

การเตรียมแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟตและพฤติกรรมการดูดซับเมทิลีนบลู
PREPARATION OF MAGNESIUM PYROPHOSPHATE AND
ITS METHYLENE BLUE ADSORPTION BEHAVIOR

จิณฉัตร	แย้มคงเมือง
จิราภรณ์	จิ๋วประเสริฐ
ณัฐญา	จันทรว

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556



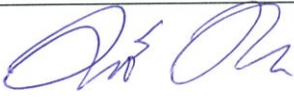
**PREPARATION OF MAGNESIUM PYROPHOSPHATE AND
ITS METHYLENE BLUE ADSORPTION BEHAVIOR**

**JINNAWAT YAMKONGMUEANG
JIRAPORN JIWPRASERT
NATTAYA CHANHUAB**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013**

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟตและพฤติกรรมการดูดซับเมทิลีนบลู			
	Preparation of magnesium pyrophosphate and its methylene blue adsorption behavior			
ชื่อนักศึกษา	นายจิณณวัตร	แย้มคงเมือง	รหัสนักศึกษา	53050188
	นางสาวจิราภรณ์	จิวิประเสริฐ	รหัสนักศึกษา	53050193
	นางสาวณัฐญา	จันทวบ	รหัสนักศึกษา	53050216
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต			
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม			
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ			

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย	
ผศ.ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร	
ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟตและพฤติกรรมการดูดซับเมทิลีนบลู			
ชื่อนักศึกษา	นายจิณฉัตร	แย้มคงเมือง	รหัสนักศึกษา	53050188
	นางสาวจิราภรณ์	จิ๋วประเสริฐ	รหัสนักศึกษา	53050193
	นางสาวณัฐญา	จันทวน	รหัสนักศึกษา	53050216
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต			
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม			
ปีการศึกษา	2556			
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ			

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการเตรียมแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) เพื่อนำไปศึกษาพฤติกรรมการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู โดยใช้วิธีการเตรียมแบบตกตะกอน (Precipitation method) โดยมีสารตั้งต้น คือ แมกนีเซียมไนเตรด ($Mg(II)(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) แหล่งที่มาของฟอสเฟต คือ กรดฟอสฟอริก (85 % w/w, H_3PO_4) และตัวปรับค่าความเป็นกรด-ด่างคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยภาวะที่ใช้ในการทดลอง คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 9 ความเร็วรอบการปั่นกวาน 500 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 5 ± 1 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเผา (Calcination) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งจะได้ร้อยละผลผลิตของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟตเท่ากับ 81.57 จากนั้นนำมาตรวจสอบเอกลักษณ์ของสาร โดยตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลซิส (Thermogravimetric , TG) การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของสารด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) การตรวจสอบลักษณะผลึกและอสัณฐานด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) การตรวจสอบลักษณะสัณฐานของสารในระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และวิเคราะห์พฤติกรรมการดูดซับ โดยการศึกษาการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-VIS Spectrophotometry) ซึ่งมีค่าร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 62.05 และจากผลการทดลอง พบว่า แนวโน้มไอโซเทอมการดูดซับที่ได้สอดคล้องกับไอโซเทอมของแลงเมียร์ และมีค่าความถดถอย (R^2) สูงสุด เท่ากับ 0.973 ค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่า k_L และ q_m จะมีค่าเท่ากับ 1.221 มิลลิกรัมต่อลิตรและ 1.523 มิลลิกรัมของตัวถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับตามลำดับ ดังนั้น สมการแบบจำลองการดูดซับ คือ $\frac{1}{q} = \frac{0.538}{C} + 0.657$

Title	Preparation of magnesium pyrophosphate and its methylene blue adsorption behavior		
Students	Jinnawat	Yamkongmueang	Student ID.53050188
	Jiraporn	Jiwprasert	Student ID. 53050193
	Nattaya	Chanhuab	Student ID. 53050216
Degree	Bachelor of Science		
Major Program	Industrial Chemistry		
Academic Year	2013		
Advisor	Asst.Prof.Dr.Montree Thongkam		

Abstract

This special project studied on the preparation of magnesium pyrophosphate by precipitation method and its adsorption behavior of methylene blue from aqueous solution were investigated. Adsorption process was applied onto magnesium pyrophosphate prepared from chemical activation of magnesium nitrate ($\text{Mg(II)(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) with 85 % w/w H_3PO_4 at $5 \pm 1^\circ\text{C}$. The solution is stirred at 500 rpm and precipitated NaOH (pH 9). The yield of magnesium pyrophosphate after calcinations was 81.57 %. The thermal behavior was evaluated using Thermogravimetry (TGA). The vibrations of atoms in molecules was evaluated using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The structural characterization of amorphous materials using X-Ray Diffraction (XRD). Scanning Electron Microscopy (SEM) was used for morphological studies.). The methylene blue adsorbed was determined by UV-Vis spectrophotometry at 660 nm. The results indicate that the adsorption isotherm of methylene blue on magnesium pyrophosphate is of the Langmuir type. ($R^2 = 0.973$, $k_L = 1.221\text{mg/L}$, $q_m = 1.523\text{ mg/g}$) with maximum monolayer adsorption capacity of 62.05 %.

Adsorption Isotherm Modeling is $\frac{1}{q} = \frac{0.538}{C} + 0.657$

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือและความกรุณาจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางแก้ไขโครงการพิเศษนี้ ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ ผศ.ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย และดร.สามารถ คงทวีเลิศ ที่ให้ความรู้ และชี้แนะแนวทางแก้ไขโครงการพิเศษนี้ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้ความรู้และคำแนะนำ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหา

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์และสารเคมี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ช่วยติดต่อประสานงาน ทำให้โครงการพิเศษนี้ดำเนินลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์สาร

ขอขอบพระคุณครอบครัว รุ่นพี่ และเพื่อนๆ ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจที่ดีตลอดมา

นายฉัตรฉัตร

แย้มคงเมือง

นางสาวจิราภรณ์

จิวิประเสริฐ

นางสาวณัฐญา

จันทวน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 โลหะหนัก	4
2.1.1 แหล่งกำเนิดและที่มาของการปนเปื้อนของโลหะหนักในตะกอนในแหล่งน้ำ	5
2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบของโลหะหนักในแหล่งน้ำ	7
2.2 กระบวนการดูดซับ	8
2.2.1 ทฤษฎีการดูดซับ	8
2.2.2 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี	11
2.2.3 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล	12
2.2.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ	13
2.3 โลหะฟอสเฟต	16
2.4 เมทิลีนบลู	17
2.4.1 สมบัติของเมทิลีนบลู	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 การนำเมทิลีนบลูมาใช้ประโยชน์	18
2.4.3 ความเป็นพิษของเมทิลีนบลู	18
2.5 เทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ	18
2.5.1 Thermogravimetric Analysis (TGA)	19
2.5.2 Fourier Transform InfraRed Spectrometer (FT-IR)	19
2.5.3 X-Ray Diffraction (XRD)	24
2.5.4 Scanning Electron Microscope (SEM)	25
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมี	29
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	29
3.3 การเตรียมแมกนีเซียมไฟโรฟอสเฟตและทดสอบการดูดซับ	30
3.3.1 การเตรียมแมกนีเซียมไฟโรฟอสเฟต	30
3.3.2 การทดสอบการดูดซับด้วยสารละลายเมทิลีนบลู	31
3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ (Characterization)	32
3.4.1 วิเคราะห์การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อน	32
3.4.2 วิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของสาร	32
3.4.3 วิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐาน	32
3.4.4 วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของสารในระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์	33
3.5 วิเคราะห์พฤติกรรมการดูดซับ	33
3.5.1 วิเคราะห์การดูดกลืนแสง	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 การเตรียมแมกนีเซียมไฟโรฟอสเฟต	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตและแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต	35
4.2.1 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA	36
4.2.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของสารด้วยเทคนิค FT-IR	37
4.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐานด้วยเทคนิค XRD	40
4.2.4 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของสารในระดับจุลภาคด้วย SEM	42
4.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมการดูดซับ	43
4.3.1 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-VIS	43
4.3.2 การสร้างกราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู	43
4.3.3 การดูดซับของสารละลายเมทิลีนบลูบนพื้นผิวแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต	45
4.3.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ	46
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 การเตรียมแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต	50
5.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตและแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต	50
5.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมการดูดซับ	52
5.4 ข้อเสนอแนะ	53
เอกสารอ้างอิง	54
ภาคผนวก ก	57
ภาคผนวก ข	65

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ตารางแสดงสมบัติต่างๆของเมทิลีนบลู	18
ตารางที่ 2.2	ตารางแสดงแถบการสั่นพื้นฐานของโมเลกุลน้ำในผลึกในช่วงเลขคลื่นต่างๆ	22
ตารางที่ 2.3	ตารางแสดงรูปแบบการสั่นพื้นฐานของอโทฟอสเฟตแอนไอออน	22
ตารางที่ 2.4	ตารางแสดงรูปแบบการสั่นพื้นฐานของไพโรฟอสเฟตแอนไอออน	23
ตารางที่ 4.1	ตารางแสดงปริมาณและร้อยละผลผลิต (%yield) ของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($MgHPO_4$) และแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$)	35
ตารางที่ 4.2	ตารางแสดงรูปแบบการสั่นพื้นฐานของโมเลกุลน้ำในโครงผลึก(H_2O) และอโทฟอสเฟตแอนไอออน (PO_4^{3-}) ที่แถบความยาวคลื่นต่างๆ	39
ตารางที่ 4.3	ตารางแสดงรูปแบบการสั่นพื้นฐานของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) ที่มีหน่วยย่อยของโครงสร้างเป็นไพโรฟอสเฟตแอนไอออน($P_2O_7^{4-}$) ที่แถบความยาวคลื่นต่างๆ	39
ตารางที่ 4.4	ตารางผลการคำนวณค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของ $Mg_2P_2O_7$	41
ตารางที่ 4.5	ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู	44
ตารางที่ 4.6	ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลู	45
ตารางที่ 4.7	ตารางแสดงค่าความเข้มข้นเริ่มต้น ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู ที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดซับ	46
ตารางที่ 5.1	ตารางแสดงรูปแบบการสั่นพื้นฐานของโมเลกุลน้ำในโครงผลึก (H_2O) และอโทฟอสเฟตแอนไอออน (PO_4^{3-}) ที่แถบช่วงความยาวคลื่นต่างๆ	51
ตารางที่ 5.2	ตารางแสดงรูปแบบการสั่นพื้นฐานของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟตที่มีหน่วยย่อยของโครงสร้างเป็นไพโรฟอสเฟตแอนไอออน ($P_2O_7^{4-}$) ที่ช่วงแถบความยาวคลื่นต่างๆ	52
ตารางที่ ก.1	ตารางแสดงปริมาณและร้อยละผลผลิตของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่ได้จากการสังเคราะห์ผ่านวิธีการตกตะกอน	58
ตารางที่ ก.2	ตารางแสดงปริมาณและร้อยละผลผลิต (%yield) ของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ $550\text{ }^{\circ}C$	59

สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ ก.3	ตารางแสดงพีคหลัก (2θ) ของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$)	61
ตารางที่ ก.4	ปริมาณสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 100 ppm และน้ำกลั่น ปราศจากไอออนที่ใช้เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู	63
ตารางที่ ก.5	ปริมาณสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 100 ppm และน้ำกลั่น ปราศจากไอออนที่ใช้เตรียมสารละลายเมทิลีนบลู	64
ตารางที่ ข.1	ตารางแสดงผลการทดลองค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน เมทิลีนบลู	65
ตารางที่ ข.2	ตารางแสดงผลการทดลองค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลู	66
ตารางที่ ข.3	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของสารละลายเมทิลีนบลู	66
ตารางที่ ข.4	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรูนดลิคซ์ของสารละลายเมทิลีนบลู	71

สารบัญรูปภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	กลไกการดูดซับ	12
รูปที่ 2.2	สูตรโครงสร้างเมทิลีนบลู	17
รูปที่ 2.3	แผนภูมิตะบบ The Michelson Interferometer	20
รูปที่ 2.4	รูปแบบการสั่นพื้นฐานของโมเลกุลน้ำในผลึกที่ช่วงเลขคลื่นต่างๆ	22
รูปที่ 2.5	รูปแบบการสั่นพื้นฐานของอโทฟอสเฟตแอนไอออน	23
รูปที่ 2.6	ค่าระยะห่าง (d) ของระนาบ	24
รูปที่ 2.7	หลักการการทำงานของเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)	26
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงการสลายตัวทางความร้อนของ $MgHPO_4$	36
รูปที่ 4.2	สเปกตร้า FTIR ของ $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$ (a) และสเปกตร้า FTIR ของ $Mg_2P_2O_7$ (b)	38
รูปที่ 4.3	การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสซิลลูชันด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของสาร $Mg_2P_2O_7$ เทียบกับกราฟมาตรฐาน PDF#720019	41
รูปที่ 4.4	ภาพถ่าย SEM ของ $Mg_2P_2O_7$ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (a) และภาพถ่าย SEM ของ $Mg_2P_2O_7$ ที่กำลังขยาย 5000 เท่า (b)	42
รูปที่ 4.5	กราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู	44
รูปที่ 4.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู ที่สถานะสมดุล (C) กับความสามารถในการดูดซับ (q)	47
รูปที่ 4.7	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์	48
รูปที่ 4.8	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิคซ์	49
รูปที่ ข.1	กราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู	65
รูปที่ ข.2	ไอโซเทอมการดูดซับของสารละลายเมทิลีนบลูแบบแลงเมียร์	67
รูปที่ ข.3	ไอโซเทอมการดูดซับของสารละลายเมทิลีนบลูแบบฟรุนดลิคซ์	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นมลภาวะทางน้ำ ทางดิน หรือทางอากาศ โดยเฉพาะมลภาวะทางน้ำที่เป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ทั้งด้านสุขภาพและเศรษฐกิจ ซึ่งมลภาวะทางน้ำเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น การใช้สารเคมีและวัตถุมีพิษทางการเกษตร การใช้ปุ๋ยโตรเคมีภัณฑ์ในชีวิตประจำวัน และ การใช้โลหะหนักในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงาน เช่น การปนเปื้อนโลหะหนักจากอุตสาหกรรมการผลิตเซรามิก ซึ่งจะมีการใช้โลหะหนักเคลือบและสีเขียน การปนเปื้อนโลหะหนักจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเหมืองแร่ และอุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่ เป็นต้น โดยโลหะที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมบางชนิด เช่น สังกะสี (zinc; Zn) โครเมียม (chromium; Cr) ทองแดง (copper; Cu) แมงกานีส (manganese; Mn) และเหล็ก (iron; Fe) เป็นโลหะที่มีความจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต สิ่งมีชีวิตต้องการโลหะเหล่านี้ในความเข้มข้นระดับหนึ่ง แต่หากว่ามีความเข้มข้นมากเกินไปก็จะเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต แต่โลหะบางชนิด เช่น แคดเมียม (cadmium; Cd) ตะกั่ว (lead; Pb) หรือปรอท (mercury; Hg) นอกจากจะไม่มี ความจำเป็นในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตแล้วยังมีความเป็นพิษสูงอีกด้วย

โลหะหนักที่ปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมและแหล่งน้ำ สุดท้ายจะ ไปสะสมกันอยู่ที่ตะกอนท้องน้ำ บางส่วนที่เหลือก็จะถูกพาออกสู่ทะเล อย่างไรก็ตาม โลหะที่ปนเปื้อนอยู่ในตะกอนอาจจะกลายเป็นแหล่งที่มาของการปนเปื้อนกลับเข้าสู่ผืนน้ำได้เมื่อสมดุลเคมีที่รอยต่อระหว่างตะกอนผิวหน้า (surface sediment) กับมวลน้ำเหนือผิวน้ำ (overlying water column) เปลี่ยนแปลงไปและปลดปล่อยโลหะหนักที่สะสมอยู่ในตะกอนออกสู่มวลน้ำ นอกจากนี้การที่ตะกอนเป็นแหล่งรองรับและสะสมโลหะหนักที่ปนเปื้อนเข้าสู่แหล่งน้ำ สิ่งมีชีวิตหน้าดิน (benthos) จึงมีโอกาสได้รับโลหะหนักไปสะสมอยู่ในร่างกาย ซึ่งจะถ่ายทอดผ่านห่วงโซ่อาหารไปสะสมในสิ่งมีชีวิตลำดับขั้นที่สูงขึ้น และท้ายที่สุดก็มาถึงมนุษย์ ซึ่งเป็นผู้บริโภคในลำดับขั้นสุดท้าย ทำให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพ เช่น โรคพาร์กินสัน (Parkinson's disease) โรคมะเร็ง (cancer) โรคไข้หวัดโลหะ (metal fume fever) โรคปอดจากการประกอบอาชีพ (Pneumoconiosis) โรคภูมิแพ้ผิวหนัง (asthma) เป็นต้น

ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่มีระบบการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพ มีระบบการกำจัดโลหะหนักก่อนปล่อยออกจากโรงงาน เช่น การตกตะกอนและกรอง (Precipitation and filtration) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane separation) เป็นต้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวไม่สามารถนำไปใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็กได้ เนื่องจากมีต้นทุนสูงและมีการทำงานที่ซับซ้อน ดังนั้นวิธีการกำจัดโลหะหนักโดยการดูดซับด้วยตัวดูดซับ (Adsorption) ซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและรวดเร็วจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ที่จะสามารถนำไปใช้ได้กับโรงงานอุตสาหกรรมดังกล่าวและเป็นประโยชน์อย่างมากในการลดสาเหตุของการเกิดมลภาวะทางน้ำ

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเตรียมตัวดูดซับโลหะหนักจำพวกโลหะฟอสเฟต คือแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) ซึ่งมีความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างช้าๆ จึงนับได้ว่าตัวดูดซับที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถสังเคราะห์ได้โดยวิธีการตกตะกอน จะได้กลุ่มแร่ฟอสเฟตในรูปแบบที่ไม่ละลายน้ำ มีโครงสร้างเป็นผลึกหรืออสัณฐาน นอกจากนั้นยังสามารถสังเคราะห์ได้จากห้องปฏิบัติการด้วยวิธีอื่นๆ เช่น การสังเคราะห์ด้วยไฮโดรเทอร์มอล วิธีโซล-เจล และวิธีการตกตะกอนร่วม เป็นต้น และศึกษาแนวโน้มของการดูดซับโลหะหนักโดยนำแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) ไปทดสอบการดูดซับกับสารละลายเมทิลีนบลู

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต
- 1.2.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการเตรียมและพฤติกรรมของการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต โดยมีตัวแปรดังต่อไปนี้
 - สารตั้งต้น ได้แก่ แมกนีเซียมไนเตรด
 - แหล่งที่มาของฟอสเฟต ได้แก่ กรดฟอสฟอริก
 - ตัวปรับความเป็นกรด-ด่าง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์
- 1.3.2 ภาวะที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 9, ความเร็วรอบการปั่นกววน 500 รอบต่อนาที, อุณหภูมิ 5 ± 1 องศาเซลเซียส

1.3.3 ตรวจสอบเอกลักษณ์ของแมกนีเซียมไฟโรฟอสเฟต ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

- การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อน (TGA)
- การวิเคราะห์เอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของสาร (FT-IR)
- การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสติฐาน (XRD)
- การวิเคราะห์ลักษณะออสติฐานของสารในระดับจุลภาค (SEM)
- การวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-VIS)

