

การสังเคราะห์ การตรวจสอบเอกลักษณ์ และ การดูดซับเมธิลีนบลูบน
อลูมิเนียมฟอสเฟต

SYNTHESIS, CHARACTERIZATION AND ADSORPTION OF
METHYLENE BLUE ON ALUMINIUM PHOSPHATE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของ การศึกษาทางเทคโนโลยีสุทรวิวิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๕๐

การสังเคราะห์ การตรวจสอบเอกลักษณ์ และ การดูดซับเมธิลีนบลูบน
อลูมิเนียมฟอสเฟต

SYNTHESIS, CHARACTERIZATION AND ADSORPTION OF
METHYLENE BLUE ON ALUMINIUM PHOSPHATE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SYNTHESIS, CHARACTERIZATION AND ADSORPTION OF
METHYLENE BLUE ON ALUMINIUM PHOSPHATE**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY**

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **ACADEMIC YEAR 2013** อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์ การตรวจสอบเอกลักษณ์ และ การดูดซับเมธิลีนบลูบนอลูมิเนียมฟอสเฟต
Synthesis, characterization and adsorption of methylene blue on aluminium phosphate



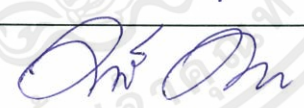
ชื่อนักศึกษา นางสาวนกนกร พงษ์ภมร รหัสนักศึกษา 53050149
นางสาวนวรรตน์ พุฒสกุล รหัสนักศึกษา 53050249
นางสาววรลักษณ์ เทียนกระจ่าง รหัสนักศึกษา 53050334

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี
อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2556

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

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสังเคราะห์ การตรวจสอบเอกลักษณ์ และ การดูดซับเมธิลีนบลูบน อลูมิเนียมฟอสเฟต	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกนกกร	พงษ์ภมร
	นางสาวนวรรตน์	พูนสกุล
	นางสาววรลักษณ์	เทียนกระจ่าง
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2556	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการสังเคราะห์และตรวจสอบเอกลักษณ์ของอลูมิเนียมฟอสเฟต (AIPO₄) และศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลูบน AIPO₄ โดยมีการใช้สารตั้งต้นที่แตกต่างกันคือ AlCl₃ และ Al(NO₃)₃ สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมอย่างง่ายและรวดเร็วที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งทำการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิค TGA FT-IR XRD และ SEM ผลจากการตรวจสอบพบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวของ AIPO₄·xH₂O ไปเป็น AIPO₄ คือที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส การตรวจสอบแถบการสั่นของ PO₃ ที่ความยาวคลื่น 1120 cm⁻¹ และ AIPO₄ ที่เตรียมได้มีโครงสร้างเป็น แบบออสฐาน โดยที่พื้นผิวของ AIPO₄ มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็ก เมื่อนำ AIPO₄ มาทดสอบการดูดซับเมธิลีนบลูที่สภาวะอุณหภูมิห้อง และใช้ระยะเวลาในการดูดซับ 45 นาที ทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ พบว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว และ AIPO₄ มีประสิทธิภาพในการดูดซับเมธิลีนบลูได้สูงถึง 83%

คำสำคัญ : โลหะฟอสเฟต, การดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Synthesis, Characterization and Adsorption of Methylene blue on Aluminium Phosphate	
Student	Miss Kanokkorn	Pongpamorn
	Miss Nawarat	Putsakul
	Miss Woralak	Thienkrajang
Degree	Bachelor of Science	
Major Program	Industrial Chemistry – Analytical Instrumentation	
Academic Year	2013	
Advisor	Assistant Professor Dr. Montree Thongkam	

Abstract

This special project studied on the simple and rapid synthesis, characterization and adsorption of methylene blue on aluminium phosphate. The substance were used, i.e. AlCl_3 and $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$, for the synthesis by precipitation method under condition at room temperature. It was confirmed by characterization techniques such as FT-IR, TGA, and XRD. The synthesized AlPO_4 has high thermal stability at 650°C . The vibration of PO_3 were detected with 1120 cm^{-1} wavelength. The morphology of the material was explained by using SEM. AlPO_4 had an amorphous structure surface and high porosity nature. The adsorption of methylene blue were studied at room temperature for 45 min. Studied isotherm of adsorption was observed that the AlPO_4 has monolayer adsorption and maximum efficiency the adsorption was 83.41%

Keywords : Metal Phosphate , Adsorption

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ดีด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่ายที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อความสมบูรณ์ของโครงการนี้ ทางผู้จัดทำโครงการพิเศษนี้จึงขอขอบพระคุณผู้ให้ความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์ดังรายนามต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการแก้ไขในการทำโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการทุกท่าน ที่ช่วยในการตรวจสอบแก้ไขให้โครงการพิเศษฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้ความรู้และคำแนะนำรวมถึงแนวทางแก้ไขปัญหา

ขอขอบคุณ พี่นักศึกษาปริญญาโทและเอก ทุกท่านที่กรุณาแนะนำและสอนเป็นอย่างดี และเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทำการทดลอง

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์และสารเคมี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์สาร

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดมา และขอบคุณกำลังใจจากบิดา มารดา อาจารย์ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกท่านที่ทำให้โครงการพิเศษนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

กนกกร พงษ์ภมร

นวรรตน์ พุฒสกุล

วรลักษณ์ เทียนกระจ่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูปภาพ	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัย	4
2.1 โลหะฟอสเฟต	4
2.2 สีย้อมชนิดเมธิลีนบลู	6
2.3 โลหะหนัก	7
2.4 ทฤษฎีการดูดซับ	11
2.4.1 กลไกการดูดซับ	12
2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	12
2.4.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ	14
2.5 เทคนิคที่ใช้สังเคราะห์โลหะฟอสเฟต	17
2.5.1 การเตรียมแบบตกตะกอน	17
2.5.2 วิธีการเตรียมแบบไฮโดรเทอร์มัล	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3 วิธีการเตรียมแบบโซล-เจล	18
2.5.4 วิธีการเตรียมแบบใช้สภาวะตัวกลาง	19
2.5.5 วิธีการเตรียมแบบตกตะกอนร่วม	19
2.5.6 วิธีการเตรียมแบบใช้โซโวเทอร์มัล	19
2.5.7 วิธีการเตรียมด้วยไมโครเวฟ	20
2.6 การตรวจสอบเอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ห่อลูมิเนสเซนซ์ฟอสเฟต	21
2.6.1 เครื่องตรวจวัดสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบอินฟราเรด	21
2.6.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	24
2.6.3 เทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัย คุณสมบัติทางความร้อน	26
2.6.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	27
2.6.5 เทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี	30
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	36
3.1 บทนำ	36
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	36
3.3 สารเคมี	37
3.4 วิธีการสังเคราะห์	38
3.4.1 การสังเคราะห์ $\text{AlPO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ด้วยสารตั้งต้น $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ กับ H_3PO_4	38
3.4.2 การสังเคราะห์ $\text{AlPO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ด้วยสารตั้งต้น $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ กับ H_3PO_4	39
3.5 วิธีการดูดซับบนอลูมิเนียมฟอสเฟต	40
3.5.1 การสร้างกราฟมาตรฐานด้วยสารละลายเมธิลีนบลู	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.2 การดูซ้ำของเมธิลินบลูบนตัวรองรับอลูมิเนียมฟอสเฟต	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	41
4.1 การเตรียมสารอลูมิเนียมฟอสเฟต	41
4.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของสาร	43
4.2.1 การตรวจสอบจากผลการตรวจวัดการสั่นแบบอินฟราเรด	43
4.2.2 การตรวจสอบจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	47
4.2.3 การตรวจสอบการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยสมบัติทางความร้อน	48
4.2.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค	50
4.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับเมธิลินบลู	52
บทที่ 5 การสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุปการสังเคราะห์อลูมิเนียมฟอสเฟต	58
5.2 สรุปผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของอลูมิเนียมฟอสเฟต	58
5.3 ผลการศึกษาการดูดซับเมธิลินบลูบนอลูมิเนียมฟอสเฟต	58
5.4 ข้อเสนอแนะ	59
เอกสารอ้างอิง	60
ภาคผนวก ก	63
ภาคผนวก ข	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ภาคผนวก ก 66
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ชนิดของโลหะหนัก แหล่งที่พบ และผลกระทบของโลหะหนักต่อสุขภาพมนุษย์	10
2.2 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ	11
4.1 ร้อยละผลิตภัณฑ์ของ $\text{AlPO}_4 \cdot 2.4\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{AlPO}_4 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$ ที่ได้จากการสังเคราะห์ของสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน	42
4.2 ร้อยละผลิตภัณฑ์ของ AlPO_4 ที่ได้จากการสังเคราะห์ของสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน	47
4.3 แถบการสั่นและการจำแนกรูปแบบการสั่นของสาร $\text{AlPO}_4 \cdot 2.4\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{AlPO}_4 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$ ก่อนเผาซึ่งได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน	45
4.4 แถบการสั่นและการจำแนกรูปแบบการสั่นของสาร AlPO_4 หลังเผาซึ่งได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน	45
4.5 แสดงข้อมูลโดยสรุปที่ได้จากเทคนิค TGA ของ $\text{AlPO}_4 \cdot 2.4\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{AlPO}_4 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$ ที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ $10.0 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$	48
4.6 ข้อมูลจากการคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับเมธิลีนบลูบนอลูมิเนียมฟอสเฟตที่ได้จากสารตั้งต้น AlCl_3	52
4.7 ข้อมูลจากการคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับเมธิลีนบลูบนอลูมิเนียมฟอสเฟตที่ได้จากสารตั้งต้น $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	52
4.8 ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับอลูมิเนียมฟอสเฟตที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วย AlCl_3 และ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	56
4.9 สมการแลงเมียร์ของ AlPO_4	56
4.10 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการดูดซับของ AlPO_4 ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน	57
ก1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของเมธิลีนบลู	63
ค1 ตารางแสดงน้ำหนักของ AlPO_4 ที่ใช้ในการดูดซับเมธิลีนบลู	66
ค2 ข้อมูลต่างๆที่ได้จากการทดลองใช้ AlPO_4 ที่ได้จากสารตั้งต้น AlCl_3 ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกหนึ่งในการดูดซับสารละลายเมธิลีนบลู โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง	66

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ค3 ข้อมูลต่างๆที่ได้จากการทดลองใช้ $AlPO_4$ ที่ได้จากสารตั้งต้น $Al(NO_3)_3$ ในการดูดซับสารละลายเมธิลินบลู โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง	67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของเมธิลีนบลู	6
2.2 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่างๆ ของ Brunauer-Emmett-Teller ในระบบก๊าซ	16
2.3 แบบจำลองการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟแล้วเกิดเป็นความร้อนของวัสดุ	20
2.4 ลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	24
2.5 โครงสร้างตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะฟอสเฟต	26
2.6 แสดงการเกิดอันตรกิริยาของสารเคมีกับการแผ่รังสีหรือแสง	31
2.7 แสดงกระบวนการเกิดการกระตุ้น	31
2.8 แสดง electronic energy levels และ transitions	32
4.1 สเปกตรัม FT-IR ของอลูมิเนียมฟอสเฟตซึ่งได้จากสารตั้งต้น $AlCl_3$ (a) ก่อนเผา (b) หลังเผา	43
4.2 สเปกตรัม FT-IR ของอลูมิเนียมฟอสเฟตซึ่งได้จากสารตั้งต้น $Al(NO_3)_3$ (a) ก่อนเผา (b) หลังเผา	44
4.3 สเปกตรัม FT-IR ของอลูมิเนียมฟอสเฟตก่อนเผาซึ่งได้จากสารตั้งต้น (a) $AlCl_3$ (b) $Al(NO_3)_3$	46
4.4 สเปกตรัม FT-IR ของอลูมิเนียมฟอสเฟตหลังเผาซึ่งได้จากสารตั้งต้น (a) $AlCl_3$ (b) $Al(NO_3)_3$	46
4.5 รูปแบบ XRD ของ $AlPO_4$ หลังเผาซึ่งได้จากสารตั้งต้น $AlCl_3$	47
4.6 รูปแบบ XRD ของ $AlPO_4$ หลังเผาซึ่งได้จากสารตั้งต้น $AlNO_3$	47
4.7 เทอร์โมแกรม TGA ของ $AlPO_4 \cdot 2.4H_2O$ ที่สังเคราะห์ได้จาก $AlCl_3$	48
4.8 เทอร์โมแกรม TGA ของ $AlPO_4 \cdot 2.8H_2O$ ที่สังเคราะห์ได้จาก $Al(NO_3)_3$	49
4.9 เปรียบเทียบเทอร์โมแกรม TGA ระหว่าง (a) $AlPO_4 \cdot 2.4H_2O$ และ (b) $AlPO_4 \cdot 2.8H_2O$ ซึ่งได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน	49

เอกสารนี้เป็น 4.10 สันฐานวิชา SEM ของอนุพันธ์ทางความร้อน $AlPO_4$ ที่ได้จากสารตั้งต้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก $AlCl_3$ ที่กำลังขาย 1000 เท่า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ 50

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 สัณฐานวิทยา SEM ของอนุพันธ์ทางความร้อน AlPO_4 ที่ได้จากสารตั้งต้น $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า	51
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q กับ C_c ของ AlPO_4 ที่ได้จากสารตั้งต้น AlCl_3	53
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q กับ C_c ของ AlPO_4 ที่ได้จากสารตั้งต้น $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	53
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q$ กับ $1/C_c$ ของ AlPO_4 ที่ได้จากสารตั้งต้น AlCl_3	54
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ กับ $\log C_c$ ของ AlPO_4 ที่ได้จากสารตั้งต้น AlCl_3	54
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q$ กับ $1/C_c$ ของ AlPO_4 ที่ได้จากสารตั้งต้น $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	55
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ กับ $\log C_c$ ของ AlPO_4 ที่ได้จากสารตั้งต้น $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	55
ก1 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายเมธิลีนบลู	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมทั้งทางดิน ทางน้ำ และทางอากาศ ก่อให้เกิดความเสียหาย และเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งรวมไปถึงยังเป็นปัญหาสำคัญของโลกในปัจจุบัน โลหะหนักนั้นสามารถเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้หลายทาง และแหล่งที่มาหลักๆของโลหะหนัก ได้แก่ โรงงานอุตสาหกรรมหลาย ๆ ประเภท อาทิ โรงงานแบตเตอรี่ โรงงานชุบโลหะ การใช้สารกำจัดศัตรูพืช การทำเหมืองแร่ สารเคมีจากอุตสาหกรรมเกษตร น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมพลาสติก น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน และวัสดุเหลือทิ้งต่าง ๆ เช่น วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานกระดาษและโรงงานผลิตอาหารสำเร็จรูป ซึ่งในปัจจุบันปริมาณของเสียจากบ้านเรือนและอุตสาหกรรมมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างมาก การกำจัดขยะมูลฝอยขององค์กรส่วนท้องถิ่นในเขตเมืองใหญ่ยังนิยมใช้วิธีการฝังกลบซึ่งทำให้มีปัญหาด้านการจัดการน้ำชะขยะตามมา แม้ว่าในการออกแบบหลุมฝังกลบขยะชุมชนจะมีการออกแบบให้มีระบบบำบัดน้ำชะขยะอยู่เสมอก็ตาม แต่องค์กรส่วนท้องถิ่นยังขาดงบประมาณ และขาดบุคลากรที่มีความชำนาญในการเดินระบบ จึงทำให้เกิดปัญหาของการไหลซึมของน้ำชะขยะออกไปนอกบริเวณที่ฝังกลบซึ่งอาจทำให้สารมลพิษต่างๆ และโลหะหนักที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ ได้แก่ ตะกั่ว โครเมียม โปรท ยูเรเนียม ซีลีเนียม สังกะสี สารหนู แคดเมียม เงิน ทอง และนิกเกิลจัดเป็นสารอันตรายประเภทที่มีพิษถาวร เนื่องจากโลหะหนักเป็นสารที่ไม่เสื่อมสลายทางชีวภาพซึ่งนอกจากจะไม่เปลี่ยนรูปตามกาลเวลาแล้ว ยังสามารถส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำตามธรรมชาติ และยังสามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ใกล้เคียงบริเวณนั้นได้โดยผ่านตามห่วงโซ่อาหาร จากการทำของเสีย มลภาวะจากดิน และน้ำ โลหะหนักสามารถทำลายระบบประสาท ตับ กระจก และขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ที่สำคัญ การหลีกเลี่ยงอันตรายต่อสุขภาพจึงจำเป็นต้องกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือจากชุมชนที่อยู่อาศัยออกก่อนทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งวิธีการกำจัดโลหะหนัก มี 3 วิธี ได้แก่ วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวภาพ กระบวนการกำจัดโลหะหนักขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น เทคโนโลยีของการบำบัดน้ำเสีย ความเข้มข้น และสถานการณ์ออกซิเดชัน (oxidation state) ของโลหะ ความเป็นกรด-เบสของน้ำ และกลไกการกำจัดโลหะ เทคนิคที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ วิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมีมีหลาย

กระบวนการได้แก่ กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) กระบวนการกรองแบบอุลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) กระบวนการแยกด้วยไฟฟ้าผ่านเยื่อกรอง (electrodialysis) กระบวนการออสโมซิสผกกลับ (reverse osmosis) กระบวนการตกตะกอนและตกตะกอนด้วยเคมี (precipitation and coagulation) และกระบวนการดูดซับ (adsorption) เป็นต้น โครงการวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักโดยใช้อลูมิเนียมฟอสเฟต (AlPO_4) เป็นตัวดูดซับ เพราะอลูมิเนียมฟอสเฟต (AlPO_4) มีความสามารถในการดูดซับที่ดี และมีราคาถูก ซึ่งได้ทำการศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับสารละลายเมธิลีนบลูจากสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการเตรียมอลูมิเนียมฟอสเฟต (AlPO_4) ด้วยหลักการตกตะกอน
- 1.2.2 ศึกษาพฤติกรรมสลายตัวของ $\text{AlPO}_4 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ จนกระทั่งเป็น AlPO_4 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal behavior analysis : TGA)
- 1.2.3 ตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดด้วย เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transfrered Spectroscopy : FT-IR) การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction method : XRD) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM)
- 1.2.4 ศึกษาการดูดซับสารละลายเมธิลีนบลูโดยใช้อลูมิเนียมฟอสเฟต (AlPO_4) และทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย เทคนิควิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV – VIS)

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 สังเคราะห์สารกลุ่มอลูมิเนียมฟอสเฟต (AlPO_4) โดยใช้เทคนิคการตกตะกอนอย่างง่าย สภาวะที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้ สารตั้งต้นคือ อลูมิเนียมคลอไรด์, $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ อลูมิเนียมไนเตรท ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ทำปฏิกิริยากับ phosphate source (H_3PO_4) ที่สภาวะความเป็น กรด-เบส (pH) 7 โดยสารที่นำมาปรับความเป็นกรด-เบส คือ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_2OH)
- 1.3.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของสารที่เตรียมได้ทั้งหมด โดยใช้เทคนิคต่างๆ

- ตรวจสอบการสั่นของสารที่เตรียมได้ทั้งหมด รวมทั้งอนุพันธ์ทางความร้อนของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ FT-IR)

- ตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารที่เตรียมด้วยเทคนิคการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

(X-ray Diffraction method : XRD)

- ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของสารที่เตรียมได้ทั้งหมด รวมถึงอนุพันธ์ทางความร้อนของสาร ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM)
- ตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของสารที่เตรียมได้ด้วย เทคนิคเทอร์มอลกราฟิเมทริกแอนอลไลซิส (Thermal behavior analysis : TGA)

1.3.2 ศึกษาการดูดซับเมธิลีนบลูโดยใช้ลูมิเนียมฟอสเฟต ($AlPO_4$) วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย เทคนิควิติเบิลสเปกโทรสโคปี (UV VIS) โดยมีความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากโครงการพิเศษนี้เมื่อเสร็จสมบูรณ์แล้ว คาดว่าจะได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1.4.1 ได้ความรู้ ความเข้าใจสำหรับการเตรียมลูมิเนียมฟอสเฟต อย่างง่าย สะดวก และรวดเร็ว

1.4.2 ได้ความรู้เกี่ยวกับการดูดซับเมธิลีนบลูบนลูมิเนียมฟอสเฟต ($AlPO_4$)

1.4.3 ได้ความรู้การใช้เครื่องมือจากการวิเคราะห์สาร และสามารถอธิบายผลที่ได้จากการทดลองได้

