาดทองแดงก็จะส่งผลให้เกิดโรคโลหิตจางได้ แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าร่างกายได้รับทองแดงมากเกินไปจะทำให้ทองแดงเกิดการสะสมที่ตับ หรือสมอง ส่งผลให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ถึงอาเจียนเป็นเลือด หนาวสั่น เป็นไข้ ปวดหัว ท้องเสีย ปวดท้อง และเมื่อได้รับการสะสมเป็นเวลานานจะส่งผลร้ายขึ้นคือ ตับไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ทำให้เกิดอาการของโรคอัลไซเมอร์ (Alzheimer's disease) หรืออาจเกิดอาการในโรคกลุ่มวิลสัน (Wilson's diseases) ขึ้น เช่น กล้ามเนื้อเกิดการเกร็ง ร่างกายสั่น และทำให้ควบคุมการพูดได้ลำบาก เป็นต้น ถ้าได้รับทองแดงสะสมเป็นปริมาณมากเข้าจะเกิดอาการที่หนักกว่าคือจะทำให้ภาวะตับหรือ

ไตวายได้ [7-12] โดยทางกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมได้ตั้งมาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภคว่าต้องมีปริมาณของทองแดงไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L, ppm) [13]

ในปัจจุบันพบว่าม้งานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับการลดการปนเปื้อนและกำจัดโลหะหนักที่อยู่ในน้ำด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation) กระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส (reverse osmosis) การดูดโลหะหนักด้วยพืช (phytoextraction) อัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) และการใช้สารดูดซับ (adsorption) เป็นต้น [1, 3] ซึ่งวิธีที่น่าสนใจในปัจจุบันคือการใช้สารดูดซับเนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้งบประมาณน้อยและมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากวิธีการดูดซับต้องคำนึงถึงการเลือกตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดที่มีประสิทธิภาพ จึงมีหลากหลายงานวิจัยได้ศึกษาค้นคว้าประสิทธิภาพของสารดูดซับแต่ละชนิด [5] และพบว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite, HA, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) เป็นสารดูดซับชนิดหนึ่งซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสมบัติน่าสนใจต่อการนำมาเป็นสารดูดซับ ได้แก่ ความสามารถในการดูดซับที่สูง ละลายน้ำยาก มีความเสถียรสูงภายใต้สภาวะออกซิเดชัน (oxidation) และรีดักชัน (reduction) ง่ายและราคาถูก เนื่องจากไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นสารที่มีอยู่ทั่วไปในกระดูกและฟันของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม [3, 14] นอกจากนี้ปัจจัยอื่น ๆ เช่น พื้นที่ผิว ขนาดและจำนวนรูพรุนที่พื้นผิว การมีอนุภาคขนาดเล็ก หรือสัณฐานวิทยาต่าง ๆ ก็มีผลต่อการช่วยเพิ่มความสามารถในการเป็นตัวดูดซับที่ดีขึ้นเช่นกัน [15-18] ดังนั้นจึงมีงานวิจัยเป็นจำนวนมากนำไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีการต่าง ๆ ไปศึกษาในการเป็นสารดูดซับน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก [2, 3, 5, 18-25]

1.2 วัตถุประสงค์ของการดำเนินงานวิจัย

เพื่อวิเคราะห์ความสามารถการเป็นตัวดูดซับคอปเปอร์ไอออนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการดำเนินงานวิจัย

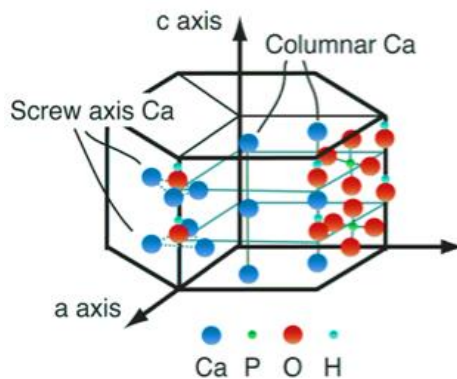
ได้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลที่สามารถนำไปดูดซับคอปเปอร์ไอออนในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

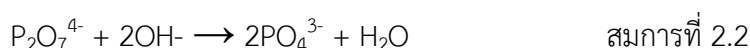
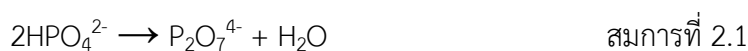
2.1 ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite, HA, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$)

อะพาไทต์ (Apatite) เป็นชื่อเรียกของสารประกอบที่มีสูตรทั่วไปคือ $\text{X}_{10}(\text{Y})_6\text{Z}_2$ โดยสัญลักษณ์ X แทนธาตุโลหะที่มีประจุ +2 (divalent cations) เช่น แคลเซียมไอออน (calcium ion, Ca^{2+}) หรือ แมกนีเซียมไอออน (magnesium ion, Mg^{2+}) เป็นต้น สัญลักษณ์ Y แทนสารประกอบออกไซด์ที่มีประจุ -2 (divalent anion) หรือ -3 (trivalent anions) เช่น คาร์บอเนตไอออน (carbonate ion, CO_3^{2-}) หรือฟอสเฟตไอออน (phosphate ion, PO_4^{3-}) เป็นต้น และสัญลักษณ์ Z แทนธาตุหรือสารประกอบที่มีประจุ -1 (monovalent anions) เช่น ไฮดรอกซิลไอออน (hydroxyl ion, OH^-), ฟลูออไรด์ไอออน (fluoride ion, F^-) หรือคลอไรด์ไอออน (chloride ion, Cl^-) เป็นต้น สำหรับไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite, HA) เป็นสารประกอบอะพาไทต์ชนิดหนึ่งที่มีแคลเซียมไอออนแทนตำแหน่ง X, ฟอสเฟตไอออนแทนตำแหน่ง Y และไฮดรอกซิลไอออนแทนตำแหน่ง Z ดังนั้นไฮดรอกซีอะพาไทต์จึงมีสูตรทางเคมีคือ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ จากองค์ประกอบดังกล่าวทำให้ไฮดรอกซีอะพาไทต์มีอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส (calcium/phosphorus ratio, Ca/P ratio) เท่ากับ 1.67 และมีโครงสร้างผลึกแบบหกเหลี่ยม (hexagonal) ดังรูปที่ 2.1 [17, 26] ซึ่งไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นสารประกอบทางอนินทรีย์ของเนื้อเยื่อแข็ง (hard tissue) ในกลุ่มสัตว์ที่มีกระดูกสันหลัง เช่น ฟัน และกระดูก เป็นต้น จึงสามารถสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ขึ้นได้จากกระดูกของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย และมีราคาต้นทุนต่ำ [1]

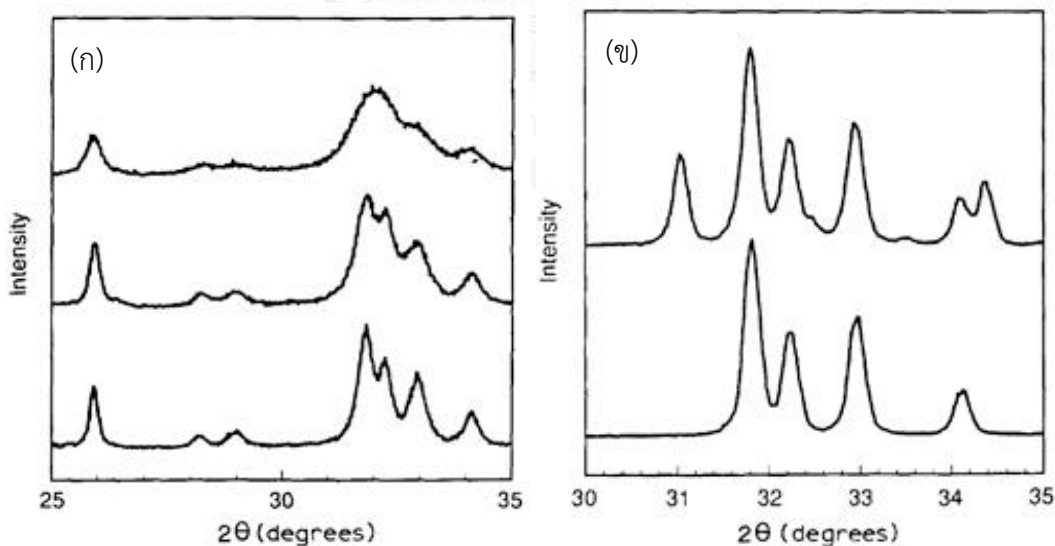


รูปที่ 2.1 ผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์โครงสร้างแบบหกเหลี่ยม (hexagonal) [27]

จากโครงสร้างผลึกแบบหกเหลี่ยมของไฮดรอกซีอะพาไทต์ดังรูปที่ 2.1 พบว่าโดยปกติใน 1 ยูนิตเซลล์ ฟอสเฟตไอออนจะถูกแบ่งเป็น 2 ชั้นส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของแคลเซียมไอออนเป็น 2 แบบบนแกนซี (c axis) ได้แก่ แบบตรง (columnar calcium) ประกอบด้วยแคลเซียมไอออนสร้างพันธะกับแคลเซียมกันเอง และแบบเกลียว (screw axis calcium) ประกอบด้วยแคลเซียมไอออนสร้างพันธะกับไอออนอื่นๆ โดยจะมีไฮดรอกซิลไอออนอยู่ตรงกลางแคลเซียมแบบเกลียว ซึ่งพบว่าช่องว่างของอะตอมในโครงสร้างของไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถเพิ่มมากขึ้นได้ เนื่องมาจากการลดระดับความเป็นผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ทำให้แคลเซียมแบบแนวตรงเกิดการหลุดจากโครงสร้างมากขึ้นส่งผลต่อค่าอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสมีค่าลดลงต่ำกว่า 1.67 จึงเกิดภาวะขาดแคลเซียม (calcium-deficient) ส่งผลทำให้ไฮดรอกซีอะพาไทต์มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้น (high activity) หรือเรียกไฮดรอกซีอะพาไทต์ชนิดนี้ว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีค่าอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสไม่พอดี (nonstoichiometric hydroxyapatite) [17] โดยระดับความเป็นผลึกที่ต่ำลงและภาวะขาดแคลเซียมของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ทำให้ค่าอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสมีค่าลดลงต่ำกว่า 1.67 ทำให้สูตรทางเคมีของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเดิมคือ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ เปลี่ยนลักษณะเป็น $\text{Ca}_{10-x}(\text{HPO}_4)_x(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{OH})_{2-x}$ (ค่า x จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 2) เนื่องจากมีองค์ประกอบ HPO_4^{2-} เพิ่มเข้ามา แต่เมื่อมีการเพิ่มระดับความเป็นผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้องค์ประกอบ HPO_4^{2-} เปลี่ยนรูปเป็น $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$ ดังสมการที่ 2.1 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึงช่วง 650 ถึง 750 องศาเซลเซียสจะทำให้ $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$ เปลี่ยนรูปเป็น PO_4^{3-} ดังสมการที่ 2.2 และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกจากผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นผลึกเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -tricalcium phosphate, β -TCP) ทำให้ระดับความเป็นผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์เพิ่มสูงขึ้น ดังภาพที่ 2.2 และส่งผลให้ไฮดรอกซีอะพาไทต์มีความเสถียรขึ้น ค่าอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสมีค่าใกล้เคียง 1.67 มากขึ้น ทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่ำลง (low activity) หรือเรียกไฮดรอกซีอะพาไทต์ชนิดนี้ว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีค่าอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสพอดี (stoichiometric hydroxyapatite) [28]



ในปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาการนำไฮดรอกซีอะพาไทต์ไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ โดยงานวิจัยที่เด่นชัดคือการนำไปใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ เช่น วัสดุทดแทนอวัยวะปริทันต์ที่เสื่อม (periodontal defects) สันกระดูกขากรรไกร (alveolar ridge) ประสาทหูชั้นกลางเทียม ในงานทันตกรรม และเคลือบโลหะเพื่อทำกระดูกเทียม (metallic osseous implants) เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ในงานด้านเทคโนโลยีต่าง ๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี วัสดุเรืองแสง (fluorescence materials) ตัวนำประจุ (ion conductors) และก๊าซเซ็นเซอร์ (gas sensor) เป็นต้น และประโยชน์ที่สำคัญของไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้านอื่น ๆ คือ การนำไปใช้เป็นคอลัมน์โครมาโตกราฟี (column chromatography) ที่สามารถแยกโปรตีนและกรดนิวคลีอิกได้อย่างง่ายและรวดเร็ว นำไปใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย และการนำไปใช้พื้นฟูดินที่ปนเปื้อนของโลหะหนัก เป็นต้น [14] ซึ่งการนำไฮดรอกซีอะพาไทต์ไปศึกษาด้านการบำบัดน้ำเสียโดยใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักธาตุต่าง ๆ ในน้ำถือเป็นหัวข้อหนึ่งที่มีผู้ให้ความสนใจเป็นจำนวนมาก [18, 22, 23, 29] เนื่องจากไฮดรอกซีอะพาไทต์มีคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ ได้แก่ ความสามารถในการดูดซับที่สูง ละลายน้ำยาก มีความเสถียรสูงภายใต้สภาวะออกซิเดชัน (Oxidation) และรีดักชัน (Reduction) [3, 14]



รูปที่ 2.2 ระดับความเป็นผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์

(ก) ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการเผาผนึก (ข) ที่ผ่านกระบวนการเผาผนึกแล้ว [28]

2.2 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์

การพัฒนาไฮดรอกซีอะพาไทต์ให้มีความสามารถในการเป็นตัวดูดซับที่สูง ขึ้นอยู่กับวิธีการในการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยมีงานวิจัยจำนวนมากทำการศึกษาการสังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การสังเคราะห์ด้วยวิธีสถานะของแข็ง (solid-state synthesis) [30] วิธีไฮโดรไลซิส (hydrolysis method) [31] วิธีอิมัลชัน (emulsion method) [32] วิธีการตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation) [33] และวิธีการไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal method) [18] เป็นต้น วิธีการสังเคราะห์แต่ละวิธีก็จะส่งผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ในการเป็นตัวดูดซับของไฮดรอกซีอะพาไทต์ ได้แก่ ระดับความเป็นผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ พื้นที่ผิวจำเพาะต่าง ๆ องค์ประกอบทางเคมี สัณฐานวิทยา และค่าอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส [14, 23] ซึ่งมีหลากหลายงานวิจัยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ และสรุปเป็นตารางดังตารางที่ 2.1

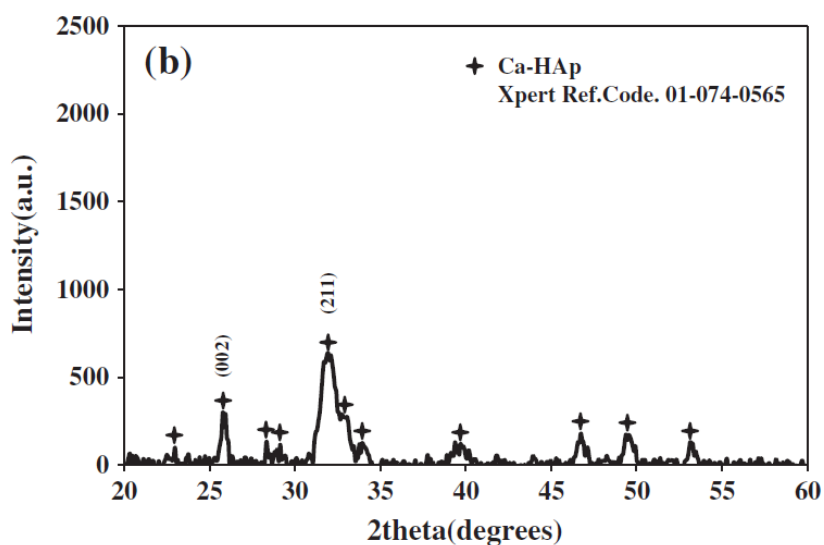
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติที่ได้ของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ [14]

วิธีการสังเคราะห์	จำนวนสารเคมีที่ใช้	ต้นทุน	สัณฐานวิทยา	ระดับความเป็นผลึก	อัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส	ขนาดอนุภาค
สถานะของแข็ง	น้อย	ต่ำ	หลากหลาย	สูงมาก	หลากหลาย	ค่อนข้างไมครอน
ไฮโดรไลซิส	น้อย	ค่อนข้างสูง	หลากหลาย	หลากหลาย	พอดี	หลากหลาย
อิมัลชัน	มาก	สูง	คล้ายแท่งเข็ม	ค่อนข้างต่ำ	ไม่พอดี	นาโน
ตกตะกอนทางเคมี	ค่อนข้างน้อย	ต่ำ	หลากหลาย	ค่อนข้างต่ำ	พอดี	ค่อนข้างนาโน
ไฮโดรเทอร์มัล	หลากหลาย	ค่อนข้างสูง	คล้ายแท่งเข็ม	สูงมาก	พอดี	นาโนหรือไมครอน

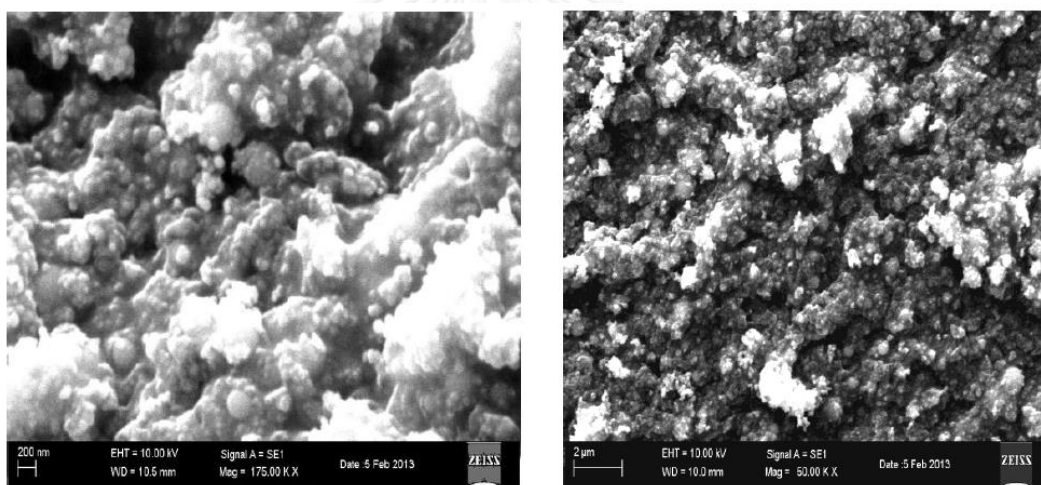
ดังนั้นวิธีการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันก็ส่งผลต่อคุณสมบัติและความสามารถในการเป็นตัวดูดซับของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่แตกต่างกันเช่นกัน โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการดูดซับโลหะหนักคอปเปอร์ไอออนบนไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ใช้วิธีในการสังเคราะห์ 2 วิธีด้วยกันได้แก่วิธีการตกตะกอน และวิธีการไฮโดรเทอร์มัลเป็นหลัก

2.2.1 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอน (precipitation method)

ในการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีจะใช้สารตั้งต้นที่มีส่วนประกอบของแคลเซียมและฟอสเฟต เช่น แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, CaO) [34] หรือแคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต (calcium nitrate tetrahydrate, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) [35] เป็นแหล่งที่มาของแคลเซียมไอออน และกรดออร์โทโรสฟอริก (orthophosphoric acid, H_3PO_4) [34] หรือไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (diammonium hydrogen phosphate, NH_4HPO_4) [35] เป็นแหล่งที่มาของฟอสเฟตไอออน แต่สำหรับการสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนจะใช้สารตั้งต้นเป็นกระดูกวัวหรือกระดูกควายแทนการใช้สารเคมีต่าง ๆ เนื่องจากในกระดูกวัวหรือกระดูกควายประกอบไปด้วยผลึกแคลเซียมฟอสเฟต (calcium phosphate, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) จำนวนหนึ่งจึงสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นแทนสารเคมีได้ ซึ่งข้อดีคือช่วยลดราคาต้นทุนในการสังเคราะห์ และสามารถนำของเสียคือกระดูกวัวหรือกระดูกควายกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ใหม่ได้ [33, 36, 37] โดยทั่วไปการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอนจะนำสารตั้งต้นมาผสมอย่างช้า ๆ และกวนผสมกับสารละลายกรดที่อุณหภูมิห้องจนได้สารละลายที่มีค่า pH ต่ำ จากนั้นจึงปรับ pH ให้สูงขึ้นด้วยสารละลายต่างอย่างรวดเร็วจึงได้สารแขวนลอย รอให้ตกตะกอนเป็นช่วงระยะหนึ่งแล้วค่อยล้างตะกอน กรอง อบแห้ง และบดละเอียดจึงได้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน [14, 33-35, 38, 39] ซึ่งเฟสองค์ประกอบของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จะมีค่าระดับความเป็นผลึกที่ค่อนข้างต่ำดังรูปที่ 2.3 [34] และมีสัญญาณวิหาคลายลักษณะกลม ดังรูปที่ 2.4 [35] ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จะมีความบริสุทธิ์และมีค่าอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสน้อยกว่า 1.67



รูปที่ 2.3 ระดับความเป็นผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน [24]

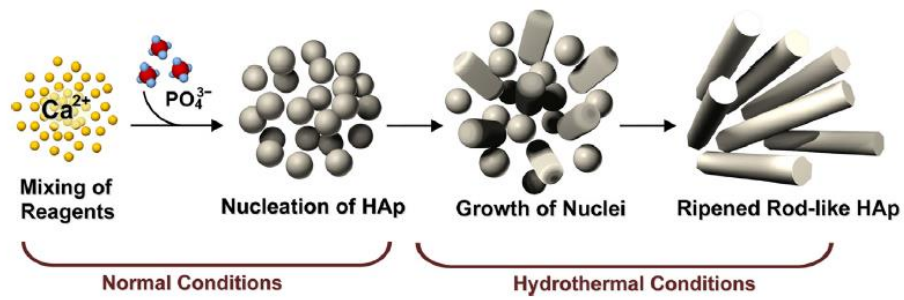


รูปที่ 2.4 สัณฐานวิทยาคล้ายลักษณะกลมของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน [35]

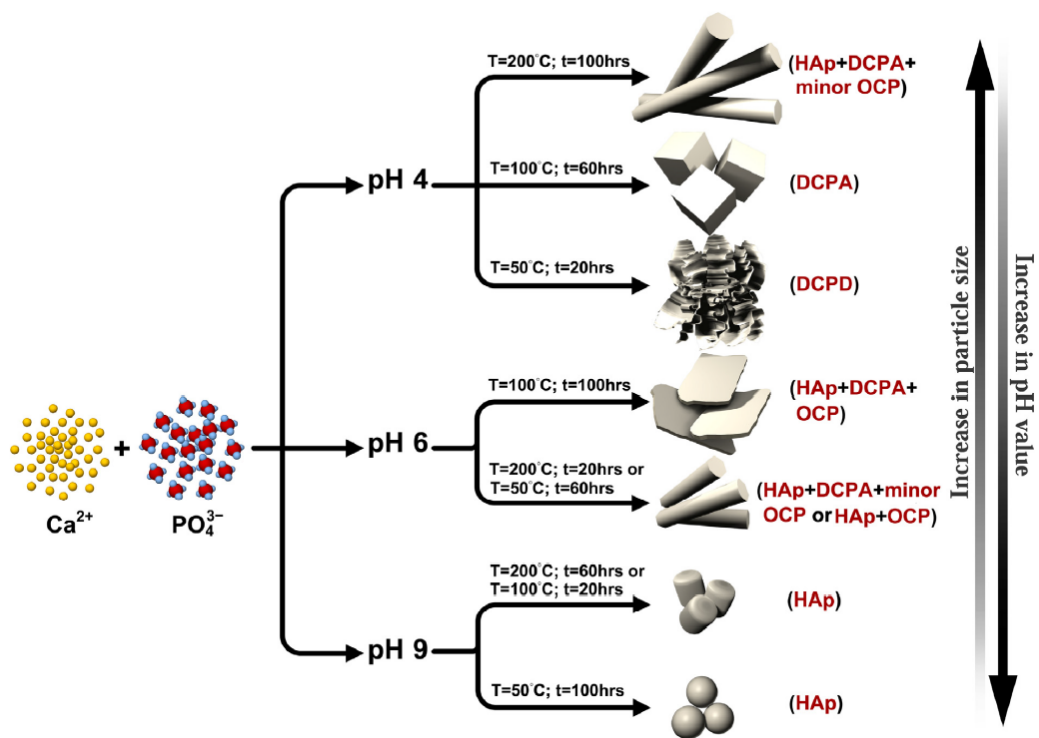
2.2.2 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal method)

การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลจะทำการบ่ม (aging) สารตั้งต้นที่อุณหภูมิและความดันสูงภายในอโตคลอป (autoclave) หรือหม้อความดัน (pressure vessel) โดยปกติจะใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเดือดของน้ำให้ได้ไฮดรอกซีอะพาไทต์มีการโตขึ้น 1 มิติ [14] ซึ่งขั้นตอนของการเปลี่ยนรูปร่างของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลจะประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนได้แก่ ขั้นตอนการเกิดนิวเคลียส (nucleation step)

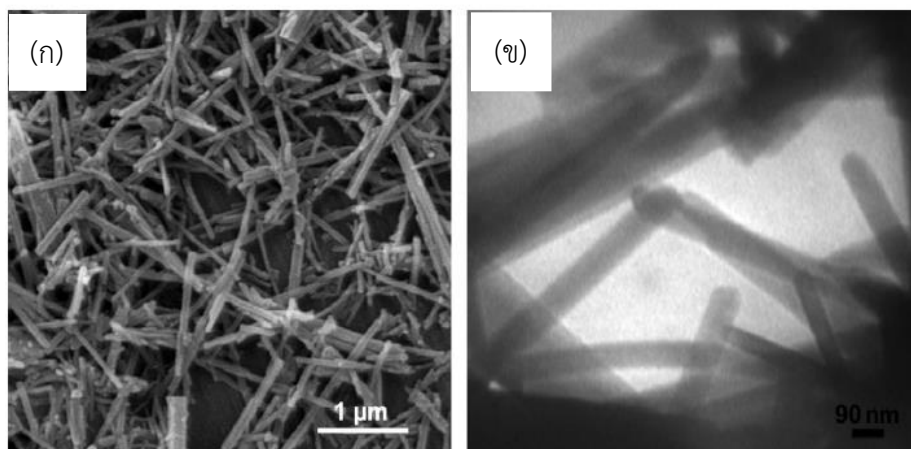
จะเกิดในระหว่างการทำปฏิกิริยาของประจุต่าง ๆ ของสารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้ซึ่งทำให้เกิดผลึกขนาดเล็กขึ้นจำนวนมาก และขั้นตอนต่อไปคือขั้นตอนการเติบโตของผลึก (growth step) เกิดในระหว่างการทำไฮโดรเทอร์มัลทำให้ผลึกขนาดเล็กจำนวนมากเกิดการโตขึ้นทั้งรูปร่างและขนาดโดยด้านที่มีการโตมากที่สุดคือด้านแกนซีทำให้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลมีลักษณะคล้ายเข็ม (needle-like) หรือเข็ม (whisker-like) ดังรูปที่ 2.5 [14, 40] โดยสรุปปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างและลักษณะของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลมากที่สุดคืออุณหภูมิระหว่างการทำไฮโดรเทอร์มัล เมื่อใช้อุณหภูมิสูง (มากกว่า 150 องศาเซลเซียส) จะทำให้ไฮดรอกซีอะพาไทต์มีระดับความเป็นผลึกที่สูงขึ้นและมีค่าอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสที่พอดี และอีกปัจจัยคือค่า pH ของสารเคมีที่ใช้สังเคราะห์ ซึ่งเมื่อค่า pH มีค่าสูงจะทำให้เกิดการโตของผลึกแบบไอโซโทรปิก (isotropic growth) หรือแอนไอโซโทรปิกอ่อน ๆ (weak-anisotropic growth) ทำให้ผลึกที่โตมีลักษณะค่อนข้างกลม แต่เมื่อลด pH ลงจะทำให้ผลึกเกิดการโตแบบแอนไอโซโทรปิก (anisotropic growth) ทำให้เกิดการโต 2 ลักษณะ คือ โตเพียง 1 มิติ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จะมีลักษณะแท่ง แต่ถ้าโต 2 มิติจะทำให้ได้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ลักษณะแผ่น [14] ดังรูปที่ 2.6 โดยมีงานวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลและพบว่าโครงสร้างของไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถยืดยาวขึ้นภายใต้สภาวะที่เป็นกรดหรือเป็นกลางทำให้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้มีลักษณะคล้ายแท่ง [40-42] และในปัจจุบันได้มีการศึกษการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลโดยการใช้สารตั้งต้นจากไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีการตกตะกอนแล้วจึงนำมาผ่านวิธีการไฮโดรเทอร์มัลต่อไป ซึ่งทำให้ได้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีค่าอัตราส่วนลักษณะ (aspect ratio) สูงและเป็นวิธีที่สังเคราะห์ง่าย ลดต้นทุน นอกจากนี้ยังทำให้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้มีการกระจายตัวสูงเช่นกัน ดังรูปที่ 2.7 [43]



รูปที่ 2.5 2 กระบวนการเปลี่ยนรูปร่างของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล [14]



รูปที่ 2.6 ผลของ pH ต่อสัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยไฮโดรเทอร์มัล [44]



รูปที่ 2.7 สัณฐานวิทยาคล้ายลักษณะแท่งของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยไฮโดรเทอร์มัล [45]

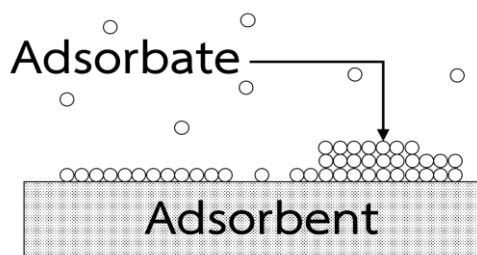
(ก) รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope)

(ข) รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope)

2.3 การดูดซับ (adsorption)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์การสะสมกันของอะตอมหรือโมเลกุลของสารต่าง ๆ บนพื้นผิวของซับสเตรต (substrate) ที่เป็นของเหลวหรือของแข็ง โดยกระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่อมีอะตอมหรือโมเลกุลของสารต่าง ๆ มาติดที่ผิวของซับสเตรตจะเกิดแรงดึงดูดและพันธะขึ้นซึ่งกันและกัน และการดูดซับจะแตกต่างจากการดูดซึม (absorption) เนื่องจากการดูดซึมจะเกิดการแพร่ของสารเข้าไปในเนื้อของซับสเตรตแต่การดูดซับจะเกิดขึ้นที่ผิวเท่านั้น โดยการเกิดทั้งสองกระบวนการพร้อมกันเรียกว่าการซัพ (sorption) ในกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการทางกายภาพชีวภาพ และเคมีที่มีการสะสมกันของอะตอมหรือโมเลกุลบนพื้นผิว ซึ่งกระบวนการจะเกิดระหว่างพื้นผิว 2 ภูมิภาค เช่น ของเหลวกับของเหลว ของเหลวกับของแข็ง และก๊าซกับของแข็ง เป็นต้น องค์ประกอบของการดูดซับแบ่งเป็น 2 องค์ประกอบหลักได้แก่ ตัวดูดซับ (adsorbent) คือซับสเตรตที่ทำหน้าที่เป็นผิวที่เกิดการดูดซับ และตัวถูกดูด (adsorbate) คืออะตอมหรือโมเลกุลต่าง ๆ ที่มาสะสมกันบนผิวของตัวดูดซับ ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งการดูดซับระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างสององค์ประกอบ โดยแรงดึงดูดสามารถเกิดได้ทั้งแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) แรงทางเคมี หรือพันธะเคมี (chemical bond) เป็นต้น

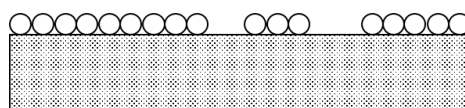
จากลักษณะแรงดึงดูดต่าง ๆ ของการดูดซับระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูด จึงสามารถแบ่งกระบวนการดูดซับได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) และการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) [46, 47]



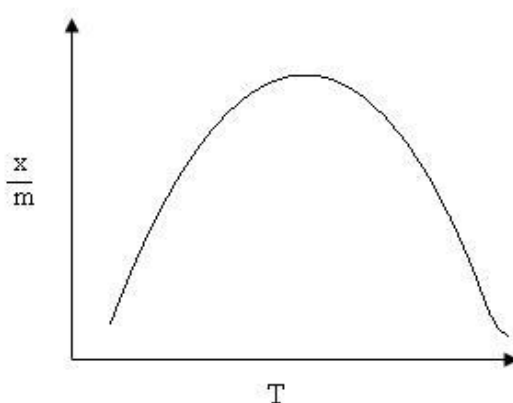
รูปที่ 2.8 ลักษณะของกระบวนการดูดซับของตัวถูกดูด (adsorbate) บนตัวดูดซับ (adsorbent)

2.3.1 การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption)

คือการดูดซับที่มีแรงทางเคมีหรือพันธะเคมีถือเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่สูง ช่วยดึงดูดตัวดูดซับกับตัวถูกดูดได้ดี เนื่องจากการสร้างพันธะไอออนิก (Ionic bond) หรือโคเวเลนต์ (Covalent bond) ขึ้นที่ผิวหน้าของตัวดูดซับและตัวถูกดูด ซึ่งจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวหน้าเพียงชั้นเดียวเท่านั้น (monolayer adsorption) ดังรูปที่ 2.9 ปฏิกริยาการดูดซับทางเคมีจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นอยู่ในช่วง -40 ถึง -1000 กิโลจูลต่อโมล และการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ทุกอุณหภูมิดังรูปที่ 2.10 แต่โมเลกุลที่ถูกดูดซับอาจจะถูกดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงอุณหภูมิแคบ ๆ เท่านั้น ซึ่งความสามารถในการดูดซับทางเคมีจะเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ ๆ หนึ่งความสามารถในการดูดซับจึงเริ่มลดลง [46, 47]



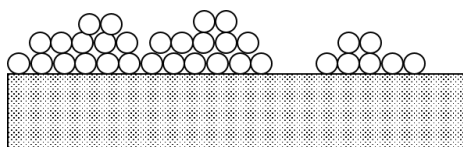
รูปที่ 2.9 การดูดซับที่ผิวหน้าเพียงชั้นเดียว (monolayer adsorption)



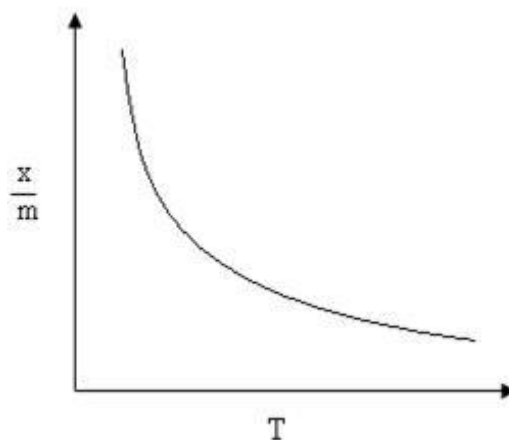
รูปที่ 2.10 กราฟระหว่างอุณหภูมิ (T) และปริมาณการดูดซับ ($\frac{x}{m}$) ของการดูดซับทางเคมี โดย x แทนจำนวนตัวถูกดูด และ m แทนจำนวนตัวดูด [47]

2.3.2 การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption)

คือการดูดซับเนื่องจากแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวแบบอ่อน ๆ และไม่มีการสร้างพันธะทางเคมีขึ้น ซึ่งการดูดซับแบบนี้อาจเกิดจากการดูดซับในรูพรุน หรือบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับ หรือระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งการดูดซับทางกายภาพจะเกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับเป็นส่วนมาก ดังนั้นจึงทำให้เกิดการดูดซับได้หลายชั้นไม่รู้จบ (multilayer adsorption) ดังรูปที่ 2.11 จึงทำให้การดูดซับทางกายภาพเป็นปฏิกิริยาที่เกิดความร้อนน้อยกว่าการดูดซับทางเคมีโดยมีความร้อนในช่วง -10 ถึง -40 กิโลจูลต่อโมล และการดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของตัวถูกดูดซับเท่านั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ดังรูปที่ 2.12 [47]



รูปที่ 2.11 การดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption)



รูปที่ 2.12 กราฟระหว่างอุณหภูมิ (T) และปริมาณการดูดซับ ($\frac{x}{m}$) ของการดูดซับทางกายภาพ โดย x แทนจำนวนตัวถูกดูด และ m แทนจำนวนตัวดูด [47]

2.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherms)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับคือรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายปฏิกิริยาการดูดซับของตัวถูกดูดซับที่อยู่ในสถานะของเหลวมีการกระจายตัวอยู่บนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งรูปแบบดังกล่าวเป็นการทำนายกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นได้อย่างน่าเชื่อถือและสามารถเปรียบเทียบให้เห็นถึงปริมาณการดูดซับของกระบวนการดูดซับประเภทต่าง ๆ โดยไอโซเทอร์มของการดูดซับจะแสดงผลในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับและความเข้มข้นของสารละลายที่ถูกดูดซับจนถึงจุดสมดุล โดยปฏิกิริยาต้องเกิดขึ้น ณ อุณหภูมิคงที่อุณหภูมิหนึ่ง และค่าที่นำมาวาดกราฟคือค่าที่ได้มาจากการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ความเข้มข้นต่าง ๆ รูปแบบไอโซเทอร์มที่นิยมนำมาศึกษาเพื่ออธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นจำนวนมากและนำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) [18, 23, 25, 48]

2.4.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

รูปแบบไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์สามารถนำมาใช้ในการอธิบายการดูดซับได้ในช่วงความเข้มข้นต่ำ โดยรูปแบบของแลงเมียร์มีสมมติฐานที่สำคัญคือ

- (1) การดูดซับจะบนพื้นผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียวเท่านั้น ไม่มีการซ้อนทับกันของอะตอมหรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในชั้นถัด ๆ ไป

- (2) การดูดซับจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่แน่นอนบนผิวของตัวดูดซับ และตำแหน่งบนตัวดูดซับสามารถดูดซับตัวถูกดูดได้เพียง 1 โมเลกุลเท่านั้น ไม่มีการเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของตัวถูกดูดบนผิวของตัวดูดซับ
- (3) กลไกหรือปฏิกิริยาการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับจะเหมือนกันทั้งหมดทุกตำแหน่ง และพลังงานในการดูดซับจะเท่ากันทุกตำแหน่ง (homogeneous adsorbent surface)

โดยไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์มีรูปแบบเป็นสมการเส้นตรงที่สามารถอธิบายดังสมการที่ 2.1

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{q_m K_L} \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

โดย C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q_m คือ จำนวนตัวถูกดูดซับที่มากที่สุดที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_L คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

q_e คือ จำนวนตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.2

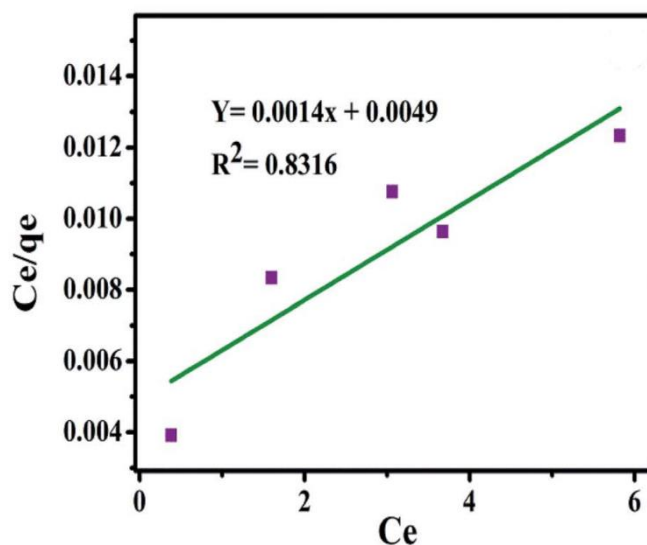
$$q_e = (C_0 - C_e) \times \frac{V}{m} \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

โดย C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V คือ ปริมาตรของสารละลายของตัวถูกดูดซับ (ลิตร)

m คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

จากสมการที่ 2.1 สามารถนำค่า $\frac{C_e}{q_e}$ และ C_e มาสร้างเป็นกราฟสมการเส้นตรง เพื่อหาค่า q_m และ K_L จากความชันและจุดตัดแกน y ของเส้นแนวโน้มเชิงเส้นของสมการเส้นตรง ดังรูปที่ 2.13 สำหรับค่า q_m คือจำนวนตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนผิวตัวดูดจะแสดงให้เห็นถึงขีดจำกัดความสามารถในการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ และ K_L คือค่าคงที่แลงเมียร์จะสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ [1, 2, 23, 25, 48-50]



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างกราฟแสดงไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ [18]

2.4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm)

รูปแบบไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิชนำไปใช้อธิบายการดูดซับในช่วงความเข้มข้นที่กว้างขึ้น โดยรูปแบบของฟรอนด์ลิชมีสมมติฐานที่สำคัญคือ

- (1) การดูดซับไม่ได้เกิดที่ผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียวเท่านั้น แต่สามารถเกิดปกคลุมที่ผิวของตัวดูดซับได้อย่างต่อเนื่อง โดยอะตอมหรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับสามารถซ้อนทับกันเองในชั้นถัด ๆ ไปได้ หรือเรียกว่าการดูดซับที่ผิวแบบหลายชั้น
- (2) กลไกหรือปฏิกิริยาการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับแต่ละตำแหน่งจะไม่เหมือนกันและพลังงานในการดูดซับบนผิวดูดซับแต่ละบริเวณจะมีค่าไม่เท่ากัน (heterogeneous adsorbent surface)

โดยไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิชมีรูปแบบเป็นสมการเส้นตรงที่สามารถอธิบายดังสมการที่ 2.3

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

โดย C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_F คือ ค่าคงที่ฟรอนด์ลิช (มิลลิกรัมต่อกรัม)

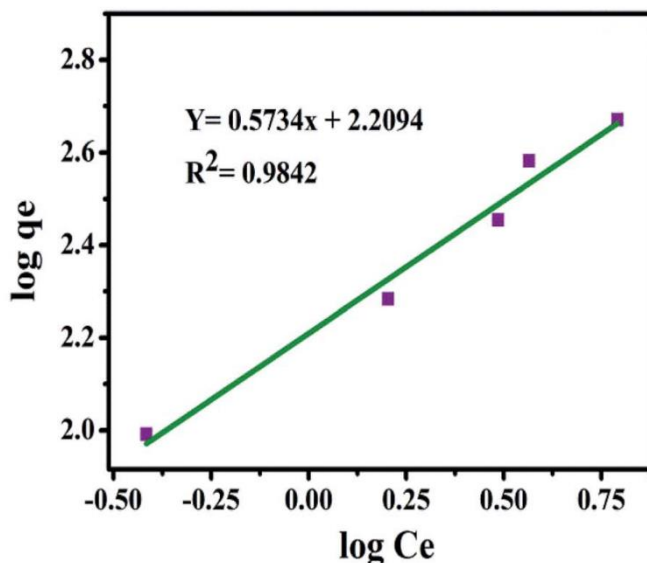
n คือ ความเข้มของการดูดซับตัวถูกดูด (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

q_e คือ จำนวนตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.2

เมื่อนำสมการที่ 2.3 มาใส่ลอการิทึมลงไปจะทำให้ได้สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนดลิชอยู่ในรูปของสมการเส้นตรง ดังสมการที่ 2.4

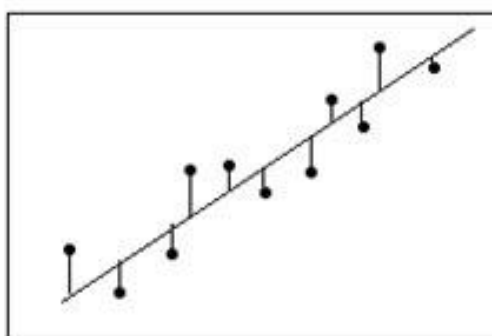
$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad \text{สมการที่ 2.4}$$

จากสมการที่ 2.4 สามารถนำมาค่า $\log C_e$ และ $\log q_e$ สร้างเป็นกราฟสมการเส้นตรง ดังรูปที่ 2.14 ค่า $\frac{1}{n}$ และ K_F สามารถคำนวณได้จากความชันและจุดตัดแกน y ของเส้นแนวโน้มเชิงเส้นของสมการเส้นตรง ตามลำดับ โดยค่า K_F คือ ค่าคงที่ฟรอนดลิชแสดงถึงความสามารถในการดูดซับที่มากที่สุดของตัวดูดซับ และถ้าค่า $\frac{1}{n}$ มีค่าน้อยกว่า 1 จะแสดงให้เห็นว่ากลไกหรือปฏิกิริยาการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับแต่ละตำแหน่งจะต่างกันและพลังงานในการดูดซับบนผิวดูดซับแต่ละบริเวณจะมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อ $\frac{1}{n}$ มีค่าสูงขึ้นแต่ไม่เกิน 1 ก็จะทำให้ที่ผิวของตัวดูดซับมีกลไกและพลังงานในการดูดซับแต่ละตำแหน่งต่างกันมากขึ้น เมื่อคำนวณค่า $\frac{1}{n}$ กลับเป็นค่า n หรือค่าความแข็งแรงในการดูดซับจะสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อค่า n มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าการดูดซับตัวถูกดูดซับที่ความเข้มข้นสูงจะเกิดขึ้นได้ไม่ดี แต่ถ้าค่า n มีค่าน้อยกว่าหรือใกล้ 1 แสดงว่าตัวดูดซับสามารถดูดซับตัวถูกดูดซับที่ความเข้มข้นสูงได้ดี [18, 23-25, 48, 51]



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างกราฟแสดงไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิซ [18]

จากรูปที่ 2.13 และ 2.14 เมื่อได้กราฟสมการเส้นตรงจะทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (coefficient of determination, R-squared, R^2) คือค่าเปอร์เซ็นต์ความแปรผันของข้อมูลที่ได้เทียบกับเส้นตรงของสมการไอโซเทอร์มทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ และสามารถตีความหมายได้ว่าไอโซเทอร์มทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลมากน้อยเพียงใด โดยค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจหาได้จากการคำนวณระยะห่างระหว่างจุดแต่ละจุดที่ได้มาจากการทดลองและเส้นตรงแนวโน้มที่ได้มาจากการสมการเส้นตรงที่จะทำให้มีค่าระยะห่างระหว่างเส้นตรงและจุดข้อมูลแต่ละจุดโดยรวมมีค่าน้อยที่สุด ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การหาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ

จากการคำนวณระยะห่างระหว่างจุดและเส้นตรงแนวโน้ม [52]