1.3.4 ศึกษาการดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแมกนีเซียมไฟโรฟอสเฟต

1.4.2 ได้ความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยแมกนีเซียมไฟโรฟอสเฟต เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปดูดซับโลหะหนัก

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก [1]

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นเกิน 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ได้แก่ ดีบุก สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว สารหนู พรอท เป็นต้น

โลหะเป็นองค์ประกอบหนึ่งของหินเปลือกโลกในธรรมชาติ เมื่อเปลือกโลกเกิดการกัดเซาะและพังทลาย โลหะบางส่วนจะถูกชะพาออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่การทำเหมืองแร่ หรือการเปิดหน้าดิน จะเร่งให้เกิดการชะล้างโลหะออกสู่สิ่งแวดล้อมได้มากขึ้น โลหะที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมจึงมีที่มาจากธรรมชาติและมาจากกิจกรรมของมนุษย์ โลหะบางชนิด เช่น สังกะสี (zinc; Zn) ทองแดง (copper; Cu) โครเมียม (chromium; Cr) แมงกานีส (manganese; Mn) และเหล็ก (iron; Fe) เป็นโลหะที่มีความจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต สิ่งมีชีวิตต้องการโลหะเหล่านี้ในความเข้มข้นระดับหนึ่ง แต่หากว่ามีความเข้มข้นมากเกินไปก็จะเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต แต่โลหะบางชนิด เช่น แคดเมียม (cadmium; Cd) ตะกั่ว (lead; Pb) หรือปรอท (mercury; Hg) นอกจากจะไม่มี ความจำเป็นในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตแล้วยังมีความเป็นพิษสูงอีกด้วย

โลหะหนักที่ปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมและแหล่งน้ำ ท้ายที่สุดจะไปสะสมกันอยู่ในตะกอนท้องน้ำ บริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างแม่น้ำและทะเลที่เรียกว่า เอสทูรี (estuary) ที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะกายภาพทางเคมี (physicochemical condition) มาก โลหะหนักที่ปนเปื้อนมากับมวลน้ำจะถูกกำจัดออกไปสะสมอยู่กับตะกอน บางส่วนที่เหลือก็จะถูกพาออกสู่ทะเล อย่างไรก็ตาม โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในตะกอนอาจจะกลายเป็นแหล่งที่มาของการปนเปื้อนกลับเข้าสู่มวลน้ำได้ เมื่อสภาวะกายภาพทางเคมีของแหล่งน้ำเปลี่ยนแปลง ทำให้สมดุลเคมี ณ รอยต่อระหว่างตะกอนผิวหน้ากับมวลน้ำเหนือผิวตะกอนเปลี่ยนแปลงไปและปลดปล่อยโลหะหนักที่สะสมอยู่ในตะกอนออกสู่มวลน้ำ นอกจากนี้การที่ตะกอนเป็นแหล่งรองรับและสะสมโลหะหนักที่ปนเปื้อนเข้าสู่แหล่งน้ำ สิ่งมีชีวิตน้ำดิน จึงมีโอกาสได้รับโลหะหนักไปสะสมอยู่ในร่างกาย ซึ่งจะถ่ายทอดผ่านห่วงโซ่อาหารไปสะสมในสิ่งมีชีวิตในลำดับขั้นที่สูงขึ้น และท้ายที่สุดก็มาถึงมนุษย์ซึ่งเป็นผู้บริโภคในลำดับขั้นสุดท้าย

2.1.1 แหล่งกำเนิดและที่มาของการปนเปื้อนของโลหะหนักในตะกอนในแหล่งน้ำ [2]

ตะกอน หมายถึง เศษแตกหักของของแข็ง หรือมวลของแข็ง ทั้งที่เป็นอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งเกิดจากการผุพังทลายของหิน โดยมีกระแสลม กระแสน้ำ หรือธารน้ำแข็ง เป็นตัวกลางพัดพาให้ไปตกตะกอนในที่ต่างๆ หรืออาจจะเกิดจากการแยกตัวออกจากสารละลายโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีที่เกิดขึ้นในมวลน้ำ หรือจากสารที่ขับออกมาจากร่างกายของสิ่งมีชีวิต แล้วตกตะกอนนอนก้นและสะสมอยู่บนพื้นท้องน้ำ ในระหว่างที่ตะกอนถูกพัดพาเคลื่อนย้ายจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งนั้นตะกอนจะผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางธรณีเคมี (geochemical) ดังนั้นองค์ประกอบของตะกอนจึงอาจจะแตกต่างจากหินต้นกำเนิด (parent rock) การเปลี่ยนแปลงต่างๆ นี้ยังคงเกิดอย่างต่อเนื่องหลังจากที่ตะกอนนอนก้นแล้ว โดยกระบวนการก่อตัวใหม่ (diagenesis) ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของตะกอนเอง และสภาวะกายภาพทางเคมีของสิ่งแวดล้อมบริเวณนั่นเอง

ตะกอนมีบทบาทสำคัญในการเป็นแหล่งเก็บสะสมและเก็บกักมลสารในแหล่งน้ำ ตะกอนสามารถยึดเกาะหรือดูดซับมลสาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถดูดซับโลหะหนักไว้กับอนุภาคของมัน และนำพามลสารเหล่านี้ไปปลดปล่อยยังที่ต่างๆ ที่มันไปตกตะกอน

จากการที่โลหะหนักเป็นองค์ประกอบของหินเปลือกโลก ดังนั้นจึงพบโลหะหนักอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม รูปแบบของโลหะที่ถูกตรึงอยู่ในโครงสร้างแร่หรือโลหะที่จับตัวเป็นผลึก จะแสดงความเป็นพิษได้น้อยมาก การกักเซาะพังทลายให้เป็นอนุภาคนขนาดเล็กที่มีโครงสร้างและมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้เกิดการสะสมโลหะหนักในรูปแบบของโลหะที่ไม่จับตัวเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งโลหะหนักส่วนนี้จะถูกปลดปล่อยออกสู่ธรรมชาติได้ง่าย เนื่องจากความแข็งแรงของพันธะทางเคมีที่ยึดเหนี่ยวไว้มีน้อยกว่าพันธะที่ยึดเหนี่ยวโลหะไว้กับโครงสร้างแร่ ดังนั้นเมื่อสภาวะกายภาพทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป โลหะส่วนนี้จึงถูกปลดปล่อยออกมาอยู่ในรูปแบบที่สิ่งมีชีวิตสามารถรับเข้าสู่ร่างกายได้ง่าย จึงอาจเรียกโลหะส่วนนี้ว่า “bioavailable metals” โลหะส่วนนี้หลายตัวมีความเป็นพิษสูงและถ่ายทอดไปยังสิ่งมีชีวิตในลำดับขั้นที่สูงขึ้นไป ความเข้มข้นของโลหะหนักในดินตามธรรมชาติที่ปราศจากการปนเปื้อนจากกิจกรรมของมนุษย์ จะถูกควบคุมโดยลักษณะธรณีวิทยาของกลุ่มน้ำและผันแปรตามวัตถุต้นกำเนิด ปริมาณสารอินทรีย์ เนื้อดิน และระดับความลึกของดิน หากว่าโลหะนั้นมีมากโดยธรรมชาติ ก็จะทำให้บริเวณนั้นมีค่าความเข้มข้นพื้นฐานสูง เช่น อลูมิเนียม และเหล็ก แต่โลหะบางชนิดมีความเข้มข้นในโครงสร้างเปลือกโลกต่ำ ค่าความเข้มข้นพื้นฐานก็จะต่ำด้วย เช่นปรอท แคดเมียม เงิน และเชเลเนียม เป็นต้น

แคลเซียม โครเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี เป็นโลหะที่มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย โลหะทั้งห้านี้มีแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ และการนำมาใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการปนเปื้อนของโลหะเหล่านี้จึงมีลักษณะแตกต่างกันออกไปตามการใช้ประโยชน์

แคลเซียม เป็นโลหะสีขาวคล้ายเงิน ในสภาพธรรมชาติแคลเซียมเป็นสารเจือปนในสินแร่สังกะสี เช่น ในสินแร่สฟาเลอไรต์หรือคาลาไมน์ ($ZnCO_3$) ฉะนั้นในการทำเหมืองสังกะสี จะได้แคลเซียมซึ่งเป็นผลพลอยได้ การปนเปื้อนของแคลเซียมในสิ่งแวดล้อมเกิดจากการนำแคลเซียมมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในการทำโลหะผสมที่หลอมละลายได้ง่าย ใช้ฉาบผิวเหล็กกล้ากันสนิม ใช้ทำเครื่องรองรับส่วนเคลื่อนที่ในเครื่องยนต์ และในการชุบด้วยไฟฟ้า แคลเซียมมีคุณสมบัติเป็นตัวควบคุมนิวตรอนได้ดี จึงใช้เป็นแท่งควบคุมปฏิกิริยาในเตาปฏิกรณ์

โครเมียม เป็นโลหะสีขาวแข็งคล้ายเหล็ก พบในแร่โครไมต์ไอออน เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมเนื่องมาจากมีการนำมาใช้งานด้านอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น นำมาผสมกับโลหะทำให้เกิดความแข็งแรงทนทาน ทำให้โลหะไม่เป็นสนิมทนต่อการผุกร่อน โลหะโครเมียมที่บริสุทธิ์ใช้มากในอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า สารประกอบของโครเมต (chromate) ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา อุตสาหกรรมฟอกหนัง และการย้อมสีขนสัตว์

ทองแดง พบในแร่แคลโคไพไรต์ ($CuFeS_2$) บอร์ไนท์ (Bu_3FeS_4) แคลโคไซต์ (Cu_2S) มาลาโคท์ ($Cu_2(OH)_2CO_3$) อาซูไรท์ ($Cu_3(OH)_2(CO_3)_2$) และคริสโซคลอรา ($CuSiO_3 \cdot H_2O$) ทองแดงเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดีรองจากเงิน จึงได้มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น ใช้ผลิตลวด สายไฟ ท่อน้ำ นอกจากนี้ ยังนำมาใช้เป็นสารเคมีทางการเกษตร สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์รบกวนต่างๆ รวมถึงการทำสีย้อม เป็นต้น ส่งผลให้มีการแพร่กระจายของทองแดงสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น

ตะกั่ว เป็นโลหะอ่อน สีเทา หรือขาวแกมน้ำเงิน พบในแร่กาไลนา (PbS) เซอร์ไรต์ไซต์ ($PbCO_3$) แองกลีไซต์ ($PbSO_4$) มีการนำตะกั่วในรูปอนินทรีย์มาใช้ประโยชน์มาก เช่น ใช้ทำฉนวนหุ้มสายเคเบิล ฉนวนกันกัมมันตรังสี ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกและแก้ว ใช้ทำเม็ดสี เช่น ตะกั่วขาวและตะกั่วแดง ซึ่งถ้ามีการนำเม็ดสีเหล่านี้มาใช้ทาของเล่นเด็กหรือดินสอจะเป็นอันตรายมาก ส่วนตะกั่วอินทรีย์ เช่น เตตระเมทิลเลดและเตตระเอทิลเลดใช้ผสมน้ำมัน ซึ่งตะกั่วแอลคิลเหล่านี้เป็นสารที่ถูกที่สุดในการเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมัน เมื่อเกิดการเผาไหม้ตะกั่วก็จะถูกปล่อยออกมากับไอเสียด้วย

สังกะสี พบได้ในแร่สฟาเลอไรต์ สมิทโซไนท์ เฮมิมอร์ไฟท์ วิลเลมไมท์ และแฟรงคลินไนท์ สังกะสีเกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการนำมาใช้ในอุตสาหกรรม เช่น การชุบโลหะ การทำบรอนซ์ ภาชนะโลหะเคลือบสี น้ำยารักษาคุณภาพไม้ ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เช่น ยาสระผมกันรังแค

โลหะหนักบางชนิด ยารักษาโรคผิวหนัง ยาฆ่าเชื้อโรค และในทางเกษตรก็มีการนำมาใช้เป็นสารคลุกเมล็ดฆ่าเชื้อรา

ถึงแม้จะพบว่าโลหะหนักมีแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ แต่ก็พบว่ามนุษย์เป็นตัวการที่เร่งให้เกิดการชะล้างโลหะออกสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น โลหะเหล่านี้แพร่กระจายในสิ่งแวดล้อม โดยฟุ้งกระจายไปในอากาศ หรือถูกพัดพาไปตามกระแสน้ำ และท้ายที่สุดจะไปสะสมอยู่ในดินหรือตะกอนที่ท้องน้ำ โลหะหนักที่ปนเปื้อนมาจากกิจกรรมของมนุษย์ อาจถูกปลดปล่อยออกสู่แหล่งน้ำ ทั้งจากแหล่งที่มาที่ระบุได้ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม ชุมชนหรือเมือง และเหมืองแร่ หรือจากแหล่งที่มาที่กระจาย โดยการชะพามาจากพื้นที่ชุมชนและพื้นที่การเกษตร โลหะเหล่านี้เมื่อเข้าสู่แหล่งน้ำ จะเกิดการสะสมในแหล่งน้ำ และผ่านกระบวนการทางชีวธรณีเคมี ถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิต

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบของโลหะหนักในแหล่งน้ำ [2]

โลหะหนักในแหล่งน้ำแพร่กระจายอยู่ในหลายรูปแบบ ทั้งที่เป็นสารละลาย ตรึงอยู่กับสารแขวนลอย ตรึงอยู่กับตะกอน หรือสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิต กระบวนการที่ควบคุมรูปแบบทางเคมีของโลหะในแหล่งน้ำ ประกอบด้วยกระบวนการดูดซับ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน การตกตะกอน และการดูดซึมไปใช้โดยสิ่งมีชีวิต กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นมากที่สุด

รูปแบบที่ละลายอยู่ในมวลน้ำของโลหะหนัก เป็นรูปแบบที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ ในสถานะที่แหล่งน้ำมีสถานะค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ มีอนุภาคแขวนลอยในน้ำน้อยและมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำสูง รูปแบบละลายของโลหะหนักในมวลน้ำจะมีมาก ทั้งนี้เพราะว่าในสถานะเหล่านี้ทำให้ค่าการละลายของโลหะเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับของพื้นที่ผิวของของแข็งลดลง นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนจะแข่งขันกับโลหะหนักในการเข้าจับกับโมเลกุลของสารอินทรีย์

ในสถานะที่น้ำมีความเค็มเพิ่มขึ้น โลหะจะละลายน้ำได้ลดลงและแยกตัวออกจากมวลน้ำ พร้อมทั้งทำให้โลหะอื่นที่ละลายอยู่ตกตะกอนร่วม (co-precipitate) นอกจากนี้ในสถานะที่แหล่งน้ำมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง หรือมีสารอินทรีย์ในตะกอนสูง อนุภาคของแร่ดินเหนียวที่มีสารอินทรีย์จับอยู่ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำจะจับตัวเป็นตะกอน (flocculate) และตกตะกอนอย่างรวดเร็ว โลหะหนักที่แยกตัวจากมวลน้ำ ไม่ว่าจะด้วยกระบวนการใด ก็จะตกตะกอนสะสมอยู่ที่ตะกอนที่ท้องน้ำ หรืออาจกระจายอยู่ในรูปตะกอนแขวนลอย

2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) [3]

2.2.1 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) หมายถึง การเพิ่มความเข้มข้นของสารที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (adsorbent) หรือในทางกลับกันเป็นการลดลงของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

การดูดซับจะเกิดได้ ก็ต่อเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ใช้ศึกษาอาจเป็น โมเลกุลของแก๊สหรือตัวทำละลายในสารละลาย การดูดซับของแก๊สหรือตัวถูกละลายในสารละลายจะเกิดขึ้นจนกระทั่งเกิดสมดุลระหว่าง โมเลกุลของแก๊สในสถานะแก๊สกับ โมเลกุลของแก๊สที่ผิวของของแข็ง หรือเกิดสมดุลระหว่าง โมเลกุลของตัวละลายในสารละลายกับ โมเลกุลของตัวถูกละลายที่ผิวของแข็ง

การดูดซับเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงดูด โมเลกุล หรือคอลลอยด์ ซึ่งอาจอยู่ในของเหลว หรือแก๊สให้มาเกาะและติดบนผิว ถือได้ว่าเป็นการเคลื่อนย้ายสารระหว่างสถานะต่างๆทั้ง 3 สถานะ ซึ่งมีได้ทั้งแบบของเหลว-ของเหลว แก๊ส-ของแข็ง และของเหลว-ของแข็ง ในกรณีการดูดซับได้กำหนดนิยามที่เกี่ยวข้องไว้ดังนี้

Adsorbate	หมายถึง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ โดยผิวของแข็ง หรือผิวของตัวดูดซับ
Adsorbent	หมายถึง ตัวดูดซับหรือสารที่มีผิวเป็นที่ยึดเกาะจับของ adsorbate
Adsorption	หมายถึง การดูดซับ
Absorption	หมายถึง การดูดซึม
Solute	หมายถึง โมเลกุลของสารหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลว
Sorption	หมายถึง การดูดติดทั้งสองชนิด ได้แก่ adsorption และ absorption

สำหรับการดูดซับ หรือการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวมายังผิวของของแข็ง เกิดขึ้นในสองลักษณะด้วยกัน คือ

ก. การไม่ชอบของเหลวของตัวถูกละลาย (Lyophobicity of solute)

ในกรณีที่ของเหลวเป็นน้ำ สารที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จะพยายามแทรกตัวอยู่ระหว่างน้ำกับของแข็ง และดูดติดที่ผิวของของแข็งในที่สุด

ข. ความชอบของตัวถูกละลายที่จะไปเกาะติดที่ผิวของของแข็ง (high affinity of solute to solid) โดยในการเกาะติดจะมีแรงอยู่ 3 แบบ ดังนี้

- แรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrical attraction force) มีลักษณะเป็นการแลกเปลี่ยนไอออน โดยไอออนที่มีประจุ จะไปแลกเปลี่ยนติดกับโมเลกุลของสารอื่นได้ พวกไดวาเลนต์ (divalent) จะดูดซับที่ผิวของวัตถุอื่นได้ดีกว่าพวกโมนวาเลนต์ (monovalent)

- แรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's force) จะมีลักษณะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) โดยตัวถูกละลายจะไม่เลือกเกาะติดที่ส่วนใดส่วนหนึ่ง แต่สามารถเกาะติดได้อย่างอิสระ และเคลื่อนที่ได้ในระหว่างผิวของสารทั้งสอง บางครั้งเรียกได้ว่าเป็นการดูดซับในอุดมคติ (ideal adsorption) การดูดซับแบบนี้เกิดขึ้นได้ดีในที่มีอุณหภูมิต่ำ

- ธรรมชาติทางเคมี (chemical nature) คือตัวถูกดูดซับจะเกิดปฏิกิริยากับตัวดูดซับ การดูดซับจะเกิดได้ดีในที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) โดยการดูดซับในลักษณะนี้ ตัวถูกดูดซับจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในระหว่างผิวของสารทั้งสอง และเป็นได้เฉพาะการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่านั้น

การดูดซับ เป็นกระบวนการแยกสารที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลว หรือแก๊ส โดยให้สารละลายหรือแก๊สผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ สารแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน ปรากฏการณ์ดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ สมบัติทางเคมีที่ผิวของตัวดูดซับ และสารที่เป็นตัวถูกดูดซับ โดยกลไกการดูดซับมี 2 ประเภท คือ