จากข้อมูลต่างๆที่ได้รับจากโครงการวิจัยนี้ ในอนาคตน่าจะมีโอกาสถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการเลือกใช้สารที่ศึกษานี้ เพื่อใช้ประโยชน์ทั้งระดับภาคการศึกษาและระดับอุตสาหกรรมต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงข้อมูลทางวิชาการและบทความต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับโลหะฟอสเฟต โลหะหนักที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุตสาหกรรม และยังรวมถึงเทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์ เทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบเอกลักษณ์ต่างๆ ของสารในกลุ่มฟอสเฟต นอกจากนี้ยังมีข้อมูลงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 โลหะฟอสเฟต [2]

สารประกอบของฟอสเฟตเป็นสารประกอบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีธาตุฟอสฟอรัส (P) ซึ่งเป็นธาตุหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชโดยปกติธาตุฟอสฟอรัสในธรรมชาติจะอยู่ในรูปที่เป็นส่วนหนึ่งของ phosphate ions รูปที่มีมากที่สุด คือ orthophosphate ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปไฮโดรเจนฟอสเฟต ($H_2PO_4^-$) ในสภาพที่ดินเป็นกรด และอยู่ในรูปของโมโนไฮโดรเจนฟอสเฟต (HPO_4^{2-}) ในสภาพที่ดินเป็นด่าง โลหะฟอสเฟตนั้นสามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้เป็นสารเคลือบสี ใช้ป้องกันสนิม ใช้ในอุตสาหกรรมปุ๋ย และยังสามารถใช้เป็นสารดูดซับได้อีกด้วย

โลหะฟอสเฟตเป็นแร่ชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นเกิดตามธรรมชาติ ซึ่งจะเกิดผ่านกลไกที่เรียกว่ากระบวนการเฟอร์โรไลซิส (ferrolysis process) ซึ่งจะเกิดผ่านปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) ภายใต้ภาวะกรด - เบส โดยมีระยะเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสม จากนั้นก็จะได้เป็นตะกอนเกิดขึ้นระหว่าง ธาตุฟอสฟอรัส ที่มีอยู่ภายในดินหรืออาจจะอยู่ในปุ๋ยของเกษตรกร กับ ธาตุที่เป็นโลหะ เช่น ซิลิกา ซิลิเกต ออกไซด์ของเหล็ก ไฮดรอกไซด์ของเหล็ก และ อลูมิเนียม เป็นต้น ซึ่งฟอสเฟตจะถูกเปลี่ยนรูปจากรูปที่สามารถละลายน้ำได้ไปอยู่ในรูปที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก เรียกว่า การตรึงฟอสเฟตในดิน ซึ่งมีกระบวนการที่สำคัญอยู่ 3 กระบวนการ คือ

1. การตกตะกอนเชิงเคมี (chemical precipitation) เป็นปฏิกิริยาระหว่างแคตไอออนบวก (cation) พวก เหล็ก อลูมิเนียม แคลเซียม และแมกนีเซียมกับฟอสเฟตไอออนที่ไม่ละลายน้ำ สามารถการค่าไม่ว่ากรณีใด แบ่งปฏิกิริยาออกอีกเป็น 2 กลุ่มดังนี้ เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ในสภาพของดินกรด เหล็กและอลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตไอออนเกิดเป็นสารประกอบฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำ ดังสมการ



1.2 ในสภาพของดินด่าง แคลเซียมและแมกนีเซียมทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตไอออนเกิดเป็นสารประกอบฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำ ดังสมการ



2. ปรากฏการณ์การดูดซับ (adsorption phenomena) ประจุลบของฟอสเฟตไอออนจะถูกดูดซับอยู่กับไอออนบวกบริเวณผิวของแร่ดินเหนียว (clay mineral) ด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางด้านไฟฟ้า (electrostatic bonding) คือประจุลบของฟอสเฟตไอออนจะดูดซับอยู่กับประจุบวกของแร่ดินเหนียว

3. ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนแอนไอออน (anion exchange reaction) เป็นการแลกเปลี่ยนระหว่าง ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH) กับฟอสเฟตไอออนในสารละลายดิน เมื่อฟอสเฟตเข้าไปแทนที่สามารถเกิดพันธะเคมี กับ โครงสร้างของแร่ดินเหนียว ได้ฟอสเฟตชนิดนี้ยากที่จะถูกปลดปล่อยออกมาทำให้เกิดเป็นสารประกอบฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำ

จากการที่ฟอสเฟตถูกเปลี่ยนรูป ไปอยู่ในรูปที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้เกิดประโยชน์ต่อพืชได้เล็กน้อยเท่านั้น แต่ความเป็นประโยชน์ของโลหะฟอสเฟตก็ขึ้นอยู่กับสถานะความเป็นกรด-เบสของดินด้วย เช่น อลูมิเนียมฟอสเฟต (AlPO_4) เป็นประโยชน์ต่อพืชได้น้อยแต่จะละลายเป็นประโยชน์ได้บ้างในดินที่มีสถานะเป็นกรด หินฟอสเฟตที่มี AlPO_4 เจือปนอยู่มากจัดเป็นหินฟอสเฟตคุณภาพต่ำ เนื่องจากมีลักษณะขื่น และ เหนียวหนืด เป็นต้น

นอกจากโลหะฟอสเฟตที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติแล้ว โลหะฟอสเฟตนั้นยังสามารถที่จะสังเคราะห์ขึ้นได้ ซึ่งในการสังเคราะห์สามารถทำได้หลากหลายวิธี คือ

1. วิธีการตกตะกอน (Precipitation)
2. วิธีการเตรียมแบบ ไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal method)

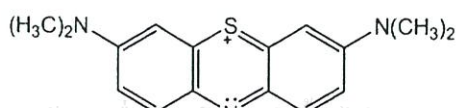
3. วิธีการเตรียมแบบ โซล-เจล (Sol-gel)
4. วิธีการเตรียมแบบใช้สภาวะตัวกลาง (Media synthetic method)
5. วิธีการเตรียมแบบจากการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method)
6. วิธีการเตรียมโดยใช้โซลโวเทอร์มัล (Solvothormal method)
7. การเตรียมโดยไมโครเวฟ (Microwave method)

ในแต่ละวิธีที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถที่จะผลิตโลหะฟอสเฟตได้อย่างดีและมีประสิทธิภาพ ซึ่งในปัจจุบันมีผู้ที่สนใจในการสังเคราะห์โลหะฟอสเฟตขึ้นเองภายในห้องปฏิบัติการนั้นเป็นที่นิยมมาก เพราะสามารถที่จะกำหนดธาตุที่เป็น โลหะได้เองตามรูปแบบที่ต้องการ และ ยังเป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็วกว่าวิธีที่โลหะฟอสเฟตเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

2.2 สีย้อมชนิดเมธิลีนบลู [4-6]

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียม หรือ ถ่านหิน เมื่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือ ถ่านหินผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซีน ไซลีน โทลูอิน แนพทาลิน และพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่าง ๆ สีย้อมโดยทั่วไปจะเป็นเกลือ ซึ่งจะประกอบไปด้วยไอออนที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ ไอออนตัวใดตัวหนึ่งจะเป็นตัวให้สี ซึ่งไอออนตัวนี้จะต้องมีประจุตรงข้ามกับประจุในส่วนที่เราจะย้อมให้ติดสี ดังนั้นสีย้อมจึงแบ่งออกได้เป็น 2 พวกคือ สีย้อมที่เป็นด่าง (basic dye) เป็นตัวให้สี และ สีย้อมที่เป็นกรด (acid dye) ซึ่งเป็นตัวให้สีเช่นกัน

เมธิลีนบลู มีสูตรโครงสร้างเป็น $C_{16}H_{18}ClN_3S$ มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สวิสบลู (swis sblue) เป็นสีย้อมที่เป็นด่าง (basic dye) ซึ่งมีไอออนบวกเป็นตัวให้สี มีความสามารถในการละลายน้ำได้ปริมาณ 3.55 เปอร์เซ็นต์ เมื่อละลายน้ำแล้วจะเป็นสีน้ำเงิน มีน้ำหนักโมเลกุล 319.86 มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของเมธิลีนบลู

ใช้เป็นสารเชื่อมสีในการศึกษาทางแบคทีเรีย เป็นรีเอเจนท์ ตัวช่วยยังกระบวนการสร้างพอลิเมอร์และ สีเชื่อมผสมชนิดไม่ถาวร ใช้เป็นสีย้อมกระดาษ สิ่งทอ และ ผนัง

ผลกระทบต่อสุขภาพ

1. ตา : อาจทำให้เยื่อตาอักเสบจากสารเคมี รู้สึกระคายเคืองต่อตา
2. ผิวหนัง : ระคายเคืองต่อผิว หากถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายอาจทำให้เกิดอาการตัวเขียว (อันเนื่องมาจากออกซิเจนขาดเลือด)
3. การกลืนกิน : อาจทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินอาหาร อาจทำให้มีอาการ คลื่นไส้ อาเจียนและท้องเสีย อาจก่อให้เกิดโรคโลหิตจาง
4. การสูดดม : ระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ อาจก่อให้เกิด methemoglobinemia (ภาวะที่เม็ดเลือดแดงของร่างกายลดความสามารถในการขนส่งออกซิเจนลง) อาการตัวเขียวคล้ำ (เนื่องจากการขาดออกซิเจนของเลือด) ชัก หัวใจเต้นเร็วผิดปกติ อาการหอบเหนื่อย (หายใจลำบาก) และอาจส่งผลต่อชีวิตได้
5. ผลกระทบเรื้อรัง : ผลกระทบอาจจะล่าช้า ถ้าทำการทดลองในห้องปฏิบัติการที่มีการสัมผัส บ่อยครั้ง อาจก่อให้เกิดการได้รับบาดเจ็บต่อกระดูกตา อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบ สืบพันธุ์

2.3 โลหะหนัก [7-9]

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ การพัฒนาเทคโนโลยีและการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ทำให้มีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมเกินขีดจำกัด ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่มีความรุนแรงซึ่งยากต่อการแก้ไข และหนึ่งในผลกระทบนั้น คือ การรั่วไหลและปนเปื้อนของ โลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำ โลหะหนักจัดอยู่ในกลุ่มธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 4 ขึ้นไป โลหะหนักส่วนใหญ่เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มทรานซิชัน (transition metals) ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โลหะหนักเป็นสารที่คงตัวไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนสะสมอยู่ในดิน และในดินตะกอนที่อยู่ในน้ำ รวมถึงยังสามารถสะสมอยู่ในสัตว์น้ำได้ด้วย

โลหะหนักเป็นวัตถุอันตรายที่ถูกนำมาใช้ในหลายภาคส่วน เช่น ในด้านอุตสาหกรรม เราใช้ โลหะหนักในการผลิตพลาสติก พีวีซี สี ถ่านไฟฉาย สำหรับทางด้านการเกษตร ใช้โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย ขณะเดียวกันทางการแพทย์ใช้โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยา

อุปกรณ์ทางการแพทย์และเครื่องสำอาง น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในการดำรงชีวิต

ในชีวิตประจำวัน คนเรามีความเสี่ยงต่อการนำโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายผ่านทางกรบริโภคหรือน้ำดื่มที่มีสารเหล่านี้ปนเปื้อนอยู่ โดยเฉพาะแหล่งชุมชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณโรงงานที่ขาดจิตสำนึกซึ่งมักจะลักลอบเทของเสียลงดินหรือลงแม่น้ำ และกำจัดกากของเสียอย่างผิดวิธี ทั้งนี้เนื่องจากต้องการลดรายจ่าย โลหะหนักบางชนิดสามารถให้ทั้งคุณและโทษต่อสิ่งมีชีวิต ขึ้นกับชนิดของสิ่งมีชีวิตและปริมาณที่ได้รับเข้าไป ตัวอย่างเช่น แคลที่เรียต้องการ โคบอลท์ (cobalt, Co) ทองแดง (copper, Cu) แมงกานีส (manganese, Mn) โมลิบดีนัม (molybdenum-Mo) แวนาเดียม (vanadium, V) และสังกะสี (zinc, Zn) ในปริมาณที่พอเหมาะต่อการเจริญเติบโต อย่างไรก็ตาม ปริมาณโลหะหนักที่มากเกินไปจะสร้างสิ่งแวดล้อมที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์เหล่านี้ ส่งผลให้ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ สำหรับโลหะหนักบางชนิด เช่น ปรอท (mercury, Hg) และแคดเมียม (cadmium, Cd) จัดเป็นสารพิษต่อร่างกาย

ตัวอย่างของโลหะมีบทบาทต่อภาคอุตสาหกรรม ซึ่งหลาย ๆ อุตสาหกรรมมีการใช้โลหะในกระบวนการผลิต เช่น

- อุตสาหกรรมยานยนต์ มีการใช้โลหะกลุ่มแพลทินัมมากที่สุด เพื่อใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา (catalytic converter)
- โลหะปรอท เป็นส่วนประกอบหลักของสารอะมัลกัมที่ใช้อุดฟัน (amalgum) ใช้เติมในสีทาบ้าน นอกจากนี้ยังใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตแบตเตอรี่และการสกัดแร่เงินและทอง
- โลหะแคดเมียม ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น โรงงานแบตเตอรี่ โรงงานทำสี โรงงานทำพลาสติก อะไหล่รถยนต์และโลหะผสมในอุตสาหกรรมเพชรพลอย
- โลหะดีบุกและอลูมิเนียม ใช้ในการผลิตกระป๋องบรรจุอาหารและผลไม้ หรือโลหะแท่งดีบุกและทองคำสำหรับผลิตในอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า และ อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

ด้วยเหตุนี้ทำให้มีการปนเปื้อนของโลหะในน้ำทิ้ง ซึ่งบางอุตสาหกรรมมีการแยกโลหะออกจากน้ำทิ้งแล้วแต่ด้วยวิธีการที่ต้องใช้สารเคมีที่ยุ่งยากหรือมีต้นทุนสูงทำให้หลาย ๆ อุตสาหกรรมละเลยที่

จะแยกโลหะกลับคืนจากน้ำทิ้ง ยิ่งถ้าโลหะที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งเป็น โลหะหนักด้วยแล้วก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและปัญหาสุขภาพตามมา

วิธีในการกำจัดโลหะหนัก ทางอุตสาหกรรมมี 3 วิธีได้แก่ วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมีและวิธีทางชีวภาพ กระบวนการกำจัดโลหะหนักออกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น เทคโนโลยีของการบำบัดน้ำเสีย ความเข้มข้น และสถานะการออกซิเดชัน (oxidation state) ของโลหะ ความเป็นกรด – เบสของน้ำ และกลไกการกำจัดโลหะ เทคนิคที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ วิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี เช่น วิธีออสโมซิสย้อนกลับ (reverse osmosis) การแยกกรองด้วยไฟฟ้า (electrodialysis) การกรอง (filtration) การแลกเปลี่ยนประจุ (ion-exchange) การตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมี และวิธีการดูดซับ โดยทั่วไปแล้ววิธีทางกายภาพ และ วิธีทางเคมีแต่ข้อเสียคือ ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักออกได้อย่างสมบูรณ์จึงมีการใช้วิธีทางชีวภาพเป็นทางเลือก ได้แก่ เทคโนโลยีดูดซับทางชีวภาพโดยใช้มวลชีวภาพธรรมชาติในการดูดซับ และ ทำให้โลหะหนักไม่เคลื่อนที่ในสารละลายเป็นกระบวนการกำจัดโลหะหนักที่ประหยัด และเป็นมิตรกับระบบนิเวศน์

โลหะหนักปริมาณน้อย ๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำจะไม่สามารถตรวจวัดได้ โลหะหนักเหล่านั้น ได้แก่ สารหนู แคดเมียม ตะกั่ว แมงกานีส ปรอท และสังกะสี ซึ่งมีความคงทนและไม่สลายตัวเมื่ออยู่ในน้ำ จึงทำให้โลหะหนักเข้าไปสู่ห่วงโซ่อาหาร และเป็นอันตรายต่อมนุษย์ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะหนัก แหล่งที่มา และผลกระทบต่อสุขภาพของโลหะหนักต่อสุขภาพมนุษย์ [1]

โลหะหนัก	แหล่งที่มา	ผลกระทบต่อสุขภาพ	ระดับที่อนุญาตให้ใช้ได้ (ppm)
สารหนู (As)	<ul style="list-style-type: none"> - สารกำจัดศัตรูพืช - สารกำจัดเชื้อรา - การถลุงโลหะ 	<p>หลอดเลือดอักเสบ</p> <p>ผิวหนังอักเสบ</p>	0.02
แคดเมียม (Cd)	<ul style="list-style-type: none"> - การเชื่อมโลหะ - การชุบโลหะ - สารกำจัดศัตรูพืช - ปุ๋ยแบตเตอรี่ - โรงปฏิกรณ์ปรมาณู 	<p>ทำลายตับ</p> <p>หลอดเลือดอักเสบ</p> <p>ระบบทางเดินอาหาร</p> <p>ไขกระดูก</p> <p>มะเร็ง</p>	0.06
ตะกั่ว (Pb)	<ul style="list-style-type: none"> - โรงงานทำสี - สารกำจัดศัตรูพืช - ควันท่อไอเสียรถยนต์ - การทำเหมือง - การเผาถ่าน 	<p>ทำลายตับ, ไต</p> <p>ระบบทางเดินอาหาร</p> <p>ในเด็กทำให้ปัญญาอ่อน</p>	0.1
แมงกานีส (Mn)	<ul style="list-style-type: none"> - การเชื่อมโลหะ - สารเติมในน้ำมัน - เชื้อเพลิงการผลิตโลหะผสมเหล็กและแมงกานีส 	<p>สูดดมหรือสัมผัสจะ</p> <p>ทำลายระบบประสาทส่วนกลาง</p>	0.26
ปรอท (Hg)	<ul style="list-style-type: none"> - สารกำจัดศัตรูพืช - แบตเตอรี่ - อุตสาหกรรมกระดาษ 	<p>ทำลายระบบประสาท</p>	0.01
สังกะสี (Zn)	<ul style="list-style-type: none"> - โรงกลั่น - การผลิตทองเหลือง - การชุบโลหะ - ท่อประปา 	<p>ไอของสังกะสีกัดกร่อน</p> <p>ผิวหนัง, ทำลายเยื่อประสาท</p>	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาดูงาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ทฤษฎีการดูดซับ [11-12]

การดูดซับ (adsorption) หมายถึง การที่โมเลกุลของสารถูกดึงเข้ามาติดบริเวณผิวของสารดูดซับ หรือ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารดูดซับ (adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (adsorbent)

ปริมาณสารดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ความดันและพลังงานศักย์ของอันตรกิริยา (interaction potential energy) ระหว่างสารดูดซับ ซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ กับสารดูดซับซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันหรือความเข้มข้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง การดูดซับบนผิวของแข็งแบ่งประเภทตามแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลเป็น 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) แรงที่ใช้ดูดซับเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลว กับ สารดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารในของเหลวกับของเหลว ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้าติดอยู่ที่สารดูดซับแทน ตัวอย่างเช่น การดูดซับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งภายในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวเป็นรูพรุนมาก ทำให้มีการดูดซับบนพื้นที่ผิวของสารดูดซับมากขึ้น ดังนั้นรูพรุนของสารดูดซับจึงมีความสำคัญ ส่วนการดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) แรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ โดยมีค่าพลังงานสูงมากในการเกิดพันธะและการดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับอย่างแท้จริง สมบัติการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
ค่าความร้อนการดูดซับ 100-500 kJ/mol	ค่าความร้อนการดูดซับ ~20 kJ/mol
เกิดที่อุณหภูมิสูง	เกิดที่อุณหภูมิต่ำ
ไม่เกิดการผันกลับ	เกิดการผันกลับได้เป็นส่วนใหญ่
เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว	เกิดการดูดซับหลายชั้น
มีพลังงานก่อกัมมันต์	ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์
แรงดึงดูดเป็นการดูดซับที่แข็งแรง	แรงดึงดูดเป็นการดูดซับอย่างอ่อนๆ

2.4.1 กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมาข้างของแข็งหรือของเหลว การเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกัน ดังนี้

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ในน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (intraparticle diffusion หรือ pore diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะพุ่งกระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 การดูดซับ (adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุนระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ การเกาะติดในระยะที่ 3 อาจจะเกาะติดบนผิวด้วยแรงทางฟิสิกส์หรือเคมีหรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน ในกระบวนการกำจัดน้ำเสียการดูดซับจะพิจารณาเฉพาะการเกาะติดด้วยแรงทางฟิสิกส์มากกว่าแรงทางเคมี