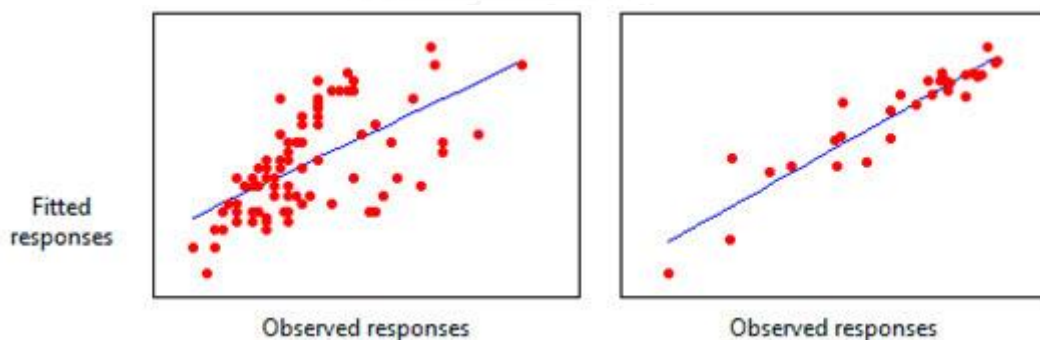
สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจทางทฤษฎีสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$R^2 = \frac{\text{ความแปรผันที่สามารถอธิบายได้ (explained variation)}}{\text{ความแปรผันทั้งหมด (total variation)}} \quad \text{สมการที่ 2.5}$$

ซึ่งจากการคำนวณทำให้ผลลัพธ์มีค่าอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ระหว่าง 0 เปอร์เซ็นต์ ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ โดย

- (1) 0 เปอร์เซ็นต์ หมายถึงไอโซเทอร์มทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไม่เหมาะสมกับข้อมูล ไม่สามารถนำมาอธิบายกับความผันแปรของตัวแปรตอบสนองต่าง ๆ ที่กระจายรอบค่าเฉลี่ยได้
- (2) 100 เปอร์เซ็นต์ หมายถึงไอโซเทอร์มทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูล และสามารถนำมาอธิบายกับความผันแปรของตัวแปรตอบสนองต่าง ๆ ที่กระจายรอบค่าเฉลี่ยได้ดี

ตัวอย่างแผนภาพที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ต่างกัน ดังรูปที่ 2.16 โดยไอโซเทอร์มทางคณิตศาสตร์ด้านซ้ายมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 38 เปอร์เซ็นต์ และด้านขวามีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 87.4 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่าเปอร์เซ็นต์ที่มีค่ามาก เนื่องจากข้อมูลการทดลองที่ได้อยู่บนเส้นตรงของสมการไอโซเทอร์มทางคณิตศาสตร์มาก และถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์แสดงว่าข้อมูลการทดลองที่ได้จะอยู่บนเส้นตรงของสมการไอโซเทอร์มทางคณิตศาสตร์ทุกจุด [52]



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างแผนภาพที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ต่างกัน [52]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Reviews)

C. Stötzel และคณะได้ทำการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอนและนำไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้ไปเผาเพื่อนำมาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักต่าง ๆ ซึ่งอยู่ในรูปไอออนเช่น ตะกั่ว สังกะสี ยูเรเนียม อะลูมิเนียม และทองแดง เป็นต้น และพบว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ไม่ผ่านการเผาจะมีระดับความเป็นผลึกที่น้อยกว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผ่านการเผา นอกจากนี้ยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่า และเมื่อเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักต่าง ๆ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ไม่ผ่านการเผามีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้เป็นจำนวนมากมากกว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผ่านการเผา [26]

R. Bazargan-Lari และคณะได้ทำการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัวด้วยวิธีการเผาและนำมาใช้ในการดูดซับโลหะหนักทองแดงที่อยู่ในรูปคอปเปอร์ไอออนซึ่งพบว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถดูดซับคอปเปอร์ไอออนได้มากที่สุดที่ pH เป็นกลาง และไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กสามารถดูดซับคอปเปอร์ไอออนได้มากกว่าขนาดอนุภาคใหญ่แต่สามารถดูดซับคอปเปอร์ไอออนได้มากที่สุดเพียง 1.631 มิลลิโมลต่อกรัม ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับไอโซเทอร์มของการดูดซับรูปแบบต่าง ๆ พบว่าการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์จากกระดูกวัวด้วยวิธีการเผาเหมาะสมกับไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิชมากกว่าแลงเมียร์ [1]

S. Kongsri และคณะได้ทำการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกปลาด้วยวิธีการตกตะกอนและนำมาใช้ในการเปรียบเทียบการดูดซับโลหะหนักเซลีนียมในรูปเซลล์ไนด์ไอออนระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผ่านการสังเคราะห์, ไฮดรอกซีอะพาไทต์ทางการค้า, ไคโตซาน และกระดูกปลา ซึ่งพบว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผ่านการสังเคราะห์มีความสามารถในการดูดซับเซลล์ไนด์ไอออน (selenide ion, Se^{2-}) ดีที่สุด และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับไอโซเทอร์มของการดูดซับรูปแบบต่าง ๆ พบว่าการดูดซับเซลล์ไนด์ไอออนบนไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์จากกระดูกปลาด้วยวิธีการตกตะกอนเหมาะสมกับไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิชมากกว่าแลงเมียร์ [23]

G. Bharath และคณะได้ทำการสังเคราะห์สังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากสารเคมีด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัลโดยใช้สารซีทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyltrimethylammonium bromide, CTAB) เป็นสารลดแรงตึงผิว (surfactant) เพื่อทำให้เกิดนิวเคลียส และมีการโตของผลึก

ที่แกนซีใน 1 มิติด้วยอุณหภูมิระหว่างการไฮโดรเทอร์มัลจึงได้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีลักษณะเป็นแท่ง แล้วนำไปทำการดูดซับโลหะหนักตะกั่วในรูปของเหลวไอออน และนำไปเปรียบเทียบกับไอโซเทอร์ม การดูดซับรูปแบบต่าง ๆ พบว่าการดูดซับตะกั่วไอออนบนไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์จากสารเคมี ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลเหมาะสมกับไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนดิลิซมากกว่าแลงเมียร์ [18]

I. Mobasherpour และคณะได้สังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากสารเคมีด้วยวิธีการ ตกตะกอนและนำไปใช้ดูดซับโลหะหนักแคดเมียมไอออนในสารละลาย พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ เมื่อนำผลของการดูดซับไปเปรียบเทียบกับ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบต่าง ๆ พบว่าการดูดซับแคดเมียมไอออนบนไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์จากสารเคมีด้วยวิธีการตกตะกอนเหมาะสมกับไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์มากกว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบอื่น ๆ และจากผลวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผ่านการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมไอออนพบว่าการฟอร์มตัวของผลึกไพโรมอไฟต์ (Pyromorphite) ที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็น $\text{Ca}_{10-x}\text{Cd}_x(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ และเป็นการดูดซับที่มีความแข็งแรงทางพันธะมากกว่าการดูดซับแบบแลกเปลี่ยนไอออนทั่วไป [24]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

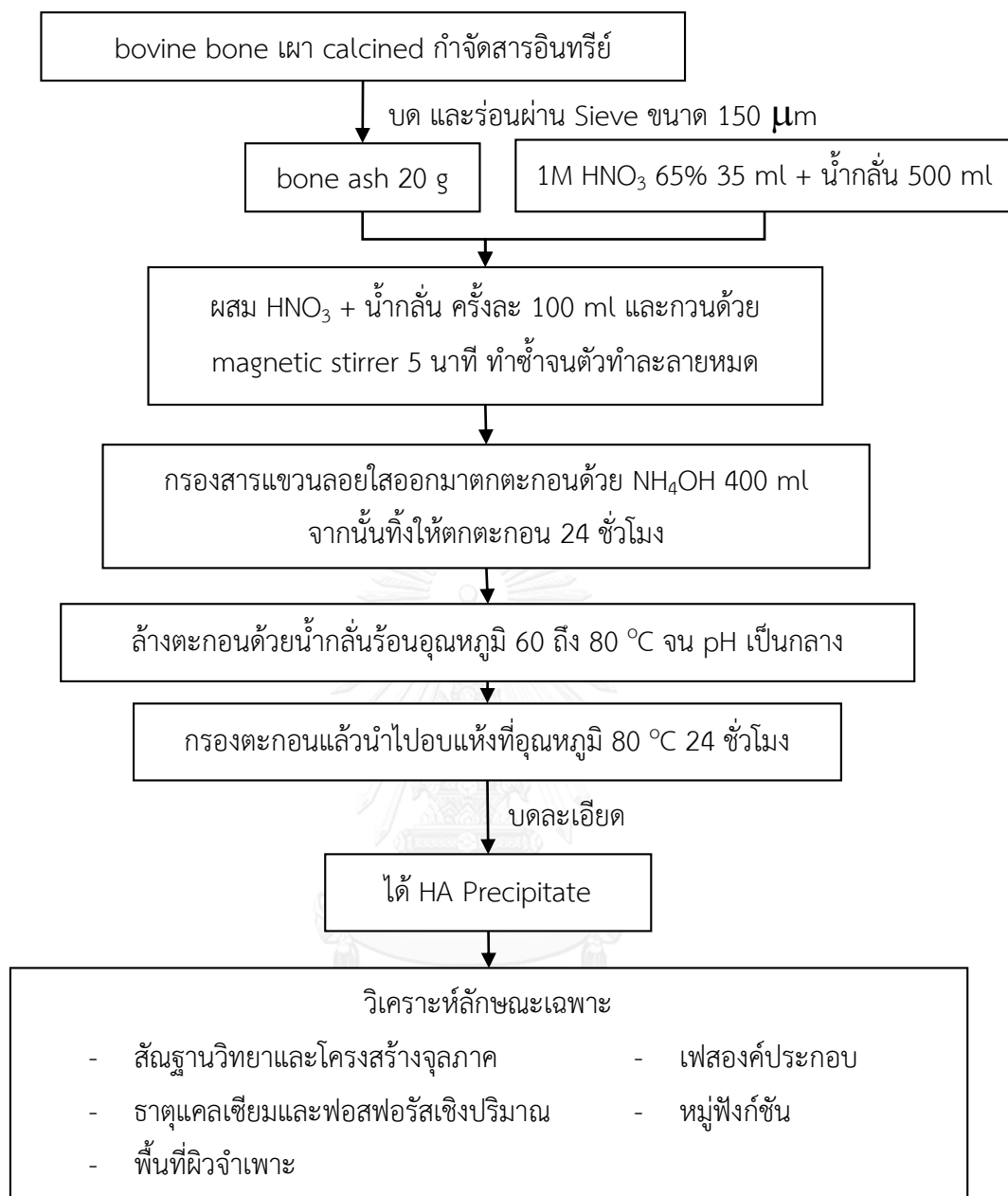
3.1 การสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอนและวิธีการไฮโดรเทอร์มัล

3.1.1 การเตรียมวัตถุดิบผงเถ้ากระดูกวัวเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์

นำกระดูกวัว (bovine bone) ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมงเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ แล้วนำไปบดให้ละเอียดและร่อนด้วยตะแกรกร่อน (sieve) ขนาด 150 ไมครอน จะได้ผงเถ้ากระดูกวัว (bone ash, BA) โดยสรุปขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ดังรูปที่ 3.1

3.1.2 การสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอน

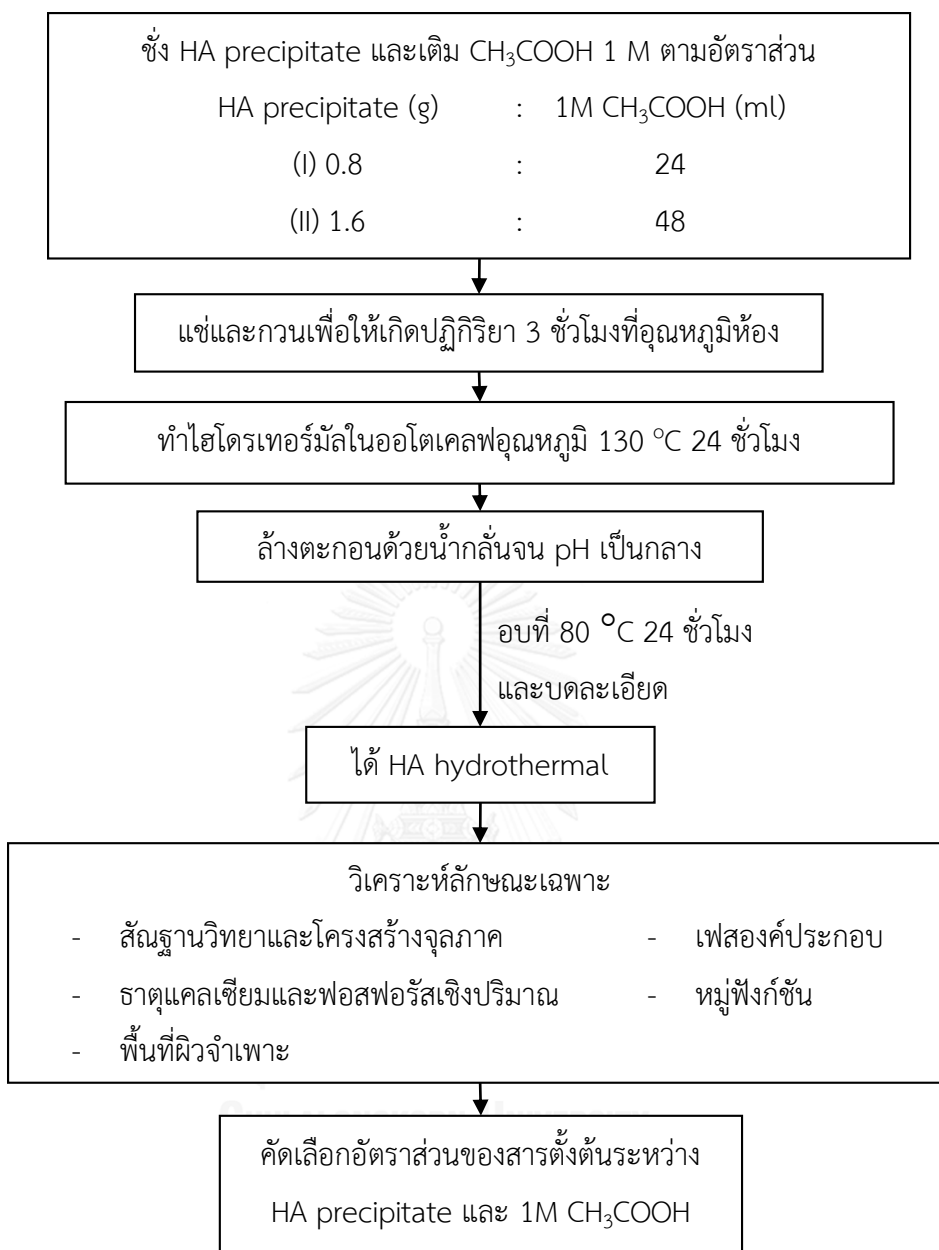
นำผงเถ้ากระดูกวัวไปผ่านกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation method) โดยชั่งผงเถ้ากระดูกวัว 20 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตรและนำไปกวนด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer) เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อช่วยให้ผงเถ้ากระดูกวัวกระจายตัวจนได้สารแขวนลอยขุ่นสีขาว แล้วจึงนำสารละลายกรดไนตริก 1 โมลาร์ (nitric acid, 1M HNO₃, 65%, QreC AR grade) 35 มิลลิลิตรที่ผสมกับน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตรใส่เข้าไปในสารแขวนลอยขุ่นสีขาวครึ่งละ 100 มิลลิลิตรและกวนเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมและจับเวลา 5 นาทีซึ่งจนกระทั่งกรดไนตริกที่ผสมน้ำกลั่นหมด จะทำให้สารแขวนลอยขุ่นสีขาวออกมาใส นำสารแขวนลอยใสที่ได้ไปผ่านเครื่องกรอง (suction pump) เพื่อแยกสารละลายใสออกมา จากนั้นเตรียมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ammonium hydroxide, NH₄OH, 30%, Panreac) ปริมาณ 400 มิลลิลิตรและกวนแรง ๆ ก่อนนำสารละลายใสที่กรองได้มาเทใสอย่างรวดเร็วเพื่อให้เกิดตะกอนขาวขุ่นขึ้นมาและทิ้งไว้เพื่อให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง แล้วจึงกรองตะกอนขาวขุ่นออกมาล้างด้วยน้ำกลั่นที่ต้มจนร้อนโดยควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 60 ถึง 80 องศาเซลเซียส รวจนตะกอนขาวขุ่นตกตะกอนลงมาถึงเทสารละลายใสส่วนบนทิ้ง และล้างตะกอนซ้ำจน pH เป็นกลาง จึงกรองตะกอนขาวขุ่นออกมาเพื่อนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสแล้วนำมาบดละเอียดจึงได้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน (hydroxyapatite precipitate, HA precipitate) ก่อนนำไปวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะต่าง ๆ โดยสรุปขั้นตอนการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอน ดังรูปที่ 3.1 [33]



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุดิบผงเอ็กกระดูกวัวเพื่อนำมาใช้ในการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ และขั้นตอนการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอน [33]

3.1.3 การสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล

เตรียมผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลโดยเริ่มจากการนำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนมาใช้เป็นสารตั้งต้นแล้วใช้วิธีการไฮโดรเทอร์มัลเพื่อปรับสัณฐานให้ได้ไฮดรอกซีอะพาไทต์แบบเข็ม โดยเริ่มจากเตรียมสารละลายกรดอะซิติก 1 โมลาร์ จากกรดอะซิติกเข้มข้น (acetic acid glacial, CH_3COOH , RCI Labscan AR grade) ปริมาตร 54 มิลลิลิตรผสมกับน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร และตวงออกมาผสมกับผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนตามอัตราส่วน ดังรูปที่ 3.2 โดยแช่และกวนด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็กเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงนำไปทำไฮโดรเทอร์มัลในอโตเคลฟปริมาตร 80 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง แล้วนำตะกอนออกมารอง และล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง ทิ้งให้ตกตะกอน จึงเทสารละลายใสส่วนบนทิ้ง ล้างตะกอนซ้ำจน pH เป็นกลาง จึงนำตะกอนไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง และบดละเอียด จะได้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล (hydroxyapatite hydrothermal, HA hydrothermal) ก่อนนำไปวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนของสารตั้งต้นได้แก่ ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและสารละลายกรดอะซิติก 1 โมลาร์ เพื่อให้ได้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่มีลักษณะเฉพาะเหมาะสมกับการนำไปศึกษาการเป็นตัวดูดซับคอปเปอร์ไอออน โดยสรุปขั้นตอนการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล ดังรูปที่ 3.2 [40]



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล [40]

3.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์จากสองวิธีการที่ต่างกัน

1) การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

การเตรียมตัวอย่างโดยนำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่างกันทำให้กระจายตัวโดยใส่ลงในเอทานอล (ethanol absolute, C_2H_5OH , 99.9%, Merck AR Grade) และนำไปแช่ในเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อทำให้อนุภาคกระจายตัวจึงนำมาหยดลงบนกระจกสไลด์ นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงนำไปแปะบนแท่นวางตัวอย่าง (stub) และฉาบด้วยทองก่อนนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL JSM 6480 LV) ใช้ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ และนำภาพโครงสร้างจุลภาคของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลมาคำนวณอัตราส่วนลักษณะ (aspect ratio) ของความยาวต่อความกว้างด้วยโปรแกรมเซ็มอะฟอว์ ซอฟต์แวร์รุ่น 5.21 (SemAfore 5.21)

2) การวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD)

นำตัวอย่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่างกันไปวิเคราะห์หาเฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (Bruker model D8) ซึ่งมี $Cu K\alpha$ เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่น 1.5406 อังสตรอม กำลังไฟ 40 มิลลิแอมแปร์ ความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์ ซึ่งรูปแบบดิฟแฟรกชันจะมีค่า 2θ ระหว่าง 5 ถึง 80 องศาและความเร็วในการวิเคราะห์เท่ากับ 0.02 องศาต่อวินาที

3) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared, FTIR)

การเตรียมตัวอย่างโดยการนำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่างกันบดผสมกับผงโพแทสเซียมโบรไมด์ (potassium bromide, KBr, ใช้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ปริมาณ 1 ถึง 5% ของปริมาณผงโพแทสเซียมโบรไมด์) และนำไปอัดขึ้นรูปให้เป็นแผ่นในแม่แบบ จากนั้นจึงนำไป

วิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (Thermo Scientific Nicolet 6700) เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่อยู่ในโครงสร้างของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่างกัน ซึ่งวิเคราะห์ที่ย่านความถี่ 4000-400 cm^{-1} (cm^{-1} เป็นหน่วยของเลขคลื่นหรือจำนวนลูกคลื่นต่อวินาที)

4) การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคบีอีที (Brunauer Emmett Teller, BET)

นำตัวอย่างของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่างกันไปวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ได้แก่ พื้นที่ผิวของอนุภาค ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และปริมาตรของรูพรุน ด้วยเทคนิคบีอีที (Micrometrics ASAP2020) โดยศึกษาการดูดซับของแก๊สไนโตรเจน (nitrogen gas, N_2) บนผิวและรูพรุนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่างกัน

5) การวิเคราะห์ธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสเชิงปริมาณด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครอานาลิซิส (electron probe micro analyzer, EPMA)

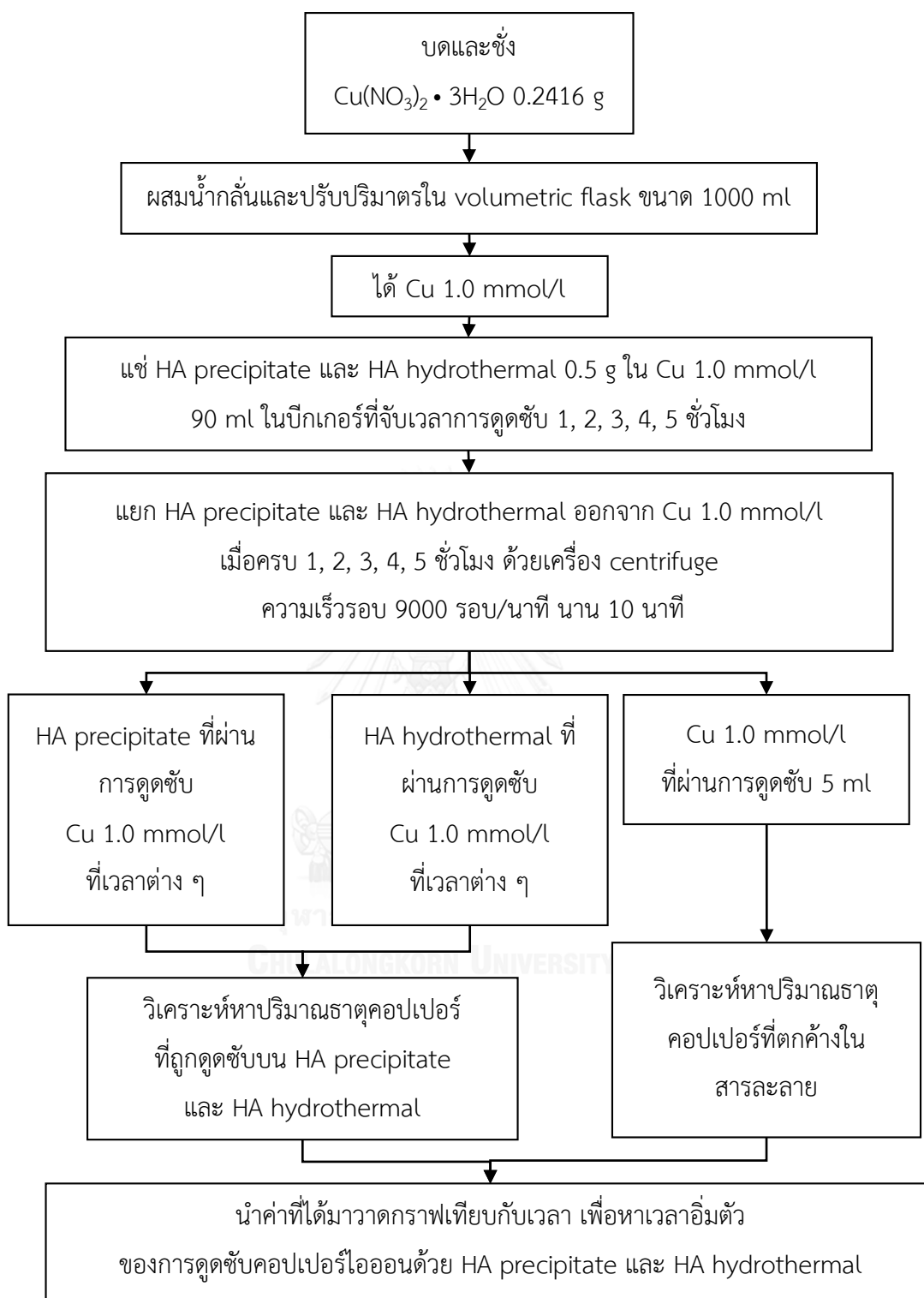
นำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกันโรยบนแผ่นเทปคาร์บอน (carbon tape) บนแท่นวางตัวอย่าง (stub) ก่อนนำไปปรับความดันภายในเครื่องมือ และวิเคราะห์ปริมาณธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครอานาลิซิส (JEOL model JXA 8100) ใช้ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ปริมาณผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ละ 5 ตำแหน่ง และนำค่าปริมาณธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส

3.2 การศึกษาการดูดซับคอปเปอร์ไอออนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน

3.2.1 การหาเวลาอิ่มตัวของ การดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน

เตรียมสารละลายคอปเปอร์ 1.0 มิลลิโมลต่อลิตร ($\text{Cu } 1.0 \text{ mmol/l}$) โดยบดสารคอปเปอร์ไนเตรตไตรไฮเดรต (copper nitrate tri-hydrate, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, AJAX AR Grade) และชั่งน้ำหนัก 0.2416 มิลลิกรัม แล้วนำมาผสมกับน้ำกลั่นในขวดเชิงปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 1000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายคอปเปอร์ 1.0 มิลลิโมลต่อลิตร จากนั้นชั่งน้ำหนักผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่างกัน 0.5 กรัมใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวนวิธีละ 5 ใบ แล้วเทสารละลายคอปเปอร์ไอออนปริมาณ 90 มิลลิลิตรลงไปและจับเวลาต่อไปจึงทำการแยกผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่างกันอย่างออกจากสารละลาย

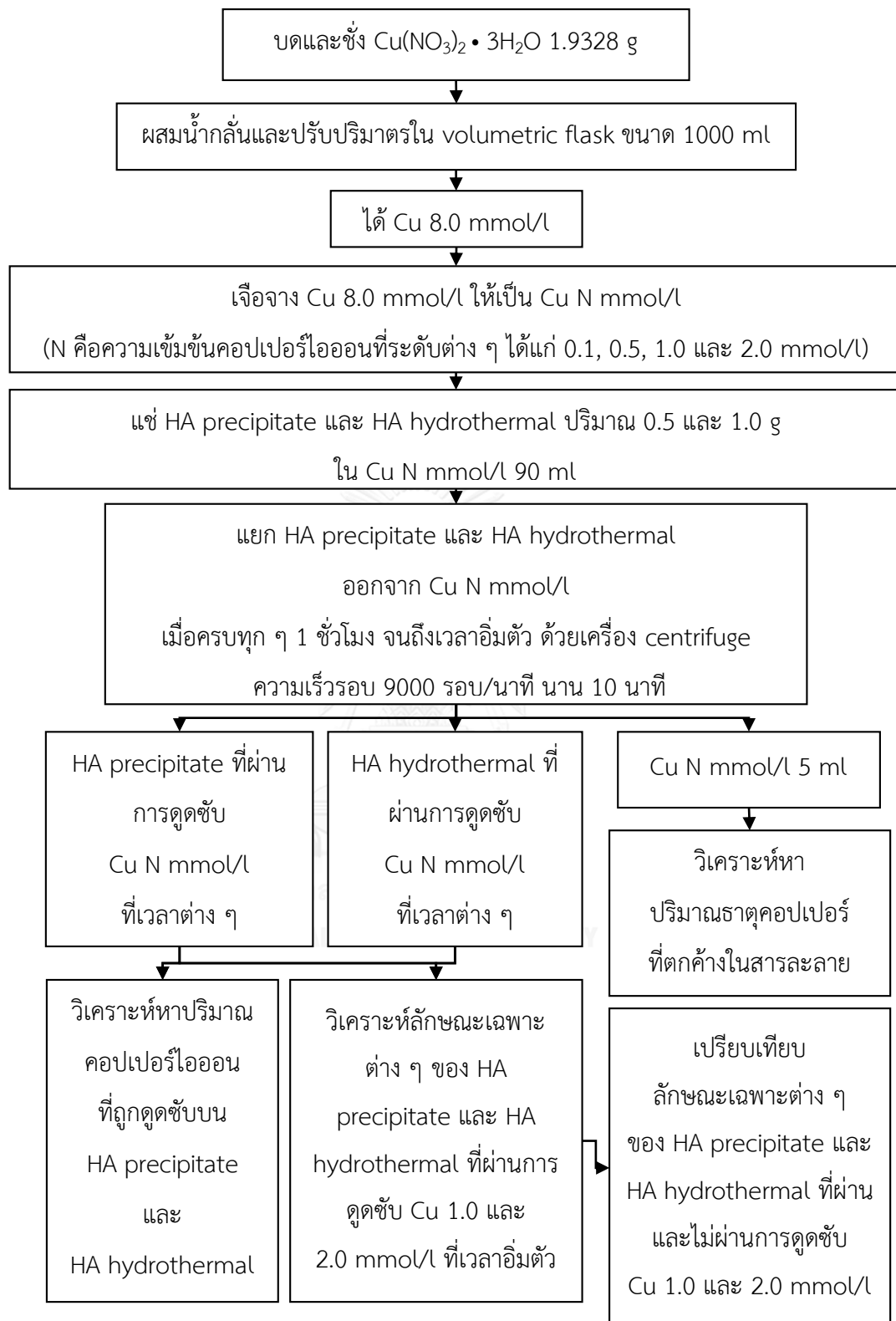
คอปเปอร์ เมื่อเวลาในการดูดซับผ่านไป 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงแยกตะกอน (centrifuge) โดยใช้สารละลายคอปเปอร์ไอออนในหลอดทดลอง 25 มิลลิลิตร จำนวน 3 หลอด ความเร็วรอบในการปั่น 9000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงดูดสารละลายคอปเปอร์ที่ผ่านกระบวนการดูดซับด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่างกัน 5 มิลลิลิตร ในแต่ละหลอดทดลอง และสารละลายคอปเปอร์ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการดูดซับ 5 มิลลิลิตร เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคอปเปอร์ที่ตกค้างในสารละลาย และแยกผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่างกันว่าผ่านการดูดซับสารละลายคอปเปอร์เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคอปเปอร์ที่ถูกดูดซับบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่างกัน จากนั้นจึงนำผลการดูดซับที่ได้ไปวาดกราฟปริมาณธาตุคอปเปอร์ที่ตกค้างในสารละลาย และกราฟปริมาณธาตุคอปเปอร์ที่ถูกดูดซับบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน โดยเทียบกับที่เวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง เพื่อหาเวลาที่อิ่มตัวของการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน โดยสรุปขั้นตอนการหาเวลาที่ใช้ในการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการหาเวลาอิมมัตว์ของการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน

3.2.2 การศึกษาการดูดซับคอปเปอร์ไอออนระดับความเข้มข้นต่าง ๆ บนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน

เมื่อสามารถหาเวลาอิ่มตัวในการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่าง ๆ ได้แล้ว จึงกำหนดให้เวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาในการนำผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วย 2 วิธีที่ต่างกันมาทำการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 0.1, 0.5, 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลต่อลิตร ซึ่งการเตรียมสารละลายคอปเปอร์ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ สามารถเตรียมจากบดและชั่งคอปเปอร์ไนเตรตไตรไฮเดรต 1.9328 กรัม มาผสมกับน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายคอปเปอร์ 8.0 มิลลิโมลต่อลิตร (Cu 8.0 mmol/L) แล้วทำการเจือจางลงมาให้เหลือระดับความเข้มข้นที่ต้องการ แช่ผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่าง ๆ 0.5 และ 1.0 กรัม ในสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ 90 มิลลิลิตร และจับเวลา ทุก ๆ 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการแยกผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ออกจากสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงแยกตะกอน โดยใส่สารละลายคอปเปอร์ในหลอดทดลอง 25 มิลลิลิตร จำนวน 3 หลอด ความเร็วรอบในการปั่น 9000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงดูดสารละลายคอปเปอร์ที่ผ่านกระบวนการดูดซับด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ 5 มิลลิลิตรในแต่ละหลอดทดลองด้วยหลอดดูด และแยกผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่ผ่านการดูดซับคอปเปอร์ไอออน ทำซ้ำทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนถึงเวลาอิ่มตัวของการดูดซับ จากนั้นนำสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการดูดซับด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน มาทำการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคอปเปอร์ที่ตกค้างในสารละลาย นำผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่ผ่านการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ มาทำการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคอปเปอร์ที่ถูกดูดซับบนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ และวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่ผ่านการดูดซับคอปเปอร์ไอออน 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลต่อลิตรที่เวลาอิ่มตัว เพื่อหาความแตกต่างของลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่ผ่านและไม่ผ่านการดูดซับคอปเปอร์ไอออน โดยสรุปขั้นตอนการศึกษาการดูดซับคอปเปอร์ไอออนระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการศึกษาการดูดซับคอปเปอร์ไอออนที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ บนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน

3.2.3 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคอปเปอร์ในสารละลายคอปเปอร์ที่ผ่านการดูดซับด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน

- 1) การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคอปเปอร์ในสารละลายที่ผ่านการดูดซับด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกันด้วยเทคนิคอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมาแมสสเปคโตรเมตรี (inductively coupled plasma – mass spectrometry, ICP-MS)

นำสารละลายคอปเปอร์ที่ผ่านกระบวนการดูดซับด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน 5 มิลลิลิตรไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคอปเปอร์ที่ตกค้างในสารละลายและนำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกันที่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคอปเปอร์ที่ถูกดูดซับด้วยเทคนิคอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมาแมสสเปคโตรเมตรี (PerkinElmer NexION@300Q)

3.2.4 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกันที่ผ่านการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลาย

- 1) การวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD)

นำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกันที่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายความเข้มข้น 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลต่อลิตรไปวิเคราะห์หาเฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (Bruker Model D8) ซึ่งมี Cu K α เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่น 1.5406 อังสตรอม กำลังไฟ 40 มิลลิแอมแปร์ ความต่างศักย์ 40 กิโลโวลท์ ซึ่งรูปแบบดิฟแฟรกชันจะมีค่า 2Theta ระหว่าง 5 ถึง 80 องศา และความเร็วในการวิเคราะห์เท่ากับ 0.02 องศาต่อวินาที และนำผลที่ได้มาเทียบความแตกต่างกับผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกันที่ไม่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลาย

- 2) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared, FTIR)

การเตรียมตัวอย่างโดยการนำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกันที่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายความเข้มข้น 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลต่อลิตรบดผสม

กับผงโพแทสเซียมโบรไมด์ (Potassium Bromide, KBr, ใช้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ปริมาณ 1-5% ของปริมาณผงโพแทสเซียมโบรไมด์) และนำไปอัดขึ้นรูปให้เป็นแผ่นในแม่แบบ จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (Thermo Scientific Nicolet 6700) เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่อยู่ภายในโครงสร้างของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่างกันในกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลาย ซึ่งวิเคราะห์ที่ย่านความถี่ 4000-400 cm^{-1} และนำผลที่ได้มาเทียบความแตกต่างกับผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกันที่ไม่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลาย

3) การวิเคราะห์การปนเปื้อนของคอปเปอร์ไอออนบนพื้นผิวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกันด้วยเทคนิคแผนภาพอิเล็กทรอนิกส์ (electron probe micro analyzer - mapping, EPMA-Mapping)

นำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกันที่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายความเข้มข้น 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลต่อลิตรโรยบนแผ่นเทปคาร์บอนบนพื้นวางตัวอย่าง และนำไปปรับความดันภายในเครื่องมือ ก่อนนำไปวิเคราะห์การปนเปื้อนของคอปเปอร์ไอออนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคแผนภาพอิเล็กทรอนิกส์ (JEOL model JXA 8100) ใช้ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 250 เท่า

3.2.5 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายความเข้มข้นต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน 0.5 กรัม

1) รูปแบบแลงเมียร์ (Langmuir model)

การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับรูปแบบแลงเมียร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{q_m K_L} \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

โดย C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของคอปเปอร์ไอออนในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q_m คือ จำนวนคอปเปอร์ไอออนที่มากที่สุดที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_L คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

q_e คือ จำนวนคอปเปอร์ไอออนที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.2

$$q_e = (C_0 - C_e) \times \frac{V}{m} \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

โดย C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของคอปเปอร์ไอออนในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V คือ ปริมาตรของสารละลายคอปเปอร์ไอออน (ลิตร)

m คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

จากสมการที่ 3.1 สามารถนำมาสร้างเป็นกราฟสมการเส้นตรงระหว่างค่า $\frac{C_e}{q_e}$ และ C_e โดยค่า q_m จะแสดงให้เห็นถึงขีดจำกัดความสามารถในการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผิวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน ซึ่งค่า q_m และ K_L สามารถคำนวณได้จากความชันและจุดตัดแกน y ของเส้นแนวโน้มเชิงเส้นของสมการเส้นตรง ตามลำดับ

2) รูปแบบฟรุนดลิช (Freundlich model)

การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับรูปแบบฟรุนดลิชสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad \text{สมการที่ 3.3}$$

โดย K_F คือ ค่าคงที่ฟรุนดลิช (มิลลิกรัมต่อกรัม)

n คือ ความเข้มของการดูดซับคอปเปอร์ไอออน (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

จากสมการที่ 3.3 สามารถนำมาสร้างเป็นกราฟสมการเส้นตรงระหว่างค่า $\log C_e$ และ $\log q_e$ โดยค่า $\frac{1}{n}$ และ K_F สามารถคำนวณได้จากความชันและจุดตัดแกน y ของเส้นแนวโน้มเชิงเส้นของสมการเส้นตรง ตามลำดับ

เมื่อสามารถสร้างกราฟจากสมการเส้นตรงของรูปแบบแลงเมียร์และรูปแบบฟรุนดลิชได้จึงสามารถนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (coefficient of determination, R-squared, R^2) ได้

บทที่ 4

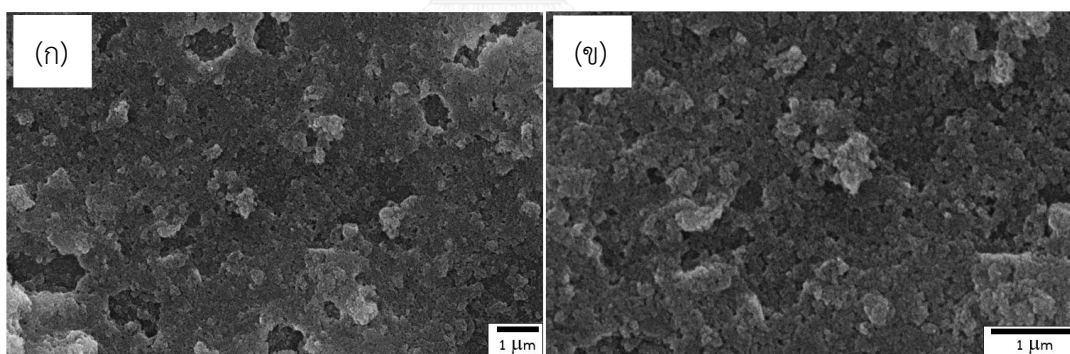
ผลการดำเนินงานวิจัย และการอภิปรายผล

4.1 ผลของการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน (HA precipitate) และไฮโดรเทอร์มัล (HA hydrothermal)

4.1.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและโครงสร้างจุลภาคของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ เทียบกับสารตั้งต้นผงเถ้ากระดูกวัว

1) ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน

ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน ดังรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคหลักของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนคล้ายลักษณะกลมและมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร ไม่มีโครงสร้างผลึกที่ชัดเจน มีการเกาะกลุ่มรวมกันของอนุภาคหลักที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรและด้วยขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรจึงทำให้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง



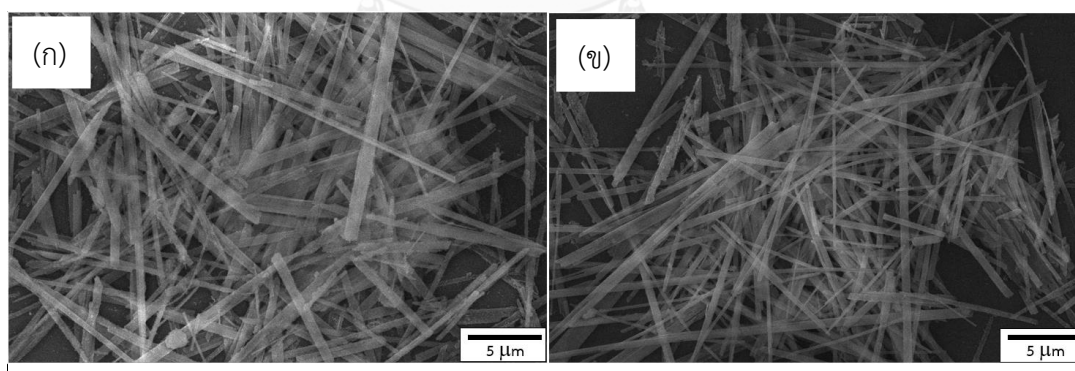
รูปที่ 4.1 สัณฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน

ที่กำลังขยาย (ก) 10,000 เท่า (ข) 20,000 เท่า

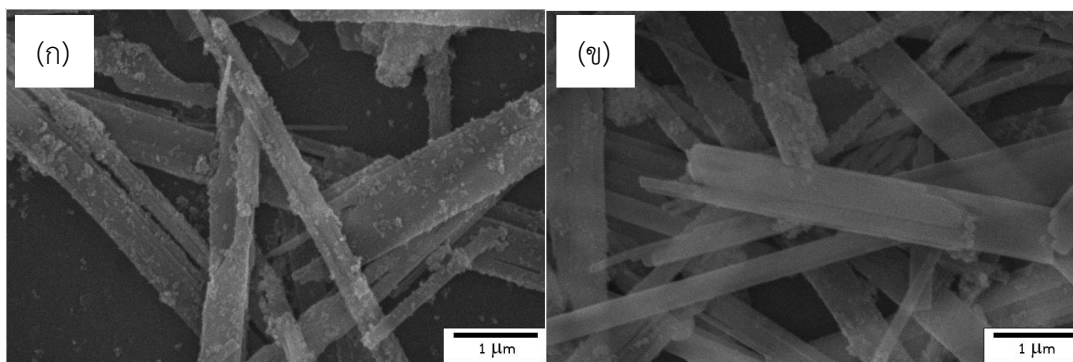
2) ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่อัตราส่วนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนต่อสารละลายกรดอะซิติก 1 โมลาร์ (HA precipitate : CH_3COOH 1 mmol) ต่าง ๆ พบว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์

ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่ได้ในทุกอัตราส่วนมีอนุภาคเป็นลักษณะเข็มที่มีการโตของผลึก 1 มิติในแนวแกนซี (c-axis) ดังรูปที่ 4.2 เนื่องจากภาวะความเป็นกรดในขณะสังเคราะห์ [40] และในขณะเดียวกันผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลทุกอัตราส่วนยังสามารถตรวจพบอนุภาคลักษณะกลมของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนที่ยังไม่มีการโตของผลึกดังรูปที่ 4.3 แต่เมื่อปรับอัตราส่วนเพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคลักษณะกลมเริ่มลดลง มีอนุภาคลักษณะเข็มมากขึ้น และอนุภาคลักษณะเข็มมีความยาวแกนซีมากขึ้น มีขนาดอนุภาคเล็กลง ดังรูปที่ 4.3 (ข) เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของกรดอะซิติกจาก 24 มิลลิลิตรเป็น 48 มิลลิลิตรจะทำให้ปริมาตรของสารละลายภายในอโตเคลฟเพิ่มขึ้น ช่วยลดที่ว่างภายในอโตเคลฟ ในขณะที่ไฮโดรเทอร์มัลความดันไอในอโตเคลฟที่มีกรดอะซิติก 48 มิลลิลิตรจึงสูงกว่าอโตเคลฟที่มีกรดอะซิติก 24 มิลลิลิตรและที่ว่างภายในอโตเคลฟที่มีกรดอะซิติก 48 มิลลิลิตรจึงน้อยกว่าทำให้อุณหภูมิเกิดการตกผลึกกลับมาเป็นลักษณะเข็มได้มากกว่า ดังนั้นอัตราส่วนในการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่ใช้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน 1.6 กรัมต่อสารละลายกรดอะซิติก 1 โมลาร์ 48 มิลลิลิตร จึงทำให้อัตราส่วนที่มีลักษณะเข็มปริมาณมากกว่า ดังตารางที่ 4.1 และจากอัตราส่วนดังกล่าวอนุภาคลักษณะเข็มที่ได้มีอัตราส่วนลักษณะ (aspect ratio) อยู่ในช่วงระหว่าง 19 ถึง 38 [53]



รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่มีอัตราส่วนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนต่อสารละลายกรดอะซิติก 1 โมลาร์ต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า (ก) 0.8 กรัม ต่อ 24 มิลลิลิตร (ข) 1.6 กรัม ต่อ 48 มิลลิลิตร



รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่มีอัตราส่วนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนต่อสารละลายกรดอะซีติก 1 โมลาร์ต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า (ก) 0.8 กรัม ต่อ 24 มิลลิลิตร (ข) 1.6 กรัม ต่อ 48 มิลลิลิตร

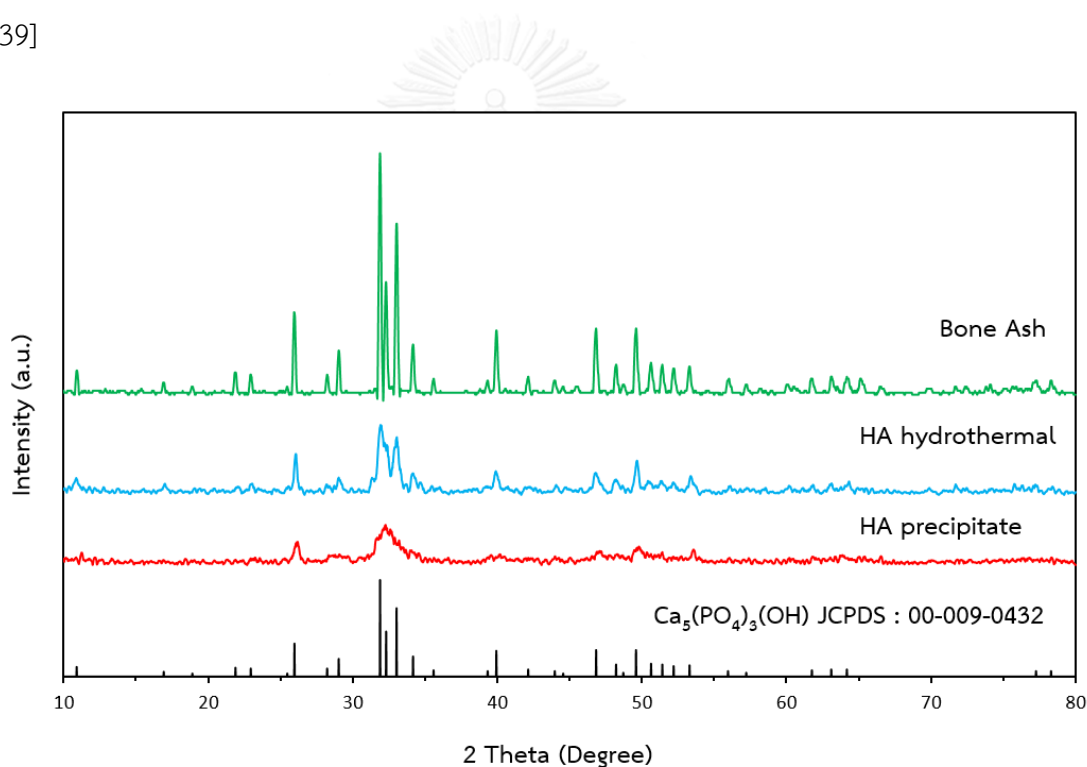
ตารางที่ 4.1 สรุปอัตราส่วนที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล

ปริมาณ HA precipitated (g)	ปริมาณ CH ₃ COOH 1 M (ml)	ปริมาณ Hydrothermal HA ที่ได้ (g)	%Yield
0.8	24	0.1465	18.31
1.6	48	0.5303	33.14

4.1.2 เฟสองค์ประกอบของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ เทียบกับสารตั้งต้นผงเถ้ากระดูกวัว

กราฟรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน และไฮโดรเทอร์มัล ดังรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าทั้งผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลต่างก็มีเฟสองค์ประกอบของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite, Ca₅(PO₄)₃(OH), JCPDS No.00-009-0432) ซึ่งพบว่ากราฟของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลมีความเข้ม (intensity) ของพีคที่น้อยกว่ากราฟของสารตั้งต้นผงเถ้ากระดูกวัว (bone ash, BA) อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลจึงทำให้ระดับความเป็นผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ลดลง แต่เมื่อเทียบระหว่างความเข้มของพีคของกราฟระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลพบว่า

ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลจะมีความเข้มของพีคที่มากกว่าความเข้มของพีคของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนเป็นจำนวนมาก ดังนั้นผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลจึงมีระดับความเป็นผลึกที่สูงกว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน อันเนื่องมาจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลใช้อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียสในการทำไฮโดรเทอร์มัลสารตั้งต้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำให้เกิดการโตของผลึก 1 มิติในทิศแกนซี แต่การสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนมีการควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการสังเคราะห์ให้ไม่เกิน 80 องศาเซลเซียส เพราะฉะนั้นการใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่สูงขึ้นจะทำให้ระดับความเป็นผลึกของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์สูงขึ้นเช่นกัน [39]

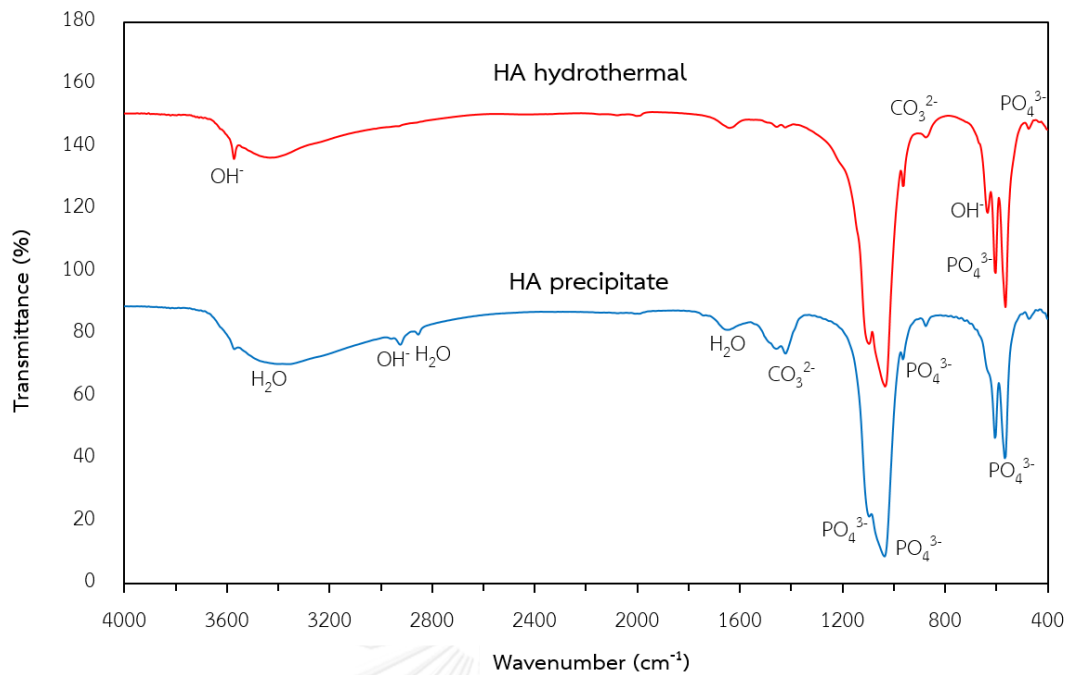


รูปที่ 4.4 เฟสองค์ประกอบของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลเทียบกับสารตั้งต้นผงเอ็กกระดูกวัว

4.1.3 หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลดังรูปที่ 4.5 พบว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ

มีหมู่ฟังก์ชันพื้นฐานของไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งประกอบไปด้วยพิกที่มีการยืดของไอออน (ion stretching) บริเวณช่วงเลขคลื่น 3563 ต่อเซนติเมตรและพิกที่มีการสั่นของ (vibration) บริเวณช่วงเลขคลื่น 632 ต่อเซนติเมตร โดยพิกจุดเล็ก ๆ บริเวณช่วงเลขคลื่น 3563 ต่อเซนติเมตรแสดงถึงการยืดและการสั่นของไฮดรอกซิลไอออน (vibration hydroxyl ion, OH^{-1}) บริเวณช่วงเลขคลื่น 3432 และ 1623 ต่อเซนติเมตรที่มีพิกที่เป็นช่วงกว้างแสดงถึงการสั่นของโมเลกุลน้ำ (water, H_2O) ในโครงสร้างของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ รวมทั้งพิกบริเวณช่วงเลขคลื่น 2919 ต่อเซนติเมตรที่แสดงถึงการยืดของไฮดรอกซิลไอออนที่มีการดูดซับน้ำและจุดยอดบริเวณช่วงเลขคลื่น 2850 ต่อเซนติเมตรก็เป็นการสั่นของโมเลกุลของน้ำเช่นเดียวกันเนื่องจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลไม่มีการนำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ไปผ่านกระบวนการเผาทำให้มีน้ำเหลือในโครงสร้าง สำหรับพิกบริเวณช่วงเลขคลื่น 1450 ถึง 1407 ต่อเซนติเมตรจะแสดงถึงการยืดอย่างไม่สมมาตรของคาร์บอเนตไอออน (asymmetric stretching carbonate bands, CO_3^{2-}) และพิกบริเวณช่วงเลขคลื่น 871 ต่อเซนติเมตรแสดงถึงการสั่นของคาร์บอเนตไอออน แต่กราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลจะพบพิกของไอออนคาร์บอเนตน้อยลง เนื่องจากการสังเคราะห์ภายใต้สภาวะที่เป็นกรดจะทำให้ไอออนคาร์บอเนตที่เป็นประจุลบจะไปรวมตัวกับไอออนประจุบวกในสารละลายกรดเป็นกรดคาร์บอนิก (carbonic acid, H_2CO_3) สำหรับพิกของหมู่ฟังก์ชันฟอสเฟตไอออนที่มีการยืดอย่างไม่สมมาตร (asymmetric stretching phosphate bands, PO_4^{3-}) จะพบบริเวณช่วงเลขคลื่น 1091 และ 1033 ต่อเซนติเมตร แต่พิกของหมู่ฟังก์ชันฟอสเฟตไอออนที่มีการสั่นอย่างไม่สมมาตร (asymmetric bending vibration phosphate bands, PO_4^{3-}) จะพบบริเวณช่วงเลขคลื่น 960, 601, 566 และ 470 ต่อเซนติเมตร และพิกบริเวณช่วงเลขคลื่น 632 ต่อเซนติเมตรแสดงถึงการสั่นของไฮดรอกซิลไอออน ซึ่งพิกที่มีความแหลมชัดเจนบริเวณช่วงเลขคลื่น 632, 601 และ 563 อันเนื่องมาจากการสั่นของไอออนจะแสดงให้เห็นว่าสารตัวอย่างนั้นมีระดับความเป็นผลึกที่สูง ดังกราฟของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่มีระดับความเป็นผลึกที่สูงกว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนเนื่องจากอุณหภูมิในการทำไฮโดรเทอร์มัลที่สูงถึง 130 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.5 [18, 23, 34, 35, 38, 54]



รูปที่ 4.5 หมู่ฟังก์ชันที่ต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล

4.1.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ

การหาพื้นที่ผิวจำเพาะของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลจะประกอบไปด้วยผล 3 ค่าดังตารางที่ 4.2 คือ พื้นที่ผิว (BET surface area, m^2/g), ปริมาตรของรูพรุนทั้งหมด (total pore volume, cm^3/g) และ ขนาดรูพรุนโดยเฉลี่ย (average pore size, \AA) ซึ่งผลที่ได้คือผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลเนื่องจากการสังเคราะห์ด้วยไฮโดรเทอร์มัลจะทำให้เกิดการโตของผลึกในทิศทางหนึ่งส่งผลให้ขนาดอนุภาคใหญ่และยาวขึ้นจึงทำให้พื้นที่ผิวมีขนาดลดลง และมีปริมาตรรูพรุนโดยรวมทั้งหมดลดลงเพราะการสังเคราะห์ด้วยไฮโดรเทอร์มัลมีการใช้อุณหภูมิสูงในระหว่างทำการไฮโดรเทอร์มัล แต่รูพรุนที่ยังเหลือของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลจะมีขนาดโดยเฉลี่ยมากกว่าขนาดรูพรุนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน

ตารางที่ 4.2 สรุปลักษณะที่ผิวจำเพาะต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล

Sample	BET surface area (m ² /g)	total pore volume (cm ³ /g)	average pore size (Å)
HA precipitate	168.11	0.6354	151.20
HA hydrothermal	67.71	0.3451	203.85

4.1.5 ปริมาณธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ

เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลเป็นค่าเปอร์เซ็นต์โดยอะตอมและนำมาคำนวณหาอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสที่มีในโครงสร้างดังตารางที่ 4.3 พบว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลมีค่าอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสที่ได้น้อยกว่า 1.67 (ค่าอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสที่พอดีของไฮดรอกซีอะพาไทด์, stoichiometric hydroxyapatite) โดยผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลมีค่าอัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 1.62 และ 1.66 ตามลำดับ ดังนั้นไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่ได้จึงมีค่าอัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสไม่พอดี (nonstoichiometric hydroxyapatite) ทำให้มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูง (high activity) แต่เมื่อเทียบระหว่างค่าอัตราส่วนแคลเซียมและฟอสฟอรัสระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลจะพบว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนจะมีค่าอัตราส่วนที่น้อยกว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นในการสังเคราะห์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ปริมาณธาตุแคลเซียมในโครงสร้างของไฮดรอกซีอะพาไทด์สูงขึ้นเพราะแคลเซียมไอออนที่มีการจัดเรียงแบบตรง (columnar calcium) ในโครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทด์มีการหลุดจากโครงสร้างน้อยลง จึงทำให้ค่าอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสมีค่าสูงขึ้น [17, 28]

ตารางที่ 4.3 สรุปปริมาณธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล

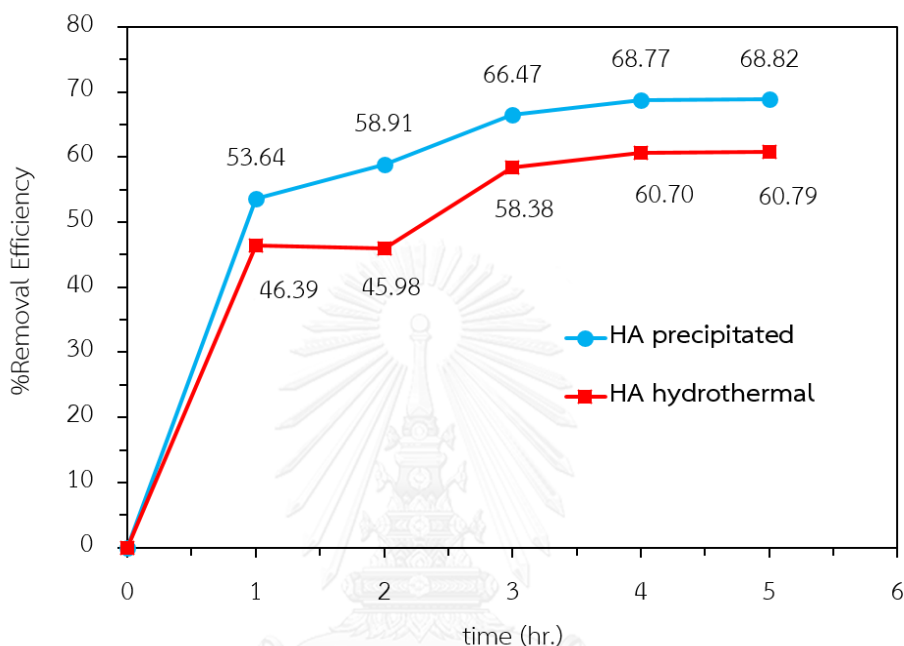
Sample	%calcium atom	%phosphorus atom	Ca/P ratio
HA precipitate	61.78	38.22	1.62
HA hydrothermal	62.46	37.54	1.66

4.2 ผลการศึกษาการดูดซับคอปเปอร์ไอออนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล

4.2.1 ผลการศึกษาเวลาอิ่มตัวของการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ

เมื่อนำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลปริมาณ 0.5 กรัม ทำการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้น 1.0 มิลลิโมลต่อลิตร ปริมาตร 90 มิลลิลิตรเป็นเวลา 5 ชั่วโมงพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมงผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเป็นจำนวน 53.64 และ 46.39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6 และเมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมงเปอร์เซ็นต์การดูดซับของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 58.91 เปอร์เซ็นต์ เปอร์เซ็นต์การดูดซับของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลกลับมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่คงที่ถึงลดลง แต่กลับมาดูดได้มากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมงด้วยค่า 58.38 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมงผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่เพิ่มขึ้นและคงที่ที่เวลา 5 ชั่วโมง เช่นเดียวกับเปอร์เซ็นต์การดูดซับของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมงและคงที่ที่เวลา 5 ชั่วโมง ดังนั้นจึงสามารถสรุปเวลาที่ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลใช้ในการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายได้ 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 คอปเปอร์ไอออนจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็วด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ ภายในเวลา 1 ชั่วโมงแรก และช่วงที่ 2 การดูดซับคอปเปอร์ไอออนด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ จะเพิ่มขึ้น

อย่างช้า ๆ และเมื่อถึงเวลา 4 ชั่วโมง ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ จะดูดซับ คอปเปอร์ไอออนได้ถึงจุดอิ่มตัว เพราะฉะนั้นเวลา 4 ชั่วโมงจึงเป็นเวลาที่นำมาศึกษาการดูดซับ คอปเปอร์ไอออนระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการ ตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลปริมาณ 0.5 และ 1.0 กรัมต่อไป

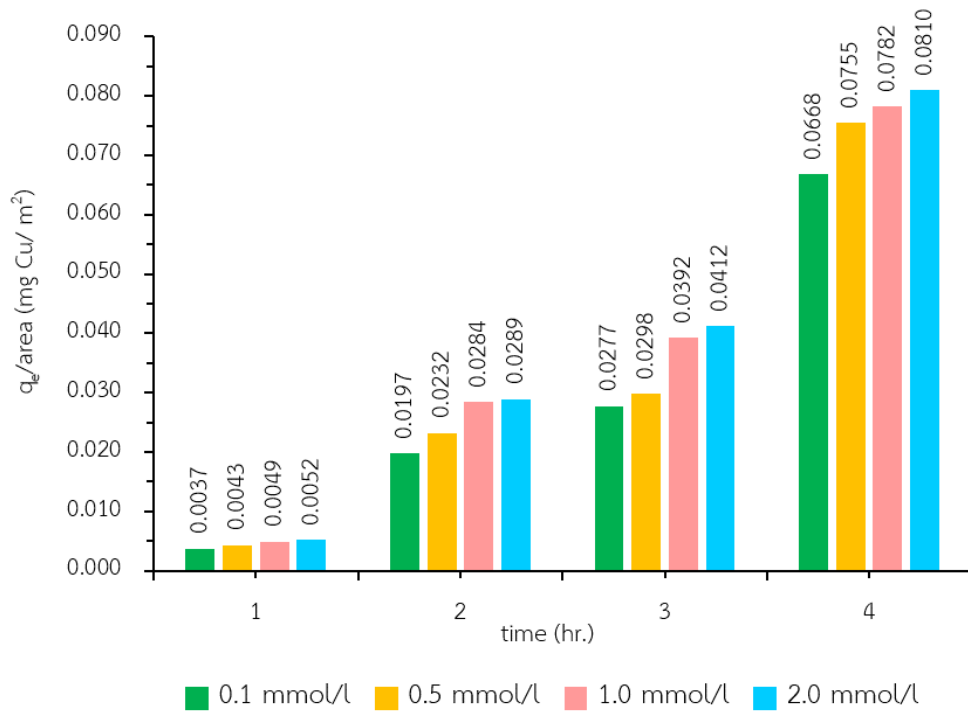


รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายความเข้มข้น 1.0 มิลลิโมลต่อลิตรบน ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล 0.5 กรัมเทียบกับเวลา

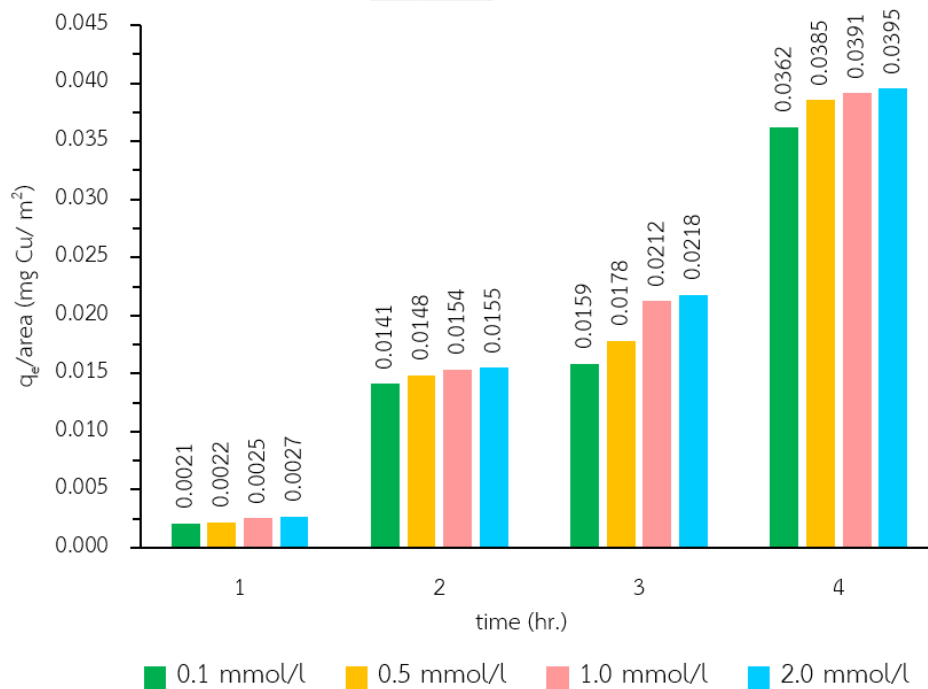
4.2.2 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคอปเปอร์บนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ผ่านการดูดซับในสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

เมื่อทำการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายระดับความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลต่อลิตรด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลปริมาณ 0.5 และ 1.0 กรัม และนำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการ ตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลที่ผ่านการดูดซับปริมาณต่าง ๆ ไปวิเคราะห์ปริมาณธาตุคอปเปอร์ใน สารละลายคอปเปอร์ที่ถูกดูดซับด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ ด้วยเทคนิค อินดักทีฟพีลิปลาสมา ได้ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุคอปเปอร์บนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ ด้วยวิธีการตกตะกอนปริมาณ 0.5 กรัมที่ผ่านการดูดซับในสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้น

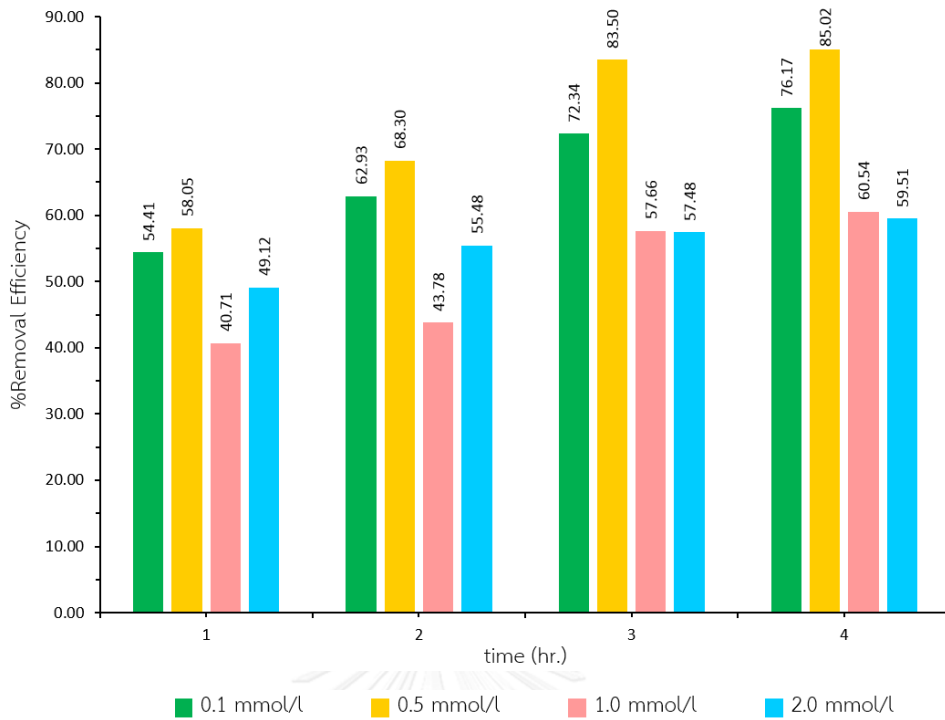
ต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.7 และบนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนปริมาณ 1.0 กรัม ที่ผ่านการดูดซับในสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์มากขึ้นจะทำให้ผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนสามารถดูดซับคอปเปอร์ไอออนได้ปริมาณมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ระหว่างปริมาณ 0.5 กรัม และ 1.0 กรัม พบว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ปริมาณ 1.0 กรัมมีการกระจายตัวของคอปเปอร์ไอออนบนผิวน้อยกว่าปริมาณ 0.5 กรัมในทุก ๆ ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ แต่เมื่อคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การดูดซับ ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนปริมาณ 1.0 กรัมมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายมากกว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนปริมาณ 0.5 กรัม เนื่องจากปริมาณของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน (ตัวดูดซับ) มากกว่าทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับมากกว่า ดังนั้นคอปเปอร์ไอออน (ตัวถูกดูด) จึงมีการกระจายตัวบนผิวของตัวดูดซับที่มีปริมาณมากในแต่ละตำแหน่งน้อยกว่าตัวดูดซับที่มีปริมาณน้อย ทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับของการใช้ปริมาณตัวดูดซับมากมีค่าสูงกว่าการใช้ปริมาณตัวดูดซับน้อย ดังนั้นการใช้ปริมาณผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนมากขึ้นจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับคอปเปอร์ไอออนมากขึ้น แต่จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนจะมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตรมากที่สุด และเปอร์เซ็นต์การดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์ที่ความเข้มข้นสูงขึ้นไปจะเริ่มลดลง ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ที่เหมาะสมต่อการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนคือ 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร



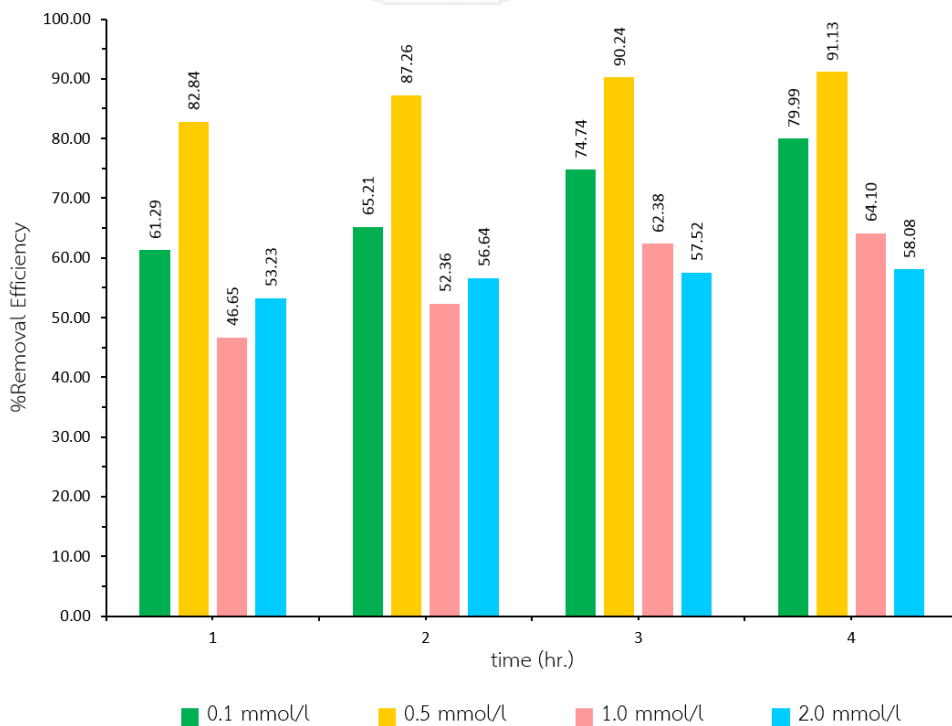
รูปที่ 4.7 ปริมาณธาตุคอปเปอร์บนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน ที่ผ่านการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อพื้นที่ผิวของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ 0.5 กรัมโดยเทียบกับเวลา



รูปที่ 4.8 ปริมาณธาตุคอปเปอร์บนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน ที่ผ่านการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อพื้นที่ผิวของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ 1.0 กรัมโดยเทียบกับเวลา

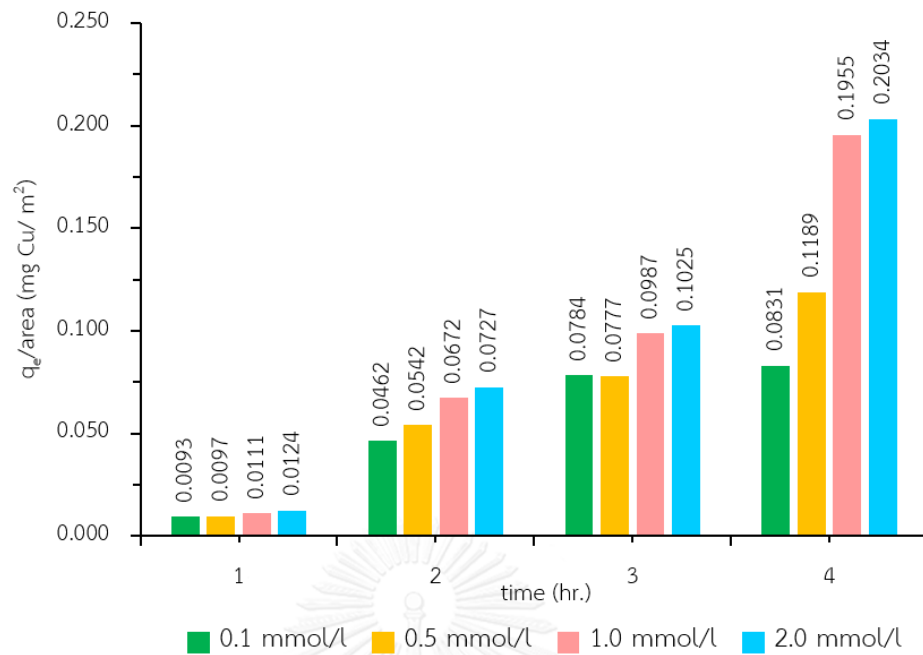


รูปที่ 4.9 เเปอร์เซ็นต์การดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ บนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน 0.5 กรัมโดยเทียบกับเวลา

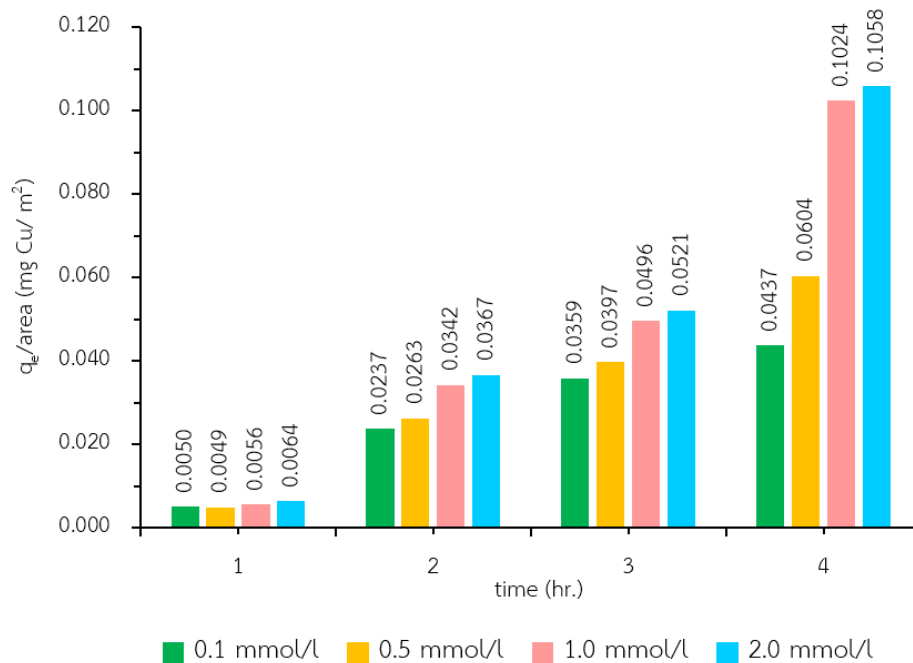


รูปที่ 4.10 เเปอร์เซ็นต์การดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ บนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน 1.0 กรัมโดยเทียบกับเวลา

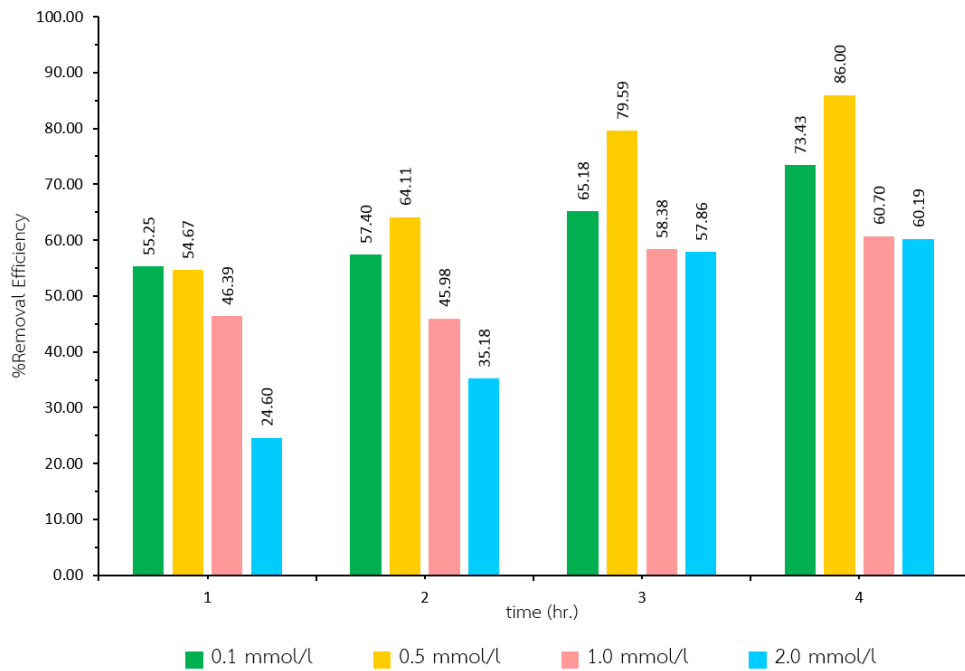
สำหรับผลวิเคราะห์ของปริมาณธาตุคอปเปอร์บนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลปริมาณ 0.5 กรัมที่ผ่านการดูดซับในสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.11 และบนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลปริมาณ 1.0 กรัมที่ผ่านการดูดซับในสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.12 แสดงผลให้เห็นเช่นเดียวกันกับผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนที่ผ่านการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ คือ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์มากขึ้นจะทำให้ผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลสามารถดูดซับคอปเปอร์ไอออนได้ปริมาณมากขึ้น และเมื่อมีปริมาณของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล (ตัวดูดซับ) มากขึ้นก็จะทำให้เกิดการกระจายตัวของคอปเปอร์ไอออน (ตัวถูกดูด) บนผิวของตัวดูดซับน้อยลงเช่นกัน เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การดูดซับ ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าเมื่อมีการใช้ปริมาณตัวดูดซับมากขึ้นแต่เปอร์เซ็นต์การดูดซับมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นการใช้ปริมาณผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่มากขึ้นไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์ได้ และพบว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลจะมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตรได้มากที่สุดเช่นเดียวกับผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน และเปอร์เซ็นต์การดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์ที่ความเข้มข้นสูงขึ้นไปจะเริ่มลดลง ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ที่เหมาะสมต่อการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลคือ 0.5 มิลลิโมลต่อลิตรเช่นเดียวกัน



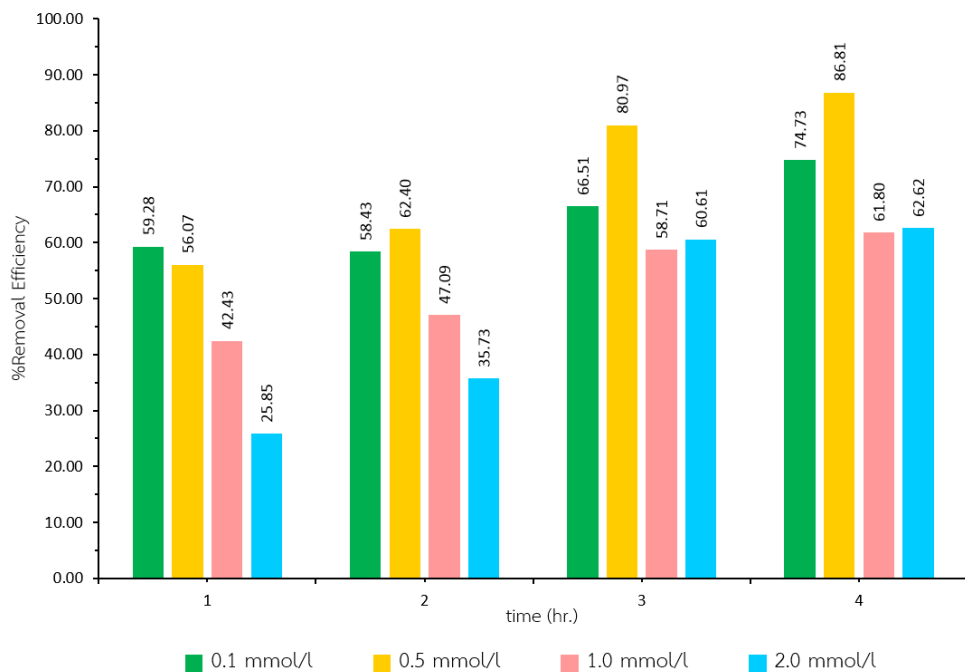
รูปที่ 4.11 ปริมาณธาตุคอปเปอร์บนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล ที่ผ่านการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อพื้นที่ผิว ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.5 กรัมโดยเทียบกับเวลา



รูปที่ 4.12 ปริมาณธาตุคอปเปอร์บนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล ที่ผ่านการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อพื้นที่ผิว ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ 1.0 กรัมโดยเทียบกับเวลา



รูปที่ 4.13 เปรี่เซ็นต์การดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ บนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล 0.5 กรัมโดยเทียบกับเวลา



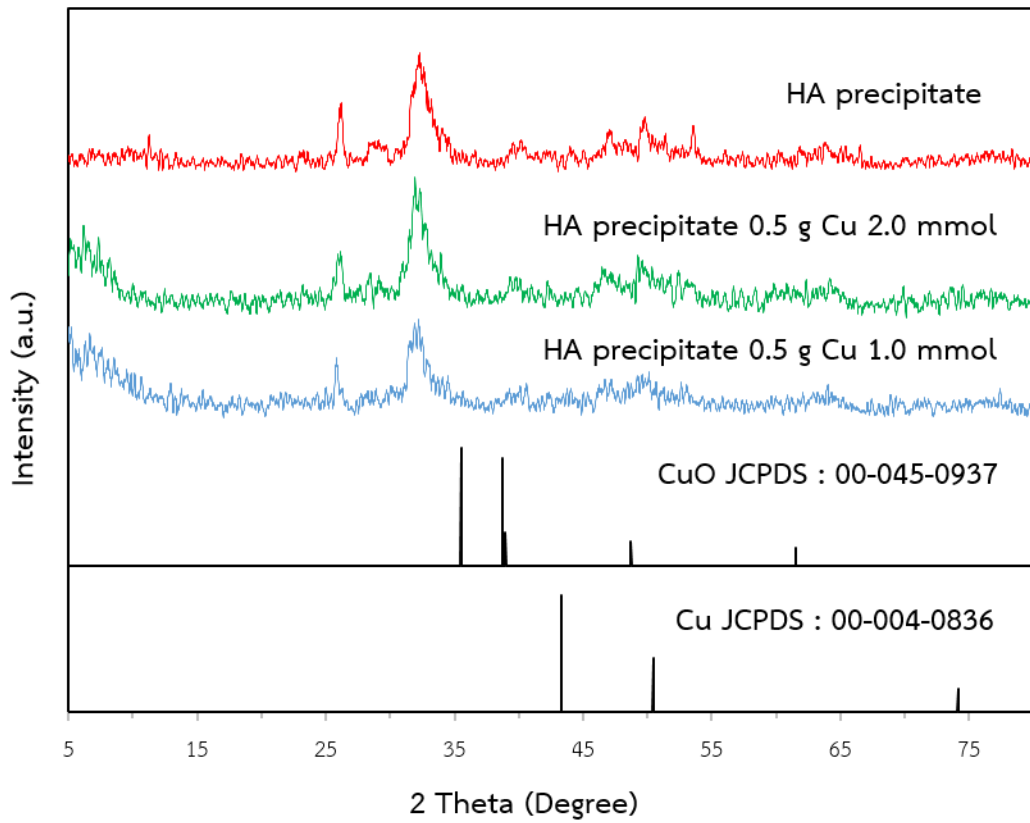
รูปที่ 4.14 เปรี่เซ็นต์การดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายคอปเปอร์ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ บนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล 1.0 กรัมโดยเทียบกับเวลา

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลที่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลาย

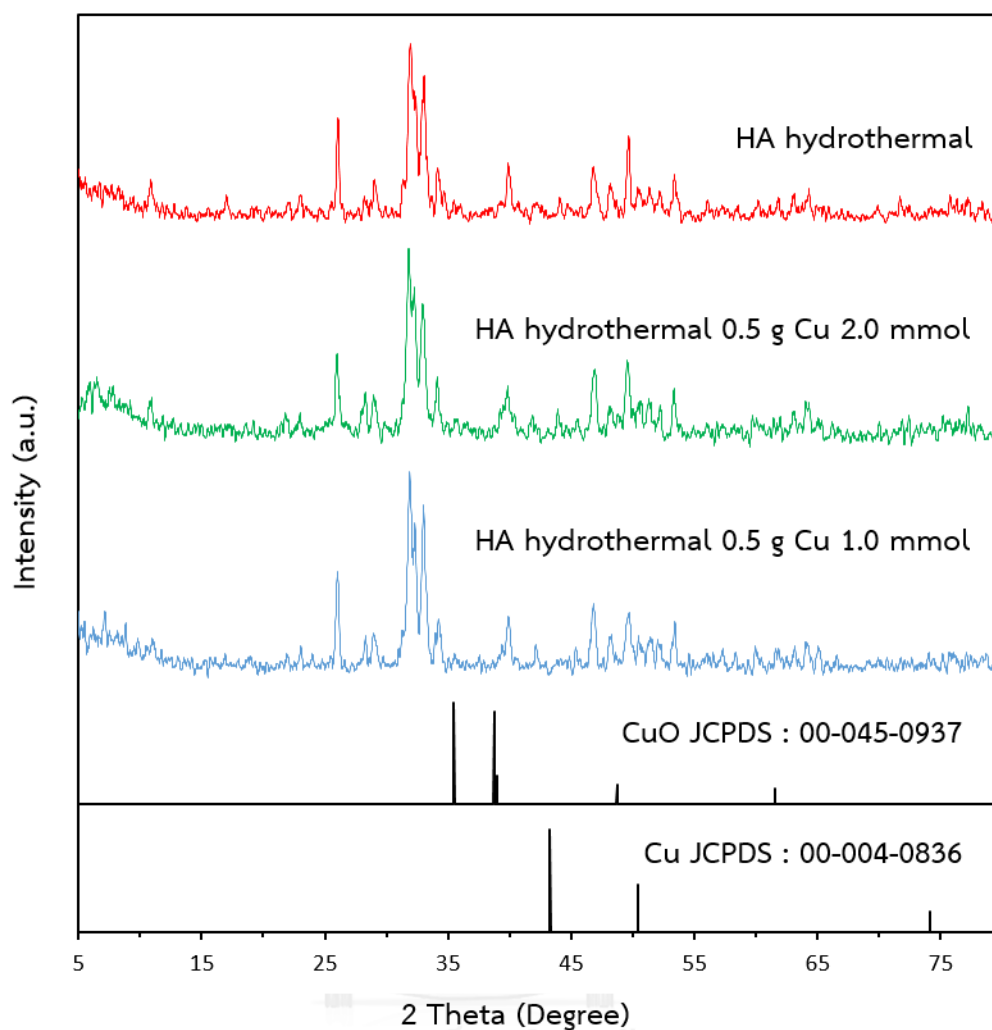
การศึกษาลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลที่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายจะเลือกใช้เงื่อนไขคือ ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ ปริมาณ 0.5 กรัมดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายที่ระดับความเข้มข้น 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลต่อลิตร

1) เฟสองค์ประกอบของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออน

จากผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนที่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออนดังรูปที่ 4.15 พบว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนที่ผ่านการดูดซับคอปเปอร์ไอออนแล้วมีเฟสองค์ประกอบไม่แตกต่างกับผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนที่ยังไม่ผ่านการดูดซับคอปเปอร์ไอออน ซึ่งการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนที่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายที่ระดับความเข้มข้น 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลต่อลิตร ต่างก็ไม่พบความเข้มของพีคของคอปเปอร์ออกไซด์ (copper oxide, CuO, JCPDS No.00-045-0937) และ คอปเปอร์ (copper, Cu, JCPDS No.00-004-0836) เกิดในระบบผลึกของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน ดังนั้นการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในกระบวนการนี้จึงไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับความเป็นผลึกของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน และเช่นเดียวกันกับผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออนดังรูปที่ 4.16 พบว่าการดูดซับคอปเปอร์ไอออนระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ไม่ทำให้เกิดผลึกของคอปเปอร์ออกไซด์และคอปเปอร์ ดังนั้นการดูดซับคอปเปอร์ไอออนจึงไม่ทำให้ระดับความเป็นผลึกของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลเปลี่ยนแปลงเช่นกัน



รูปที่ 4.15 เฟสองค์ประกอบของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน
ที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออน

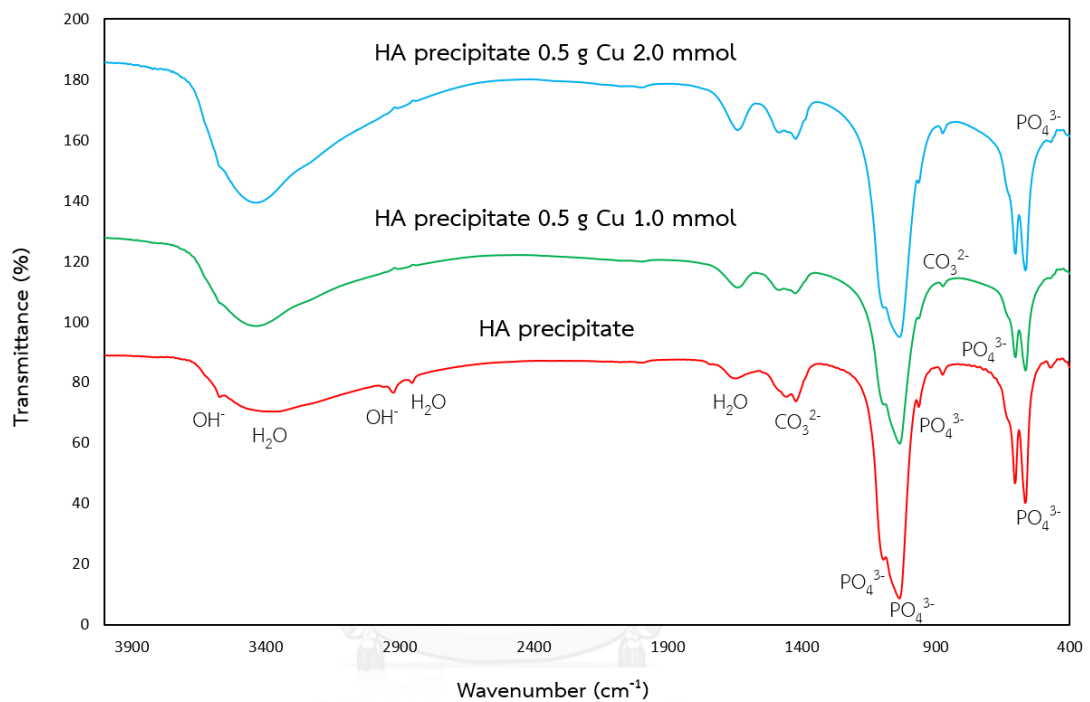


รูปที่ 4.16 เฟสองค์ประกอบของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล ที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออน

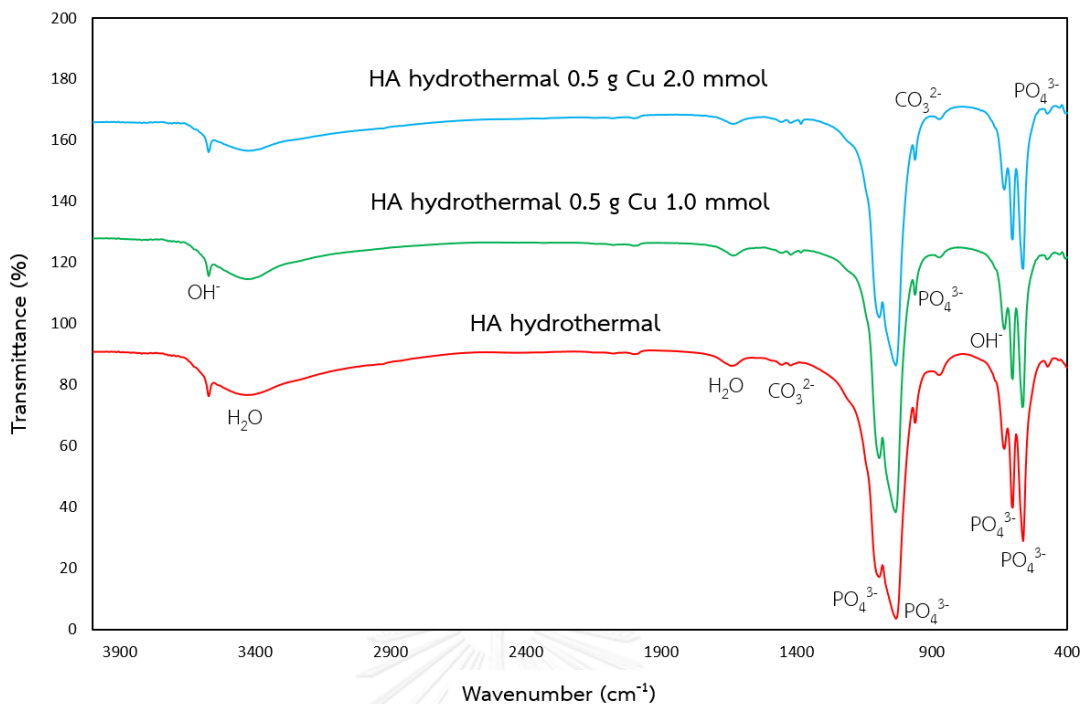
2) หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออน

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนที่ผ่านการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายที่ระดับความเข้มข้น 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลต่อลิตร ดังรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนที่ผ่านการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายที่ระดับความเข้มข้น 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลต่อลิตร มีการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันใดภายในโครงสร้างของไฮดรอกซีอะพาไทต์เพียงแค่วิเวณช่วงเลขคลื่น 3424 และ

1627 ต่อเซนติเมตรที่แสดงถึงการสั่นของโมเลกุลของน้ำที่เพิ่มขึ้นเท่านั้นเมื่อเทียบกับผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนที่ไม่ผ่านกระบวนการดูดซับ แต่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันของคอปเปอร์ออกไซด์หรือการสร้างพันธะของคอปเปอร์ไอออนกับไอออนอื่น ๆ ในโครงสร้างของไฮดรอกซีอะพาไทต์เพิ่มขึ้นมาเลย ดังนั้นการดูดซับคอปเปอร์ไอออนระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนจึงเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของตัวดูดซับเท่านั้น



รูปที่ 4.17 หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออน

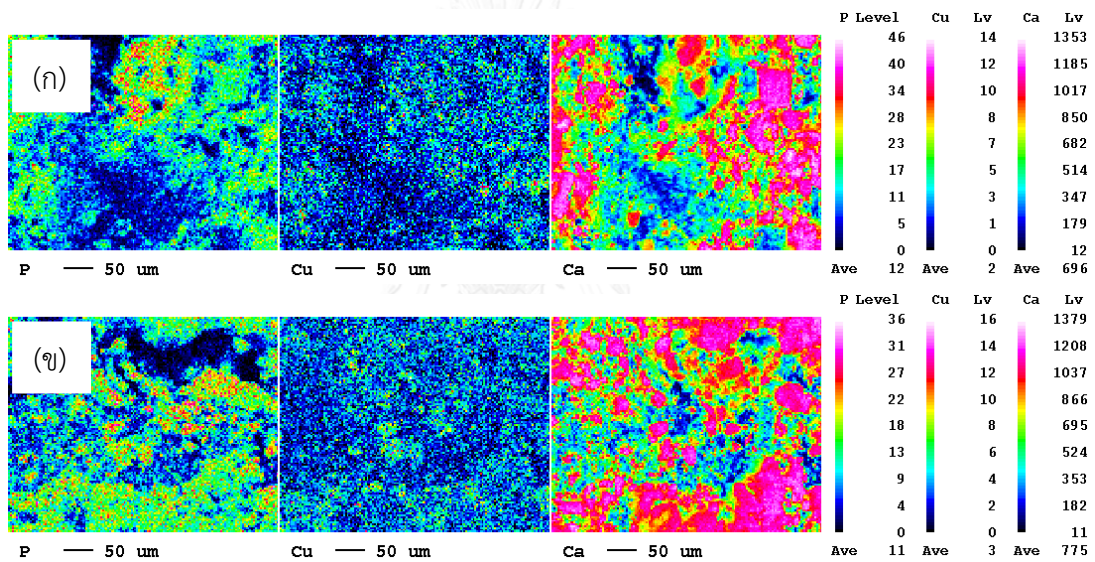


รูปที่ 4.18 หมู่ฟังก์ชันที่ต่าง ๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการดูดซับคอปเปอร์ไอออน

เช่นเดียวกับกับผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่ผ่านการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายที่ระดับความเข้มข้น 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลต่อลิตร ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันใด ๆ ภายในโครงสร้างของไฮดรอกซีอะพาไทต์รวมทั้งไม่มีการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันบริเวณช่วงเลขคลื่น 3424 และ 1627 ต่อเซนติเมตรที่แสดงถึงการสั่นของโมเลกุลของน้ำ เพราะการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลใช้อุณหภูมิสูงในการสังเคราะห์จึงทำให้ปริมาตรรูพรุนส่วนใหญ่ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลเป็นรูพรุนปิดจึงทำให้ไม่มีการแพร่ของโมเลกุลของน้ำเข้าไปในโครงสร้างได้เหมือนกับผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน ดังนั้นการดูดซับคอปเปอร์ไอออนระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลจึงเกิดขึ้นที่ผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

3) การปนเปื้อนของคอปเปอร์ไอออนบนพื้นผิวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างกัน

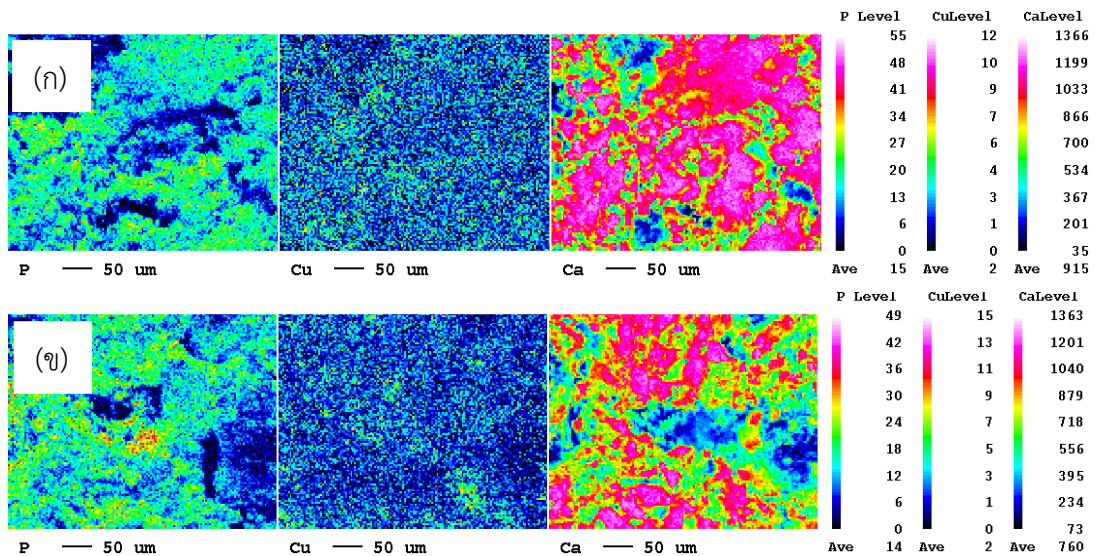
ผลการวิเคราะห์การปนเปื้อนของคอปเปอร์ไอออนบนพื้นผิวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนที่ผ่านการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายที่ระดับความเข้มข้น 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลต่อลิตร ดังรูปที่ 4.20 พบว่ามีการตรวจพบธาตุคอปเปอร์บนพื้นผิวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ปริมาณหนึ่ง จึงสามารถยืนยันได้ว่าการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนเกิดขึ้นที่บริเวณผิวเท่านั้น ไม่มีการดูดซึมเข้าไปในโครงสร้างไม่ว่าความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์จะสูงขึ้น



รูปที่ 4.19 แผนภาพการปนเปื้อนของคอปเปอร์ไอออนบนพื้นผิวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์

ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอน (ก) 1.0 มิลลิโมลต่อลิตร (ข) 2.0 มิลลิโมลต่อลิตร

ผลการวิเคราะห์การปนเปื้อนของคอปเปอร์ไอออนบนพื้นผิวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่ผ่านการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในสารละลายที่ระดับความเข้มข้น 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลต่อลิตร ดังรูปที่ 4.21 ก็พบเช่นเดียวกันว่ามีการตรวจพบธาตุคอปเปอร์บนพื้นผิวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ปริมาณหนึ่ง จึงสามารถยืนยันได้เช่นกันว่าการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลก็เกิดขึ้นที่บริเวณผิวเท่านั้น ไม่มีการดูดซึมเข้าไปในโครงสร้างไม่ว่าความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์จะสูงขึ้น



รูปที่ 4.20 แผนภาพการปนเปื้อนของคอปเปอร์ไอออนบนพื้นผิวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัล (ก) 1.0 มิลลิโมลต่อลิตร (ข) 2.0 มิลลิโมลต่อลิตร

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ

นำผลการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับคอปเปอร์ไอออนระดับความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลต่อลิตรของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลปริมาณ 0.5 กรัม มาคำนวณและวาดกราฟเป็นสมการเส้นตรงด้วยไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบแลงเมียร์ดังสมการที่ 3.1

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{q_m K_L} \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

โดย C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของคอปเปอร์ไอออนในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q_m คือ จำนวนคอปเปอร์ไอออนที่มากที่สุดที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_L คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

q_e คือ จำนวนคอปเปอร์ไอออนที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

และไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบฟรุนดลิชดังสมการที่ 3.3

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad \text{สมการที่ 3.3}$$

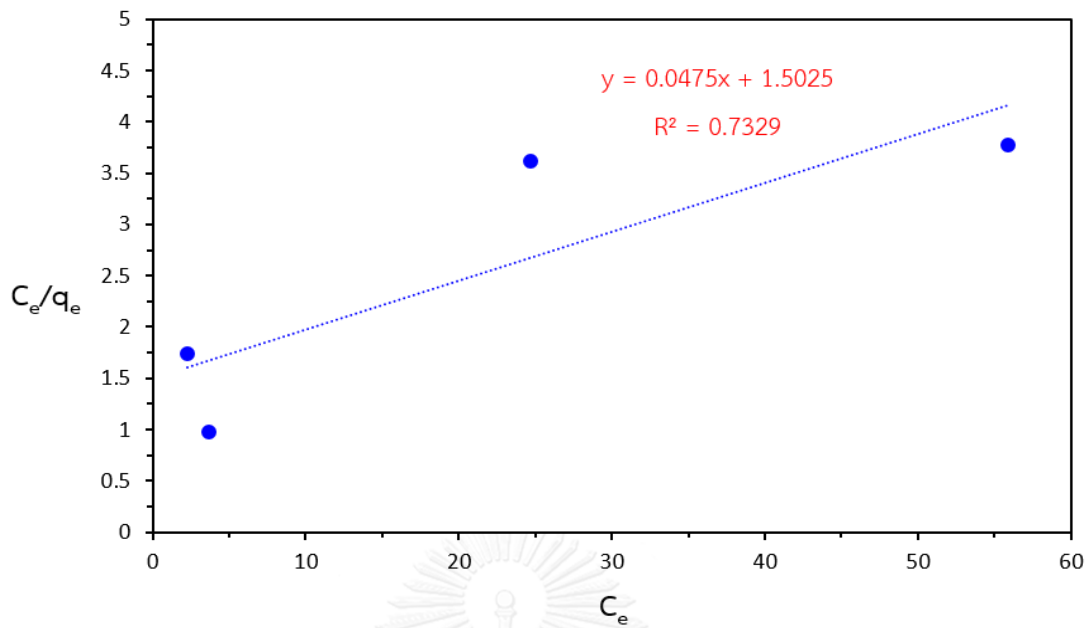
โดย K_F คือ ค่าคงที่ฟรุนดลิช

n คือ ความเข้มของการดูดซับคอเปอร์ไอออน (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

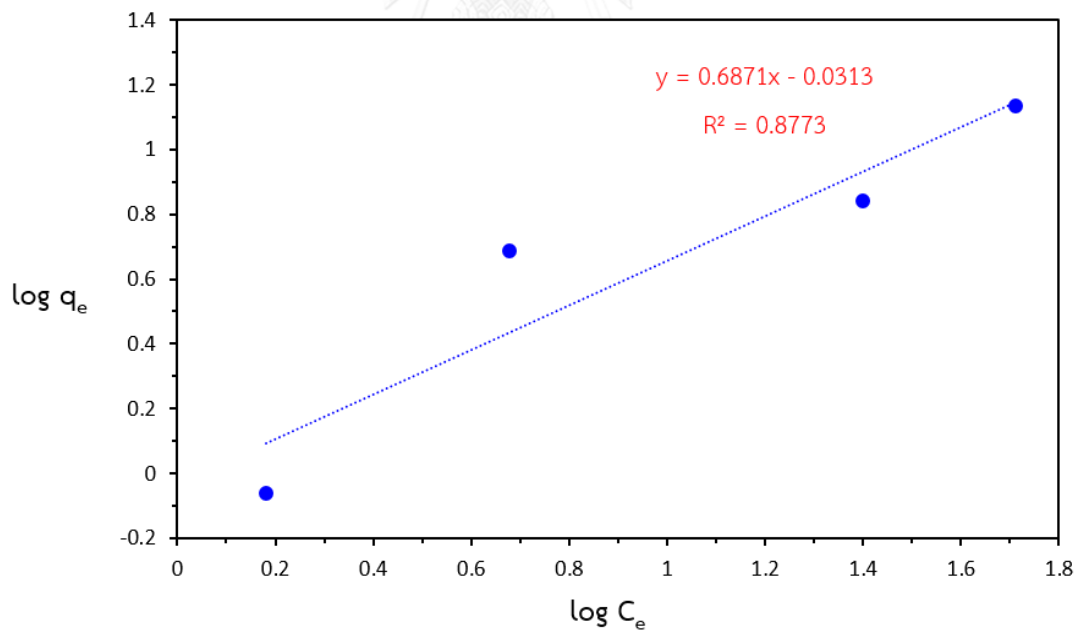
เมื่อได้กราฟสมการเส้นตรงจึงสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (coefficient of determination, R-squared, R^2) เพื่อตัดสินใจว่าการดูดซับของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ เหมาะสมกับไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบใดมากกว่ากัน และแสดงให้เห็นถึงกลไกการดูดซับของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ

1) ผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน

เมื่อนำผลการวิเคราะห์การดูดซับคอเปอร์ไอออนด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนมาคำนวณในไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชจะได้ผลดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 พบว่าการดูดซับคอเปอร์ไอออนด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนเหมาะสมกับไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบฟรุนดลิชมากกว่ารูปแบบแลงเมียร์ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจของไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบฟรุนดลิชมีค่าเท่ากับ 0.8773 ซึ่งมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจของไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบแลงเมียร์ที่มีค่าเท่ากับ 0.7329 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการดูดซับคอเปอร์ไอออนด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนเป็นการดูดซับที่ผิวแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) และปฏิกิริยาการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับแต่ละตำแหน่งจะไม่เหมือนกันและพลังงานในการดูดซับบนผิวดูดซับแต่ละบริเวณจะมีค่าไม่เท่ากัน (heterogeneous adsorbent surface)



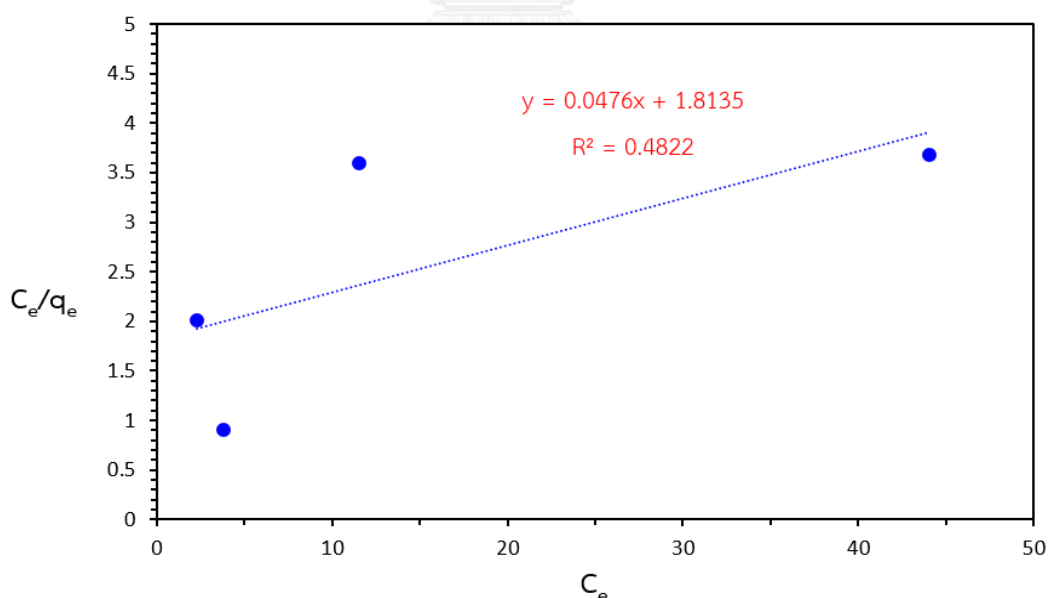
รูปที่ 4.21 ไอโซเทอร์มการดูดซับคอปเปอร์ไอออนรูปแบบแลงเมียร์
ของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน



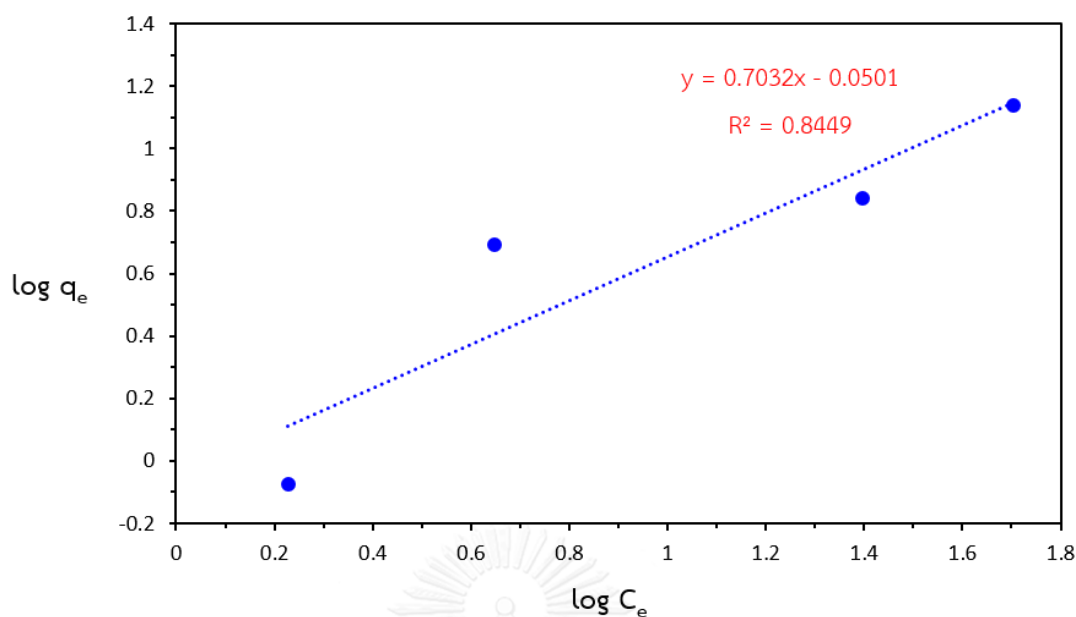
รูปที่ 4.22 ไอโซเทอร์มการดูดซับคอปเปอร์ไอออนรูปแบบฟรุนดลิช
ของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน

2) ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล

สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชของการดูดซับคอปเปอร์ไอออนด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล เมื่อนำผลการวิเคราะห์มาคำนวณในไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชจะได้ผลดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 พบว่าการดูดซับคอปเปอร์ไอออนด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลเหมาะสมกับไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบฟรุนดลิชมากกว่ารูปแบบแลงเมียร์ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจของไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบฟรุนดลิชมีค่าเท่ากับ 0.8449 ซึ่งมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจของไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบแลงเมียร์ที่มีค่าเท่ากับ 0.4822 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการดูดซับคอปเปอร์ไอออนด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลเป็นการดูดซับที่ผิวแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) และปฏิกิริยาการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับแต่ละตำแหน่งจะไม่เหมือนกันและพลังงานในการดูดซับบนผิวดูดซับแต่ละบริเวณจะมีค่าไม่เท่ากัน (heterogeneous adsorbent surface) เช่นเดียวกันกับการดูดซับคอปเปอร์ไอออนด้วยผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน



รูปที่ 4.23 ไอโซเทอร์มการดูดซับคอปเปอร์ไอออนรูปแบบแลงเมียร์ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล



รูปที่ 4.24 ไอโซเทอร์มการดูดซับคอปเปอร์ไอออนรูปแบบฟรุนดลิช
ของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล

3) การศึกษาค่าคงที่ต่าง ๆ ในไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับคอปเปอร์ไอออนระดับความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลต่อลิตรของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลปริมาณ 0.5 กรัม มาคำนวณและวาดกราฟเป็นสมการเส้นตรงด้วยไอโซเทอร์มการดูดซับต่าง ๆ ทำให้ได้ ค่า q_m และ K_L จากความชันและจุดตัดแกน y ของเส้นแนวโน้มเชิงเส้นของสมการเส้นตรงไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบแลงเมียร์ ตามลำดับ ซึ่งค่า q_m คือจำนวนตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับจะแสดงให้เห็นถึงขีดจำกัดความสามารถในการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ และ K_L คือค่าคงที่แลงเมียร์จะสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ และสำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบฟรุนดลิชจะได้ค่า $\frac{1}{n}$ และ K_F สามารถคำนวณได้จากความชันและจุดตัดแกน y ของเส้นแนวโน้มเชิงเส้นของสมการเส้นตรง ตามลำดับ โดยค่า K_F คือ ค่าคงที่ฟรุนดลิชแสดงถึงความสามารถในการดูดซับที่มากที่สุดของตัวดูดซับ และค่า $\frac{1}{n}$ ถ้ามีค่าน้อยกว่า 1 จะแสดงว่ากลไกหรือปฏิกิริยาการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับแต่ละตำแหน่งจะต่างกันและพลังงานใน

การดูดซับบนผิวดูดซับแต่ละบริเวณจะมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อค่า $\frac{1}{n}$ สูงขึ้นใกล้เคียง 1 ก็จะทำให้ที่ผิวของตัวดูดซับมีกลไกและพลังงานในการดูดซับแต่ละตำแหน่งต่างกันมากขึ้น และเมื่อคำนวณค่า $\frac{1}{n}$ กลับเป็นค่า n หรือค่าความแข็งแรงในการดูดซับจะสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อค่า n มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าการดูดซับตัวถูกดูดที่ความเข้มข้นสูงจะเกิดขึ้นได้ไม่ดี แต่ถ้าค่า n มีค่าน้อยกว่าหรือใกล้ 1 แสดงว่าตัวดูดซับสามารถดูดซับตัวถูกดูดที่ความเข้มข้นสูงได้ดี