2.2.1.1 การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) เป็นผลที่เกิดจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่สูงมากเมื่อเทียบกับการจัดเรียงตัวของสารประกอบทางเคมี การดูดซับแบบนี้ จะอาศัยการสร้างพันธะทางเคมีระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ โดยมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนของทั้งสองฝ่าย มีความร้อนเกิดขึ้นสูง จากการศึกษาโดยอาศัยเทคนิคอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (electron spin resonance) และวัดค่าการตอบสนองต่อการเป็นแม่เหล็ก (magnetic susceptibility) สามารถยืนยันได้ว่ามีการดูดซับทางเคมี โดยเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature) ของตัวดูดซับ ความร้อนของการดูดซับมีค่าประมาณ 60 - 70 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่สารสามารถถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น (monomolecular

layer) และเกิดขึ้นอย่างจำเพาะเจาะจง กล่าวคือ จะเกิดได้ก็ต่อเมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากันได้เท่านั้น และการดูดซับทางเคมีไม่สามารถเกิดผันกลับได้ (irreversible) หรือผันกลับได้แต่น้อยมาก ใช้เวลาการดูดซับนาน นั่นคือ เมื่อเกิดการดูดซับแล้วจะไม่มีสารหลุดออกมา หรือถ้าหลุดออกมาก็อาจทำได้โดยวิธีที่ยุ่งยาก และมักมีการเปลี่ยนรูปไป จากการศึกษาถ้าให้เกิดการผันกลับทำได้โดยการให้ความร้อนกับตัวดูดซับเพื่อขจัดตัวถูกดูดซับให้หลุดออกไปได้

2.2.1.2 การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) เป็นการดูดซับที่มีแรงกระทำอย่างอ่อนๆ ระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะอยู่ที่ผิวของตัวดูดซับ โดยอาศัยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยกว่า 50 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับทางกายภาพนี้ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้เป็นแบบชั้นเดียวที่ความดันต่ำและเป็นแบบหลายชั้น (multi molecular layer) ที่ความดันสูง หรือตัวถูกดูดซับอาจเกิดการดูดซับในลักษณะของการดูดซับแบบหลายชั้นซ้อนกัน (superimpose layers) บนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งการดูดซับแบบนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างถาวร จะเกิดการผันกลับได้ง่าย (reversible) การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการดูดซับทางเคมี หรือถึงสภาวะสมดุลได้เร็วกว่า เพราะไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานกระตุ้น (activation energy) เหมือนการดูดซับทางเคมี ยกเว้นในกรณีที่รูพรุนของตัวดูดซับมีขนาดเล็กมากจะทำให้อัตราการดูดซับช้าลง การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างไม่จำเพาะเจาะจง กล่าวคือ สารต่างๆสามารถถูกดูดซับบนผิวได้ และการแยกสารที่ถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับทำได้โดยง่าย เช่น อาจทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิ หรือลดความดัน ซึ่งจะเกิดการปล่อย หรือคายสารที่ดูดซับออกมา (desorption) การปลดปล่อยดังกล่าวจะไม่มีผลทำให้ตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับเปลี่ยนแปลง การดูดซับจะไม่ทำให้ตำแหน่งเฉพาะที่ทำหน้าที่ดูดซับหมดไป ซึ่งเป็นผลจากแรงดึงดูดประเภทรแวงแวนเดอร์วาลส์ และแรงดึงดูดระหว่างขั้วมากกว่าการเกิดพันธะ

นอกจากกระบวนการดูดซับทางกายภาพที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์แล้ว ยังมีกระบวนการดูดซับที่เกิดจากแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) ซึ่งอาจเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่มีขั้ว และโมเลกุลที่ไม่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วด้วยกัน หรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่มีขั้ว โดยรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเกิดจากการจัดเรียง โมเลกุล (orientation effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม

ข. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากการกระจาย (dispersion effect) ซึ่งเห็นได้จากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ด้านใด

ด้านหนึ่งมากและเมื่อ โมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามาก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ซึ่งแรงนี้มักจะเป็นแรงอ่อนๆ เช่น แรงดึงดูดระหว่างสารอินทรีย์และถ่านกัมมันต์

ค. แรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลที่มีขั้วกับ โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องจากการเหนี่ยวนำ (induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วแล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้าม ทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

การดูดซับทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลในวัฏภาคแก๊สหรือของเหลวเข้าใกล้และยึดติดกับของแข็ง ซึ่งเป็นผลจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งซึ่งเป็นตัวดูดซับซึ่งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของ โมเลกุลของสารที่อยู่ภายในของเหลวหรือแก๊สได้

2.2.2 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี [4]

1. การดูดซับทางกายภาพไม่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน
2. การดูดซับทางกายภาพจะไม่จำกัดเกี่ยวกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปเกาะส่วนใดก็ได้ แต่การดูดซับทางเคมีจะเลือกเฉพาะบริเวณที่เกิดพันธะได้เท่านั้น
3. ค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าต่ำ ซึ่งมีค่าเท่ากับความร้อนของการกลายเป็นของเหลว เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางเคมีจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น แต่ค่าความร้อนของการดูดซับก็ไม่ใช่ว่าที่สำคัญในการพิจารณา
4. การดูดซับทางกายภาพจะมีการเกิดขึ้นหลายโมเลกุล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นสมบูรณ์เมื่อมีการเกิดขึ้นที่ 1 แล้ว ซึ่งบางครั้งการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวของการดูดซับทางเคมีก็ได้
5. การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นอย่างทันที (เป็นการแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับซึ่งต้องใช้เวลาพอสมควร) ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างทันทีเช่นเดียวกันแต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้นด้วย

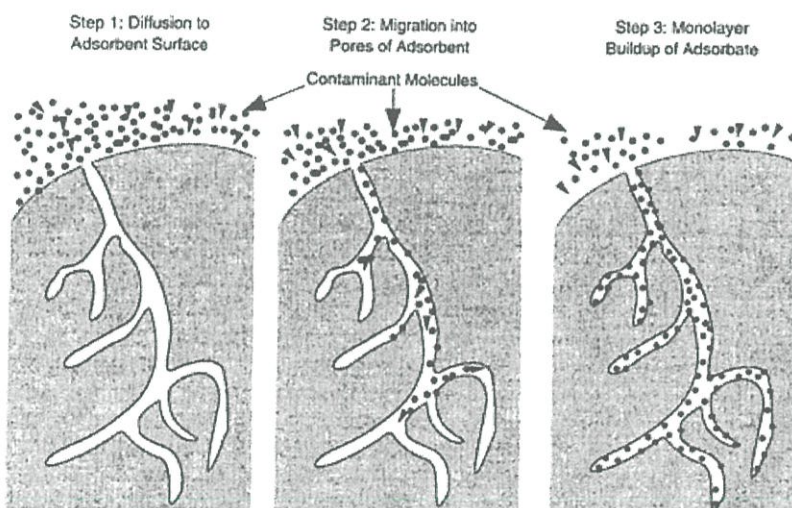
2.2.3 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer)

2.2.3.1 กลไกการดูดซับ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การแพร่ภายนอก (External Diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงสารดูดซับ ซึ่งพื้นผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มอยู่ โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของสารดูดซับ

2. การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างของสารดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

3. ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายติดที่ผิวของสารดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นความต้านทานจากกระบวนการนี้จึงละเลยได้



รูปที่ 2.1 กลไกการดูดซับ [4]

2.2.3.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer)

อัตราการดูดซับมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจึงทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับของสารละลายมี 3 ขั้นตอน คือ

1. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆที่ห่อหุ้มด้วยสารดูดซับ
 2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆแทรกตัวอยู่สู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดการดูดซับเช่นเดียวกัน
 3. การขนส่งภายในอนุภาค (Pore Diffusion) เป็นการแพร่ของ โมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดการดูดซับเช่นเดียวกัน
- ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งผ่านชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ แต่หากว่าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

2.2.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ [5]

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีต่อการดูดซับ คือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกละลาย อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกละลายและสารดูดซับ ดังนั้นในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับคงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายกับความดันของแก๊สหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนพื้นผิวของแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ (สภาวะสมดุล หมายถึง สภาวะที่ผิวของสารดูดซับอิ่มไปด้วยสารถูกละลายจนไม่มีพื้นที่สำหรับสารถูกละลายอื่นมาเกาะแล้ว) โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า ไอโซเทอม (isotherm)

ไอโซเทอมของการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้หลายแบบ ทั้งนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของสารถูกละลาย ลักษณะของพื้นที่ผิวของสารดูดซับ และรูปแบบการดูดซับของสารถูกละลายบนผิวของสารดูดซับ ว่ามีการจับกันแบบชั้นเดียว (Mono-layer) หรือหลายชั้น (Multi-layer) เป็นต้น โดยสมการที่สามารถใช้เพื่ออธิบายลักษณะของ ไอโซเทอมของการดูดซับมีอยู่หลากหลาย แต่สมการที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ สมการของแลงเมียร์ (Langmuir) และสมการของฟรอนดลิคซ์ (Freundlich)

2.2.4.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ. 1916 เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอมแบบง่ายสุด โดยมีสมมติฐานคือ 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับ โมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน

จากการศึกษาไอโซเทอมของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายได้ ดังสมการ

$$q = \frac{q_m k_L C}{1 + k_L C} \quad \text{----- (2.1)}$$

เมื่อ q คือ ความสามารถในการดูดซับซึ่งคำนวณได้จากปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (mg/g)

q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/g)

k_L คือ ค่าคงที่การดูดซับของแลงเมียร์

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุล (mg/l)

จากสมการนี้สามารถจัดให้อยู่ในสมการเชิงเส้น ได้ดังนี้

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{q_m k_L} + \frac{C}{q_m} \quad \text{----- (2.2)}$$

หรือ

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m k_L C} + \frac{1}{q_m} \quad \text{----- (2.3)}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ กับ $\frac{1}{C}$ จะสามารถหาค่าคงที่ k_L และ q_m ได้จากความชันและจุดตัดของกราฟ ตามลำดับ

2.2.4.2 ไอโซเทอมแบบฟรูนดลิคซ์ (Freundlich isotherm)

ในปี ค.ศ. 1880-1941 นักฟิสิกส์-เคมี ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ได้เสนอสมการสำหรับอธิบายไอโซเทอมของการดูดซับ ซึ่งใช้อธิบายกระบวนการดูดซับที่เป็นแบบผันกลับได้ และกระบวนการดูดซับไม่จำเป็นต้องเกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุดูดซับเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ดังสมการ

$$q = k_F (C_e)^{\frac{1}{n}} \quad : n > 1 \quad \text{----- (2.4)}$$

เมื่อ k_F คือ ค่าคงที่การดูดซับของฟรูนดลิคซ์
 C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุล (mg/l)
 $\frac{1}{n}$ คือ ตัวชี้กำลังของฟรูนดลิคซ์
 q คือ ความสามารถในการดูดซับ ซึ่งคำนวณได้จากปริมาณตัวถูกละลายบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (mg/g) ดังนี้

$$q = \frac{V(C_0 - C_e)}{W} \quad \text{----- (2.5)}$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่เวลาเริ่มต้น (mg/l)
 C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล (mg/l)
 V คือ ปริมาตรของสารผสม (l)
 W คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

โดยทั่วไป n จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง หาก n เข้าใกล้ 1 สมการฟรูนดลิคซ์จะเป็นไปตามกฎของเฮนรี (Henry's law) ที่ความสามารถในการดูดซับแปรผันตรงกับความดันซึ่งจะพบในช่วงต้นของไอโซเทอม หาก n เข้าใกล้ ∞ จะทำให้ $q = k_F$ ซึ่งเป็นค่าคงที่ ซึ่งจะพบในช่วงท้ายของไอโซเทอม กล่าวคือ เป็นช่วงที่การดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลนั่นเอง โดยเมื่อจัดสมการไอโซเทอมของการดูดซับของฟรูนดลิคซ์ (สมการที่ 2.4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงจะได้

$$\log q = \log k_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad \text{----- (2.6)}$$

ตามสมการไอโซเทอมของการดูดซับของฟรอนคลิคซ์ เราสามารถคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ ได้จากการสร้างกราฟระหว่าง $\log q$ (แกน y) และ $\log C_e$ (แกน x) จะได้ กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และจุดตัดแกน y เท่ากับค่า $\log k_f$

นอกจากสมการของแลงเมียร์และสมการของฟรอนคลิคซ์ ยังมีสมการอื่นที่สามารถใช้อธิบายไอโซเทอมของการดูดซับ เช่น สมการของบรูเนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller Isotherm, BET) ซึ่งความสัมพันธ์นี้ในปัจจุบันนิยมใช้สำหรับการหาพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Adsorbent)

2.3 โลหะฟอสเฟต [6]

โลหะฟอสเฟต เป็นสารประกอบที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย เช่น เป็นสีเคลือบเซรามิก ตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคลือบผิวโลหะป้องกันการกัดกร่อน และเป็นปุ๋ยที่มีความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างช้าๆ จึงนับได้ว่าเป็นสารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การที่ฟอสเฟตจะจัดเรียงตัวอยู่ในรูปแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ อัตราส่วนของฟอสฟอรัสต่อโลหะ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ชนิดของตัวปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง รวมถึงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา สารโลหะฟอสเฟตมีแหล่งที่มาสำคัญ 2 แหล่ง คือ เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และเกิดขึ้นจากฝีมือมนุษย์ด้วยการสังเคราะห์ขึ้น

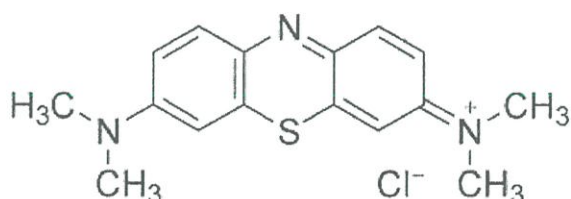
หน่วยย่อยของฟอสเฟตที่มักพบ [7] คือ Orthophosphate (PO_4^{3-}) Hydrogenphosphate (HPO_4^{2-}) Dihydrogenphosphate (H_2PO_4^-) Pyrophosphate ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) และ Cyclotetraphosphate ($\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$) สำหรับสารแร่ฟอสเฟตที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจะเกิดผ่านกลไกที่เรียกว่า “ กระบวนการเฟอร์โรไลซิส (Ferrolysis process) ” โดยเกิดผ่านปฏิกิริยารีดักชัน ด้วยสภาวะความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลา และอุณหภูมิที่เหมาะสม ส่วนใหญ่เกิดตะกอนโลหะฟอสเฟตที่มีความสามารถละลายน้ำได้น้อยมาก เช่น $\text{MnPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ หรือ $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ โดยจะเกิดการตกตะกอนระหว่างปุ๋ยฟอสเฟตที่มาจากกาใส่ปุ๋ยของเกษตรกร และแร่ธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบภายในดินเองที่สภาวะที่เป็นกรดหรือด่างที่เหมาะสม และสำหรับโลหะฟอสเฟตที่เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้นจากฝีมือมนุษย์ ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นที่นิยมมากในปัจจุบัน เพราะสามารถกำหนดให้เกิดโลหะฟอสเฟตในรูปแบบตามที่ต้องการได้ ซึ่งมีความสนใจสังเคราะห์สารในกลุ่มฟอสเฟตในรูปแบบต่างๆ มากมาย

มีการศึกษาอย่างแพร่หลายเกี่ยวกับการใช้วัสดุฟอสเฟตเพื่อการบำบัดดินปนเปื้อนโลหะหนักชนิดของวัสดุฟอสเฟตที่แตกต่างกัน [8] เช่น อะพาไทต์ หินฟอสเฟต บัญฟอสเฟต และกรดฟอสฟอริก มีผลต่อความสามารถในการคงสภาพของโลหะหนัก ได้ทดลองบำบัดดินปนเปื้อน Pb และ Zn ที่ได้รับผลกระทบโดยของเสียจากเหมือง ด้วยฟอสเฟตอนินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ (Na_2HPO_4) และพบว่าเกิดการตกตะกอนของโลหะหนักกับฟอสเฟตซึ่งไม่ละลายน้ำจึงเป็นการลดการเคลื่อนย้ายของตะกั่ว และสังกะสี การตกตะกอนของตะกั่ว กับฟอสฟอรัสมักตกตะกอนในรูปของแร่คลอโรไพโรมอร์ไฟท์ (chloropyromorphite; $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$) ซึ่งเป็นรูปที่เสถียรของตะกั่ว

2.4 เมทิลีนบลู (methylene blue) [3]

2.4.1 สมบัติของเมทิลีนบลู

สารประกอบเมทิลีนบลูเป็นสารอินทรีย์กลุ่มสารประกอบพวกเฮเทอโรไซคลิก อะโรมาติก (heterocyclic aromatic) ที่ย่อยสลายยาก ซึ่งมีสูตรทางเคมี คือ $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{ClS}$ หรือสามารถเรียกชื่อตามระบบ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ว่า 3,7-bis (dimethylamino)-phenazathionium chloride หรือ tetramethylthionine chloride โดยมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.2 ลักษณะเป็นผลึกสีเขียวเข้ม และละลายน้ำจะเป็นสีน้ำเงิน โดยสมบัติต่างๆของเมทิลีนบลู แสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2 สูตร โครงสร้างเมทิลีนบลู [3]

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงสมบัติต่างๆของเมทิลีนบลู [3]

สมบัติทั่วไป	มวลโมเลกุล (g/mol)	319.85
สมบัติทางกายภาพ และเคมี	ลักษณะ	ของแข็ง
	จุดหลอมเหลว (K)	463.15
	ความสามารถในการละลายน้ำ (g/100 cm ³)	4
	ความสามารถในการละลายแอลกอฮอล์ (g/100 cm ³)	1.54

2.4.2 การนำเมทิลีนบลูมาใช้ประโยชน์

ในปัจจุบัน เมทิลีนบลูถูกใช้เป็นสีย้อมในอุตสาหกรรมสีต่างๆ เนื่องจากเมทิลีนบลูเมื่อละลายน้ำแล้วให้สีน้ำเงิน และยังใช้เป็นอินดิเคเตอร์ในการทดสอบความเป็นกรด-ด่างของสารละลายได้อีกด้วย นอกจากนี้ เมทิลีนบลูยังถูกใช้เป็นยาฆ่าเชื้อในลำไส้ ยาฆ่าเชื้อทางเดินปัสสาวะ และยาฆ่าเชื้อมาเลเรียอย่างอ่อน

2.4.3 ความเป็นพิษของเมทิลีนบลู

ถ้ามนุษย์ได้รับเมทิลีนบลูเข้าสู่ร่างกายมากเกินไป อาจมีอาการแสบร้อนในปากหรือท้องคลื่นไส้ อาเจียน นอกจากนี้จะมีอาการปวดศีรษะ เจ็บหน้าอก แน่นหน้าอก หายใจเร็ว เกิดอาการวิตกกังวล บางรายจะเกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินปัสสาวะ ทำให้ปัสสาวะขุ่นหรือปัสสาวะบ่อย นอกจากนี้ เมทิลีนบลูยังอาจทำให้ผิวหนังมีสีน้ำเงิน (bluish skin) ได้

2.5 เทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ

โครงการวิจัยนี้ได้มีการศึกษาเอกลักษณ์ของโลหะแมกนีเซียมฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) ที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้เทคนิคต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.5.1 Thermogravimetric Analysis (TGA) [9]

Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุ โดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน โดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊ส หรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry)

หลักการและวิธีการวิเคราะห์

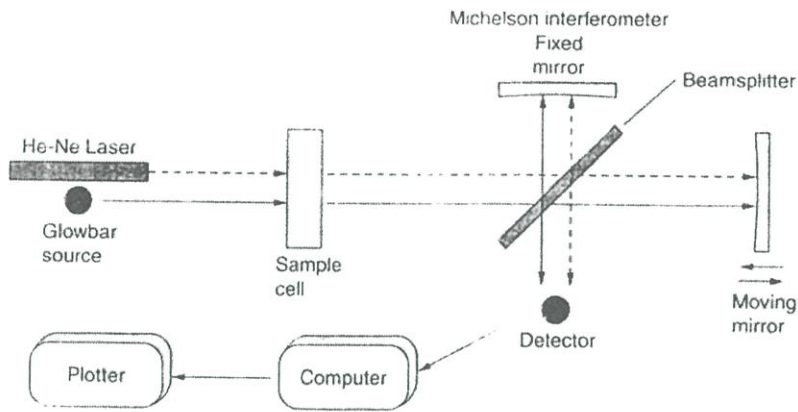
ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น ออกซิเจน หรือออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

2.5.2 Fourier Transform InfraRed Spectroscopy (FT-IR) [10]

Fourier Transform InfraRed Spectrometer (FT-IR Spectrometer) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงที่พัฒนามาจาก เครื่อง IR Spectrometer เพื่อให้สามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้น มีความสามารถในการแยกสูง และสภาพไวสูง สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีในปริมาณน้อยๆ ได้

หลักการและวิธีการวิเคราะห์

แหล่งกำเนิดคลื่นอินฟราเรดของเครื่อง FT-IR Spectrometer เป็นแท่งเซรามิกที่เผาด้วยขดลวดความร้อน ทำให้เกิดรังสีอินฟราเรด สู่กระจกเงาที่ทำด้วยโลหะขัดมัน สะท้อนคลื่นแสงสู่ส่วนสำคัญ คือ ตัวแยกแสง (Beam Splitter) เพื่อแยกคลื่นแสงออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ส่วนหนึ่งจะผ่านทะลุออกไป อีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับสู่กระจกเงาที่เคลื่อนที่ได้ โดยมีแสงเลเซอร์ปรับระยะการเคลื่อนที่ของกระจก ให้ที่ระยะและทิศทางที่คลื่นแสงทั้งสองส่วนมารวมกันเป็นลำแสงเดี่ยวผ่านไปยังสารตัวอย่าง ซึ่งเรียกระบบนี้ว่า The Michelson Interferometer ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภูมิระบบ The Michelson Interferometer [10]

คลื่นรังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้อยู่ระหว่างย่านที่มองเห็น (Visible region) กับย่านไมโครเวฟ ความยาวของคลื่นอินฟราเรด แบ่งเป็นช่วงๆ คือ ช่วง wave number 4,000-12,800 cm^{-1} เป็นย่านอินฟราเรดใกล้ (Near infrared region) ช่วง wave number 200-4,000 cm^{-1} เป็นย่านอินฟราเรดกลาง (Middle infrared region) ช่วง wave number 10-200 cm^{-1} เป็นย่านอินฟราเรดไกล (Far infrared region) นักเคมีวิเคราะห์จะให้ความสนใจและใช้ประโยชน์รังสีอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle IR.) มากกว่าช่วงอื่น

คลื่นอินฟราเรดในช่วง wave number 400-4,000 cm^{-1} ซึ่งจัดเป็นแสงอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle IR.) มีความถี่ซึ่งตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นอินฟราเรดที่พอเหมาะจะเกิดการสั่นหรือการหมุนของพันธะโมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์คู่ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสง แล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมา แสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือ wave number กับค่าการส่งผ่านของแสง เรียกว่าอินฟราเรด สเปกตรัม (Infrared Spectrum-IR spectrum)

อินฟราเรดสเปกตรัมเป็นข้อมูลเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด ซึ่งแตกต่างจากสารชนิดอื่น โมเลกุลที่มีพันธะต่างชนิดกันจะมีความถี่ของการดูดกลืนคลื่นต่างกัน ทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของโมเลกุลของสารนั้นๆว่ามีหมู่ฟังก์ชันอะไรบ้าง ในตำแหน่งไหน เช่น สารกลุ่มแอลกอฮอล์ จะมีพีคของพันธะ O-H อยู่ที่ประมาณ 3,300-3,600 cm^{-1} หมู่เอมีน มีพีคพันธะ N-H อยู่ที่ 3,500 cm^{-1} สารเอสเทอร์ มีพีคของหมู่ C-O อยู่ที่ประมาณ 1,000-1,300 cm^{-1} เป็นต้น เมื่อพิจารณาในรายละเอียดที่ปรากฏใน IR spectrum พีคในช่วง 1,350-4,000 cm^{-1} จะเป็นช่วงความถี่ของแถบการดูดกลืนคลื่นแสงของพันธะในหมู่ฟังก์ชันต่างๆที่ค่อนข้างคงที่ ซึ่งกำหนดเป็นย่านความถี่ของหมู่

ฟังก์ชัน (Group function region) และในช่วงประมาณ 910-1,350 cm^{-1} จะได้แถบการดูดกลืนคลื่นแสงที่มีลักษณะเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว เรียกว่า ย่านรอยพิมพ์นิ้วมือ (Finger print region)

เมื่อพิจารณาโมเลกุลของสาร โดยทั่วไปจะประกอบด้วยอะตอมที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะเคมี เมื่อโมเลกุลได้รับรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงกับการสั่นของโมเลกุลแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ โมเลกุลนั้นก็สามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ เราเรียกว่า IR active แต่ถ้าการสั่นนั้นไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ก็จะไม่ทำให้เกิดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เราเรียกว่า IR inactive การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดมีรูปแบบการสั่นของโมเลกุลดังนี้

- การยืดหด (stretching) เป็นการเปลี่ยนแปลงความยาวระหว่างอะตอมที่เกิดพันธะกันอยู่ มีทั้งการยืดหดแบบสมมาตร (symmetric stretching : V_1) และการยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching : V_3)

- การโค้งงอ (bending) หรือการผิดรูป (deformation) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างพันธะ 2 อัน ที่เรียกว่า scissoring V_2

- การหมุนที่ถูกขัดขวาง (hindered rotation) หรือไลเบรชัน (libration) เกิดจากการหมุนแบบกลับไปกลับมา (rotational oscillations) ของโมเลกุลน้ำที่เกิดอันตรกิริยากับอะตอมข้างเคียง แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ขึ้นอยู่กับทิศทางของแกนหมุนหลัก ได้แก่ rocking (Rx), wagging (Ry), twisting (Rz)

สำหรับโครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาสารกลุ่มโลหะฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และอนุพันธ์ทางความร้อน คือ สารกลุ่มโลหะไพโรฟอสเฟต ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$) ซึ่งสารทั้งสองชนิด จะมีองค์ประกอบหน่วยย่อยโครงสร้าง คือน้ำและฟอสเฟตแอนไอออนสำหรับสารกลุ่มฟอสเฟตไฮเดรต และไพโรฟอสเฟตแอนไอออน สำหรับสารกลุ่มไพโรฟอสเฟต โดยหน่วยย่อยดังกล่าวจะมีรูปแบบการสั่นพื้นฐาน [7] ดังนี้

1. รูปแบบการสั่นพื้นฐานของโมเลกุลน้ำในโครงผลึก (Fundamental vibration mode of crystal water, H_2O)

ในช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรด 4000-400 cm^{-1} โมเลกุลน้ำจะดูดซับรังสีแล้วทำให้เกิดการสั่นของพันธะ ซึ่งน้ำประกอบด้วย 3 อะตอม จึงสามารถแสดงรูปแบบการสั่นพื้นฐานดังนี้ คือ $3N - 6 = (3 \times 3) - 6 = 3$ (เมื่อ N คือจำนวนอะตอมภายในโมเลกุลหรือไอออนของหน่วยย่อยโครงสร้าง) ซึ่งประกอบไปด้วย การสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตร (symmetry stretching, V_1) การสั่นแบบโค้งงอ (bending mode, V_2) และการสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตร (symmetric stretching : V_1) นอกจากการสั่นพื้นฐานแล้ว โมเลกุลของน้ำยังแสดงรูปแบบการหมุนพื้นฐานอีก 3 แบบ คือ rocking (Rx), wagging (Ry) และ twisting (Rz) โดยแถบการสั่นและรูปแบบการแสดงดังตารางที่ 2.2 และ รูปที่ 2.4

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงแถบการสั่นพื้นฐานของ โมเลกุลน้ำในผลึกในช่วงเลขคลื่นต่างๆ [11]

โหมด	ช่วงของเลขคลื่น (ซม. ⁻¹)
การยืดของ O-H (ν)	3600-3000
การงอของ O-H (δ)	1660-1590
การแกว่งของ O-H (ρ)	900-350



รูปที่ 2.4 การสั่นพื้นฐานของ โมเลกุลน้ำในผลึกในช่วงเลขคลื่นต่างๆ[11]

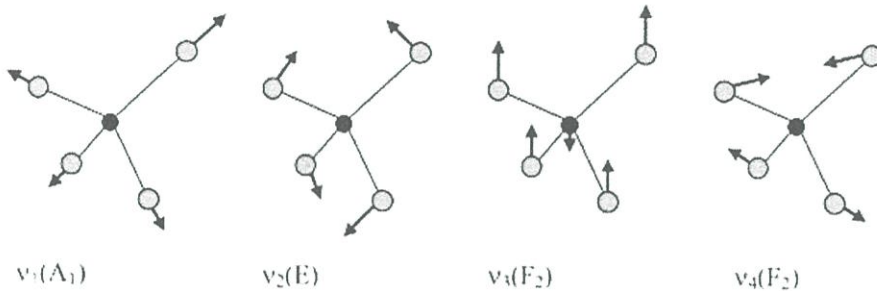
2. รูปแบบการสั่นพื้นฐานของออร์โทฟอสเฟตแอนไอออน (Fundamental vibration mode of orthophosphate anion, PO_4^{3-})

ในช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรด 4000-400 ซม.⁻¹ โมเลกุลของออร์โทฟอสเฟตแอนไอออน (PO_4^{3-}) จะดูดซับรังสีแล้วทำให้เกิดการสั่นของพันธะ ซึ่งประกอบด้วย 5 อะตอม จึงสามารถแสดงรูปแบบการสั่นพื้นฐานดังนี้ คือ $3N - 6 = (3 \times 5) - 6 = 9$ (เมื่อ N คือจำนวนอะตอมภายในโมเลกุลหรือไอออนของหน่วยย่อยโครงสร้าง) โดยรูปแบบการสั่นพื้นฐานของออร์โทฟอสเฟตแอนไอออนแสดงในตารางที่ 2.3 และรูปที่ 2.5

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงรูปแบบการสั่นพื้นฐานของออร์โทฟอสเฟตแอนไอออน[12]

โหมด	ช่วงของเลขคลื่น (ซม. ⁻¹)
asymmetric stretching region (ν_2)	1100-1020
symmetric stretching region (ν_1)	990-950

โหมด	ช่วงของเลขคลื่น (cm ⁻¹)
Asymmetric bending region (V ₄)	650-500
symmetric bending region (V ₂)	480-400



รูปที่ 2.5 รูปแบบการสั่นพื้นฐานของอโทฟอสเฟตแอนไอออน[12]

3. รูปแบบการสั่นพื้นฐานของไพโรฟอสเฟตแอนไอออน (Fundamental vibration mode of pyrophosphate anion, P₂O₇⁴⁻)

ในช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรด 4000 – 400 ซม.⁻¹ โมเลกุลไพโรฟอสเฟตแอนไอออน (P₂O₇⁴⁻) จะดูดซับรังสีแล้วทำให้เกิดการสั่นของพันธะ ซึ่งประกอบด้วย 9 อะตอม จึงสามารถแสดงรูปแบบการสั่นพื้นฐานดังนี้ คือ $3N - 6 = (3 \times 9) - 6 = 21$ (เมื่อ N คือจำนวนอะตอมภายในโมเลกุลหรือไอออนของหน่วยย่อยโครงสร้าง) ซึ่งจะเกิดการซ้อนทับกัน ทำให้สามารถสังเกตแถบการสั่นหลักๆ ได้ 7 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงรูปแบบการสั่นพื้นฐานของไพโรฟอสเฟตแอนไอออน[13]

โหมด	ช่วงของเลขคลื่น (cm ⁻¹)
P–O stretching	1250 - 950
Symmetric PO ₂ stretching	1127 และ 1040
Asymmetric PO ₂ stretching	1090
Symmetric stretch POP bridge	736
asymmetric stretch POP bridge	736

โหมด	ช่วงของเลขคลื่น (cm. ⁻¹)
PO ₃ deformation, rocking	430 -180
POP deformations, torsional	430 -180

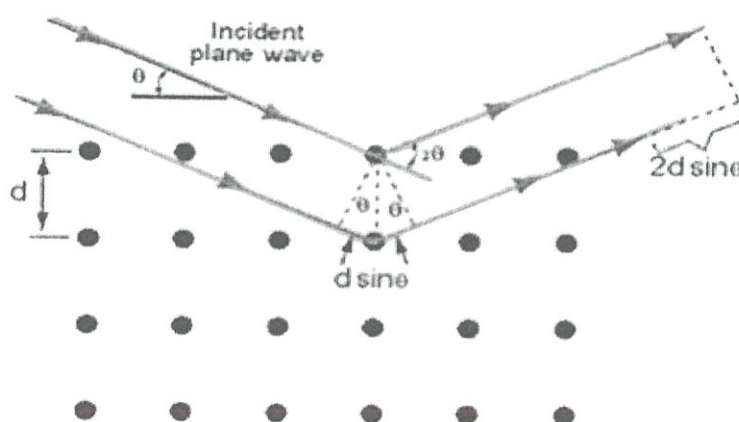
การใช้เครื่อง FT-IR Spectrometer วิเคราะห์ตัวอย่างจะใช้เวลาน้อยมากและไม่สิ้นเปลืองสารเคมี จึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการวิเคราะห์ เพื่อการตรวจสอบสารเชิงคุณภาพ หรือเพื่อการยืนยันสูตร โครงสร้างของสารตัวอย่างที่วัดในตัวกลางชนิดเดียวกัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ ถ้ามีพีคตรงกันย่อมแสดงว่าเป็นสารชนิดเดียวกัน เช่น การวิเคราะห์ชนิดหมึกพิมพ์บนแผ่นกระดาษ ชนิดเส้นใยของสิ่งทอ สารเคลือบผิวภาชนะบรรจุอาหาร ตัวอย่างพอลิเมอร์ แผ่นพลาสติก เป็นต้น

2.5.3 เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction , XRD) [14]

X-Ray Diffraction (XRD) เป็นการวิเคราะห์โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึก ของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง

หลักการและวิธีการวิเคราะห์

วัสดุที่เป็นผลึก คือ วัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายใน โครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d โดยที่ค่าระยะห่าง (d) จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับธรรมชาติของผลึก



รูปที่ 2.6 ค่าระยะห่าง (d) ของระนาบ [14]

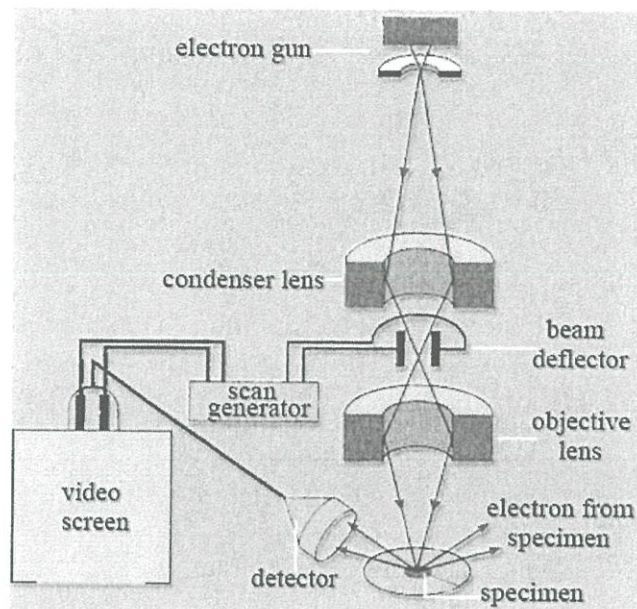
ในปี ค.ศ.1912 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ Theta รังสีเอกซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับที่มุมสะท้อนที่เท่ากันเท่ากับมุมตกกระทบ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ ถูกเสนอในรูปสมการดังกล่าว เรียกว่า " Bragg 's Law " ดังสมการที่ 2.7

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad \text{-----} (2.7)$$

2.5.4 Scanning Electron Microscope (SEM) [15]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้ศึกษารายละเอียดและรูปร่างภายนอกของวัตถุขนาดเล็กที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า การสร้างภาพทำได้ด้วยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด นี้จะเป็นลักษณะของ 3 มิติ เหมือนกล้อง Stereomicroscope หรือ dissecting microscope หลักการทำงานก็คล้ายกัน ภาพเกิดจากอิเล็กตรอนวิ่งกระทบตัวอย่างซึ่งถูกเคลือบผิวด้วยโลหะแล้วสะท้อนกลับออกมา อิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับออกมาเนื่องจากวิ่งเข้าชนตัวอย่าง อิเล็กตรอนของโลหะที่เคลือบผิวถูกกระแทกหลุดออกมาจะถูกเครื่องจับอิเล็กตรอนรวบรวม อิเล็กตรอนทั้งสองแบบ โดยสามารถแยกรายละเอียดของวัตถุที่ขนาดเล็ก 10 อังสตรอม หรือ 0.1 นาโนเมตร (กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะแจกแจงรายละเอียดได้ประมาณ 0.2 ไมโครเมตร) จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงมากถึง 500,000 เท่าและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีสองชนิด ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจอภาพกล้องชนิดนี้มีกำลังขยายประมาณ 28 – 15,000 เท่า สำหรับโครงการพิเศษนี้อาศัยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จะเป็น 3 มิติ ดังนั้น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจึงถูกนำมาใช้เพื่อการศึกษาสัณฐานวิทยาและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุเป็นต้น



รูปที่ 2.7 หลักการทำงานของเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) [15]

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพต่อไป

ข้อดีของเครื่อง SEM เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง TEM คือ ภาพโครงสร้างที่เห็นจากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ในขณะที่ภาพจากเครื่อง TEM จะให้ภาพลักษณะ 2 มิติ อีกทั้งวิธีการใช้งานเครื่อง SEM จะมีความรวดเร็วและใช้งานง่ายกว่าเครื่อง TEM มาก