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ คือธรรมชาติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

2.4.2.1 ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ ธรรมชาติของตัวดูดซับเป็นปัจจัยหลักปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ ได้แก่

1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับในการดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น แต่พื้นที่ผิว โมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี และ โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น

2) ขนาดของตัวดูดซับ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ การลดขนาดของตัวดูดซับให้มีขนาดเล็กทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารที่มีขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ความลับ การเปิดเผยข้อมูลเป็นการฝ่าฝืนนโยบายความปลอดภัยด้านข้อมูลของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ หากมีการนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

3) เคมิที่ผิวหน้า หมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่อยู่บนผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมีสมบัติที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ

2.4.2.2 ธรรมชาติของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ ธรรมชาติของตัวดูดซับจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับดังนี้

1) ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการละลายสูงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ซึ่งจะทำให้การแพร่ขยายของการดูดซับลดลงเนื่องจากก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นต้องมีการทำละลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลาย

2) น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ เมื่อ น้ำหนักโมเลกุล และ ขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน

3) ความมีขั้ว (polarity) ของ โมเลกุล นอกจากธรรมชาติของโมเลกุลของสารแล้ว ยังขึ้นอยู่กับตัวทำละลายและตัวดูดซับของสารด้วย ซึ่งความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความมีขั้วเพิ่มขึ้น เนื่องจากความมีขั้วเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

4) ผลจาก $[H^+]$ หรือ pH ถ้า $[H^+]$ ลดลง อัตราการดูดซับจะเร็วและมาก

5) ผลจากอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราเร็วของการดูดซับเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่ความสามารถในการดูดซับบริเวณพื้นผิวจะลดลง เพราะเนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

2.4.2.3 ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ film diffusion และ pore diffusion ซึ่งขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของระบบ หากน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้ film diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม การที่ความปั่นป่วนสูง ทำให้ pore diffusion เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ทำให้อัตราการดูดซับเร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ของปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวกับความดันของก๊าซหรือความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับ กับ ความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใด ๆ ไอโซเทอมการดูดซับแบ่งออกได้เป็น ดังนี้

1. ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ.1916 เออร์วิง แลงเมียร์ (irving langmuir) ได้เสนอไอโซเทอมแบบง่ายที่สุด โดยมีสมมติฐานคือ

- 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)
- 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน
- 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับ ได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น และในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับจะเท่ากันและคงที่ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน

จากการศึกษาไอโซเทอมของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายได้ดังสมการ (2.5)

$$q = q_m K_L C_e / (1 + K_L C_e) \dots\dots\dots(2.5)$$

เมื่อ q = ความสามารถในการดูดซับ ซึ่งคำนวณได้จากปริมาณของสารถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

q_m = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของตัวถูกละลาย เมื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์

C_e = ความเข้มข้นตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

K_L = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับความใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_e/q = 1/K_L q_m + C_e/q_m \dots\dots\dots(2.6)$$

หรือ
$$1/q = (1/K_L q_m)1/C_e + 1/q_m \dots\dots\dots(2.7)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C_e$ จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกนคือ $1/q_m$ และมีความชันเท่ากับ $1/ K_L q_m$

2. ไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

ในปี ค.ศ. 1880-1941 นักฟิสิกส์-เคมี ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ปริมาณของสารดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายดังสมการ (2.8)

$$q = X/m = K_f C_e^{1/n} \dots\dots\dots (2.8)$$

- เมื่อ
- C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับที่สมดุล
 - X/m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ (mg/g)
 - K_f = ปริมาณความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (adsorption capacity)
 - $1/n$ = บ่งบอกถึงความแรงของการดูดซับ (adsorption intensity) ของความเป็นพื้นผิวหลายชั้น (g/l)

จากสมการฟรอนด์ลิช เมื่อใส่ลอการิทึม (logarithm) จะได้สมการ

$$\log q = \log X/m = \log K_f + (1/n) \log C_e \dots\dots\dots (2.9)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C_e$ ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกนสามารถนำมาหาค่า K_f ได้ และความชันของกราฟเป็น $1/n$

บางกรณีที่พล็อตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C_e$ แล้วไม่ได้เส้นตรงแสดงว่าเกิดการเบี่ยงเบนไปจากสมการของฟรอนด์ลิช เช่น การดูดซับสารละลายที่ไม่ได้วัดจากน้ำหนักจริงของสารดูดซับแต่ค่าจากสารถูกดูดซับในตัวทำละลายปริมาณมาก ทำให้สารถูกดูดซับที่เหลือที่ความเข้มข้นสูงจึงมีปริมาณลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

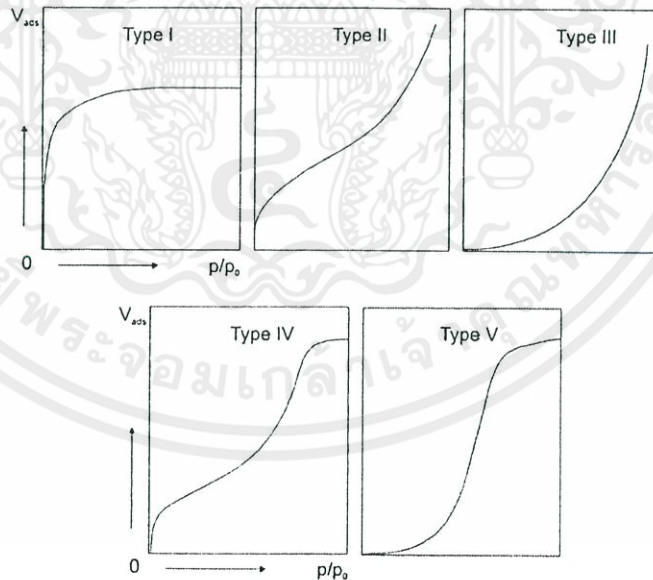
3. ไอโซเทอมแบบ Brunauer-Emmett-Teller (Brunauer-Emmett-Teller isotherm)

ในปี ค.ศ. 1903-1986 นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน Stephen Brunauer และ ในปีค.ศ. 1900 - 1985 Paul Emmett และ Edward Teller ได้ศึกษาการดูดซับหลายชั้นและเสนอดังสมการ (2.10)

$$P \cdot P_0 / V(P_0 - P) = 1/V_0 k + P/P_0 \dots\dots\dots (2.10)$$

- เมื่อ P = ความดันสมดุลของสารดูดซับ
- V = ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดัน
- V₀ = ปริมาตรที่ถูกดูดซับเพื่อให้เกิดเป็นชั้นเดียว
- P₀ = ความดันไออิ่มตัวของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ
- K = ค่าคงที่

Brunauer-Emmett-Teller ได้แบ่งลักษณะไอโซเทอมออกเป็น 5 แบบ ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งอธิบายการดูดซับแต่ละแบบดังนี้



รูปที่ 2.2 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่างๆ ของ Brunauer-Emmett-Teller ในระบบก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบ I เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่สารดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก การบรรจุโมเลกุลลงในรูขนาดเล็กของสารดูดซับนี้อย่างสมบูรณ์และมีการอิมดัวที่แน่นอน โดยเกิดการเรียงเป็นชั้นเดียว
- แบบ II และ III เป็นไอโซเทอมที่สารดูดซับที่การกระจายขนาดรูพรุนในช่วงกว้างในระบบนี้เกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัว โมเลกุลเพียงชั้นเดียว จนถึงโมเลกุลหลายชั้น โดยในแบบที่ III จะมีแรงกระทำระหว่าง โมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวสารดูดซับมากกว่าแบบที่ II
- แบบ IV เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมาก จึงเกิดการเรียงตัวของ โมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (bilayer)
- แบบ V เป็นไอโซเทอมที่เกิดขึ้น เมื่อแรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับมีความแรงมากขึ้น

2.5 เทคนิคที่ใช้สังเคราะห์โลหะฟอสเฟต

เทคนิคการเตรียมสาร โลหะฟอสเฟตมีหลายวิธี ตัวอย่างเช่น หลักการเตรียมแบบตกตะกอน (precipitation method) วิธีการเตรียมแบบไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal method) วิธีการเตรียมแบบโซล-เจล (sol-gel method) วิธีการเตรียมด้วยตัวกลาง (media method) วิธีการเตรียมแบบตกตะกอนร่วม (co - precipitation method) วิธีการเตรียมโซลโวเทอร์มัล (solvothormal method) และวิธีเตรียมไมโครเวฟ (microwave) เป็นต้น จากหลักการเตรียมที่แตกต่างกัน จะก่อให้เกิดสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารที่ต้องการตัวหนึ่ง ๆ มีความแตกต่างกัน และยังพบอีกว่าสถานะตัวแปรการเตรียม เช่น อุณหภูมิ เวลา ความเป็นกรด-เบส และสารตั้งต้นจะแตกต่างกันขึ้นกับวิธีการเตรียม โดยเทคนิคที่ใช้สังเคราะห์โลหะฟอสเฟตแต่ละวิธีมีดังต่อไปนี้

2.5.1 การเตรียมแบบตกตะกอน (Precipitation) [13]

การตกตะกอน (precipitation) เป็นการแยกตะกอนแขวนลอยออกจากของเหลวเพื่อให้ได้ส่วนของชั้นใส (clear fluid) และชั้นของ slurry ที่มีความเข้มข้นของตะกอนสูง การเตรียมแบบตกตะกอนถือเป็นกระบวนการเตรียมที่ง่าย สะดวกและรวดเร็ว ก็คือทำการเตรียมสารตั้งต้นให้เป็นสารละลายความเข้มข้นตามที่ต้องการ จากนั้นเตรียมสารที่สามารถทำให้เกิดการตกตะกอน ซึ่งตัวทำให้เกิดตะกอนส่วนมากจะเป็นสารที่เป็นกรดแก่หรือเบสแก่ โดยส่วนใหญ่สารโลหะฟอสเฟตจะ

ตกตะกอนในสภาวะความเป็นกรดหรือเบสที่แตกต่างกัน เช่นการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา amorphous AlPO_4 ในอัตราส่วนโดยโมล $\text{Al/P} = 1$ จากระบบสารตั้งต้น $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ผสมกับ H_3PO_4 ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิ 0°C แล้วปรับค่าความเป็นกรด-เบสด้วยสารละลายแอมโมเนียให้มีค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 7 จากนั้นทำการกรอง และล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน ทำตะกอนให้แห้งที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลาหนึ่งคืน และทำการเผาที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

2.5.2 วิธีการเตรียมแบบไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal method) [14]

หลักการ คือ การผสมสารตั้งต้นที่ประกอบด้วยโลหะซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารโลหะออกไซด์ (metal oxide) สารแหล่งของฟอสฟอรัส ได้แก่ H_3PO_4 , NaH_2PO_4 , Na_2HPO_4 , KH_2PO_4 , K_2HPO_4 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ และ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ และสารสุดท้ายคือน้ำ โดยผสมตามสัดส่วนโมลของสาร ขึ้นอยู่กับสารโลหะฟอสเฟตที่ต้องการ จากนั้นบรรจุในอุปกรณ์ที่ปิดสนิท และนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมพร้อมกำหนดระยะเวลา เช่น การสังเคราะห์ $\text{AlPO}_4\text{-n}$ ที่มาจาก อลูมิเนียมซซ

2.5.3 วิธีการเตรียมแบบโซล-เจล (Sol-gel) [15]

กระบวนการเตรียมแบบโซล-เจล เป็นกระบวนการเตรียมเชิงเคมีประเภทหนึ่งที่มีความนิยมสูงเนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพสูง และนอกจากนี้ยังสามารถนำไปดัดแปลง ประยุกต์ใช้งานในการผลิตวัสดุได้หลายรูปแบบ เช่น การผลิตสารเร่งปฏิกิริยา (catalysts) ตัวดูดซับ (adsorbents) แผ่นฟิล์มบาง (thin film) การฉาบผิววัสดุ (coatings) เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (nuclear fuel) แผ่นกรองและเส้นใยเซรามิกแก้วชนิดพิเศษ ผงขัดและวัสดุชีวภาพ (biomaterials) ต่างๆ คำว่า “โซล-เจล” เป็นเทอมที่มีลักษณะเฉพาะตัว และเกี่ยวข้องกับเทคนิคต่าง ๆ มากมาย ที่สามารถนำมาใช้เพื่อเตรียมสารที่มีความบริสุทธิ์สูง และมีความสม่ำเสมอ เป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุล โดยทั่วไปกระบวนการ “โซล-เจล” คือกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “โซล” ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของอนุภาคคอลลอยด์ที่แขวนลอยอย่างคงตัวในของเหลว โดยที่โซลจะมีความหนาแน่นของของแข็งมากกว่าของของเหลวที่อยู่บริเวณรอบๆ อนุภาคของแข็งที่อยู่ในของเหลวที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอน ไปเป็นสารที่จับตัวกันแข็งเป็นก้อนที่มีความหนืดสูง เป็นอนุภาคของแข็งที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนเชื่อมต่อกันสามมิติ ซึ่งเรียกว่า “เจล” ปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการ โซล-เจล มี 3 ปฏิกิริยา คือ Hydrolysis , Water

เอกสารนี้เป็นเอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาไปใช้

condensation และ Alcohol condensation มีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ ความเป็นกรด-เบส ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วน โมลของน้ำกับโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ในสภาวะที่ต่างกันจะทำให้โซลและเจลที่ได้มีสมบัติโครงสร้างต่างกัน ข้อดีของเทคนิคโซล-เจล คือ มีการรวมตัวกันของทุกโมเลกุลเป็นเนื้อเดียวกัน สารประกอบที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูง อนุภาคขนาดเล็กละเอียดมากอยู่ในช่วง 20 ถึง 50 นาโนเมตรส่งผลให้มีพื้นที่ผิวมาก การเผาผลาญเพื่อให้เกิดการแน่นตัวจึงทำที่อุณหภูมิสูงต่ำ

2.5.4 วิธีการเตรียมแบบใช้สภาวะตัวกลาง (Media synthetic method)

การเตรียมแบบนี้ส่วนใหญ่จะใช้สารตั้งต้นผสมกันในตัวกลางที่ไม่ใช่น้ำ แต่อาจจะเป็นสารประเภทแอลกอฮอล์ สารโพลีเมอร์หรือสารโปรตีน เป็นต้น เมื่อผสมแล้วทำให้ตกตะกอนโดยใช้สภาวะอุณหภูมิหรือสภาวะความเป็นกรดหรือเบส ก็จะได้สารโลหะฟอสเฟตที่ต้องการ

2.5.5 วิธีการเตรียมแบบการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method) [16]

เทคนิคการเตรียมแบบการตกตะกอนร่วม คือกระบวนการที่จะนำสารโลหะมากกว่าสองชนิดเข้าไปอยู่ในตำแหน่งแลตทิซภายในโครงสร้างโลหะฟอสเฟตทำให้เกิดสารประกอบตัวใหม่ ที่เรียกว่า ทวิโลหะฟอสเฟต (binary metal phosphates) ซึ่งหลักการจะคล้ายกับวิธีการตกตะกอนแบบธรรมดา คือ เตรียมสารละลายโลหะสองชนิดแล้วนำไปผสมกับแหล่งของฟอสฟอรัส พร้อมกับปรับความเป็นกรดหรือเบสให้เหมาะสม เพื่อทำให้เกิดตะกอน เช่น การเตรียมตั้งเร่ง Ni/AlPO_4 โดยทำให้ AlPO_4 gel ชุ่มด้วย นิกเกิลไนเตรท แล้วทำการเผา (calcined) ที่อุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสม

2.5.6 วิธีการเตรียมโดยใช้โซลโวเทอร์มัล (Solvothormal method)

วิธีโซลโวเทอร์มัล คือ การเตรียมสารโลหะฟอสเฟตโดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาในผลึกของสารอินทรีย์ และใช้ตัวทำละลายที่เป็นสารอินทรีย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้สภาวะอุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่ต่ำ ใช้ความดันในการสังเคราะห์สูง ซึ่งปฏิกิริยานี้สามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ค่าความว่องไวได้เอง และ แสดงสมบัติในการจำเพาะเจาะจงมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากการใช้ความดันสูงในการทดลอง จึงจำเป็นต้องทำการสังเคราะห์ในหม้อความดันนิ่ง (autoclave) ทำด้วยเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรง ทนทานและสามารถทนอุณหภูมิได้สูง โดยปกติแล้วจะมีการบุผนังภายในของหม้อด้วยเทฟลอน (teflon) อีกทีเพื่อลดปัญหาเรื่อง

การกักร้อนของผนังหม้อความดันจากสารละลาย ซึ่งผลที่ได้มีความเป็นผลึกสูง มีรูปร่างเหมือนกันและมีการกระจายตัวใกล้เคียงกัน

2.5.7 วิธีการเตรียมโดยไมโครเวฟ (Microwave method) [17]

กระบวนการเตรียมโดยไมโครเวฟ เป็นกระบวนการที่จะทำให้ชิ้นงานนั้นร้อนขึ้นโดยการ ใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูง สอดคล้องกับรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงแบบจำลองการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟแล้วเกิดเป็นความร้อนของวัสดุ ไดอิเล็กตริกโดยโมเลกุลไดโพลจะถูกบังคับให้หมุนภายใต้สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของคลื่นไมโครเวฟ การชนกันระหว่างโมเลกุลขณะหมุนทำให้เกิดแรงเสียดทานและเกิดเป็นความร้อนขึ้น เพื่อให้โมเลกุลของน้ำภายในชิ้นงานเกิดการสั่นสะเทือนและชนโมเลกุลอื่นต่อไปจนเกิดเป็นพลังงานจลน์ ซึ่งพลังงานจลน์นี้จะกลายสภาพเป็นพลังงานความร้อน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.3 แบบจำลองการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟแล้วเกิดเป็นความร้อนของวัสดุ

คลื่นไมโครเวฟมีลักษณะเด่น 3 ประการคือ

- การสะท้อนกลับ (reflection) เมื่อคลื่นไมโครเวฟไปกระทบกับวัตถุที่เป็นโลหะ หรือ มีส่วนผสมของโลหะคลื่นไม่สามารถทะลุผ่านวัตถุดังกล่าวได้ และจะเกิดการสะท้อนกลับหมด ทำให้ไม่สามารถให้ความร้อนแก่วัตถุได้
- การส่งผ่าน (transmission) คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านภาชนะที่ทำด้วยแก้ว กระดาษ

เอกสารนี้เป็นเอกสาร ไม้ เซรามิก และพลาสติกได้ เพราะวัตถุดังกล่าวไม่มีส่วนผสมของโลหะ จึงเหมาะสำหรับการต้มไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น การใช้งานไมโครเวฟลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การดูดซึม (absorption) ส่วนใหญ่วัตถุที่ต้องการให้ความร้อนจะประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำ เมื่อ โมเลกุลของน้ำดูดซึมคลื่นไมโครเวฟแล้วจะสลายตัวทันทีและไม่สะสมภายในวัตถุ

2.6 การตรวจสอบเอกลักษณ์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์อวลุมิเนียมฟอสเฟต

2.6.1 เครื่องตรวจวัดสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบอินฟราเรด [18]

(Fourier transform Infrared, FT-IR)

เครื่องตรวจวัดสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบอินฟราเรด เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุล รวมถึงสามารถบอกปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด ซึ่งเทคนิค FT-IR นี้มีความไวสูง ใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่นๆ โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (wave number) ประมาณ $12800 - 10 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

รังสีอินฟราเรด (infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า แต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วง Visible radiation กับ Microwave radiation โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

1. อินฟราเรดย่านใกล้ (near Infrared) มีเลขคลื่นอยู่ในช่วง $12800-4000 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งในแถบการดูดกลืนแสงของโมเลกุลในย่านนี้ส่วนใหญ่เกิดจากโอเวอร์ โทน (overtone)

ข้อดีในการวิเคราะห์สเปกตรัมของพอลิเมอร์ในช่วง Near IR คือ

- การหาปริมาณหมู่ฟังก์ชัน บางชนิดในโมเลกุลสารอินทรีย์ เช่น หมู่เมธิลีนที่อยู่ปลายทาง (terminal methylene) หมู่มีไรน์ (methyne) หมู่เอมีน (NH) และหมู่ไฮดรอกซิล (OH)
- การวิเคราะห์พันธะไฮโดรเจน
- การศึกษาแรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวถูกละลาย

2. อินฟราเรดย่านกลาง (middle infrared) มีเลขคลื่นอยู่ในช่วง $4000-200 \text{ cm}^{-1}$ ใช้ศึกษาคุณภาพวิเคราะห์ และ ปริมาณวิเคราะห์ในช่วงนี้จะแบ่งเป็นช่วงกลุ่มความถี่ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อินฟราเรดย่านไกล (far infrared) มีเลขคลื่นอยู่ในช่วง $200-10\text{ cm}^{-1}$ จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับการหมุนของโมเลกุล เนื่องจากพลังงานที่เกี่ยวข้องกับรากฐานลิซันที่มีระดับพลังงานค่อนข้างต่ำ

เมื่อพิจารณาโมเลกุลของสารโดยทั่วไปจะประกอบด้วย อะตอมที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะเคมี เมื่อโมเลกุลได้รับรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงกับการสั่นของโมเลกุลแล้ว จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ทำให้โมเลกุลนั้นสามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ โดยการสั่นของโมเลกุลแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การยืดหด (Stretching) การโค้งงอ (Bending หรือ Deformation)

2.6.1.1 การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อบันทึก IR spectrum

การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อบันทึก IR spectrum มีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับสถานะของสารอินทรีย์ และความเหมาะสม

1. สารตัวอย่างที่เป็นแก๊ส

แก๊สจะถูกบรรจุลงในแก๊สเซลล์ โดยก่อนบรรจุจะต้องดูดอากาศออกจากแก๊สเซลล์ก่อนแล้วจึงปล่อยให้แก๊สที่ต้องการบันทึกเข้าไปในเซลล์หน้าต่างของแก๊สเซลล์ทำด้วยผลึกที่ให้รังสีอินฟราเรดผ่านได้ ซึ่งอาจทำได้ด้วย sodium chloride, potassium bromide, cesium iodide, fused silica, calcium fluoride หรือ thallium bromide-iodide ความหนาของแก๊สเซลล์แบบมาตรฐานทั่วไปคือ 10 cm .