ตารางที่ 4.4 สรุปค่าคงที่ต่าง ๆ และค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจของไอโซเทอร์มการดูดซับ คอปเปอร์ไอออนรูปแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล

ตัวดูดซับ	รูปแบบแลงเมียร์			รูปแบบฟรุนดลิช			
	q _m (mg/g)	K _L (L/mg)	R ²	1/n (mg/L)	n (L/mg)	K _F (mg/g)	R ²
HA precipitate	21.05	0.03	0.7329	0.6871	1.46	1.07	0.8773
HA hydrothermal	21.01	0.03	0.4822	0.7032	1.42	1.12	0.8449

จากตารางที่ 4.3 คือค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ได้มาจากการคำนวณสมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชของการดูดซับคอปเปอร์ไอออนระดับความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1.0 และ 2.0 มิลลิโมลต่อลิตรของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลปริมาณ 0.5 กรัม ซึ่งทำให้ทราบว่า การดูดซับ คอปเปอร์ไอออนของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลเหมาะสมกับไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบฟรุนดลิชมากกว่ารูปแบบแลงเมียร์ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับที่ผิวสามารถเกิดขึ้นได้หลายชั้นต่อเนื่อง ซึ่งค่าคงที่ฟรุนดลิชที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับที่มากที่สุดของผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลมีค่าไม่ต่างกับผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนมาก แสดงว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลต่างก็มีความสามารถในการดูดซับได้เท่ากัน เมื่อวิเคราะห์ค่า $\frac{1}{n}$ ที่น้อยกว่า 1 ทำให้ทราบว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล

ต่างก็มีกลไกหรือปฏิกิริยาการดูดซับบนผิวแต่ละตำแหน่งต่างกันและพลังงานในการดูดซับบนผิวดูดซับแต่ละบริเวณก็มีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งเมื่อคำนวณกลับเป็นค่าความแข็งแรงในการดูดซับแล้ว ทั้งผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลมีค่าน้อยกว่า 1 จึงยืนยันได้ว่าตัวดูดซับทั้งสองมีการดูดซับได้ไม่ดีที่ระดับความเข้มข้นของคอปเปอร์ไอออนสูง ๆ [48]



บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากผลของการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล และวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะต่าง ๆ จากนั้นนำไปใช้ในการศึกษาการดูดซับคอปเปอร์ไอออนระดับความเข้มข้นต่าง ๆ และศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับรูปแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล ได้ข้อสรุป ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนมีสัญญาณวิทยาลักษณะกลมที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร และผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลมีสัญญาณวิทยาลักษณะแท่งเนื่องจากการใช้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน 1.6 กรัมเป็นสารตั้งต้นและกวนในกรดอะซิติก 48 มิลลิลิตร จึงทำให้เกิดกระบวนการสร้างผลึกเป็นจำนวนมาก และการทำไฮโดรเทอร์มัลจึงช่วยให้ผลึกดังกล่าวเกิดการโต 1 มิติในทิศแกนซี และมีอัตราส่วนลักษณะอยู่ในช่วงระหว่าง 19 ถึง 38

5.1.2 ทั้งผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลมีเฟสองค์ประกอบของไฮดรอกซีอะพาไทต์ และเมื่อเทียบกับสารตั้งต้นผงแก้วกระดูกแล้ว ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลมีระดับความเป็นผลึกที่ต่ำกว่าผงแก้วกระดูกมาก แต่เมื่อเทียบกับระหว่างผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลพบว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนมีระดับความเป็นผลึกต่ำกว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลเนื่องจากอุณหภูมิในการทำไฮโดรเทอร์มัลสูงถึง 130 องศาเซลเซียสจึงทำให้ระดับความเป็นผลึกของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้สูงขึ้น ซึ่งจากระดับความเป็นผลึกของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลต่ำลงจึงทำให้อัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ทั้งสองวิธีการสังเคราะห์มีค่าลดลงหรือเรียกว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีค่าอัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสไม่พอดี

- 5.1.3 ทั้งผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลมีหมู่ฟังก์ชันพื้นฐานของไฮดรอกซีอะพาไทต์เหมือนกันแต่ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลจะมีพีคของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอเนตไอออนน้อยกว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนเนื่องจากการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลต้องทำภายใต้สภาวะที่เป็นกรดจึงทำให้คาร์บอเนตไอออนรวมกับไฮดรอกซิลไอออนในกรดเป็นกรดคาร์บอนิก ดังนั้นพีคของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอเนตไอออนในผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลจึงน้อยลง
- 5.1.4 จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนที่คล้ายลักษณะกลมจึงมีพื้นที่ผิวมากกว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลที่มีสัณฐานวิทยาลักษณะแท่งแต่ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนมีปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดมากกว่าผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลเนื่องจากในระหว่างการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอนมีการควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สูงกว่า 80 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงมีรูพรุนที่เปิดเหลืออยู่ในโครงสร้างของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน
- 5.1.5 จากการศึกษาการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการต่าง ๆ พบว่าเวลาอิ่มตัวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลที่ใช้ในการดูดซับคอปเปอร์ไอออนคือ 4 ชั่วโมงเท่ากัน
- 5.1.6 ผลการดูดซับคอปเปอร์ไอออนระดับความเข้มข้นต่าง ๆ บนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลปริมาณ 0.5 กรัมและ 1.0 กรัม พบว่าเมื่อมีการใช้ปริมาณผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น แต่การใช้ปริมาณผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลเพิ่มขึ้นไม่เพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ และระดับความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ที่ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลสามารถดูดซับได้มากที่สุดคือ 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร
- 5.1.7 ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลที่ผ่านการดูดซับคอปเปอร์ไอออนแล้วไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสองค์ประกอบใด ๆ และไม่มีการตรวจพบเฟส

องค์ประกอบของคอปเปอร์ออกไซด์และคอปเปอร์ในโครงสร้างผลึกของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลที่ผ่านการดูดซับคอปเปอร์ไอออนแล้วก็เช่นกัน โดยไม่พบพีคหมู่ฟังก์ชันของคอปเปอร์ออกไซด์หรือหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ ที่มีการสร้างพันธะกับคอปเปอร์ไอออนเพิ่มขึ้นมาในโครงสร้างของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัล ดังนั้นการดูดซับที่เกิดขึ้นจึงเกิดขึ้นที่ผิวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์เท่านั้นและไม่มีการแพร่เข้ามาในโครงสร้างของไฮดรอกซีอะพาไทต์

5.1.8 จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ พบว่าทั้งการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลต่างก็เหมาะสมกับไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบฟรุนดลิช แสดงว่าการดูดซับที่ผิวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ สามารถเกิดขึ้นได้หลายชั้นต่อเนื่อง และผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลต่างก็มีความสามารถในการดูดซับได้เท่ากัน ซึ่งทั้งผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลมีการดูดซับได้ไม่ดีที่ระดับความเข้มข้นของคอปเปอร์ไอออนสูง ๆ ดังนั้นระดับความเข้มข้นคอปเปอร์ไอออนที่เหมาะสมต่อการนำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลที่ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร

5.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

- 5.2.1 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับคอปเปอร์ไอออนบนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลในสารละลายคอปเปอร์ที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่า 2.0 มิลลิโมลต่อลิตรเพื่อให้ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับรูปแบบต่าง ๆ มีค่าถูกต้องขึ้น
- 5.2.2 ศึกษาการดูดซับธาตุโลหะหนักอื่น ๆ เช่น ปรอท, ตะกั่ว, แคดเมียม เป็นต้น บนผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลเพื่อทดสอบหาความสามารถในการเป็นตัวดูดซับของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลมากขึ้น

5.2.3 ศึกษาการนำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนและไฮโดรเทอร์มัลไปเคลือบบนตัวรองรับและนำไปทดสอบความสามารถในการเป็นตัวดูดซับคอปเปอร์ไอออนที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้



รายการอ้างอิง

- [1] Bazargan-Lari R., Bahrololoom M. E., Nemati A., Salehi Z. Adsorption of Cu (II) ions from industrial wastewater on natural hydroxyapatite extracted from bone ash. Journal of Food, Agriculture and Environment. 9(2) (2011): 652-657.
- [2] Corami A., Mignardi S., Ferrini V. Cadmium removal from single- and multi-metal () solutions by sorption on hydroxyapatite. Journal of Colloid and Interface Science. 317(2) (2008): 402-408.
- [3] Mobasherpour I., Salehi E., Pazouki M. Comparative of the removal of Pb²⁺, Cd²⁺ and Ni²⁺ by nano crystallite hydroxyapatite from aqueous solutions: Adsorption isotherm study. Arabian Journal of Chemistry. 5(4) (2012): 439-446.
- [4] Corami A., Mignardi S., Ferrini V. Copper and zinc decontamination from single- and binary-metal solutions using hydroxyapatite. Journal of Hazardous Materials. 146(1–2) (2007): 164-170.
- [5] Fernane F., Mecherri M. O., Sharrock P., Hadioui M., Lounici H., Fedoroff M. Sorption of cadmium and copper ions on natural and synthetic hydroxylapatite particles. Materials Characterization. 59(5) (2008): 554-559.
- [6] Wongsorntam K., Sirilak S., Khuntong S. Analysis of Chemical and Biological Contaminations of Tap Water in Mahidol Adulayadej Building, Queen Sawang Vadhana Hospital at Si Racha. Proceedings of the 48th Kasetsart University Annual Conference. (2010):
- [7] Jamjang K. Quality Analysis of Piped Water in Kamphanphet Rajabhat University. The Golden Teak : Humanity and Social Science Journal. 12(1) (2006): 85-92.
- [8] สาธารณสุข, กระทรวง, ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา. ความเป็นพิษของทองแดง[Online]. 2005. Available from:
http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=296
[2015,February 4]
- [9] Tchounwou P., Yedjou C., Patlolla A., Sutton D. Heavy Metal Toxicity and the Environment. Springer Basel, 2012.

- [10] Brewer G. J. Copper toxicity in the general population. Clinical Neurophysiology. 121(4) (2010): 459-460.
- [11] U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, Public Health Service, (ATSDR). A. f. T. S. a. D. R. Public Health Statement for Copper. Toxicological profile for Copper (2004): 1-9.
- [12] Tchounwou P. B., Yedjou C. G., Patlolla A. K., Sutton D. J. Heavy Metals Toxicity and the Environment. EXS. 101((2012): 133-164.
- [13] ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง., กรมควบคุมมลพิษ. มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค[Online]. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม 1978. Available from: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water01.html#top [2015,February 4]
- [14] Sadat-Shojai M., Khorasani M.-T., Dinpanah-Khoshdargi E., Jamshidi A. Synthesis methods for nanosized hydroxyapatite with diverse structures. Acta Biomaterialia. 9(8) (2013): 7591-7621.
- [15] Khalid M., Mujahid M., Amin S., Rawat R. S., Nusair A., Deen G. R. Effect of surfactant and heat treatment on morphology, surface area and crystallinity in hydroxyapatite nanocrystals. Ceramics International. 39(1) (2013): 39-50.
- [16] Blumenthal N. C., Betts F., Posner A. S. Formation and structure of Ca-deficient hydroxyapatite. Calcified Tissue International. 33(1) (1981): 111-117.
- [17] Rivera-Muñoz E. M. Hydroxyapatite-Based Materials: Synthesis and Characterization[Online]. InTech 2011. Available from: <http://www.intechopen.com/books/biomedical-engineering-frontiers-and-challenges/hydroxyapatite-based-materials-synthesis-and-characterization> [2015,February 8]
- [18] Bharath G., Jagadeesh Kumar A., Karthick K., Mangalaraj D., Viswanathan C., Ponpandian N. Shape evolution and size controlled synthesis of mesoporous hydroxyapatite nanostructures and their morphology dependent Pb(ii) removal from waste water. RSC Advances. 4(70) (2014): 37446-37457.
- [19] Medellin-Castillo N. A., Leyva-Ramos R., Padilla-Ortega E., Perez R. O., Flores-Cano J. V., Berber-Mendoza M. S. Adsorption capacity of bone char for removing fluoride from water solution. Role of hydroxyapatite content,

- adsorption mechanism and competing anions. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 20(6) (2014): 4014-4021.
- [20] Hokkanen S., Repo E., Westholm L. J., Lou S., Sainio T., Sillanpää M. Adsorption of Ni²⁺, Cd²⁺, PO₄³⁻ and NO₃⁻ from aqueous solutions by nanostructured microfibrillated cellulose modified with carbonated hydroxyapatite. Chemical Engineering Journal. 252((2014): 64-74.
- [21] Marchat D., Bernache-Assollant D., Champion E. Cadmium fixation by synthetic hydroxyapatite in aqueous solution—Thermal behaviour. Journal of Hazardous Materials. 139(3) (2007): 453-460.
- [22] Wang Y.-J., Chen J.-H., Cui Y.-X., Wang S.-Q., Zhou D.-M. Effects of low-molecular-weight organic acids on Cu(II) adsorption onto hydroxyapatite nanoparticles. Journal of Hazardous Materials. 162(2–3) (2009): 1135-1140.
- [23] Kongsri S., Janpradit K., Buapa K., Techawongstien S., Chanthai S. Nanocrystalline hydroxyapatite from fish scale waste: Preparation, characterization and application for selenium adsorption in aqueous solution. Chemical Engineering Journal. 215–216(0) (2013): 522-532.
- [24] Mobasherpour I., Salahi E., Pazouki M. Removal of divalent cadmium cations by means of synthetic nano crystallite hydroxyapatite. Desalination. 266(1–3) (2011): 142-148.
- [25] Mobasherpour I., Salahi E., Pazouki M. Removal of nickel (II) from aqueous solutions by using nano-crystalline calcium hydroxyapatite. Journal of Saudi Chemical Society. 15(2) (2011): 105-112.
- [26] Stötzel C., Müller F. A., Reinert F., Niederdraenk F., Barralet J. E., Gbureck U. Ion adsorption behaviour of hydroxyapatite with different crystallinities. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 74(1) (2009): 91-95.
- [27] Mohammad H. U., Matsumoto T., Okazaki M., Nakahira A., Sohmura T. Biomimetic Fabrication of Apatite Related Biomaterials[Online]. InTech 2010. Available from: <http://www.intechopen.com/books/biomimetics-learning-from-nature/biomimetic-fabrication-of-apatite-related-biomaterials> [2015,February 8]

- [28] Ishikawa K., Ducheyne P., Radin S. Determination of the Ca/P ratio in calcium-deficient hydroxyapatite using X-ray diffraction analysis. J Mater Sci: Mater Med. 4(2) (1993): 165-168.
- [29] Zhao X.-Y., Zhu Y.-J., Zhao J., Lu B.-Q., Chen F., Qi C., et al. Hydroxyapatite nanosheet-assembled microspheres: Hemoglobin-templated synthesis and adsorption for heavy metal ions. Journal of Colloid and Interface Science. 416((2014): 11-18.
- [30] Pramanik S., Agarwal A. K., Rai K. N., Garg A. Development of high strength hydroxyapatite by solid-state-sintering process. Ceramics International. 33(3) (2007): 419-426.
- [31] Pieters I. Y., De Maeyer E. A. P., Verbeeck R. M. H. Influence of Na⁺ on the Stoichiometry of Carbonated Hydroxyapatite Obtained by the Hydrolysis of Octacalcium Phosphate. Inorganic Chemistry. 37(24) (1998): 6392-6395.
- [32] Zhou W. Y., Wang M., Cheung W. L., Guo B. C., Jia D. M. Synthesis of carbonated hydroxyapatite nanospheres through nanoemulsion. J Mater Sci: Mater Med. 19(1) (2008): 103-110.
- [33] Lorprayoon C. Synthesis of Calcium Hydroxyapatite and Tricalcium Phosphate from Bone Ash. Ionic Polymers, Ordered Polymers for High Performance Materials, Biomaterials. 1((1989): 329-336.
- [34] Abidi S. S. A., Murtaza Q. Synthesis and Characterization of Nano-hydroxyapatite Powder Using Wet Chemical Precipitation Reaction. Journal of Materials Science & Technology. 30(4) (2014): 307-310.
- [35] Chandrasekar A., Sagadevan S., Dakshnamoorthy A. Synthesis and Characterisation of Nano-Hydroxyapatite (n-HAP) using the wet chemical technique. International Journal of Physical Sciences. 8(32) (2013): 1639-1645.
- [36] Barakat N. A. M., Khil M. S., Omran A. M., Sheikh F. A., Kim H. Y. Extraction of pure natural hydroxyapatite from the bovine bones bio waste by three different methods. Journal of Materials Processing Technology. 209(7) (2009): 3408-3415.
- [37] Ruksudjarit A., Pengpat K., Rujijanagul G., Tunkasiri T. Synthesis and characterization of nanocrystalline hydroxyapatite from natural bovine bone. Current Applied Physics. 8(3-4) (2008): 270-272.

- [38] Ramli R. A., Adnan R., Baker M. A., Masudi S. a. M. Synthesis and Characterisation of Pure Nanoporous Hydroxyapatite Journal of Physical Science. 22(1) (2011): 25-37.
- [39] Lee W.-H., Zavgorodniy A. V., Loo C.-Y., Rohanizadeh R. Synthesis and characterization of hydroxyapatite with different crystallinity: Effects on protein adsorption and release. Journal of Biomedical Materials Research Part A. 100A(6) (2012): 1539-1549.
- [40] Kuanchertchoo N., Chuthong P., Wejprasit N., Supaphol P. (2013). Synthesis of Hydroxyapatite Whiskers from Cattle Bone Ash. The 4th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology and The 19th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers Ballroom and Meeting Room 1-4, Queen Sirikit National Convention Center Bangkok, Thailand.
- [41] Ioku K., Yamauchi S., Fujimori H., Goto S., Yoshimura M. Hydrothermal preparation of fibrous apatite and apatite sheet. Solid State Ionics. 151(1-4) (2002): 147-150.
- [42] Zhang H., Darvell B. W. Morphology and structural characteristics of hydroxyapatite whiskers: Effect of the initial Ca concentration, Ca/P ratio and pH. Acta Biomaterialia. 7(7) (2011): 2960-2968.
- [43] Sadat-Shojai M., Atai M., Nodehi A., Khanlar L. N. Hydroxyapatite nanorods as novel fillers for improving the properties of dental adhesives: Synthesis and application. Dental Materials. 26(5) (2010): 471-482.
- [44] Sadat-Shojai M., Khorasani M.-T., Jamshidi A. Hydrothermal processing of hydroxyapatite nanoparticles—A Taguchi experimental design approach. Journal of Crystal Growth. 361((2012): 73-84.
- [45] Sadat-Shojai M., Atai M., Nodehi A. Design of experiments (DOE) for the optimization of hydrothermal synthesis of hydroxyapatite nanoparticles. Journal of the Brazilian Chemical Society. 22(3) (2011): 571-582.
- [46] ภาชนะ ค. วิชา 303432 เคมีพื้นผิว. (เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา). ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์: มหาวิทยาลัยบูรพา, 2011.

- [47] XAmplified. Adsorption[Online]. XAmplified Free Online Education Resource 2010. Available from: <http://www.chemistrylearning.com/adsorption/> [2015,December 8]
- [48] แสงอาทิตย์ น. การดูดซับยาปฏิชีวนะ Norfloxacin โดยเถ้าแกลบที่ pH 5-8. ปรินญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย ศิลปากร. 2554.
- [49] Sundaram C. S., Viswanathan N., Meenakshi S. Defluoridation chemistry of synthetic hydroxyapatite at nano scale: Equilibrium and kinetic studies. Journal of Hazardous Materials. 155(1–2) (2008): 206-215.
- [50] Langmuir I. THE ADSORPTION OF GASES ON PLANE SURFACES OF GLASS, MICA AND PLATINUM. Journal of the American Chemical Society. 40(9) (1918): 1361-1403.
- [51] Hasany S. M., Saeed M. M., Ahmed M. Sorption and thermodynamic behavior of zinc(II)-thiocyanate complexes onto polyurethane foam from acidic solutions. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 252(3) (2002): 477-484.
- [52] minitab s. การวิเคราะห์สมการถดถอย[Online]. TPA National Industrial Test Center 2014 Available from: <http://www.tpa.or.th/nitctool/writer.php?bookID=3086&pageid=1&read=true&count=true> [2015,December 10]
- [53] Byrappa K., Yoshimura M. HANDBOOK OF HYDROTHERMAL TECHNOLOGY A Technology for Crystal Growth and Materials Processing. Park Ridge, New Jersey, U.S.A.: WILLIAM ANDREW PUBLISHING, 2001.
- [54] Rajiv Gandhi M., Kousalya G. N., Meenakshi S. Removal of copper(II) using chitin/chitosan nano-hydroxyapatite composite. International Journal of Biological Macromolecules. 48(1) (2011): 119-124.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ผลการศึกษาการวิเคราะห์ธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสเชิงปริมาณด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครนาลิซิส (electron probe micro analyzer, EPMA) เป็นค่าอัตราส่วนของอะตอม

1. ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน

ตารางที่ ก.1 อัตราส่วนธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน

No.	Ca	P	Total
1	67.3337	32.6663	100
2	62.4088	37.5912	100
3	59.0825	40.9175	100
4	60.0314	39.9686	100
5	62.7664	37.2336	100
6	59.1326	40.8674	100
7	61.3102	38.6898	100
8	67.2602	32.7398	100
9	74.0829	25.9171	100
10	96.1351	3.8649	100
11	68.2285	31.7715	100
12	64.5347	35.4653	100
13	61.1357	38.8643	100
14	68.1012	31.8988	100
15	60.4917	39.5083	100
16	51.0575	48.9425	100
17	57.218	42.782	100
18	61.2921	38.7079	100
19	65.8728	34.1272	100
20	71.9015	28.0985	100

2. ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล

ตารางที่ ก.2 อัตราส่วนธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล

No.	Ca	P	Total
1	57.832	42.168	100
2	66.3085	33.6915	100
3	63.2268	36.7732	100
4	63.0538	36.9462	100
5	61.2631	38.7369	100
6	61.5716	38.4284	100
7	63.1764	36.8236	100
8	60.3276	39.6724	100
9	60.0797	39.9203	100
10	66.3939	33.6061	100

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธรณิศร ชูชัยแสงรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 4 เดือนมกราคม ปีพุทธศักราช 2532 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเซรามิกและวัสดุศาสตร์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2555 และศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภายในปีการศึกษา 2556 และได้รับเงินทุนการศึกษาวิทยบัณฑิตจากภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, โครงการจ้างผู้ช่วยนักวิจัยของอาจารย์ ดร. ธีรนุช ควรเชิดชู อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง และโครงการผู้ช่วยสอนของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในระหว่างการศึกษาในปริญญาโท ได้มีโอกาสเข้าร่วมงานประชุมทางวิชาการและนำเสนอผลงานทางวิชาการรูปแบบโปสเตอร์ในหัวข้อ “Effect of Crystallinity of Hydroxyapatite Nanoparticles Prepared from Bovine Bone on Adsorption of Ammonium Gas” ที่งานประชุม “8th International Conference on Materials Science and Technology (MSAT-8)” จัดขึ้นวันที่ 15-16 เดือนธันวาคม ปีพุทธศักราช 2557 ณ โรงแรมสวิสโซเทล เลอคองคอร์ด กรุงเทพมหานคร จัดขึ้นโดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และได้ตีพิมพ์ผลงานในรูปแบบวารสารทางวิชาการในหนังสือ Key Engineering Materials ฉบับที่ 659 หน้า 289-293 ปีพุทธศักราช 2558