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hiroki Yanagisawa และคณะ(2010) [16] ได้ศึกษาการดูดซับซิงก์ไอออนและแคดเมียมไอออนบนถ่านกัมมันต์ที่มีแมกนีเซียม และไม่มีแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบในสารละลาย ถ่านกัมมันต์ถูกเตรียมเพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนักในสารละลาย โดยถ่านกัมมันต์ที่มีแมกนีเซียม และไม่มีแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบถูกนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับซิงก์ไอออนและแคดเมียมไอออน จากการทดลองพบว่า ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก ระยะเวลาการสัมผัส และอุณหภูมิของสารละลาย มีอิทธิพลต่อปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสองชนิด และสมบัติทางเคมีของพื้นผิวซึ่งวัดโดยการไทเทรตตาม วิธีของ Boehm ตัวดูดซับที่มีแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบจะสามารถดูดซับซิงก์ไอออนและแคดเมียมไอออนได้ดีกว่าตัวดูดซับที่ไม่มีแมกนีเซียม แคดเมียมถูกดูดซับบนพื้นผิวโดยการแลกเปลี่ยนไอออนกับแมกนีเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาจากพื้นผิวคาร์บอน ในขณะที่ซิงก์ไอออนถูกดูดซับโดยไม่มีการแลกเปลี่ยนไอออน

Sahar Mousa (2010) [17] ได้ศึกษาปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้น ซึ่งมีผลต่อการสังเคราะห์แมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) และแมกนีเซียมออร์โทฟอสเฟต ($Mg_3(PO_4)_2 \cdot 22H_2O$) โดยในการทดลองนั้นแหล่งแมกนีเซียมที่ใช้ คือ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) และแหล่งฟอสเฟต คือ กรดฟอสฟอริก(H_3PO_4) โดยศึกษาอัตราส่วน Mg/P คือ 1:1 และ 3:2 สภาพที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ภายใต้บับกวน และค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยของแข็งที่ได้จะถูกนำไปตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสตรูชัน (XRD) พบว่า ที่อัตราส่วน Mg/P = 1:1 จะพบพีคของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) ซึ่งมีความเป็นผลึก โดยที่ $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$ จะเกิดการสูญเสียน้ำจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน กลายเป็น $Mg_2P_2O_7$ และที่อัตราส่วน Mg/P = 3:2 จะพบพีคของแมกนีเซียมออร์โทฟอสเฟต ($Mg_3(PO_4)_2 \cdot 22H_2O$) ซึ่งมีความเป็นผลึก โดยที่น่าจะเกิดจากแมกนีเซียมไอออนจะเข้ามาแทนที่ไฮโดรเจนทำให้เกิดเป็น $Mg_3(PO_4)_2 \cdot 22H_2O$

Carole Lamonier และคณะ (2008) [18] ได้ศึกษาธรรมชาติของสารตกตะกอนที่มีอิทธิพลต่อการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมฟอสเฟต โดยใช้ตัวปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง 2 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ โดยจากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้ตัวปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต (Pyrophosphate) แต่เมื่อใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแมกนีเซียมออร์โทฟอสเฟต (Orthophosphate) จากนั้นทำการตรวจวัดเอกลักษณ์ของสาร โดยวิธีการวิเคราะห์การตรวจสอบ

พฤติกรรมทางความร้อนของสาร (TGA) พบว่า ที่อุณหภูมิ 948 เคลวิน จะเกิดการคายพลังงาน ซึ่งระบุได้ว่าเป็นการเปลี่ยนรูปของแมกนีเซียมไฟโรฟอสเฟตจากอสังฐานไปเป็นผลึก

A. Aklil และคณะ(2004) [19] ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักจากน้ำโดยการเผาฟอสเฟตมาใช้เป็นตัวดูดซับ การเผาฟอสเฟตถูกทำการทดลองขึ้นเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ในปฏิกิริยาต่างๆ โดยในการศึกษานี้ ฟอสเฟตถูกเผาเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ถูกนำมาทดลอง เพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนักจากสารละลาย โดยการกำจัดเลข(II)ไอออน คอปเปอร์(II)ไอออน และซิงค์(II)ไอออนด้วยฟอสเฟตที่ถูกเผาจะนำมาทำทดลองในกระบวนการแบบกะ(batch) ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วด้วยฟอสเฟตที่ถูกเผาจะถูกนำมาทำการทดลองและทำการวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีของ Langmuir และ Freundlich โดยในการวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่างด้วย จากผลการทดลองพบว่า ฟอสเฟตที่ถูกเผามีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งฟอสเฟตจะพบมากในธรรมชาติ มีราคาถูก ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และยังสามารถช่วยในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้อีกด้วย โดยที่ pH 5 จะมีความสามารถในการดูดซับเลข(II)ไอออน คอปเปอร์(II)ไอออน และซิงค์(II)ไอออน 85.6 , 29.8 และ 20.6 มิลลิกรัมต่อโลหะหนัก 1 กรัม ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. แมกนีเซียมไนเตรด ($\text{Mg(II)(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) Loba chemie (AR)
2. กรดฟอสฟอริก (85 % w/w, H_3PO_4) Mallinckrodt baker (ACS)
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (3 M NaOH) Carlo erba reagent (ACS)
4. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
5. สารละลายเมทิลีนบลู Fluka analytical

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ชุดเครื่องแก้ว
2. เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง (AND) GR-200 บริษัท A&D company ประเทศญี่ปุ่น
3. เครื่องปั่นกวน (Stirrer) (IKA) C-MAG HS7
4. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) (Mettler – Toledo) five easy FE 20-I บริษัท Mettler – Toledo group
5. เครื่องกรองแบบลดความดัน (Ultrafiltration) Model WJ-20 Serial no. 1YS94S บริษัท SIBATA ประเทศญี่ปุ่น
6. กระดาษกรอง (Filter paper) 5C (70mm.) บริษัท Advance Toyo Kaisha, Ltd. ประเทศญี่ปุ่น
7. เตาอบ (Oven) Serial no.8 502.0552 บริษัท MEMMERT ประเทศญี่ปุ่น
8. เตาเผา (Furnance) Controller B 170 บริษัท Naber therm ประเทศเยอรมัน
9. โถดูดความชื้น (Desiccator)
10. เครื่องอัดเม็ด
11. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) บริษัท Perkin Elmer instruments รุ่น Pyris 1

12. เครื่องวิเคราะห์สารด้วยระบบอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) บริษัท Perkin Elmer model Spectrum GX
13. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffactometer, XRD) บริษัท BRUKER AG รุ่น D8 ADVANCE
14. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) บริษัท LEO รุ่น LEO 1455VP
15. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) Thermo scientific genesys 10s uv-vis spectrophotometer

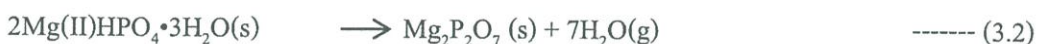
3.3 การเตรียมแมกนีเซียมไฟโรฟอสเฟตและทดสอบการดูดซับ

3.3.1 การเตรียมแมกนีเซียมไฟโรฟอสเฟต

จากปฏิกิริยา



Calcination 550 °C



มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ชั่งสารตั้งต้นแมกนีเซียมไนเตรด 30.77 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร
2. ใช้แหล่งของฟอสเฟต คือ กรดฟอสฟอริก ความบริสุทธิ์ 85.0 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 20.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
3. เทสารละลายกรดฟอสฟอริกลงในบีกเกอร์ที่ใส่แมกนีเซียมไนเตรด จากนั้นเทน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 250 มิลลิลิตรลงในบีกเกอร์
4. บั่นกวนผสมสารตั้งต้นกับแหล่งของฟอสเฟตในน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิ 5 ± 1 องศาเซลเซียส
5. ค่อยๆปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ให้เท่ากับ 9 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้สารที่ได้อยู่ในรูปของเจล จากนั้นทำการบั่นกวนต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

6. ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. กรองแยกตะกอนด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน และล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออน โดยวัดค่าการนำไฟฟ้าจากน้ำที่ถูกล้างตะกอน จนมีค่าการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกับค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออน
8. อบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
9. เเปาะของแข็งที่ได้ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ของแข็งสีขาวนำไปบดให้ละเอียด เพื่อนำไปวิเคราะห์

3.3.2 การทดสอบการดูดซับด้วยสารละลายเมทิลีนบลู

ตอนที่ 1 การสร้างกราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู

1. เตรียมสารละลายมาตรฐาน (Blank) และสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 1.0 2.0 3.0 4.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
2. ล้างเซลล์ใส่สารตัวอย่างสำหรับเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ด้วยน้ำกลั่น แล้วตามด้วยสารละลายที่ต้องการวัดทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานทั้ง 5 ความเข้มข้น โดยวัดที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร
3. บันทึกค่าที่ได้และสร้างกราฟมาตรฐาน โดยแกน y เป็นค่าการดูดกลืนแสง และแกน x เป็นค่าความเข้มข้น

ตอนที่ 2 การดูดซับของสารละลายเมทิลีนบลูบนพื้นผิวแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต

1. เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
2. ชั่งแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟตประมาณ 0.1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่างๆขวดละ 1 ตัวอย่าง
3. ปิดจุกและนำไปเขย่า 1.30 ชั่วโมง เพื่อให้เข้าสู่ภาวะสมดุล
4. นำสารละลายในขวดรูปชมพู่ไปกรองแบบลดความดันเพื่อแยกแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟตออก

5. นำสารละลายแต่ละขวดไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร เพื่อหาความเข้มข้นและปริมาณของเมทิลีนบลูที่เหลือในสารละลายภายหลังการดูดซับ

3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ (Characterization)

3.4.1 วิเคราะห์การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อน

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA อาศัยสมบัติเชิงความร้อนของวัตถุต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีความไว และละเอียดสูงในสภาวะแวดล้อมที่กำหนด สามารถวิเคราะห์หาจุดหลอมเหลว การสูญเสียน้ำหนัก หาสารเจือปนในตัวอย่าง รวมไปถึงการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อนได้อีกด้วย ซึ่งผลแสดงเป็นกราฟการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ

3.4.2 วิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของสาร

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์และอินทรีย์ เทคนิคนี้เป็นวิธีการสเปกโตรสโคปี (spectroscopy) ชนิดหนึ่งที่ใช้ศึกษาการดูดกลืนแสงของสารในย่านความถี่ของแสง ซึ่งการวิเคราะห์โครงสร้างของสารจะอาศัย การดูดกลืนที่แตกต่างกันของแต่ละโมเลกุล ซึ่งแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดที่แตกต่างกัน โดยช่วง wave number 1500-4000 cm^{-1} จะเป็นช่วงที่บ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล นอกจากนั้นยังเป็นช่วงย่านรอยพิมพ์นิ้วมือซึ่งจะมีลักษณะของสเปกตรัมที่เฉพาะเจาะจงของสารแต่ละตัว

3.4.3 วิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสัณฐาน

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง ซึ่งเป็นการตรวจสอบเอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive)

3.4.4 วิเคราะห์ลักษณะสัญญาณของสารในระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM อาศัยลำแสงอิเล็กตรอนที่เกิดจากการให้ความร้อนที่ขั้วแคโทด ไปถึงยังพื้นที่ผิววัตถุ เมื่อลำแสงอิเล็กตรอนไปกระตุ้นให้วัตถุเกิดพลังงานมากขึ้น วัตถุจะคายพลังงานออกมา ในลักษณะลำแสงอิเล็กตรอน Back Scatter Electron

3.5 วิเคราะห์พฤติกรรมกรดซัลฟิวริก

3.5.1 วิเคราะห์การดูดกลืนแสง

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่วัดค่าการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต และวิสิเบิล ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190 – 800 นาโนเมตร ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี การดูดกลืนแสงของสารต่างๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ในเชิงคุณภาพและปริมาณ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในการสังเคราะห์แมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$) โดยวิธีการตกตะกอน (Precipitation method) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว ในบทนี้ได้นำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการสังเคราะห์แมกนีเซียมไพโรฟอสเฟตรวมถึงผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารที่สังเคราะห์ได้ ได้แก่ พฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของสารด้วยเทคนิค FTIR ลักษณะผลึกและออสติฐานด้วยเทคนิค XRD ลักษณะสัณฐานของสารในระดับจุลภาคด้วย SEM และการวิเคราะห์พฤติกรรมการดูดซับโดยการศึกษากการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูด้วยเทคนิค UV-VIS โดยมีรายละเอียดตามลำดับต่อไปนี้

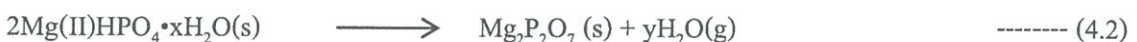
4.1 การเตรียมแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต

สำหรับโครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$) ผ่านวิธีการตกตะกอน (Precipitation method) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารตกตะกอน เพื่อควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง ให้มีค่าเท่ากับ 9 ซึ่งเป็นค่าความเป็นกรด-ด่างที่สามารถเกิดเป็นแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$) ได้โดยผ่านกระบวนการเผา (Calcination) ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2

$$\text{NaOH}, \text{pH} = 9$$



$$\text{Calcination } 550^{\circ}\text{C}$$



จากการสังเคราะห์แมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (MgHPO_4) และแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$) สรุปผลที่ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงปริมาณและร้อยละผลผลิต (%yield) ของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (MgHPO_4) และแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$)

ผลิตภัณฑ์	น้ำหนักสารตามทฤษฎี (กรัม)	น้ำหนักสารจริง (กรัม)	ร้อยละผลผลิต (%yield)
MgHPO_4	20.92	17.98	85.94
$\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$	13.35	10.89	81.57

จากตารางที่ 4.1 พบว่าร้อยละผลผลิตของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (MgHPO_4) เท่ากับร้อยละ 85.94 ซึ่งอาจเกิดจากขั้นตอนการล้างตะกอนที่ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตได้น้อยกว่าในทางทฤษฎี โดยในขั้นตอนของการกรองล้างตะกอนนั้นจะต้องล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออน โดยวัดค่าการนำไฟฟ้าจากน้ำที่ถูกล้างตะกอน จนมีค่าการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกับค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียสารผลิตภัณฑ์ และพบว่าร้อยละผลผลิตของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$) เท่ากับร้อยละ 81.57

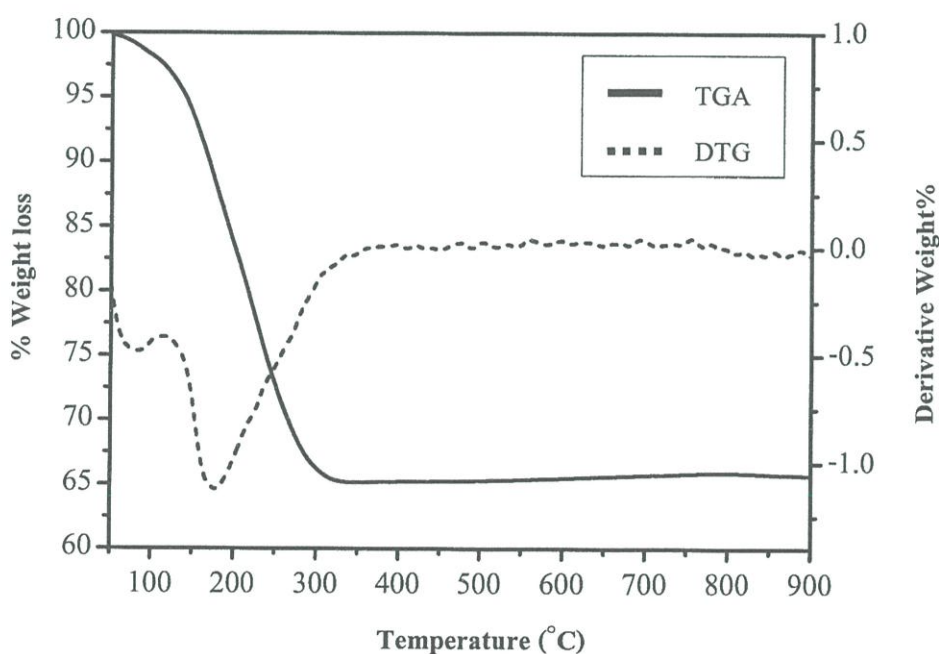
สำหรับงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ผ่านวิธีการตกตะกอน เมื่อได้แมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตแล้ว นำมาทำการเผา โดยสารกลุ่มไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮเดรตจะเกิดการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ 4.2.1 กลายเป็นสารกลุ่มที่เรียกว่า โลหะไพโรฟอสเฟต

4.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตและแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต

แมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ถูกตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของสารด้วยเทคนิค FTIR และแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ถูกตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของสารด้วยเทคนิค FTIR ตรวจสอบลักษณะผลึกและอสัณฐานด้วยเทคนิค XRD และตรวจสอบลักษณะสัณฐานของสารในระดับจุลภาคด้วย SEM

4.2.1 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA บริษัท Perkin Elmer instruments รุ่น Pyris 1

การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA แสดงถึงเสถียรภาพทางความร้อนและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง โดยข้อมูลดังกล่าวจะนำมาใช้ในการกำหนดช่วงอุณหภูมิในการเผาของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($MgHPO_4 \cdot 3H_2O$) ซึ่งมีการสูญเสียน้ำหนักอยู่ 3 ช่วงคือ ช่วงที่ 1 เกิดที่อุณหภูมิระหว่าง $50 - 115^\circ C$ มีการสูญเสียน้ำหนักประมาณร้อยละ 2.63 โดยน้ำหนัก ซึ่งน่าจะเกิดการ dehydration ของความชื้น ช่วงที่ 2 เกิดที่อุณหภูมิระหว่าง $115 - 320^\circ C$ มีการสูญเสียน้ำหนักประมาณร้อยละ 32.09 โดยน้ำหนัก ซึ่งน่าจะมีผลมาจากการ dehydration ของน้ำในผลึก ช่วงที่ 3 เกิดที่อุณหภูมิระหว่าง $320 - 550^\circ C$ ซึ่งน่าจะเป็นการเกิดแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) [20] ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการสลายตัวทางความร้อนของ $MgHPO_4$

จากรูปที่ 4.1 พบว่ามีการสูญเสียน้ำหนัก คิดเป็นร้อยละ 34.63 ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของน้ำในผลึก คิดเป็นร้อยละ 32.09 โดยน้ำหนัก (2.82 โมลของน้ำ) ซึ่งใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีที่จะมีการสูญเสียน้ำหนัก คิดเป็นร้อยละ 31.03 โดยน้ำหนัก (3 โมลของน้ำ) ดังปฏิกิริยาที่ 4.3

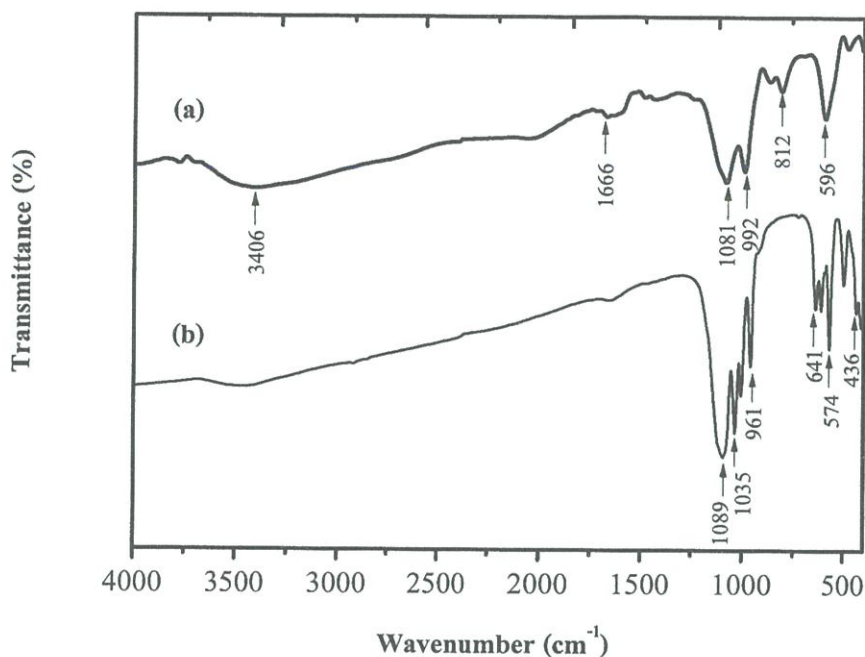


Calcination 550 °C



4.2.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของสารด้วยเทคนิค FT-IR บริษัท Perkin Elmer model Spectrum GX