2. สารตัวอย่างที่เป็นของเหลว

ใส่ตัวอย่างในเซลล์ที่มีความหนาของเซลล์ตามต้องการหากต้องใช้ตัวทำละลาย ต้องเลือกให้เหมาะสม เพื่อป้องกันการละลายของเซลล์ โดยทั่วไปมักใช้ตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว

3. สารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

- เทคนิคมัลล์ (mull Technique) ใช้สำหรับตัวอย่างของแข็งโดยทำให้เป็น Suspension ในน้ำมันที่เรียกว่า Nujol
- วิธีการอัดเม็ด (pellet Method) อัดของแข็งตัวอย่างในเกลือบางชนิด เช่น KBr ด้วยความดันสูง
- เทคนิคฟิล์ม (film techniques) ละลายตัวอย่างของแข็งในตัวทำละลายที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามวิธีละลายตัวอย่างของแข็ง (solution Methods) และละลายตัวอย่างของแข็งในตัวทำละลายที่เหมาะสม

2.6.1.2 เครื่องมืออินฟราเรด (IR instrument)

องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องมือ อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ในแบบดิสเพอร์ซีฟ (dispersive infrared spectroscopy) ซึ่งเป็นแบบดั้งเดิม จะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญดังนี้

1. แหล่งกำเนิดแสง (light source)
2. เซลล์บรรจุสาร (sample cell)
3. โมโนโครมาเตอร์
4. อุปกรณ์วัดสัญญาณ (detector)
5. ตัวขยายสัญญาณ (amplifier)
6. เครื่องบันทึกข้อมูล (recorder)

เครื่องอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

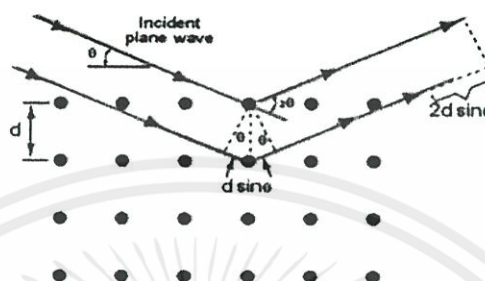
1. เครื่องอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ใช้ระบบกระจายแสง (dispersive infrared spectrophotometer) ซึ่งมีแบบลำแสงเดี่ยว และลำแสงคู่
2. เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrometer) เป็นเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีที่ใช้อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (michelson interferometer) ในการทำหน้าที่แยกแสงที่ผ่านออกจากเซลล์บรรจุสาร ตัวอย่างออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ (แทนที่การใช้วิธีธรรมดาในกรณีของเครื่องมืออินฟราเรดแบบดิสเพอร์ซีฟหรือแบบลำแสงคู่)

ข้อดี-ข้อจำกัด

FT-IR ให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็วและมีความไวสูง (โดยส่วนใหญ่จะใช้เวลาในการวิเคราะห์ประมาณ 1-5 นาที) โดยมีอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ; S/N) ต่ำ อัตรา S/N จะแปรผันกับรากที่สองของปริมาณสัญญาณที่ตรวจวัดได้ทั้งหมด ความไวของเครื่องตรวจวัดสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการเพิ่ม S/N ร่วมกับการเพิ่มจำนวนรอบของสแกน มีการใช้ circular optical aperture แทนที่ entrance slit ทำให้ลำรังสีมีขนาดมากกว่าแบบ Dispersive ถึง 75-100 เท่า มีกำลังแสงสูงขึ้น เหมาะสำหรับตัวอย่างหรือเทคนิคบางเทคนิคที่มีข้อจำกัดของกำลังแสง นอกจากนี้ FT-IR ยังให้ประสิทธิภาพในการแยกสูงรวมทั้งมีความถูกต้องไม่ต่ำกว่า 0.01 cm^{-1} มีกลไกการทำงานที่ง่ายแต่ FT-IR มีข้อจำกัดในการเตรียมตัวอย่างบางเทคนิคที่ต้องใช้สารละลายที่

ยินยอมให้รังสีทะลุผ่านและตัวอย่างจะต้อง active ในช่วงอินฟราเรด นอกจากนี้เครื่องมือที่ใช้มีราคาค่อนข้างสูงและมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง

2.6.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) [20]



รูปที่ 2.4 ลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [20]

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray Diffraction; XRD) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง โดยรังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกและจะถูกบันทึกค่าแล้วทำการวิเคราะห์ธรรมชาติของโครงสร้างผลึกนั้นๆ โดยระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Bragg ซึ่งมีลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ตามที่แสดงในรูปที่ 2.4

เทคนิคนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีและเคมีชีวภาพ โดยใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบอนินทรีย์ ดีเอ็นเอ โปรตีนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ รวมถึงวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น

XRD เป็นเทคนิคที่คล้ายเทคนิค spectroscopic อื่นๆ เช่น เทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (x-ray Fluorescence; XRF) โดยที่ XRF จะสามารถบอกได้ว่าวัสดุเหล่านั้นประกอบด้วยธาตุอะไรบ้าง ในขณะที่ XRD นั้นจะช่วยให้สามารถรู้ได้ว่าธาตุเหล่านั้นมีองค์ประกอบเป็นอย่างไร

2.6.2.1 หลักการพื้นฐาน

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD นั้นจะใช้คุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีของโครงสร้างผลึก ซึ่งเอกสารนี้เป็นเป็นไปตามสมการของ Bragg ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

โดยที่ $n = 1, 2, 3, \dots, \lambda$ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์, d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก และ q คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึก

2.6.2.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เทคนิคที่ใช้หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 เทคนิค ได้แก่

1. Single-Crystal Methods

โดยหลักแล้วเทคนิคนี้ใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างอะตอม (ความสมมาตร ตำแหน่ง และ ช่องว่าง เป็นต้น) ซึ่งวิธีการดั้งเดิมนั้น (laue method) จะใช้ผลึกติดอยู่กับที่และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เมื่อฉายลำรังสีให้ตกลงบนผลึกเดี่ยวจะทำการบันทึกผลการเลี้ยวเบนลงบนแผ่น Photographic plate ซึ่งใช้ในการบันทึกค่าความเข้มและตำแหน่งของรังสีที่เกิดการเลี้ยวเบน แต่ในปัจจุบันนั้นจะทำให้ผลึกเกิดการหมุน และอาศัยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีของกล้องก้าวข้ามขีดจำกัดของการตรวจวัดปริมาณของรังสีที่เลี้ยวเบนจากวิธีการดั้งเดิม วิธีการนี้จะใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวแต่อาศัยการเปลี่ยนมุม q โดยการเคลื่อนที่ของผลึกซึ่งอยู่บนแท่นหมุนแล้วใช้ diffractometer และคอมพิวเตอร์ในการเก็บรวบรวมและจัดการข้อมูล ซึ่งจะให้ผลที่มีความแม่นยำมากกว่า

2. Powder Methods

เบื้องต้นแล้ววิธีการนี้จะใช้ในการระบุแร่ธาตุ โดยจะใช้บอกร่องค์ประกอบ และ ตรวจวัดความสัมพันธ์ของธาตุที่มีอยู่ในสารผสม เช่นเดียวกับ Single-Crystal Methods คือ แต่เดิมนั้นจะใช้เทคนิคของการถ่ายภาพในการบันทึกข้อมูลการเลี้ยวเบน แต่ในปัจจุบันจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า X-ray Powder Diffractometer และยังสามารถช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการเตรียมตัวอย่างผลึกแล้วไม่สามารถใช้วิธีการแรกในการตรวจวัดได้

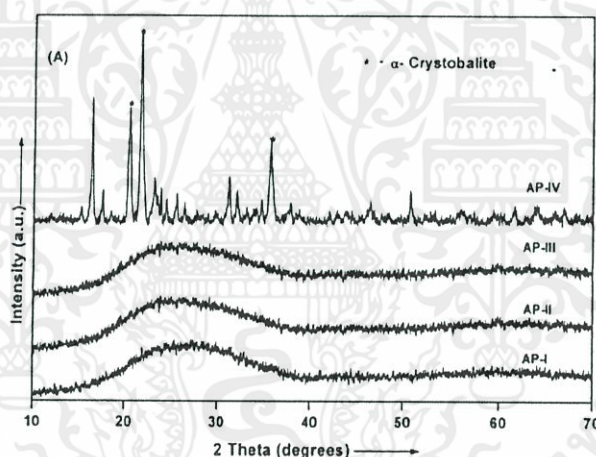
2.6.2.3 ประโยชน์ของการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

ปัจจุบันมีการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในการศึกษาวัสดุกันอย่างกว้างขวาง เพื่อวัตถุประสงค์หลาย ๆ ประการแตกต่างกัน เช่น

- การวิเคราะห์เชิงคุณภาพหาองค์ประกอบซึ่งเป็นผลึกที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง
- การวิเคราะห์เชิงปริมาณหาสัดส่วน โดยน้ำหนักขององค์ประกอบซึ่งเป็นผลึกที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง

- การวิเคราะห์ค่าคงที่แลตทิซและชนิดของแลตทิซของสารตัวอย่าง
- การวิเคราะห์ตำแหน่งของอะตอมในเซลล์หน่วยโดยละเอียด
- การวัดความเค้นสารตัวอย่าง เช่น ฟิล์มบาง
- การหาขนาดของเม็ดผลึกผง
- ฯลฯ

จากงานวิจัยของ V. Siva Kumar และคณะ ในปีค.ศ.2006 [20] ได้ทำการศึกษาวิธีการเตรียมอลูมิเนียมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน และทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะฟอสเฟตด้วยเครื่อง XRD ได้ผลดังรูปที่ 2.5 จากรูปพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา AlPO_4 ที่เตรียมด้วยวิธี AP-I, AP-II และ AP-III ลักษณะโครงสร้างที่เป็นเตตระฮีดรอน (tetrahedral) ในโครงสร้างผลึกแบบออสถูเนียนของ AlPO_4 มีค่า 2θ เท่ากับ 26° และวิธี AP-IV ปรากฏพีคที่เห็นได้ชัดที่เป็นรูปแบบผลึกชนิด เอลฟาคริสโตบาลิต (α -crystobalite)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะฟอสเฟต [20]

2.6.3 เทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน

(Thermogravimetric Analysis, TGA) [21]

หลักการ

TGA เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุ โดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน โดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ซึ่งเทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ แก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงการแตกตัวของ

วัสดุ (decomposition) และศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือ ปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry)

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

ความสามารถในการวิเคราะห์ทดสอบ

- องค์ประกอบของสาร (composition)
- เสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability/decomposition)
- ปริมาณสารสัมพันธ์ที่เกิดปฏิกิริยา (stoichiometry of reaction)
- จลพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา (kinetics of reactions)
- กระบวนการดูด/คายพลังงาน (desorption/adsorption processes)
- การระเหย (evaporation)

การประยุกต์ใช้งาน

- ตัวอย่างพอลิเมอร์
- ยา และเครื่องสำอาง
- ตัวอย่างทางเคมี
- สี และพิกเมนต์
- ตัวอย่างทางปิโตรเคมี และสารอินทรีย์ต่างๆ
- ส่วนประกอบในอาหาร

2.6.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Scanning Electron Microscope, SEM) [22]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนหรือที่เรียกกันอย่างย่อว่า SEM ซึ่งจะใช้แหล่งภาพเอกสารถูกผลิตมาจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ในกล้องอิเล็กตรอนแบบสแกน ซึ่งแตกต่างจากกล้องไมโครสโคปแบบแสง (light microscopes, LM) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกผลิตมาจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ในกล้องอิเล็กตรอนแบบสแกน ซึ่ง

ตัวสารจะถูกสแกนในลักษณะสัญญาณด้วยลำแสงอิเล็กตรอนมีประโยชน์ในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology) หรือโครงสร้างจุลภาค (microstructure) กล้องอิเล็กตรอนแบบสแกนจะใช้ดูรายละเอียดของพื้นผิวหรือชิ้นส่วนที่เล็กมาก ๆ บนผิวของวัตถุหรือวัตถุโดยรวมทั้งหมดโดยทางชีววิทยาเคมี และ ทางฟิสิกส์จะใช้เทคนิคนี้ในการตรวจสอบดูโครงสร้างที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรได้ซึ่งใช้ในการศึกษาส่วนต่างของเซลล์ศึกษาศาสตร์พันธุกรรม และการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ซึ่งการโค้ทบนไมโครชิพของสารตัวอย่างซึ่งมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงมากกว่า 100,000 เท่าโดยการแจกแจงรายละเอียดของภาพมีความเป็นไปได้ถึงประมาณ 2 นาโนเมตร นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดนี้ยังประกอบไปด้วย ชุดอุปกรณ์อิเล็กตรอนิกส์ที่สามารถดัดแปลงต่อเติมอุปกรณ์เสริมชนิดอื่น ๆ เช่น ระบบคอมพิวเตอร์ หรือชุดหัวโพรงรังสีเอ็กซ์ เป็นต้น เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการแสดงผลในรูปแบบต่างๆ ซึ่งสัญญาณที่ได้จากกล้องอิเล็กตรอนแบบสแกนจะเกิดจากการใช้ตัวตรวจจับพวกอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron detector) คอยดักจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นจากผิวของสารตัวอย่างมีอันตรกิริยากับ ลำอิเล็กตรอนที่ยิงเข้าไป

หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

การทำงานเบื้องต้นของกล้องอิเล็กตรอนแบบสแกน สามารถอธิบายได้ดังนี้ เริ่มจากการผลิตอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) ออกมาจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ซึ่งอิเล็กตรอนปฐมภูมิเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูง ให้วิ่งผ่านท่อสุญญากาศลงสู่แผ่นแอโนด (anode plate) จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับให้เล็กลงเพื่อเพิ่มความเข้มแข็งของอิเล็กตรอน โดยอาศัยชุดคอนเดนเซอร์เลนส์ (condenser lens) ที่เป็นแม่เหล็กจากนั้น ลำของอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสลงบนสารตัวอย่างด้วยเลนส์วัตถุ (objective lens) ตามที่ต้องการพร้อมทั้งสามารถทำการบังคับให้จุดโฟกัสเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งบนผิวของสารตัวอย่างได้ด้วยเครื่องสแกน (scanning generator) ซึ่งอยู่ระหว่างคอนเดนเซอร์เลนส์ เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบกับผิวตัวอย่างที่วางอยู่บนห้องบรรจุสารตัวอย่าง จะทำให้เกิดกลุ่มอิเล็กตรอนเรียกว่า อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ซึ่งหลุดออกมาจากผิวของสารตัวอย่างและถูกรวบรวมด้วยตัวเก็บอิเล็กตรอน (electron collector) และสัญญาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิเหล่านี้จะถูกส่งผ่านทางท่อนำแสงเข้าไปสู่ตัวขยายสัญญาณ (signal amplifier) ซึ่งจะช่วยให้หน้าที่ยขยายสัญญาณที่เข้ามา พร้อมกับกับการแปลสัญญาณ

ที่ทำให้ได้เกิดเป็นรูปภาพไปปรากฏบนจอโทรทัศน์ (CTR) และบันทึกภาพในเวลาเดียวกัน โดยมี ส่วนประกอบหลักของกล้อง ได้แก่

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun)
2. ระบบเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) หรือ ขดลวดที่ทำหน้าที่ควบคุมการส่องกราดของลำอิเล็กตรอน
3. เครื่องสูบลม ก๊าซและระบบควบคุมความดัน (control pressure system)
4. ห้องใส่สารตัวอย่าง (specimen chamber)
5. ตัวตรวจวัดสัญญาณอิเล็กตรอน (electron signal detector)
6. ชุดอุปกรณ์สำหรับสร้างภาพ (imaging devices)

นำวัสดุตัวอย่างหรือผงวัสดุตัวอย่างที่เป็นของแข็งความดันไอต่ำมากกว่า 1 หรือเท่ากับ 10^{-3} ทอร์ โดยที่ขนาดถูกจำกัดโดยขนาดของช่องใส่ตัวอย่างและแท่นวางตัวอย่างของเครื่องกล้องอิเล็กตรอนแบบสแกนซึ่งแตกต่างกันแล้วแต่บริษัทและรุ่นที่ผลิต โดยบางรุ่นอาจวางตัวขนาดใหญ่ได้ถึงประมาณ 15 - 20 เซนติเมตรอย่างไรก็ตามขอบเขตการส่องกราดของลำอิเล็กตรอนจะจำกัดอยู่ในวงพื้นที่ไม่เกิน 4 - 8 เซนติเมตร ในห้องวางตัวอย่างของเครื่องกล้องอิเล็กตรอนแบบสแกนที่แท่นควบคุมการเคลื่อนที่ของฐานใส่ตัวอย่าง (specimen holder) ที่มีตัวอย่างติดบนก้านวางตัวอย่าง (specimen stub) วางอยู่บนฐานใส่ตัวอย่างในการเตรียมสารตัวอย่างประกอบด้วย การตัดตัวอย่าง การติดตัวอย่างและการเคลือบผิวตัวอย่าง

การติดตัวอย่างบนแท่นวางตัวอย่างมีหลักการเบื้องต้นดังต่อไปนี้

1. กรณีตัวอย่างเป็นชิ้นงาน ก่อนนำเข้าศึกษาโดยใช้เครื่องต้องทำการติดชิ้นงานเข้ากับก้านวางตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่ทำด้วยโลหะจำพวกเหล็ก อลูมิเนียม ทองเหลือง ทองแดง มีลักษณะเป็นรูปทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงเหมาะสมใส่ได้พอดีกับช่องว่างในฐานของตัวอย่าง และใช้สารยึดติดตัวอย่างเข้ากับก้านวางตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่ใช้วัสดุจำพวกเทปกาวคาร์บอน หรือน้ำยาทาเล็บ เป็นต้น วิธีการทำโดยการทาหรือติดสายยึดตัวอย่างลงบนแผ่นหน้าของก้านวางตัวอย่างและติดตัวอย่างด้านที่ไม่ต้องศึกษาลงบนแผ่นหน้าก้านวางตัวอย่าง ทั้งนี้ให้ติดสนิท

เอกสารนี้เป็นหรือแห่งใดระยะหนึ่งก่อนการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กรณีตัวอย่างเป็นผงมักใช้สารยึดติดสารตัวอย่างจำพวกที่เป็นเทปกาวสองหน้า หรือเทปทองแดงติดด้านบนก้านวางของสารตัวอย่างและให้สารตัวอย่างกระจายลงบนด้านหน้าของก้านวางตัวอย่างที่มีเทปทองแดงติดอยู่ จากนั้นใช้ลูกยางเป่าลมและปิดฝุ่นเศษผงตัวอย่างที่ไม่ยึดติดบนก้านวางตัวอย่างออก หรือใช้เครื่องเป่าลมเป่าไล่ซ้ำอีกครั้งเพื่อให้เศษผงละอองที่ยังตกค้างออกไปจากตัวอย่าง หรือใช้ผงกระจายในตัวกลางที่ไม่สามารถละลายตัวผงตัวอย่างได้ เช่น เอทานอล อะซิโตน เป็นต้น และทำการกระจายตัวอย่างโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกเพื่อช่วยในการกระจายของผงตัวอย่างในช่วงเวลาหนึ่ง แล้วทำการหยดตัวอย่างลงบนเทปกาวดังกล่าวทิ้งไว้แห้งที่อุณหภูมิห้องจากนั้นจึงนำเข้าเครื่องกล้องอิเล็กตรอนแบบสแกน เพื่อการศึกษาต่อไปหรือทำการฉาบผิวด้วยโลหะตัวอย่างด้วยสารที่ไม่นำไฟฟ้า

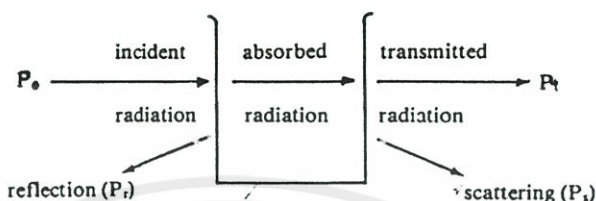
ส่วนการเคลือบหรือฉาบผิวตัวอย่างนิยมใช้สารตัวนำไฟฟ้าจำพวก โลหะหนักที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น คาร์บอน ทอง และโลหะผสมทอง-พัลลาเดียม เป็นต้น โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าให้กับสารตัวอย่าง ทั้งนี้หลักการเบื้องต้นของการฉาบผิว คือ ต้องกระทำภายใต้ภาวะสุญญากาศและให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อให้โลหะหนักเปลี่ยนสภาพจากแท่งโลหะมาเป็น โมเลกุลและตกลงบนผิวตัวอย่างในอัตราส่วนเดียวกัน ทำให้โลหะฉาบผิวตัวอย่างได้เป็นเนื้อเดียวกัน

2.6.5 เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV – VIS) [23]

การดูดกลืนแสงหรือรังสีที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิล ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190-800 นาโนเมตร (nm) ของสารเคมีนั้นส่วนใหญ่พวกสารอินทรีย์ (organic compound) หรือสารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) หรือสารอินทรีย์ (organic compound) ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สมบัติของสารดังกล่าวนี้ได้นำมาใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณอย่างกว้างขวาง เพราะวิธีนี้ให้ความถูกต้องแม่นยำดี และมีสภาพไว (sensitivity) สูง โดยอาจทำการวิเคราะห์อยู่ในรูปของธาตุหรือโมเลกุลก็ได้แต่ในกรณีที่จะนำไปใช้พิสูจน์ว่าสารตัวอย่างนั้นเป็นสารอะไรอาจจะต้องใช้เทคนิคอื่นเข้าช่วยด้วย เพื่อให้เกิดความแน่ใจ เช่น ใช้เทคนิค FT-IR หรือ NMR spectroscopy เป็นต้น

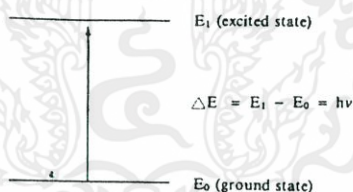
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไป เทคนิคการวิเคราะห์นั้นบางครั้งนิยมเรียกว่า ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโคปี แต่ ถ้าสารที่ทำการวิเคราะห์มีสีหรือทำให้เกิดสีขึ้น สารที่มีสีนั้นจะดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิลอาจ เรียกว่า คัลเลอร์ิเมตรี (colorimetry)



รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดอันตรกิริยาของสารเคมีกับการแผ่รังสีหรือแสง [23]

เมื่อลำแสงที่เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องกัน (continuous beam of radiation) ผ่านเข้าไปในวัสดุ ใสจะพบว่าแสงบางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนเกิดการสะท้อน บางส่วนกระเจิง และบางส่วนผ่าน ทะลุออกไป ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ถ้าแสงที่ผ่านทะลุออกไปนั้นผ่านเข้าเครื่องกระจายแสง จะเห็นว่า สเปกตรัมหายไปส่วนหนึ่ง ส่วนที่หายไปเรียกว่า absorption spectrum และพลังงานที่ถูกดูดกลืนนั้น จะทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้น (ground state) ไปยังสถานะ กระตุ้น (excited state) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



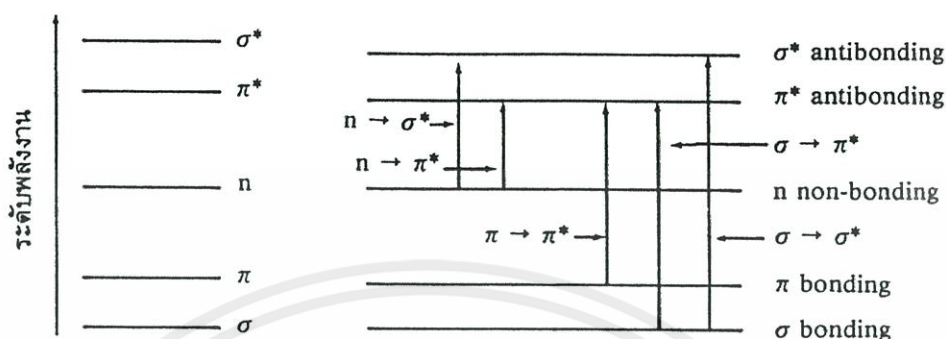
รูปที่ 2.7 แสดงกระบวนการเกิดการกระตุ้น [23]

2.6.5.1 สาเหตุของการดูดกลืนแสงในช่วงยูวี-วิสิเบิล (UV-VIS Absorption)

เมื่อแสงที่อยู่ในช่วงยูวี-วิสิเบิลผ่านเข้าไปในโมเลกุลของสาร สารนั้นจะดูดกลืนแสงเฉพาะ บางช่วงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (electron transition) ซึ่งโดยมาก จะใช้พลังงานประมาณ 30-50 kcal/mole และอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องคือ อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงนอก สุดหรืออิเล็กตรอนที่เกิดพันธะแล้ว หรืออิเล็กตรอนที่ยังไม่เกิดพันธะ (non-bonding electron) ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนและใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละชนิดมีพลังงานแตกต่างกัน อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานสูงขึ้นนี้เรียกว่า antibonding orbitals ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดง electronic energy levels และ transitions [23]

2.6.5.2 การวิเคราะห์หาปริมาณของสารด้วยเทคนิคทางยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี

ในกรณีที่สารตัวอย่างมีสารวิเคราะห์เพียงสารเดียว อาจใช้วิธีทำกราฟมาตรฐานโดยเตรียมสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นต่างๆกัน แล้วนำไปวัดค่าแอมพลิจูดของเบนซ์ที่ λ_{\max} โดยเทียบกับ blank นำผลที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างค่าแอมพลิจูดของเบนซ์กับความเข้มข้นจะได้กราฟเป็นเส้นตรง เมื่อวัดค่าแอมพลิจูดของสารตัวอย่างได้ หาปริมาณของสารที่วิเคราะห์ได้โดยอ่านจากกราฟมาตรฐานและลักษณะของสเปกตรัม ซึ่งในปัจจุบันนี้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์มักจะมีไมโครโปรเซสเซอร์หรือไมโครคอมพิวเตอร์ประกอบด้วยใช้ทั้งในการควบคุม เก็บข้อมูล คำนวณผล และรายงานผล ทำให้สะดวกต่อนักวิเคราะห์ขึ้นอย่างมาก

ค่าแอมพลิจูดของเบนซ์ควรอยู่ในช่วงที่พอเหมาะเพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้อง นั่นคือ ควรอยู่ในช่วง 0.1-1.0 ถ้าสารละลายเจือจางเกินไปจะวัดค่าแอมพลิจูดของเบนซ์ได้น้อย อาจจะทำให้การแก้ไขได้ด้วยการใช้เซลล์ให้กว้างขึ้น แต่ถ้าสารละลายเข้มข้นเกินไปก็จะใช้วิธีทำให้เจือจางลง เมื่อวัดค่าแอมพลิจูดของเบนซ์ได้ก็อาจใช้เครื่องคำนวณโดยใส่ข้อมูลลงเข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

V. Siva Kumar และ คณะ (2006) [19] ได้ทำการศึกษาวิธีการเตรียม AlPO_4 ที่แตกต่างกัน เพื่อนำไปเปลี่ยนเมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์ ซึ่งเตรียมทั้งหมด 4 วิธี โดยวิธีแรกนั้นได้ทำการผสมอลูมิเนียมไนเตรดกับกรดฟอสฟอริกที่อุณหภูมิห้องจากนั้นปรับ pH โดยทำการหยดสารละลายแอมโมเนีย 5 เปอร์เซ็นต์ลงไปเพื่อให้ได้ pH เท่ากับ 9 ต่อมาวิธีที่ 2 ใช้อลูมิเนียมออกไซด์ที่เผาแล้วมาเคลือบด้วยกรดฟอสฟอริก ในวิธีที่ 3 ผสมสารละลายอลูมิเนียมไนเตรดกับสารละลายไดแอมโมเนียม และไฮโดรเจนฟอสเฟต ซึ่งทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องจากนั้นปรับ pH โดยหยดสารละลายแอมโมเนีย 5 เปอร์เซ็นต์ให้ได้ pH เท่ากับ 9 และในวิธีที่ 4 ใช้อลูมิเนียมออกไซด์ที่เผาแล้วมาเคลือบด้วยสารละลายไดแอมโมเนียม และไฮโดรเจนฟอสเฟต ซึ่งจากวิธีการทดลองทั้งหมดพบว่าแอมโมเนียจะถูกทำให้มีความเป็นกรดเพื่อที่ในขั้นตอน dehydration ของ เมทานอลจะเปลี่ยนไปเป็นไดเมทิลอีเทอร์ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำ AlPO_4 มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่าวิธี AP-I, AP-II และ AP-III ลักษณะโครงสร้างที่เป็นเตตระฮีดรอน (tetrahedral) ในโครงสร้างผลึกแบบออสตัญฐาน และเมื่อตรวจวัด สเปกโทรสโกปีการสั่นแบบอินฟราเรด (FT-IR) พบพีกที่บ่งบอก ถึงการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน OH ซึ่งมีช่วงความถี่ที่ $3700\text{--}2900\text{ cm}^{-1}$ พีกต่อมาบ่งบอก ถึงการสั่นของ P-O ที่มีช่วงความถี่ $1400\text{--}900\text{ cm}^{-1}$, การสั่นของ O-P-O ที่มีช่วงความถี่ 480 cm^{-1} และ การสั่นของ Al-O-P มีช่วงความถี่ $800\text{--}400\text{ cm}^{-1}$

Hailun Ren และ คณะ (2006) [3] ได้ทำการศึกษาเอกลักษณ์ที่ได้จากการการเผาสารตั้งต้น ซึ่งเป็นแหล่งของ AlPO_4 ที่มีขนาดรูพรุนแบบ mesoporous และประยุกต์ใช้ แมงกานีส-อลูมิเนียมฟอสเฟต (Mn-AlPO_4) ที่มีขนาดรูพรุนแบบ mesoporous ด้วย โดยการสังเคราะห์ AlPO_4 ที่มีรูพรุนขนาด mesoporous จะใช้วิธีการสังเคราะห์แบบ Hydrothermal เป็นหลัก และยังสามารถสังเคราะห์ได้โดยวิธีอื่นแต่จะได้ AlPO_4 ที่ได้นั้นจะมีขนาดของ รูพรุน mesoporous ต่ำ ซึ่งจากงานวิจัยฉบับนี้ได้สนใจศึกษาขนาดรูพรุนของ AlPO_4 และ Mn-AlPO_4 เนื่องจากขนาดของรูพรุนจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำ เพราะพื้นผิวของ AlPO_4 นั้นมีลักษณะเป็น hydrophilic ผลจากการสังเคราะห์ lamellar mesophase ของ AlPO_4 ที่ได้จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ที่อุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้ความดันไอต่ำ และเมื่อมีการเติมแมงกานีสเพื่อแลกเปลี่ยนไอออนกับอลูมิเนียมในการสังเคราะห์ เพื่อให้ได้โครงสร้างผลึกเป็น Mn-AlPO_4 จะพบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น $200\text{ }^{\circ}\text{C}$

Kun Jia และคณะ(2008) [10] ได้ทำการศึกษา การดูดซับ โลหะหนักจำพวก Pb^{2+} , Zn^{2+} และ Cd^{2+} ที่มีอยู่ในน้ำโดยใช้ตัวรองรับเป็นไทเทเนียมฟอสเฟต (titanium phosphate, TiP) ที่มีผลึกแบบอสัณฐาน (amorphous) โดยการเตรียม TiP จะเริ่มจากใช้ ไทเทเนียมคลอไรด์ (titanium chloride) 40 ml ละลายกับกรดไฮโดรคลอริก 60 ml เข้มข้น 4 โมลาร์ จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาผสมกับไฮโดรเจนฟอสเฟตที่อุณหภูมิห้อง ทำการเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 คืน จากนั้นนำมากรองตะกอนและล้างตะกอนด้วยน้ำ DI ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าไทเทเนียมฟอสเฟตมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอสัณฐาน หลังจากนั้นทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโลหะหนักบน TiP พบว่า TiP นั้นสามารถดูดซับ Pb^{2+} ได้ดีที่สุด การดูดซับโลหะหนักทั้งสามชนิดจะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-เบส โดยค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมต่อการดูดซับ Pb^{2+} , Zn^{2+} และ Cd^{2+} ประมาณ 3, 4.5 และ 5 ตามลำดับ

มานิตย์ ดวงเพ็ญมาตร และคณะ (2011) [24] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา โลหะฟอสเฟต ซึ่งประกอบไปด้วย อลูมิเนียมฟอสเฟต โคบอลต์ฟอสเฟต โครเมียมฟอสเฟต เฟอร์รัส(III)ฟอสเฟต ซิงค์ฟอสเฟต และซิลิกาอลูมิเนียมฟอสเฟต เพื่อนำไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการขจัดน้ำของเมทานอล โดยเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม จากนั้นได้นำมาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะฟอสเฟตด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) พบว่าทุกตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะฟอสเฟตมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอสัณฐานเป็นทั้งหมด นอกจากนั้นยังวิเคราะห์ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการ Titration ion exchange ซึ่งทำให้ทราบถึงปัจจัยการเกิดปฏิกิริยาการขจัดน้ำของเมทานอลเนื่องมาจาก ชนิดของโลหะที่ทำหน้าที่ในการกระตุ้น (active site) ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีส่วนช่วยในการเกิดปฏิกิริยาการขจัดน้ำของเมทานอลที่ดีขึ้นและยังพบว่าเมื่อเติมซิลิกาเข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยา $AlPO_4$ จะส่งผลให้ค่าความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น

Chellapandian Kanna และคณะ (2012) [25] ได้ทำการศึกษาการนำสีย้อมที่เป็นอันตรายออกจากสารละลายผ่าน $AlPO_4$ ด้วยโครงสร้างพื้นฐานที่มีลักษณะเป็นรูพรุน โดยการดูดซับซึ่งทำการตรวจสอบโมเลกุลของ $AlPO_4$ ที่สังเคราะห์ขึ้นมา และนำเอาสีย้อม Malachite green (MG) และ Methylene blue (MB) ที่เป็นอันตรายออก ในการสังเคราะห์โมเลกุลที่เป็นตะแกรงของ $AlPO_4$ นั้นจะใช้สารเป็น Aluminium hydroxide (98%) ผสมกับ Phosphoric acid (88%) และ long-chain

alkylbenzene (SDBS, 25% in water) ซึ่งใช้เป็นตัวแม่แบบในการกำหนดโครงสร้างการจัดการของ AlPO_4 การสังเคราะห์ AlPO_4 จะใช้ Tetra - methyl ammonium hydroxide (TMAOH) ซึ่งจำเป็นในการปรับค่า pH ในระหว่างการสังเคราะห์ AlPO_4 สามารถทนความร้อนได้อุณหภูมิที่สูงกว่า 1173 K และมีลักษณะรูพรุนมีขนาด 40 nm เมื่อทำการสังเคราะห์เสร็จแล้วก็นำไปดูดซับ MG และ MB ผลจากการทดลองนั้นเห็นได้ว่า AlPO_4 ใช้เวลาในการดูดซับเร็วเพียงแค่ 20 นาที เพราะเนื่องมาจาก AlPO_4 นั้นมีการดูดซับแบบชั้นเดียวมากที่สุด 24.51 mg/g สำหรับ MG และ 35.2 mg/g สำหรับ MB การนำกลับมาใช้ใหม่ของ AlPO_4 นั้น จะใช้เอทานอลในการทำการคายซับสีย้อมและตามด้วยการนำไปเผาเพื่อนำ AlPO_4 กลับมาใช้งานอีกครั้ง

Fei Ji และคณะ (2012) [27] ได้ทำการศึกษาการเตรียมการของเซลล์ลูโลสอะซิเตท / เส้นใยชนิดซีโอไลต์ และ พฤติกรรมการดูดซับของไอออนโลหะหนักจำพวก คอปเปอร์ และ นิกเกิ้ลในสารละลาย เมื่อได้ทำการศึกษาวิเคราะห์เซลล์ลูโลสอะซิเตท / เส้นใยชนิดซีโอไลต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสแกน (SEM) พบว่า CA/Z มีโครงสร้างที่มีรูพรุนสูงและมีลักษณะที่คล้ายฟองน้ำ ส่วนในการศึกษาความสามารถในการดูดซับนั้นจะวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิก-แอบเซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (AAS) ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับ เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก ค่า pH นั้นมีผลต่อการดูดซับซึ่งจะเห็นได้จาก CA/Z จะดูดซับโลหะหนักดีกว่า pure CA จะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับของ CA/Z ซึ่งเป็นสารละลายที่เป็นกรดอ่อนหรือเป็นกลางจะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าสารละลายที่เป็นกรดแก่ เนื่องมาจากผลของซีโอไลต์ เพราะ ซีโอไลต์นั้นมี H^+ ion สูง เมื่อความเข้มข้นของ H^+ ion สูงจะทำให้ค่า pH นั้นต่ำลงซึ่งแสดงว่าถ้าค่า pH ต่ำ จะมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่า pH สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 บทนำ

โครงการวิจัยนี้สนใจศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์สารด้วยเทคนิคที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว และก่อให้เกิดอันตรายในขณะเตรียมสาร โดยสารที่สังเคราะห์ ได้แก่ สารในกลุ่มฟอสเฟต คือ อลูมิเนียมฟอสเฟต (AlPO_4) ซึ่งพบว่าสารนี้สามารถสลายตัวไปเป็นกลุ่มไพโรฟอสเฟตได้

เมื่อเตรียม AlPO_4 ได้จะถูกนำไปตรวจสอบเอกลักษณ์ ทางด้านเคมีและทางด้านกายภาพ ของสารที่เตรียมขึ้นได้ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ เครื่องตรวจวัดสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบอินฟราเรด (fourier transform Infrared, FT-IR) , เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (thermogravimetric Analysis, TGA) , เครื่องวิเคราะห์หารเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (x-ray Diffractometer, XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning Electron Microscope, SEM)

จากนั้นนำ AlPO_4 ที่ตรวจสอบเอกลักษณ์แล้ว มาทดสอบการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์ในระดับห้องปฏิบัติการด้วยกระบวนการดูดซับ (adsorption) ซึ่งจะทำการทดสอบโดยการดูดซับเมทิลีนบลู (methylene blue) ซึ่งเป็นสีย้อมชนิดต่างและทำการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค UV-VIS สเปกโทรสโกปีในการวัดค่าการดูดกลืนแสง

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ชุดเครื่องแก้ว
2. เตาเผา (Furnance) Controller B 170 บริษัท Naber therm ประเทศเยอรมัน
3. เครื่องชั่งความละเอียด 3 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง (AND) GR-200 บริษัท A&D company ประเทศญี่ปุ่น