รูปที่ 4.2 แสดงเอกลักษณ์พื้นฐานของการสั่นของของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$) โดยแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) แบ่งรูปแบบการสั่นออกเป็น 2 รูปแบบคือ รูปแบบการสั่นพื้นฐานของโมเลกุลน้ำในโครงผลึก (H_2O) และรูปแบบการสั่นพื้นฐานของอโทฟอสเฟตแอนไอออน (PO_4^{3-}) ซึ่งแถบการสั่นของโมเลกุลของน้ำ (H_2O) จะแสดงเอกลักษณ์การสั่น 3 รูปแบบคือ การสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตร (symmetric stretching), การสั่นแบบยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) และการสั่นแบบโค้งงอ (Bending) ส่วนรูปแบบการสั่นพื้นฐานของอโทฟอสเฟตแอนไอออน (PO_4^{3-}) จะแสดงเอกลักษณ์การสั่นคือการยืดหด (Stretching) การยืดหดแบบสมมาตร (symmetric stretching) และการยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของ PO_4^{3-} การยืดหด (Stretching) ของพันธะ P-OH การโค้งงอแบบไม่สมมาตร (asymmetric bending) ของ PO_4^{3-} [7]



รูปที่ 4.2 สเปกตร้า FTIR ของ $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (a) และสเปกตร้า FTIR ของ $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ (b)

สำหรับรูปแบบการสั่นของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ที่มีหน่วยย่อยของโครงสร้างเป็นไฮโดรเจนฟอสเฟตแอนไอออน (PO_4^{3-}) จะแสดงเอกลักษณ์การสั่นคือ การยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของ PO_3 และการยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของ PO การสั่นแบบโค้งงอ (Bending) ของ PO_3 และการสั่นแบบส่าย (wagging) ของ PO_3

สเปกตร้า FTIR ของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ที่แสดงดังรูปที่ 4.2(a) แบ่งการจำแนกรูปแบบการสั่นออกเป็น 2 พื้นฐานการสั่น คือ รูปแบบการสั่นพื้นฐานของโมเลกุลน้ำในโครงผลึก (H_2O) และรูปแบบการสั่นพื้นฐานของออร์โทฟอสเฟตแอนไอออน (PO_4^{3-}) ที่แถบความยาวคลื่นต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงรูปแบบการสั่นพื้นฐานของโมเลกุลน้ำในโครงผลึก (H_2O) และอโธฟอสเฟตแอนไอออน (PO_4^{3-}) ที่แถบความยาวคลื่นต่างๆ

รูปแบบการสั่นพื้นฐาน	แถบความยาวคลื่น(ซม. ⁻¹)
การโค้งงอ(Bending)ของโมเลกุลน้ำ	1666
การยืดหด(Stretching)ของโมเลกุลน้ำ	3406
การยืดหดแบบสมมาตร (symmetric stretching) และการยืดหดแบบไม่สมมาตร(asymmetric stretching) ของ PO_4^{3-}	1081, 992
การยืดหด(Stretching) ของพันธะ P-OH	812
การโค้งงอแบบไม่สมมาตร(asymmetric bending)ของ PO_4^{3-}	596

จากรูปแบบการสั่นที่แสดงจะพบว่ามีเพียงรูปแบบการสั่นพื้นฐานของโมเลกุลน้ำในโครงผลึก (H_2O) และรูปแบบการสั่นของอโธฟอสเฟตแอนไอออน (PO_4^{3-}) ซึ่งเป็นรูปแบบการสั่นพื้นฐานของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($MgHPO_4 \cdot 3H_2O$)

สเปกตร้า FTIR ของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($MgHPO_4 \cdot 3H_2O$) ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ $550^\circ C$ แสดงรูปแบบการสั่นเป็นของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต($Mg_2P_2O_7$) ที่แสดงดังรูปที่ 4.2(b) ที่มีหน่วยย่อยของโครงสร้างเป็นไพโรฟอสเฟตแอนไอออน($P_2O_7^{4-}$) ที่แถบความยาวคลื่นต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงรูปแบบการสั่นพื้นฐานของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) ที่มีหน่วยย่อยของโครงสร้างเป็นไพโรฟอสเฟตแอนไอออน($P_2O_7^{4-}$) ที่แถบความยาวคลื่นต่างๆ

รูปแบบการสั่นพื้นฐาน	แถบความยาวคลื่น(ซม. ⁻¹)
การสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตร (symmetric stretching) ของพันธะ PO_3	1089
การยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของพันธะ PO_3	961
การสั่นแบบโค้งงอ(Bending) ของ PO_3	574

รูปแบบการสั่นพื้นฐาน	แถบความยาวคลื่น(ซม. ⁻¹)
การสั่นแบบส่าย(wagging)ของPO ₃	436

จากรูปแบบการสั่นที่แสดงเป็นรูปแบบการสั่นของหน่วยย่อยไพโรฟอสเฟตแอนไอออน (P₂O₇⁴⁻) ซึ่งเป็นรูปแบบการสั่นของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต (Mg₂P₂O₇)

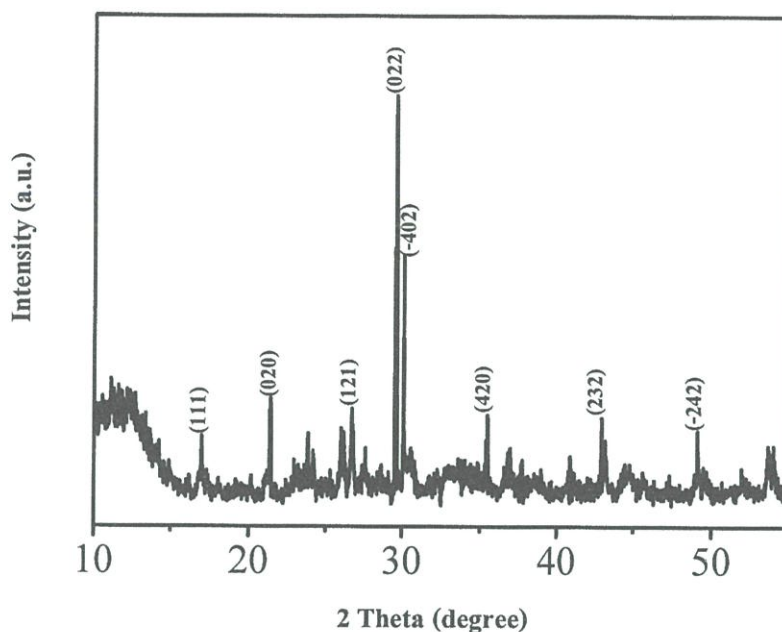
จากรูป 4.2(a) จะพบแถบการสั่นของโมเลกุลของน้ำ (H₂O) และพบแถบการยืดหด(Stretching) ของพันธะ P-OH ซึ่งแถบเหล่านี้จะหายไปเมื่อเกิดการสลายตัวทางความร้อนไปเป็นแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต (Mg₂P₂O₇) ดังแสดงในรูป 4.2(b)

4.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐานด้วยเทคนิค XRD บริษัท BRUKER AG รุ่น D8 ADVANCE

วิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐาน โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน โดยมีแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ คือ Cu K_α จากรูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบ XRD แมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต (Mg₂P₂O₇) ซึ่งกราฟที่วัดได้นั้นตรงกับข้อมูลมาตรฐาน PDF#720019 ขนาดของผลึกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.4

$$D = \frac{0.89\lambda}{\beta \cos\theta} \quad \text{----- (4.4)}$$

- เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
 θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน
 β คือ ความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีค (full width at half maximum , FWHM)



รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสันฐานด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของสาร $Mg_2P_2O_7$ เทียบกับกราฟมาตรฐาน PDF#720019

จากรูปแบบ XRD ของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยจะพบพีคหลัก (2θ) คือ 21.401, 29.623, 30.097, 35.481 และ 42.939 ซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลมาตรฐาน PDF#720019 และมีโครงสร้างระบบผลึก คือ โมโนคลินิก (monoclinic)

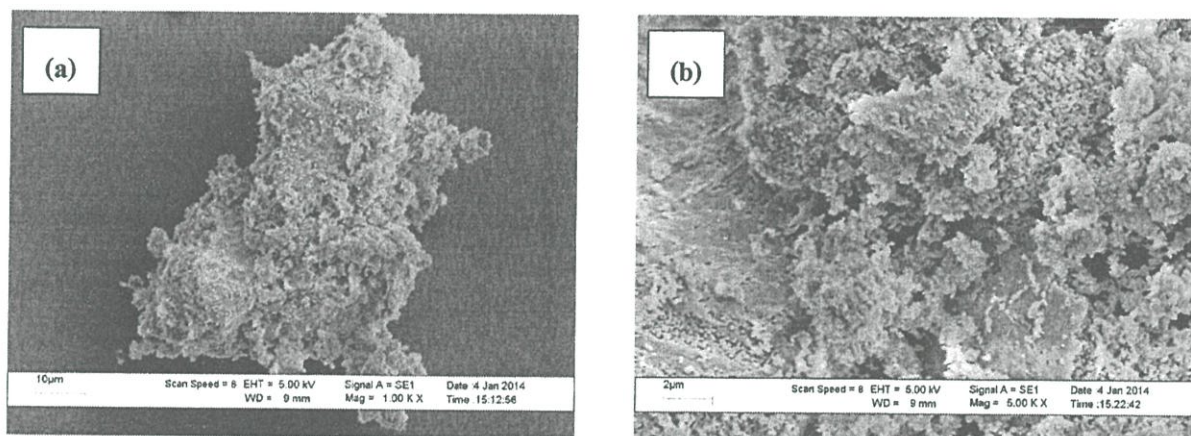
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลการคำนวณค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของ $Mg_2P_2O_7$

Compounds	Systems	a(Å)	b(Å)	c(Å)	$\beta(^{\circ})$	Average Crystallite size (nm)
$Mg_2P_2O_7$	PDF#720019	13.1900	8.2950	9.0720	104.9000	-
	This work	13.1964	8.2964	9.0721	104.8998	151.38± 28.47
DIF. This work –PDF		0.0064	0.0014	0.0001	0.0002	

ค่าแเลตทิซพารามิเตอร์และขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ยของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) แสดงดังตารางที่ 4.2 จะมีขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ยเท่ากับ 151.38 ± 28.47 นาโนเมตร มีค่าเซลล์พารามิเตอร์ของ a b และ c คือ $13.1964(\text{\AA})$ $8.2964(\text{\AA})$ และ $9.0721(\text{\AA})$ ตามลำดับ ค่ามุมระหว่างเวกเตอร์ a กับ c (β)เท่ากับ 104.90° ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลมาตรฐาน PDF#720019

4.2.4 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของสารในระดับจุลภาคด้วย SEM บริษัท LEO รุ่น LEO 1455VP

นำแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) มาทำการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำการตรวจสอบลักษณะของเกรน ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของ $Mg_2P_2O_7$ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (a) และภาพถ่าย SEM ของ $Mg_2P_2O_7$ ที่กำลังขยาย 5000 เท่า (b)

จากรูปที่ 4.4 พบว่ารูปร่างสัณฐานวิทยาของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) มีลักษณะเป็นเกร็ดกระจายอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ มีอนุภาคขนาดเล็กและเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เห็นเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

4.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมผลการดูดซับ

4.3.1 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-VIS บริษัท Thermo scientific รุ่น genesys 10s uv-vis spectrophotometer

การศึกษาการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูด้วยแมกนีเซียมไฟโรสเฟด ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer บริษัท Thermo scientific รุ่น genesys 10s uv-vis spectrophotometer โดยมีน้ำกลั่นเป็นตัวเปรียบเทียบ (Blank) ใช้ค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 660 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าความยาวคลื่นในช่วงที่สารละลายเมทิลีนบลูดูดกลืนได้สูงสุด ทำให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงต่างๆ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายเมทิลีนบลู

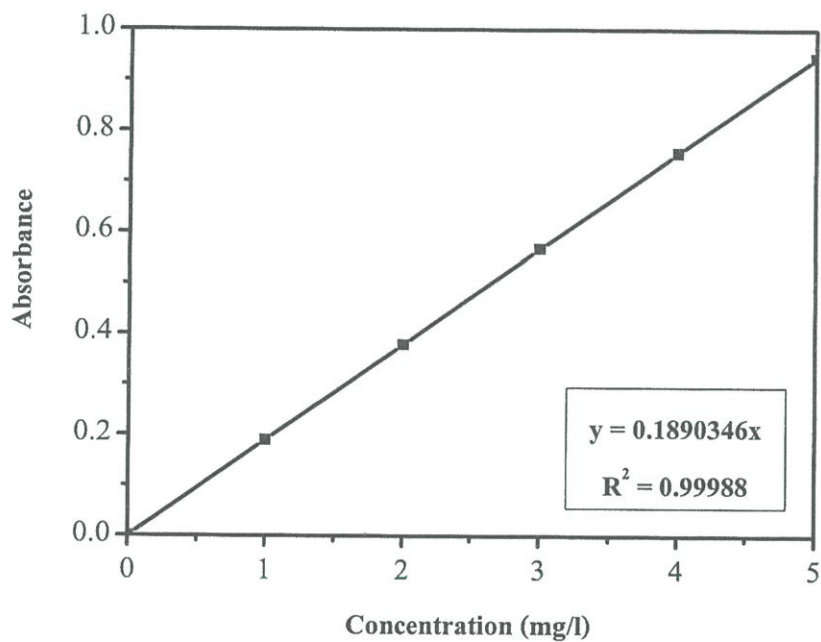
4.3.2 การสร้างกราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู

กราฟมาตรฐาน เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลู ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าการดูดกลืนแสงจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง การเตรียมกราฟมาตรฐานมีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารละลายมาตรฐาน (Blank) และสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 1.0 2.0 3.0 4.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร
2. ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน (Blank) และสารละลายเมทิลีนบลูทั้ง 5 ความเข้มข้น ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer) โดยวัดที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร
3. บันทึกค่าที่ได้และสร้างกราฟมาตรฐาน โดยแกน y เป็นค่าการดูดกลืนแสง และแกน x เป็นค่าความเข้มข้น

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู

ขวดที่	ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0.0	0.000
2	1.0	0.189
3	2.0	0.378
4	3.0	0.567
5	4.0	0.756
6	5.0	0.945



รูปที่ 4.5 กราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู

4.3.3 การดูดซับของสารละลายเมทิลีนบลูบนพื้นผิวแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

การศึกษาการดูดซับของสารละลายเมทิลีนบลูบนพื้นผิวแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นต่างๆ คือ 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
2. ชั่งแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ประมาณ 0.1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นต่างๆขวดละ 1 ตัวอย่าง
3. ปิดจุกและนำไปเขย่า 1 ชั่วโมง เพื่อให้เข้าสู่ภาวะสมดุล
4. นำสารละลายในขวดรูปชมพู่ไปกรองแบบลดความดันเพื่อแยกแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ออก
5. นำสารละลายแต่ละขวดไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร เพื่อหาความเข้มข้นและปริมาณของเมทิลีนบลูที่เหลือในสารละลายภายหลังการดูดซับ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าร้อยละการดูดซับเฉลี่ยได้เท่ากับ 62.05

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลู

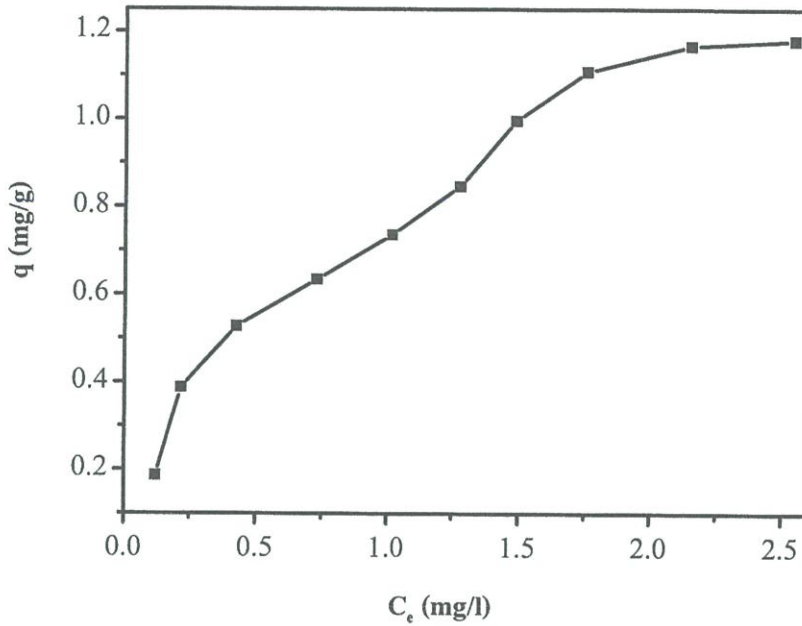
ขวดที่	ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0.5	0.023
2	1.0	0.041
3	1.5	0.080
4	2.0	0.138
5	2.5	0.193
6	3.0	0.242
7	3.5	0.282
8	4.0	0.332
9	4.5	0.408
10	5.0	0.482

4.3.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

จากการทดลองการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วยแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ แล้ววิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่สภาวะสมดุล สามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.7 และพล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่สภาวะสมดุล (C) กับความสามารถในการดูดซับ (q) ได้ดังรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าความเข้มข้นเริ่มต้น ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการดูดซับ

ขวดที่	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ปริมาตร (ml)	ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่สภาวะสมดุล (mg/l)	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
1	0.5	50	0.1206	0.1858
2	1.0	50	0.2164	0.3871
3	1.5	50	0.4253	0.5273
4	2.0	50	0.7306	0.6341
5	2.5	50	1.0189	0.7361
6	3.0	50	1.2786	0.8471
7	3.5	50	1.4898	0.9971
8	4.0	50	1.7589	1.1083
9	4.5	50	2.1557	1.1675
10	5.0	50	2.5496	1.1803



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่สถานะสมดุล (C) กับความสามารถในการดูดซับ (q)