4. pH meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 5. โถดูดความชื้น คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เครื่องกรองแบบลดความดัน (Ultrafiltration) Model WJ-20 Serial no. 1YS94S บริษัท SIBATA ประเทศญี่ปุ่น
7. ตู้อบ (Oven) Serial no.8 502.0552 บริษัท MEMMERT ประเทศญี่ปุ่น
8. เครื่องปั่นกวน
9. เครื่องเขย่าแบบตั้งโต๊ะ
10. เครื่องตรวจวัดสเปกโทรสโกปีการสั่นแบบอินฟราเรด (Fourier transform Infrared, FT-IR) รุ่น FT-IR spectrum GX บริษัท Perkin elmer
11. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) รุ่น Pyris 1 TGA บริษัท Perkin elmer
12. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) รุ่น D8 advance บริษัท Bruker AG
13. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น 1455VP บริษัท LEO
14. เครื่อง UV-VIS สเปกโทรสโกปี Thermo scientific genesys 10s uv-vis spectrophotometer

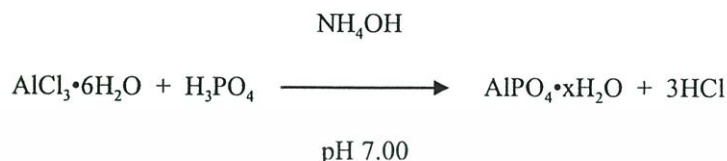
3.3 สารเคมี

1. กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เกรดวิเคราะห์ ความเข้มข้น 85 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร บริษัท Mallinckrodt Baker, Inc.
2. อลูมิเนียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($AlCl_3 \cdot 6H_2O$) เกรดวิเคราะห์ ความบริสุทธิ์ 99.0 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Loba Chemic Pvt, Ltd.
3. อลูมิเนียมไนเตรดโนนะไฮเดรต ($Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) เกรดวิเคราะห์ ความบริสุทธิ์ 99.0 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Loba Chemic Pvt, Ltd.
4. แอมโมเนีย (NH_3) เกรดวิเคราะห์ ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร บริษัท Carlo Erba Reagenti Spa.
5. สารละลายเมธิลีนบลู (Methylene blue, $C_{16}H_{18}ClN_3S$, MW 319.85) เข้มข้น 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีการสังเคราะห์

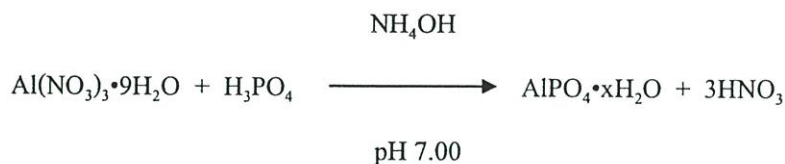
3.4.1 การสังเคราะห์ $\text{AlPO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ด้วยสารตั้งต้น $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ กับ H_3PO_4



1. ชั่ง $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 24.150 กรัม มาละลายด้วยน้ำ DI โดยปรับปริมาตร 100 ml ให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 1 M
2. เตรียมสารละลายกรด 85 % w/v H_3PO_4 ให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยเปิด 6.9 ml และปรับปริมาตร 100 ml
3. ผสมสารละลาย $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และสารละลาย 85 % w/v H_3PO_4 ที่เตรียมได้อย่างละ 100 ml ลงในบีกเกอร์ 600 ml พร้อมปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวน เป็นเวลาประมาณ 5 นาที โดยจะทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง
4. ปรับค่า pH ด้วยเครื่อง pH meter ให้ได้ pH 7.0 โดยใช้ 30 % NH_3 จะได้ตะกอนสีขาว ทำการปั่นกวนต่ออีก 1 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ 1 คืน
5. นำตะกอนที่ได้มาล้างด้วยน้ำ DI และทำการกรองตะกอนด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน ซึ่งในการล้างครั้งสุดท้ายจะล้างตะกอนด้วยอะซิโตน
6. อบตะกอนที่ได้ให้แห้งที่ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง
7. นำตะกอนที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วย FT-IR , TGA , XRD และ SEM โดยจะแบ่งตะกอนไปเผาตามอุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การสังเคราะห์ $\text{AlPO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ด้วยสารตั้งต้น $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ กับ H_3PO_4



1. ชั่ง $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 37.313 กรัม มาละลายด้วยน้ำ DI โดยปรับปริมาตร 100 ml ให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 1 M
2. เตรียมสารละลายกรด 85 % w/v H_3PO_4 ให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยปิเปต 6.9 ml และปรับปริมาตร 100 ml
3. ผสมสารละลาย $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ และสารละลาย 85 % w/v H_3PO_4 ที่เตรียมได้อย่างละ 100 ml ลงใน บีกเกอร์ 600 ml พร้อมปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวน เป็นเวลาประมาณ 5 นาที โดยจะทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง
4. ปรับค่า pH ด้วยเครื่อง pH meter ให้ได้ pH 7.0 โดยใช้ 30 % NH_3 จะได้ตะกอนสีขาว ทำการปั่นกวนต่ออีก 1 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ 1 คืน
5. นำตะกอนที่ได้มาล้างด้วยน้ำ DI และทำการกรองตะกอนด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน ซึ่งในการล้างครั้งสุดท้ายจะล้างตะกอนด้วยอะซิโตน
6. อบตะกอนที่ได้ให้แห้งที่ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง
7. นำตะกอนที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วย FT-IR , TGA , XRD และ SEM โดยจะแบ่งตะกอนไปเผาตามอุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 วิธีการดูดซับบน AlPO_4

3.5.1 การสร้างกราฟมาตรฐานด้วยสารละลายเมธิลีนบลู

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 1 , 2 , 3 , 4 และ 5 ppm ปริมาตร 50 ml โดยเจือจางจากสารละลายเมธิลีนบลูเข้มข้น 100 ppm ซึ่งปีเปิดมา 0.5 , 1.0 , 1.5 , 2.0 และ 2.5 ml ตามลำดับ ทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
2. ทำการวัดค่าการดูดกลืนโดยใช้เครื่อง UV-VIS สเปกโทรสโกปี ซึ่งทำการวัดที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร

3.5.2 การดูดซับของเมธิลีนบลูบนตัวรองรับ อลูมิเนียมฟอสเฟต

1. เตรียมสารละลายเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1 , 2 , 3 , 4 และ 5 ppm ปริมาตร 50 ml โดยปีเปิดสารละลายมาตรฐานเมธิลีนบลูเข้มข้น 100 ppm มา 0.5 , 1.0 , 1.5 , 2.0 และ 2.5 ml จากนั้นถ่ายสารละลายลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 ml
2. ชั่ง AlPO_4 0.1 กรัม จำนวน 5 ตัวอย่าง ใสลงในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้นต่างๆ ทั้ง 5 ขวด
3. นำขวดรูปชมพู่ที่มี AlPO_4 และ สารละลายเมธิลีนบลู เขย่าบนเครื่องเขย่าเป็นเวลา 45 นาที
4. นำสารละลายในขวดรูปชมพู่มากรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดันเพื่อแยก AlPO_4 ออก
5. นำสารละลายที่ได้จากแต่ละขวดมาทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้เครื่อง UV-VIS สเปกโทรสโกปี ซึ่งทำการวัดที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การเตรียมสารอลูมิเนียมฟอสเฟต

จากโครงงานวิจัยได้ทำการสังเคราะห์ AlPO_4 ด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่าย โดยใช้อลูมิเนียมคลอไรด์ และ อลูมิเนียมไนเตรท เป็นสารตั้งต้นในการตะกอนร่วมกับกรดฟอสฟอริก 1 โมลและใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในการปรับค่า pH ให้มีค่าเท่ากับ 7 ในสภาวะที่อุณหภูมิห้องล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำปราศจากไอออนเพื่อปรับค่า pH ให้เท่ากับน้ำที่ใช้ล้าง ตะกอนที่ได้นำไปผ่านการอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และเผาที่ 650 องศาเซลเซียสเป็นลำดับถัดไป ดังปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังตาราง



และ



ในการสังเคราะห์อลูมิเนียมฟอสเฟตสามารถสรุปน้ำหนักของสารที่ได้จากทางทฤษฎี และน้ำหนักของสารที่ได้จากการทดลองโดยสามารถคำนวณเป็นร้อยละผลิตภัณฑ์ดัง ตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ร้อยละผลิตภัณฑ์ของ $\text{AlPO}_4 \cdot 2.4\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{AlPO}_4 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$ ที่ได้จากการสังเคราะห์ของสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน

สารตั้งต้น	น้ำหนักสารตั้งต้น (g)	น้ำหนักสารที่ได้จากทางทฤษฎี (g)	น้ำหนักสารที่ได้จากการทดลอง (g)	ร้อยละผลิตภัณฑ์
AlCl_3	24.1500	16.515	14.36	86.9512
$\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	37.5010	17.235	12.97	75.2538

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ร้อยละผลิตภัณฑ์ของ $\text{AlPO}_4 \cdot 2.4\text{H}_2\text{O}$ ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วย AlCl_3 และ $\text{AlPO}_4 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$ ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วย $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ ร้อยละผลิตภัณฑ์เท่ากับ 86.9512 และ 75.2538 ตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจากขั้นตอนในการทดลองที่ส่งผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์ได้น้อยกว่าทางทฤษฎี ซึ่งในขั้นตอนการล้างตะกอนโดยใช้น้ำปราศจากไอออน และได้ทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าให้ใกล้เคียงกับค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออน จากขั้นตอนที่กล่าวมานั้นทำให้เกิดการสูญเสียสารผลิตภัณฑ์ไป และนอกจากนั้นการควบคุมอุณหภูมิ และ ค่าความเป็นกรด-ด่างก็มีส่งผลต่างร้อยละผลิตภัณฑ์อีกด้วย

ตารางที่ 4.2 ร้อยละผลิตภัณฑ์ของ AlPO_4 ที่ได้จากการสังเคราะห์ของสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน

สารตั้งต้น	น้ำหนักก่อนเผา (g)	น้ำหนักหลังเผา (g)	น้ำหนักสารทางทฤษฎี (g)	ร้อยละผลิตภัณฑ์
AlCl_3	9.224	7.229	6.8112	106.1340
$\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	4.914	3.679	3.4770	105.8096

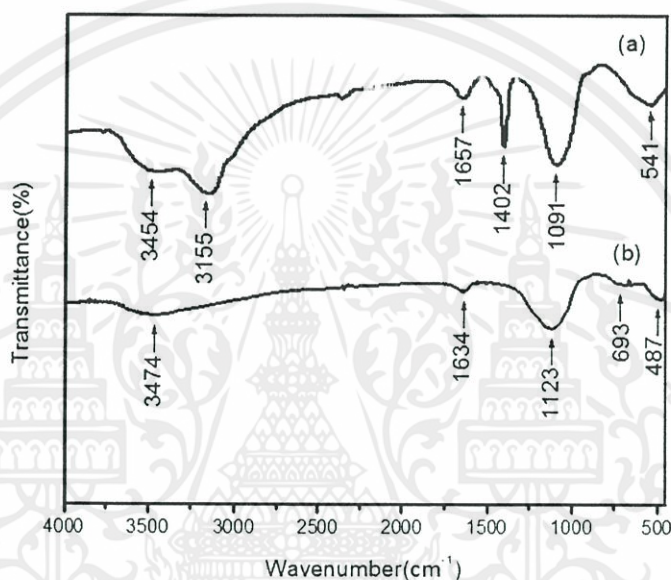
จากตารางที่ 4.2 พบว่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของ AlPO_4 ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วย AlCl_3 และ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ มีร้อยละผลิตภัณฑ์เท่ากับ 106.1340 และ 105.8096 ตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจากสาร AlPO_4 สามารถดูดซับความชื้นภายในอากาศได้ จึงทำให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่ามากกว่าที่ได้จากทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของสาร

4.2.1 ผลการตรวจสอบจากการตรวจวัดการสั่นแบบอินฟราเรด

รูปแบบการสั่นแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือรูปแบบการสั่นพื้นฐานของโมเลกุลน้ำในโครงผลึก และรูปแบบการสั่นพื้นฐานของอโทฟอสเฟสแอนไอออน

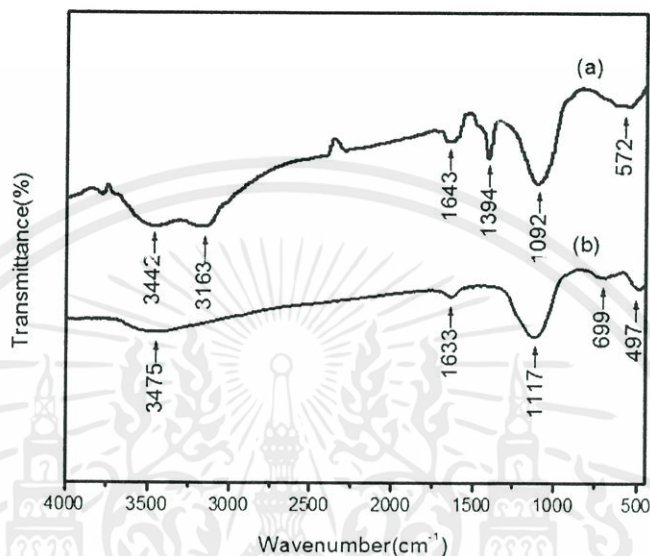


รูปที่ 4.1 สเปกตรา FT-IR ของอลูมิเนียมฟอสเฟสซึ่งได้จากสารตั้งต้น AlCl_3 (a) ก่อนเผา (b) หลังเผา

จากรูปที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบแถบการสั่นของ AlPO_4 ที่ได้จากสารตั้งต้น AlCl_3 ทั้งก่อนเผา และหลังเผา พบแถบการสั่นของน้ำที่มีเลขคลื่น 3454 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดหดแบบอสมมาตรของโมเลกุลน้ำ เลขคลื่น 3155 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตรของโมเลกุลน้ำ และที่เลขคลื่น 1657 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบโค้งงอของโมเลกุลน้ำ ซึ่งแถบการสั่นของโมเลกุลน้ำจะพบควรที่จะพบในช่วงก่อนเผาเท่านั้น แต่ที่พบแถบการสั่นในช่วงหลังเผาดังนั้นเนื่องจากมีความชื้นเกิดขึ้น นอกจากนั้นยังพบแถบการสั่นของ PO_3 ที่ปรากฏทั้งก่อนเผาและหลังเผา โดยมีเลขคลื่น 1402 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดหดของ PO เลขคลื่นต่อมา 1091 cm^{-1} ก่อนเผา และ 1123 cm^{-1} หลังเผา เป็นการสั่นแบบยืดหดของ PO_2 นอกจากนั้นยังมีที่เลขคลื่น 541 cm^{-1} ก่อนเผา และ 487 cm^{-1} หลังเผา เป็นการสั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบโค้งงอของ PO_3 และเป็นการสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตรของ AIOIP ซึ่งเป็นแถบการสั่นที่สำคัญต่อการยืนยันได้ว่าสารที่สังเคราะห์ได้นั้นเป็น $\text{AlPO}_4 \cdot 2.4\text{H}_2\text{O}$ และ AlPO_4



รูปที่ 4.2 สเปกตร้า FT-IR ของอลูมิเนียมฟอสเฟตซึ่งได้จากสารตั้งต้น $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$
(a) ก่อนเผา (b) หลังเผา

จากรูปที่ 4.2 เป็นการเปรียบเทียบแถบการสั่นของ AlPO_4 ที่ได้จากสารตั้งต้น $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ ทั้งก่อนเผาและหลังเผา พบแถบการสั่นของน้ำที่มีเลขคลื่น 3442 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตรของโมเลกุลน้ำ เลขคลื่น 3163 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตรของโมเลกุลน้ำ และที่เลขคลื่น 1643 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบโค้งงอของโมเลกุลน้ำ ซึ่งแถบการสั่นของโมเลกุลน้ำจะพบควรที่จะพบในช่วงก่อนเผาเท่านั้น แต่ที่พบแถบการสั่นในช่วงหลังเผาดังนั้นเนื่องจากมีความชื้นเกิดขึ้น นอกจากนั้นยังพบแถบการสั่นของ PO_3 ที่ปรากฏทั้งก่อนเผาและหลังเผา โดยมีเลขคลื่น 1394 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดหดของ PO เลขคลื่นต่อมา 1092 cm^{-1} ก่อนเผา และ 1117 cm^{-1} หลังเผา เป็นการสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตรของ PO_4 นอกจากนั้นยังมีที่เลขคลื่น 572 cm^{-1} ก่อนเผา และ 497 cm^{-1} หลังเผา เป็นการสั่นแบบโค้งงอของ PO_3 และเป็นการสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตรของ AIOIP ซึ่งเป็นแถบการสั่นที่สำคัญต่อการยืนยันได้ว่าสารที่สังเคราะห์ได้นั้นเป็น $\text{AlPO}_4 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$ และ AlPO_4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากรูปที่ 4.1 และ 4.2 สามารถอธิบายแถบการสั่นและการจำแนกรูปแบบการสั่นของ AlPO_4 ได้ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 [27]

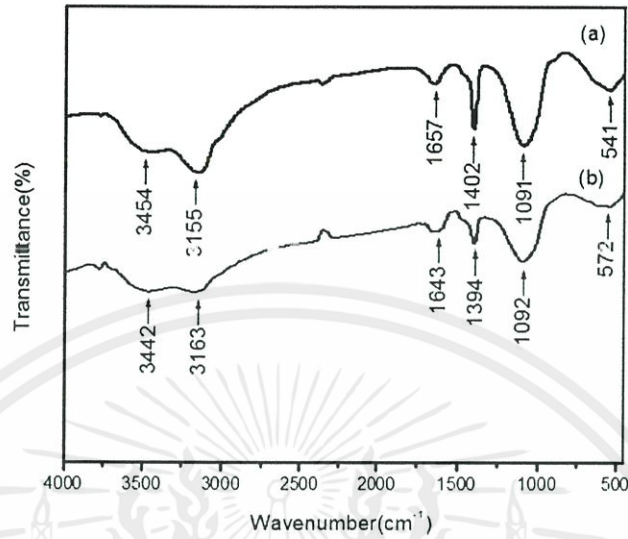
ตารางที่ 4.3 แถบการสั่นและการจำแนกรูปแบบการสั่นของสาร $\text{AlPO}_4 \cdot 2.4\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{AlPO}_4 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$ ก่อนเผาซึ่งได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน

แถบการสั่น		Assignment
$\text{AlPO}_4 \cdot 2.4\text{H}_2\text{O}$ ที่ได้จาก AlCl_3	$\text{AlPO}_4 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$ ที่ได้จาก $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	
3454	3442	การสั่นแบบยืดหดแบบอสมมาตรของโมเลกุลน้ำ
3155	3163	การสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตรของโมเลกุลน้ำ
1657	1643	การสั่นแบบโค้งงอของโมเลกุลน้ำ
1402	1394	การสั่นแบบยืดหดของ PO
1091	1092	การสั่นแบบยืดหดของ PO_2
541	572	การสั่นแบบโค้งงอของ PO_3 และ การสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตรของ AIOP

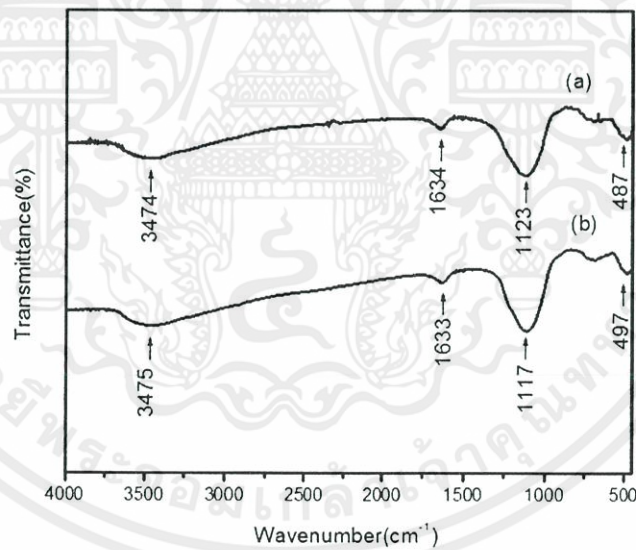
ตารางที่ 4.4 แถบการสั่นและการจำแนกรูปแบบการสั่นของสาร AlPO_4 หลังเผาซึ่งได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน

แถบการสั่น		Assignment
AlPO_4 ที่ได้จาก AlCl_3	AlPO_4 ที่ได้จาก $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	
3474	3475	การสั่นแบบยืดหดแบบอสมมาตรของโมเลกุลน้ำ
1634	1633	การสั่นแบบโค้งงอของโมเลกุลน้ำ
1123	1117	การสั่นแบบยืดหดแบบอสมมาตรของ PO_4
693	699	การสั่นแบบโค้งงอของ PO_3 และ การสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตรของ AIOP
487	497	การสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตรของ AIOP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 สเปกตรัม FT-IR ของอลูมิเนียมฟอสเฟตก่อนเผาซึ่งได้จากสารตั้งต้น (a) AlCl_3 (b) $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$

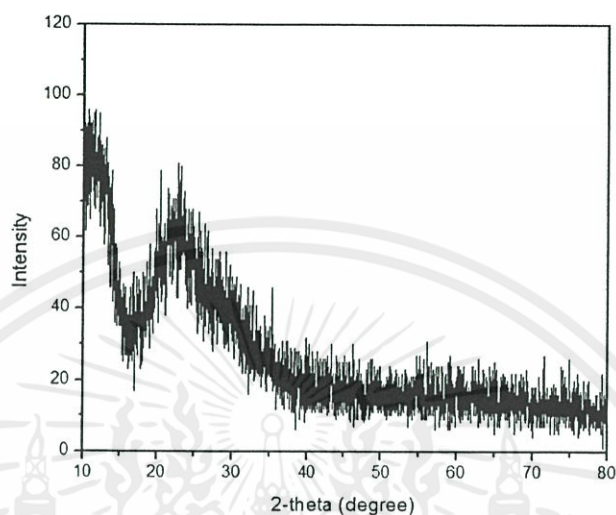


รูปที่ 4.4 สเปกตรัม FT-IR ของอลูมิเนียมฟอสเฟตหลังเผาซึ่งได้จากสารตั้งต้น (a) AlCl_3 (b) $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$

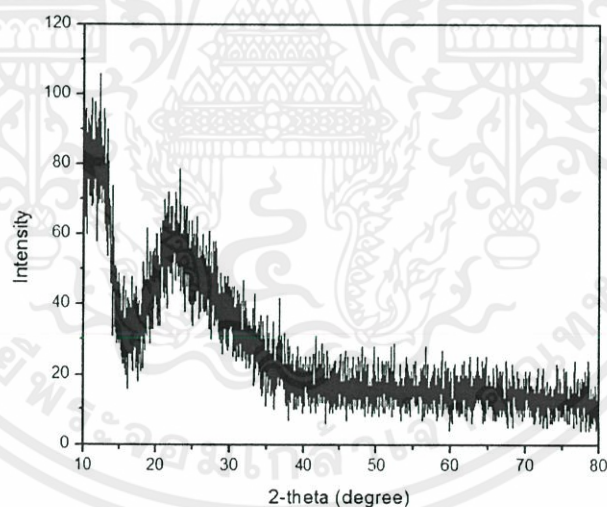
จากรูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า AlPO_4 ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วย AlCl_3 และ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ ปรากฏแถบการสั่นที่คล้ายกันซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าสารที่สังเคราะห์ได้จากสารตั้งต้นที่แตกต่างกันนั้นเป็น AlPO_4 เหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การตรวจสอบจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 4.5 รูปแบบ XRD ของ AlPO_4 หลังเผาซึ่งได้จากสารตั้งต้น AlCl_3



รูปที่ 4.6 รูปแบบ XRD ของ AlPO_4 หลังเผาซึ่งได้จากสารตั้งต้น $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่ารูปแบบ XRD ของ AlPO_4 ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้สารตั้งต้นที่แตกต่างกัน มีลักษณะของพีคที่คล้ายกัน ค่าความเข้มต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเตรียม AlPO_4 ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมนั้นมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอสัณฐานทั้งหมด [19]

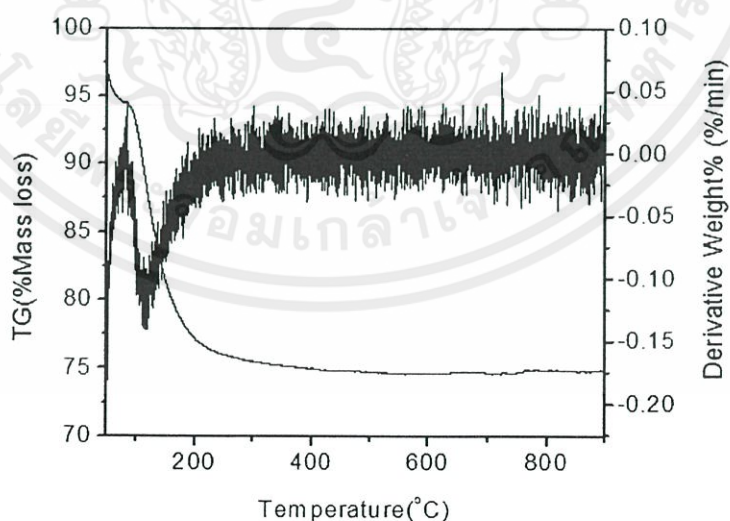
เอกสารนี้เป็นเอกสารผลงานวิจัยที่รับทุนวิจัยเงินเพื่อการศึกษาเพื่อพัฒนาเมืองผู้ให้ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การตรวจสอบการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยสมบัติทางความร้อน

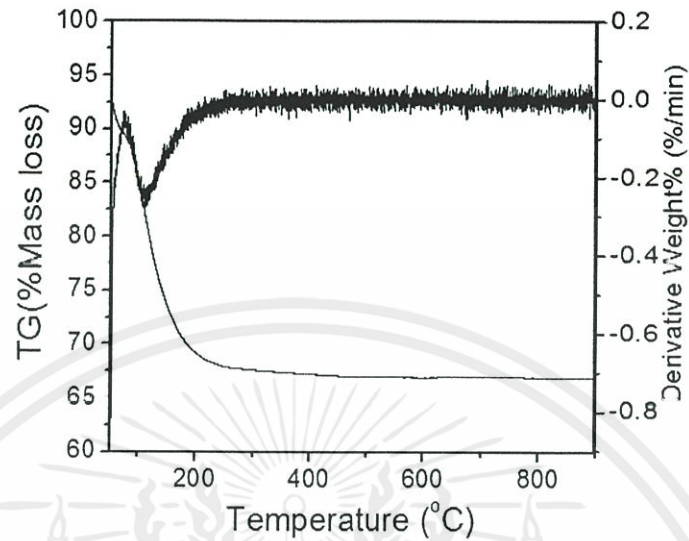
ตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลโดยสรุปที่ได้จากเทคนิค TGA ของ $\text{AlPO}_4 \cdot 2.4\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{AlPO}_4 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$ ที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ $10.0 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$

$\text{AlPO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	ขั้นตอนการสลายตัว	ปริมาณการสลายตัว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
		ขั้นที่ 1 600 – 700 $^\circ\text{C}$	ขั้นที่ 2
$\text{AlPO}_4 \cdot 2.4\text{H}_2\text{O}$ ที่ได้จาก AlCl_3	1	23.22	-
$\text{AlPO}_4 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$ ที่ได้จาก $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	1	29.63	-

ขั้นตอนการสลายตัวสามารถแสดงการสลายตัว ดังสมการ

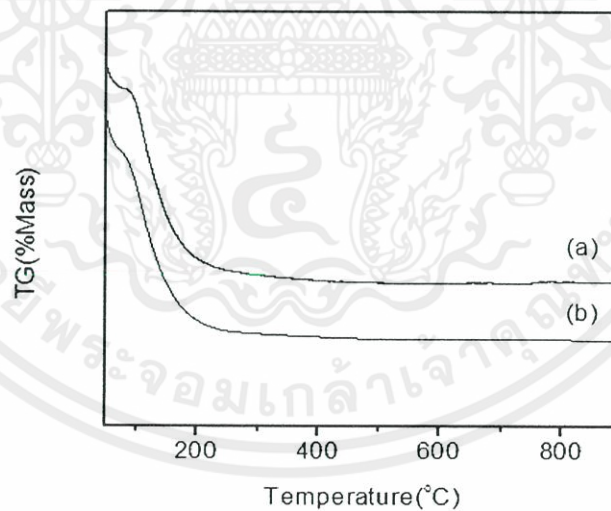


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครูอาจารย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.7 เทอร์โมแกรม TGA ของ $\text{AlPO}_4 \cdot 2.4\text{H}_2\text{O}$ ที่สังเคราะห์ได้จาก AlCl_3
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 เทอร์โมแกรม TGA ของ $\text{AlPO}_4 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$ ที่สังเคราะห์ได้จาก $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่า ใช้ขั้นตอนการสลายตัวทางความร้อนใน 2 ช่วง และอุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัว คือ $50 - 100^\circ\text{C}$ และ $100 - 300^\circ\text{C}$ ตามลำดับ

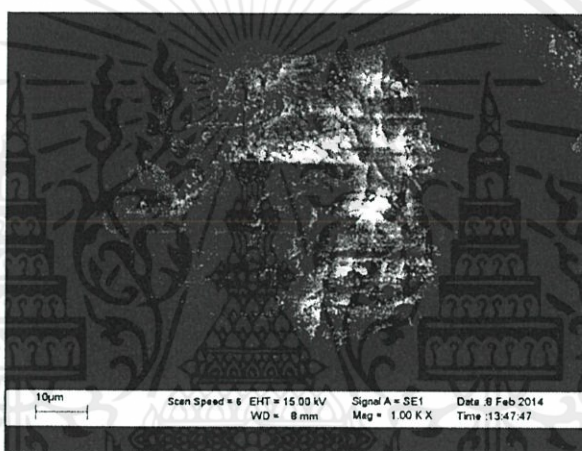


รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบเทอร์โมแกรม TGA ระหว่าง (a) $\text{AlPO}_4 \cdot 2.4\text{H}_2\text{O}$ และ (b) $\text{AlPO}_4 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.9 พบว่า AlPO_4 ที่สังเคราะห์ได้จากสารตั้งต้นที่แตกต่างกันมีพฤติกรรมทางความร้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ ใช้อ้างอิง การค้า และกลไกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมีลักษณะที่คล้ายกัน กล่าวคือสาร $\text{AlPO}_4 \cdot 2.4\text{H}_2\text{O}$ ที่ได้จาก AlCl_3 ไม่ว่าจะผลิตได้จากวิธีใดก็ตาม มีพฤติกรรมที่คล้ายกัน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ $\text{AlPO}_4 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$ ที่ได้จาก $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 50 - 100°C มีการสูญเสียน้ำหนักประมาณร้อยละ 8.8 โดยน้ำหนัก และ 19 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากการสูญเสียน้ำที่มาจากความชื้นที่อยู่ภายในรูพรุน และ ช่วงที่ 2 เกิดที่อุณหภูมิ 100 - 300°C มีการสูญเสียน้ำหนักประมาณร้อยละ 13.8 โดยน้ำหนัก และ 12.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เป็นการสูญเสียน้ำหนักของน้ำที่เป็นจุดภายในผลึก ซึ่งเมื่อคำนวณจำนวนโมลของน้ำ พบว่า จำนวนโมลของน้ำที่ได้จาก AlCl_3 และ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ มีค่าเท่า 2.4 และ 2.8 ตามลำดับ [29]

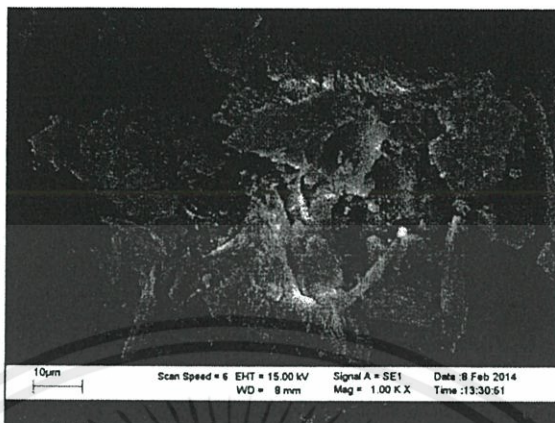
4.2.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของสารในระดับจุลภาค



รูปที่ 4.10 สัณฐานวิทยา SEM ของอนุพันธ์ทางความร้อน AlPO_4 ที่ได้จากสารตั้งต้น AlCl_3 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

รูปร่างสัณฐานวิทยาของอนุพันธ์ทางความร้อนของอลูมิเนียมฟอสเฟตในรูปที่ 4.10 มีรูปร่างของอนุภาคที่แตกต่างกันเนื่องจากการสลายตัวทางความร้อน โดยมีรูปร่างลักษณะเป็นกลุ่มก้อนไม่เท่ากันและมีรูปร่างรูปทรงที่ไม่แน่นอน มีขนาดที่เล็กใหญ่สลับกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และเมื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของ AlPO_4 จะเห็นพื้นที่ผิวมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็ก จึงมีความเหมาะสมที่จะดูดซับสารละลายเมธิลีนบลูได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยา SEM ของอนุพันธ์ทางความร้อน AlPO_4 ที่ได้จากสารตั้งต้น $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

รูปร่างสัณฐานวิทยาของอนุพันธ์ทางความร้อนของอลูมิเนียมฟอสเฟสในรูปที่ 4.11 มีรูปร่างของอนุภาคที่แตกต่างกันเนื่องจากการสลายตัวทางความร้อน โดยมีรูปร่างลักษณะเป็นแผ่นหนาบางไม่เท่ากันและมีรูปร่างรูปทรงที่ไม่แน่นอน มีขนาดที่เล็กใหญ่สลับกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และเมื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของ AlPO_4 จะเห็นพื้นที่ผิวมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็ก จึงมีความเหมาะสมที่จะดูดซับสารละลายเมธิลินบลูได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับเมธิลีนบลู

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของเมธิลีนบลูโดย AlPO_4 เป็นตัวดูดซับเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการดูดซับทำการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q$ กับ $1/C_e$ สำหรับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ สำหรับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช ค่าตัวแปรต่างๆที่นำมาใช้ แสดงดังตารางที่ 4.6 และ 4.7

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลจากการคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับเมธิลีนบลูบน AlPO_4 ที่ได้จากการตั้งต้น AlCl_3

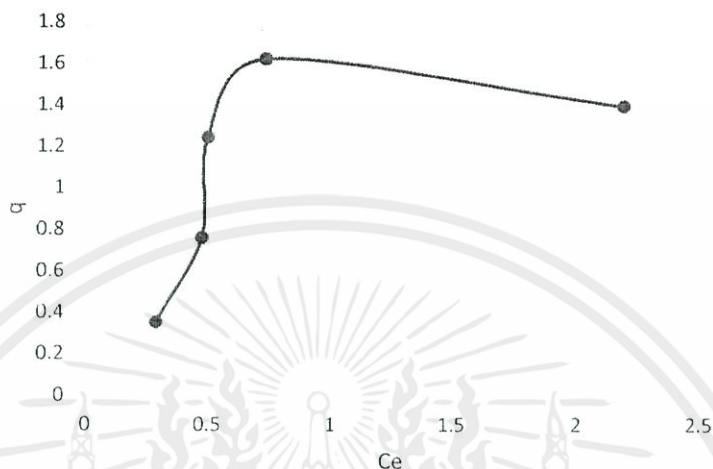
ความเข้มข้น ก่อนดูดซับ ; C_0 (ppm)	ความเข้มข้น หลังดูดซับ ; C_e (ppm)	ความสามารถ ในการดูดซับ ; q (mg/g)	$1/C_e$	$1/q$	$\log C_e$	$\log q$
1	0.2875	0.3524	3.4783	2.8377	-0.5414	-0.4530
2	0.4753	0.7593	2.1039	1.3170	-0.3230	-0.1196
3	0.4978	1.2449	2.0088	0.8033	-0.3030	0.0951
4	0.7337	1.6234	1.3630	0.6160	-0.1345	0.2104
5	2.1870	1.3981	0.4572	0.7153	0.3398	0.1455

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลจากการคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับเมธิลีนบลูบน AlPO_4 ที่ได้จากการตั้งต้น $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$

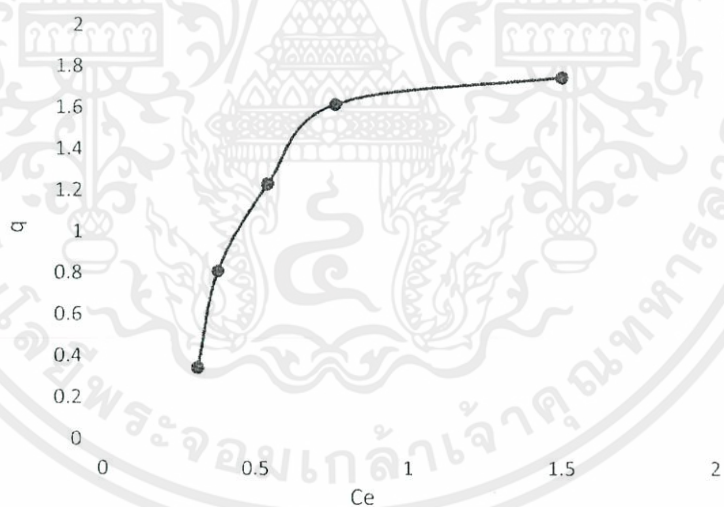
ความเข้มข้น ก่อนดูดซับ ; C_0 (ppm)	ความเข้มข้น หลังดูดซับ ; C_e (ppm)	ความสามารถ ในการดูดซับ ; q (mg/g)	$1/C_e$	$1/q$	$\log C_e$	$\log q_e$
1	0.3110	0.3431	3.2154	2.9146	-0.5072	-0.4646
2	0.3746	0.8111	2.6695	1.2329	-0.4264	-0.0910
3	0.5368	1.2316	1.8629	0.8120	-0.2702	0.0905
4	0.7567	1.6184	1.3215	0.6179	-0.1211	0.2091
5	1.4972	1.7497	0.6679	0.5715	0.1753	0.2430

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากข้อมูลดังตารางที่ 4.6 และ 4.7 สามารถนำมาสร้างกราฟไอโซเทอมได้ดังนี้



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q กับ C_e ของอลูมิเนียมฟอสเฟตที่ได้จากสารตั้งต้น $AlCl_3$

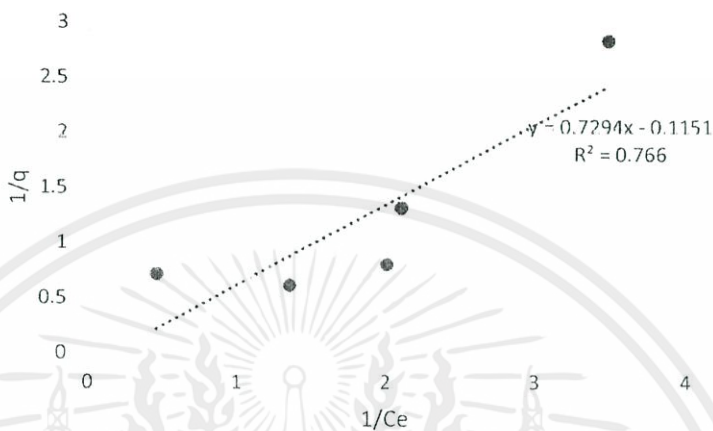


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q กับ C_e ของอลูมิเนียมฟอสเฟตที่ได้จากสารตั้งต้น $Al(NO_3)_3$

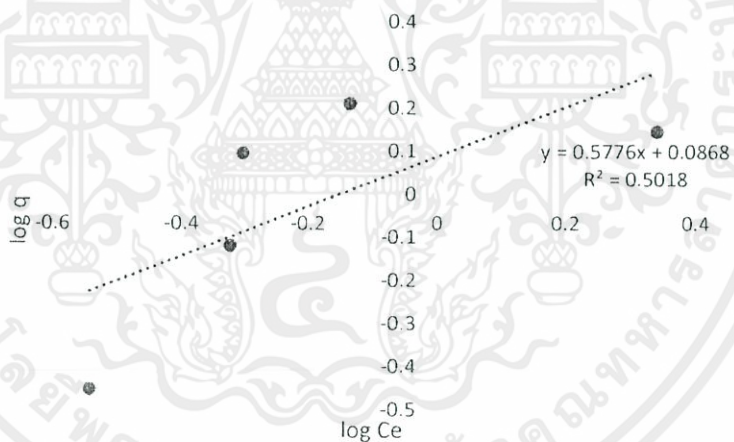
จากรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่า กราฟในช่วงแรกนั้นมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

เนื่องจากว่า $AlPO_4$ ในช่วงแรกมีปริมาณรูพรุนสูงซึ่งมีความสามารถในการดูดซับได้เป็นจำนวนมาก ส่วน
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงหลังพบว่ากราฟมีลักษณะที่เริ่มคงที่ เนื่องจากว่า AlPO_4 เริ่มดูดซับเมธิลีนบลูจนจะเต็มรูพรุนแล้ว จึงทำให้เมธิลีนบลูที่เหลืออยู่นั้นถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้ยากขึ้น