4.3.4.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์

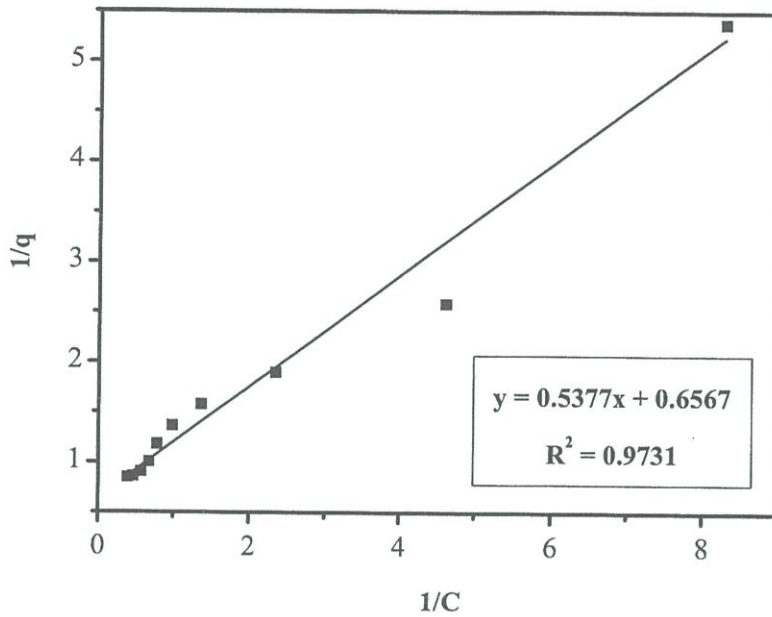
จากการศึกษาไอโซเทอมของแลงเมียร์ที่สถานะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายได้ ดังสมการ

$$q = \frac{q_m k_L C}{1 + k_L C} \quad \text{----- (2.1)}$$

จากสมการนี้สามารถจัดให้อยู่ในสมการเชิงเส้น ได้คือ

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m k_L C} + \frac{1}{q_m} \quad \text{----- (2.3)}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ กับ $\frac{1}{C}$ จะได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าแนวโน้มไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ จะมีค่าความถดถอย (R^2) เท่ากับ 0.9731 ค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ซึ่งได้แก่ ค่า k_L และ q_m จะมีค่าเท่ากับ 1.221 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1.523 มิลลิกรัมของตัวถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ ดังนั้น สมการแบบจำลอง คือ $\frac{1}{q} = \frac{0.538}{C} + 0.657$

4.3.4.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

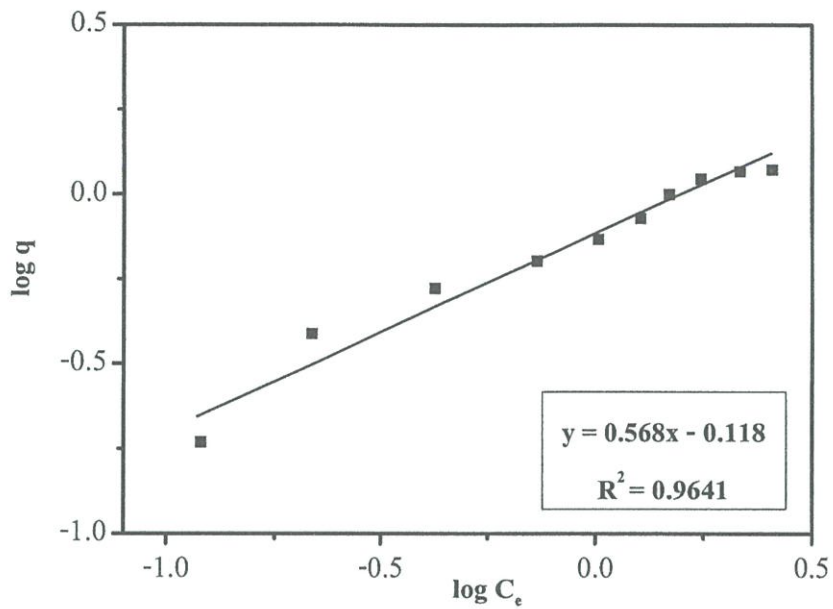
จากการศึกษาไอโซเทอมของฟรุนดลิชที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายได้ ดังสมการ

$$q = k_F (C_e^{\frac{1}{n}}) \quad \text{----- (2.4)}$$

จากสมการนี้สามารถจัดให้อยู่ในสมการเชิงเส้น ได้คือ

$$\log q = \log k_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad \text{----- (2.6)}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C_e$ จะได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าแนวโน้มไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช จะมีค่าความถดถอย (R^2) เท่ากับ 0.9641 ค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชซึ่งได้แก่ ค่า $\log k_f$ และ $\frac{1}{n}$ จะมีค่าเท่ากับ -0.118 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.568 มิลลิกรัมของตัวถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับตามลำดับ ดังนั้น สมการแบบจำลอง คือ $\log q = 0.568 \log C_e - 0.118$

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองในการเตรียมแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต โดยใช้วิธีการตกตะกอน (Precipitation method) และได้ศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA จากนั้นนำมาตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารที่สังเคราะห์ได้ด้วยการตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของสาร ด้วยเทคนิค FTIR ตรวจสอบลักษณะผลึกและอสัณฐานด้วยเทคนิค XRD และวิเคราะห์ทางด้านสัณฐานในระดับจุลภาคด้วย SEM และการวิเคราะห์พฤติกรรมการดูดซับโดยการศึกษากการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูด้วยเทคนิค UV-VIS โดยมีรายละเอียดตามลำดับต่อไปนี้

5.1 การเตรียมแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต

แมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) สามารถเตรียมได้จากการตกตะกอนของสารตั้งต้นแมกนีเซียมจาก $Mg(NO_3)_2$ ทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ปั่นกวนผสมสารตั้งต้นกับแหล่งของฟอสเฟตในน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิ 5 ± 1 องศาเซลเซียส ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้เท่ากับ 9 ด้วย NaOH นำสารที่สังเคราะห์ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้แมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($MgHPO_4 \cdot 3H_2O$) สลายตัวไปเป็นแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) พบว่าร้อยละผลผลิตของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) เท่ากับร้อยละ 81.57

5.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตและแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต

ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($MgHPO_4 \cdot 3H_2O$) และแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) ที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้วิธีการตกตะกอน สามารถสรุปผลเรียงตามลำดับคือ การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อน ตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารที่สังเคราะห์ได้ด้วยการตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของสาร จากนั้นนำมาวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐาน และวิเคราะห์ทางด้านสัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค

จากการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) โดยแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) จะเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิประมาณ 50 - 550 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้อุณหภูมิ 550°C ในการเผาเพื่อใช้ในการสังเคราะห์แมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$) ดังปฏิกิริยา $2\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O} (\text{s}) \rightarrow \text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7 + 7\text{H}_2\text{O}$

จากการตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานการสั่นของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) สามารถแบ่งรูปแบบการสั่นออกเป็น 2 รูปแบบ คือ รูปแบบการสั่นพื้นฐานของโมเลกุลน้ำในโครงผลึก (H_2O) และรูปแบบการสั่นพื้นฐานของอโธฟอสเฟตแอนไอออน (PO_4^{3-}) ที่แถบช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงรูปแบบการสั่นพื้นฐานของโมเลกุลน้ำในโครงผลึก (H_2O) และอโธฟอสเฟตแอนไอออน (PO_4^{3-}) ที่แถบช่วงความยาวคลื่นต่างๆ

รูปแบบการสั่นพื้นฐาน	แถบความยาวคลื่น (ซม. ⁻¹)
การโค้งงอ (Bending) ของโมเลกุลน้ำ	1600-1700
การยืดหด (Stretching) ของโมเลกุลน้ำ	3200-3400
การยืดหด (stretching) ของ PO_4^{3-}	1000-1100
การยืดหด (Stretching) ของพันธะ P-OH	810-820
การโค้งงอแบบไม่สมมาตร (asymmetric bending) ของ PO_4^{3-}	590-600

สำหรับรูปแบบการสั่นของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$) ที่มีหน่วยย่อยของโครงสร้างเป็นไพโรฟอสเฟตแอนไอออน ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) จะแสดงเอกลักษณ์การสั่นที่แถบช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงรูปแบบการสั่นพื้นฐานของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) ที่มีหน่วยย่อยของโครงสร้างเป็นไพโรฟอสเฟตแอนไอออน ($P_2O_7^{4-}$) ที่ช่วงแถบความยาวคลื่นต่างๆ

รูปแบบการสั่นพื้นฐาน	แถบความยาวคลื่น (ซม. ⁻¹)
การสั่นแบบยืดหด (stretching) ของพันธะ PO_3	1000-1100
การยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของพันธะ PO_3	950-970
การสั่นแบบโค้งงอ (Bending) ของ PO_3	530-580
การสั่นแบบส่าย (wagging) ของ PO_3	400-450

ดังนั้น พบว่าเป็นรูปแบบการสั่นของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($MgHPO_4 \cdot 3H_2O$) และแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$)

จากการวิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสติฐาน พบว่ากราฟ XRD ของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) ที่ได้ตรงกับข้อมูลมาตรฐาน PDF#720019 และมีขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ยเท่ากับ 151.38 ± 28.47 นาโนเมตร

จากการวิเคราะห์ลักษณะออสติฐานของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) ในระดับจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด อนุภาคของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($Mg_2P_2O_7$) มีลักษณะเป็นเกร็ดกระจายอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ มีอนุภาคขนาดเล็กและเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เห็นเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

5.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมการดูดซับ

การศึกษาการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูด้วยแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer โดยมีน้ำกลั่นเป็นตัวเปรียบเทียบ (Blank) ใช้ค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 660 นาโนเมตร โดยสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลู แล้วสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่สภาวะสมดุล (C) กับความสามารถในการดูดซับ (q) และเมื่อคำนวณร้อยละของการดูดซับจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 62.05 จากนั้นศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ จะเห็นว่าแนวโน้มไอโซเทอมการดูดซับที่ได้นั้นสอดคล้องกับไอโซเทอมของแลงเมียร์ และพบว่าจะมีค่า

ความถดถอย (R^2) สูงสุด เท่ากับ 0.9731 ค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ซึ่งได้แก่ ค่าคงที่การดูดซับของแลงเมียร์ (k_L) และความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (q_m) จะมีค่าเท่ากับ 1.221 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1.523 มิลลิกรัมของตัวถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ และได้สมการแบบจำลอง คือ $\frac{1}{q} = \frac{0.538}{C} + 0.657$

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการเตรียมแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟตด้วยวิธีต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับงานวิจัยนี้
2. ศึกษาสารตั้งต้นและแหล่งฟอสเฟตอื่นๆเพิ่มเติม และตรวจสอบเอกลักษณ์ของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟตที่ได้
3. ศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาอัตราส่วนโดยโมลระหว่างสารตั้งต้นและแหล่งฟอสเฟตที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ร้อยละผลผลิตสูงสุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] [online]. Available; <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2080/heavy-metal-%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AB%E0%B8%B0%E0%B8%AB%E0%B8%99%E0%B8%B1%E0%B8%81> สืบค้นข้อมูลวันที่ 21/09/56
- [2] [online]. Available; http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CCkQFjAA&url=http%3A%2F%2Fkb.psu.ac.th%2Fpsukb%2Fbitstream%2F2553%2F3498%2F7%2F286001_ch1.pdf&ei=8S5qUvCWEIPTrQfvzYDYAQ&usg=AFQjCNFut_DgtIXhn12wQGcwusOtx2DN1A สืบค้นข้อมูลวันที่ 21/09/56
- [3] ปรินทร์ เต็มญารศิลป์. 2551. การเตรียมและการวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไผ่ตง และไผ่หมาจู้ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมี ภาควิชาเคมี บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [4] [online]. Available; http://www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/design_absorbtion.htm สืบค้นข้อมูลวันที่ 21/09/56
- [5] ไกรวิทย์ เอียวพันธ์ และคณะ. 2551. การใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับแบบเพิ่มความเข้มข้นสำหรับการวิเคราะห์สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนปริมาณน้อยในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีสเปกโทรฟลูออโรเมทรีที่สถานะของแข็ง โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] Cotter-Howells, J., and S. Caporn. 1996. Remediation of contaminated land by formation of heavy metal phosphates. *Applied Geochemistry*, 11: 335-342.
- [7] ชมฉรรณ สุวรรณทศ และคณะ. 2555. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแมงกานีสไฟโรฟอสเฟต ($Mn_2P_2O_7$) ปริญญานิพนธ์ วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [8] Laperche, V., S.J. Traina, P. Gaddam, and T.J. Logan. 1996. Chemical and mineralogical characterizations of Pb in a contaminated soil: Reactions with synthetic apatite. *Environmental Science and Technology* 30: 3321-3326.
- [9] [online]. Available; http://www.nanotec.or.th/th/?page_id=569 สืบค้นข้อมูลวันที่ 12/10/56

- [10] [online].Available; <http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM328-10.pdf> ผู้แต่งร.รชนี้
ต้นทะพานิชกุล สืบค้นข้อมูลวันที่ 12/10/56
- [11] [online].Available; <http://www.kmitl.ac.th/~kbbanjon/ThesisdefencePhDBJ.pdf> สืบค้นข้อมูล
วันที่ 12/10/56
- [12] [online].Available; <http://www.champa.kku.ac.th/chanaiporn/journal/orther%20no%2034.pdf>
สืบค้นข้อมูลวันที่ 12/10/56
- [13] Assaouidi, Hassane, Kozinski, Janusz, Bélanger-Gariépy, Francine “Crystal structure, vibrational spectra and thermal decomposition study of a new, dicationic, acidic pyrophosphate: $\text{KHMgP}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ” Journal of Chemical Crystallography, Volume 35, Number 10, October 2005, 809-820(12)
- [14] [online].Available; http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf_XRD1.htm สืบค้น
ข้อมูลวันที่ 12/10/56
- [15] [online].Available;<http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html> สืบค้นข้อมูล
วันที่ 12/10/56
- [16] Hiroki Yanagisawa , Yuki Matsumoto , Motoi Machida Solid State Applied Surface Science
256 (2010) 1619–1623
- [17] Sahar Mousa, Study on synthesis of Magnesium Phosphate Materials Phosphorus, Research
Bulletin Vol. 24 (2010), 16-21
- [18] Carole Lamonier , Mhamed Sadiq , Mohammed Bensitel , Jacques Leglise Solid State
Sciences 10 (2008) 434-437
- [19] A. Aklil , M. Mouflih , S. Sebt Journal of Hazardous Materials A112 (2004) 183–190
- [20] นริศรา ขาวเรืองและคณะ. 2555. การเตรียมและตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา
แมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$) ปริญญานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี
อุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

1. คำนวณมวลโมเลกุลของสาร

Mg(II)(NO ₃) ₂ •6H ₂ O	256.41	กรัม/โมล
H ₃ PO ₄	98.00	กรัม/โมล
NaOH	40.00	กรัม/โมล
MgHPO ₄ •3H ₂ O	174.33	กรัม/โมล
Mg ₂ P ₂ O ₇	222.55	กรัม/โมล
C ₁₆ H ₁₈ N ₃ ClS	319.85	กรัม/โมล

2. คำนวณหาตัวกำหนดปริมาณ

- Mg(II)(NO₃)₂•6H₂O

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad n &= \frac{g}{Mw} \\ n &= \frac{30.77}{256.41} \\ n &= 0.12 \text{ mol} \end{aligned}$$

- 85% w/w H₃PO₄ (ความหนาแน่น 1.685 กรัม/มิลลิลิตร)

สารละลาย	100 g	มีกรดฟอสฟอริก	85 g
สารละลาย	20 × 1.685 g	มีกรดฟอสฟอริก	$\frac{85 \times 20 \times 1.685}{100} = 28.65 \text{ g}$

$$\begin{aligned} \text{จากความสัมพันธ์} \quad n &= \frac{g}{Mw} \\ \text{จะได้} \quad n &= \frac{28.65}{98.00} \\ n &= 0.29 \text{ mol} \end{aligned}$$

ดังนั้น Mg(II)(NO₃)₂•6H₂O เป็นตัวกำหนดปริมาณ

3. กำหนดการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3 M

เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3 M ในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 ml.

$$\begin{aligned} \text{จากความสัมพันธ์} \quad \frac{g}{Mw} &= \frac{CV}{1000} \\ \text{จะได้} \quad \frac{g}{40.00} &= \frac{3 \times 250}{1000} \\ g &= 30.00 \text{ g} \end{aligned}$$

∴ ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 30.00 กรัม ละลายในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 ml. และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน

4. กำหนดร้อยละผลผลิตของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตและแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต

4.1 ร้อยละผลผลิตของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (MgHPO_4)

- กำหนดหา theoretical yield



จาก $\text{Mg(II)(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ เป็นตัวกำหนดปริมาณ ใช้ 0.12 โมล

$$\begin{aligned} \text{จะเกิด } \text{Mg(II)HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O} &= 0.12 \text{ โมล} \\ &= 0.12 \text{ โมล} \times 174.33 \text{ กรัม/โมล} \\ &= 20.92 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

∴ theoretical yield เท่ากับ 20.92 กรัม

- กำหนดหา actual yield

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงปริมาณและร้อยละผลผลิต (%yield) ของแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ได้จากการสังเคราะห์ผ่านวิธีการตกตะกอน

ผลิตภัณฑ์	น้ำหนักสารตามทฤษฎี (กรัม)	น้ำหนักสารจริง (กรัม)	ร้อยละผลผลิต (%yield)
MgHPO_4	20.92	17.98	85.94

∴ actual yield เท่ากับ 17.98 กรัม

- คำนวณหา Percent yield

$$\text{จาก} \quad \text{Percent yield} = \frac{\text{actual yield}}{\text{theoretical yield}} \times 100$$

$$\text{Percent yield} = \frac{17.98}{20.92} \times 100$$

$$\text{Percent yield} = 85.94 \%$$

∴ Percent yield เท่ากับ 85.94 %

4.2 ร้อยละผลผลิตของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$)

- คำนวณหา theoretical yield



$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad \frac{1}{2} \text{ จำนวนโมลของ } \text{Mg(II)HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O} &= \text{จำนวน โมลของ } \text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7 \\ \frac{20.92 \text{ กรัม}}{(2)(174.33) \text{ กรัม/โมล}} &= \frac{g \text{ กรัม}}{(222.55) \text{ กรัม/โมล}} \\ g &= 13.35 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

∴ theoretical yield เท่ากับ 13.35 กรัม

- คำนวณหา actual yield

ตารางที่ ก.2 ตารางแสดงปริมาณและร้อยละผลผลิต (%yield) ของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟตที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 550 °C

ผลิตภัณฑ์	น้ำหนักสารตามทฤษฎี (กรัม)	น้ำหนักสารจริง (กรัม)	ร้อยละผลผลิต (%yield)
$\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$	13.35	10.89	81.57

∴ actual yield เท่ากับ 10.89 กรัม

- กำหนดหา Percent yield

$$\text{จาก} \quad \text{Percent yield} = \frac{\text{actual yield}}{\text{theoretical yield}} \times 100$$

$$\text{Percent yield} = \frac{10.89}{13.35} \times 100$$

$$\text{Percent yield} = 81.57 \%$$

∴ Percent yield เท่ากับ 81.57 %

5. กำหนดจำนวนโมลของน้ำในผลึกแมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต

Calcination 550 °C



จากรูปที่ 4.1 กราฟแสดงการสลายตัวทางความร้อนของ MgHPO_4

เกิด $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 65.00 กรัม สลายจาก $2\text{MgHPO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O} = 100$ กรัม

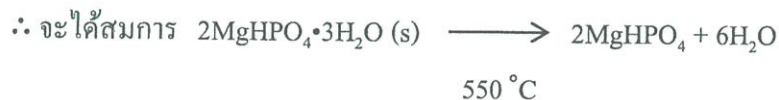
เกิด $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 222.55 กรัม/โมล สลายจาก $2\text{MgHPO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O} = \frac{100 \times 222.55}{65.00}$ กรัม/โมล
= 341.54 กรัม/โมล

จาก $2\text{MgHPO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ มีมวลโมเลกุล = 341.54 กรัม/โมล

$\text{MgHPO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ มีมวลโมเลกุล = 170.77 กรัม/โมล

$x\text{H}_2\text{O}$ มีมวลโมเลกุล = 50.89 กรัม/โมล

$x = 2.82$ โมล



Calcination 550 °C



6. กำหนดขนาดอนุภาคของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต

ขนาดอนุภาคสามารถคำนวณได้จากสมการ
$$D = \frac{0.89\lambda}{\beta \cos\theta}$$

เมื่อ D คือ ขนาดอนุภาค

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ($\lambda = 1.542 \text{ \AA}$)

θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

β คือ ความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีค (full width at half maximum, FWHM)

จากผลการทดลองจะพบพีคหลัก (2θ) ของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$) ดังแสดงในตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก.3 ตารางแสดงพีคหลัก (2θ) ของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$)

No.	λ (nm.)	h	k	l	2θ (degree)	θ (radian)	FWHM (degree)	FWHM (radian)	D (\AA .)
1	0.154	0	2	0	21.401	0.187	0.079	1.378×10^{-3}	1012.890
2	0.154	0	2	2	29.623	0.259	0.048	0.837×10^{-3}	1694.900
3	0.154	4	0	2	30.097	0.263	0.059	1.029×10^{-3}	1380.172
4	0.154	4	2	0	35.481	0.310	0.048	0.837×10^{-3}	1720.394
5	0.154	2	3	2	42.939	0.375	0.048	0.837×10^{-3}	1760.758

- กำหนดหาขนาดของมุม (radian)

พีคที่ 1 $2\theta(\text{degree}) = 21.401$

$\theta(\text{degree}) = 10.701$

$\theta(\text{radian}) = 10.701 \text{ degree} \times \frac{1 \text{ rad.}}{180 \text{ degree}} \times \frac{\pi}{\pi}$

$\theta(\text{radian}) = 0.187 \text{ rad.}$

- กำหนดหาความกว้างที่ครึ่งความสูงของพีค (radian)

$$\begin{aligned} \text{พีคที่ 1} \quad \text{FWHM (degree)} &= 0.079 \\ \text{FWHM (radian)} &= 0.079 \text{ degree} \times \frac{1 \text{ rad.}}{180 \text{ degree}} \\ \text{FWHM (radian)} &= 1.378 \times 10^{-3} \text{ rad.} \end{aligned}$$

- กำหนดหาขนาดอนุภาคเฉลี่ยของแมกนีเซียมไฟโรฟอสเฟต

$$\begin{aligned} \text{พีคที่ 1} \quad D &= \frac{0.89\lambda}{\beta \cos\theta} \\ D &= \frac{0.890 \times 1.541}{1.378 \times 10^{-3} \cos(10.701)} \\ D &= 1012.890 \text{ \AA.} \end{aligned}$$

ดังนั้น ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของแมกนีเซียมไฟโรฟอสเฟต คือ 151.382 nm.