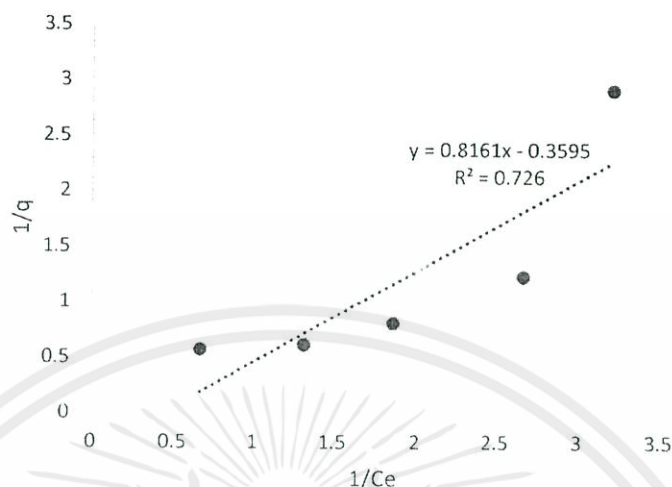


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q$ กับ $1/C_e$ ของ AlPO_4 ที่ได้จากสารตั้งต้น AlCl_3

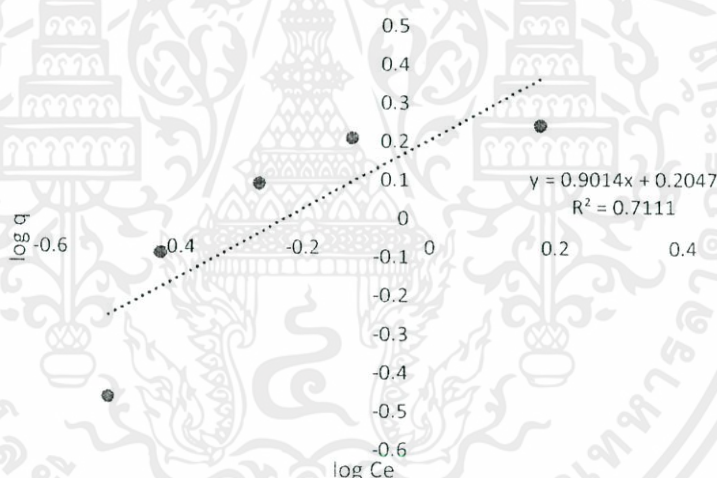


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ กับ $\log C_e$ ของ AlPO_4 ที่ได้จากสารตั้งต้น AlCl_3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q$ กับ $1/C_e$ ของ $AIPO_4$ ที่ได้จากสารตั้งต้น $Al(NO_3)_3$



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ กับ $\log C_e$ ของ $AIPO_4$ ที่ได้จากสารตั้งต้น $Al(NO_3)_3$

จากรูปที่ 4.14 และ 4.16 เป็นกราฟไอโซเทอมตามแบบจำลองของแลงเมียร์ และ จากรูปที่ 4.15 และ 4.17 เป็นกราฟไอโซเทอมตามแบบจำลองของฟรุนดลิช ซึ่งสามารถวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับ ได้ดังตารางที่ 4.8 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับ AlPO_4 ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วย AlCl_3 และ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$

AlPO_4	แลงเมียร์			ฟรุนดลิช		
	R^2	K_L	q_m (mg/g)	R^2	K_F	$1/n$
AlCl_3	0.7294	0.1578	8.6881	0.5018	1.2212	0.5776
$\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	0.7260	0.4405	2.7816	0.7111	1.6021	1.6164

ในโครงการวิจัยได้นำผลการทดลองจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่สภาวะสมดุลมาทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการดูดซับด้วยสมมติฐานแบบจำลองการดูดซับที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ และแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดลิช ซึ่งความน่าเชื่อถือของการดูดซับจะมีมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination : R^2) โดยค่าต่ำสุด ที่ 0 แสดงว่ามีความน่าเชื่อถือน้อยที่สุด และมีค่าสูงสุด เท่ากับ 1 แสดงว่ามีความน่าเชื่อถือมากที่สุด [28]

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ตามสมมติฐานของสมการแลงเมียร์ และฟรุนดลิช ซึ่งแสดงข้อมูลดังตารางที่ 4.8 พบว่า การดูดซับของ AlPO_4 ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วย AlCl_3 และ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ มีความสอดคล้องตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์มากกว่าแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดลิช ดังนั้นสามารถอธิบายได้ว่า การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว และมีกลไกการดูดซับที่เหมือนกัน คือ มีพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด มีการกระจายตัวของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับอย่างทั่วถึงและไม่มีแรงกระทำระหว่างตัวถูกดูดซับที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับ จากผลการทดลองค่า R^2 ที่ได้นั้นมีค่าไม่เข้าใกล้ 1 เนื่องจากว่า AlPO_4 ที่นำมาใช้ในการดูดซับนั้นมีการดูดซับความชื้นจากภายนอก จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับเมธิลีนบลูลดลง และสามารถสรุปสมการของแลงเมียร์ได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 สมการแลงเมียร์ของ AlPO_4

แลงเมียร์	AlPO_4	
	AlCl_3	$\text{Al}(\text{NO}_3)_3$
สมการแลงเมียร์	$q = 1.3710\text{Ce}/1+0.1578\text{Ce}$	$q = 1.2253\text{Ce}/1+0.4405\text{Ce}$

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการดูดซับของ AlPO_4 ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน

ความเข้มข้นเมธิลีนบลู ช่วงเริ่มต้น (ppm)	ร้อยละการดูดซับของ AlPO_4 ที่ได้จาก AlCl_3 (%)	ร้อยละการดูดซับของ AlPO_4 ที่ได้จาก $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ (%)
1	71.25	68.90
2	76.24	81.27
3	83.41	82.11
4	81.66	81.08
5	56.26	70.06

จากตารางที่ 4.10 เมื่อทำการเฉลี่ยร้อยละการดูดซับของ AlPO_4 ที่ได้จาก AlCl_3 มีค่าเท่ากับ 73.76 % และที่ได้จาก $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ มีค่าเท่ากับ 76.68 % จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับของ AlPO_4 ที่ได้จากสารตั้งต้นทั้งสองตัวมีค่าที่แตกต่างกันอยู่ 2.92 % แต่ถึงอย่างไรก็ตามจากค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับของ AlPO_4 นั้นมีค่าที่สูงมากซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในการดูดซับที่สูงมากตัวหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปการสังเคราะห์ออลูมิเนียมฟอสเฟต

จากการศึกษาการสังเคราะห์ AlPO_4 โดยใช้สารตั้งต้นสองตัว คือ $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งใช้แหล่งโลหะฟอสเฟตตัวเดียวกันคือ H_3PO_4 ที่ใช้เป็นตัวกลางทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น และใช้สารละลายแอมโมเนีย 30% เป็นตัวปรับค่า pH ให้เท่ากับ 7 ในสภาวะอุณหภูมิห้อง ซึ่งเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จากนั้นนำสารที่สังเคราะห์ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้ได้เป็น AlPO_4 ผลการสังเคราะห์ที่ได้พบว่า ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์เฉลี่ยของ AlPO_4 ที่ได้จากสารตั้งต้น AlCl_3 และ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ เท่ากับ 106.1340 และ 105.8096 ตามลำดับ

5.2 สรุปผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของออลูมิเนียมฟอสเฟต

จากการวิเคราะห์ตรวจสอบเอกลักษณ์โดยเทคนิค XRD และ FT-IR สามารถยืนยันได้ว่าสารที่สังเคราะห์ได้นั้นเป็น AlPO_4 ซึ่งได้จากการสังเคราะห์ด้วย AlCl_3 และ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ โดย AlPO_4 ที่ได้มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบออสถึฐาน อุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวทางความร้อน คือ ช่วงอุณหภูมิ 100 - 300°C และเมื่อทำการวิเคราะห์เอกลักษณ์โดยเทคนิค SEM พบว่า AlPO_4 มีลักษณะการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน มีแบบแผนไม่ซ้ำกัน และพื้นที่ผิวมีลักษณะขรุขระและมีรูพรุนขนาดเล็ก

5.3 ผลการศึกษาการดูดซับเมธิลีนบลูบนออลูมิเนียมฟอสเฟต

จากการศึกษาประสิทธิภาพ AlPO_4 ในการดูดซับสารละลายเมธิลีนบลู ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน ได้แก่ AlCl_3 และ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ ใช้เวลาในการดูดซับเป็นเวลา 45 นาที ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง โดยศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสามารถสรุปได้ว่า สาร AlPO_4 ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วย AlCl_3 และ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ มีพฤติกรรมการดูดซับสารละลายเมธิลีนบลูเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว กล่าวคือ มีการดูดซับเป็นไปตามสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ โดยมีสมการการดูดซับของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แลงเมียร์โดยแสดง $q = 1.3710Ce/1+0.1578Ce$ และ $q = 1.2253Ce/1+0.4405Ce$ ซึ่งเป็นสมการของสาร $AlPO_4$ ที่ได้จาก $AlCl_3$ และ $Al(NO_3)_3$ ตามลำดับ

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 นอกจากศึกษาปัจจัยทางด้านความเข้มข้นของสารละลายเมธิลีนบลูแล้ว ควรศึกษาถึงปัจจัยในเรื่องระยะเวลาการดูดซับ อัตราเร็วในการปั่นกววน ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ และอุณหภูมิในการดูดซับด้วย เพราะปัจจัยด้านความเข้มข้นเป็นเพียงปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับ

5.4.2 เนื่องจากสถานะน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ไม่ได้มีการปนเปื้อนเฉพาะสีข้อมเท่านั้น ดังนั้นควรนำ $AlPO_4$ ไปทดลองดูดซับสารปนเปื้อนอื่นๆ เช่น น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก

5.4.3 เพื่อให้การดูดซับมีประสิทธิภาพสูงนั้นก่อนที่จะทำการดูดซับนั้นควรที่จะนำเอา $AlPO_4$ ที่ใช้ในการดูดซับนั้นทำการอบเพื่อไล่ความชื้นที่อยู่ภายในรูพรุน จะทำให้การดูดซับนั้นดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] อัญชลี เลิศสงคราม. 2554. การดูดซับโลหะหนักด้วยวิธีทางชีวภาพ. วรสารองค์การเกษตรกรรม. 18(3), 17-18.
- [2] ชญานิศ ปานทอง และ อนุสรรา พุ่มมั้น. 2555. การสังเคราะห์และตรวจสอบเอกลักษณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาอลูมิเนียมฟอสเฟต.วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] Ren, H. and Xin, F. 2006. In situ calcinations of precursors of mesoporous AlPO_4 and application of mesoporous Mn- AlPO_4 . Catalysis Communications. 7, 848–854.
- [4] [Online].Available : www.chemtrack.org/HazMap-Agent-Info.asp?ID=1005
- [5] [Online].Available : www.vcharkarn.com/vcafe/43097
- [6] [Online].Available : www.merckmillipore.com/thailand/life-science-research/methylene-blue/EMD_BIO-457250/thai/p_IsOb.s1LKvcAAAEWw2EfVhTm
- [7] Rether, A. and Sclective, M. 2003. Separation and recovery of heavy metal ions using water soluble N-benzoylthiourea modified PAMAM polymers. Reactive & Functional Polymers. 57, 13-21.
- [8] [Online].Available : <http://www.siamglobe.com/rescenter/ecommerce.php?id=1211&rid=0011>
- [9] เกียรติศักดิ์ อุดมศิลป์โรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : มิตรนราการพิมพ์
- [10] Jia, K., Pan, B., Zhang, Q., Zhang, W., Jiang, P., Hong, C., Pan, B. and Zhang, Q. 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าวิจัยเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำข้อมูลไปใช้

- [11] ชัยยศ ตั้งสติกัลกุลชัย. 2554.กระบวนการดูดซับสาร. พิมพ์ครั้งที่ 1. นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [12] Cooney, D.O. 1999. Adsorption Design for Wastewater Treatment. Lewis Publishers. 1.
- [13] Lertijamrant, k., Prasertdam, P., Arai, M. and Panpranot, J. 2010. Modification of acid properties and catalytic properties of AlPO₄ by hydrothermal pretreatment for methanol dehydration to dimethyl ether. Applied Catalysis. 379, 119-123.
- [14] Murayama, E., Arimura, K., Okajima, K., and Shibata, J. 2009. Effect of structure-directing agent on AlPO₄-n synthesis from aluminium dross. Int.J. Miner. Process. 93, 110-114.
- [15] Brinker, C.J. and Scherer, G.W. 1990. Sol-Gel: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing. California : Academic Press
- [16] El-Hakam, S.A., El-Khouly, A.A. and Khder A.S. 1999. Effect of thermal treatment on various characteristics of nikel/aluminium phosphate catalysts. Applied Catalysis A: General. 185, 247-257.
- [17] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2551. พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [18] รศ. ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์ และ ดร.ณัฐวิภา เจริญชัย. 2555. ปฏิบัติการประยุกต์ใช้เครื่องมือเคมีวิเคราะห์. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [19] Kumar, V.S., Padmasri, A.H., C.V.V. Satyanarayana., Reddy, I.A.K., Raju, B.D. and K.S. Rama Rao. 2006. Nature and mode of addition of phosphate precursor in the synthesis of aluminum phosphate and its influence on methanol dehydration

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์. ห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต. ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [20] [online].Available :
www.elecnet.chandra.ac.th/courses/ELEC2101/termwork/xrd/index.html
- [21] [online].Available : www.mne.eng.psu.ac.th/staff/lek_files/ceramic/u910-4.htm
- [22] [online].Available : www.rmutphysics.com/charud/oldnews/192/SEM.pdf
- [23] แก้ว อรรถสิทธิ์. 2553. *Principles and Techniques of Instrumental Analysis*. พิมพ์ครั้งที่ 1.
 กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ชวนพิมพ์
- [24] มานิตย์ ดวงเพ็ญมาตว , สุขลณี เนรมิตตกพงษ์ และ อาทิตย์ เนรมิตตกพงษ์. 2554. การ
 เปลี่ยน เมทานอลเป็นไดเมทิลอีเทอร์บนตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะฟอสเฟต. การ
 ประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย
- [25] Kannan, C., Muthuraja, K., and Devi, M. R.(2013).Hazardous dye removal from aqueous
 solution over mesoporous alumiophosphate with textural porosity by adsorption.
 Hazardous Meterial. 244-245, 10-20.
- [26] Ji, F., Li, C., Tang, B., Xu, J., Lu, G. and Liu, P. 2012. Preparation of cellulose
 acetate/zeolite composite fiber and its adsorption behavior for heavy metal ions
 in aqueous solution. Chemical Engineering Journal. 209, 325-333.
- [27] ชไมพร คัมภีร์ชยา , ภัทรพร สุขสมกิจ และ สุธิยา หมุนมิตร. 2553. การสังเคราะห์และการ
 ตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารทวิโลหะแมกนีเซียม (II) โดบอลต์ (II) ไฮโดรเจน
 ฟอสเฟต ไฮเดรต. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
 เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [28] ปรีชญา ชัยสาร. 2551. การพัฒนาตัวดูดซับเพื่อศึกษาการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยใน
 โรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพารา.วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารนี้เป็น [29] Ren H., and Xin F. 2006. In situ calcinations of precursors of mesoporous AlPO_4 and
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น application of mesoporous Mn- AlPO_4 . Catalysis Communication 7, 848-854.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

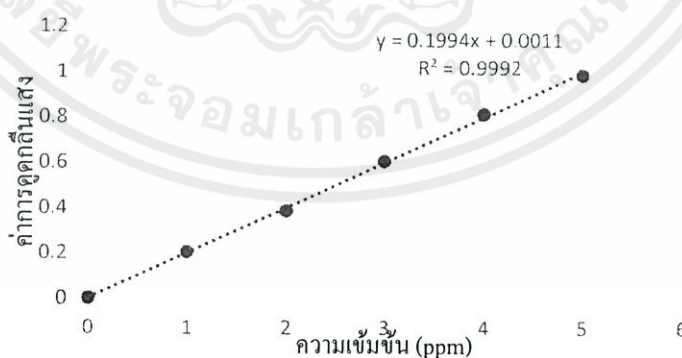
ภาคผนวก ก

การสร้างกราฟมาตรฐาน (Standard Calibration Curve)

1. เตรียมสารละลายเมธิลีนบลู เข้มข้น 100 ppm และทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นโดยใช้ขวดวัดปริมาตร 100 ml
2. นำสารละลายเมธิลีนบลูที่เตรียมได้ทำการเปิดตามความเข้มข้นดังต่อไปนี้ 0.5 , 1 , 1.5 , 2 , 2.5 ml และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
3. นำสารละลายที่เตรียมได้ไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer โดยใช้ความยาวคลื่น 660 nm

ตารางที่ ก1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของเมธิลีนบลู

ความเข้มข้น (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)
1	0.205
2	0.378
3	0.605
4	0.814
5	0.987



รูปที่ ก1 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การคำนวณ

- การคำนวณหาน้ำหนักสารของ $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$

น้ำหนักสาร $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$

$$\frac{g}{MW} = \frac{CV}{1000}$$

เมื่อ g = จำนวนกรัมของสาร
 C = ความเข้มข้นของสาร
 V = ปริมาตรของสาร
 MW = น้ำหนักโมเลกุลของสาร

- การคำนวณหาร้อยละผลผลิตของสาร AlPO_4

$$\text{ร้อยละผลผลิตของสาร} = \frac{\text{ผลผลิตจริง}}{\text{ผลผลิตตามทฤษฎี}} \times 100$$

- การคำนวณหาจำนวน โมลของน้ำด้วยเทคนิค TGA

โดยยกตัวอย่างการคำนวณ AlPO_4 ที่ได้จาก AlCl_3



%Mass loss	97	72	22
------------	----	----	----

M.W.	$121.98 + 18x$	121.98	$18x$
------	----------------	----------	-------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{หา } x \text{ โดย } \frac{97}{121.98+18x} = \frac{72}{121.98}$$

$$\text{จะได้ } x = 2.35$$

ดังนั้นจะได้จำนวนโมลของน้ำ เท่ากับ 2.4 โมล



4. การคำนวณหาความสามารถในการดูดซับ

$$\text{ความสามารถในการดูดซับ} = \frac{[(C_0 - C_e) \times V]}{M}$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นของสารละลายเมธิลินบลูก่อนการดูดซับ (mg/l)

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายเมธิลินบลูหลังการดูดซับ (mg/l)

V = ปริมาตรของสารละลาย (ml)

M = น้ำหนักของสาร (g)

5. การคำนวณค่าประสิทธิภาพการดูดซับ

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับ} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นของสารละลายเมธิลินบลูก่อนการดูดซับ (mg/l)

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายเมธิลินบลูหลังการดูดซับ (mg/l)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลอง

1. น้ำหนักของ AlPO_4 ซึ่งได้จากสารตั้งต้นที่แตกต่างกันนำไปดูค่าเมริสีนบลูที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

ตารางที่ ก1 ตารางแสดงน้ำหนักของ AlPO_4 ที่ใช้ในการดูค่าเมริสีนบลู

ความเข้มข้นของสารละลาย เมริสีนบลู (ppm)	น้ำหนัก AlPO_4 ที่ได้จาก AlCl_3 (g)	น้ำหนัก AlPO_4 ที่ได้จาก $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ (g)
1	0.1011	0.1004
2	0.1004	0.1002
3	0.1005	0.1000
4	0.1006	0.1002
5	0.1006	0.1001

2. ผลการศึกษาการดูค่าของอลูมิเนียมฟอสเฟตแบบฟรอนคลิช

ตารางที่ ก2 ข้อมูลต่างๆที่ได้จากการทดลองใช้ AlPO_4 ที่ได้จากสารตั้งต้น AlCl_3 ในการดูค่าสารละลายเมริสีนบลู โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง

ขวดที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นก่อนดูค่า (ppm)	ความเข้มข้นหลังดูค่า (ppm)	ความสามารถในการดูค่า (mg/g)
1	0.057	1	0.2875	0.3524
2	0.095	2	0.4753	0.7593
3	0.099	3	0.4978	1.2449
4	0.147	4	0.7337	1.6234
5	0.437	5	2.8130	1.3981

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค3 ข้อมูลต่างๆที่ได้จากการทดลองใช้ AlPO_4 ที่ได้จากสารตั้งต้น $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ ในการดูดซับสารละลายเมธิลีนบลู โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง

ขวดที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นก่อนดูดซับ (ppm)	ความเข้มข้นหลังดูดซับ (ppm)	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
1	0.062	1	0.311	0.3431
2	0.075	2	0.3746	0.8111
3	0.107	3	0.5368	1.2316
4	0.151	4	0.7567	1.6184
5	0.299	5	1.4972	1.7497

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้