7. กำหนดการเตรียมสารละลายเมทิลีนบลู

7.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 100 ppm, mg/l

สารละลาย 1000 ml มีเมทิลีนบลู 0.10 g

สารละลาย 500 ml มีเมทิลีนบลู 0.05 g

∴ ชั่งเมทิลีนบลู 0.05 กรัม ละลายในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 ml. และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน

7.2 เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 1.0 2.0 3.0 4.0 และ 5.0 ppm, mg/l

ตัวอย่างการคำนวณสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 1 ppm

$$\begin{aligned} \text{จากความสัมพันธ์} \quad C_1 V_1 &= C_2 V_2 \\ \text{จะได้} \quad 1 \times 50 &= 100 \times V_2 \\ V_2 &= 0.5 \text{ ml} \end{aligned}$$

∴ ปิเปตสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 0.5 ml ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 ml และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน และสำหรับสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่างๆ กำหนดเช่นเดียวกับข้างต้น ได้ผลดังตารางที่ ก.4

ตารางที่ ก.4 ปริมาตรสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 100 ppm และน้ำกลั่นปราศจากไอออนที่ใช้เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู

ขวดที่	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู (ppm , mg/l)	ปริมาตรสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 100 ppm (ml.)	ปริมาตรน้ำกลั่นปราศจากไอออน (ml.)
1	1.0	0.5	49.5
2	2.0	1.0	49.0
3	3.0	1.5	48.5
4	4.0	2.0	48.0
5	5.0	2.5	47.5

7.3 เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 และ 5.0 ppm , mg/l

ตัวอย่างการคำนวณสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 0.5 ppm

$$\begin{aligned}
 \text{จากความสัมพันธ์} \quad C_1 V_1 &= C_2 V_2 \\
 \text{จะได้} \quad 0.5 \times 50 &= 100 \times V_2 \\
 V_2 &= 0.25 \text{ ml}
 \end{aligned}$$

∴ ปิเปตสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 0.25 ml ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 ml และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน และสำหรับสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นต่างๆ จำนวนเช่นเดียวกับข้างต้น ได้ผลดังตารางที่ ก.5

ตารางที่ ก.5 ปริมาตรสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 100 ppm และน้ำกลั่นปราศจากไอออนที่ใช้เตรียมสารละลายเมทิลีนบลู

ขวดที่	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู (ppm , mg/l)	ปริมาตรสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 100 ppm (ml.)	ปริมาตรน้ำกลั่นปราศจากไอออน (ml.)
1	0.5	0.25	49.75
3	1.5	0.75	49.25
4	2.0	1.00	49.00
5	2.5	1.25	48.75
6	3.0	1.50	48.50
7	3.5	1.75	48.25
8	4.0	2.00	48.00
9	4.5	2.25	47.75
10	5.0	2.50	47.50

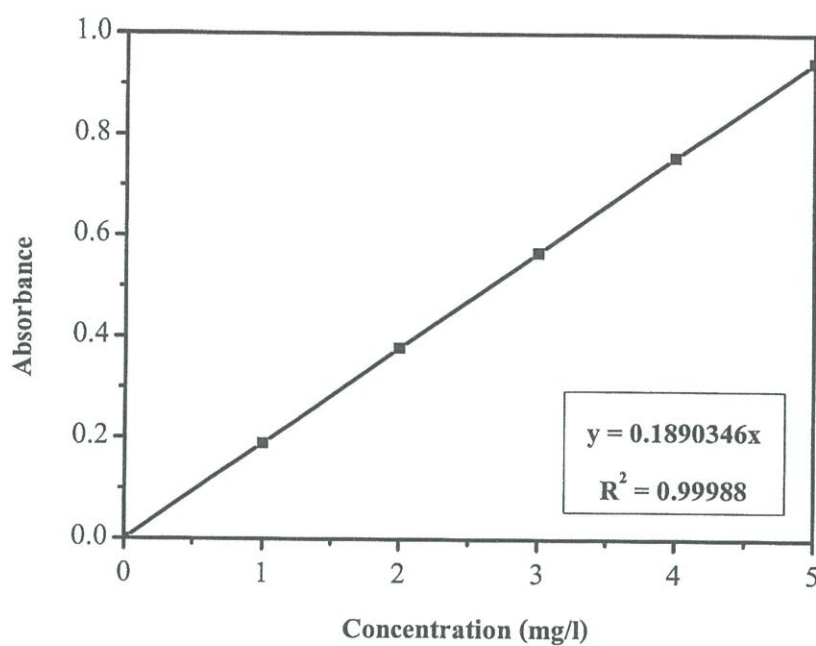
ภาคผนวก ข

1. การศึกษากราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ของสารละลายเมทิลีนบลู

ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร ของสารละลายไร้สารตัวอย่าง (Blank) คือน้ำกลั่น และสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงผลการทดลองค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู

ขวดที่	ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0.0	0.000
2	1.0	0.189
3	2.0	0.378
4	3.0	0.567
5	4.0	0.756
6	5.0	0.945



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู

2. การศึกษาการดูดซับของสารละลายเมทิลีนบลูบนพื้นผิวแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ ข.2 ตารางแสดงผลการทดลองค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลู

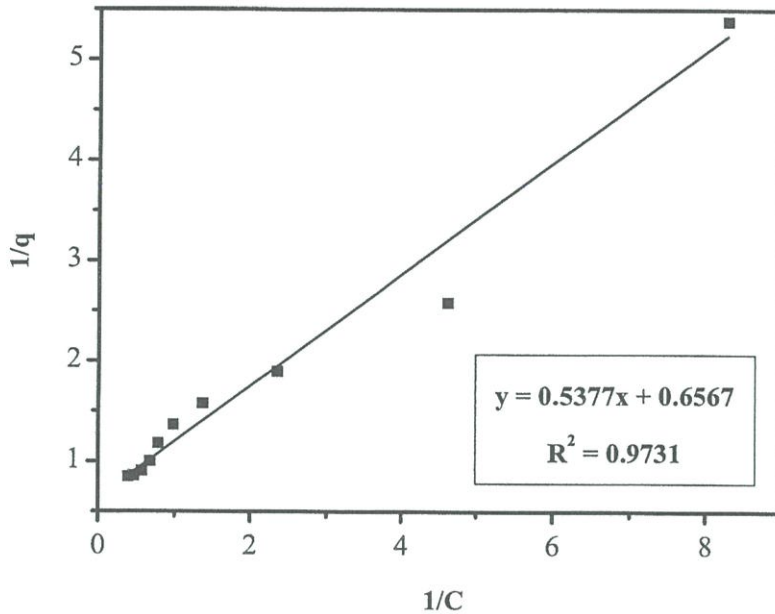
ขวดที่	ปริมาณ $Mg_2P_2O_7$ (g)	ปริมาตร (ml)	ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของ สารละลายเมทิลีนบลู ที่สถานะสมดุล (mg/l)
1	0.102	50	0.5	0.023	0.121
2	0.101	50	1.0	0.041	0.216
3	0.102	50	1.5	0.080	0.425
4	0.100	50	2.0	0.138	0.731
5	0.101	50	2.5	0.193	1.019
6	0.102	50	3.0	0.242	1.279
7	0.101	50	3.5	0.282	1.490

ขวดที่	ปริมาณ $Mg_2P_2O_7$ (g)	ปริมาตร (ml)	ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของ สารละลายเมทิลีนบลู ที่สภาวะสมดุล (mg/l)
8	0.101	50	4.0	0.332	1.759
9	0.100	50	4.5	0.408	2.156
10	0.104	50	5.0	0.482	2.550

3. การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์

ตารางที่ ข.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของสารละลายเมทิลีนบลู

ขวดที่	q (mg/l)	C (mg/g)	1/q	1/C
1	0.186	0.121	5.382	8.292
2	0.387	0.216	2.583	4.621
3	0.527	0.425	1.896	2.351
4	0.634	0.731	1.577	1.369
5	0.733	1.019	1.364	0.981
6	0.847	1.019	1.180	0.782
7	0.997	1.279	1.003	0.671
8	1.108	1.490	0.902	0.569
9	1.168	1.759	0.857	0.464
10	1.180	2.156	0.847	0.392



รูปที่ ข.2 ไอโซเทอมการดูดซับของสารละลายเมทิลีนบลูแบบแลงเมียร์

จากสมการ $q = \frac{q_m k_L C}{1 + k_L C}$

จะได้ $\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m k_L C} + \frac{1}{q_m}$

ซึ่งเมื่อนำค่า $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ มาพล็อตกราฟจะได้ดังกราฟข้างต้น และค่าเหล่านี้คำนวณได้จาก

คำนวณหาค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่สภาวะสมดุล (C) ;

จากสมการของกราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลู $y = 0.1890346x$

โดยกำหนดให้ y เป็นค่าการดูดกลืนแสงที่แท้จริง

x เป็นค่าความเข้มข้น ณ จุดสมดุล (C)

ขวดที่ 1 จะได้ $0.023 = 0.1890346x$

$x = 0.121$

ขวดที่ 2 จะได้ $0.041 = 0.1890346x$

$$x = 0.216$$

คำนวณร้อยละการดูดซับของสารละลายเมทิลีนบลูด้วยแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

$$\text{จาก ร้อยละการดูดซับ} = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100$$

โดยกำหนดให้ C_0 เป็นความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่สภาวะเริ่มต้น (mg/l)

C เป็นความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่สภาวะสมดุล (mg/l)

$$\text{ขวดที่ 1 จะได้ ร้อยละการดูดซับ} = \frac{(0.5 - 0.121)}{0.5} \times 100$$

$$= 75.88$$

$$\text{ดังนั้น ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย} = 62.05$$

คำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับ (q) ;

$$\text{จากสมการ } q = \frac{V(C_0 - C)}{W}$$

โดยกำหนดให้ V เป็นปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลู (l)

C_0 เป็นความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่สภาวะเริ่มต้น (mg/l)

C เป็นความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่สภาวะสมดุล (mg/l)

W เป็นปริมาณของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (g)

$$\text{ขวดที่ 1 จะได้ } q = \frac{0.05(0.5 - 0.121)}{0.102}$$

$$q = 0.186$$

$$\text{ขวดที่ 2 จะได้ } q = \frac{0.05(1.0 - 0.216)}{0.101}$$

$$q = 0.387$$

จากนั้นนำมาคำนวณค่า $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ ได้ดังนี้

$$\text{ขวดที่ 1 จะได้ } \frac{1}{q} = \frac{1}{0.186}$$

$$= 5.382$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{C} &= \frac{1}{0.120} \\ &= 8.292\end{aligned}$$

ขาคที่ 2 จะได้

$$\begin{aligned}\frac{1}{q} &= \frac{1}{0.387} \\ &= 2.583\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{C} &= \frac{1}{0.216} \\ &= 4.621\end{aligned}$$

เมื่อนำค่า $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ มาพล็อตกราฟแล้ว จะได้สมการเส้นตรงดังนี้

$$y = 0.538x + 0.657$$

เมื่อนำมาพิจารณาในสมการ

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m k_L C} + \frac{1}{q_m}$$

จะได้

$$\frac{1}{q_m k_L} = 0.538$$

และ

$$\frac{1}{q_m} = 0.657$$

จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหา q_m และ k_L ซึ่งปรากฏดังตารางข้างต้น

จะได้

$$q_m = \frac{1}{0.657}$$

$$q_m = 1.523$$

และ

$$k_L = \frac{1}{(1.523)(0.538)}$$

$$k_L = 1.221$$

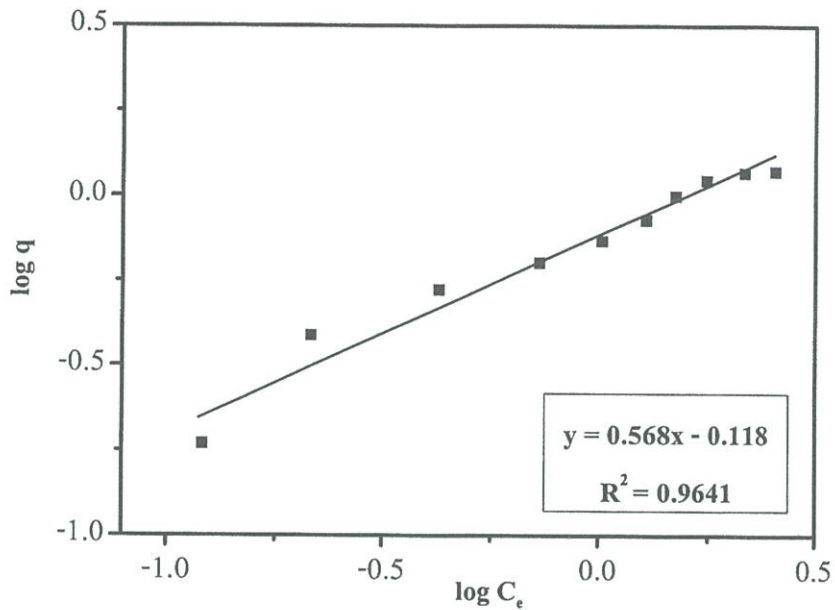
$\frac{1}{q_m}$	q_m	$\frac{1}{q_m k_L}$	$q_m k_L$	k_L
0.657	1.523	0.538	1.860	1.221

ดังนั้น แบบจำลอง คือ $\frac{1}{q} = \frac{0.538}{C} + 0.657$

4. การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดลิช

ตารางที่ ข.4 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดลิชของสารละลายเมทิลีนบลู

ขวดที่	q (mg/l)	C _e (mg/g)	log q	log C _e
1	0.186	0.121	-0.731	-0.919
2	0.387	0.216	-0.412	-0.665
3	0.527	0.425	-0.278	-0.371
4	0.634	0.731	-0.198	-0.136
5	0.733	1.019	-0.133	0.008
6	0.847	1.019	-0.072	0.107
7	0.997	1.279	-0.001	0.173
8	1.108	1.490	0.045	0.245
9	1.168	1.759	0.067	0.334
10	1.180	2.156	0.072	0.407



รูปที่ ข.3 ไอโซเทอมการดูดซับของสารละลายเมทิลีนบลูแบบฟรอนดลิช

จากสมการ
$$q = k_F(C_e^{\frac{1}{n}})$$

จะได้
$$\log q = \log k_F + \frac{1}{n} \log C_e$$

ซึ่งเมื่อนำค่า $\log q$ และ $\log C_e$ มาพล็อตกราฟจะได้ดังกราฟข้างต้น และค่าเหล่านี้คำนวณได้จาก
คำนวณหาค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่สถานะสมดุล (C) ;

จากสมการของกราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลู $y = 0.1890346x$

โดยกำหนดให้ y เป็นค่าการดูดกลืนแสงที่แท้จริง

x เป็นค่าความเข้มข้น ณ จุดสมดุล (C)

ขวดที่ 1 จะได้ $0.023 = 0.1890346x$

$$x = 0.121$$

ขวดที่ 2 จะได้ $0.041 = 0.1890346x$

$$x = 0.216$$

คำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับ (q) ;

$$\text{จากสมการ} \quad q = \frac{V(C_0 - C)}{W}$$

โดยกำหนดให้ V เป็นปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลู (l)
 C_0 เป็นความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่สภาวะเริ่มต้น (mg/l)
 C เป็นความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่สภาวะสมดุล (mg/l)
 W เป็นปริมาณของแมกนีเซียมไพโรฟอสเฟต (g)

$$\begin{aligned} \text{ขวดที่ 1 จะได้} \quad q &= \frac{0.05(0.5 - 0.121)}{0.102} \\ q &= 0.186 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ขวดที่ 2 จะได้} \quad q &= \frac{0.05(1.0 - 0.216)}{0.101} \\ q &= 0.387 \end{aligned}$$

จากนั้นนำมาคำนวณค่า $\log q$ และ $\log C_e$ ได้ดังนี้

ขวดที่ 1 จะได้	$\log q$	=	$\log 0.186$	=	-0.731
	$\log C_e$	=	$\log 0.121$	=	-0.919
ขวดที่ 2 จะได้	$\log q$	=	$\log 0.387$	=	-0.412
	$\log C_e$	=	$\log 0.216$	=	-0.665

เมื่อนำค่า $\log q$ และ $\log C_e$ มาพล็อตกราฟแล้ว จะได้สมการเส้นตรงดังนี้

$$y = 0.568x - 0.118$$

เมื่อนำมาพิจารณาในสมการ

$$\log q = \log k_F + \frac{1}{n} \log C_e$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad \log k_F &= -0.118 \\ k_F &= 0.762 \end{aligned}$$

และ $\frac{1}{n} = 0.568$

ดังนั้น แบบจำลอง คือ $\log q = 0.568 \log C_e - 0.118$